

Министерство науки и высшего образования РФ  
Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

На правах рукописи



Пашментова Анна Сергеевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС**

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность 2.5.5. Технология и оборудование механической и  
физико-технической обработки (технические науки)

Научный руководитель к.т.н., Канатников Никита Владимирович  
(ученая степень, ученое звание, ФИО)

Орёл, 2022

## Оглавление

Введение.....	5
1 Направления совершенствования процесса обработки венцов зубчатых конических колес.....	14
1.1 Механическая обработка зубчатых конических колес в современном машиностроении.....	14
1.2 Современные методы обработки зубчатых колес .....	27
1.3 Подходы к проблеме изучения физических процессов сопровождающих процесс обработки конструктивно сложных поверхностей деталей.....	31
1.3.1 Подходы к проблеме изучения силы возникающей в процессе съема стружки.....	31
1.3.2 Подходы к проблеме изучения теплового состояния процессов резания .....	33
1.4 Особенности стружкообразования при механической обработке зубчатых колес.....	38
1.5 Робастное планирование эксперимента.....	41
1.6 Прогностическое моделирование процессов механической обработки ...	42
1.7 Выводы по главе.....	46
2 Моделирование процесса механической обработки венца конического зубчатого колеса.....	49
2.1 Кинематика процесса обработки конических зубчатых колес методом обката.....	49
2.2 Общие подходы к прогностическому моделированию процесса резания конического зубчатого колеса .....	51
2.3 Аналитическое моделирование .....	55
2.4 Определение кинематических параметров процесса с помощью математического отображения схемы резания .....	60
2.5 Численное моделирование .....	62
2.6 Алгоритм моделирования процесса обработки конического зубчатого колеса.....	64

2.6.1 Аналитическое моделирование процесса обработки конического зубчатого колеса.....	67
2.6.2 Трехмерное моделирование режущего инструмента и обрабатываемой части заготовки.....	71
2.6.3 Численное моделирование процесса резания .....	73
2.7 Исследование физических процессов, возникающих в инструменте, заготовке и стружке в процессе механической обработки конического зубчатого колеса.....	74
2.8 Теоретический анализ процесса резания .....	76
2.9 Исследование тепловых процессов .....	78
2.10 Исследование возникающих в процессе резания нагрузок .....	85
2.11 Влияние геометрических параметров режущей части инструмента на тепловые процессы, происходящие в нем .....	88
2.12 Прогнозирование практических результатов обработки .....	96
2.12.1 Прогнозирование износа режущего инструмента .....	96
2.12.2 Прогнозирование шероховатости обрабатываемого изделия .....	98
2.12.3 Прогнозирование точности обрабатываемого изделия.....	100
2.13 Разработка алгоритма реализующего прогностическую модель .....	103
2.14 Выводы по главе.....	108
3 Проведение экспериментальных исследований и анализ полученных данных .....	111
3.1 Проведение экспериментальных исследований .....	111
3.2 Анализ экспериментальных данных .....	122
3.3 Выводы по главе.....	129
4 Виртуальные исследования процесса механической обработки венцов конических зубчатых колес.....	131

4.1	Выявление зависимостей, связывающих физические явления сопровождающие процесс резания и геометрические параметры профиля зубьев конического зубчатого колеса .....	131
4.2	Оценка влияния геометрических параметров профиля зубчатого колеса на физические явления сопровождающие процесс резания.....	136
4.2.1	Осевые составляющие силы, возникающей в процессе резания .....	138
4.3	Влияние геометрических параметров режущего лезвия на процесс обработки .....	142
4.4	Выводы по главе.....	144
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ .....	146
	Список использованных источников .....	149
	Приложение А .....	162

## Введение

В настоящее время на машиностроительных предприятиях в России и мире происходит переход к цифровым и интеллектуальным производственным технологиям. «Умное» производство успешно развивается применительно к процессам обработки лезвийным инструментом. Однако темпы внедрения интеллектуальных технологий в производственную практику не удовлетворяют задачам форсированного экономического развития страны. Цифровые технологии внедряются в наиболее распространенные и хорошо изученные технологические процессы (точение, фрезерование). Однако в конструкциях современных машин и механизмов широко применяются детали, рабочие поверхности которых требуют более сложной механической обработки (цилиндрические и конические зубчатые колеса стандартного и специального профиля и другие детали, имеющие сложные периодические поверхности). Такими деталями комплектуются различного рода моментопередающие механизмы, используемые в автомобилях, морских судах, строительных и горных машинах, сельскохозяйственной технике, авиации и других отраслях.

Обработка венцов конических зубчатых колес – одна из наиболее ответственных операций в промышленности, зачастую требующая оптимизации геометрии зубьев колес с целью достижения требуемых эксплуатационных характеристик зубчатой передачи. В таких случаях, рабочую часть режущего инструмента для обработки зубчатых колес необходимо специально проектировать для каждой отдельной зубчатой пары, учитывая конструктивные особенности.

Понимание степени влияния регулируемых конструкторско-технологических параметров системы (геометрии рабочего профиля инструмента и режимов обработки) на физические явления, возникающие в

процессе обработки конических зубчатых колес в инструменте, заготовке и стружке имеет критическое значение для прогнозирования износа инструмента, точности и шероховатости обрабатываемой поверхности.

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. Тем не менее, в справочной и научной литературе либо присутствуют фрагментарно, либо отсутствуют конкретные данные, позволяющие прогнозировать стойкость специального режущего инструмента, точность и качество получаемого зубчатого профиля конических колес.

Известные подходы к моделированию физических процессов можно разделить на аналитические, с применением метода краевых задач, и численные.

Применение моделей, строящихся на аналитических методах, позволяет получить обобщенные решения для тел простой формы с учетом ряда упрощений, что позволяет решать, как двух-, так и трехмерные задачи.

Численные методы позволяют успешно моделировать как малые, так и большие величины температур, решать стационарные и нестационарные задачи в двух- и трехмерном пространстве. Широко использовать численные методы для решения задач моделирования резания стало возможно только с недавнего времени, благодаря развитию и увеличению уровня доступности специальных программных средств и вычислительных мощностей.

Таким образом, представляется актуальной задача создания модели и алгоритма позволяющих на основе синтеза различных подходов к исследованию процесса резания (аналитического, эмпирического и

численного) предсказать влияние конструкторско-технологических параметров системы на производительность обработки, шероховатость и точность изделия, а также стойкость инструмента. Что также позволит решить задачу обратного моделирования, на основе информации о требуемых практических результатах обработки рассчитать рациональные входные параметры технологической системы.

**Цель работы** – повышение эффективности производства венцов конических зубчатых колес методом обката за счет управления регулируемыми конструкторско-технологическими параметрами процесса резания (скоростью, подачей, углами заточки режущих лезвий).

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

1. Разработать прогностическую модель механической обработки конических зубчатых колес на основе синтеза методов аналитического и численного моделирования, где за счет аналитического моделирования производится расчет кинематики процесса обработки конического зубчатого колеса по методу обката, позволяющую рассчитать параметры процесса резания (геометрию стружки и кинематическое изменение углов резания) в искомый момент; а с помощью численного моделирования процесса съема стружки, рассчитываются физические параметры процесса резания (температуру в зоне резания и силу резания).

2. Разработать и апробировать алгоритм, реализующий прогностическую модель механической обработки конических зубчатых колес, сущность которого заключается в

- прогнозировании физических явлений, сопровождающих процесс резания;
- прогнозировании результатов механической обработки;

- решении обратной задачи моделирования, расчета конструкторско-технологических параметров резания на основе требуемых качественных параметров результата обработки.

3. Провести экспериментальные исследования процесса обработки с целью верификации разработанной прогностической модели и установления качественных и количественных взаимосвязей, возникающих между конструкторско-технологическими параметрами технологической системы и физическими явлениями, сопровождающими процесс обработки.

4. Выявить закономерности между регулируемыми конструкторско-технологическими параметрами системы и физическими явлениями, возникающими в процессе обработки конических зубчатых колес.

5. Разработать практические рекомендации, направленные на повышение эффективности производства венцов конических зубчатых колес.

**Объект исследования:** процесс механической обработки конических зубчатых колес методом обката.

**Предмет исследования:** производительность и качество (точность, шероховатость) обработки венцов конических зубчатых колес, а также конструкторско-технологические параметры процесса обработки (режимы обработки и конструкция режущей части инструмента).

**Методы исследования.** Теоретические исследования базируются на основных положениях теории резания, теории проектирования режущих инструментов с использованием методов математического и графического моделирования, теории механизмов и машин, технологии машиностроения, инженерии поверхности. Планирование экспериментальных исследований, а также обработка результатов проведены с использованием методов робастного планирования экспериментов. При моделировании использованы инструментарий дифференциальной геометрии и векторной алгебры. Для



трехмерного твердотельного моделирования в ходе решения задач был использован САПР «Компас-3D», для численного моделирования была использована среда DEFORM-3D, также для решения поставленных задач были использованы программные продукты (Microsoft Office 2010, LabVIEW 2010, Mathcad).

**Достоверность полученных научных результатов** обеспечена согласованием расчетных и экспериментальных данных, а также апробацией на международных, региональных и всероссийских конференциях и публикациями в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов, а также изданиях, включенных в различные отечественные и зарубежные библиографические базы данных.

**Теоретическая значимость.**

- предложена новая прогностическая модель, сочетающая в себе подходы аналитического, численного и эмпирического моделирования процесса резания, использованный в ее разработке гибридный подход к моделированию процесса резания позволяет выявить зависимости, возникающие между регулируемыми конструкторско-технологическими параметрами резания и физическими явлениями, сопровождающими процесс резания.

- выявлены качественные и количественные зависимости, связывающие геометрию режущего инструмента (модуль, радиус закругления вершины резца, угол профиля) и физические явления, сопровождающие процесс резания (сила резания, максимальная температура в зоне резания, тепловой поток).

**Практическая значимость работы заключается в том, что**

- предложен алгоритм, использование которого позволяет прогнозировать физические явления, сопровождающие процесс резания, и на

основе этого прогнозировать результаты механической обработки, а также решать обратную задачу – произвести расчет конструкторско-технологических параметров резания на основе требуемых качественных параметров результата обработки.

- использование предложенных решений позволяет заменить часть натуральных экспериментальных исследований на исследования в виртуальной среде конечно-элементного анализа, тем самым обеспечив сокращение материальных и временных ресурсов на конструкторско-технологическую подготовку производства.

- предложены рекомендации по рациональному выбору геометрических параметров режущей части инструмента для обработки венцов конических зубчатых колес по методу обката.

**Научная новизна работы.** Разработана прогностическая модель процесса механической обработки венцов конических зубчатых колес методом обката, основанная на синтезе методов аналитического, численного и эмпирического моделирования, позволяющая: на основе анализа информации о конструкторско-технологических параметрах системы прогнозировать практические результаты обработки; решить обратную задачу моделирования: выбрать рациональные регулируемые параметры технологической системы для достижения требуемых показателей результатов обработки.

**Автор защищает:**

1. Прогностическую модель процесса механической обработки венцов конических зубчатых колес методом обката основанную на синтезе методов аналитического, численного и эмпирического моделирования, позволяющую на основе заданных конструкторско-технологических параметров системы получить информацию о физических явлениях,

сопровождающих процесс резания и на основе этих данных произвести прогноз практических результатов обработки.

2. Алгоритм, реализующий прогностическую модель механической обработки конических зубчатых колес, использование которого позволит прогнозировать физические явления, сопровождающие процесс резания и результаты механической обработки, а также рассчитать значения регулируемых конструкторско-технологических параметров технологической системы в зависимости от требуемых качественных параметров результата обработки.

3. Выявленные качественные и количественные взаимосвязи, возникающие между регулируемыми конструкторско-технологическими параметрами системы и практическими результатами механической обработки венцов конических зубчатых колес методом обката.

4. Технологические рекомендации по выбору рациональных параметров технологической системы для достижения цели улучшения практических результатов обработки (сокращении основного времени, снижение шероховатости, повышение точности).

**Реализация и внедрение результатов работы.** Разработанный алгоритм и полученные практические рекомендации успешно апробированы и применены при проектировании новых технологических процессов на ЗАО «Мценскпрокат» и ООО «Инструмент-инжиниринг».

Результаты работы используются в учебном процессе для подготовки бакалавров, при выполнении курсовых проектов, а также в научно-исследовательской работе магистров ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева».

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных

конференциях: научном семинаре «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий» посвящённом памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, д.т.н., почётного профессора ДГТУ А.П. Бабичева, Ростов-на-Дону, 28 февраля, 2020 г., IV международной молодежной конференции «Новые материалы, подходы и технологии проектирования, производства и эксплуатации ракетно-космической техники», Москва, 19-20 ноября, 2020 г., международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», Сочи, 17-21 мая, 2021 г., XVII всероссийской конференции с международным участием «МЕХАНИКИ XXI ВЕКУ», Братск, 16-17 мая, 2018 г., VII международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве», Белгород, 17-18 октября 2018 г., Международном научном симпозиуме технологов - машиностроителей «Наукоёмкие и виброволновые технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий», п. Дивноморское, 26-28 сентября, 2018 г., международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», Воронеж, 11-13 ноября, 2019 г.

**Диссертация выполнялась при поддержке** гранта Российского фонда фундаментальных исследований «Исследование влияния геометрии профиля зубьев конического колеса на физические явления, сопровождающие процесс резания» (2019-2022 гг.).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 19 печатных работах, в том числе 10 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации материалов диссертационных исследований, 5 – в зарубежных библиографических базах данных SCOPUS и WoS, 17 – РИНЦ, 5 – другие статьи и материалы конференций, 1 программа для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Научно-квалификационная работа (диссертация) состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы из 115 источников и приложения. Объем научно – квалификационной работы (диссертации) 161 стр. (без приложений), включая 68 рисунков и 20 таблиц.

# **1 Направления совершенствования процесса обработки венцов зубчатых конических колес**

## **1.1 Механическая обработка зубчатых конических колес в современном машиностроении**

Обработка конических зубчатых колес — одна из наиболее ответственных технологических операций в автомобильной промышленности, требующая оптимизации геометрии зубьев колес с целью достижения требуемых эксплуатационных характеристик зубчатой передачи.

Исходя из существующих данных, в процессе проектирования зубчатых передач (редукторам, коробкам передач) большое значение имеют следующие требования [49]:

- повышение надежности;
- увеличение ремонтпригодности;
- снижение стоимости;
- увеличение передаваемого крутящего момента и увеличение мощности привода;
- снижение уровня шума;
- снижение габаритных размеров;
- повышение коэффициента полезного действия
- снижение веса;
- улучшение динамических характеристик;
- увеличение срока службы.

Часть из этих требований должна быть реализована за счет соответствующей конструкции зубчатых колес, часть — за счет технологии изготовления. Однако технология изготовления в любом случае должна обеспечивать возможность реализации конструктивных параметров с заданной конструкторской точностью.

Можно выделить три основных метода производства прямозубых конических колес на современных машиностроительных предприятиях [37]:

- начальное формирование;
- пластическое формирование;
- 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 [60].

В настоящее время нашли широкое применение в массовом производствековка и штамповка для изготовления конических дифференциалов. При свободной ковке, заготовки, получаемые на молотах и ковочных прессах, отличаются низким качеством, так как значительная глубина дефектного слоя, большие колебания размеров, и несоответствия конфигурации заготовки форме готовой детали приводит к тому, что необходимо закладывать большие припуски, что несет за собой значительные их колебания, потери металла и удорожанию механической обработки.

Получение заготовки свободной ковкой в некоторой степени решает задачу правильного ориентирования волокон по отношению к зубу, однако может быть использовано только при единичном или мелкосерийном производстве зубчатых колес.

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 [59,60].

Поскольку отличительными чертами современного машиностроительного производства является: широкая номенклатура изготавливаемой продукции, требования к стабильности точностных показателей изготавливаемой продукции, минимальные затраты на переналадку оборудования. В этих условиях наиболее эффективными технологическими процессами обработки незвольвентных зубчатых колес являются: зубофрезерование червячными фрезами, зубодолбление, фрезерование резцовыми головками на специальных и универсальных станках, фрезерование пальцевыми фрезами на пятикоординатных обрабатывающих центрах.

Основными методами фрезерования зуба являются метод профильного фрезерования (метод копирования с единичным делением) и метод обкатного фрезерования. В первом случае инструментом являются дисковые модульные фрезы (реже пальцевые модульные фрезы), во втором – строгание двумя резцами с прямолинейными режущими кромками и фрезерование двумя спаренными дисковыми фрезами [59,60,61]. Способ копирования применяется главным образом при изготовлении зубчатых колес невысокой точности. Современным, точным и производительным способом изготовления зубчатых колес является нарезание зубьев по способу обкатки. В этом случае



инструмент – дисковая или пальцевая модульная фреза – в сечении имеет профиль, совпадающий с профилем заданной впадины зуба [60,61].

Обработка зуба производится подачей вдоль оси детали на всю длину одной впадины, после чего деталь поворачивается на угол, соответствующий угловому шагу зубьев и обрабатывается следующая впадина. Этот процесс повторяется столько раз, сколько зубьев надо обработать. Необходимость поворачивать («делить») деталь на угловой шаг при обработке следующего зуба обуславливает другое название этого метода – метод единичного деления [70,71].

В настоящее время метод копирования имеет существенно меньшую область применения, чем метод обката, в связи с недостатками: невысокой точности (8–9-я степень точности), являющейся следствием погрешностей, возникающих в процессе деления, а также неточности профиля инструмента и меньшей производительности вследствие потерь на холостые движения после окончания фрезерования каждой впадины зубчатого колеса [9,17,26].

На отечественных предприятиях до сегодняшнего дня применяются классические конструкции зубофрезерного инструмента. К этим конструкциям для дисковых модульных фрез относятся: цельные быстрорежущие фрезы, напайные быстрорежущие фрезы, сборные быстрорежущие фрезы, напайные (сборные) твердосплавные фрезы и сборные твердосплавные фрезы (рисунок 1.1) [49].

Недостатками этого способа являются:

- низкая точность обработки зуба, так как дисковые модульные фрезы изготавливают с приближенными профилями зубьев, причем каждый типоразмер фрезы рассчитан на несколько смежных чисел зубьев нарезаемых колес в определенном интервале;

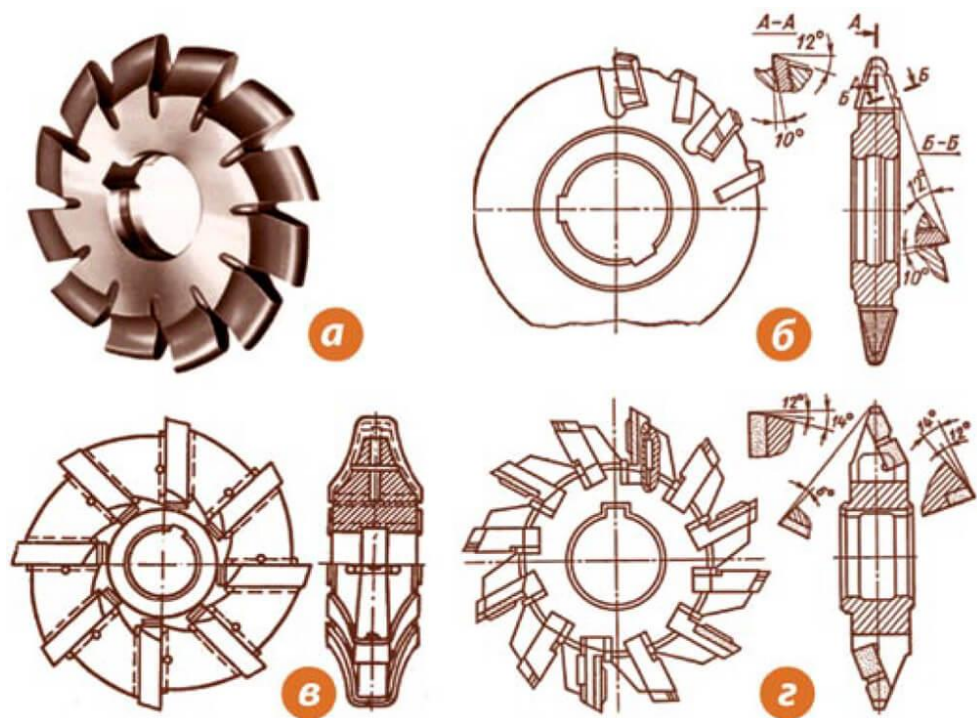


Рисунок 1.1 – традиционные конструкции дисковых модульных фрез [49]

– низкая производительность и высокая себестоимость обработки (большое машинное и вспомогательное время). Низкая производительность определяется прерывностью процесса обработки, вызывающей потери времени на врезание фрезы при изготовлении каждого очередного зуба, на индексирование (поворот) заготовки, на подвод заготовки к фрезе, а также относительно малым числом зубьев фрезы, работающих одновременно [70].

Необходимо отметить, что современная технология обработки предполагает совершенно другие конструкции фрез. Практически повсеместно в технологически развитых странах при реализации современной технологии профильного фрезерования зуба применяются фрезы со сменными многогранными пластинами [9,17,26].

Принцип применения модульных фрез подразумевает, что профиль фрезы полностью соответствует профилю зуба обрабатываемой детали.

Однако если применяются отдельно фрезы для черновой и чистовой обработки, то профиль черновых фрез не обязательно должен полностью соответствовать профилю зуба детали с соответствующим припуском.

Фрезы со сменными пластинами имеют более высокую экономическую эффективность по сравнению с фрезами с напайными пластинами благодаря следующим факторам [17,9,88]:

- нет необходимости перетачивать ножи с напайными пластинами, в результате исключаются затраты на переточку;
- в конструкции фрезы отсутствуют ножи, поэтому конструкция становится проще и дешевле;
- сменные пластины крепятся механическим способом, поэтому отсутствует необходимость пайки пластин и последующей перепайки по окончании периода стойкости;
- сменные пластины могут иметь износостойкое покрытие, что позволяет существенно увеличить скорость резания при обработке и повысить производительность при одновременном повышении стойкости. Возможности нанесения покрытия на напайные пластины ограничены из-за напайного соединения, свойства которого могут измениться при нагревании до температуры нанесения покрытия.

Зубофрезерование двумя дисковыми фрезами (рисунок 1.2) [60] методом обкатывания характеризуется высокой производительностью благодаря применению многолезвийного инструмента, работающего на высоком режиме резания. Нарезание зубьев производят из целой заготовки. Производительность станков при работе двумя дисковыми фрезами в четыре раза выше, чем при зубострогании двумя резцами [37,59,60].

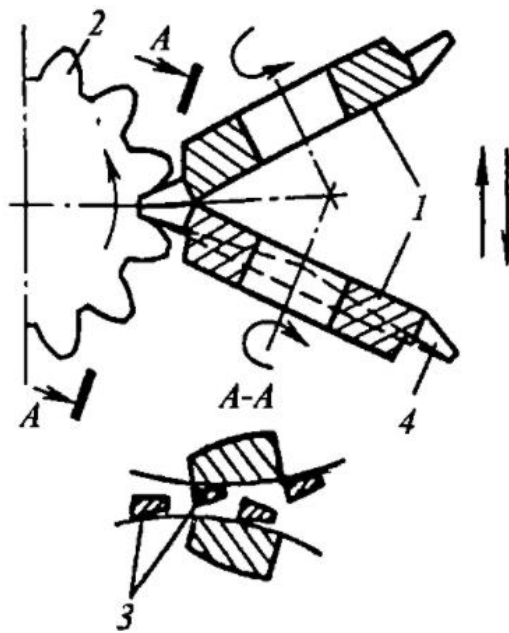


Рисунок 1.2 – схема нарезания зубьев прямозубых конических колес двумя дисковыми фрезами

Обработка ведется двумя дисковыми фрезами 1, наклоненными друг к другу и расположенными в одной впадине зуба колеса 2. Резцы 3 одной фрезы входят в промежутки между резцами другой фрезы. Каждая фреза обрабатывает свою сторону зуба колеса. Во время обработки фрезы вдоль зуба они не перемещаются, поэтому дно впадины зуба имеет слегка вогнутую поверхность. По концам зубьев глубина впадины стандартная, а в середине несколько глубже [70].

Для получения бочкообразности по длине зуба режущие кромки фрез располагают под углом к оси вращения. Описывая во время вращения коническую поверхность, режущие кромки 4 по концам зуба снимают больше металла, чем в середине. Величина бочкообразности определяется углом поднутрения режущих кромок и выбирается в зависимости от требуемой длины пятна контакта на зубьях.

При нарезании конических колес методом обкатки на станке воспроизводится зацепление нарезаемого конического колеса с

воображаемым производящим колесом 3 (круговой рейкой), зубья которого образуются в пространстве движущимися режущими кромками инструмента [70]. Производящее колесо (рисунок 1.3) может быть плоским и плосковершинным. Станки, у которых производящее колесо является плоским (половинный угол начального конуса этого колеса равен  $90^\circ$ ), по конструкции сложнее станков с плосковершинным производящим колесом, половинный угол начального конуса которого равен  $90^\circ - \gamma$  (где  $\gamma$  – угол ножки зуба).

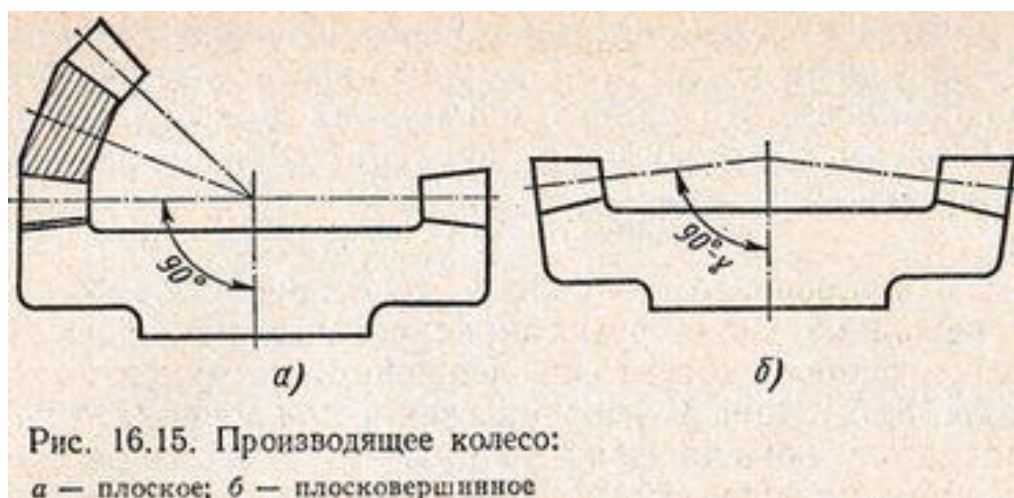


Рисунок 1.3 – производящее колесо [60]

Нарезание зубьев круговой протяжкой (рисунок 1.4: а – схема зубонарезания; б – график перемещения инструмента; 1 – зона поворота заготовки колеса на один зуб; 2 – заготовка; 3 – круговая протяжка) является наиболее производительным методом изготовления конических прямозубых колес небольшого диаметра. Применяется в массовом производстве на специальных автоматах и полуавтоматах.

Прямозубые конические колеса, обработанные этим методом, в отличие от таких же колес, обработанных другими методами, имеют другую геометрию зацепления и существенно отличаются размерами заготовок; поэтому эти колеса не могут быть взаимозаменяемыми [39].

При круговом протягивании заготовка 1 неподвижна, а режущий инструмент вращается с постоянной угловой скоростью и совершает возвратно-поступательное движение параллельно образующей конуса впадин конического колеса. За один оборот инструмента, который происходит за 2...5 с, полностью обрабатывается впадина зуба колеса [60].

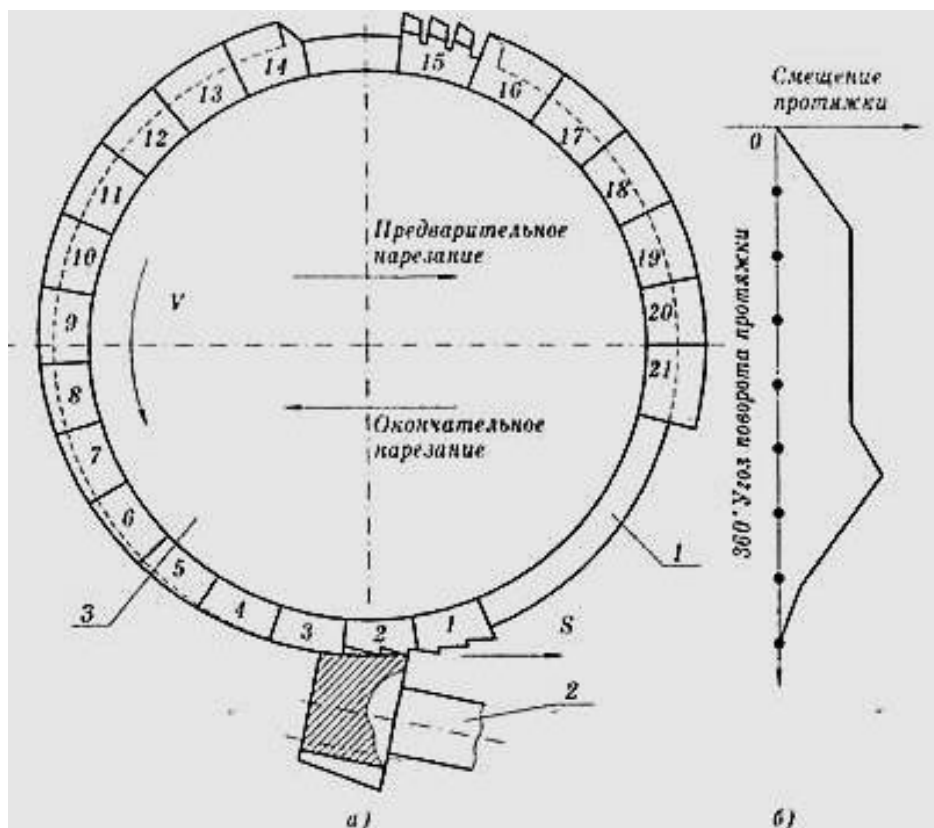


Рисунок 1.4 – Круговое протягивание зубьев конического колеса [60]

Инструмент представляет наборную фрезу-протяжку (диаметр 500 мм), составленную из резцовых блоков по 4 – 5 резцов в каждом. Первые 10 – 12 блоков черновые, остальные 4 – 5 чистовые.

При обработке прорезается впадина зуба, время обработки 1,5 – 5с. Точность нарезания определяется точностью изготовления протяжки (не высокая) [59].

При черновой обработке протяжка совершает движения подачи вдоль нарезаемой впадины в направлении от узкого конца к широкому, а при

чистовом нарезании она подается в обратном направлении с постоянной скоростью. В результате сложения вращательного и поступательного движения протяжка относительно заготовки будет совершать движение обкатки, при котором начальная окружность, связанная с протяжкой, будет без скольжения катиться по начальной прямой, связанной с головкой [71].

Нарезание каждой впадины зуба производится за один оборот протяжки. После окончания обработки впадины зуба происходит поворот заготовки за один зуб, в то время когда мимо заготовки проходит сектор протяжки, свободный от зубьев. В результате обеспечивается непрерывное вращение инструмента при обработке всех впадин зубьев колеса.

В процессе обработки каждый чистовой зуб протяжки профилирует определенный участок поверхности впадины зуба, с которым не соприкасаются режущие кромки других звеньев. Способ позволяет получить бочкообразные зубья при обработке, т.е. уменьшить толщину зубьев у их торцов и обеспечить расположение зоны контакта в средней части зуба. Это, как правило, улучшает условия работы передачи и делает ее менее чувствительной к погрешности монтажа и деформациям системы под нагрузкой [57].

Наиболее распространенным способом обработки прямозубых конических колес является строгание двумя резцами по методу обкатки (рисунок 1.5) [72]. В основе этого способа лежит принцип воспроизводства на станке зацепления плоского производящего колеса и заготовки. Плоское производящее колесо является воображаемым. Поверхности зубьев его описываются режущими кромками резцов,двигающихся возвратно-поступательно. В процессе обработки наблюдаются также вращение люльки с резцами вокруг оси производящего колеса и вращение заготовки вокруг своей оси. Эти два вращения кинематически связаны и приводятся к качению без

скольжения начального конуса заготовки по начальному конусу производящего колеса. Так как обработка ведется двумя резцами, режущие кромки которых при возвратно-поступательных движениях описывают только одну впадину плоского производящего колеса и соответственно при зацеплении с заготовкой нарезают один зуб колеса, приходится после каждого цикла возвращать люльку и заготовку в исходное положение и производить поворот заготовки на один зуб. В результате происходит переход от обработки одного зуба к другому [71,57].

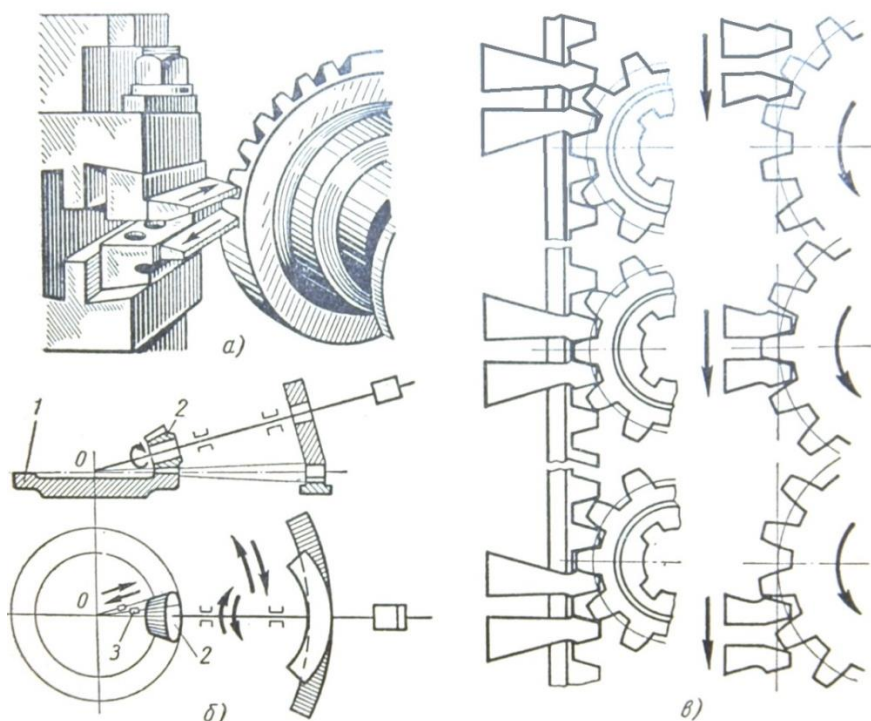


Рисунок 1.5 – Нарезание конических зубчатых колес с прямыми зубьями на зубострогальном станке: 1 – венец; 2 – обрабатываемая шестерня; 3 – резец

Принцип действия этих станков (рисунок 1.5 4, а и б) основан на воспроизведении движения обкатки обрабатываемого колеса 2 по воображаемому плоскому зубчатому венцу 1, зубьями которого являются два призматических резца 3, совершающие возвратно-поступательные движения.



Обрабатываемое зубчатое колесо при вращении входит в зацепление с зубьями плоского венца, которые образовали резцы; так происходит обработка зуба (рисунок 1.5 4, в). Потом обрабатываемое зубчатое колесо возвращается в первоначальное положение, поворачиваясь на один зуб. При следующих циклах обрабатываются оставшиеся зубья [72].

Таким методом обеспечивается высокая точность и чистота обработки.

Рисунок 1.6, а изображает схему нарезания конического колеса резцовой головкой [73].

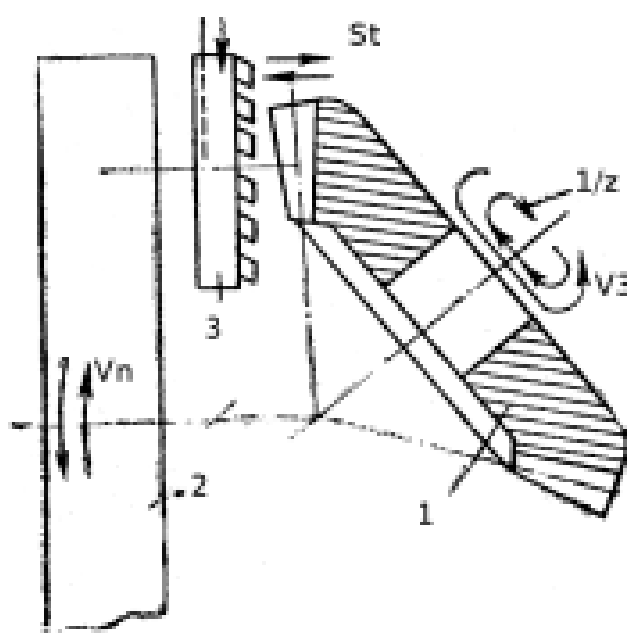


Рисунок 1.6 – Нарезание конического колеса резцовыми головками: а – схема нарезания; б – резцовая головка; 1 – нарезаемое колесо; 2 – люлька; 3 – резцовая головка

Вращательное движение резцовой головки  $V$  является движением скорости резания; возвратно-вращательное движение люльки  $V_L$  согласованное с вращательным движением заготовки  $V_3$ , – движением обкатки; поступательно-возвратное движение  $St$  – движением подачи на глубину впадины. Вращательное движение люльки (обкатка) продолжается до тех пор, пока не будет обработана впадина. Когда обкатка закончится,

заготовка отводится от резцовой головки; люлька поворачивается в обратную сторону до исходного положения. Заготовка колеса продолжает вращаться в том же направлении и за время обратного вращения люльки успевает занять угловое положение, соответствующее новой впадине [60,71,73].

При одностороннем способе нарезания каждая сторона впадины зуба колеса (большого звена в паре) и шестерни (малого звена в паре) профилируются отдельно на разных наладках станка. При двухстороннем способе нарезания обе стороны впадины зуба колеса профилируются на одной наладке одновременно, а сопряженная шестерня профилируется по одностороннему способу и обычно каждая сторона впадины зуба — на отдельном, станке. За счет корректирования наладки станков, нарезающих шестерню, достигается высокое качество сопряжения профилей зубьев в передающей паре. При двойном двухстороннем способе нарезания обе стороны впадины зуба как у колеса, так и у шестерни профилируются одновременно. Последний способ нарезания, хотя и является более производительным, не обеспечивает получение такого высокого качества колес, как первые два способа. Основными типами резцовых головок являются головки одностороннего резания и головки двухстороннего резания [84,4].

Головки одностороннего резания имеют только наружные или только внутренние резцы, а головки двухстороннего резания имеют наружные и внутренние резцы, чередующиеся в корпусе.

Традиционные методы механической обработки зубчатых колес имеют определенные ограничения производственной эффективности при мелко- и среднесерийном производстве. В настоящее время разработаны и активно внедряются два новых метода механической обработки зубчатых колес: InvoMilling и пятиосевая обработка с использованием технологии gearMILL.

Данные подходы применимы для использования на универсальных станках и позволяют преодолеть существующие производственные ограничения.

Подходы, используемые для обработки зубьев зубчатых колес, основываются на использовании специальных станков и режущего инструмента. Качество и время производства одной единицы продукции прогнозируемы и соответствуют предъявляемым требованиям, однако существуют и недостатки:

- недостаточная гибкость оборудования для производства зубчатых колес различных типов,
- длительные сроки приобретения инструментов и станков,
- высокая стоимость оборудования и инструмента.

Данные недостатки не позволяют производителям зубчатых колес реализовать бизнес-планы, основанные на быстром реагировании на требования клиентов, или к переходу от производства одного типа зубчатых колес к другому.

## **1.2 Современные методы обработки зубчатых колес**

Новые методы позволяют использовать стандартные многофункциональные станки и стандартные режущие инструменты для процесса нарезания зубьев зубчатых колес. Два метода зарекомендовали себя как наиболее эффективные для многофункциональных станков: I. InvoMilling [74], технология нарезания зубчатых колес, разработанная компанией Sandvik (рисунки 1.7 и 1.8) [55], II программное обеспечение gearMILL, разработанное DMG Mori Pfronten.

Метод InvoMill заключается в том, что для получения профиля зуба колеса используется специальная дисковая фреза с установленными в ней

твердосплавными пластинками. Квазиэвольвентный профиль образуется путем согласованного перемещения узлов станка. Контакт между режущей плоскостью инструмента и профилем зуба – линейный. Траектория перемещения инструмент – радиальная, как правило, от вершины до впадины зуба. Основные конструктивные параметры колеса (модуль, угол профиля и угол наклона зубьев) определяются траекторией инструмента, а не его профилем. В отличие от концевой фрезы, которая вырезает дугообразные выемки на каждом проходе, для фрезы InvoMill нет корреляции между расстоянием между проходами и качеством поверхности. Это позволяет использовать большие переходы между проходами, как правило, от 5 до 15 мм для колес в диапазоне модулей с 3 до 6 мм. Для сравнения, расстояние между проходами концевой фрезы – 0,1 до 0,3 мм. В результате производительность InvoMilling может быть на один-два порядка выше, чем фрезерование профиля зубьев концевой фрезой [17].



Рисунок 1.7 - Модель обработки блока зубчатых колес по технологии InvoMilling



Рисунок 1.8 - Обработка зубчатого колеса по технологии InvoMilling

Однако обработка InvoMill и обработка концевыми фрезами имеет общий недостаток. Это сложность разработки программы для ЧПУ.

Традиционные САМ-решения неэффективны, поскольку в них отсутствуют решения для создания твердотельных моделей профилей зубчатых колес. В САМ системах, используемых для традиционного оборудования, для производства зубчатых колес использовались только геометрические параметры шестерни, а сама твердотельная модель с геометрически точным профилем зубьев не требовалась. Эта проблема была решена в результате разработки программного обеспечения gearMILL.

Процесс InvoMilling и процесс зуборезания червячной фрезой используются для обработки цилиндрических колес. Для сравнения двух методов произведен подсчет основного времени обработки для колес модуля 3 мм и модуля 6 мм. Время производственного цикла для высокоскоростной обработки червячной фрезой было получено в соответствии с рекомендациями, взятыми из [11].

Расчет основного времени InvoMilling был произведен с использованием программного обеспечения Manufacturing Suite, предназначенного для моделирования работы станков ЧПУ. Результаты представлены на рисунках 1.9 и 1.10. Параметры резания, используемые для зубофрезерования и для InvoMilling, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры зубофрезерования

Модуль	Диаметр фрезы, мм		Подача, для червячной фрезы – мм/об, для InvoMilling – град/мин		Скорость резания, м/мин	
	Червячная фреза	InvoMilling	Червячная фреза	InvoMilling	Червячная фреза	InvoMilling
3	82,5	80	2,54	1000	60	244
6	114,3	135	1,52	1000	60	244

Как видно на рисунках 1.9 и 1.10, когда ширина венца колеса уменьшается, разрыв в производительности между обработкой червячной фрезой и InvoMilling также уменьшается. Производительность InvoMilling также увеличивается по мере увеличения модуля зуба.

Установлено, что в некоторых случаях современные универсальные многокоординатные станки с ЧПУ в сочетании со специальными фрезами InvoMill и специальным программным обеспечением позволяют повысить производительность и гибкость процесса изготовления зубчатых колес. Выбор основного оборудования для производства зубчатых колес должен основываться на тщательном изучении существующих решений, которые позволят эффективно выпускать продукцию без потери в производительности и качестве [75].

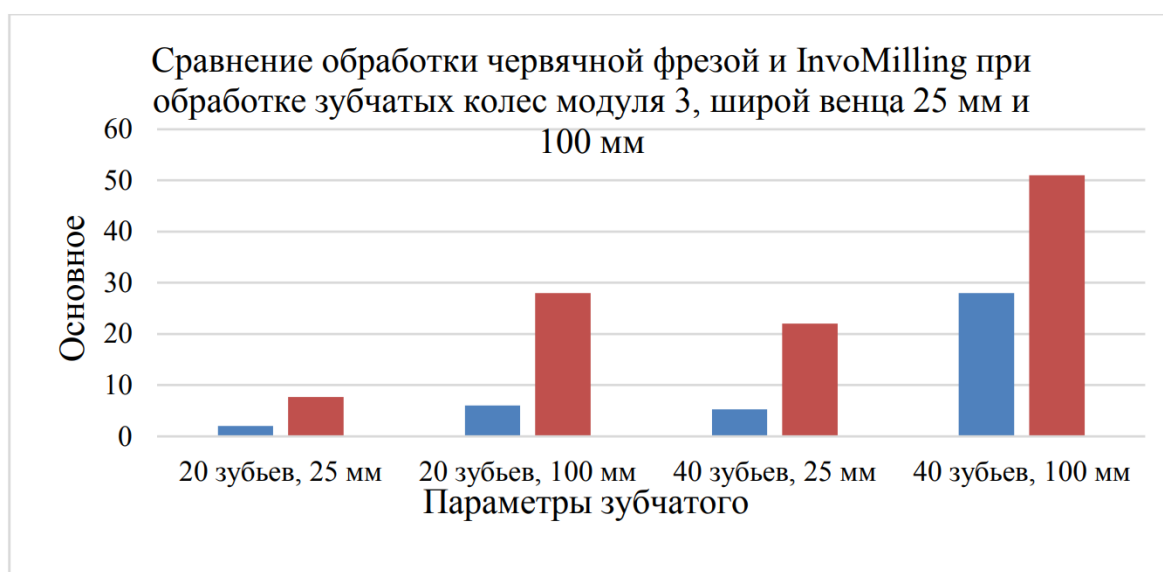


Рисунок 1.9 – Сравнение времени производственного цикла зубчатых колес модуля 3 мм (правые столбцы – InvoMilling; левые столбцы – червячное фрезерование)

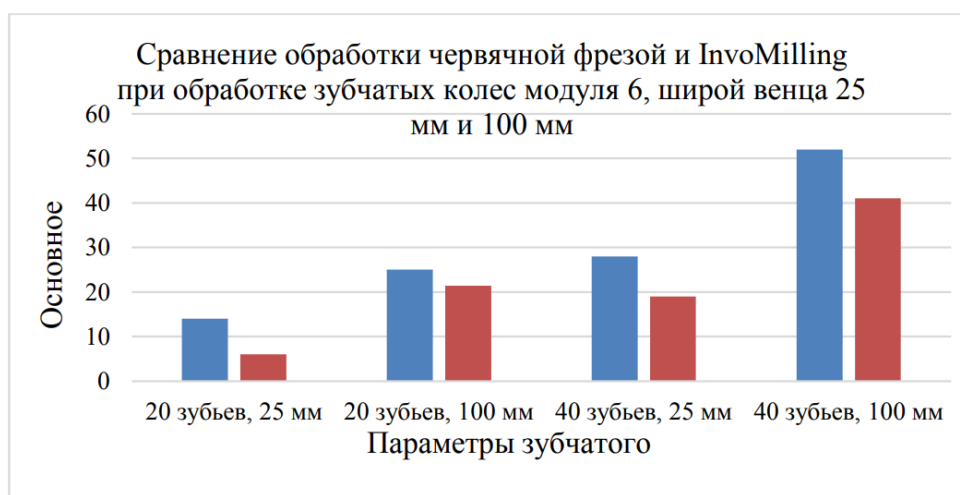


Рисунок 1.10 – Сравнение времени производственного цикла зубчатых колес модуля 6 мм (правые столбцы – InvoMilling; левые столбцы – червячное фрезерование)

### 1.3 Подходы к проблеме изучения физических процессов сопровождающих процесс обработки конструктивно сложных поверхностей деталей

#### 1.3.1 Подходы к проблеме изучения силы возникающей в процессе съема стружки

Основой модели прогнозирующей силу резания могут являться методы аналитического, эмпирического, численного и гибридного моделирования [1].

Аналитическое моделирование позволяет прогнозировать силу резания, силу трения, напряжения, деформации, температуры и т.д., однако, в силу того, что резание сопровождается множеством сложных физических явлений, использование аналитического моделирования в ряде случаев затруднительно. Для прогнозирования силы резания используют аналитические модели, основанные на теории линий скольжения [90, 91]. Применение аналитических моделей, позволяет получить обобщенные решения для тел простой формы с учетом ряда упрощений.

С конца 70-х годов для моделирования резания применяются численные методы. Численные методы позволяют успешно моделировать как малые, так и большие величины силы резания, а также решать задачи в двух- и трехмерном пространстве [92, 93, 94, 95]. Численные модели проще и удобнее исследовать в силу возможности проводить с ними вычислительные эксперименты. Логичность и формализованность численных моделей позволяет выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта, в частности, исследовать отклик моделируемой физической системы на изменения ее параметров и начальных условий. Широко использовать численные методы для решения задач моделирования резания стало возможно только с недавнего времени, благодаря развитию и увеличению уровня доступности специальных программных средств и вычислительных мощностей.

Эмпирические модели отличает высокая точность и простота применения, однако для их разработки требуется массив экспериментальных данных, а область применения ограничена. Проектирование новой эмпирической модели требует больших временных и материальных затрат. В настоящее время наибольшее распространение получил эмпирический подход, основанный на использовании значения удельной составляющей силы резания на единицу длины режущего лезвия («Mechanistic Force Modelling» в зарубежной литературе). Сущность метода заключается в определении удельных сил на единицу длины режущего лезвия и последующем суммировании их по всем режущим кромкам, участвующим в резании. Данным методом могут быть рассчитаны силы для процессов резания инструментом с нестандартным профилем, когда в процессе съема стружки участвуют сразу несколько кромок. Ю. Н. Стеблецов использовал данный подход для расчета силы резания, возникающей при фрезеровании зубчатых



колес с профилем Новикова [96, 97]. Р.В. Анисимов рассчитывал данным методом силу, возникающую при зубодолблении внутренних неэвольвентных зубчатых колес [98]. L. Berglind и D. Plakhotnik на основе данного подхода разработали модель для расчета сил резания, возникающих при обработке деталей произвольной конфигурации на пяти координатных фрезерных центрах [99].

Недостатком данного подхода является то, что в случае необходимости внесения в отработанный технологический процесс каких-либо изменений (использование новых режимов обработки, использование нового режущего инструмента и др.) необходимо произвести калибровку модели для уточнения поправочных коэффициентов. Калибровка реализуется путем проведения комплекса экспериментальных исследований. После калибровки модели, ошибка прогноза будет менее 5% [100].

Для предсказания практических результатов обработки широкие перспективы открывает использование подхода гибридного моделирования, соединяющего в себе положительные качества экспериментальных и теоретических методов исследований [1]. Однако такой подход до настоящего времени полностью не реализован. Это связано с тем, что долгое время, как в России, так и за рубежом преимущественно развивалось аналитическое моделирование процессов механической обработки, ввиду недостатка вычислительных мощностей и программных средств, численному моделированию уделялось значительно меньшее внимание.

### **1.3.2 Подходы к проблеме изучения теплового состояния процессов резания**

Важной задачей теории резания является исследование температурных полей и закономерностей распределения потоков тепла, возникающих в детали, инструменте и заготовке в процессе чистовой и отделочной обработки

конструктивно сложных поверхностей деталей [45, 47, 51, 63, 66, 69,82,86]. Возникающая в результате деформации и трения теплота оказывает определяющее влияние на процесс износа режущей части инструмента, а также определяет качество и точность обработки конструктивно сложных поверхностей деталей.

Изучению тепловых явлений при резании в технологической науке традиционно посвящалось отдельное направление исследований, получившее благодаря работам А. Н. Резникова название «Теплофизика резания». Исследование теплофизических особенностей обработки резанием, как с использованием широко распространенных технологий (точения, сверления и т.д.), так и специальных технологий обработки (зубодолбления, зубофрезерования червячными фрезами, зубофрезерования специальными резцовыми головками), показывает всю сложность возникающих явлений, в том числе неоднозначность зависимостей между температурными полями, возникающими в инструменте, заготовке и стружке и технологическими параметрами процесса, конструктивными параметрами изделия и инструмента.

Отечественными и зарубежными исследователями изучены физические явления, возникающих в процессе резания деталей различной конструктивной сложности. Существенный вклад в развитие теории и практики теплофизики резания внесли: Г. С. Андреев, Г. И. Грановский, А. И. Дальский, А. Н. Даниелян, Ю. Г. Кабалдин, Б. А. Кравченко, Т. Н. Лоладзе, А. Д. Макаров, В. А. Остафьев, А. Н. Резников, Н. В. Талантов, Г. Л. Хае [50, 52, 54, 67, 68, 77, 78, 79, 80, 87,]. Работы зарубежных ученых: И. Армарега, С. А. Клименко, М. Кроненберга и др., дополняют проведенные исследования [38, 42, 56, 64, 2, 5, 10, 13, 29, 33]. Полный обзор эмпирических подходов к

прогнозированию температур резания дали в своей работе Р. Командури и З. Хоу [24, 25,23].

Прогнозирование температурных полей, возникающих в процессе резания, может быть осуществлено при использовании различных типов моделей: аналитических, сочетающих аналитический подход и теорию линий скольжения, численных, основанных на методе конечных разностей, численных, основанных на методе конечных элементов.

Применение аналитических методов позволяет получить общие решения, актуальные для тел простой формы с введением ряда допущений. Возможно решение двух- и трехмерных задач, однако при этом возникают сложности с интегрированием дифференциального уравнения теплопроводности при условиях однозначности. Аналитические методы теплофизического расчета температуры основываются главным образом на общей теории источников теплоты, разработанной Г. Карслоу, Д. Егером и Н. Н. Рыкалиным [81]. Основы аналитического моделирования тепловых процессов, возникающих в зоне резания, за рубежом заложил Р. Командури [24,25,23].

Я. Карпат и Т. Озел [19] использовали модель, сочетающую в себе теорию линий скольжения и аналитическое моделирование для прогнозирования температурных полей при высокоскоростной механической обработке стали AISI 4340 инструментом с фаской.

И. Лазоглу и Я. Алтинтас [27] разработали метод конечных разностей для прогнозирования температур в инструменте и стружке для случая ортогонального резания.

Специальный вариант метода конечных разностей - метод элементарных балансов был использован В. Гржезиком [14, 15,16] для того, чтобы

предсказать распределение температуры вдоль вершинной и боковых режущих кромок инструмента. В работе были проанализированы значения температур для твердосплавного инструмента и инструмента с покрытием при механической обработке стали 45 на скоростях резания в диапазоне от 72-145 м/мин [14], была получена достаточно хорошая корреляция (6%) теоретических и экспериментальных данных. Было также установлено [16], что форма теплового источника влияет на распределение температуры вдоль линии контакта инструмента и заготовки. В частности, при использовании трапецевидного источника тепла получается установить лучшее согласование между расчетными и экспериментальными данными.

Для численного решения задач теплофизики резания нашли применение метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ). Так, многие задачи теплофизики резания были исследованы моделированием на сеточных моделях Н. В. Дилигенским и А. В. Темниковым [78], что позволило обосновать схематизацию тепловых расчетов и некоторые принимавшиеся ранее допущения.

Е. Усуи [34] рассчитывал температуры в зоне резания с использованием МКР, используя прогнозируемое усилие резания. Впоследствии автором была разработана модель развития лунки износа в зависимости от напряжений и температур, возникающих на передней поверхности инструмента.

Ряд исследователей использовали МКЭ для прогнозирования температур при различных условиях резания, инструментальных материалах, покрытиях, геометрических параметрах режущей кромки [30,31].

Моделирование с помощью численных методов позволяет расширить круг задач, решаемых моделью, при этом расчет можно успешно выполнить

как для малых, так и больших величин температур. Они позволяют решить стационарные и нестационарные задачи в двух- и трехмерном пространстве.

Широко использовать численные методы для решения задачи моделирования температурных полей стало возможно только с недавнего времени, благодаря развитию и увеличению уровня доступности специальных программных средств и вычислительных мощностей.

Анализ научных трудов [6, 40, 43, 41, 44, 46, 48, 58, 65, 76, 83] свидетельствует о том, что данные об абсолютных значениях экспериментальных температур противоречивы вследствие существенной разницы методик исследования и сложности контроля. Таким образом, измерение температур в области механической обработки является сложным и трудоемким процессом, в результате чего проверка любой модели - это практически сложная задача.

Теплофизика резания успешно развивается применительно к процессам обработки лезвийным инструментом. Однако темпы внедрения методов и рекомендаций теплофизики процессов механической обработки в инженерную практику не удовлетворяют задачам повышения эффективности технологических процессов. Одной из причин данной проблемы является то, что исследования направлены на изучение наиболее распространенных и хорошо изученных процессов, таких как точение и фрезерование, в то время как в конструкциях современных машин и механизмов широко применяются детали, рабочие поверхности которых требуют более сложной механической обработки, в частности, конические зубчатые колеса.

#### **1.4 Особенности стружкообразования при механической обработке зубчатых колес**

Вопросам влияния геометрических параметров режущего лезвия на физические явления сопровождающие процесс обработки уделяется внимание в случае, если применяются специальные инструменты или обрабатываются геометрически сложные профили (конические зубчатые колеса). Для обработки такого рода поверхностей характерно резание со снятием сложной Г- или U- образной стружки, на рисунок 1.11 представлена фотография стружки, срезаемой зуборезным инструментом.



Рисунок 1.11 – Вид стружки, срезаемой зуборезным долбяком

Г- или U- образная стружка образуется при механической обработке инструментом с определенной геометрией режущего лезвия, когда несколько смежных режущих кромок одного инструмента срезают стружку одновременно, рисунок 1.12. Такое стружкообразование наблюдается в процессе механической обработки зубчатых колес, например при

зубофрезеровании или нарезании конического зубчатого колеса [4, 20, 36], а также в ряде случаев при резьбонарезании, протягивании и др.

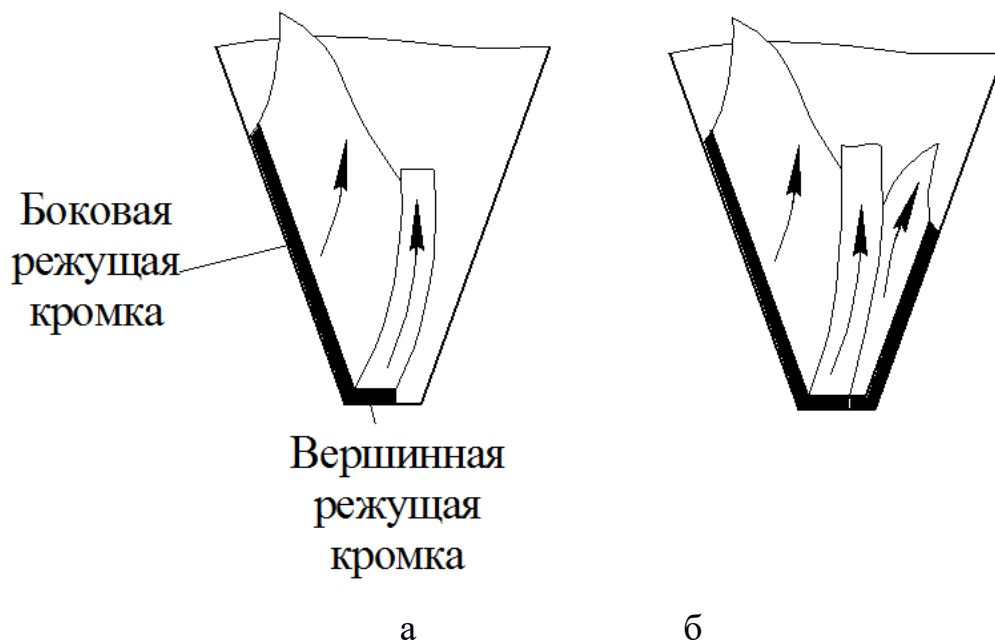


Рисунок 1.12 – Схема схода стружки; а- при обработке конического зубчатого колеса резцовой головкой; б - при обработке зубчатого колеса червячной фрезой

Такие инструменты имеют короткие временные интервалы между переточками, а зачастую достигают максимально допустимого износа раньше положенного времени. Стойкость инструмента ограничивает чрезмерный износ режущих кромок. Анализ износа зуборезного инструмента показывает, что причиной выхода из строя инструмента, зачастую, является выкрашивание. Фотографии двух изношенных резцов для обработки конических зубчатых колес показаны на рисунке 1.13 [21] и рисунке 1.14 [53].

Кроме того, износ имеет определяющее значение для работоспособности зуборезного инструмента, так как он оказывает значительное влияние на точность обрабатываемых изделий.

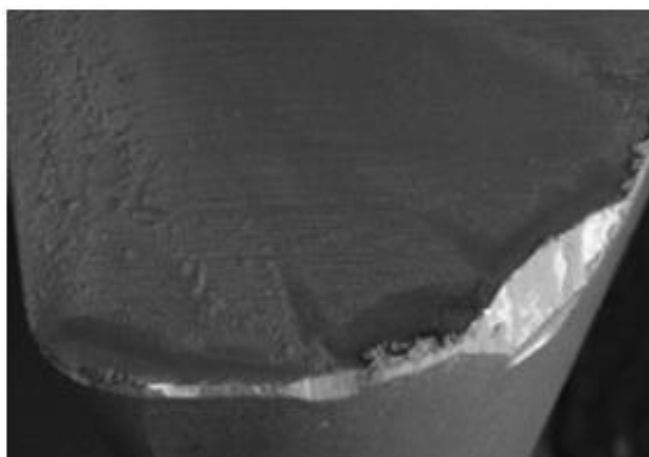
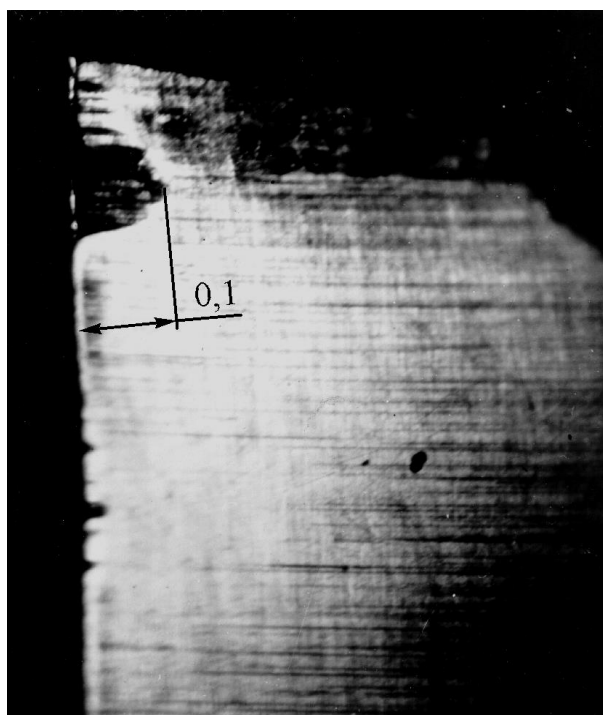


Рисунок 1.13 – Изношенный зуборезный резец для обработки конического зубчатого колеса [21]



а



б

Рисунок 1.14 – Износ резца головки [53]; а) – по задней поверхности выходной кромки; б) – по передней поверхности



## 1.5 Робастное планирование эксперимента

Основные аспекты методов робастного планирования эксперимента (методов Тагучи) опубликованы в работах Pease [107], Ross [108] и Roy [109]. Вводные обзоры идей Тагучи о качестве и его улучшении можно найти в работах Barker [102], Kacker [104] и Noori [106]. В методологии Тагучи качество выражается через противоположное понятие – общие потери, обусловленные функциональной изменчивостью и неблагоприятными побочными эффектами, связанными с соответствующим продуктом. Таким образом, появляется возможность измерить качество в количестве потерь, чем больше потери качества, тем ниже само качество.

Ключевой принцип измерения качества: необходимо минимизировать изменчивость в ответ на факторы шума (находятся вне контроля оператора), максимизируя при этом изменчивость в ответ на управляющие факторы (устанавливаются или управляются оператором). Улучшение качества достигается установлением наилучших значений управляющих факторов, которые включены в производственный процесс для того, чтобы максимизировать отношение сигнал–шум (С/Ш).

Отношения С/Ш, описанные далее, были предложены Тагучи [110].

Меньше – лучше. Если необходимо минимизировать число появлений некоторых дефектов продукта, вычисляется следующее отношение С/Ш:

$$\text{Eta} = -10 * \log_{10} [(1/n) * (y_i^2)] \quad (1.1)$$

где Eta – является результирующим отношением С/Ш, n – число наблюдений, y – значение исследуемого параметра.

Множитель «–10» указывает на то, что это отношение измеряет величину, противоположную «плохому качеству». Максимизация этого отношения приводит к возрастанию качества.

Номинальное – наилучшее значение. Имеется фиксированное значение величины сигнала (номинальное значение), и дисперсия вокруг этого значения рассматривается как результат действия шумов:

$$\text{Eta} = 10 * \log_{10} (\text{Mean}^2/\text{Variance}) \quad (1.2)$$

Такое отношение С/Ш может использоваться, когда идеальное качество совпадает с конкретным номинальным значением.

Больше – лучше. Здесь используется следующее отношение С/Ш:

$$\text{Eta} = -10 * \log_{10} [(1/n) * (1/y_i^2)] \quad (1.3)$$

Тагучи разработал систему планов, которые позволяют оценить максимальное число главных эффектов при помощи минимального числа опытов в эксперименте. Многие стандартные ортогональные массивы, предложенные Тагучи, идентичны дробно факторным двухуровневым планам экспериментов, планам Плакетта–Бермана, планам Бокса–Бенкена, латинским квадратам, греко–латинским квадратам и др. Большая часть робастных планов эквивалентна дисперсионному анализу для соответствующих отношений С/Ш, в котором игнорируются взаимодействия второго порядка и выше.

Исследования [101, 103, 113] показали, что использование методов робастного планирования эксперимента может значительно упростить процедуру оптимизации для определения параметров резания при операциях механической обработки. В результате, с практической точки зрения, метод Тагучи является наиболее подходящим для эмпирического определения оптимальных параметров резания [106]. Монтгомери [105] подчеркивает, что теория Тагучи в отношении процессов механической обработки имеет широкое применение.

## **1.6 Прогностическое моделирование процессов механической обработки**

Предсказательные модели могут быть интегрированы в системы

планирования процессов для повышения производительности и качества продукции. Предсказательные модели также могут эффективно использоваться при адаптивном управлении процессами механической обработки. Промышленность заинтересована в предсказании результатов технологического процесса: производительности, стойкости инструмента, точности, шероховатости и т. д. Предсказательные модели можно разделить на несколько групп в зависимости от подходов, которые лежат в их основе: эмпирические, аналитические, численные и гибридные.

Эмпирические модели отличает высокая точность и простота применения, однако для их разработки требуется массив экспериментальных данных, а область применения ограничена. Проектирование новой эмпирической модели требует больших временных и материальных затрат.

Аналитические модели, в том числе модели, основанные на теории линий скольжения, позволяют прогнозировать физические показатели, характеризующие процесс обработки: силы резания, напряжения, деформации, скорости деформации и температуры. Однако сложность исследуемых процессов затрудняет аналитическое прогнозирование практических результатов.

В течение последних четырех десятилетий растет интерес к численному моделированию процессов механической обработки. Появление новых и развитие известных вычислительных методов позволило использовать для численного моделирования адаптивную сетку и автоматическое перестроение сетки. Это, в значительной степени, позволило преодолеть препятствия, связанные с чрезмерным искажением сетки. Однако из-за высоких требований к производительности вычислений численные методы стали полезным и практичным инструментом только в начале 2000-х годов. Были разработаны численные модели для исследования специальных конструкционных

материалов, а также предложены модели для исследования обработки специальным режущим инструментом. Несмотря на значительные достижения, численные методы по-прежнему остаются «черным ящиком» для прогнозирования выходных данных процесса в зависимости от предполагаемых граничных условий. Например, сообщалось, что численное моделирование на основе метода конечных элементов одних и тех же процессов может давать разные результаты. Для повышения эффективности численных моделей могут быть использованы аналитические модели. Этот гибридный аналитическо-численный подход не был в полной мере реализован, но, вероятно, станет основой для будущих исследований.

Входные данные, используемые при моделировании, состоят из технологических параметров резания, геометрии инструмента и заготовки, а также информации об инструментальном и обрабатываемом материалах. Из этих данных большинство известных моделей рассчитывают промежуточные физические показатели, характеризующие процесс обработки, которые затем используются для прогнозирования практических результатов механической обработки. Таким образом, наиболее успешными моделями с точки зрения их использования в промышленности являются те, которые позволяют успешно осуществить переход от первого этапа ко второму.

Так же отметим тот факт, что использование неизменных входных данных в различных моделях приводит к значительному изменению результатов моделирования. Это указывает на то, что отсутствует полное понимание процессов механической обработки и подчеркивает необходимость продолжения фундаментальных исследований по моделированию. Выявленные возможности и ограничения подходов к моделированию процессов механической обработки представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Возможности и ограничения подходов моделирования

	Аналитическое	Численное	Эмпирическое	Гибридное
Принцип	Теория скольжения или принцип наименьшей энергии	Метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод конечных объёмов	Корректировка экспериментальных данных	Объединяет сильные стороны других подходов
Возможности	Предсказание силы резания, геометрии стружки, напряжений, деформаций, температур	Предсказание силы резания, геометрии стружки, напряжений, деформаций, температур	Применимо для большинства процессов обработки, но только для измеряемых параметров процесса	Позволяет создать общую структуру из некоторого множества моделей
Ограничения	Обычно применяется для двумерного анализа резания одной или двумя режущими кромками, реже для трехмерного анализа	Необходимо иметь априорные модели описывающие деформации материала заготовки, а также модель трения	Адекватно только в диапазоне параметров рассмотренных в эксперименте	Ограничено применимостью «базовой» модели (аналитической, численной, эмпирической)
Преимущества	Возможность быстрого расчета	Возможность расчета практических результатов обработки	Быстрый расчет практических результатов обработки	Расширяет возможности «базовой» модели
Недостатки	Низкая универсальность	Данный подход вычислительно «дорог»	Трудоемкость и высокая стоимость	Потребность в большом объеме данных об исследуемом процессе

## **1.7 Выводы по главе**

1. Для достижения заданных технических характеристик требуется изменять геометрию профиля зубьев конических колес, однако в справочной литературе отсутствуют рекомендации по выбору режимов обработки, на практике это приводит к необходимости использовать режимы рекомендованные для обработки аналогичных зубьев стандартного профиля, что зачастую, ведет к тому, что становится невозможно прогнозировать стойкость инструмента, шероховатость и точность обрабатываемой поверхности.

2. Обработка венцов зубчатых колес является одной из наиболее затратных по времени и ресурсам операций. Снижение основного времени обработки за счет рационального выбора режимов обработки позволяет значительно повысить эффективность процесса и в конечном итоге, сделать все изделие более конкурентоспособным.

3. В настоящее время стал возможен переход на изготовление зубчатых колес на универсальных многокоординатных станках не только в единичном но и в серийном производстве, для этого предлагается использовать специальный инструмент и программное обеспечение. Логичным развитием данного направления является разработка методов и подходов направленных на обработку венцов конических зубчатых колес, а также других сложных поверхностей деталей машин. Особенную актуальность это приобретает для малых и средних машиностроительных предприятий с широкой номенклатурой изделий.

4. Существующие модели для прогнозирования физических параметров процесса резания не адаптированы для исследования процессов

зубообработки конических зубчатых колес ввиду следующих особенностей:

- конструкция инструмента, режущая часть которого спроектирована специально для обрабатываемой пары зубчатых колес;
- кинематика процесса резания: непрерывное изменение геометрических параметров срезаемого слоя металла и углов резания;
- стружка, формируемая вершинной и боковой режущими кромками, сходя по передней поверхности резца, фрагменты стружки накладываются друг на друга, вызывая в инструменте дополнительные нагрузки.

5. Исследование физических явлений сопровождающих процесс резания и их прогнозирование по прежнему остается актуальной задачей при изучении новых процессов механической обработки, а также при оптимизации известных. Это связано с тем, что данная информация необходима для обоснованного предсказания практических результатов обработки. При исследовании обработки нестандартных профилей особое внимание уделяется вопросам влияния геометрических параметров режущей части инструмента на процесс.

6. Основой для моделей, прогнозирующих физические процессы сопровождающие резание являются методы аналитического, эмпирического, численного и гибридного моделирования. Численное моделирование с использованием МКЭ дает возможность рассчитать нагрузки, возникающие в инструменте, заготовке и срезаемой стружке непосредственно при моделировании стружкообразования. Данный подход отличает широкая функциональность и универсальность применения, а также возможность быстрого и наглядного численного эксперимента.

7. Для исследования влияния геометрии профиля зубьев конического колеса на физические явления, сопровождающие процесс резания, могут быть использованы методы и подходы, используемые при исследовании других

процессов для которых характерен съем сложной Г- или U- образной стружки (зубодолбление, зубофрезерование червячными фрезами и др.). Также справедливо будет и обратное утверждение, результаты исследования могут быть использованы для исследования иных процессов обработки резанием при которых происходит съем сложной стружки.

8. Изменение профиля обрабатываемого зуба приводит к изменению технических параметров процесса резания. Увеличение модуля приводит к увеличению длины режущей кромки и следовательно увеличению площади реза. Увеличение радиуса скругления вершины резца приводит к уменьшению деформаций стружки и снижению объема стружки снимаемого вершиной резца. Увеличение профильного угла приводит к увеличению заднего угла резания, а также уменьшает длину режущей кромки. Необходимо учесть, что влияние геометрии профиля на характеристики процесса может быть, как минимальным так и довольно значительным. Это зависит от кинематики рассматриваемого процесса и режимов обработки.



## **2 Моделирование процесса механической обработки венца конического зубчатого колеса**

### **2.1 Кинематика процесса обработки конических зубчатых колес методом обката**

Конические зубчатые колеса обрабатывают резанием обрабатывают методом обката путем воспроизведения станочного зацепления плоского воображаемого производящего колеса с зубьями обрабатываемого колеса при их взаимной обкатке (рисунок 2.1). В процессе обработки зубьев прямолинейные режущие кромки резцов 4 зуборезной головки 5 воспроизводят зубья воображаемого производящего колеса 1. Вращение заготовки 3 согласовано с вращением люльки 2 станка, на которой установлена зуборезная головка. При совместном обкатывании зуборезной головки 5 и заготовки 3 вращающиеся резцы, занимая последовательные положения, формируют продольную кривизну и профиль зуба. Зубья шестерни и колеса образуются одним и тем же плоским производящим колесом [60,76].

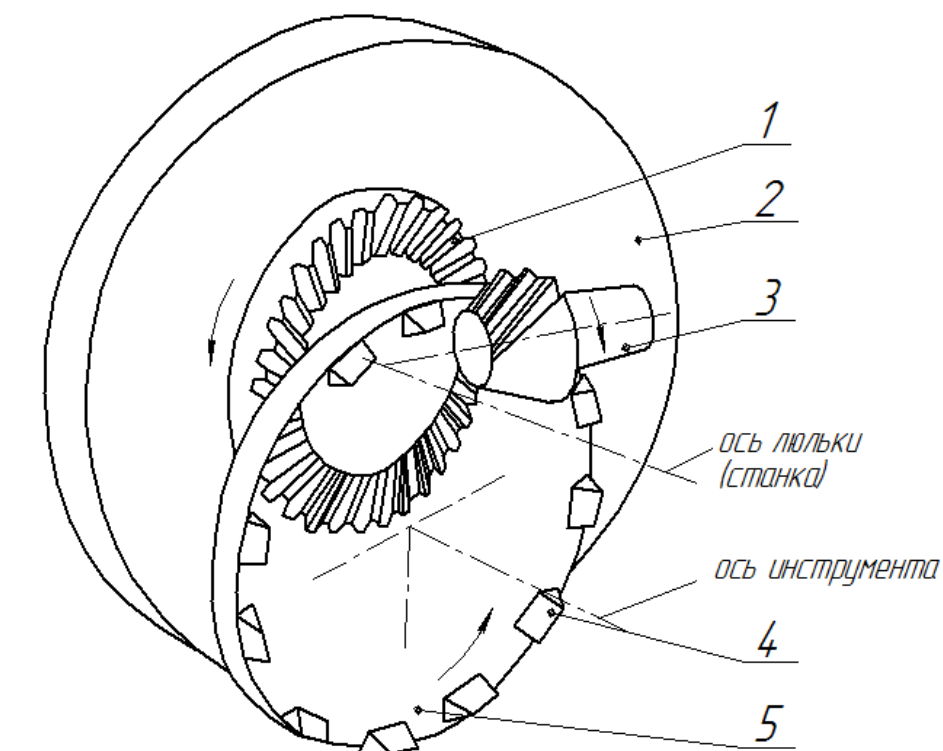


Рисунок 2.1 – Технология обработки зубьев конических зубчатых колес

В работе рассмотрена технология, при которой обе стороны каждого зуба колеса нарезают методом обката по отдельности односторонними зуборезными головками: вогнутую сторону - головками с наружными, а выпуклую - головками с внутренними резцами. Нарезания зубьев происходит по предварительно нарезанным впадинам. Этот способ применяют для нарезания зубьев колес, когда необходимо обеспечить высокое качество (6-8 я степень точности) [59].

Предварительная (черновая) обработка осуществляется методом врезания (рисунок 2.2). При нарезании зубьев методом врезания обрабатываемое колесо 2 неподвижно, а зуборезная головка 1 вращается и, перемещаясь вдоль своей оси, прорезает впадину зубьев. Резцы головки копируют свой профиль во впадине зуба. После достижения требуемой глубины впадины зуба зуборезная головка отводится, а заготовка поворачивается для обработки следующего зуба.

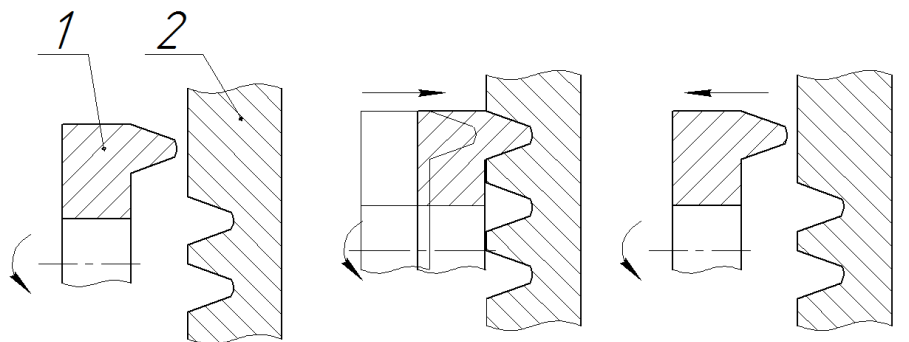


Рисунок 2.2 – Схема нарезания зубьев методом врезания

## 2.2 Общие подходы к прогностическому моделированию процесса резания конического зубчатого колеса

В ходе выполнения проекта, для решения задачи прогнозирования физических явлений, возникающих в процессе механической обработки конических зубчатых колес, разработана методика прогностического моделирования. Входные данные для моделирования: геометрия обрабатываемого профиля, технологические режимы, геометрия и материал обрабатываемого изделия, геометрия и материал режущего инструмента, кинематика резания (рисунок 2.3).

При моделировании будут приняты следующие допущения: заготовка неподвижна, все необходимые для формообразования движения совершает инструмент, инструмент абсолютно однородный и абсолютно твердый, поверхность инструмента имеет однородную структуру, обрабатываемый материал имеет геометрически и физически нелинейную структуру, деформирование заготовки описывается по методу Джонсона-Кука. Расчетная схема для моделирования представлена на рисунке 2.4.



Рисунок 2.3 – Методика прогностического моделирования

влияния геометрии профиля зуба на физические явления, возникающие в процессе резания конических зубчатых колес

Методика прогнозирования состоит из четырех этапов. Схема, иллюстрирующая предлагаемую методику, представлена в блоке II на рис. 2. На первом этапе моделирования определяем геометрию профилирующей части режущего инструмента. Для решения задачи используется подход

предложенный Р.В. Анисимовым и А.С. Тарапановым. Профиль обрабатываемой поверхности задается в торцевом сечении. Профиль задается в виде связного набора стандартных кривых (прямая, дуга окружности, эпициклоида, архимедова спираль, эвольвента). Такое задание позволяет найти неограниченное количество точек линии контакта инструментальной и номинальной поверхности. После задания геометрии торцевого сечения обрабатываемой поверхности, производится преобразования данных таким образом, чтобы получить описание процесса формообразования. Направление линии номинальной поверхности будет совпадать с искомыми режущими кромками инструмента. Преобразования осуществляются путем матричного преобразования координат в зависимости от заданной кинематики резания.

На втором этапе моделирования производим расчет параметров срезаемой стружки и кинематического изменения геометрии режущей части инструмента. Для этого будет использован аналитический метод расчета параметров срезаемого слоя на основе пространственного отображения схемы резания, предложенный А. С. Тарапановым и Г. А. Харламовым.

На рисунке 2.4 приведена общая схема процесса механической обработки конического зубчатого колеса. На рисунке приведена геометрия поперечного сечения стружки и геометрия инструмента. Приведенная геометрия стружки и инструмента является типичной в условиях обработки конических зубчатых колес резцовыми головками в середине цикла обработки выпуклой стороны зуба шестерни.

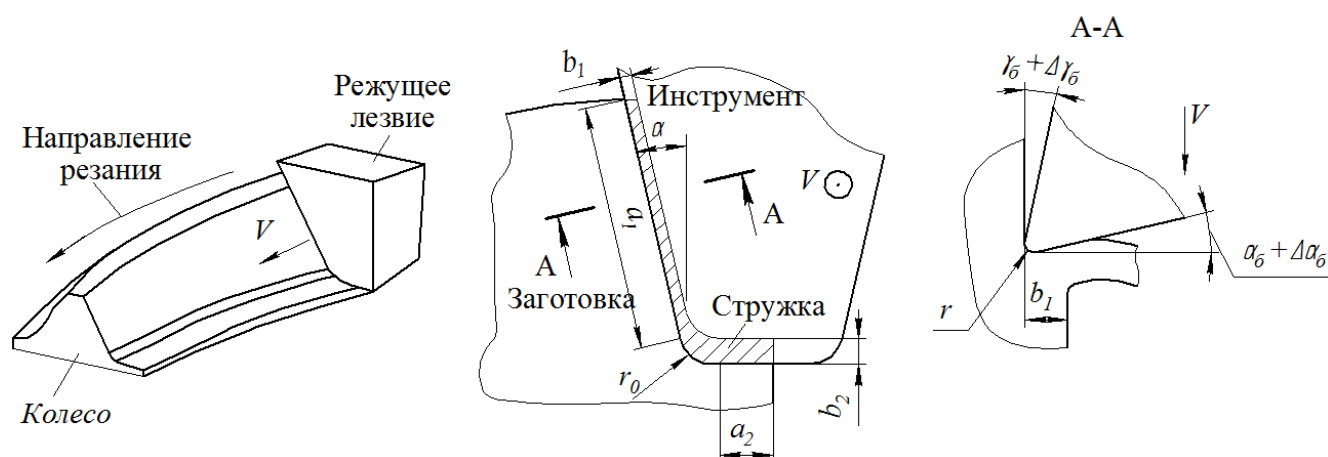


Рисунок 2.4 – Расчетные схема для определения параметров моделируемого процесса ( $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$ ,  $b_2$  – геометрические параметры стружки срезаемой боковой и вершинной режущими кромками,  $r_0$  – радиус закругления резца,  $\alpha$  – угол профиля резца)

Параметры срезаемой стружки и геометрия режущей части инструмента определяется с помощью аналитической модели с использованием универсальной методики расчета параметров срезаемого слоя, предложенной А. С. Тарапановым и Г. А. Харламовым [89] с учетом их кинематического изменения.

При моделировании приняты следующие допущения:

- заготовка неподвижна;
- все необходимые для формообразования движения совершает инструмент;
- инструмент абсолютно однородный и абсолютно твердый;
- поверхность инструмента имеет однородную структуру;
- обрабатываемый материал имеет геометрически и физически нелинейную структуру;

- деформирование заготовки описывается по методу Джонсона-Кука с использованием критерия пластичности Мизеса;
- обкат происходит по делительной окружности колеса без скольжения.

### 2.3 Аналитическое моделирование

В общем виде математическое отображение схемы резания для произвольно выбранного резца в декартовых координатах можно представить следующим образом [89]:

$$\begin{aligned} X &= f(S, V, \Delta h); \\ Y &= f(S, V, \Delta h); \\ Z &= f(S, V, \Delta h), \end{aligned} \quad (2.1)$$

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

$S$  – параметр подачи;

$V$  – параметр скорости резания;

$\Delta h$  – параметр режущего лезвия.

Расчетная схема аналитической модели представлена на рисунке 2.5. При моделировании были приняты следующие обозначения:

$\psi_1$  – угол поворота инструмента вокруг своей оси, является функцией от скорости резания  $V$ ;

$$\psi_1 = f(V).$$

$\psi_2$  – угол поворота инструмента вокруг оси воображаемого производящего колеса (люльки), является функцией от подачи  $S$ ;

$$\psi_2 = f(S).$$

$\psi_3$  – угол наклона обрабатываемого колеса,  $\psi_3$  задается входными параметрами и является константой;

$$\psi_3 = \text{const.}$$

$\psi_4$  – угол поворота обрабатываемого колеса вокруг своей оси, является функцией от подачи  $S$ ;

$$\psi_4 = g(S).$$

$r_n$  – расстояние между вершиной режущего лезвия и осью симметрии инструмента;

$r_1$  – расстояние между осью инструмента и осью симметрии люльки;

$a$  – исследуемая точка принадлежащая режущей кромке инструмента, взятая произвольно, имеет координаты  $X, Y, Z$ .



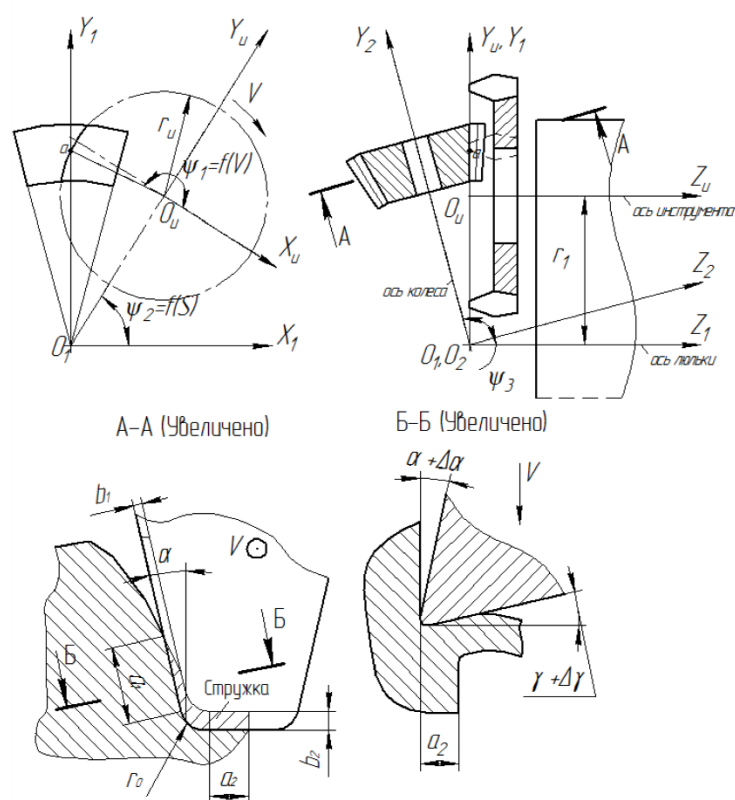


Рисунок 2.5 – Расчетная схема для определения параметров моделируемого процесса ( $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$ ,  $b_2$  – геометрические параметры стружки, срезаемой боковой и вершинной режущими кромками;  $r_0$  – радиус закругления резца;  $\alpha$  – угол профиля резца;  $S$  – параметр подачи;  $V$  – параметр скорости резания;  $\psi_1$  – угол поворота инструмента вокруг своей оси, является функцией от скорости резания  $V$ ;  $\psi_2$  – угол поворота инструмента вокруг оси воображаемого производящего колеса (люльки), является функцией от подачи  $S$ ;  $\psi_3$  – угол наклона обрабатываемого колеса,  $\psi_3$  задается входными параметрами и является константой;  $r_1$  – расстояние между вершиной режущего лезвия и осью симметрии инструмента;  $r_1$  – расстояние между осью инструмента и осью симметрии люльки;  $a$  – исследуемая точка, принадлежащая режущей кромке инструмента.  $\alpha$  и  $\Delta\alpha$  – задний угол и кинематическое изменение заднего угла;  $\gamma$  и  $\Delta\gamma$  – передний угол и кинематическое изменение переднего угла

Математическое отображение процесса резания зубьев конических зубчатых колес было получено при осуществлении последовательных итераций, таблица 2.1.

Таблица 2.1 – Таблица последовательных преобразований для получения математического описания процесса формообразования, соответствующего нарезанию конического зубчатого колеса

Номер преобразования	Математическое описание	Пояснения
0	$x_0 = x(\Delta h)$ $y_0 = y(\Delta h)$ $z_0 = z(\Delta h)$	Описание торцевого сечения профиля инструмента
1	$x_1 = x_0 \cdot \cos \psi_1 - y_0 \cdot \sin \psi_1$ $y_1 = y_0 \cdot \cos \psi_1 + x_0 \cdot \sin \psi_1$	Вращение профиля вокруг оси фрезы
2	$x_2 = x_1 \cdot \cos \psi_2 - y_1 \cdot \sin \psi_2$ $y_2 = y_1 \cdot \cos \psi_2 + x_1 \cdot \sin \psi_2$	Поворот системы координат на угол скрещивания осей инструмента и люльки
3	$x_3 = x_2 + x'$ $y_3 = y_2 + y'$	Перемещение системы координат в центр люльки
4	$x_4 = x_3$ $y_4 = y_3 \cdot \cos \psi_3 - z_3 \cdot \sin \psi_3$ $z_4 = z_3 \cdot \cos \psi_3 + y_3 \cdot \sin \psi_3$	Поворот системы координат на угол наклона зубчатого колеса
5	$x_5 = x_4 \cdot \cos \psi_4 + z_4 \cdot \sin \psi_4$ $y_5 = y_4$ $z_5 = y_4 \cdot \cos \psi_4 - z_4 \cdot \sin \psi_4$	Вращение полученной системы относительно оси колеса

В таблице 2.1:

$x_n, y_n, z_n$  – координаты точек поверхности после текущей итерации;

$x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1}$  – уравнение функции, полученное с предыдущего преобразования;

$\psi_n$  – значение параметра соответствующего текущему преобразованию.

Параметры  $x(\Delta h)$ ,  $y(\Delta h)$  и  $z(\Delta h)$  определяют торцевое сечение профиля инструмента, значение данных параметров меняется в зависимости от исследуемой точки, являются функцией от параметра режущего лезвия  $\Delta h$ .

Сформируем выражение математического описания процесса формообразования.

Шаг 0. Описание торцевого сечения профиля инструмента:

$$x_0 = x(\Delta h)$$

$$y_0 = y(\Delta h) ;$$

$$z_0 = z(\Delta h)$$

Шаг 1. Вращение профиля вокруг оси инструмента:

$$x_1 = x(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 - y(\Delta h) \cdot \sin \psi_1$$

$$y_1 = y(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 + x(\Delta h) \cdot \sin \psi_1 ;$$

$$z_1 = z(\Delta h)$$

Шаг 2. Поворот системы координат на угол скрещивания осей инструмента и люльки:

$$x_2 = (x(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 - y(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \cos \psi_2 - (y(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 + x(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \sin \psi_2$$

$$y_2 = (y(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 + x(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \cos \psi_2 + (x(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 - y(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \sin \psi_2 ;$$

$$z_2 = z(\Delta h)$$

Шаг 3. Перемещение системы координат в центр люльки:

$$x_3 = (x(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 - y(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \cos \psi_2 - (y(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 + x(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \sin \psi_2 + x'$$

$$y_3 = (y(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 + x(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \cos \psi_2 + (x(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 - y(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \sin \psi_2 + y' ;$$

$$z_3 = z(\Delta h)$$

Шаг 4. Поворот системы координат на угол наклона зубчатого колеса:

$$x_4 = (x(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 - y(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \cos \psi_2 - (y(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 + x(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \sin \psi_2 + x'$$

$$y_4 = ((y(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 + x(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \cos \psi_2 + (x(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 - y(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \sin \psi_2 + y') \cdot \cos \psi_3 - z(\Delta h) \cdot \sin \psi_3 ;$$

$$z_4 = z(\Delta h) \cdot \cos \psi_3 + ((y(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 + x(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \cos \psi_2 + (x(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 - y(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \sin \psi_2 + y') \cdot \sin \psi_3$$

Шаг 5. Вращение полученной системы относительно оси колеса:

Получаем конечное выражение, описывающее движение всей системы в процессе формообразования:

$$\begin{aligned}
x_5 &= \{(x(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 - y(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \cos \psi_2 - (y(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 + x(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \sin \psi_2 + x'\} \cdot \cos \psi_4 \\
&+ \{z(\Delta h) \cdot \cos \psi_3 + ((y(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 + x(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \cos \psi_2 + (x(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 - y(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \sin \psi_2 + y') \cdot \sin \psi_3\} \cdot \sin \psi_4 \\
y_5 &= ((y(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 + x(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \cos \psi_2 + (x(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 - y(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \sin \psi_2 + y') \cdot \cos \psi_3 - z(\Delta h) \cdot \sin \psi_3 \\
z_5 &= (((y(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 + x(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \cos \psi_2 + (x(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 - y(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \sin \psi_2 + y') \cdot \cos \psi_3 - z(\Delta h) \cdot \sin \psi_3) \cdot \cos \psi_4 \\
&- \{z(\Delta h) \cdot \cos \psi_3 + ((y(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 + x(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \cos \psi_2 + (x(\Delta h) \cdot \cos \psi_1 - y(\Delta h) \cdot \sin \psi_1) \cdot \sin \psi_2 + y') \cdot \sin \psi_3\} \cdot \sin \psi_4
\end{aligned} \quad (2.2)$$

Полученное пространственное отображение схемы резания позволяет просчитать положение каждой отдельно взятой точки режущей кромки в пространстве в любой момент времени и, соответственно, на дальнейшем этапе моделирования позволит определить кинематическое изменение рабочих углов инструмента и толщину срезаемого слоя.

## 2.4 Определение кинематических параметров процесса 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 2.6) с привлечением численных методов.

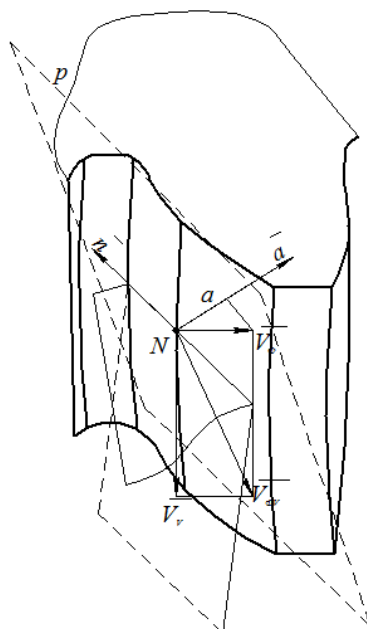


Рисунок 2.6 – Схема определения толщины слоя, срезаемого при обработке конического зубчатого колеса

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

$$\Delta\alpha = \arctg \frac{\sqrt{X_{\phi}^2 + Y_{\phi}^2 + Z_{\phi}^2}}{\sqrt{X_V^2 + Y_V^2 + Z_V^2}}, \quad (2.3)$$

где  $X_{\phi}, Y_{\phi}, Z_{\phi}$  – координаты вектора скорости в направлении подачи:

$$\vec{V}_{\phi} = \{X_{\phi}; Y_{\phi}; Z_{\phi}\} = \left\{ \frac{\partial x}{\partial \psi_2} \frac{d\psi_2}{dt} V_x; \frac{\partial y}{\partial \psi_2} \frac{d\psi_2}{dt} V_y; \frac{\partial z}{\partial \psi_2} \frac{d\psi_2}{dt} V_z \right\}$$

$X_V, Y_V, Z_V$  – координаты вектора движения резания:

$$\vec{V}_V = \{X_V; Y_V; Z_V\} = \left\{ \frac{\partial x}{\partial \psi_1} \frac{d\psi_1}{dt} V_x; \frac{\partial y}{\partial \psi_1} \frac{d\psi_1}{dt} V_y; \frac{\partial z}{\partial \psi_1} \frac{d\psi_1}{dt} V_z \right\}$$

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:

Суммарным вектором:

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

Вектором  $\vec{n}$

$$\vec{n} = \{X_n; Y_n; Z_n\}$$

Вектором  $\vec{z}$

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

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

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

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

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

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

$$a = \frac{X_a X_\phi + Y_a Y_\phi + Z_a Z_\phi}{\sqrt{X_a^2 + Y_a^2 + Z_a^2}} \quad (2.4)$$

Кинематическое изменение переднего угла определяется по формуле:

$$\Delta\gamma = \arctg \frac{a}{\sqrt{X_v^2 + Y_v^2 + Z_v^2}} \quad (2.5)$$

## 2.5 Численное моделирование

Для численного моделирования процесса обработки использовалась программа Deform3D. Программа позволяет реализовать конечно элементный анализ процессов резания и использует для этого неявный метод Лагранжа с непрерывно перестраивающейся сеткой.

В постпроцессоре программы происходит моделирование резания методом конечных элементов путем генерации сетки для инструмента и заготовки. С целью увеличения точности расчетов в зонах, где заготовка подвергается повышенной локальной нагрузке, используется меньшая, непрерывно перестраивающаяся в процессе моделирования сетка. Моделирование обработки с помощью «мелкой» сетки используется только в зонах деформации и для стружки. Влияние процесса обработки на состояние заготовки не является предметом исследования данного проекта, поэтому для остальной части заготовки используется крупная сетка.

Решающее значение на качество результатов оказывает корректное описание поведения материала при пластическом деформировании и корректное определение трения между стружкой и передней поверхностью инструмента.

Существует два широко используемых при численном моделировании подхода к учету трения: модель Кулона для численного моделирования и модель касательного трения [28]. В модели трения Кулона сила трения возрастает пропорционально нормальной силе. Модель касательного трения определяет величины сдвига на основе предела текучести материала заготовки. При высоких контактных давлениях, таких, которые возникают при резании, результаты расчета касательного напряжения, которые дает модель Кулона, превышают предел текучести материала. Таким образом, модель трения Кулона не применима для численного моделирования резания [8,35]. Поэтому для учета трения используем модель касательного трения.

При использовании МКЭ для моделирования обработки резанием, важную роль играет выбор точной и надежной модели для описания процесса деформирования материала заготовки. В данной работе используется модель Джонсона и Кука [18]. Данная модель позволяет обеспечить достаточно точное описание поведения материала в условиях больших деформаций в сочетании с высокими температурами. Предел текучести обрабатываемого материала по модели Джонсона и Кука описывается зависимостью 2.6.

$$\sigma_T = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot \left( 1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{\vartheta - \vartheta_0}{\vartheta_M - \vartheta_0} \right)^m \right) \quad (2.6)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести обрабатываемого материала, Па;

$\varepsilon$  – эквивалентная пластическая деформация, 1/с;

$v$  - текущая температура обрабатываемого материала, К;

$v_M$  - текущая плавления обрабатываемого материала, К;

$v_0$  - начальная температура, К;

$A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$ ,  $m$  – константы, характеризующие физические свойства обрабатываемого материала.

## **2.6 Алгоритм моделирования процесса обработки конического зубчатого колеса**

Алгоритм прогностического моделирования реализуется в три этапа, рисунок 2.7. Для моделирования процесса обработки конического зубчатого колеса был разработан специальный алгоритм результатом реализации которого являются данные о распределении температурных полей и исследовании силы резания в инструменте, заготовке и стружке.

Разработанный алгоритм реализуется в три этапа: (схема, иллюстрирующая предлагаемый алгоритм, приведена на рисунке 2.8. Схема выполнена в нотации IDEF0.





Рисунок 2.7 – Схема алгоритма прогностического моделирования

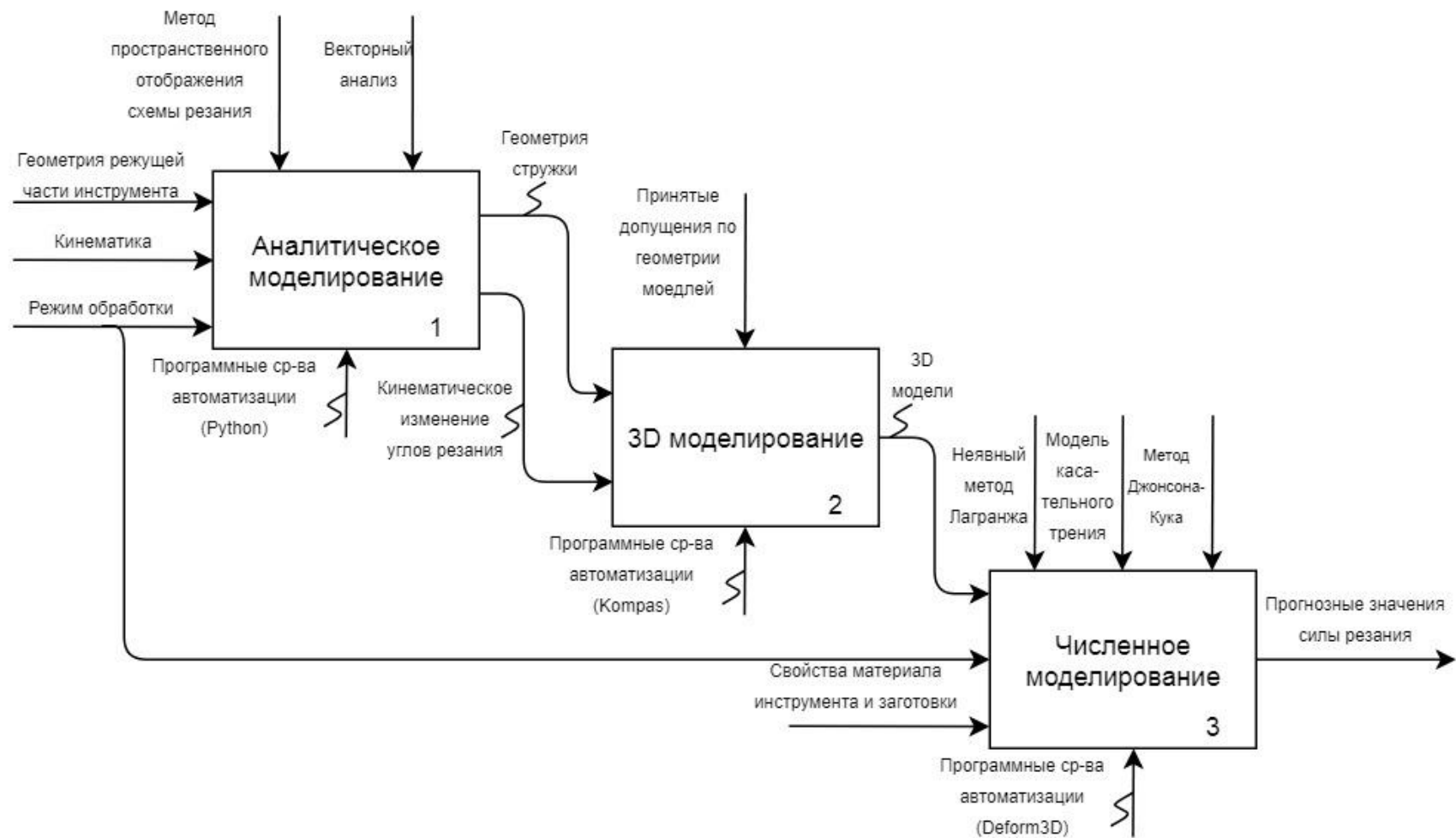


Рисунок 2.8 – Схема алгоритма реализации модели механической обработки зубчатых конических колес

### **2.6.1 Аналитическое моделирование процесса обработки конического зубчатого колеса**

Описание процесса формообразования (рисунок 2.10, поз. 2-4) происходит путем последовательного преобразования зависимостей, описывающих положение исследуемой точки, принадлежащей режущей кромке инструмента. В начале (рисунок 2.10, поз. 2) положение точки описывается геометрией режущих кромок инструмента, затем преобразуется в соответствии с теми перемещениями, которые совершает инструмент и заготовка.

Параметр скорости резания  $V$  характеризует перемещение инструмента относительно заготовки в направлении главного движения резания. Параметр  $V$  изменяется в интервале от  $V_{\min}$  до  $V_{\max}$  с шагом  $\Delta V$ .  $\Delta V$  может быть выбрано произвольно, в зависимости от того сколько сечений необходимо рассмотреть в ходе исследования. При исследовании процесса в одном сечении параметр  $V$  надо рассматривать как константу. Параметр подачи  $\Phi$  характеризует перемещение инструмента относительно заготовки в направлении движения подачи.

Параметр  $\Phi$  изменяется в интервале от  $\Phi_{\min}$  до  $\Phi_{\max}$  с шагом  $\Delta\Phi$ .  $\Delta\Phi$  равно перемещению инструмента между двумя последовательными резами. Параметр режущей кромки  $h$  характеризует расположение исследуемой точки на режущей кромке. Параметр  $h$  изменяется в интервале от 0 до  $h_{\max}$  с шагом  $\Delta h$ .  $\Delta h$  выбирается произвольно, в зависимости от сложности геометрии режущей кромки.

Расчет кинематического изменения переднего и заднего углов резания и расчет геометрии стружки (рисунок 2.10, поз. 11) происходит путем анализа описания процесса формообразования в позиции, характеризующейся параметрами  $V$ ,  $\Phi$ ,  $\Delta h$ .

Результатом выполнения аналитического этапа моделирования являются массивы данных, содержащих информацию о кинематическом изменении переднего и заднего углов, а также толщины снимаемой стружки в каждой исследуемой точке в каждый исследуемый момент обработки.

Выводятся зависимости для расчета движения режущей кромки инструмента в процессе резания, для этого используется метод матричного преобразования координат.

Ранее приведена методика расчета толщины срезаемой стружки в исследуемой точке, а также кинематического изменения заднего и переднего углов резания, также в исследуемой точке. Которая основана на векторном анализе пространственного отображения схемы резания, для расчета геометрических параметров срезаемой стружки и кинематического изменения переднего и заднего углов резания.

В процессе моделирования представляем боковую и вершинную режущий кромки инструмента в виде двух массивов точек:  $[n_{б1}, n_{б2}, \dots, n_{бk}]$  и  $[n_{в1}, n_{в2}, \dots, n_{вm}]$ , лежащих друг от друга на равных расстояниях  $l_{б}$  и  $l_{в}$  соответственно, рисунок 2.9.

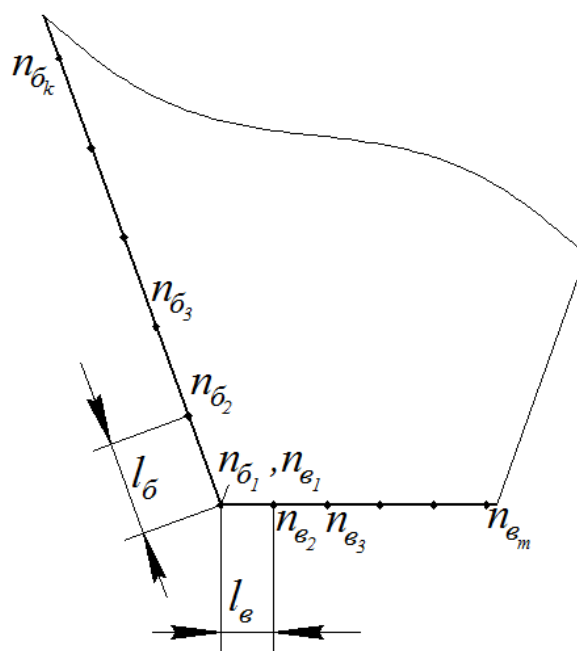


Рисунок 2.9 – Схема разбиения режущих лезвий на точки

Далее, согласно методике, описанной в разделе 2.3, находим координаты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  каждой точки в исследуемый момент обработки. Затем, согласно методике, описанной в разделе 2.4, определяем точки режущей кромки, участвующие в процессе резания, для них должно выполняться условие:  $a > 0$ .

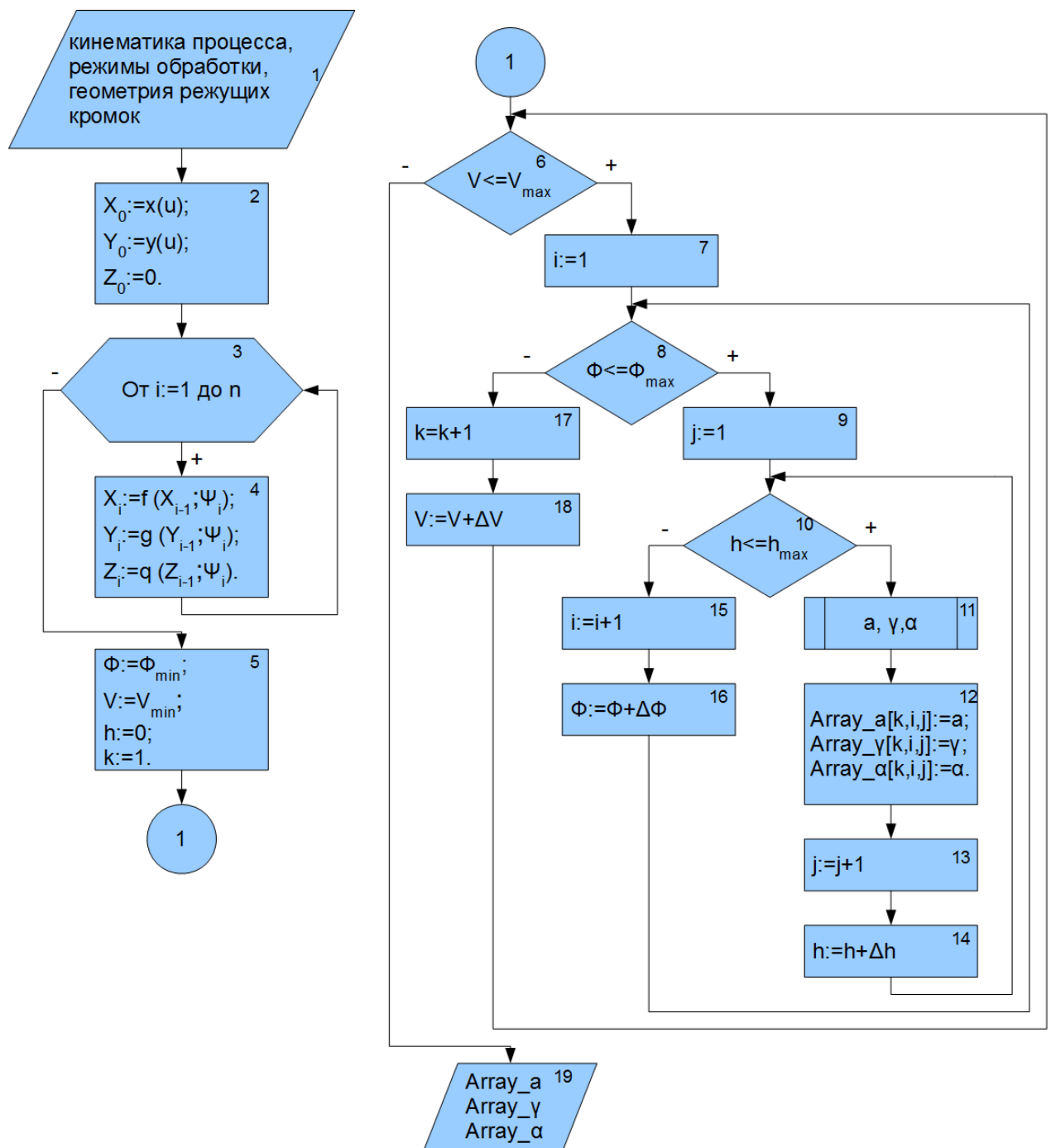


Рисунок 2.10 – Алгоритм аналитического этапа моделирования

Для точек, принадлежащих элементам режущих кромок, участвующих в резании, находим кинематическое изменение переднего и заднего углов резания. Имея данные о параметрах толщины срезаемой стружки и

кинематическом изменении углов для каждой точки, рассчитываем искомую геометрию срезаемой стружки и значения кинематического изменения углов резания режущих кромок.

### **2.6.2 Трехмерное моделирование режущего инструмента и обрабатываемой части заготовки**

Входными данными для численного моделирования процесса обработки конического зубчатого колеса являются трехмерные модели инструмента и заготовки. Моделирование происходит с учетом данных о геометрических параметрах снимаемой стружки и кинематическом изменении переднего и заднего углов резания, полученных на первом этапе реализации алгоритма.

В качестве модели режущего инструмента выступает объект, который представляет собой элемент резца и имеющий геометрию, аналогичную геометрии режущих лезвий резца для обработки конического зубчатого колеса. С целью упрощения модель лишена конструктивных элементов, не оказывающих влияния на процесс резания, рисунок 2.11.

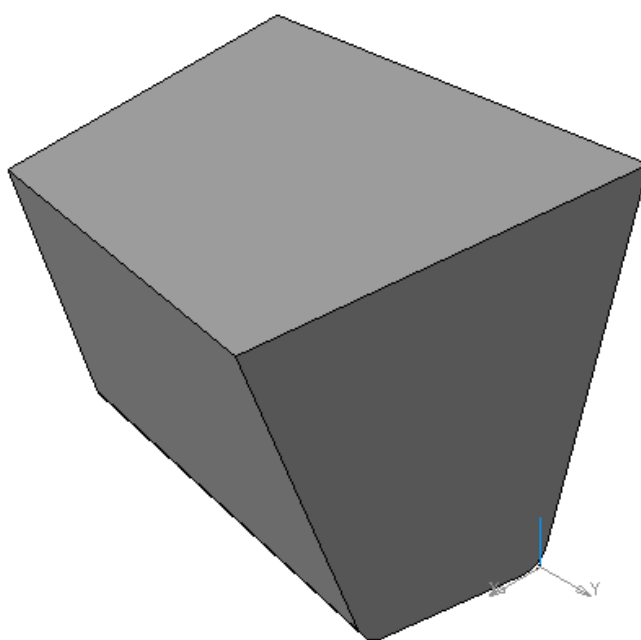


Рисунок 2.11 – Трехмерная твердотельная модель резца режущего инструмента

Модель заготовки – это элемент конического зубчатого колеса, который представляет собой обрабатываемую боковую сторону зуба и впадину зуба, рисунок 2.12.

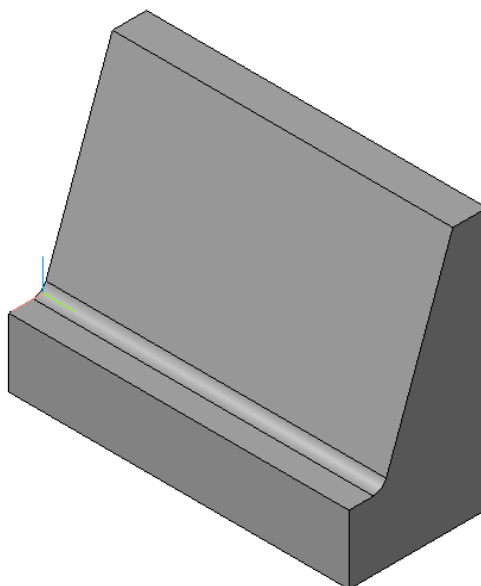


Рисунок 2.12 – Трехмерная твердотельная модель обрабатываемой заготовки



С целью упрощения моделирования заготовка рассматривается не с криволинейной, а с прямолинейной обрабатываемой впадиной с учетом того, что длина хода резца остается неизменной. Данное допущение распространено при экспериментальном и аналитическом моделировании процессов зуборезания [53].

Модели создаются в среде Kompas, и сохраняются с использованием формата данных \*.STL.

### 2.6.3 Численное моделирование процесса резания

Модели инструмента и заготовки экспортируются в среду численного моделирования DEFORM 3D. Формат данных STL не может быть использован для численного моделирования, поэтому в среде конечно-элементного анализа происходит перестройка моделей. Для генерации новой геометрии используются тэтроидальные блоки. Точность окончательной геометрии зависит от размеров тэтроидальных блоков, так как для моделирования резания используется сетка с большим количеством элементов ( $>20\ 000$ ), плотность элементов высока и новая геометрия допустимо близка к исходной геометрии.

Модели инструмента и заготовки располагаются таким образом, чтобы при резании и боковой и вершинной режущими кромками снималась стружка заданной геометрии, рисунок 2.13.

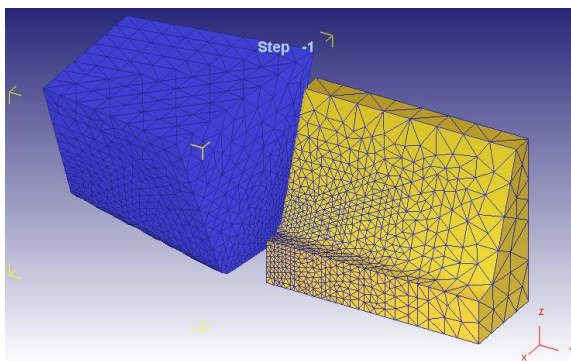


Рисунок 2.13 – Подготовленные и установленные для численного эксперимента модели инструмента и заготовки

Применяемое для трехмерного моделирования деформации программное обеспечение основано на применении неявного метода Лагранжа, т.е. сетка конечных элементов формирует заготовку и последовательно деформируется с ней. При этом неструктурированная тетраэдральная сетка конечных элементов моделируется с использованием специальной системы автоматической генерации сетки. Данный метод подходит для моделирования переходных и дискретных процессов обработки (разрыв сетки при резании), однако имеет недостаток, а именно то, что он вычислительно «дорог», так как для относительно небольших временных шагов требуется получать переходные решения.

Заготовка моделируется как вязко-пластичное тело, напряжение течения для нее является функцией от деформации, скорости деформации и температуры. Деформации инструмента при резании незначительны по сравнению с деформациями обрабатываемой заготовки, поэтому режущий инструмент моделируется идеально жестким, и назначаются только его теплофизические свойства. Таким образом, при моделировании механической обработки используются известные и широко используемые методы исследования.

## **2.7 Исследование физических процессов, возникающих в инструменте, заготовке и стружке в процессе механической обработки конического зубчатого колеса**

На рисунке 2.14 представлена используемая для моделирования процесса обработки конических зубчатых колес схема. Геометрия стружки была получена при помощи аналитического моделирования процесса резания, рассмотренные условия резания являются типичными для обработки конического зубчатого колеса в середине реза.

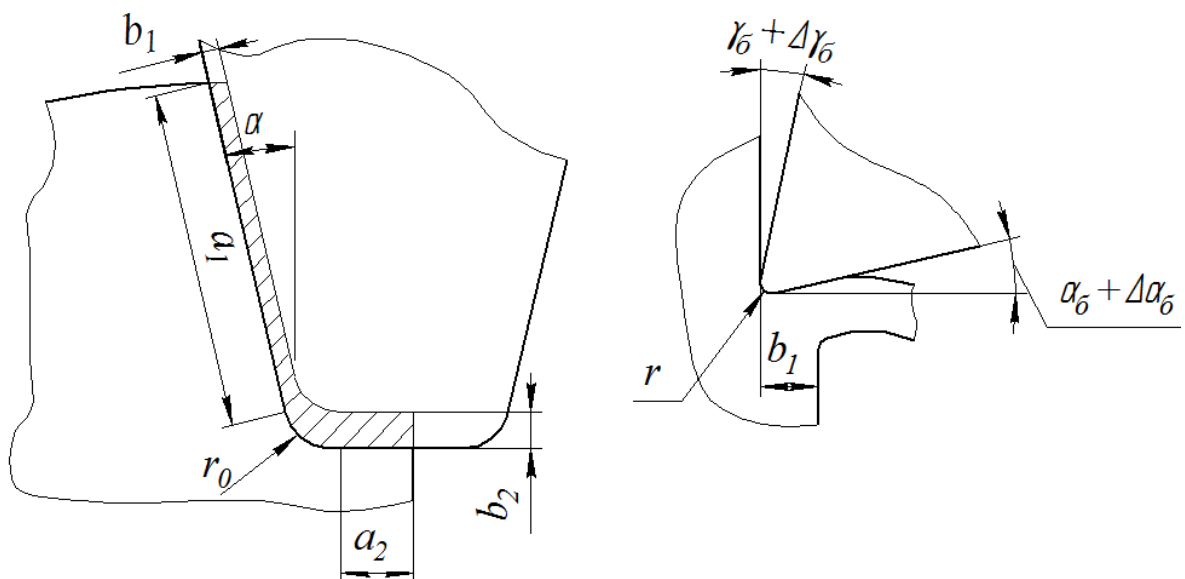


Рисунок 2.14 – Расчетная схема для численного моделирования

Свойства материала заготовки, необходимые для использования в формуле 2.6, приведены в таблице 2.2, данные взяты из [22].

Таблица 2.2 – Параметры материала заготовки

Параметр	$\varepsilon$	A	B	C	n	m
Ед. изм.	1/с	МПа	МПа	-	-	-
Значение	1	560	400	0,022	0,2	1,0

Исходные данные для рассматриваемого случая моделирования приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Исходные данные для численного моделирования

Параметр процесса резания	Значение
1	2
Толщина стружки снимаемой боковой режущей кромкой $b_1$ , мм	0,2
Толщина стружки снимаемой вершинной режущей кромкой $b_2$ , мм	0,07
Длина боковой режущей кромки $a_1$ , мм	2,9
Длина вершинной режущей кромки $a_2$ , мм	0,4
Профильный угол резца $\alpha$ , град	20
Радиус закругления вершины резца $r_0$ , мм	0,2
Радиус закругления режущих кромок $r$ , мм	0,01
Задний угол резания боковой режущей кромки $\alpha_b$ , град	5
Кинематическое изменение заднего угла боковой режущей кромки $\Delta\alpha_b$ , град	0,025
Передний угол резания боковой режущей кромки $\gamma_b$ , град	6
Кинематическое изменение переднего угла боковой режущей кромки $\Delta\gamma_b$ , град	0,015
Задний угол резания вершинной режущей кромки $\alpha_v$ , град	8
Кинематическое изменение заднего угла вершинной режущей кромки $\Delta\alpha_v$ , град	0,02
Передний угол резания вершинной режущей кромки $\gamma_v$ , град	6
Кинематическое изменение переднего угла вершинной режущей кромки $\Delta\gamma_v$ , град	0,012
Скорость резания $V$ , м/мин;	100
Материал инструмента	Карбид вольфрама
Материал заготовки	16MnCr5

## 2.8 Теоретический анализ процесса резания

При резании конического зубчатого колеса толщина снимаемой стружки не является постоянной вдоль режущих кромок. Особенно отличаются толщины стружек, снимаемых боковой и вершинной режущими кромками. В

случае, если бы кромки работали отдельно друг от друга, стружка по ним сходила бы разной толщины. Однако, из-за того, что форма стружки L-образная, направления потоков стружек пересекаются, накладываются друг на друга, и в результате стружка приобретает общее направление и скорость схождения.

Реальное направление потока схода стружки не совпадает ни с одним из направлений схода стружек от каждой из режущих кромок в отдельности. Поэтому ширина стружки, радиус стружкообразования, распределение толщины вдоль режущих кромок, длина контакта стружки и режущих кромок находятся под влиянием процесса сложного стружкообразования. Это позволяет сделать предположением о том, что на тепловые процессы в инструменте, заготовке и стружке влияет процесс сложного стружкообразования.

На рисунке 2.15 показано начало процесса формирования стружки происходящего при резании конического зубчатого колеса, полученного в результате моделирования. Первый контакт инструмента и заготовки происходит по боковой режущей кромке, пока работает только боковая кромка, образуется стружка с малым радиусом завивания. В течение первых 0,1 мс в процесс резания входит вершинная режущая кромка. Радиус завивки стружки изменяется в связи с изменением ее геометрии, и на всем остальном протяжении резания радиус завивки стружки неизменен.

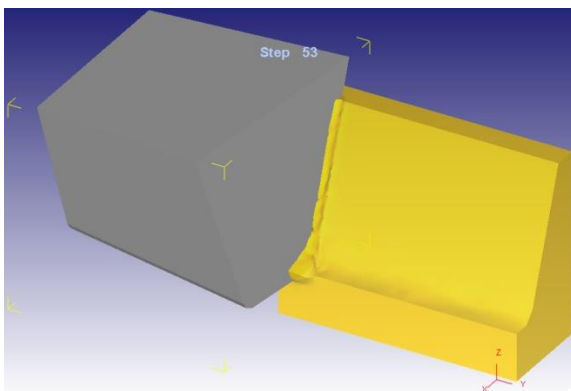


Рисунок 2.15 – Формирование стружки в процессе резания

Для детальной оценки температуры в моделируемых объектах режущее лезвие инструмента условно разделяем на три участка: вершинную режущую кромку, радиусную режущую кромку и боковую режущую кромку, рисунке 2.16.

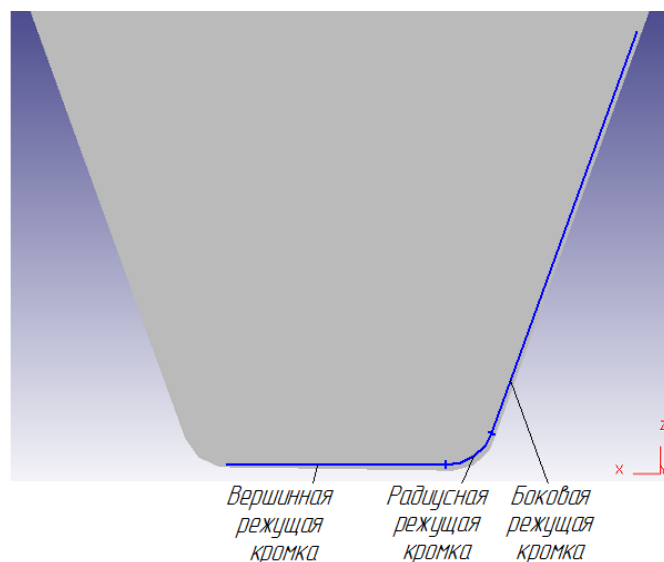


Рисунок 2.16 – Разделение режущей кромки лезвия на участки

## 2.9 Исследование тепловых процессов

На рисунке 2.17 представлено распределение температуры в части стружки, отделяемой от заготовки. Для того, чтобы найти максимальную температуру на участке, значение температуры всех слоев, находящихся в контакте с режущей кромкой инструмента, сравниваются и выбирается наибольшая.

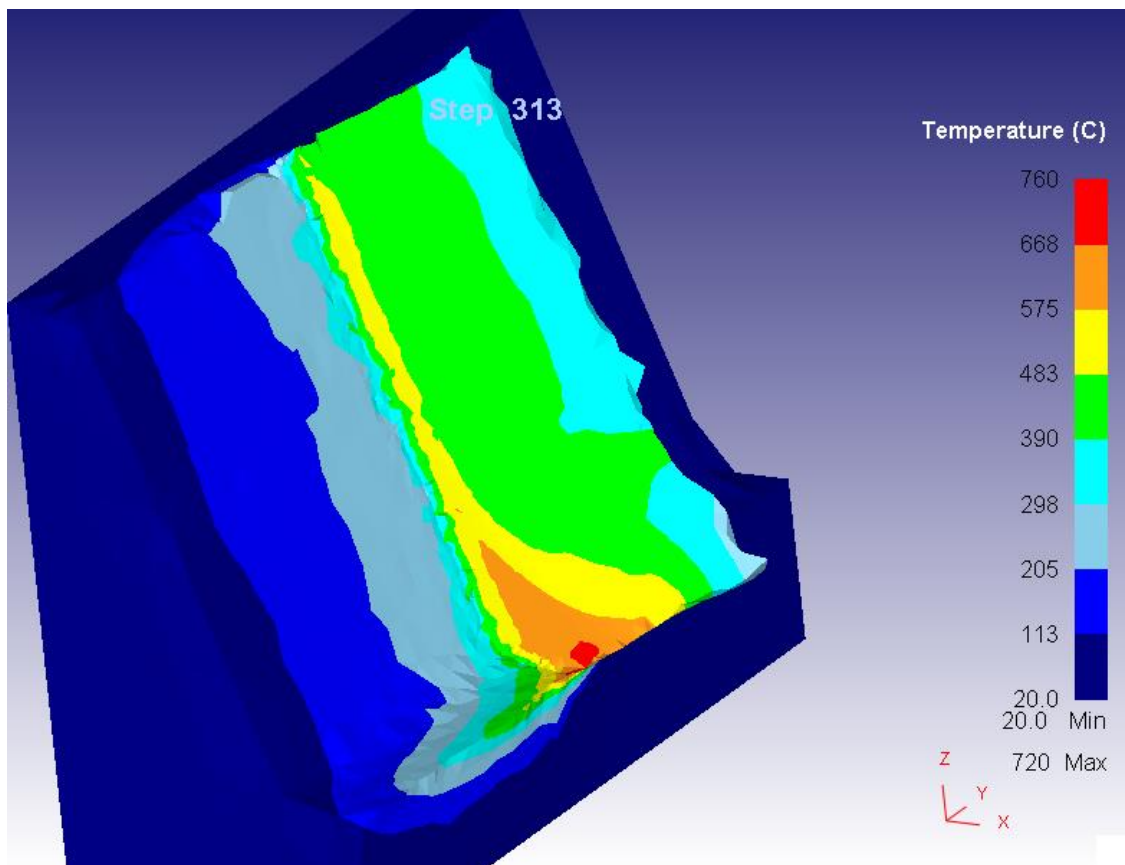


Рисунок 2.17 – График распределения поля температуры в стружке в момент резания  $t=1,5$  мс

Максимальная температура стружки наблюдается у корня стружки вдоль режущих кромок. Температура увеличивается от зоны боковой поверхности через радиус скругления к поверхности впадины. Самая высокая температура наблюдается в зоне пересечения радиуса скругления и поверхности впадины. Однако существенный пик в распределении температур отсутствует.

Развитие среднего значения температуры на трех участках представлено на рисунке 2.18. Как только инструмент полностью входит в контакт с заготовкой, распределение температуры становится постоянным во времени.

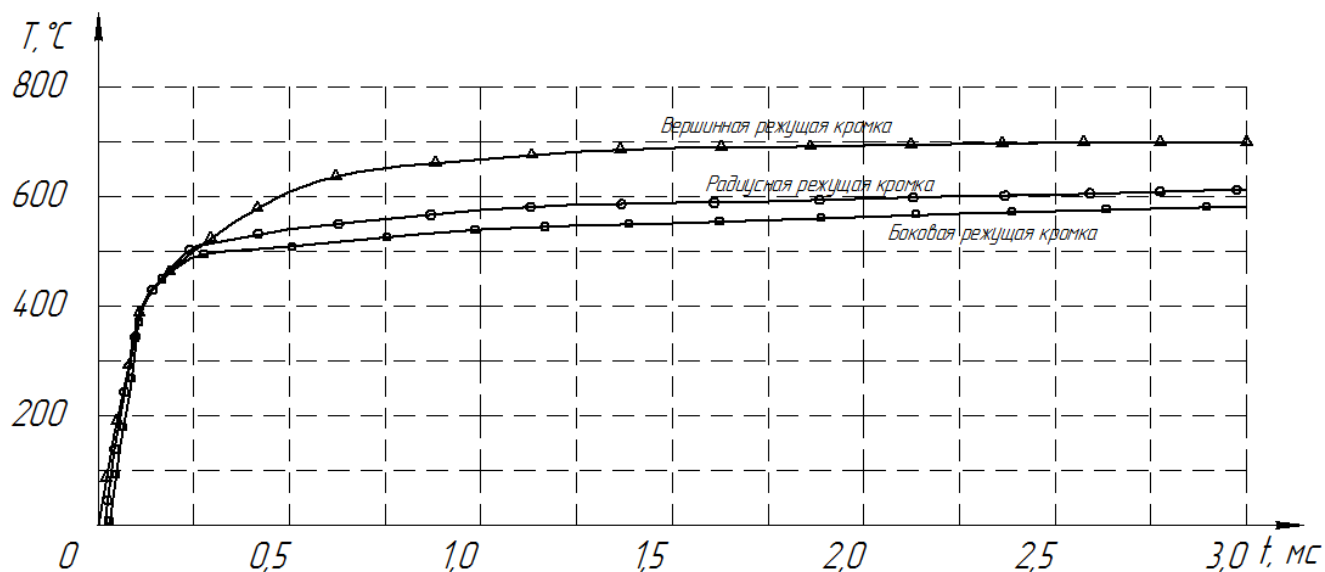


Рисунок 2.18 – График изменения максимальной температуры на участках стружки, снимаемых различными режущими кромками

Анализируя график, можно сделать вывод о том, что в моделируемых условиях режущие кромки инструмента не подвергаются повышенной тепловой нагрузке, вызванной сложным стружкообразованием, так как температура стружки, снимаемой различными режущими кромками, значительно не отличается. Вместе с тем, не только температура стружки влияет на распределение температуры вдоль режущей кромки, но и процесс переноса тепла внутрь инструмента.

На рисунке 2.19 представлен график изменения значения теплового потока в заготовке в процессе резания. Анализируя график, можно сделать вывод о том, что значительный пик в значении теплового потока возникает в момент вхождения в зону резания вершинной режущей кромки. После входа всех режущих кромок в зону резания, значение теплового потока значительно не изменяется и становится квазипостоянным.



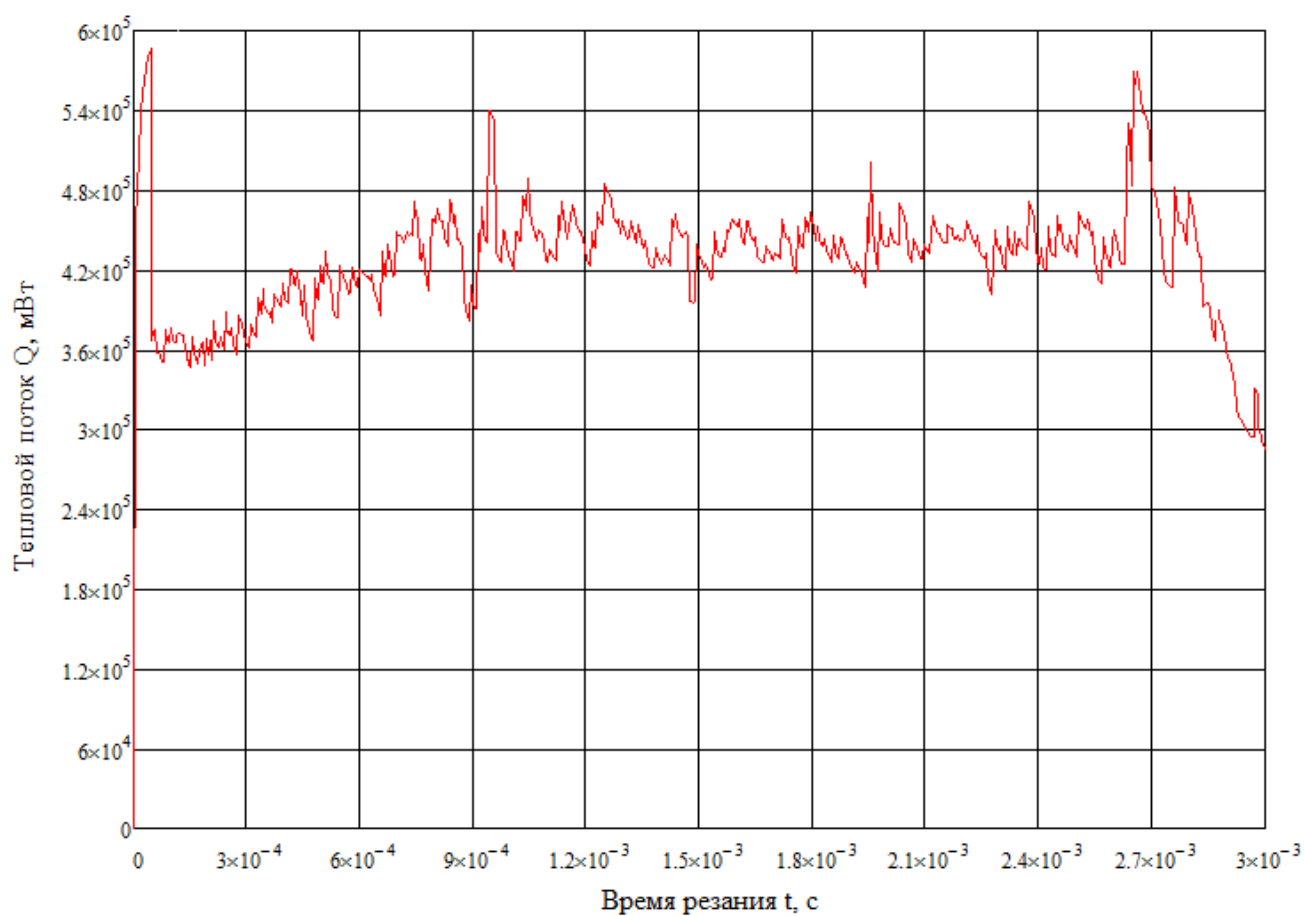


Рисунок 2.19 – Тепловой поток в заготовке

На рисунке 2.20 представлено распределение температуры на передней поверхности резца, в момент резания  $t=1,5$  мс. Для того, чтобы найти максимальную температуру на участке, значение температуры всех слоев, инструмента сравниваются и выбирается наибольшая.

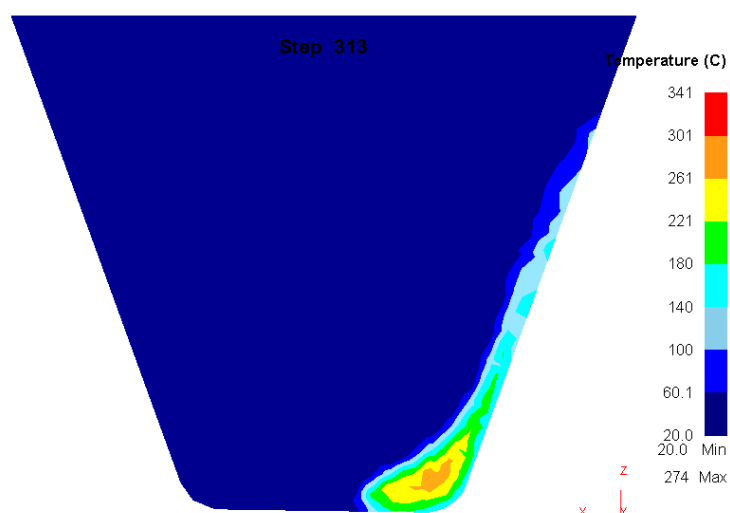


Рисунок 2.20 – Поле распределения температуры на передней поверхности инструмента в момент времени  $t=1,5$  мс

На рисунке 2.21 приведены максимальные температуры для различных элементов резца в различные промежутки времени. Во всех случаях температурный максимум наблюдается на участке, прилегающем к радиусной режущей кромке.

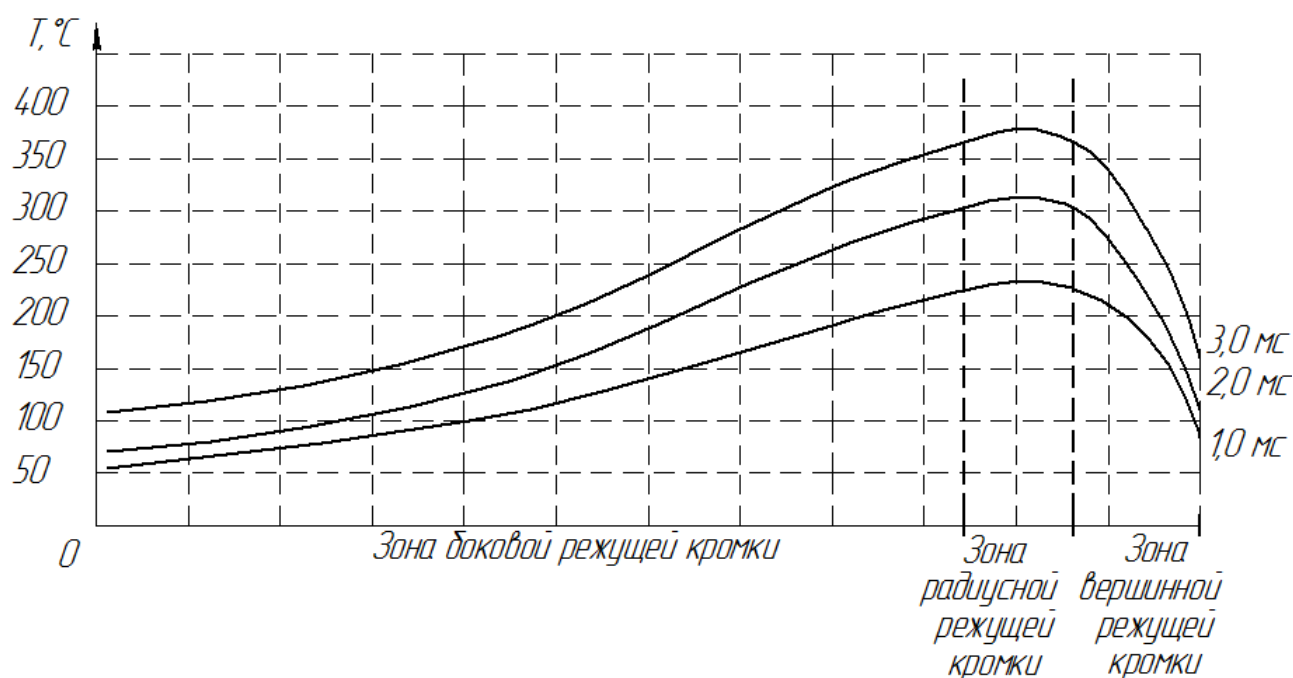


Рисунок 2.21 – Графики изменения максимальной температуры вдоль режущих кромок инструмента

Боковая режущая кромка первой вступает в процесс резания и, следовательно, долгое время влияет на тепловые процессы. Вершинная режущая кромка входит в процесс резания последней. Температура впадины выше, чем температура на боковой поверхности зуба. Разница температур двух тел является движущей силой для процесса теплопередачи. Разница температур между режущей кромкой и впадиной зуба больше по сравнению с разницей температур боковой поверхности зуба и боковой режущей кромкой инструмента. В сочетании с тем, что боковая режущая кромка имеет более продолжительное время контакта, этим объясняется равномерное распределение температуры в начале реза. Максимальная температура наблюдается в зоне радиусной режущей кромки инструмента, дальнейший процесс резания показывает, что в этой области инструмент имеет наихудший теплоотвод внутрь инструмента по сравнению с боковой и вершинной режущими кромками.

На рисунке 2.22 представлены графики изменения максимальной температуры резания режущих кромок. Для сравнения максимальная температура стружки изображена линией. Температура в разных элементах режущего лезвия увеличивается в течение времени резания. Разница температур между инструментом и заготовкой является движущей силой теплообмена. Предположительно, через некоторое время температура режущих кромок инструмента достигнет того же уровня, что и стружка.

На рисунке 2.23 представлен график изменения значения теплового потока в инструменте в процессе резания. Для сравнения, тепловой поток в инструменте показан пунктирной линией и в заготовке основной. Анализируя график, можно сделать вывод о том, что значительный пик в значении

теплового потока возникает в момент вхождения в зону резания вершинной режущей кромки.

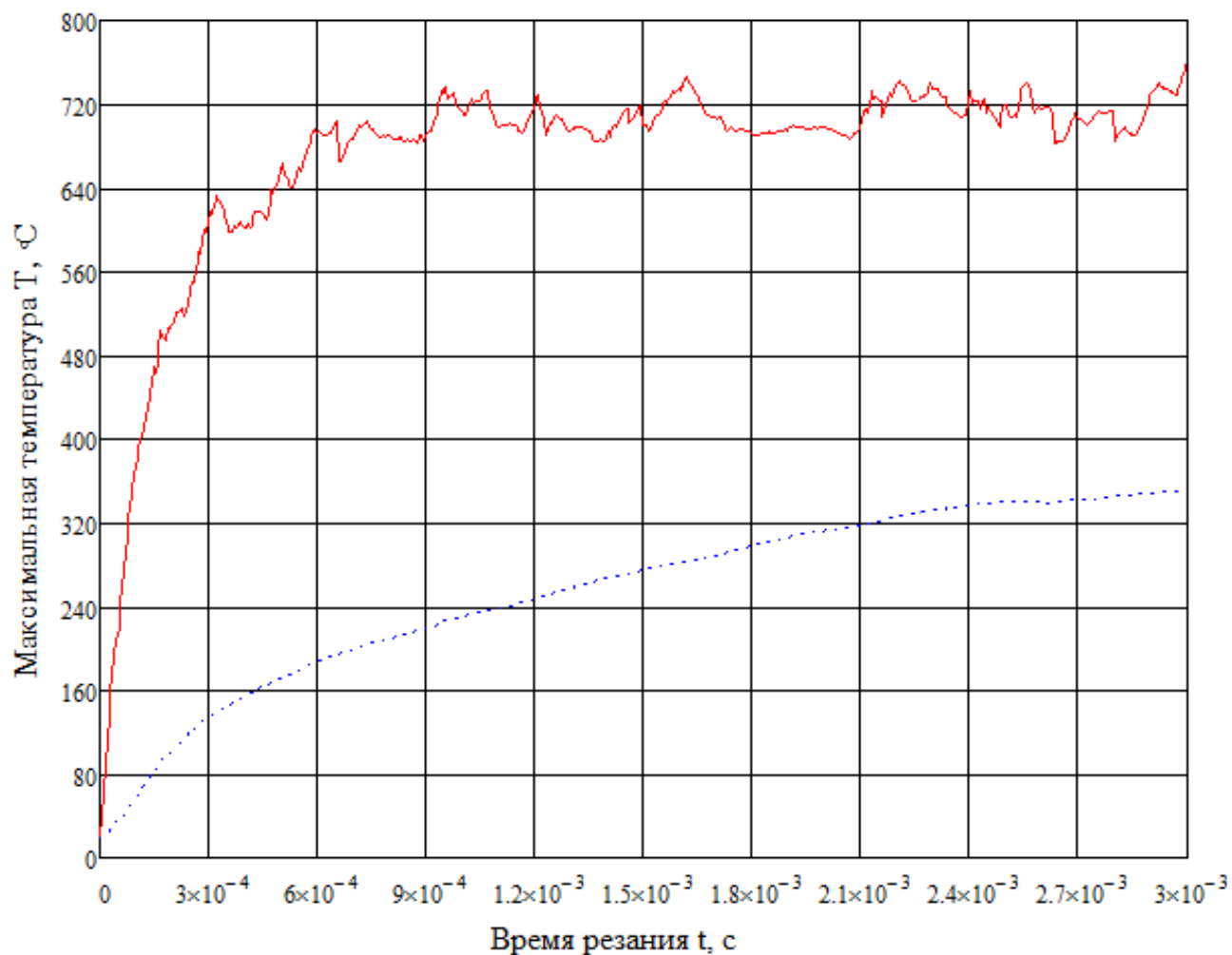


Рисунок 2.22 – Изменение максимальной температуры (-температура в заготовке; ..... температура в инструменте)

После входа всех режущих кромок в зону резания значение теплового потока значительно не изменяется и становится квазипостоянным. Значение теплового потока в инструменте в среднем в 3,5–4 раза меньше, чем в обрабатываемой заготовке.

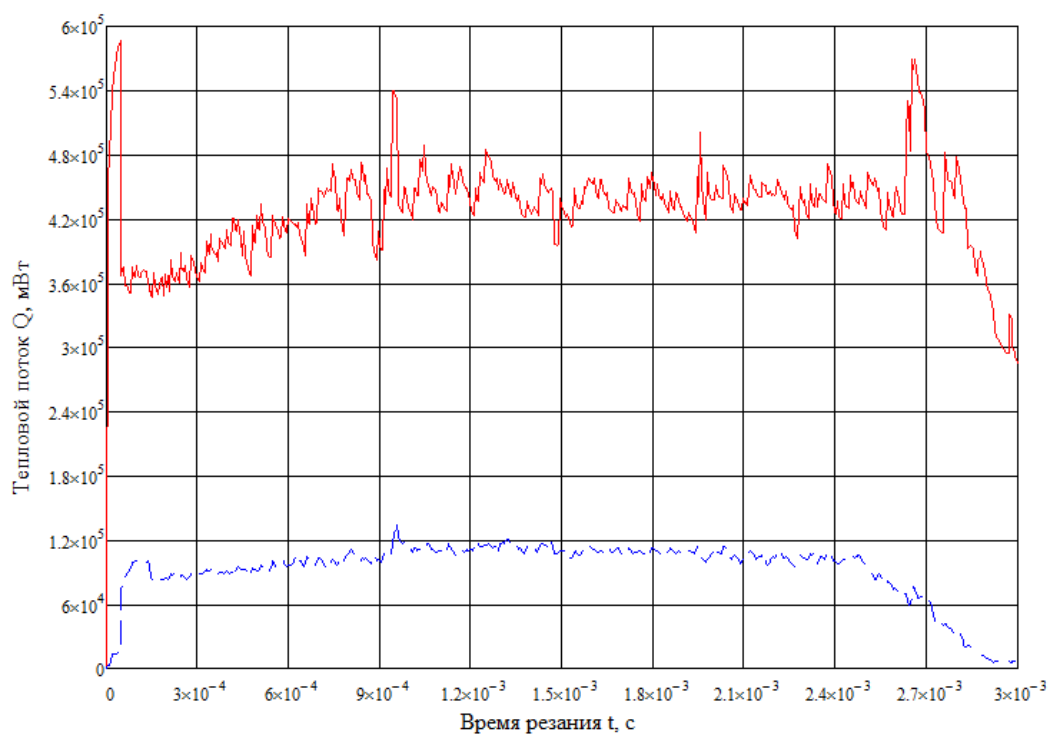


Рисунок 2.23 – Тепловой поток в инструменте (—тепловой поток в заготовке; - - тепловой поток в инструменте)

## 2.10 Исследование возникающих в процессе резания нагрузок

Сила резания, действующая на каждом зубе инструмента при обработке профиля, может быть разложена на осевые составляющие:  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  (рисунок 2.24).

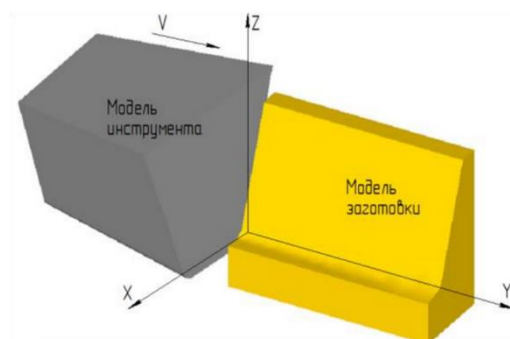


Рисунок 2.24 – Разложение силы резания по осевым составляющим при моделировании обработки

В процесс обработки последовательно вступает сначала боковая режущая кромка, затем радиусная и вершинная. Геометрия срезаемой стружки и, следовательно, сила резания постоянно изменяется в процессе обработки от нуля до определенного максимального значения.

На рисунках 2.25-2.27 представлены графики изменения осевых составляющих силы резания. Для изменения осевых составляющих сил резания характерно достижение максимальных значений к моменту установившегося резания. Максимальное влияние оказывает составляющая  $P_Y$ , имеющая направление противоположное движению резца.

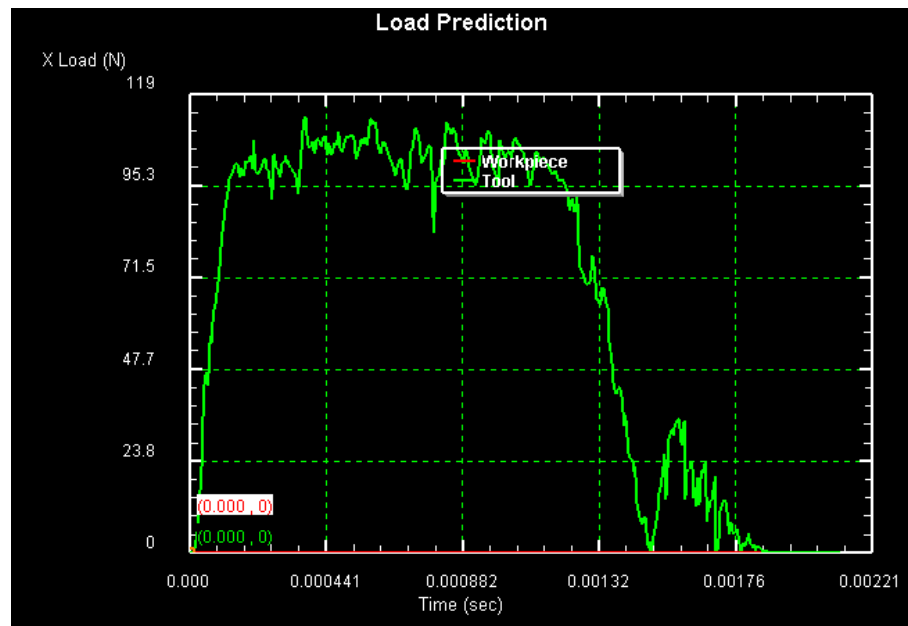


Рисунок 2.25 – График изменения  $P_X$

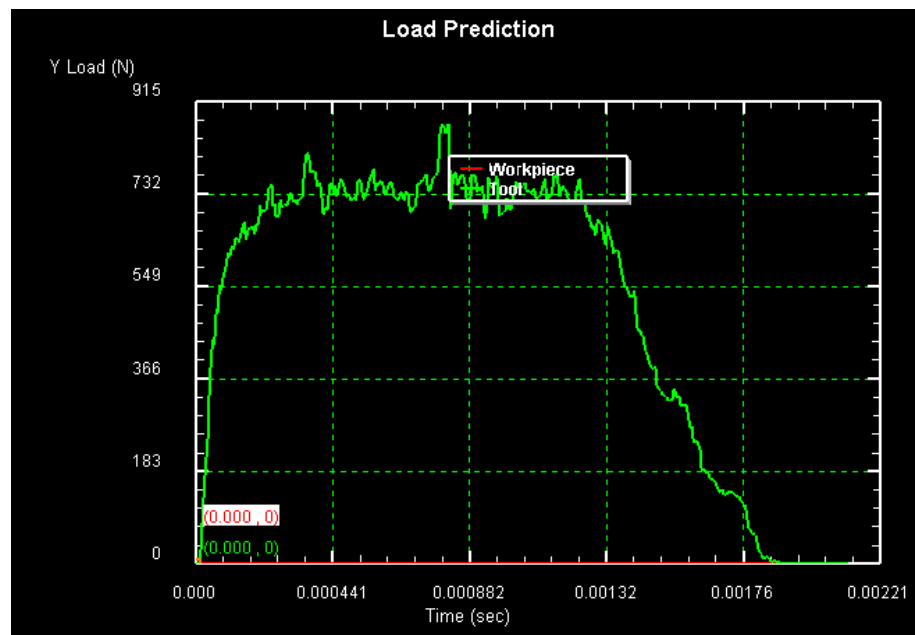


Рисунок 2.26 – График изменения  $P_Y$

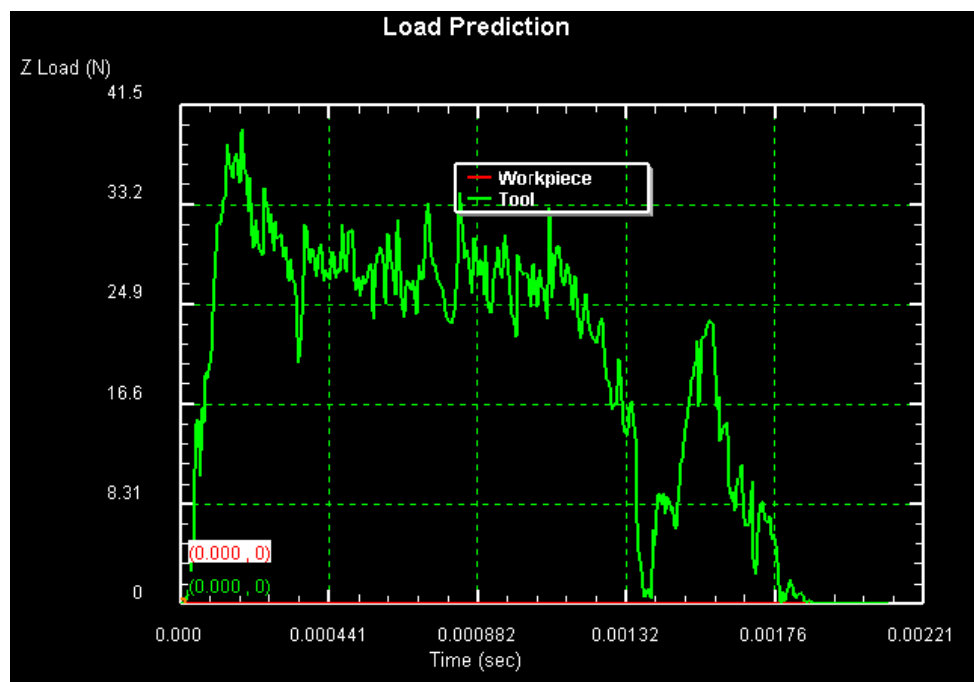


Рисунок 2.27 – График изменения  $P_Z$

## **2.11 Влияние геометрических параметров режущей части инструмента на тепловые процессы, происходящие в нем**

В процессе проведения численного эксперимента были рассмотрены варианты изменения геометрических параметров режущей части инструмента, а именно переднего и заднего углов резания. Изменение переднего угла происходило в диапазоне от 6 до 12 градусов. Изменение заднего угла происходило в диапазоне от 5 до 15 градусов. Выбор данных диапазонов основан на практических рекомендациях по выбору углов резания для резцов при обработке конических зубчатых колес [59].

В процессе проведения численного эксперимента были получены графики тепловых полей для инструмента, обрабатываемой заготовки и стружки, а также получен массив данных об их изменении в процессе резания, некоторые полученные результаты представлены в приложении А.

При сравнении графиков тепловых полей, возникающих на передней и задней поверхностях инструмента, а также в различных сечениях (перпендикулярном вершинной, боковой и радиусной режущей кромке резца, рисунок 2.28) можно отметить ряд общих закономерностей:



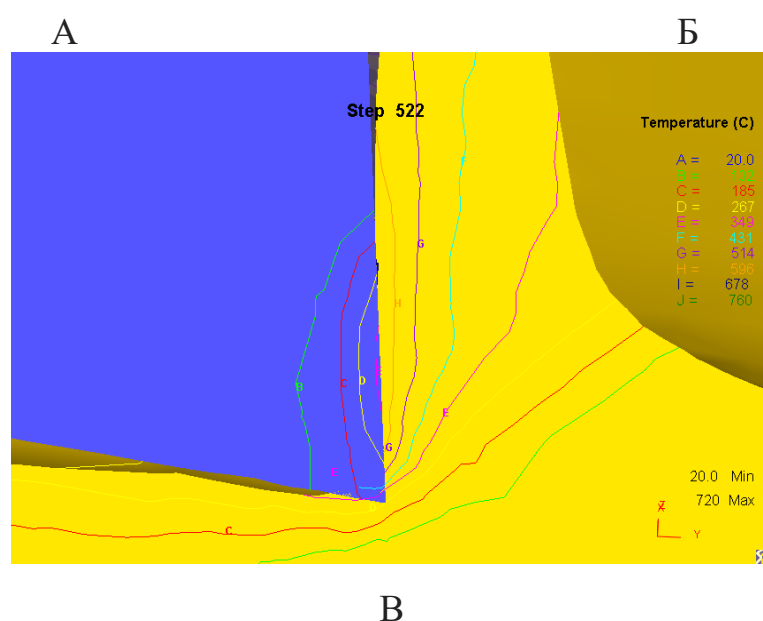
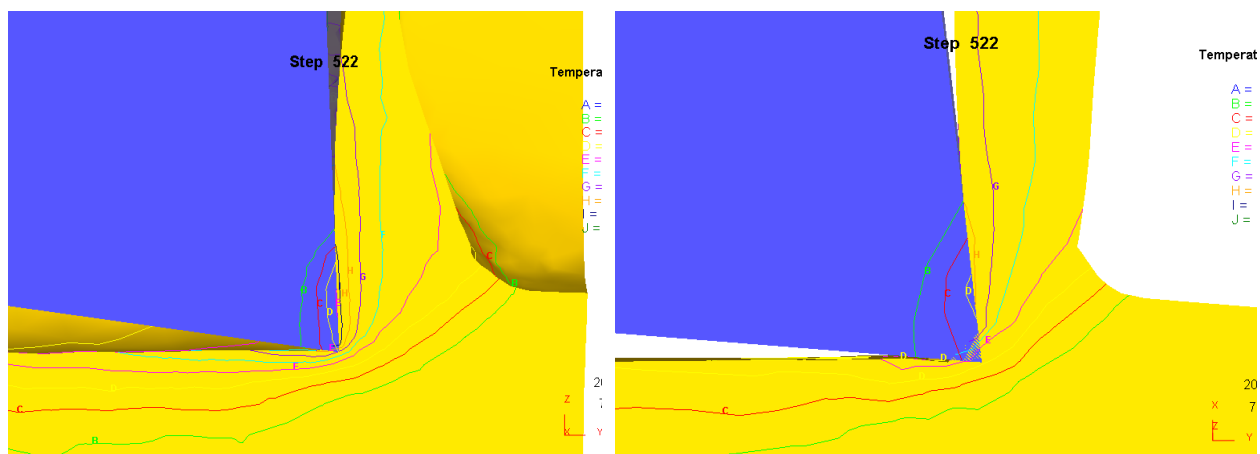


Рисунок 2.28 – Графики распределения температурных полей в инструменте и заготовке в сечениях, А - в сечении, перпендикулярном вершинной режущей кромке; Б - в сечении, перпендикулярном боковой режущей кромке; В - в сечении, перпендикулярном радиусной режущей кромке

1. Температура в зоне радиуса закругления вершины резца больше, чем температура на боковом и вершинном участках режущего лезвия;

2. Максимальное значение температур и характер распространения температурного поля, возникающего в инструменте, не отличается в зависимости от переднего и заднего углов резания.

Так как анализ изменения тепловых полей, возникающих в инструменте при изменении конструкции режущей части не позволил определить влияние переднего и заднего углов резания на тепловые процессы, рассмотрим другие характеристики процесса теплообмена.

В таблице 2.4 приведены значения тепловых потоков, возникающих в инструменте в процессе резания в момент времени  $t=2,5$  мс в зависимости от значения переднего и заднего углов.

Таблица 2.4 - Тепловой поток в инструменте в момент времени  $t=2,5$  мс

№	Передний угол $\gamma$ , град	Задний угол $\alpha$ , задний	Тепловой поток $Q$ , мВт
1	6	5	$1,1 \times 10^5$
2	6	10	$1,094 \times 10^5$
3	6	15	$1,035 \times 10^5$
4	9	5	$10,1 \times 10^4$
5	9	10	$10,0 \times 10^4$
6	9	15	$9,754 \times 10^4$
7	12	5	$9,823 \times 10^4$
8	12	10	$9,692 \times 10^4$
9	12	15	$9,279 \times 10^4$

График изменения значения теплового потока в зависимости от  $\gamma$  и  $\alpha$  представлен на рисунке 2.29.

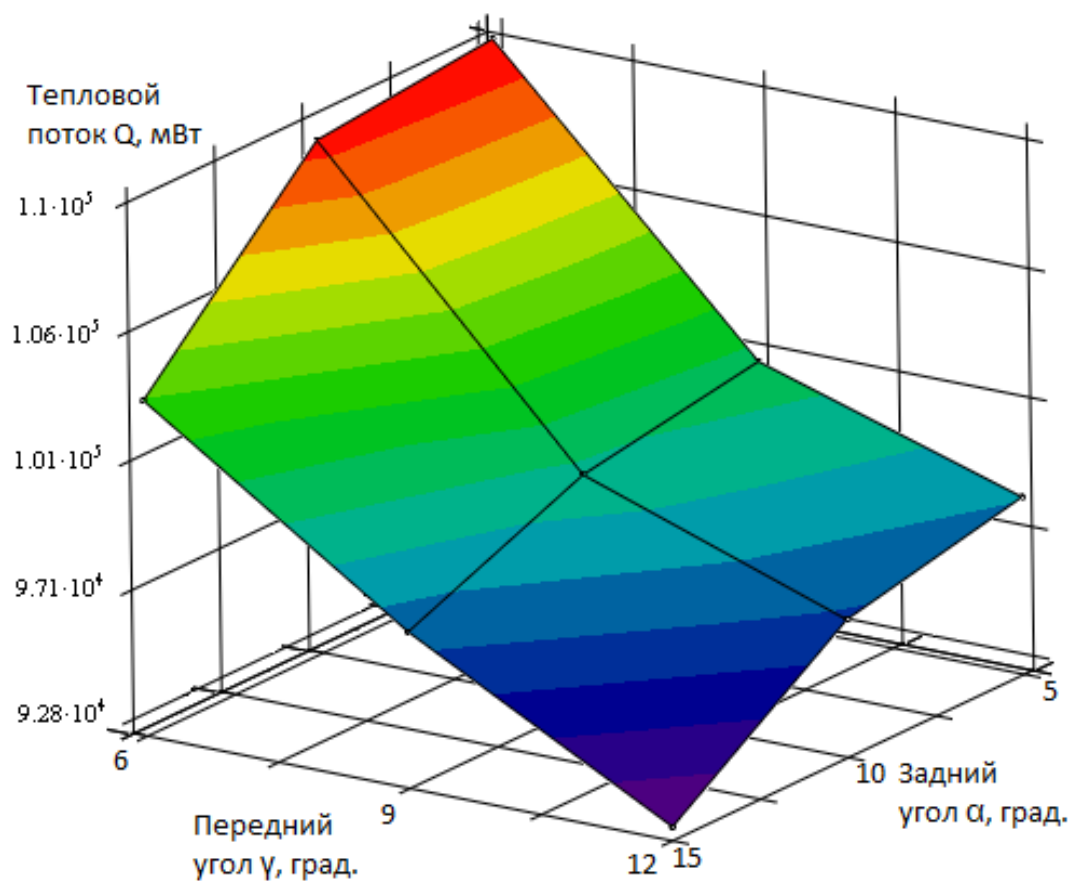


Рисунок 2.29 – График изменения теплового потока в инструменте в зависимости от угла наклона режущих кромок

Результаты численного эксперимента показывают, что при увеличении переднего и заднего углов значения теплового потока уменьшаются. При этом передний угол оказывает большее влияние, так при увеличении угла с 6 до 12 градусов тепловой поток уменьшается на 10%, а при увеличении заднего угла с 5 до 15 градусов тепловой поток уменьшается на 6%. Это можно связать с тем, что при увеличении углов  $\gamma$  и  $\alpha$  до определенной степени уменьшаются силы резания  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  [78], соответственно снижается интенсивность источников теплообразования в зоне резания.

Результаты численного эксперимента показывают, что тепловой поток изменяется не прямопропорционально  $\gamma$  и  $\alpha$ . Это связано с тем, что от углов наклона зависят: усадка стружки, длина контакта лезвий инструмента со стружкой, а также трение на передней и задней поверхности.

Однако передний и задний углы инструмента влияют на способность инструмента отводить теплоту из зоны резания. При увеличении углов совместно или по отдельности, угол заострения инструмента уменьшается,

соответственно теплоотвод тормозится в тело резца. Для инструмента, снимающего сложную стружку, это становится критичным, так как теплоотвод осложняется от максимально нагретого участка - радиуса закругления вершины резца. Для того чтобы оценить влияние переднего и заднего углов инструмента на процесс теплоотвода, использовали показатель удельной тепловой энергии. Удельная тепловая энергия показывает, какое количество энергии необходимо для того, чтобы нагреть  $1 \text{ мм}^3$  на  $1^\circ\text{C}$ .

Так как на исследуемом временном интервале (от 0 до 3 мс) происходит нагрев инструмента, то удельную тепловую энергию рассчитывали по экспериментальным данным в определенный момент времени  $t=2,5 \text{ мс}$ .

Формула для расчета удельной тепловой энергии:

$$q = \frac{Q}{\sum_i V_i t_i}, \text{ при } t_i > 20^\circ\text{C} \quad (2.7)$$

где  $Q$  - тепловой поток в исследуемый момент времени, Вт;

$i$  - количество объемов инструмента с одинаковой температурой;

$V$  - объем инструмента в котором температура принята постоянной,  $\text{мм}^3$ ;

$t$  - температура,  $^\circ\text{C}$ .

В таблице 2.5 приведены значение удельной тепловой энергии, затрачиваемой на нагрев  $1 \text{ мм}^3$  инструмента на  $1^\circ\text{C}$  в зависимости от значения переднего и заднего углов.

Таблица 4.4 – Удельная тепловая энергия в момент времени  $t=2,5 \text{ мс}$

№	Передний угол $\gamma$ , град.	Задний угол $\alpha$ , град.	Удельная тепловая энергий $q$ , мВт/(мм <sup>3</sup> °C)
1	6	5	471,9
2	6	10	485,0
3	6	15	382,9
4	9	5	617,4
5	9	10	580,4
6	9	15	528,9
7	12	5	358,6
8	12	10	421,0
9	12	15	365,8

График изменения удельной тепловой энергии в зависимости от  $\gamma$  и  $\alpha$  представлен на рисунке 2.30.

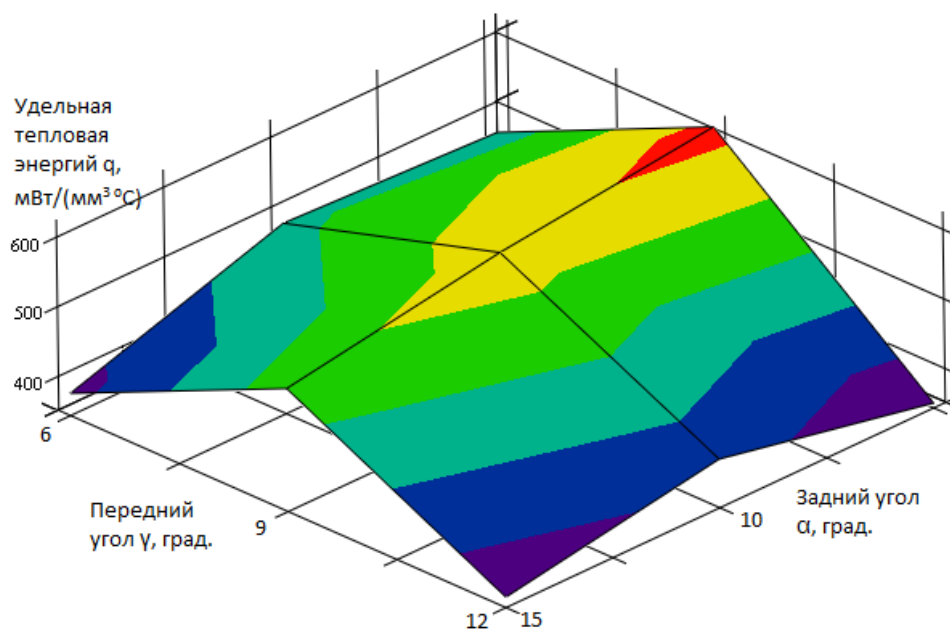


Рисунок 2.30 – График изменения удельной тепловой энергии в зависимости от переднего и заднего углов резания

График изменения удельной тепловой энергии возрастает в диапазоне изменения переднего угла от 6 до 9 градусов и уменьшается от 9 до 12, при этом изменение значительно и составляет порядка 40%. Увеличение значения заднего угла отражается на графике уменьшением значения удельной тепловой энергии, для рассматриваемого диапазона изменения заднего угла диапазон изменения значения удельной тепловой энергии составляет 15%.

Данные об удельной тепловой энергии подтверждают предположение о том, что при уменьшении угла заострения теплоотвод тормозится в тело резца. Соответственно увеличивается температура в районе режущих кромок инструмента.

В процессе проведения численного эксперимента были рассмотрены варианты изменения геометрических параметров режущей части инструмента, зависящих от геометрии обрабатываемого профиля зубьев, а именно угла профиля резца и радиуса закругления резца. Изменение угла профиля резца происходило в диапазоне от 15 до 25 градусов. Изменение радиуса закругления резца происходило в диапазоне от 0,1 до 0,2 мм. Выбор данных диапазонов основан на практических рекомендациях. Значения сил резания представлены на графиках, рисунок 2.31. Изменение силы резания рассчитанно как корень из суммы квадратов осевых составляющих силы резания.

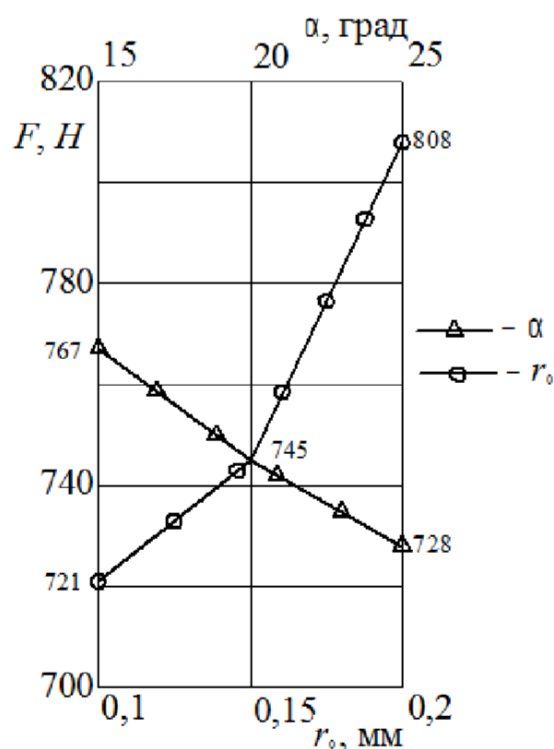


Рис. 2.31 – График изменения силы резания

Связь силы резания с радиусом закругления вершины резца, можно объяснить тем, что с увеличением радиуса увеличивается длина режущей кромки, участвующей в резании. Его значительное влияние можно связать с тем, что моделировался процесс обработки зуба относительно небольшой высоты (3 мм), можно предположить, что при увеличении высоты зуба влияние данного параметра будет снижаться.

Согласно исследованию, при уменьшении профильного угла увеличивается сила резания. Это можно объяснить тем фактом, что при уменьшении угла ухудшаются условия резания и блокируется отвод стружки.

Таким образом, результаты проведенного моделирования показывают, что в зависимости от изменения геометрии обрабатываемого колеса меняются и физические характеристики процесса резания. В рассматриваемом случае, изменение геометрии зуба в рекомендуемом диапазоне позволяет снизить силу резания более чем на 10 % при одних и тех же условиях обработки.

Конечно для установления точных качественных и количественных характеристик влияния геометрии зуба на процесс резания необходимо провести комплекс дополнительных исследований, однако уже на данном этапе можно утверждать, что учет технологических условий при проектировании новых профилей зубчатых передач позволит повысить эффективность обработки.

## **2.12 Прогнозирование практических результатов обработки**

### **2.12.1 Прогнозирование износа режущего инструмента**

Зависимость 2.8 предложенная С.С. Силиным, позволяет связать период стойкости и радиальный износ инструмента с конструкторско-технологическими параметрами резания. Данное выражение получено из условий постоянства: геометрии срезаемого слоя, рабочих углов, сил резания и температур.

Для установления зависимостей радиального износа, возникающих в процессе обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля, необходимо длину режущего лезвия разбить на элементарные участки. Тогда радиальный износ элементарного участка режущего лезвия, будет определяться как функция от геометрии срезаемой стружки и углов резания, зависимости 2.9 и 2.10.

Стойкость зуборезного инструмента.

$$T_p = \frac{[h_p]}{n \Delta h_p^1}; T_p \geq [T_p]$$

где  $[h_p]$  – допустимый размерный износ;

$n$  – частота рабочего хода инструмента в минуту;

$\Delta h_p^1$  – суммарный радиальный износ участка режущего лезвия за один рез инструмента.



$$h_p = v S_z T_p h_{o.n.} \quad (2.8);$$

где  $v$  – скорость резания;

$S_z$  – подача на зуб;

$T_p$  – период размерной стойкости инструмента;

$h_{o.n.}$  – относительный износ.

$$\Delta h_p = f(a, \gamma, \alpha) \Delta \tau; \quad (2.9)$$

или

$$\Delta h_p = \frac{\Delta \tau S_z h_{o.n.} k^2 \left( \frac{\rho_c}{\Delta a} \right)^{0,2}}{4 \Delta a \sin^{0,1} \alpha} \left( \frac{a \Delta b c \rho \Theta_{\max}}{\Delta P_z} \right)^2 \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2,65 \frac{\lambda_p}{\lambda} \beta \varepsilon \left( \frac{\Delta a}{\Delta b} \right)^{0,3}}{k^2 \frac{a \Delta b c \rho \Theta_{\max}}{\Delta P_z} \sin^{0,065} \alpha}} \right)^2, \quad (2.10)$$

где  $a$  – толщины срезаемого слоя;

$\Delta b$  – длина элементарного участка;

$c$  – удельная теплоемкость материала заготовки;

$\rho$  – плотность материала заготовки;

$T_p$  – сопротивление материала заготовки пластическому сдвигу;

$\Delta P_z$  – сила резания на элементарном участке;

$\Theta_{\max}$  – максимальная температура инструмента, выражение для определения  $\Theta_{\max}$  получили из анализа данных численного эксперимента:

$$\Theta_{\max} = 222 + 4,056\gamma - 0,1167\lambda - 0,1111\gamma^2 + 0,08333\gamma\lambda + 0,02\lambda^2.$$

$\rho_c$  – радиус скругления режущей кромки;

$\lambda_p$  – коэффициент теплопроводности инструментального материала;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала;

$\beta$  – угол заострения зуба инструмента;

$\varepsilon$  – угол при вершине зуба в плане;

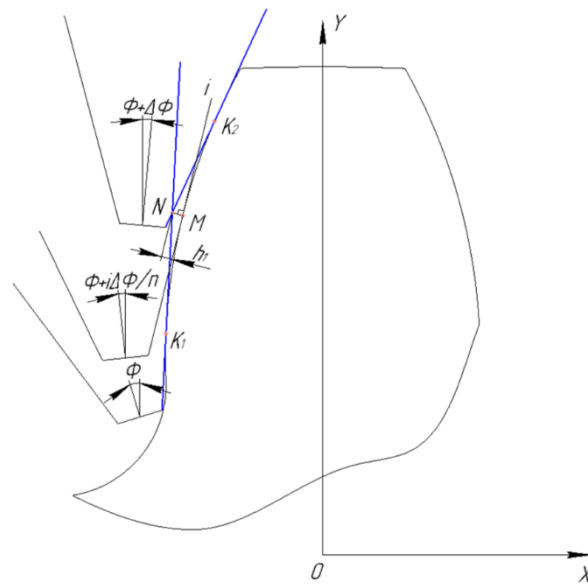
$k$  – коэффициент, учитывающий погрешность при замене  $Re^{0,43}$  на  $Re^{0,5}$ .

### 2.12.2 Прогнозирование шероховатости обрабатываемого изделия

Зависимость для определения средней высоты профиля шероховатости предложенная А.Г. Суловым представляет собой совокупность четырех составляющих ( $h_1$  – составляющая, обусловленная геометрией инструмента и кинематической резания;  $h_2$  – составляющая, обусловленная колебаниями режущего инструмента;  $h_3$  – составляющая, обусловленная пластическими деформациями;  $h_4$  – составляющая, обусловленная шероховатостью инструмента) и имеет вид 2.11.

Формирование профиля зуба осуществляется за счет того, что режущие лезвия инструмента последовательно огибают его в различных точках. Данный процесс реализуется за счет кинематики станка или ЧПУ. В результате, реальный профиль представляет собой ломаную линию. Возникающие отклонения от идеального профиля называют гребешками огранки.

Для определения высоты гребешка огранки можно использовать приближенную зависимость 2.12. Для точного определения кинематической составляющей профиля шероховатости, можно использовать зависимость 2.13. Расчетная схема для вывода зависимости приведена на рисунке 2.32. Составляющая профиля шероховатости  $h_2$  может быть рассчитана по зависимости 2.14. Составляющая  $h_3$  определяется пластическим сдвигом обрабатываемого материала в зоне резания. Составляющая  $h_4$  определяется шероховатостью рабочих поверхностей инструмента и нормируется соответствующими ГОСТ.



Рисунке 2.32 – Схема определения  $h_1$

$$R_a = 0,2(h_1 + h_2 + h_3 + h_4); Ra \leq [Ra] \quad (2.11)$$

где  $h_1$  – составляющая, обусловленная геометрией инструмента и кинематической резания;

$h_2$  – составляющая, обусловленная колебаниями режущего инструмента;

$h_3$  – составляющая, обусловленная пластическими деформациями;

$h_4$  – составляющая, обусловленная шероховатостью инструмента.

$$h_1 = \rho_i \frac{\Delta\alpha^2}{8}, \quad (2.12)$$

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

$\Delta\alpha$  – угол между исследуемыми резами.

Максимальное значение  $NM_i$  равно высоте гребешка огранки  $h_1$ .

$$NM_i = \left| \frac{\frac{Y_{i2} - Y_{i1}}{X_{i2} - X_{i1}} X_N + Y_N + \frac{Y_{i2} - Y_{i1}}{X_{i2} - X_{i1}} X_{i1} - Y_{i1}}{\sqrt{\left( \frac{Y_{i2} - Y_{i1}}{X_{i2} - X_{i1}} \right)^2 + 1}} \right|; \quad (2.13)$$

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

$$h_2(\tau) = \frac{P(\tau) - P_{\min}}{j}, \quad (2.14)$$

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

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

$j$  – жесткость технологической системы.

### 2.12.3 Прогнозирование точности обрабатываемого изделия

В условиях кинематически сложных процессов резания динамические деформации технологической системы изменяются во времени. Возникающие погрешности невозможно компенсировать наладкой на размер. Главным параметром, определяющим динамические деформации, является сила резания. Так как резцы инструмента работают периодически, возникает так называемое прерывистое резание и происходят значительные колебания силы резания.

Суммарную погрешность обработки можно определить, как сумму упругих отжатий и динамических прогибов оправки и заготовки, зависимость 2.15.

$$\Delta_{\Sigma} = h_o + h_3 + f_o + f_3; \quad (2.15)$$

где  $h_o$  – упругое отжатие оправки;

$h_3$  – упругое отжатие заготовки;

$f_o$  – динамический прогиб оправки;

$f_3$  – динамический прогиб заготовки.

Упругое отжатие оправки и динамический прогиб оправки много меньше, чем упругое отжатие заготовки и динамический прогиб заготовки. Поэтому, упругим отжатием оправки и динамическим прогибом оправки можно пренебречь. Упругое отжатие заготовки зависит от жесткости оборудования и значений возникающей силы резания, зависимость 2.16. Динамический прогиб заготовки с учетом коэффициента динамичности можно определить зависимостью 2.17.

$$h_3 = f(P_{изг}, j_{станка}); \quad (2.16)$$

$P_{изг}$  – изгибающая сила, действующая на заготовку со стороны инструмента, определяется как функция от осевых составляющих силы резания;

$$f_3 = g(P_{изг}, \mu); \quad (2.17)$$

$$P(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{при } (k-1)T + \tau_0 \leq 0 < kT, \\ A\tau^{-b\tau} & \text{при } kT \leq \tau < kT + \tau_0; \end{cases} \quad (2.18)$$

где  $A = P_{\max}e/\tau_1$ ;  $b = 1/\tau_1$ ;

$\tau_0$  – длительность импульса;

$\tau_1$  – время, в течение которого импульс достигает 0,95 максимального значения или более.

Изменение силы резания во времени при обработке конического колеса резцовой головкой может быть приближенно описано экспоненциальной зависимостью 2.18 (рисунок 2.33). Динамический прогиб заготовки рассчитаем на основе дифференциального уравнения колебаний механической системы, зависимость 2.19. В случае, когда период свободных колебаний мал, в сравнении со временем возрастания силы, силу можно считать приложенной статически.

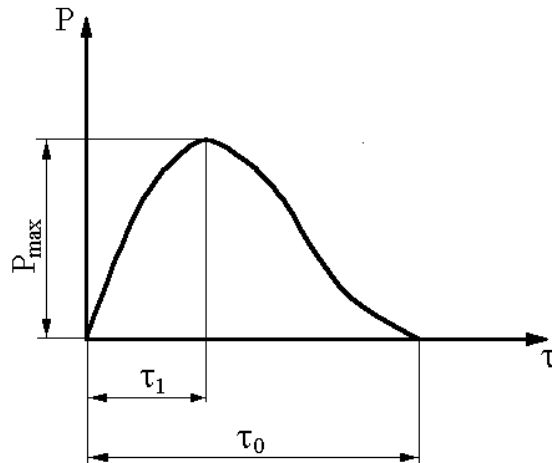


Рисунок 2.33 – Изменение силы резания в процессе одного реза

$$\frac{d^2 f}{d\tau^2} + 2\xi\omega_c \frac{df}{d\tau} + \omega_c^2 f = \frac{P(\tau)}{m_{np}}; \quad (2.19)$$

$\xi$  – относительный коэффициент затухания колебаний;

$\omega_c$  – частота собственных колебаний, определить по формуле Рэлея:

$$\omega_c^2 = \frac{\int_0^l EJ \left( \frac{d^2 f}{dx^2} \right)^2 dx}{\int_0^l m f^2 dx + \sum m_i f_i^2},$$

$\int_0^l m f^2 dx$  – распределенная масса заготовки;

$\sum m_i f_i^2$  – сосредоточенные нагрузки.

Для случая действия произвольной силы:

$$f_3(\tau) = \frac{e^{-\xi\omega_c T}}{m\omega_c^*} \left\{ \frac{C \left[ e^{\xi\omega_c T} \sin \omega_c^* (\tau + T) - \sin \omega_c^* \tau \right] - S \left[ e^{\xi\omega_c T} \cos \omega_c^* (\tau + T) - \cos \omega_c^* \tau \right]}{1 - 2e^{\xi\omega_c T} \cos \omega_c^* T + e^{2\xi\omega_c T}} + \right. \\ \left. + \int_0^\tau P(t) e^{\xi\omega_c t} \sin \omega_c^* (\tau - t) dt \right\}$$

где  $C = \int_0^T P(\tau) e^{\xi \omega_c \tau} \cos \omega_c^* \tau d\tau$ ;  $S = \int_0^T P(\tau) e^{\xi \omega_c \tau} \sin \omega_c^* \tau d\tau$ ;

$\omega_c^*$  – собственная частота колебаний с учетом демпфирования  $\omega_c^* = \sqrt{\omega_c^2 - n^2}$

## 2.13 Разработка алгоритма реализующего прогностическую модель

На рисунке 2.34 приведена схема процесса обработки поверхностей деталей машин. Схема имеет иерархическую структуру. Задача выбора параметров процесса механической обработки находит свое решение после выполнения всех уровней.

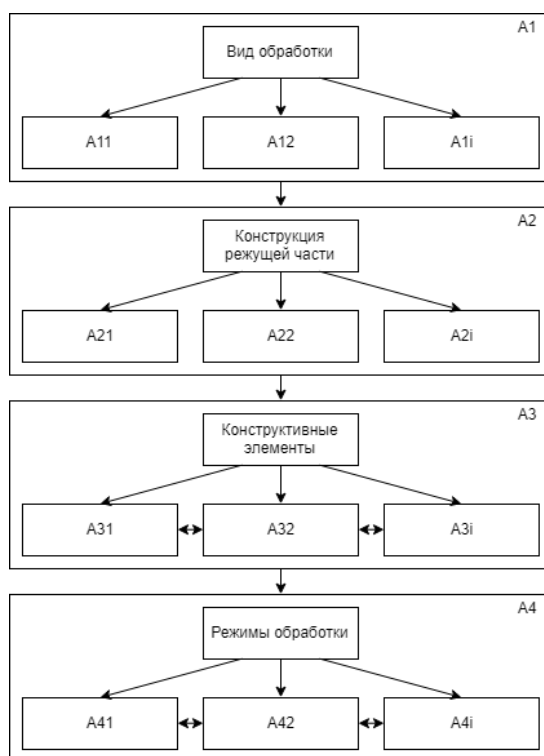


Рисунок 2.34 – Иерархическая схема процесса обработки зубчатых колес

В блоке А1 перебираются возможные виды обработки. Чаще всего один и тот же зубчатый профиль можно обработать несколькими различными способами. Априорно известно на какие значения выходных параметров процесса можно рассчитывать, используя тот или иной вид обработки, поэтому данный выбор можно произвести аналитически с целью упрощения алгоритмизации и сокращения требуемых вычислений.

В блоке А2 необходимо выбрать конструкцию режущей части инструмента. Кроме стандартизированного зуборезного инструмента, имеющего несколько вариантов исполнения, в патентной базе данных и научной литературе приведено множество вариантов исполнения конструкции режущей части, позволяющих повысить некоторые выходные характеристики процесса. В качестве примера такого инструмента можно привести ступенчатые долбяки и зубострогальные резцы, применение которых позволяет не меняя оборудование повысить производительность до 2 раз, точность обработки и качество поверхности на одну степень. На данном шаге стоит руководствоваться следующим принципом: если использование стандартного инструмента позволяет достичь требуемых характеристик, то выбираем его и переходим на следующий уровень, иначе формализуем возможные варианты нестандартной конструкции инструмента.

Задачей Блока А3 является выбор рациональных конструкционных параметров специального режущего инструмента (углов заточки передней и задней режущих кромок, радиуса закругления вершины резца и др.) в случае выбора на этапе А2 стандартного инструмента в блоке А3 принимаются нормированные конструкционные параметры.

В блоке А4 происходит оптимизация режимов обработки. В качестве оптимизируемых параметров рекомендуется выбрать наиболее



универсальные для обработки зубчатых колес – круговую подачу и скорость резания.

На рисунке 2.35 представлен алгоритм пошаговой оптимизации механической обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля. При разработке алгоритма принимаем, что целевая функция оптимизации стремится к минимуму. Блоки 1-4 соответствуют уровням А1-А4 иерархической схемы оптимизации. Значения параметров А1 и А2 дискретны. Параметры А3 и А4 изменяются в диапазонах от минимального к максимальному в зависимости от технологических ограничений. Для реализации алгоритма необходимо задаться значениями шага для рассматриваемых на этапах 3 и 4 переменных. В качестве рекомендаций для основных регулируемых конструкторско-технологических параметров резания возможно использование следующих шагов: скорость резания – от 0,1 до 1 м/мин; окружная подача – от 0,01 до 0,1 мм/дв.ход (мм/об.); передний и задний углы резания – от 0,1 до 1 градуса.

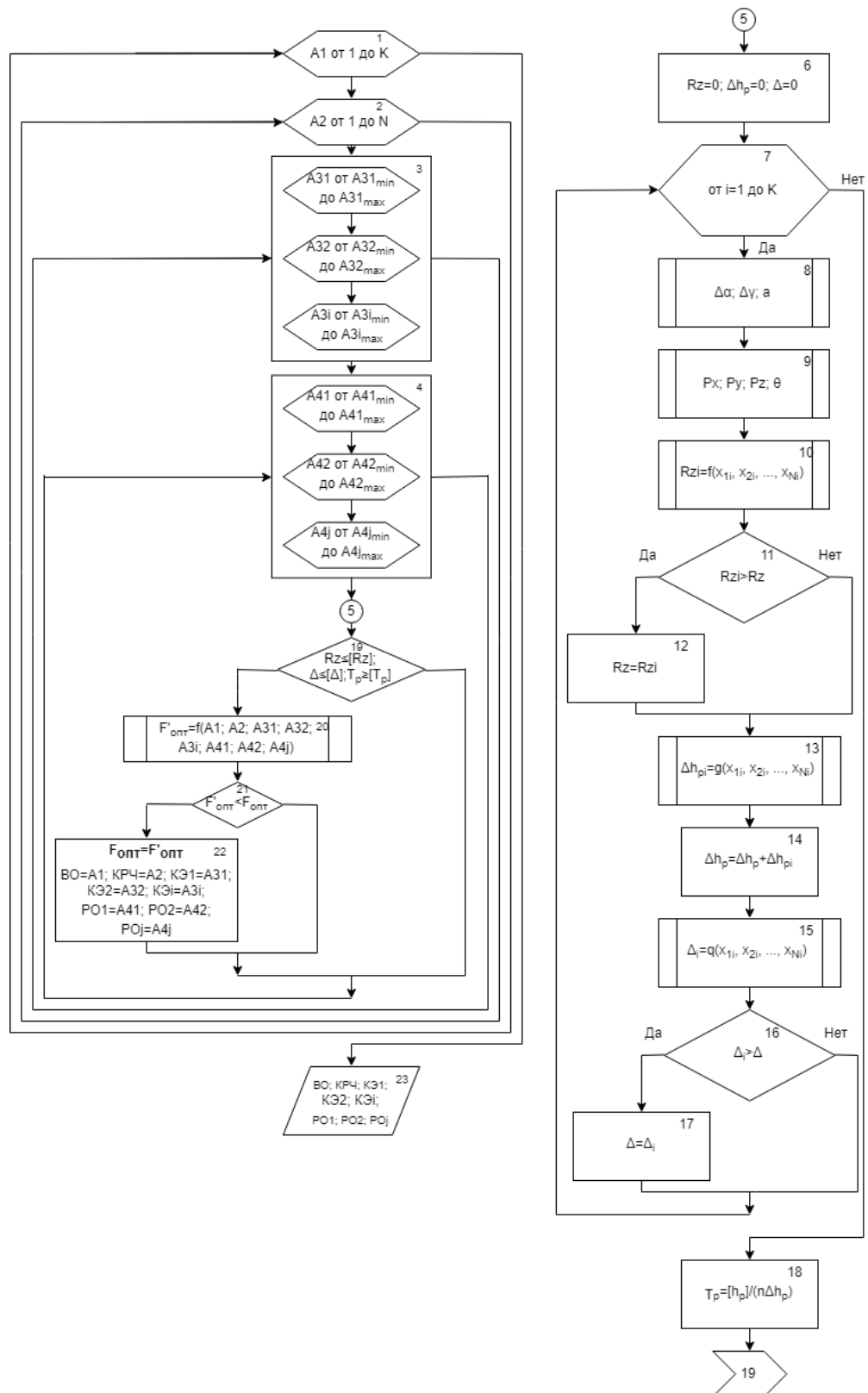


Рисунок 2.35 – Алгоритм оптимизации процесса механической обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля

В блоках 6-18 происходит расчет значений характеристик результатов механической обработки (погрешности, шероховатости и стойкости инструмента). Расчет ведется на основе гибридной прогностической модели процесса механической обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля предложенной ранее. Для расчета характеристик боковой стороны профиля зуба необходимо последовательно рассмотреть каждый рез, профилирующий сторону зуба (блок 7),  $i$  - рассматриваемый рез изменяющий свое значение от 1-го до  $K$ -го. Далее в блоке 8 для каждого реза аналитическим способом на основе пространственной модели формообразования определяются кинематические параметры процесса (кинематическое изменение переднего и заднего углов резания, толщина стружки). В блоке 9 на основе разработанной численной модели процесса определяются физические характеристики процесса резания (осевые составляющие силы резания и поля распределения температуры). В блоке 10 рассчитывается шероховатость исследуемого реза как функция от массива входных данных и физических характеристиках процесса ( $x_1, x_2, \dots, x_i$ ). В блоке 11 происходит сравнение шероховатости на исследуемом резе и максимальной шероховатостью, имевшей место на предыдущих резах, если  $R_{zi} > R_z$ , то текущему максимальному значению шероховатости присваиваем  $R_{zi}$ . В блоке 14 рассчитывается износ на  $i$ -том резе. В блоке 15 происходит подсчет накопленного в процессе обработки профиля зуба износа. В блоке 15 рассчитывается суммарная погрешность обработки как функция от массива входных данных и физических характеристиках процесса ( $x_1, x_2, \dots, x_i$ ). Далее в блоке 16 происходит сравнение суммарной погрешности исследуемого шага с информацией о максимальной суммарной погрешности, имевшей место ранее, в случае положительного результата локальному значению

максимальной суммарной погрешности присваивается значение суммарной погрешности рассматриваемого реза. После рассмотрения всех резов, в блоке 18 происходит расчет износа режущего инструмента в процессе обработки профиля зуба.

В блоке 19 происходит проверка выполнения ограничений, если ограничения выполняются, то происходит расчет целевой функции процесса. Далее в блоке 21 происходит проверка значения целевой функции, если она меньше чем минимальная целевая функция, полученная ранее, то записываем в промежуточное значение целевой функции значение, полученное на данном этапе, а всем переменным оптимизируемым технологическим параметрам присваиваем значения, имеющие место на данном шаге.

## **2.14 Выводы по главе**

1. Разработана прогностическая модель процесса механической обработки венца конического зубчатого колеса. Она основана на синтезе методов аналитического, численного и эмпирического моделирования. В основе модели лежит аналитический метод пространственного отображения схемы резания, дополненной исследованиями физических явлений сопровождающих процесс резания, выполненными с использованием численных методов конечно-элементного анализа, полученные на первых двух этапах моделирования характеристики процесса резания используются для расчета практических результатов обработки по известным эмпирическим зависимостям. Модель реализуется посредством применения специального программного обеспечения конечно-элементного анализа, что позволяет решать нелинейные пространственные задачи механики деформируемого твердого тела, теплопроводности и теплообмена и учитывать в модели специфические особенности процесса.

Разработанная прогностическая модель объединяет положительные качества различных методов и отличается от принятых моделей:

- обеспечением максимальной гибкости работы с входными данными, позволяющей трансформировать виртуальный эксперимент, переходя от одних геометрических параметров режущей части инструмента и режимов обработки, к другим;

- возможностью визуализации процесса обработки в целях изучения особенностей конструкции режущей части инструмента, процесса съема стружки и генерируемой поверхности детали.

2. Разработан алгоритм реализующий прогностическую модель. Данный алгоритм предназначен для внедрения в практику машиностроительных предприятий с целью практической реализации исследований. Использование алгоритма позволяет осуществить выбор рациональных конструкторско-технологических параметров системы на основе расчетных данных о физике процесса резания и прогнозировании практических результатов обработки.

3. Были проведены виртуальные исследования физических явлений сопровождающих процесс резания, которые показали, что:

- в зависимости от изменения геометрии обрабатываемого колеса меняются и физические характеристики процесса резания. В рассматриваемом случае, изменение геометрии зуба в рекомендуемом диапазоне позволяет снизить силу резания более чем на 10 % при одних и тех же условиях обработки;

- геометрические параметры режущего инструмента влияют на тепловые процессы, происходящие в инструменте. Тепловой поток уменьшается с увеличением переднего и заднего углов резания. Удельная тепловая энергия возрастает в диапазоне изменения переднего угла от 6 до 9 градусов и уменьшается от 9 до 12. Увеличение значения заднего угла отражается на графике уменьшением значения удельной тепловой энергии, для

рассматриваемого диапазона изменения заднего угла. Передний угол имеет большее влияние на тепловые процессы, чем задний.

- передний и задний резания оказывают различное влияние на теплообразование и теплоотвод, что приводит к тому, что для конкретных случаев конструкции режущего инструмента (обрабатываемого профиля) существует возможность установить значения углов, соответствующие рациональной (оптимальной) температуре.

### **3 Проведение экспериментальных исследований и анализ полученных данных**

#### **3.1 Проведение экспериментальных исследований**

На данном этапе была осуществлена проверка адекватности прогностической модели процесса обработки зубчатых колес.

С целью проверки адекватности модели были проведены экспериментальные исследования, которые подтвердили теоретически определенные величины физических параметров, характеризующих процесс резания, и параметров, являющихся характеристикой результатов обработки.

В соответствии с поставленной целью, в процессе проведения экспериментального исследования, решались следующие задачи:

- исследование силы резания в зависимости от конструкторско-технологических параметров системы;
- исследование тепловых явлений, возникающих в процессе резания, в зависимости от конструкторско-технологических параметров системы;
- исследование параметров шероховатости профиля зубьев;
- исследование погрешностей профиля зуба;
- исследование стойкости режущего инструмента.

На этапе экспериментальных исследований физических процессов, сопровождающих резание, были проведены исследования сил резания и температур, возникающих в процессе механической обработки зубчатых колес. Помимо задачи подтверждения адекватности прогностической модели была поставлена задача сбора данных для рационального выбора конструкторско-технологических параметров процесса резания. Экспериментальные исследования были направлены на установление влияния регулируемых конструктивных параметров режущего инструмента (переднего и заднего углов резания, а также радиуса закругления вершины

резца) на физические явления, возникающие в процессе механической обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля. Полученные результаты позволили дать рекомендации по выбору рациональных углов заточки передней и задней поверхностей инструмента и выбора радиуса закругления вершины резца, методика исследования и анализ полученных данных приведены в соответствующем разделе отчета.

Планирование, обработка и анализ экспериментальных исследований были проведены по методике робастного планирования эксперимента.

Проведение исследований физических явлений, возникающих в процессе обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля, имеет ряд трудностей:

- высокая стоимость проведения экспериментальных исследований, складывающаяся из необходимости использовать специально изготовленный инструмент, а также заготовки зубчатых колес;
- сложность выделения наиболее нагруженного реза одного зуба, так как в процессе зубообработки зачастую одновременно участвуют несколько зубьев.

С целью преодолеть описанные затруднения для экспериментальных исследований использовалась специальная резцовая головка, позволяющая моделировать исследуемый рез в заданных условиях. Эксперимент производился на поперечно-строгальном станке ГД-320. Для измерения мгновенных значений осевых составляющих силы резания был использован универсальный динамометр УДМ-600. Показания прибора регистрировались с помощью персонального компьютера и программного обеспечения LabView. Используемое в дальнейшем значение максимальной силы возникающей в процессе резания определялось зависимостью 3.1.



$$P_{\max} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}. \quad (3.1)$$

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 резания производится тремя резцами.

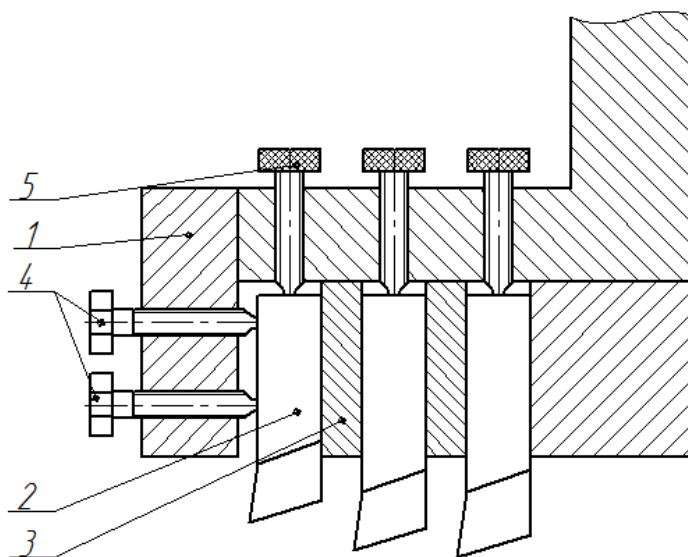


Рисунок 3.1 – Конструкция приспособления для моделирования процесса

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 производится тремя резцами (рисунок 3.2). 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.

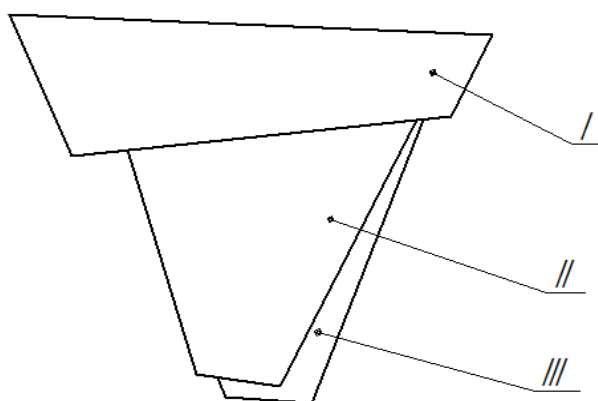


Рисунок 3.2 – Схема расположения резцов строгальной головки

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.

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

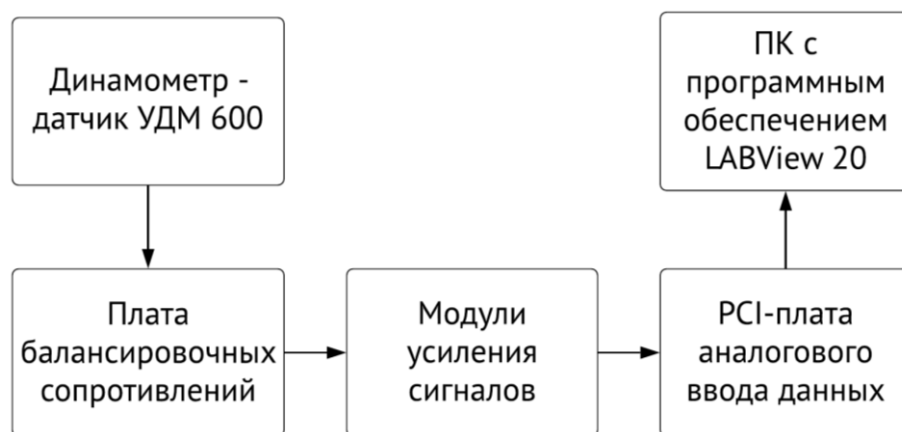


Рисунок 3.3 – Структурная схема взаимодействия составных частей измерительного стенда для измерения сил резания

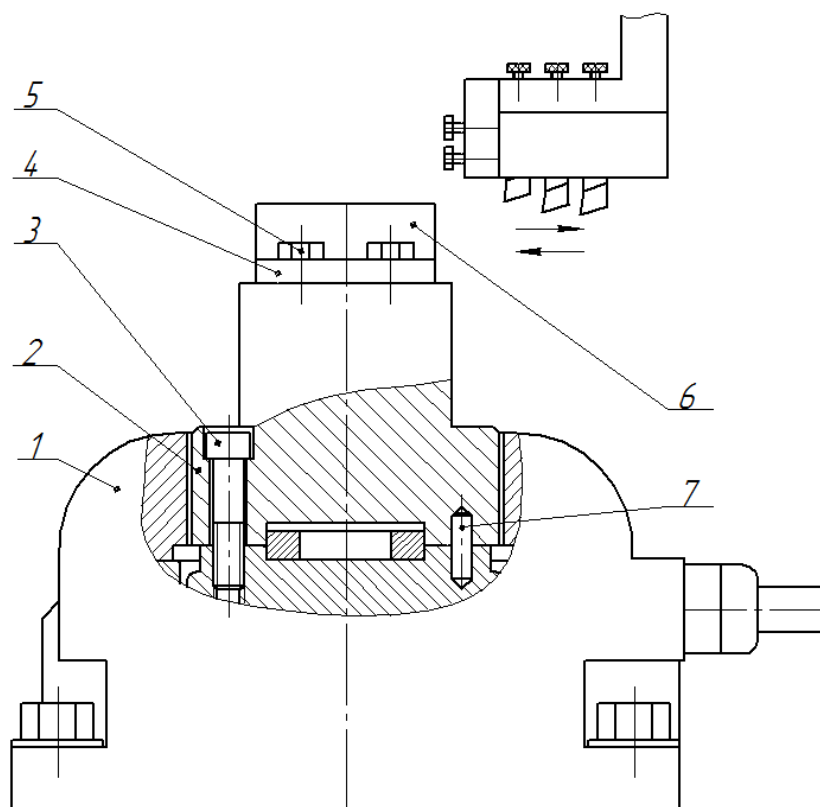


Рисунок 3.4 – Приспособление для закрепление заготовки при проведении эксперимента на УДМ-600

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).

Для экспериментального исследования тепловых явлений был использован метод измерения по инфракрасному излучению, для измерений использовался тепловизор модели Testo 875-2.

Схема исследуемого реза приведена на рисуне 3.5, геометрические параметры исследуемого реза приведены в таблице 3.1.

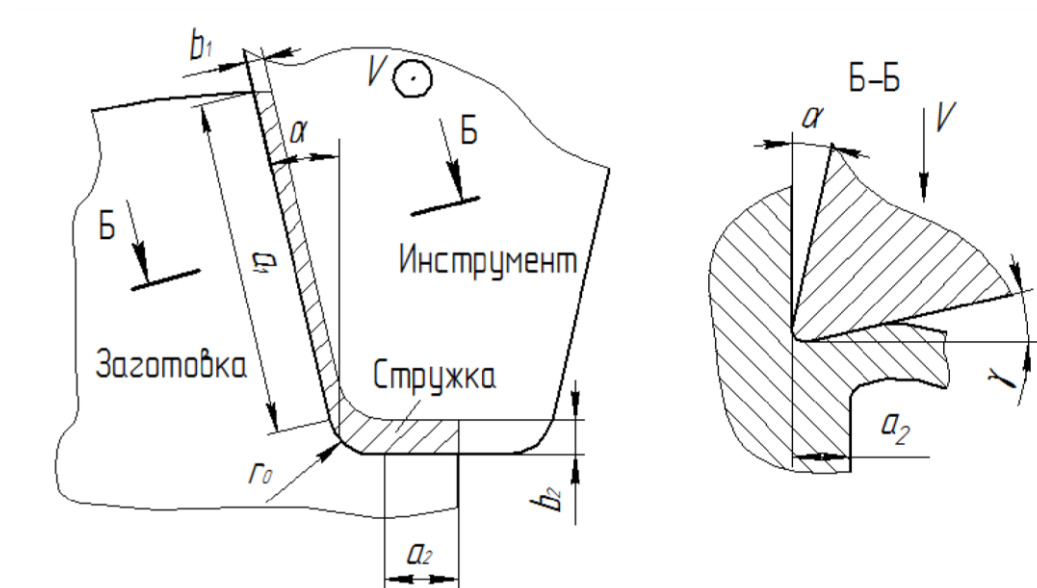


Рисунок 3.5 – Расчетная схема для экспериментального моделирования

Таблица 3.1 – Исходные данные для экспериментального моделирования

Параметр процесса резания	Значение
Толщина стружки, снимаемой боковой режущей кромкой $b_1$ , мм	0,04
Толщина стружки, снимаемой вершинной режущей кромкой $b_2$ , мм	0,06
Длина стружки, снимаемой боковой режущей кромкой $a_1$ , мм	2,9
Длина стружки, снимаемой вершинной режущей кромкой $a_2$ , мм	0,4
Профильный угол резца $\alpha$ , град	20
Скорость резания $V$ , м/мин;	20
Материал инструмента	P6M5
Материал заготовки	45

Было проведено девять различных экспериментов с разными сочетаниями переднего угла резания ( $\gamma$ ), заднего угла резания ( $\alpha$ ) и радиуса закругления вершины резца ( $r_0$ ). Передний угол принимал значения: 2, 5 и 8 градусов, задний угол: 5, 10 и 15 градусов, радиус закругления вершины резца:

0,1, 0,15 и 0,2 мм. Каждый эксперимент был проведен три раза, в качестве результата принималось среднеарифметическое значение.

В процессе проектирования эксперимента, в соответствии с методикой робастного планирования эксперимента, были выбраны три уровня геометрических параметров режущего инструмента, таблица 3.2.

Таблица 3.2 – Геометрические параметры инструмента и их уровни

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
A	Передний угол	градус	2	5	8
B	Задний угол	градус	5	10	15
C	Радиус закругления	мм	0,1	0,15	0,2

В экспериментальном исследовании использовался ортогональный массив L9 с четырьмя столбцами и девятью строками. Этот массив имеет восемь степеней свободы и может быть использован при эксперименте с тремя независимыми параметрами. Каждому геометрическому параметру присваивается столбец, доступны девять комбинаций геометрических параметров. План эксперимента с использованием ортогонального массива L9 представлен в таблице 3.2. Ортогональный массив L9 имеет четыре столбца, один столбец массива остается пустым.

Таблица 3.3 – План экспериментальных исследований

№ эксп.	A, передний угол	B, задний угол	C, радиус закругления	D, ошибка
1	1	1	1	
2	1	2	2	
3	1	3	3	
4	2	1	2	
5	2	2	3	
6	2	3	1	
7	3	1	3	
8	3	2	1	
9	3	3	2	

В таблице 3.4 представлено сравнение результатов, полученных в результате проведения численного и натурного эксперимента. Различия в результатах не превышают 10 %.

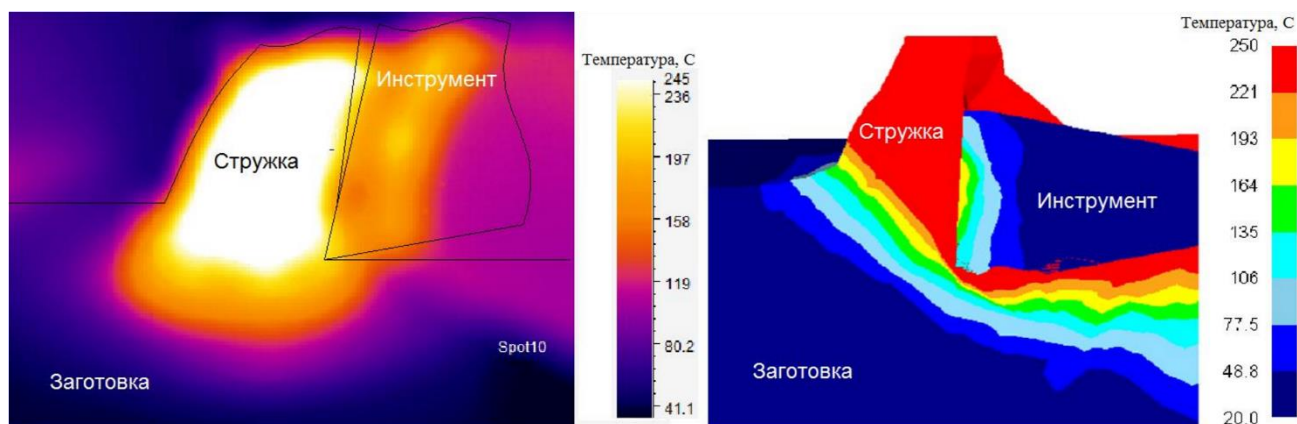


Рисунок 3.6 – Измеренные и смоделированные температурные поля

Таблица 3.4 – Результаты эксперимента по определению максимальной силы резания и максимальной температуры инструмента

№ эксп.	А передний угол, град.	В задний угол, град.	С радиус закр., мм	Сила резания, $H$		Максимальная температура, $^{\circ}\text{C}$	
				Расчет	Эксп.	Расчет	Эксп.
1	2	5	0,1	712	748	232	248
2	2	10	0,15	736	775,5	258	250
3	2	15	0,2	741	786,5	241	248
4	5	5	0,15	698	726	271	258
5	5	10	0,2	851	808,5	239	246
6	5	15	0,1	702	710,6	291	270
7	8	5	0,2	748	774,4	285	263
8	8	10	0,1	705	691	288	263
9	8	15	0,15	709	742,5	285	264

Исследования параметров, характеризующих результаты обработки, проводились в производственных условиях ООО «Мценскпрокат». Исследовалась партия из 50 деталей. Обработка – чистовая по сплошному металлу. Параметры: количество зубьев обрабатываемого изделия  $z_1=30$ , высота зуба  $h = 3$  мм, диаметр впадин зубьев  $d_f=65$  мм, ширина венца  $b=30$  мм,

скорость резания  $V = 13$  м/мин; круговая подача  $S_{кр} = 0,25$  мм/дв.ход., станок модели 5В150, материал инструмента – Р6М5, материал изделия – сталь 45, число зубьев инструмент  $z_d = 20$ . Шероховатость передней поверхности режущих кромок инструмента соответствовала  $Ra = 0,32$  мкм, задней  $Ra = 0,63$  мкм.

Для контроля параметров шероховатости применялся иммерсионно-репликовый метод. Шероховатость поверхности измерялась с помощью электромеханического профилографа-профилометра модели 201.

Результаты измерений представлены в виде полигонной кривой на рисунке 3.7. Вертикальной линией на рисунке показан результат аналитического расчета параметра шероховатости. Отличие прогнозного значения шероховатости не превышает 15% от математического ожидания очередного результата эксперимента.

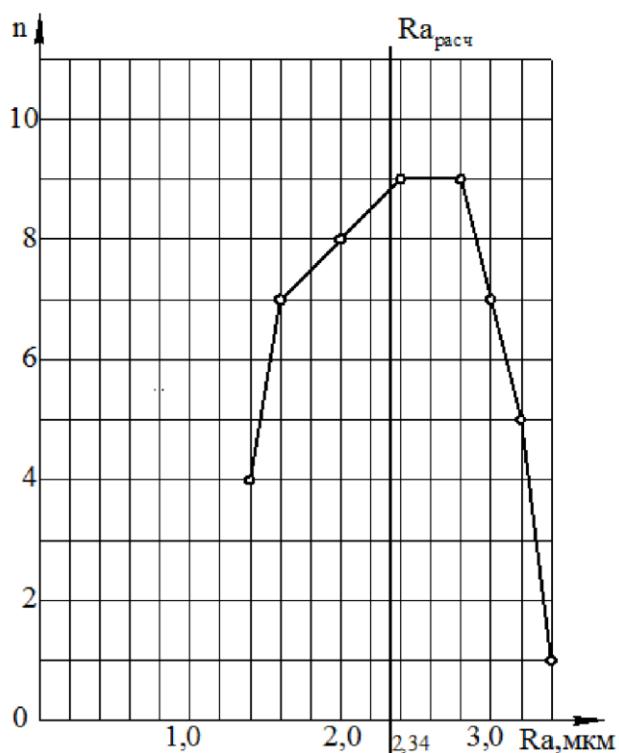


Рис. 3.7 – Шероховатость боковой поверхности зубьев



Измерения суммарной погрешности обработки осуществлялись с помощью универсальной координатно-измерительной машины PRISMO 7. Полученные данные представлены в виде полигонной кривой распределения на рисунке 3.8. Отличие прогнозного значения суммарной погрешности обработки не превышает 10% от математического ожидания очередного результата эксперимента.

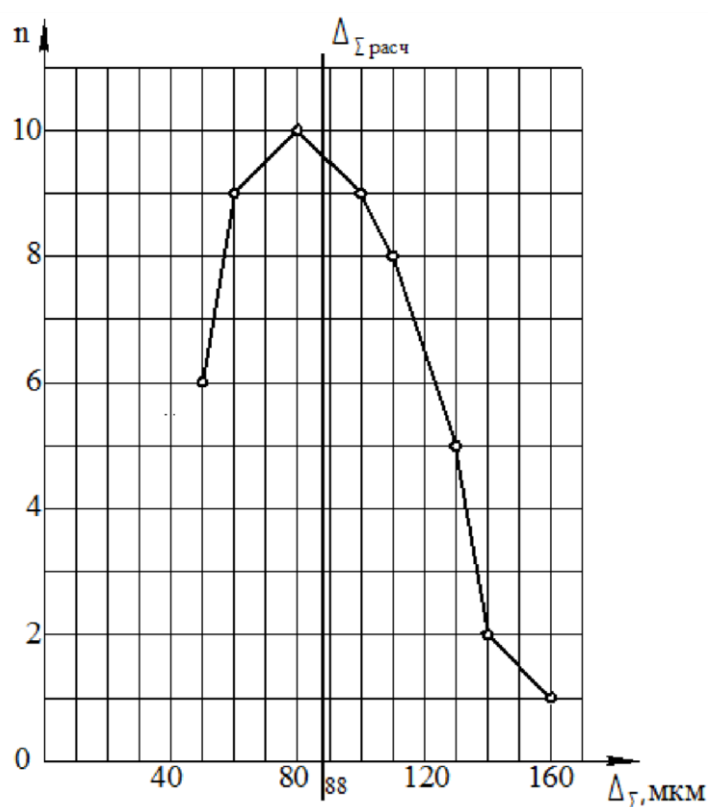


Рисунок 3.8 – Суммарная погрешность обработки

Характер износа вдоль режущих кромок неодинаков. Наибольший износ имеет задняя поверхность участка выходной режущей кромки. Именно этот элемент был взят за основу для определения износостойкости инструмента в целом.

Исследование износа производилось в процессе производственных испытаний без снятия инструмента со станка В качестве измерительного

инструмента применялась бинокулярная лупа. Цена деления 0,038мм. Визуальная точность отсчета 0,02мм.

Лимитирующий износ происходил по задней поверхности выходной кромки. По результатам измерений построен график износа (рисунок 3.9), результаты исследований аппроксимированы прямой. Критерием прекращения эксперимента являлось достижение критического износа в 0,4 мм задней поверхности. На рисунке 3.9 также приведен график прогнозного износа задней поверхности выходной кромки. Прогнозное время стойкости долбяка отличается от экспериментального менее чем на 10%.

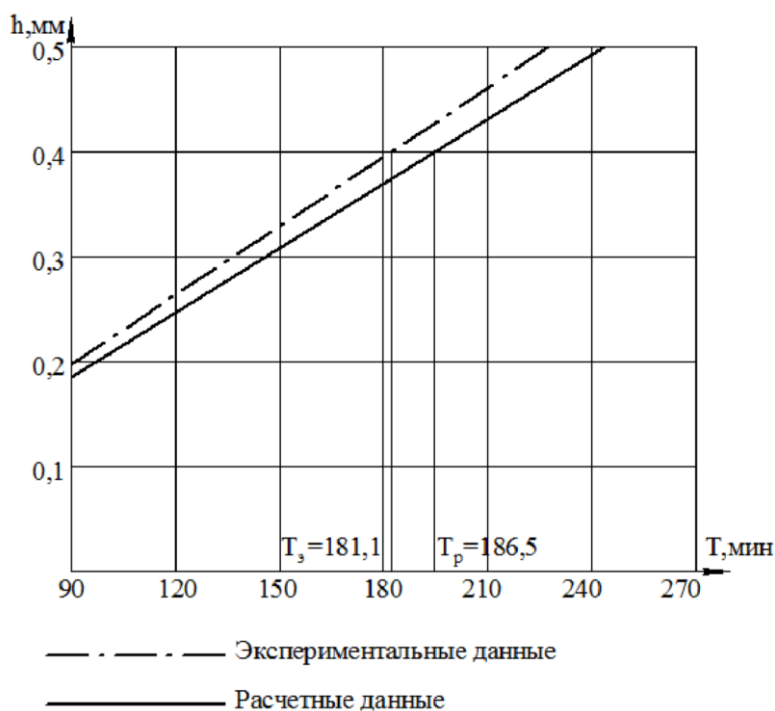


Рисунок 3.9 – Износ задней поверхности выходной режущей кромки

### 3.2 Анализ экспериментальных данных

Целью данной части исследования являлось установление влияния переднего и заднего углов резания, а также радиуса закругления вершины резца на максимальное значение силы резания и максимальное значение температуры инструмента, возникающих в процессе механической обработки неэвольвентных зубчатых колес.

Планирование, обработка и анализ экспериментальных исследований были проведены по методике робастного планирования эксперимента. Ключевой принцип данной методики заключается в том, что необходимо минимизировать изменчивость в ответ на факторы шума (факторы, которые находятся вне контроля оператора), максимизируя при этом изменчивость в ответ на управляющие факторы (факторы, которые устанавливает оператор). Улучшение качества достигается установлением наилучших значений управляющих факторов, для сочетания которых отношение сигнал/шум (С/Ш) максимально.

В таблице 3.5 приведены результаты экспериментального исследования силы резания и температуры, а также расчетные значения отношения С/Ш. Расчетное отношение С/Ш определяется по формуле 7.

Таблица 3.5 – Результаты эксперимента по определению максимальной силы резания, температуры и расчету отношения С/Ш

№ Экс.	А пер. угол, град.	В зад. угол, град.	С рад. закр., мм	Сила резания, Н	С/Ш отношение	Максимальная температура	С/Ш отношение
1	2	5	0,1	748	-57,48	248	-47,89
2	2	10	0,15	775,5	-57,79	250	-47,96
3	2	15	0,2	786,5	-57,91	248	-47,89
4	5	5	0,15	726	-57,22	258	-48,23
5	5	10	0,2	808,5	-58,15	246	-47,82
6	5	15	0,1	710,6	-57,03	270	-48,63
7	8	5	0,2	774,4	-57,78	263	-48,40
8	8	10	0,1	691	-56,53	263	-48,40
9	8	15	0,15	742,5	-57,41	264	-48,43

$$C / Ш = -10 \lg \left( \frac{1}{n} y_i^2 \right). \quad (7)$$

Рассчитали среднее значение отношения С/Ш для переднего угла на

уровнях 1, 2 и 3 путем усреднения отношения С/Ш для экспериментов 1-3, 4-6 и 7-9 соответственно. Аналогично рассчитали среднее значение отношения С/Ш для заднего угла и радиуса закругления. Результаты расчета занесли в таблицы 3.6 и 3.7.

Таблица 3.6 – Среднее значение отношения С/Ш для рассматриваемых уровней при исследовании силы резания

Обозначение	Параметр	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Max-Min
A	Передний угол	-57,73	-57,47	-57,24	0,49
B	Задний угол	-57,49	-57,49	-57,45	0,04
C	Радиус закругления	-57,01	-57,47	-57,95	0,94

Таблица 3.7 – Среднее значение отношения С/Ш для рассматриваемых уровней при исследовании температуры

Обозначение	Параметр	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Max-Min
A	Передний угол	-47,91	-48,23	-48,41	0,50
B	Задний угол	-48,17	-48,06	-48,32	0,26
C	Радиус закругления	-48,31	-48,21	-48,04	0,27

На рисунках 3.10 и 3.11 показаны графики изменения среднего значения отношения С/Ш, в зависимости от геометрических параметров режущего инструмента, используемых в эксперименте. Максимальное значение среднего отношения С/Ш соответствует лучшему сочетанию исследуемых

параметров.

Рисунок 3.10 показывает, что сочетание A3B3C1 (максимальное значение переднего угла резания, максимальное значение заднего угла резания и минимальное значение радиуса закругления) является оптимальным из условия максимального уменьшения силы резания.

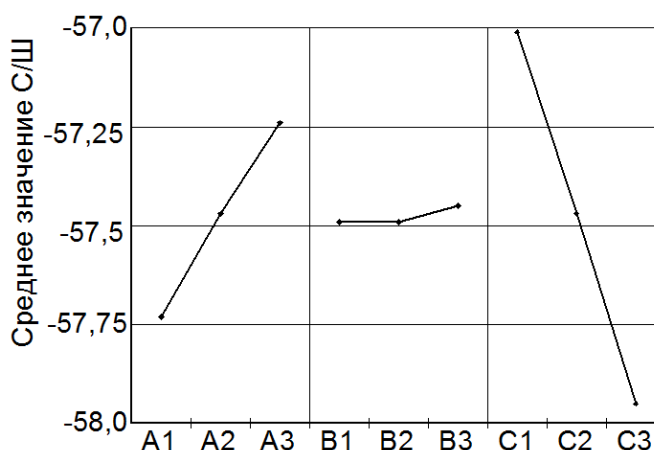


Рисунок 3.10 – График изменения среднего значения отношения С/Ш при исследовании силы резания

Рисунок 3.11 показывает, что сочетание A1B2C3 (минимальное значение переднего угла резания, среднее значение заднего угла резания и максимальное значение радиуса закругления) является оптимальным из условия максимального уменьшения температуры.

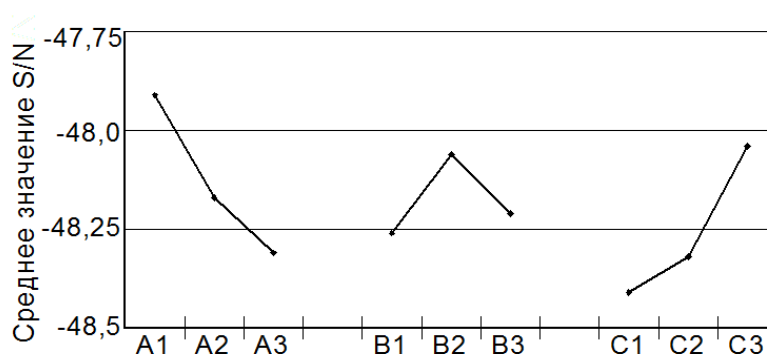


Рисунок 3.11 – График изменения среднего значения отношения С/Ш при исследовании температуры

После выбора оптимального сочетания конструктивных параметров следующим этапом является прогнозирование физических явлений и экспериментальная проверка прогнозных значений. Для расчета прогнозных значений использовали зависимость 3.2.

$$C / Ш_{\text{сред.опт.}} = C / Ш_{\text{сред.}} + \sum_{i=1}^n (C / Ш_{i \text{ сред.}} - C / Ш_{\text{сред.}}) \quad (3.2)$$

где  $C / Ш_{\text{сред.опт.}}$  – среднее значение отношения  $C / Ш$  на оптимальном уровне,

$C / Ш_{\text{сред.}}$  – общее среднее значение отношения  $C / Ш$ ,

$n$  – количество проектных параметров, которые влияют на характеристику качества.

В таблицах 3.8 и 3.9 приводится сравнение прогнозируемой силы резания и температуры с результатами, полученными экспериментальным путем. Наблюдается хорошее совпадение прогнозируемого и фактического значений, отличие менее 2%.

Таблица 3.8 – Сравнение расчетного значения силы резания с результатами эксперимента

Уровень	A3B3C1	A3B3C1
	Расчет	Эксперимент
Сила резания, $H$	688	701
$C / Ш$	-56,75	-56,91

Таблица 3.9 – Сравнение расчетного значения температуры с результатами эксперимента

Уровень	A1B2C3	A1B2C3
	Расчет	Эксперимент
Максимальная температура,	241,0211	239,8833
$C / Ш$	-47,64	-47,6

В таблице 3.10 представлены результаты дисперсионного анализа эксперимента по исследованию силы резания.

Таблица 3.10 – Результаты дисперсионного анализа эксперимента по исследованию силы резания

	Сумма квадратов	Количество степеней свободы	Дисперсия	Критерий Шифера, F	Доверие	Вклад, %
А	0,3558	1	0,35582	5,3703	93,17%	20,54
В	0,0035	1	0,00349	0,0527	17,24%	0,20
С	1,3068	1	1,30676	19,7223	99,32%	75,43
Ошибка	0,3313	5	0,06626	1	50,00%	3,82
Итого	1,9974	8	1,73232			100

«Доверие» более 90% для исследуемых конструктивных параметров свидетельствует о том, что они оказывают значимое влияние на силу резания. В пределах исследуемого диапазона параметров наибольшее влияние имеет значение радиус закругления (75,43%). Передний угол резания оказывает меньшее влияние (20,54%), задний угол резания не оказывает значимое влияние на силу резания. Результаты эксперимента показали, что: влияние конструкционных параметров режущего лезвия на силу резания значительно (разница между измеренными силами резания достигает 15%); зависимость силы резания от исследуемых параметров имеет линейный характер.

Связь силы резания с радиусом закругления вершины резца, можно объяснить тем, что с увеличением радиуса увеличивается длина режущей кромки, участвующей в резании. Наибольшее его влияние из всех рассматриваемых факторов можно связать с тем, что моделировался процесс обработки зуба относительно небольшой высоты (3 мм), при увеличении высоты зуба влияние данного параметра будет снижаться.

Влияние переднего угла связано с тем, что при его увеличении упрощается формирование и отвод стружки. Влияние данного параметра не зависит от высоты обрабатываемого зуба. Результаты исследования позволяют оценить влияние переднего угла – увеличение переднего угла на один градус снижает силу резания на 2,8%.

Исследование показывает, что сочетание АЗВЗС1 (максимальное значение переднего угла резания, максимальное значение заднего угла резания и минимальное значение радиуса закругления) является оптимальным из условия максимального уменьшения силы резания.

В таблице 3.11 представлены результаты дисперсионного анализа эксперимента по исследованию температуры.

Таблица 3.11 – Результаты дисперсионного анализа эксперимента по исследованию температуры

	Сумма квадратов	Количество степеней свободы	Дисперсия	Критерий Шифера , F	Доверие	Вклад, %
А	0,3785	1	0,37847	15,6564	98,92%	61,67
В	0,0993	1	0,09927	4,1065	90,14%	16,17
С	0,1118	1	0,11180	4,6249	91,58%	18,22
Ошибка	0,1209	5	0,02417	1	50,00%	3,94
Итого	0,7104	8	0,61371			100

«Доверие» более 90% для каждого из исследуемых конструктивных параметров свидетельствует о том, что каждый из них оказывает значимое



влияние на максимальную температуру. В пределах исследуемого диапазона параметров наибольшее влияние имеет передний угол (61,67%). Задний угол резания и радиус закругления оказывают меньшее влияние (16,17% и 18,22 % соответственно).

Исследование показывает, что сочетание A1B2C3 (минимальное значение переднего угла резания, среднее значение заднего угла резания и максимальное значение радиуса закругления) является оптимальным из условия максимального уменьшения температуры.

### **3.3 Выводы по главе**

1. Экспериментально подтверждена адекватность разработанной прогностической модели.

- Были произведены сравнения расчетных и экспериментальных данных характеризующих физику процесса резания (осевые составляющие силы резания и максимальная температура в зоне резания). Различия в результатах проведения численного и натурного эксперимента не превышают 10 %.

- Экспериментальные данные о характере изменения амплитуды силы резания и тепловых полях в инструмента и стружке совпадают с данными расчетными.

- Были произведены сравнения расчетных и экспериментальных данных характеризующих практические результаты обработки (шероховатость боковой поверхности зубьев, суммарная погрешность обработки, износ задней поверхности выходной режущей кромки). Различия в результатах проведения численного и натурного эксперимента не превышают 15 %.

2. Для выявления взаимосвязей между регулируемыми параметрами режущего инструмента (передний и задний углы резания, а также радиус закругления вершины резца) и физическими явлениями сопровождающими

процесс резания (силы резания и максимальной температуры) было проведено экспериментальное исследование основанное на методах робастного планирования эксперимента, анализ результатов показал, что, в пределах исследуемого диапазона параметров:

- наибольшее влияние на силу резания имеет значение радиуса закругления (75,43%). Передний угол резания оказывает меньшее влияние (20,54%), задний угол резания не оказывает значимое влияние на силу резания.

- наибольшее влияние на максимальную температуру имеет передний угол (61,67%). Задний угол резания и радиус закругления оказывают меньшее влияние (16,17% и 18,22 % соответственно).

- влияние конструктивных параметров режущего лезвия на силу резания и температуру значительно (влияние достигает 15%).

## 4 Виртуальные исследования процесса механической обработки венцов конических зубчатых колес

### 4.1 Выявление зависимостей, связывающих физические явления сопровождающие процесс резания и геометрические параметры профиля зубьев конического зубчатого колеса

На рисунке 4.1 представлена расчетная схема для проведения серии численных экспериментов. В таблице 4.1 представлены исходные данные для проведения численных экспериментов.

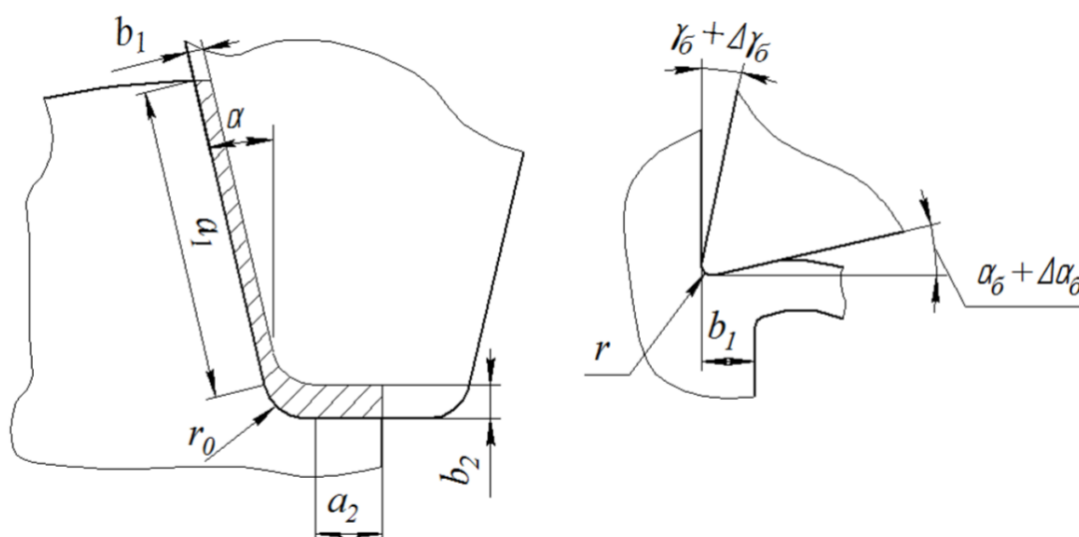


Рисунок 4.1 – Параметры моделируемого процесса

Таблица 4.1 – Исходные данные для моделирования

Параметр процесса резания	Значение
Толщина стружки $b_1$ , мм	0,04
Толщина стружки $b_2$ , мм	0,06
Длина режущей кромки $a_1$ , мм	2,9
Длина режущей кромки $a_2$ , мм	0,4
Радиус закругления режущих кромок $r$ , мм	0,01
Задний угол $\alpha_6$ , град	5
Кинематическое изменение заднего угла $\Delta\alpha_6$ , град	0,025
Передний угол $\gamma_6$ , град	5
Кинематическое изменение переднего угла $\Delta\gamma_6$ , град	0,015
Задний угол $\alpha_v$ , град	10
Кинематическое изменение заднего угла $\Delta\alpha_v$ , град	0,02
Передний угол $\gamma_6$ , град	6
Кинематическое изменение переднего угла $\Delta\gamma_6$ , град	0,012
Скорость резания $V$ , м/мин	100
Материал инструмента	WC
Материал заготовки	16MnCr5

В процессе проведения численного эксперимента были рассмотрены варианты изменения геометрических параметров режущей части инструмента, зависящих от геометрии обрабатываемого профиля зубьев, а именно угла профиля резца и радиуса закругления резца. Изменение угла профиля резца происходило в диапазоне от 15 до 25 градусов. Изменение радиуса закругления резца происходило в диапазоне от 0,1 до 0,2 мм. Выбор данных диапазонов основан на практических рекомендациях. Значения сил резания представлены на графиках, рисунок 4.2. Изменение силы резания рассчитанно как корень из суммы квадратов осевых составляющих силы резания.

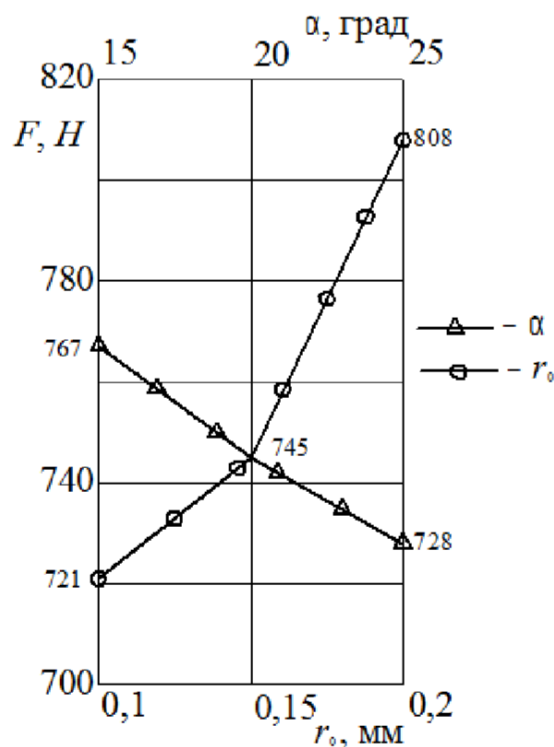


Рисунок 4.2 – График изменения силы резания

Связь силы резания с радиусом закругления вершины резца, можно объяснить тем, что с увеличением радиуса увеличивается длина режущей кромки, участвующей в резании. Его значительное влияние можно связать с тем, что моделировался процесс обработки зуба относительно небольшой

высоты (3 мм), можно предположить, что при увеличении высоты зуба влияние данного параметра будет снижаться.

Согласно исследованию, при уменьшении профильного угла увеличивается сила резания. Это можно объяснить тем фактом, что при уменьшении угла ухудшаются условия резания и блокируется отвод стружки.

Таким образом, результаты проведенного моделирования показывают, что в зависимости от изменения геометрии обрабатываемого колеса меняются и физические характеристики процесса резания. В рассматриваемом случае, изменение геометрии зуба в рекомендуемом диапазоне позволяет снизить силу резания более чем на 10 % при одних и тех же условиях обработки. Конечно для установления точных качественных и количественных характеристик влияния геометрии зуба на процесс резания необходимо провести комплекс дополнительных исследований, однако уже на данном этапе можно утверждать, что учет технологических условий при проектировании новых профилей зубчатых передач позволит повысить эффективность обработки.

Графики изменения значения максимальной температуры и теплового потока в инструменте, в зависимости от исследуемых параметров представлены на рисунках 4.3 и 4.4 соответственно.

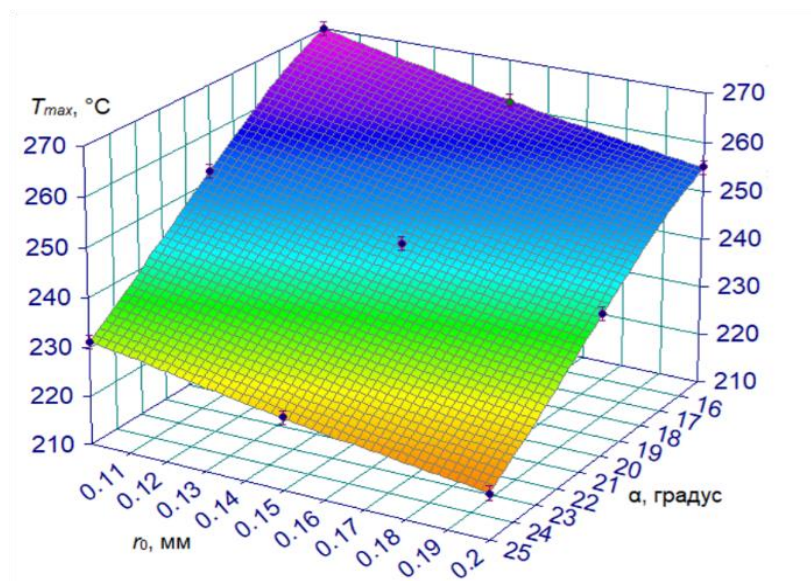


Рисунок 4.3 – График изменения максимальной температуры в инструменте

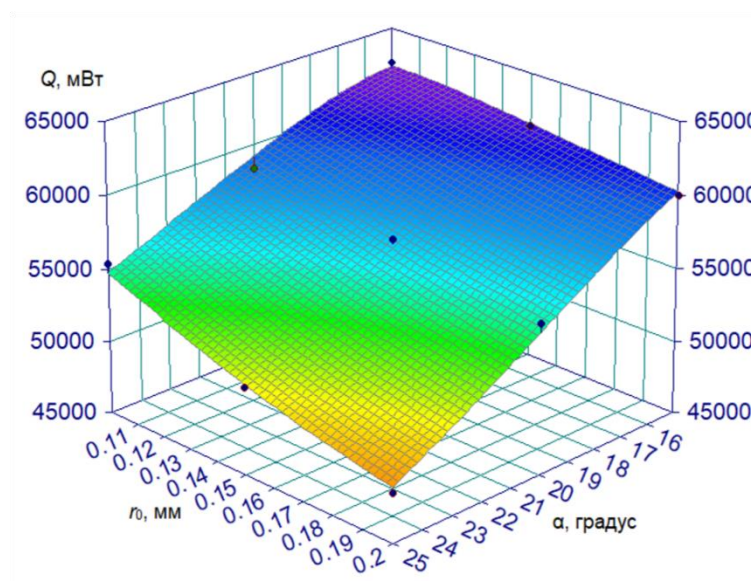


Рисунок 4.4 – График изменения теплового потока в инструменте

На основе численного анализа результатов виртуальных экспериментальных исследований получены зависимости:

$$T_{\max} = 41,5 + \frac{5345,5}{x} + \frac{5,6}{y} - \frac{38750}{x^2} - \frac{0,28}{y^2} + \frac{24,2}{xy};$$

$$Q = -11992,8 + \frac{1645706,4}{x} + \frac{3852,1}{y} - \frac{9916500}{x^2} - \frac{93,8}{y^2} - \frac{30921,4}{xy}.$$

Результаты виртуальных экспериментальных исследований показывают, что геометрические параметры обрабатываемого колеса оказывают значимое влияние на тепловые явления возникающие в процессе обработки конических зубчатых колес. В рассматриваемом диапазоне, увеличение радиуса закругления резца с 0,1 до 0,2 мм позволяет снизить в инструменте максимальную температуру до 5 %, а тепловой поток до 10%; увеличение угла профиля резца с 15 до 25 градусов позволяет снизить в инструменте максимальную температуру до 15 %, а тепловой поток до 20%.

#### **4.2 Оценка влияния геометрических параметров профиля зубчатого колеса на физические явления сопровождающие процесс резания**

Исследование влияния радиуса закругления вершины резца было описано в разделе 4.1, было рассмотрено изменение данного параметра в диапазоне от 0,1 до 0,2 мм. На рис. 8-10 приведены графики изменения физических параметров в зависимости от изменения радиуса закругления вершины резца.

Исследуемый параметр не одинаково влияет на физические явления сопровождающие процесс резания. С возрастанием от 0,1 до 0,2 мм сила резания возрастает на 12%, максимальная температура снижается на 5%, а тепловой поток на 10%.



Объяснить данные явления можно тем, что при увеличении радиуса закругления вершины резца увеличивается и длина режущей кромки, что приводит к возрастанию нагрузки на инструмент. Однако при этом происходит улучшение отвода стружки и улучшение теплоотвода из зоны резания. Позитивные эффекты от увеличения радиуса можно объяснить изменением механизма деформации стружки.

В процессе обработки конического зубчатого профиля происходит процесс съема сложной L образной, когда в работе участвует вершинная и боковая режущая кромка, или U образной стружки, когда в процессе резания участвует вершинная и обе боковые режущие кромки.

Исследование влияния угла профиля было описано в разделе 4.1, было рассмотрено изменение данного параметра в диапазоне от 15 до 25 градусов. На рис. 8-10 приведены графики изменения физических параметров в зависимости от изменения угла профиля.

В соответствии с результатами исследования, увеличение профильного угла на 10 градусов уменьшает силу резания на 5 %, а также снижает тепловой поток до 20% и максимальную температуру в инструменте до 15 %.

Влияние профильного угла можно объяснить несколькими эффектами. Увеличение угла профиля приводит к увеличению значений переднего и заднего углов резания для бокового режущего лезвия. Известно, что при увеличении переднего и заднего углов до определенной степени уменьшаются осевые составляющие силы резания, и, соответственно, снижается интенсивность источников теплообразования в зоне резания. Однако, результаты исследований показывают, что физические явления сопровождающие процесс резания изменяются не прямо пропорционально углам резания. Это связано с тем, что от углов зависят: усадка стружки, длина

контакта лезвий инструмента со стружкой, а также трение на передней и задней поверхности.

Однако передний и задний углы инструмента влияют на способность инструмента отводить теплоту из зоны резания. При увеличении углов совместно или по отдельности, угол заострения инструмента уменьшается, соответственно теплоотвод тормозится в тело резца. Для инструмента, снимающего сложную стружку, это становится критичным, так как теплоотвод осложняется от максимально нагретого участка – радиуса закругления вершины резца.

Кроме того увеличение угла профиля приведет к изменению процесса деформации стружки происходящей на передней поверхности резца, аналогично тому как это происходит при изменении радиуса закругления вершины резца.

#### **4.2.1 Осевые составляющие силы, возникающей в процессе резания**

На рисунке 4.5 показаны изменения осевых составляющих силы резания при моделировании обработки конического зубчатого колеса. Осовая составляющая силы резания  $F_y$  имеет наибольшее значение и достигает 1600 Н на одном резе.  $F_x$  и  $F_z$  имеют значительно меньшие значения достигающие 50 Н.

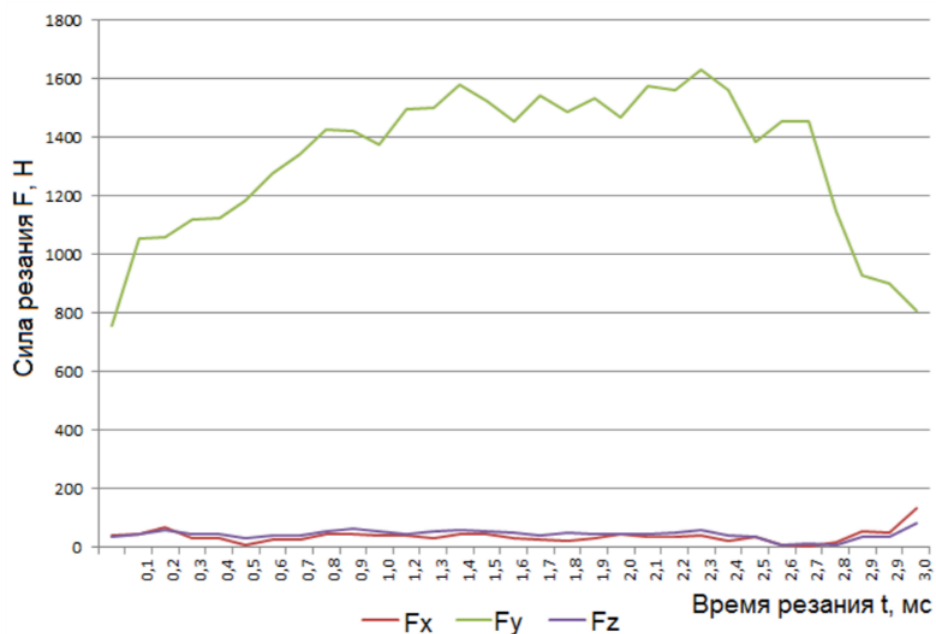


Рисунок 4.5 – График изменения осевых составляющих силы резания в процессе одного реза

Программа виртуальных экспериментальных исследований предусматривала расчет составляющих силы резания при обработке конических колес с числом зубьев  $z_1=30$ , внешний окружной модуль изменяться в диапазоне от 3,0 мм до 5,0 мм. Время обработки одного зуба изменялось в диапазоне от 29,6 до 51,7 с/зуб. Скорость резания изменялась в диапазоне от 80 м/мин до 120 м/мин. Исследовался наиболее нагруженный рез (рез с наибольшей площадью срезаемой стружки).

Анализируя данные изменения осевых составляющих силы резания, в зависимости от модуля обрабатываемых зубьев (рисунок 4.6), наблюдаем значимое повышение сил с увеличением модуля. Это связано с тем, что увеличиваются площади срезаемых стружек. Были получены зависимости 6 осевых составляющих силы резания от модуля обрабатываемых зубьев.

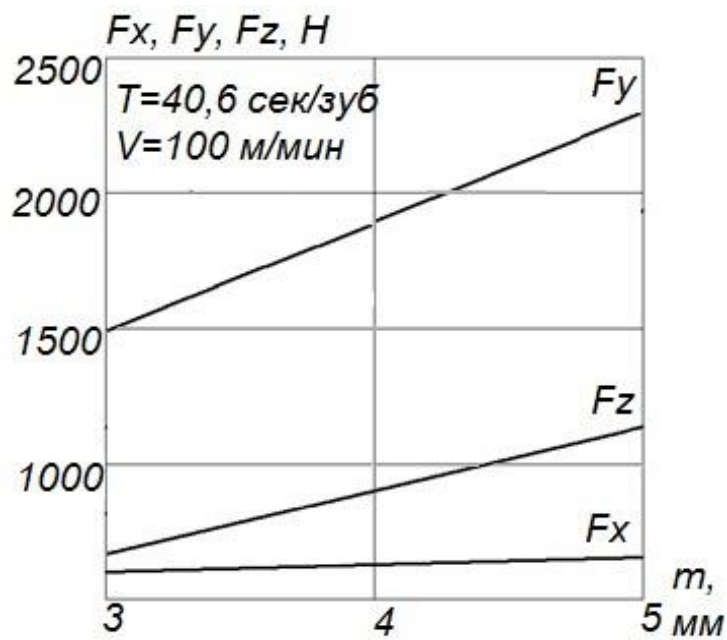


Рисунок 4.6 – Влияние модуля зубьев на осевые составляющие силы резания

$$P_Y = C_{MY} m^{1.72};$$

$$P_Z = C_{MZ} m^{1.2};$$

$$P_X = C_{MX} m^{0.41}.$$

Виртуальные экспериментальные исследования показали, что, в выбранном диапазоне изменения скорость резания не оказывает значительного влияния на осевые составляющие силы резания (рисунок 4.7).

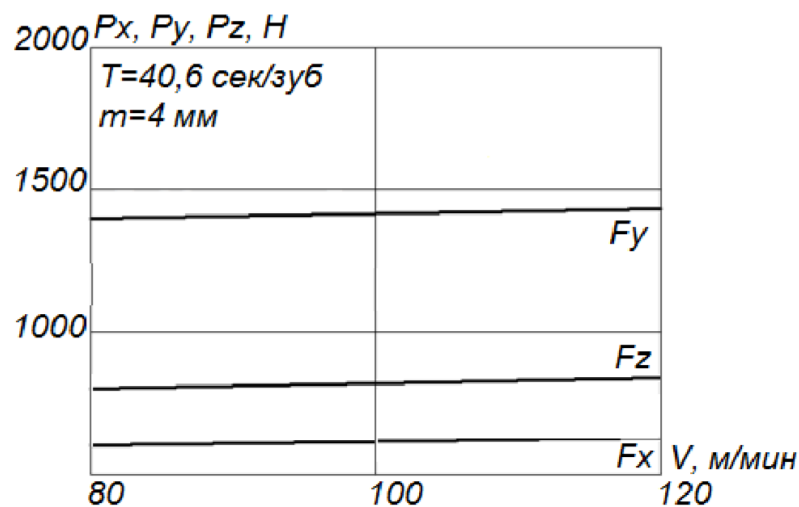


Рисунок 4.7 – Влияние скорости резания на осевые составляющих силы резания

При нормировании операций по обработке конических зубчатых колес, окружная подача задается через параметр «Время обработки одного зуба». Рассматривая график (рисунок 4.8) зависимости осевых составляющих силы резания от времени обработки одного зуба, можно наблюдать, значительному повышению сил соответствует уменьшение времени обработки. Это объясняется увеличением площади сечения реза. Были получены зависимости 7 осевых составляющих силы резания от времени обработки одного зуба:

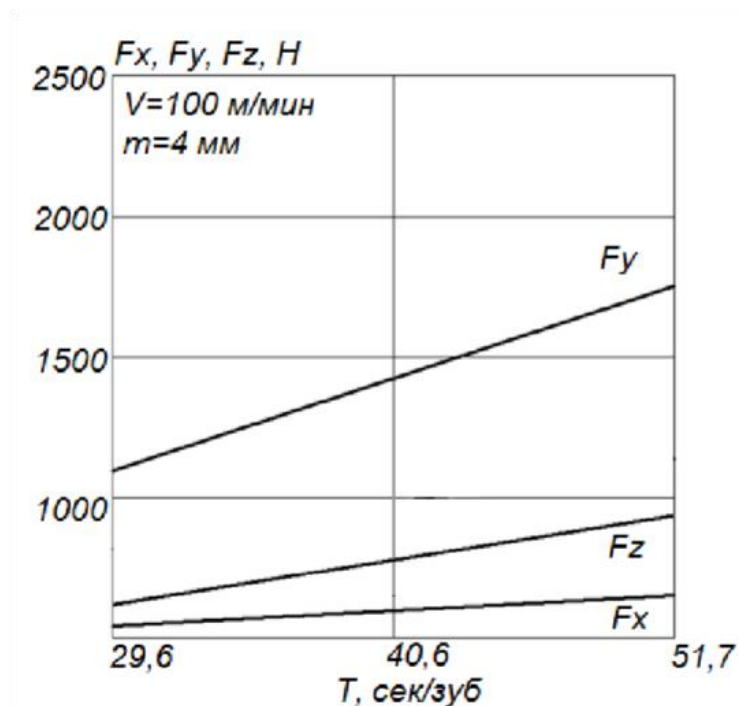


Рисунок 4.8 – Влияние времени обработки одного зуба на осевые составляющие силы резания

$$\begin{aligned} P_Y &= C_{MY} T^{1,37}; \\ P_Z &= C_{MZ} T^{0,81}; \\ P_X &= C_{MX} T^{0,42}. \end{aligned}$$

### 4.3 Влияние геометрических параметров режущего лезвия на процесс обработки

В таблице 4.2 представлена сводная информация по влиянию геометрических параметров обрабатываемого профиля на физические явления сопровождающие процесс резания. Анализ влияния характеристик профиля обрабатываемого зуба на физические явления сопровождающие процесс резания позволил выявить характеристики процесса резания на которые оказывается наибольшее влияние: длина срезаемой стружки, толщина срезаемой стружки, передний угол резания, задний угол резания.

Таблица 4.2 – Влияние геометрии зуба на физические явления сопровождающие процесс резания

	Сила резания	Максимальная температура	Тепловой поток
Увеличение Модуля	Возрастает	Возрастает	Возрастает
Увеличение радиуса закругления	Уменьшается	Уменьшается	Уменьшается
Увеличение угла профиля	Уменьшается	Уменьшается	Уменьшается

В таблице 4.3 представлена информация и качественном влиянии параметров профиля на параметры процесса.

Таблица 4.3 – Влияние геометрии зуба на параметра процесса резания

	Длина срезаемой стружки	Толщина срезаемой стружки	Передний угол резания	Задний угол резания
Увеличение Модуля	Возрастает	Возрастает	-	-
Увеличение радиуса закругления	Возрастает	-	-	-
Увеличение угла профиля	Уменьшается	Возрастает	Возрастает	Возрастает

Анализируя результаты исследований для различных вариантов профиля зуба можно прийти к выводу, что рассматриваемые параметры

оказывают не линейное влияние на обработку, а также их влияние взаимосвязано. Данный факт сложно объяснить оказываемым влиянием на стандартные характеристики процесса резания (таблица 4.3). Кроме того, на первый план выходит проблема формирования сложной стружки. Негативный эффект от повышенных нагрузок возникающих в результате образования сложной стружки хорошо известен и описан во множестве работ отечественных и зарубежных ученых. Данная проблема остро стоит при использовании оборудования и процессов обработки, при которых скорость резания не превышает 20-25 м/мин. В таком случае выбираются относительно большие подачи (особенно при черновой обработке). Казалось бы, что при условии использования современного оборудования позволяющего реализовать скорости резания более 100 м/мин появляется возможность уменьшить подачу и тем самым сократить до минимума возможность формирования сложной стружки, однако этого не происходит по ряду причин, таких как необходимость соблюдения требуемой минимальной толщины слоя срезаемой стружки, обработки по непрорезанным впадинам и др. В этой связи, вопрос влияния сложной стружки на процесс резания встает с новой актуальностью.

#### **4.4 Выводы по главе**

1. Геометрические параметры профиля зубчатого колеса оказывают значимое влияние на физические явления сопровождающие процесс резания:

- радиус закругления вершины резца не одинаково влияет на физические явления сопровождающие процесс резания. С возрастанием от 0,1 до 0,2 мм сила резания возрастает на 12%, максимальная температура снижается на 5%, а тепловой поток на 10%;



- увеличение профильного угла на 10 градусов уменьшает силу резания на 5 %, а также снижает тепловой поток до 20% и максимальную температуру в инструменте до 15 %;

- наблюдаем значимое повышение силы резания с увеличением модуля обрабатываемого зуба.

2. Рассматриваемые регулируемые конструкторско-технологические параметры системы оказывают не линейное влияние на обработку, а также их влияние взаимосвязано. На первый план выходит проблема формирования сложной стружки. Несмотря на то, что современное оборудование позволяет сократить до минимума возможность формирования сложной стружки за счет увеличения скорости и уменьшения подачи, этого не происходит по ряду причин, таких как необходимость соблюдения требуемой минимальной толщины слоя срезаемой стружки, обработки по непрорезанным впадинам и др. В этой связи, вопрос влияния сложной стружки на процесс резания встает с новой актуальностью.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В представленной работе изложена совокупность технологических решений, направленных на повышение производительности и точности механической обработки венцов конических зубчатых колес методом обката за счет рационального выбора конструкторско-технологических параметров процесса (геометрии режущей части инструмента и режимов обработки).

2. На основе синтеза аналитического, численного и эмпирического моделирования разработана прогностическая модель процесса механической обработки зубчатых венцов конических колес позволяющая связать входные конструкторско-технологические параметры системы (материал инструмента и заготовки, кинематику резания, режим обработки, геометрию режущей части инструмента) и физические явления сопровождающие процесс резания (силу резания, максимальную температуру, тепловой поток) и затем, на основе комплексного анализа входных данных и расчетных параметров произвести прогноз результатов обработки (шероховатости и точности зубчатого профиля, а также стойкости инструмента). Различия между расчетными и экспериментальными значениями параметров точности, шероховатости и стойкости не превышают 15%, что подтверждает адекватность предложенной модели.

3. Разработан алгоритм, реализующий предложенную прогностическую модель. Использование алгоритма позволяет решить как задачу прогнозирования производственно значимых результатов обработки (точности, шероховатости и стойкости инструмента), так и решить обратную задачу – на основе анализа информации о требуемых результатах обработки подобрать рациональные регулируемые конструкторско-технологические параметры системы (углы заточки передней и задней режущих кромок, радиус закругления вершины резца, скорость резания, подачу).

4. На основе математического моделирования и проведенных экспериментальных исследованиях были выявлены закономерности между регулируемые конструкторско – технологическими параметрами системы и физическими явлениями возникающими в процессе обработки конических зубчатых колес:

- геометрические параметры режущего инструмента влияют на тепловые процессы, происходящие в инструменте. Тепловой поток уменьшается с увеличением переднего и заднего углов резания. Удельная тепловая энергия возрастает в диапазоне изменения переднего угла от 6 до 9 градусов и уменьшается от 9 до 12. Увеличение значение заднего угла приводит к уменьшению значения удельной тепловой энергии. Передний угол имеет большее влияние на тепловые процессы, чем задний.

- передний и задний углы резания оказывают различное влияние на теплообразование и теплоотвод, что приводит к тому, что для конкретных случаев конструкции режущего инструмента (обрабатываемого профиля) существует возможность установить значения углов, соответствующие требуемой температуре.

- наибольшее влияние на силу резания имеет значение радиуса закругления (75,43%). Передний угол резания оказывает меньшее влияние (20,54%), задний угол резания не оказывает значимое влияние на силу резания.

- наибольшее влияние на максимальную температуру имеет передний угол (61,67%). Задний угол резания и радиус закругления оказывают меньшее влияние (16,17% и 18,22 % соответственно).

- влияние конструктивных параметров режущего лезвия на силу резания и температуру значительно (влияние достигает 15%).

5. Разработаны практические рекомендации, направленные на повышение эффективности производства венцов конических зубчатых колес.

- при проектировании технологических процессов обработки венцов конических зубчатых колес, следует стремиться к упрощению геометрии геометрии срезаемой стружки. Это может быть достигнуто за счет изменения конструкторско-технологических параметров процесса резания.

- при проектировании новых зубчатых передач необходимо учитывать как конструктивные требования, так и технологические особенности процесса, показано, что геометрические параметры профиля зубчатого колеса оказывают значимое влияние на физические явления сопровождающие процесс резания. Учет технологических условий при проектировании новых профилей зубчатых передач позволит повысить эффективность обработки.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Arrazola P. J. et al. Recent advances in modelling of metal machining processes //CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2013. – Т. 62. – №. 2. – С. 695-718.
2. Bhatia, S. M., Pandey P. C., Shan H. S. Thermal cracking of carbide tools during intermittent cutting //Wear. – 1978 – Т. 51 – №. 2 – С. 201-211.
3. Bouzakis, K. D. et al. Determination of chip geometry and cutting forces in gear hobbing by a FEM-based simulation of the cutting process //Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Chemnitz. – 2005 – С. 49-58.
4. Bouzakis, K.-D. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods [Текст] / Bouzakis K.-D., Michailidis E.LiliN., Friderikos O. – Manufacturing Technoljgy. – V. 52. – 2008. – С.583-772.
5. Chandrasekaran, H., Nagarajan R. On certain aspects of transient stresses in cutting tools //Journal of Engineering for Industry. – 1980 – Т. 102 – №. 2 – С. 133-141.
6. Davies, M. A. et al. On the measurement of temperature in material removal processes //CIRP Annals–Manufacturing Technology. – 2007 – Т. 56 – №. 2 – С. 581-604.
7. Davoodi, B., Tazehkandi A. H. Experimental investigation and optimization of cutting parameters in dry and wet machining of aluminum alloy 5083 in order to remove cutting fluid //Journal of Cleaner Production. – 2014 – Т. 68 – С. 234-242.
8. Denkena, B., Tracht K., Clausen M. Material Parameter Determination for Turning Process Simulation //Annals of the German Academic Society for Production Engineering. – XII/1. – 2005.

9. Denkena, D., Optimization of complex cutting tools using a multi-dexel based material removal simulation. 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations [Текст] / Denkenaa B., Grovea T., Papea O. – Procedia CIRP. – 2019. – V. 82. – C. 379–382.
10. Dorsch, H. Temperatur sensoren // Sensor Rept. – 1987 – №5. – C. 9-10.
11. Endoy, Robert. Gear Hobbing, Shaping and Shaving. 1st ed. / Michigan: Society of Manufacturing Engineers Publications Development Dept. – 1991. – P. 27-28.
12. Gerth, J. et al. On the wear of PVD-coated HSS hobs in dry gear cutting //Wear. – 2009 – T. 266 – №. 3 – C. 444-452.
13. Grattan, K. The use of fible optic technigues for temperature measurement // Mear + Conts. – 1987 – №6. – C. 32-38.
14. Grzesik W., Bartoszu M. Prediction of temperature distribution in the cutting zone using finite difference approach //International Journal of Machining and Machinability of Materials. – 2009 – T. 6 – №. 1-2. – C. 43-53.
15. Grzesik, W., Bartoszu M., Nieslony P. Finite difference analysis of the thermal behaviour of coated tools in orthogonal cutting of steels //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2004 – T. 44 – №. 14 – C. 1451-1462.
16. Grzesik, W., Van Luttervelt C. A. Analytical models based on composite layer for computation of tool-chip interface temperatures in machining steels with multilayer coated cutting tools //CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2005 – T. 54 – №. 1 – C. 91-94.
17. Hyatt, G. A Review of New Strategies for Gear Production. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting [Текст] / Hyatt G., PiberNitin M., Orrin C., Orrin K., Mori M. – Procedia CIRP. – 2014. – V. 14. – C. 72-76.

18. Johnson, G. R., Cook W. H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures //Engineering fracture mechanics. – 1985 – T. 21 – №. 1 – C. 31-48.
19. Karpat, Y., Özel T. Analytical and thermal modeling of high-speed machining with chamfered tools //Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2008 – T. 130 – №. 1 – C. 11001.
20. Klein, A. Spiral Bevel and Hypoid Gear Tooth Cutting with Coated Carbide Tools. – Shaker. – 2007.
21. Klocke, F., Brumm M., Herzhoff S. Influence of gear design on tool load in bevel gear cutting //Procedia CIRP. – 2012 – T. 1 – C. 66-71.
22. Klocke, F., Gorgels C., Herzhoff S. Tool load during multi-flank chip formation //Advanced Materials Research. – 2011 – T. 223 – C. 525-534.
23. Komanduri, R., Hou Z. B. Thermal modeling of the metal cutting process – Part III: temperature rise distribution due to the combined effects of shear plane heat source and the tool – chip interface frictional heat source // International Journal of Mechanical Sciences. – 2001 – T. 43 – №. 1 – C. 89-107.
24. Komanduri, R., Hou Z. B. Thermal modeling of the metal cutting process: Part I – Temperature rise distribution due to shear plane heat source // International Journal of Mechanical Sciences. – 2000 – T. 42 – №. 9 – C. 1715-1752.
25. Komanduri, R., Hou Z. B. Thermal modeling of the metal cutting process – Part II: temperature rise distribution due to frictional heat source at the tool – chip interface // International Journal of Mechanical Sciences. – 2001 – T. 43 – №. 1 – C. 57-88.
26. Laperrière, L., Gear Hobbing. In: The International Academy for Production Engineering [Текст] / Laperrière L., Reinhart G. – CIRP. Encyclopedia of Production Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2019. – 46 P.

27. Lazoglu, I., Altintas Y. Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2002 – T. 42 – №. 9 – C. 1011-1022.
28. Mitchell J. Two-Direction Cracking Shear-Friction Membrane Model for Finite Elment Analysis of Reinforced concrete. – 2010.
29. Narutaki Norihiko, Yamane Yasuo. Tool wear and cutting temperature of CBN tool machining of hardened steel // CJRP Ann. – 1979. –№1(28). – P.23-28.
30. Outeiro, J. C. et al. Analysis of residual stresses induced by dry turning of difficult-to-machine materials //CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2008 – T. 57 – №. 1 – C. 77-80.
31. Özel, T. et al. Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti–6Al–4V alloy with experiments and finite element simulations //CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2010 – T. 59 – №. 1 – C. 77-82.
32. Rech, J. Influence of cutting edge preparation on the wear resistance in high speed dry gear hobbing //Wear. – 2006 – T. 261 – №. 5 – C. 505-512.
33. Ueda, T., Hosokawa A., Yamamoto A. Measurement of grinding temperature using infrared radiation pyrometer with optical fiber //Journal of Engineering for Industry. – 1986 – T. 108 – №. 4 – C. 247-251.
34. Usui, E., Shirakashi T., Kitagawa T. Analytical prediction of three dimensional cutting process—Part 3: Cutting temperature and crater wear of carbide tool //Journal of Engineering for industry. – 1978 – T. 100 – №. 2 – C. 236-243.
35. Westhoff, B. Modellierungsgrundlagen zur FE-analyse von HSC-Prozessen. – Shaker, 2001.
36. Winkel, O. Steigerung Hartmetallwerkzeugen durch eine optimierte Werkzeuggestaltung: дис. – Dissertation RWTH Aachen. – 2005.



37. Алексеева, Н.А. Проектирование эвольвентных зубчатых передач авиационных механизмов [Текст] / Алексеева Н.А., Михайлов Ю.Б.: Учебное пособие. – Изд-во МАИ. – 1997. – 72с.: ил.
38. Армарего, И. Обработка металлов резанием: пер. с англ. [Текст] / И. Армарего, Р. Браун. – М.: Машиностроение. – 1977. – 325 с.
39. Барбашов, Ф.А. Фрезерное дело [Текст] / Барбашов Ф.А.: Учебное пособие для сред. проф.-техн. Училищ. – М.: Высшая школа. – 1975. – 216с. с ил.
40. Башков, В.М., Кацев П.Г. Испытания режущего инструмента на стойкость. [Текст] / Башков В.М. – М.: Машиностроение. – 1985. – 136 с.
41. Бердников, Л.Н. Расчет температуры инструмента с механически закрепляемыми пластинами Станки и инструмент. [Текст] / Бердников Л.Н. – 1985. – №11. [Текст] / С.23 24.
42. Бетанели, А.И. Прочность и надежность режущего инструмента. [Текст] / Бетанели А.И. – Тбилиси: Сабчато Сакартвело. – 1973. – 304 с.
43. Большаков, А.Н. Повышение эффективности торцового фрезерования изменением условий резания при выходе зуба из зоны обработки: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Орел, 2014 – 18 с.
44. Васин, Л.А., Васин С.А. Расчет температурного поля в цилиндрической детали при торцовом точении // Технология механической обработки и сборки. – Тула: политехн. ин-т. – 1988. – С. 131-134.
45. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. [Текст] / Верещака А.С. – М.: Машиностроение. – 1983. – 336 с.
46. Виноградов, А.А. Температуры при резании сталей инструментами из твердого сплава и сверхтвердых материалов //Сверхтвердые материалы. – 1988. – №4. – С. 58-62.

47. Виноградов, А.А., Чапалюк В.П. Температуры при резании закаленной стали 45 инструментами из СТМ // Сверхтвердые материалы. – 1992 – №3. – С. 62-67.
48. Гартфельдер, В.А., Аранзон М.А. Определение температуры при точении закаленных сталей резцами из СТМ // Сверхтвердые материалы. – 1989. – №3. – С.55-58.
49. Геер, А.С. Современные методы и технологические решения эффективной обработки зубчатых колес крупного модуля [Электронный ресурс] / А. Геер. – Электрон. текстовые дан. – Москва, 2020. – Режим доступа: <https://technopolice.ru/obrabotka-zubchatyh-koles-krupnogo-modulya/>.
50. Грановский, Г.И., Резание металлов. [Текст] / Грановский, Г.И., Грановский, В.Г. – М.: Высшая школа. – 1985. – 304 с.
51. Григорьев, С.Н., Табаков В.П., Волосова М.А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента. – Старый Оскол: ТНТ. – 2011. – 380 с.
52. Даниелян, А.Н. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов [Текст] / Даниелян А.Н. – М.: Машгиз. – 1954. – 275 с.
53. Дерли, А.Н. Управление параметрами качества нарезаемых колес при зубодолблении на основе многомерного отображения процесса обработки: дис. канд. техн. наук. Брянский. гос. университет, Брянск, 2000.
54. Зорев, Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. [Текст] / Зорев Н.Н. – М.:Машгиз. – 1956. – 368 с.
55. Зубофрезерование [Электронный ресурс] Электрон. текстовые дан. – 2019. – Режим доступа: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/milling/pages/gear-manufacturing.aspx?Country=ru>.

56. Инструментальщик: энциклопедический справочник-каталог. В трех томах. Том 1 / Я.А. Музыкант, Я. Арпаз, М.А. Волосова / Под общ. ред. Я.А. Музыканта. – М.: Наука и технологии. – 2009. – 464 с.
57. Инструменты для нарезания конических колес [Электронный ресурс] Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: [http://www.info.instrumentmr.ru/instrum\\_narez\\_koles.shtml](http://www.info.instrumentmr.ru/instrum_narez_koles.shtml).
58. Кабалдин, Ю.Г. Исследование температуры и адгезии при непрерывном и прерывистом резании // Станки и инструмент. – 1980. – №4. – С. 27-29.
59. Калашников, А.С. Технологии изготовления зубчатых колес [Текст] / А.С. Калашников – М.: Машиностроение. – 2004. – 480 с.
60. Калашников, С.Н. Производство зубчатых колес [Текст] / С.Н. Калашников, А.С. Калашников, Г.И. Коган – М.: Машиностроение. – 1990. – 464с.
61. Кедринский, В.Н. Станки для обработки конических зубчатых колес [Текст] / Кедринский, В.Н., Писманик К.М. – М.: Машиностроение. – 1967. – 583.: ил.
62. Координатно-измерительная машина LH 87 STANDARD / PREMIUM / PREMIUM-SELECT. Технические характеристики [Электронный ресурс] Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/43794801-Koordinatno-izmeritelnaya-mashina-lh-87-standard-premium-premium-select-tehnicheskie-harakteristiki.html>.
63. Кочеровский, Е.В. Тепловые деформации режущих элементов, оснащенных композитом 01 // Станки и инструмент. – 1989. – №3. – С.35-37.
64. Кравченко, Б.А., Лищинский Н.Я. Исследование температуры резания при торцовом фрезеровании закаленных сталей инструментами из

СТМ // Прогрессивные процессы в машиностроении: Сборник научных трудов. - Волгоград: ВПИ. – 1985. – С.50-54.

65. Кравченко, Б.А., Лищинский Н.Я. Исследование температуры резания при торцовом фрезеровании закаленных сталей инструментами из СТМ // Прогрессивные процессы в машиностроении: Сборник научных трудов. - Волгоград: ВПИ. – 1985. – С.50-54.

66. Ларин, М.Н. Оптимальные геометрические параметры режущей части инструмента. [Текст] / Ларин, М.Н. – М.: Оборонгиз. – 1953. – 169 с.

67. Лоладзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. [Текст] / Лоладзе Т.Н. – М.: Машиностроение. – 1982. – 320 с.

68. Макаров, А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. [Текст] / Макаров А.Д. – М.: Машиностроение. – 1966. – 264 с.

69. Материалы и технологические процессы машиностроительных производств: Учебное пособие / Е.А. Кудряшов, С.Г. Емельянов, Е.И. Яцун. – М.: Аль-фа-М: ИНФРА-М.. – 2012. – 256 с.

70. Методы обработки зубчатых колес [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. – Москва, 2015. – Режим доступа: <https://tehnar.net.ua/ obrabotka-zubchatyih-koles-2/>.

71. Мильштейн, Н.З. Нарезание зубчатых колес [Текст] / Мильштейн Н.З. – М.: Высшая школа. – 1972. – 272 с.: ил.

72. Нарезание зубьев конических колес [Электронный ресурс] Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <https://www.studiplom.ru/soft/Tekhnologiya-narezaniya-zebev-konitseskikh-i-chervyachnykh-koles.html>.

73. Нарезание конических колес [Электронный ресурс] Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <https://xn--80awbhbdcfu.su/narezkonkol/>.

74. Патент № DE102010042835, 26.05.2012. Stefan Scherbarth. Zahnfräser und Verfahren zum Fräsen der Zähne von Zahngetriebeelementen.

75. Пашментова, А.С. К вопросу о новых технологиях производства зубчатых колес // Материалы V региональной научно-практической конференции. (30 марта – 2 апреля 2018 г., г. Ливны – г. Тула). – Орел. ОГУ имени И.С. Тургенева. – 2018. – С. 36-39.
76. Проскуряков, С.Л., Макаров В.Н. Теоретическое определение геометрических параметров и температурного поля элементной стружки // Технологическое обеспечение надежности и долговечности деталей: Сборник научных трудов. – Ярославль: политехн. ин-т. – 1987. – С. 100-109.
77. Резников, А.Н. Теплообмен при резании и охлаждении инструментов. [Текст] / Резников А.Н. – М.: Машгиз. – 1963. – 199 с.
78. Резников, А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. [Текст] / Резников А.Н. – Машиностроение. – 1981. – 279 с.
79. Резников, А.Н. Теплофизика резания. [Текст] / Резников А.Н. – М.: Машиностроение. – 1969. – 279 с.
80. Резников, А.Н., Тепловые процессы в технологических системах. [Текст] / Резников А.Н., Резников Л.А. – М.: Машиностроение. – 1990. – 288 с.
81. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. [Текст] / Рыкалин Н. Н. – М.: Машгиз. – 1951. – 269 с.
82. Симонян, М.М. Исследование динамики силового и теплового воздействий на твердосплавный инструмент при прерывистом резании // Вестник машиностроения. – 2004. – №12. – С. 54-56.
83. Синопальников, В.А., Гурин В.Д. Температурное поле в режущем клине инструмента при прерывистой работе // Вестник машиностроения. – 1980 №4. – С. 44-47.
84. Станок зуборезный для нарезания конических колес. Иллюстрированные каталоги, справочники, базы данных по металлорежущим станкам и кузнечно-прессовому оборудованию [Электронный ресурс]

Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: [http://mail.stanki-katalog.ru/sprav\\_528s.htm](http://mail.stanki-katalog.ru/sprav_528s.htm).

85. Суслов, А.Г. Инженерия поверхности деталей [Текст] / А.Г. Суслов – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

86. Табаков, В.П., Смирнов М.Ю., Циркин А.В. Исследование теплового и напряженного состояния режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях резания // Вестник машиностроения. – 2010. – №6. – С. 11-16.

87. Талантов, Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. [Текст] / Талантов Н.В. – М.: Машиностроение. – 1992. – 240 с.

88. Технология Skiving для крупномодульных зубчатых колёс [Электронный ресурс] Электрон. текстовые дан. Журн. Твердый сплав. – 2019. – Режим доступа: <https://tverdysplav.ru/tehnologiya-skiving-dlya-kрупnomodulnyh-zubchatyh-kolyos/>.

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

90. Fang N., Jawahir I. S. An analytical predictive model and experimental validation for machining with grooved tools incorporating the effects of strains, strain-rates, and temperatures // CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2002. – Т. 51. – №. 1. – С. 83-86.

91. Wang X., Jawahir I. S. Recent advances in plasticity applications in metal machining: slip-line models for machining with rounded cutting edge restricted contact grooved tools // International Journal of Machining and Machinability of Materials. – 2007. – Т. 2. – №. 3-4. – С. 347-360.

92. Jin X., Altintas Y. Prediction of micro-milling forces with finite element method //Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Т. 212. – №. 3. – С. 542-552.
93. Wang Z. G. et al. A hybrid cutting force model for high-speed milling of titanium alloys //CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2005. – Т. 54. – №. 1. – С. 71-74.
94. Matsumura T., Usui E. Predictive cutting force model in complex-shaped end milling based on minimum cutting energy //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2010. – Т. 50. – №. 5. – С. 458-466.
95. Tamura S., Matsumura T., Arrazola P. J. Cutting force prediction in drilling of titanium alloy //Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. – 2012. – Т. 6. – №. 6. – С. 753-763.
96. Стеблецов Ю. Н., Тарапанов А. С., Михайлов Г. А. Экспериментальное исследование сил резания при обработке зубчатых колес передачи Новикова //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – №. 6. – С. 95-101.
97. Стеблецов Ю. Н., Тарапанов А. С. Определение сил резания процесса нарезания зубчатых колес передачи Новикова червячными фрезами //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – №. 5-2. – С. 31-34.
98. Анисимов Р. В., Тарапанов А. С. Силы резания при зубодолблении колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – №. 5. – С. 86-93.
99. Berglind L., Plakhotnik D., Ozturk E. Discrete Cutting Force Model for 5-Axis Milling with Arbitrary Engagement and Feed Direction //Procedia CIRP. – 2017. – Т. 58. – С. 445-450.

100. Altintas Y., Merdol S. D. Virtual high performance milling //CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2007. – T. 56. – №. 1. – C. 81-84.
101. Abuelnaga, A.M. Optimization methods for metal cutting //International Journal of Machine Tool Design and Research. – 1984. – T. 24. – №. 1. – C. 11–18.;
102. Barker, T.B. Quality engineering by design: Taguchis philosophy //Quality Progress. – 1986. – T. 19. – №. 12. – C. 32–42.
103. Chua, M. S. et al. Determination of optimal cutting conditions using design of experiments and optimization techniques //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1993. – T. 33. – №. 2. – C. 297–305.
104. Kackar, R.N. Robust design: a cost-effective method for improving manufacturing processes //AT&T technical journal. – 1986. – T. 65. – №. 2. – C. 39–50.
105. Montgomery, D.C. Statistical quality control. – New York: Wiley, 2009. – T. Nian, C.Y. Optimization of turning operations with multiple performance characteristics //Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – T. 95. – №. 1–3. – C. 90–96.
106. Noori, H. The Taguchi methods: Achieving design and output quality //The Academy of Management Executive. – 1989. – T. 3. – №. 4. – C. 322–326.
107. Peace, G.S. Taguchi methods: a hands-on approach. – Addison Wesley Publishing Company, 1993.
108. Ross, P.J. Taguchi Methods for Quality Engineering. – 1988.
109. Roy, R.K. A primer on the Taguchi method, competitive manufacturing series //New York. – 1990. – C. 7– 80.
110. Taguchi, G., Taguchi methods: Orthogonal arrays and linear graphs: tools for quality engineering. – American Supplier Institute, 1987.



111. Taguchi, G. Quality engineering through design optimization //Quality Control, Robust Design, and the Taguchi Method. – Springer, Boston, MA, 1989. – C. 77–96.
112. Yang, W. H. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method //Journal of materials processing technology. – 1998. – T. 84. – №. 1–3. – C. 122–129.
113. Zhou, C. An integrated system for selecting optimum cutting speeds and tool replacement times //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1992. – T. 32. – №. 5. – C. 695–707.
114. P. J. et al. Recent advances in modelling of metal machining processes // CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2013. – T. 62. – №. 2. – C. 695-718.
115. Berglind L., Plakhotnik D., Ozturk E. Discrete Cutting Force Model for 5-Axis Milling with Arbitrary Engagement and Feed Direction //Procedia CIRP. – 2017. – T. 58. – C. 445-450.

## Приложение А

На рисунках А.1 - А.9 приведены графики изменения теплового поля на передней поверхности инструмента, задней боковой поверхности инструмента и задней вершинной поверхности инструмента

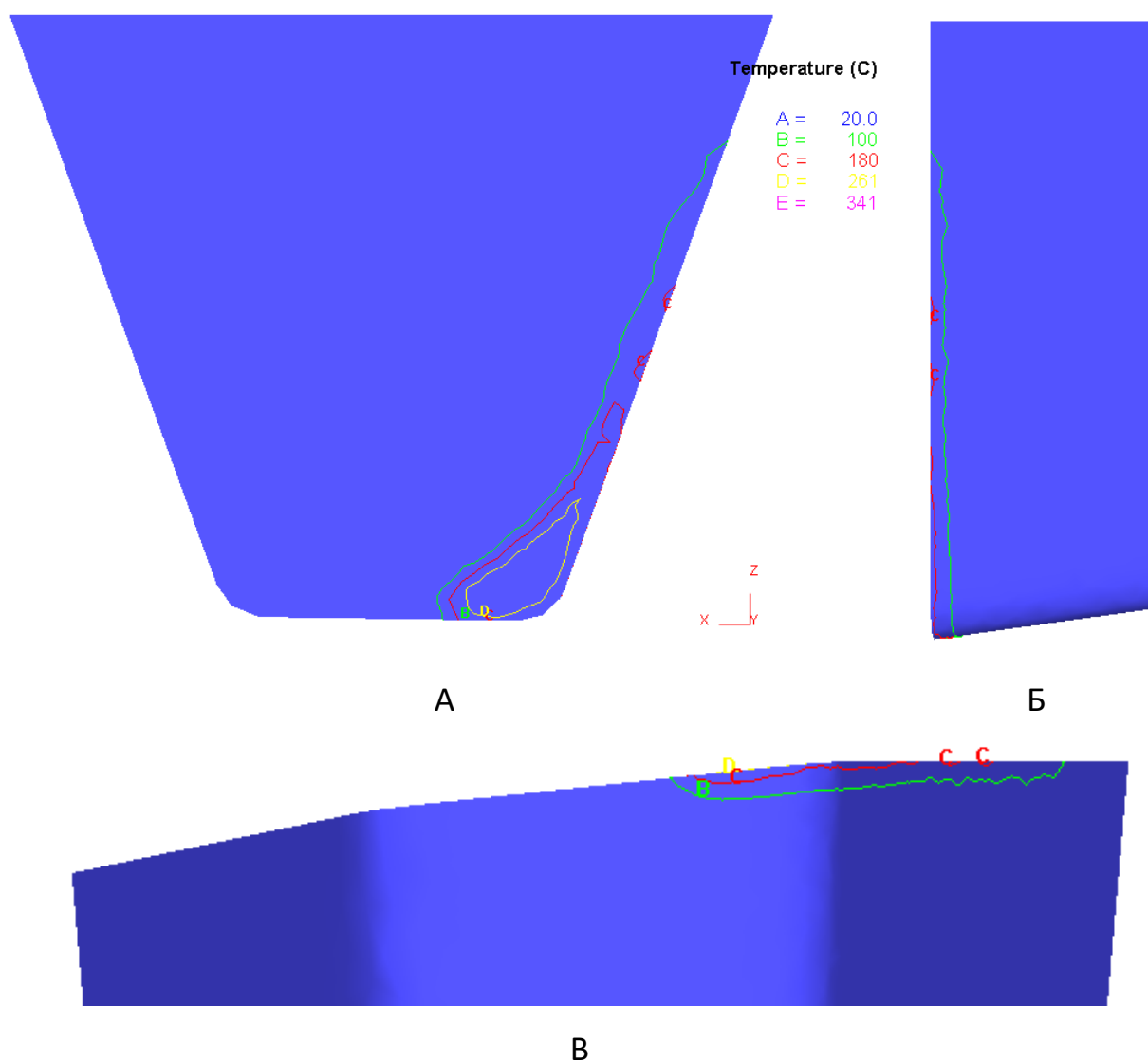


Рисунок А.1 - Тепловое поле при  $\gamma = 6$  градусов ;  $\alpha = 5$  градусов (А - на передней поверхности, Б - на задней боковой поверхности, В - на задней вершинной поверхности)

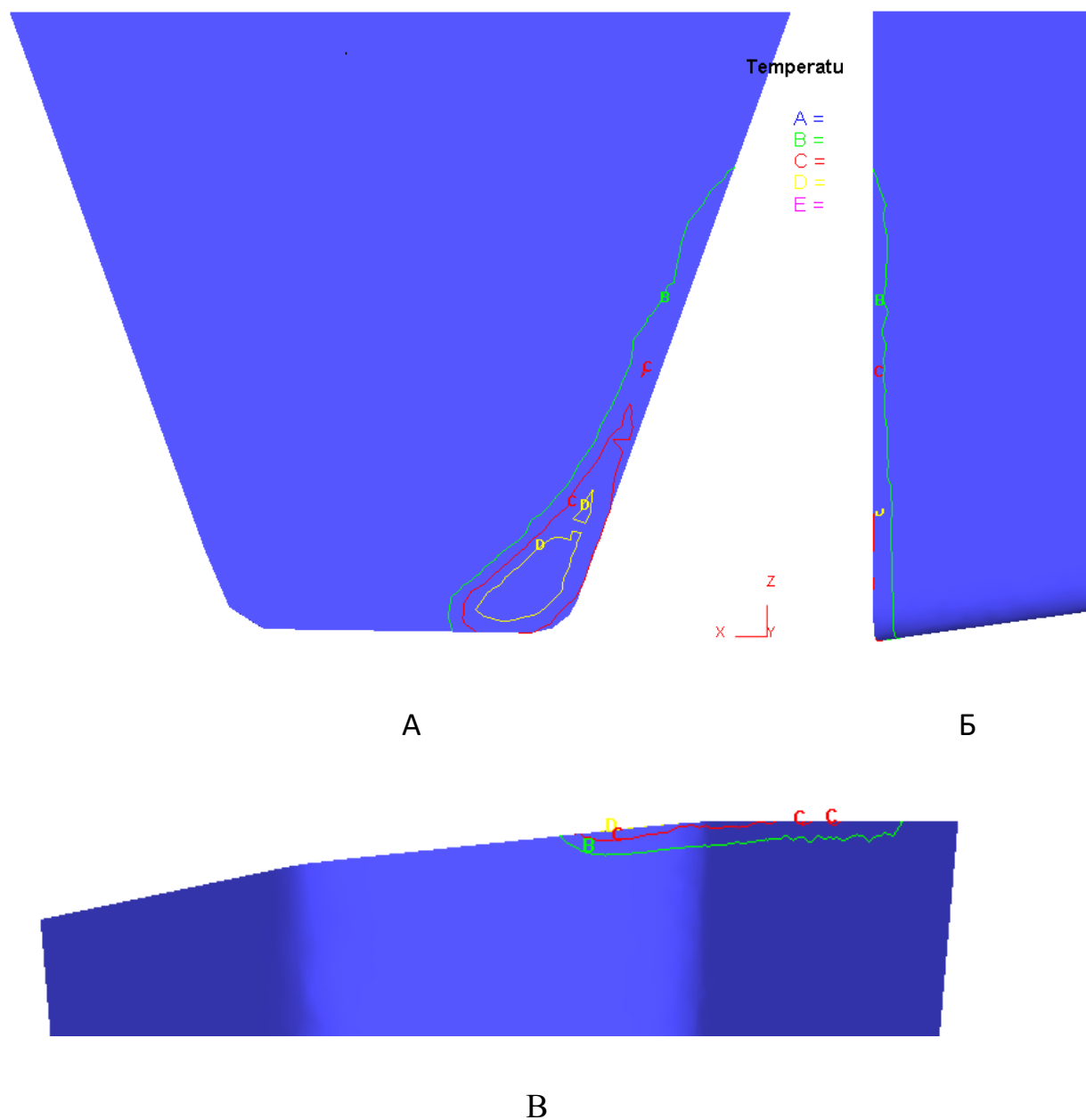
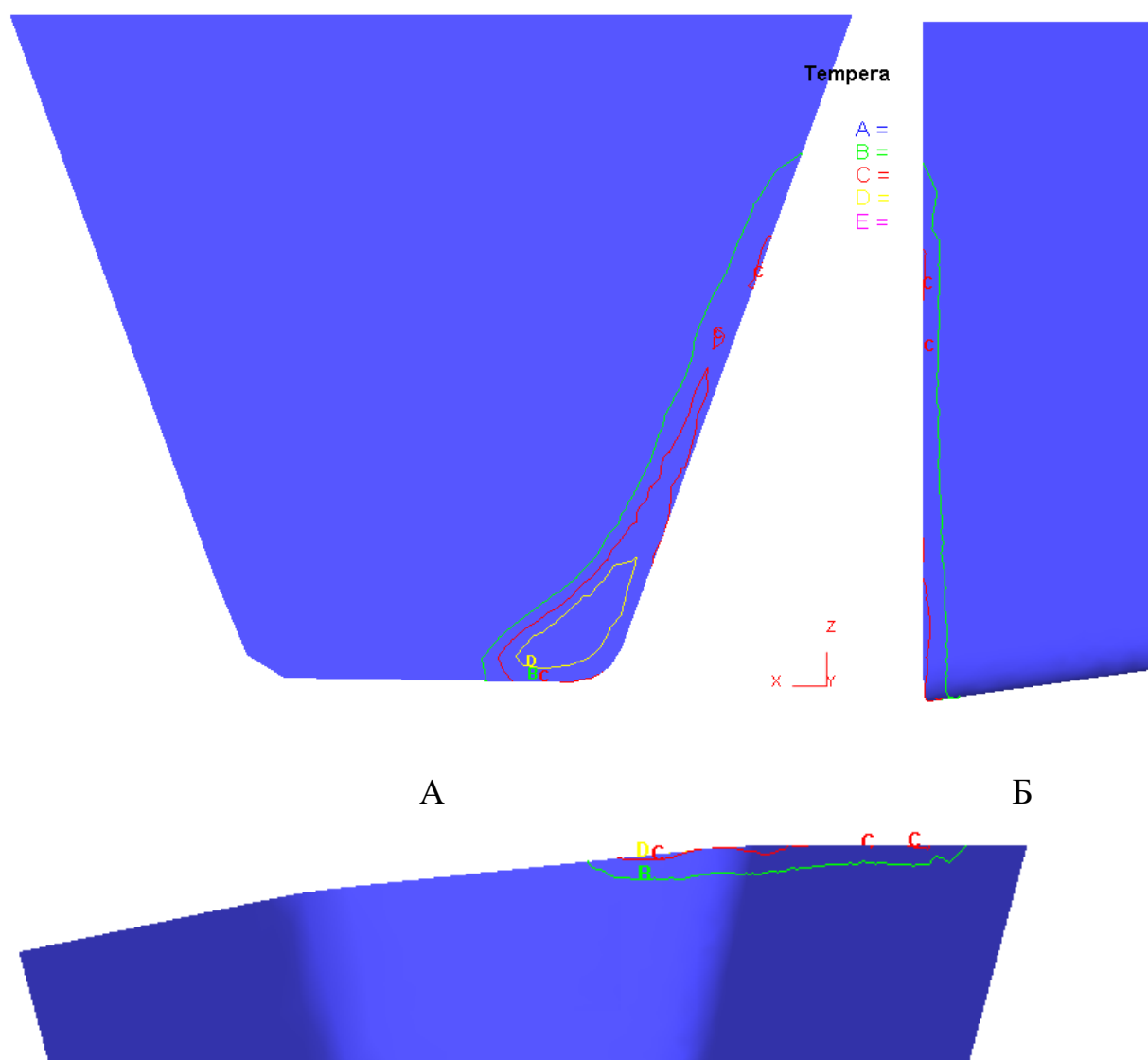
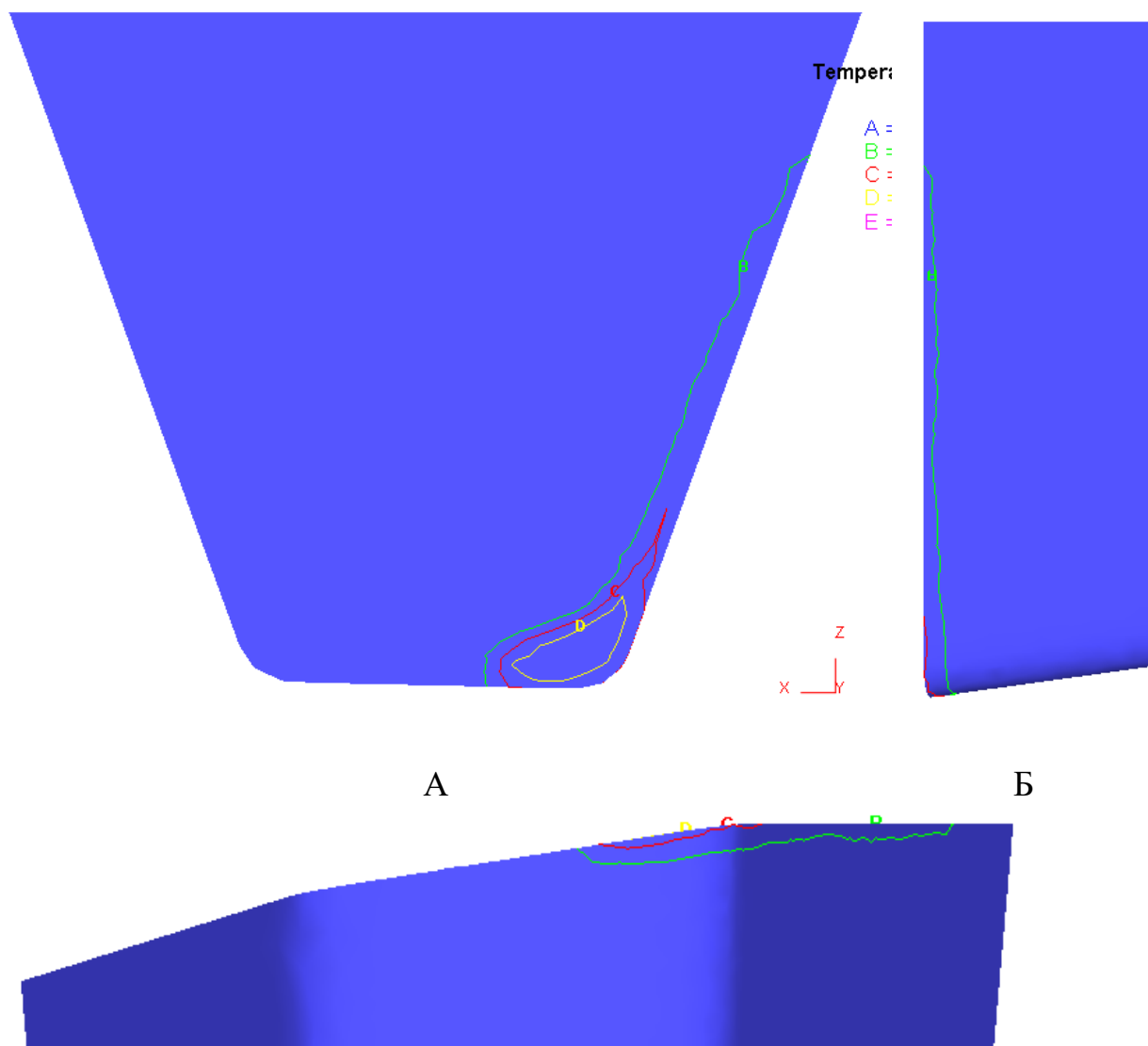


Рисунок А.2 - Тепловое поле при  $\gamma = 6$  градусов ;  $\alpha = 10$  градусов (А - на передней поверхности, Б - на задней боковой поверхности, В - на задней вершинной поверхности)



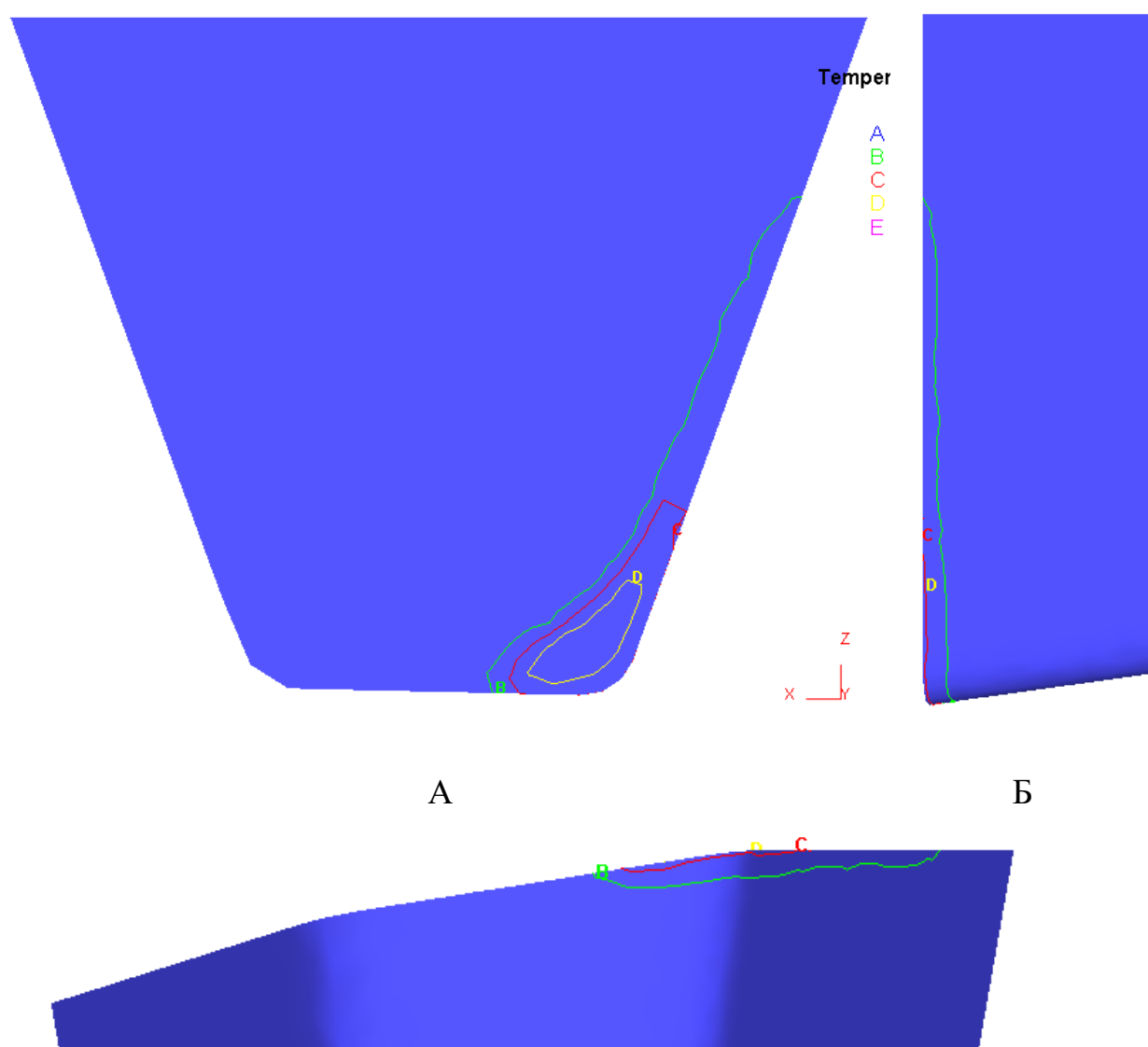
В

Рисунок А.3 - Тепловое поле при  $\gamma=6$  градусов ;  $\alpha= 15$  градусов (А - на передней поверхности, Б - на задней боковой поверхности, В - на задней вершинной поверхности)



В

Рисунок А.4 - Тепловое поле при  $\gamma = 9$  градусов ;  $\alpha = 5$  градусов (А - на передней поверхности, Б - на задней боковой поверхности, В - на задней вершинной поверхности)



В

Рисунок А.5 - Тепловое поле при  $\gamma = 9$  градусов ;  $\alpha = 10$  градусов (А - на передней поверхности, Б - на задней боковой поверхности, В - на задней вершинной поверхности)

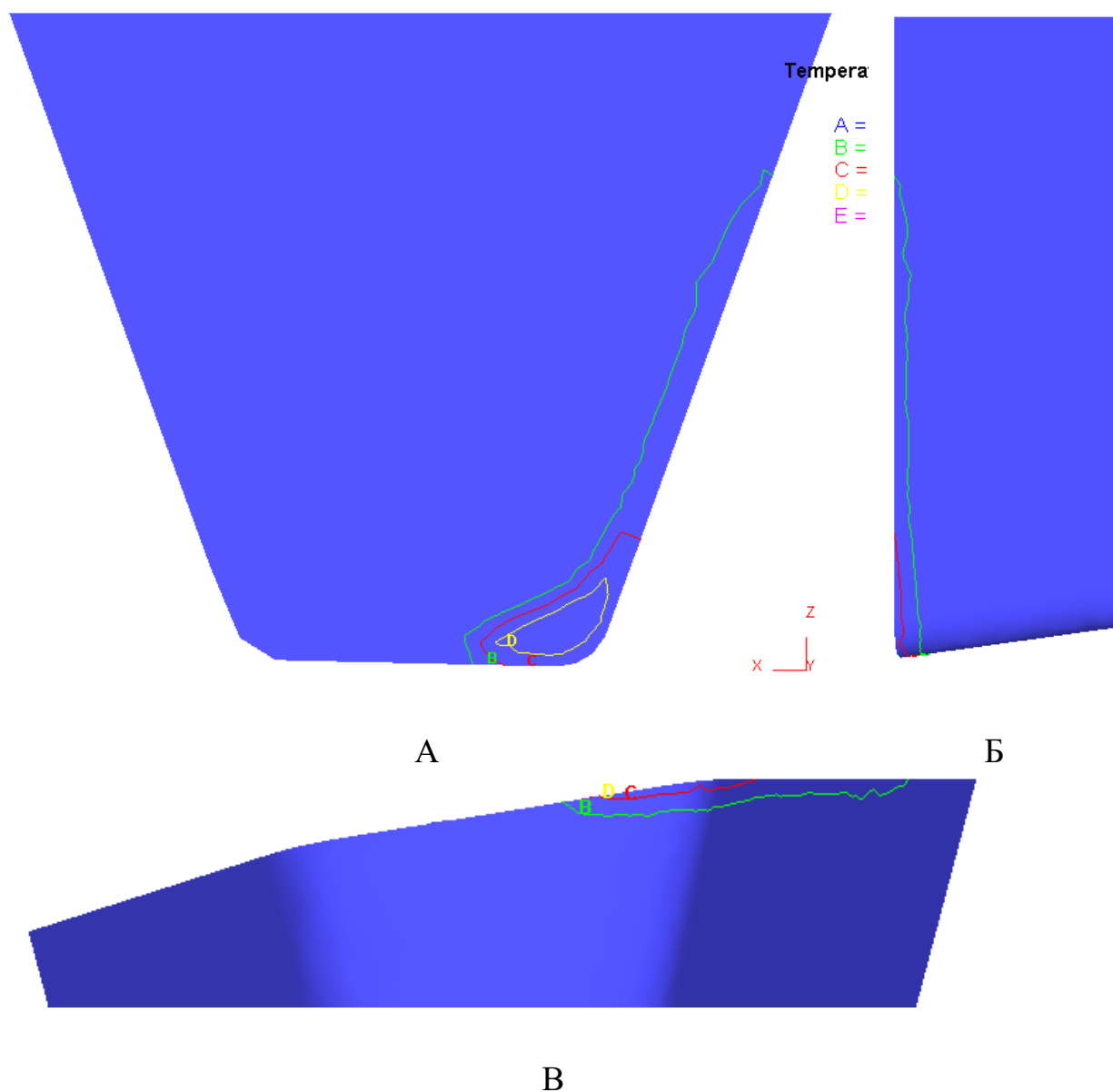
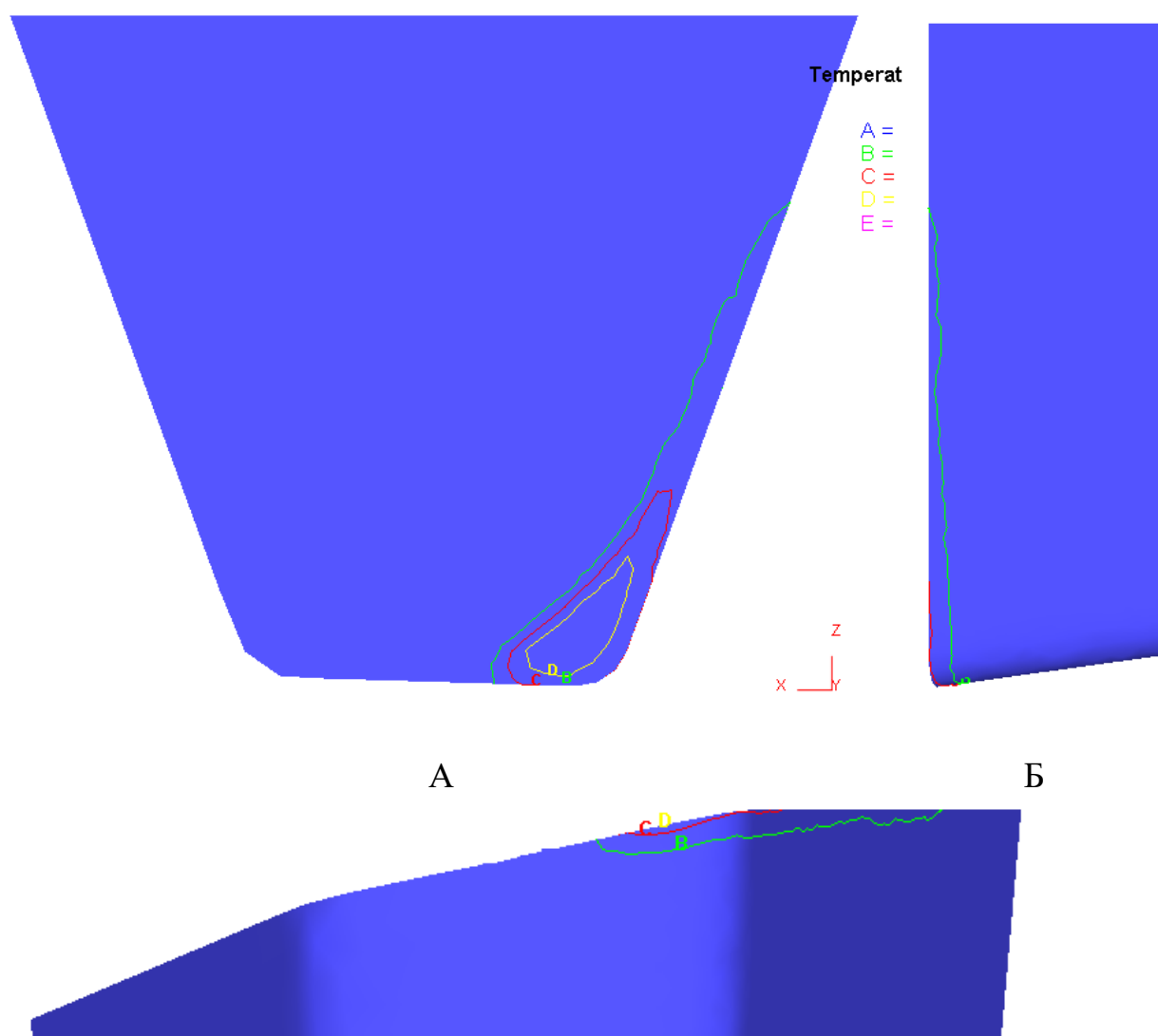


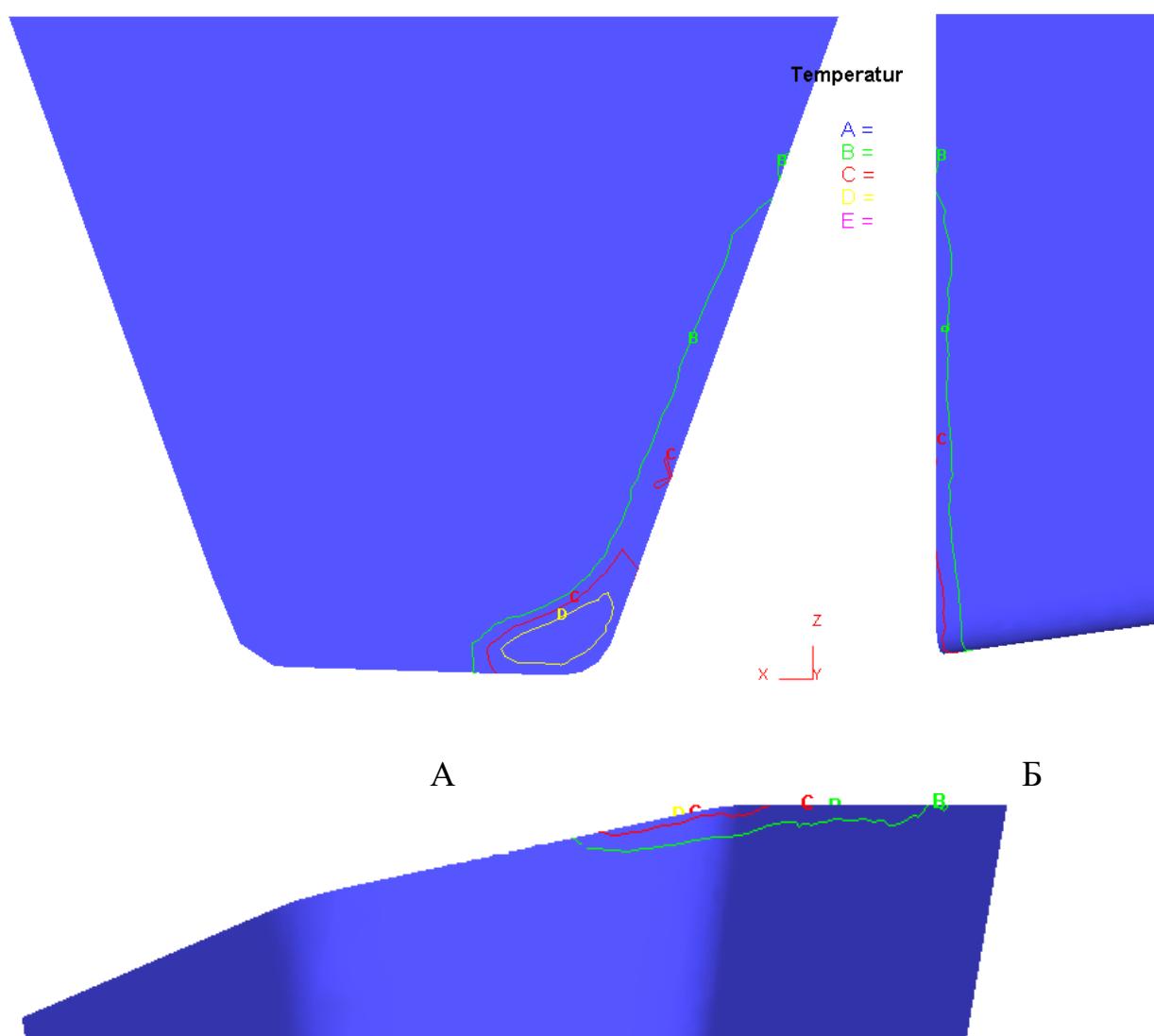
Рисунок А.6 - Тепловое поле при  $\gamma=9$  градусов ;  $\alpha=15$  градусов (А - на передней поверхности, Б - на задней боковой поверхности, В - на задней вершинной поверхности)



В

Рисунок А.7 - Тепловое поле при  $\gamma = 12$  градусов ;  $\alpha = 5$  градусов (А - на передней поверхности, Б - на задней боковой поверхности, В - на задней вершинной поверхности)





В

Рисунок А.8 - Тепловое поле при  $\gamma = 12$  градусов ;  $\alpha = 10$  градусов (А - на передней поверхности, Б - на задней боковой поверхности, В - на задней вершинной поверхности)

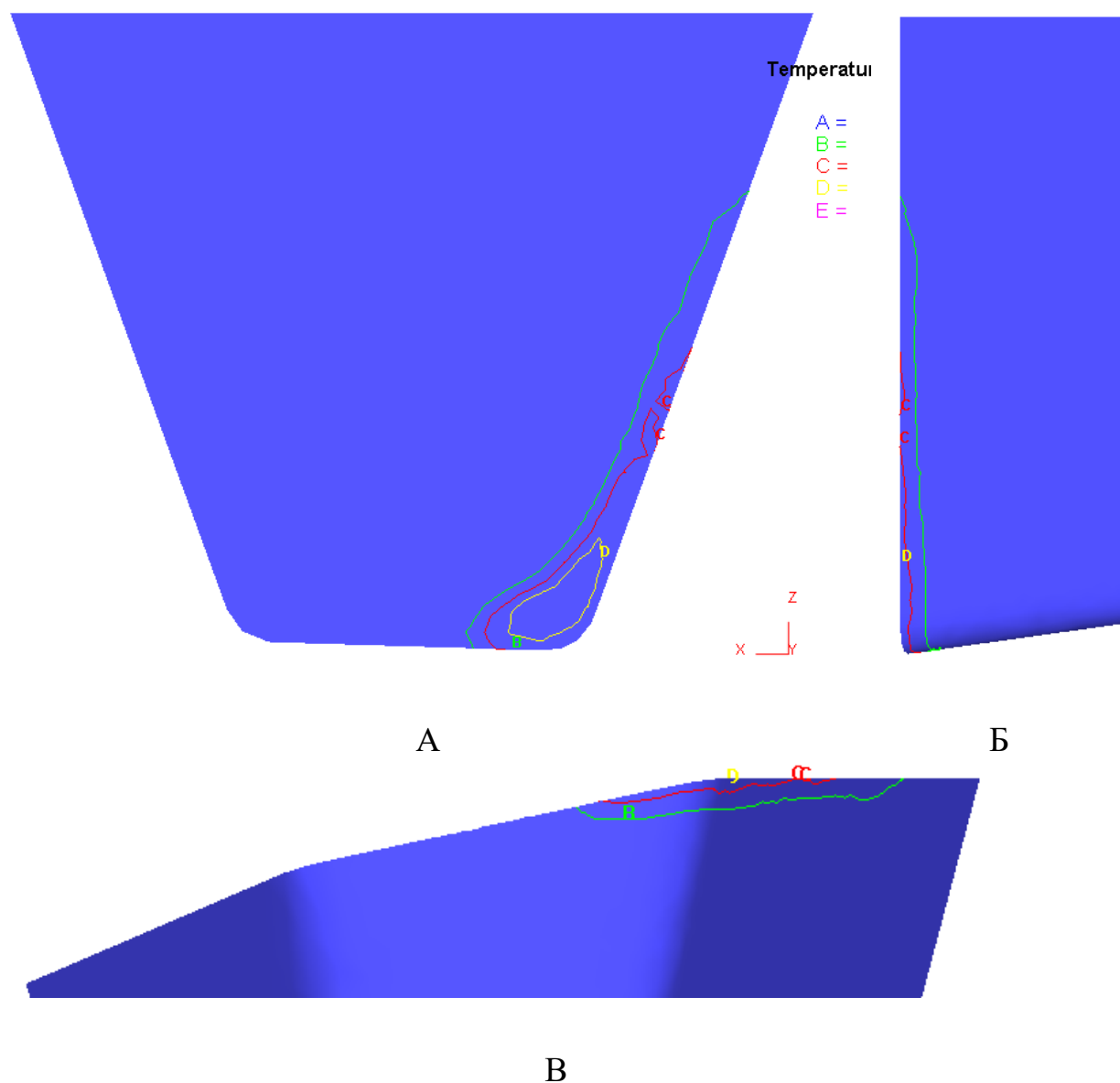


Рисунок А.9 - Тепловое поле при  $\gamma = 12$  градусов ;  $\alpha = 15$  градусов (А - на передней поверхности, Б - на задней боковой поверхности, В - на задней вершинной поверхности)