

**В. А. ДАНИЛОВ, Р. А. КИСЕЛЁВ, О. В. ЯЛОВСКИЙ**

**ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ  
КОНТУРОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Новополоцк  
ПГУ  
2015

УДК 621.91.04(035.3)

ББК 34.4

П78

Рекомендовано к изданию советом учреждения образования  
«Полоцкий государственный университет» в качестве монографии

*Рецензенты:*

д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Беларуси,  
лауреат Государственной премии Республики Беларусь,  
технический директор ЗАО «Солигорский Институт проблем  
ресурсосбережения с Опытным производством» В. Я. ПРУШАК;  
канд. техн. наук, доц., профессор кафедры «Технология  
и оборудование машиностроительного производства»  
Полоцкого государственного университета А. И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ

**Данилов, В. А.**

П78

Прогрессивные технологии формообразования торцовых зубчатых контуров деталей машин / В. А. Данилов, Р. А. Киселёв, О. В. Яловский. – Новополоцк : ПГУ, 2015. – 220 с.

ISBN 978-985-531-393-0.

В монографии изложены методологические основы синтеза способов формообразования торцовых зубчатых контуров при непрерывном движении деления, дан анализ схем кинематического формирования производящих линий обрабатываемых поверхностей на базе циклоидальных кривых. Исследованы возможности схем обработки торцовых зубчатых контуров с прямолинейными и круговыми пазами резцовыми головками, червячными и секторными инструментами по универсальности и точности формообразования. Предложены кинематические и геометрические методы управления процессами формообразования для расширения их технологических возможностей, повышения точности обработки и обеспечения рациональных условий резания. Рассмотрены варианты реализации разработанных технологий формообразования торцовых зубчатых контуров у деталей типа кулачковых и храповых муфт и индукторов АБС автомобилей на специальных и универсальных станках с применением созданных режущих инструментов.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников машиностроительных и приборостроительных предприятий; может быть полезна студентам, магистрантам и аспирантам.

**УДК 621.91.04(035.3)**

**ББК 34.4**

**ISBN 978-985-531-393-0**

© Данилов В. А., Киселёв Р. А., Яловский О. В., 2015  
© УО «Полоцкий государственный университет», 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	7
<b>Глава 1. Методические основы синтеза технологий формообразования торцовых зубчатых контуров</b> .....	9
1.1. Представление и классификация методов формообразования поверхностей резанием .....	9
1.2. Общие принципы синтеза рациональных схем формообразования поверхностей резанием .....	12
1.3. Синтез схем формообразования торцовых зубчатых контуров .....	19
1.3.1. Геометрия торцовых зубчатых контуров .....	19
1.3.2. Методы формирования производящих линий при обработке пазов.....	27
1.3.3. Исполнительные движения при обработке пазов.....	28
1.3.4. Методика синтеза методов и схем формообразования торцовых зубчатых контуров .....	30
1.4. Синтез и анализ технологических возможностей методов формообразования торцовых зубчатых контуров .....	34
<b>Глава 2. Анализ схем формообразования торцовых зубчатых контуров на базе циклоидальных кривых</b> .....	43
2.1. Схемы кинематического формирования направляющих линий при обработке торцовых зубчатых контуров.....	43
2.2. Математическое моделирование схем формирования направляющих линий торцовых зубчатых контуров .....	47
2.3. Анализ формы траектории исполнительного движения.....	50
2.3.1. Форма образуемых линий при целом значении кинематического коэффициента.....	51
2.3.2. Форма образуемых линий при дробном значении кинематического коэффициента.....	55
2.4. Определение и оптимизация параметров схемы формирования направляющих линий торцовых зубчатых контуров.....	58

<b>Глава 3. Обработка торцовых зубчатых контуров</b>	
<b>при скрещивающихся осях инструмента и заготовки</b> .....	63
3.1. Схемы обработки торцовых зубчатых контуров резцовыми головками .....	63
3.2. Схемы обработки торцовых зубчатых контуров дисковыми и червячными инструментами .....	71
3.3. Математическое моделирование схем обработки торцовых зубчатых контуров инструментами червячного и секторного типов.....	76
3.3.1. Обработка торцовых зубчатых контуров червячными инструментами .....	77
3.3.2. Обработка торцовых зубчатых контуров секторными инструментами .....	82
3.3.3. Анализ технологических возможностей схем обработки на основе математических моделей .....	88
3.4. Профилирование пазов методом копирования при непрерывном движении деления.....	90
3.5. Сравнительный анализ схем обработки торцовых зубчатых контуров инструментами червячного и секторного типов.....	96
3.6. Геометрическое управление формообразованием торцовых зубчатых контуров секторным инструментом .....	100
3.7. Кинематическое управление формообразованием торцовых зубчатых контуров секторным инструментом .....	105
3.7.1. Кинематические условия формирования пазов на торце детали.....	105
3.7.2. Управление формообразованием путем изменения отношения частот вращения инструмента и заготовки...	107
3.7.3. Управление формообразованием за счет параметров схемы обработки .....	111
<b>Глава 4. Обработка торцовых зубчатых контуров</b>	
<b>при параллельных осях инструмента и заготовки</b> .....	113
4.1. Типовые схемы обработки торцовых зубчатых контуров с непрерывным движением деления .....	113
4.2. Формирование торцовых зубчатых контуров с прямыми и круговыми пазами .....	118
4.2.1. Обеспечение заданного числа пазов .....	118

4.2.2. Оценка неустойчивости скорости исполнительного движения .....	122
4.2.3. Погрешность формообразования пазов.....	124
4.3. Модификация схем обработки торцовых зубчатых контуров при кинематическом управлении формообразованием.....	128
4.3.1. Формирование торцовых зубчатых контуров по базовой схеме .....	129
4.3.2. Формирование торцовых зубчатых контуров при последовательном и одновременном выполнении движений врезания и профилирования .....	130
4.3.3. Обработка торцовых зубчатых контуров при переменном межосевом расстоянии.....	132
4.4. Анализ кинематических способов управления формообразованием торцовых зубчатых контуров .....	134
4.5. Анализ геометрических способов управления формообразованием торцовых зубчатых контуров.....	140
<b>Глава 5. Динамика процессов обработки торцовых зубчатых контуров по схеме с непрерывным делением.....</b>	<b>151</b>
5.1. Оценка динамики процессов обработки торцовых зубчатых контуров.....	151
5.2. Изменение сил резания при обработке пазов секторным инструментом .....	156
5.3. Обеспечение динамической устойчивости процесса обработки.....	159
5.4. Повышение динамической устойчивости обрабатываемой системы при ее проектировании .....	163
<b>Глава 6. Влияние параметров настройки обрабатываемой системы на точность формообразования .....</b>	<b>168</b>
6.1. Точность обработки торцовых зубчатых контуров резцовой головкой .....	168
6.1.1. Факторы, влияющие на точность обработки.....	168
6.1.2. Влияние погрешности геометрических параметров инструмента на точность обработки .....	172
6.1.3. Влияние погрешности заготовки на точность обработки.....	174

6.1.4. Влияние погрешности относительного расположения инструмента и заготовки на точность обработки.....	175
6.1.5. Погрешность схемы формообразования пазов .....	176
6.1.6. Определение погрешности обработки на основе математической модели схемы формообразования .....	178
6.1.7. Алгоритм расчета погрешности обработки торцового зубчатого контура резцовой головкой .....	179
6.2. Влияние погрешностей элементов обрабатывающей системы на точность обработки торцовых зубчатых контуров секторным инструментом.....	182
6.3. Определение допусков на параметры режущего инструмента.....	184
<b>Глава 7. Реализация процессов обработки торцовых зубчатых контуров по схемам с непрерывным движением деления .....</b>	<b>188</b>
7.1. Станочное оборудование для обработки торцовых зубчатых контуров.....	188
7.2. Режущие инструменты для обработки торцовых зубчатых контуров .....	194
7.2.1. Инструменты типа резцовых головок.....	194
7.2.2. Секторные инструменты .....	198
7.3. Настройка станков для нарезания торцового зубчатого контура .....	203
7.4. Обработка торцовых зубчатых контуров на универсальном оборудовании.....	206
<b>Заключение .....</b>	<b>210</b>
<b>Литература.....</b>	<b>213</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В трансмиссиях машин, станках, приборах и измерительных устройствах различного назначения широко применяются изделия с зубчатым контуром на торцах типа кулачковых и храповых муфт, индукторов, роторов и т.п. [1, 55, 68]. Существующие технологии их обработки основаны, как правило, на дискретном процессе формообразования и поэтому имеют относительно низкую производительность и не соответствуют мировым достижениям в данной области. В этой связи актуальной является проблема интенсификации процессов формообразования торцовых зубчатых контуров (ТЗК) в направлении повышения производительности и создания на этой основе прогрессивных технологий, станков и инструментов.

Эффективный путь интенсификации процессов механической обработки представляет синтез рациональных способов формообразования – один из основных этапов концептуального уровня проектирования металлорежущих станков, в значительной мере определяющего их технико-экономические показатели [7, 9]. Допущенные здесь ошибки, как показывает практика, не могут быть компенсированы на последующих этапах проектирования и реализации. Поэтому разработка рациональных способов формообразования имеет первостепенное значение для создания прогрессивного станочного оборудования и инструментов, решения проблемы интенсификации технологий формообразования ТЗК.

Проблеме интенсификации процессов формообразования поверхностей резанием посвящено относительно небольшое количество работ. Основными из них в Республике Беларусь являются исследования, выполненные под руководством академиков Е.Г. Коновалова [57] и П.И. Ящерицына. Исследования по данной проблеме проведены в Белорусском национальном техническом университете [56, 60, 74]. Известны также работы ученых России [55, 58, 59, 73] и Украины [65, 67]. Высокая эффективность нетрадиционных методов формообразования прерывистых поверхностей подтверждается рядом зарубежных разработок, в частности фирм «WERA», «FORTUNA» (Германия) и др., станки которых обеспечивают многократное повышение производительности по сравнению с традиционными технологиями в основном благодаря применению прогрессивных схем формообразования.

Исследования по проблеме синтеза и интенсификации методов формообразования сложных поверхностей, в том числе с ТЗК, ведутся в По-

лоцком государственном университете [4, 7–10, 16–49]. Созданы на уровне изобретений новые способы формообразования торцовых зубчатых контуров [13, 15, 78–86], некоторые из которых реализованы при создании новых и модернизации существующих металлорежущих станков [11].

В книге отражены результаты, относящиеся к разработке, исследованию и практической реализации прогрессивных технологий формообразования ТЗК и направленные на решение следующих задач:

- разработка классификации ТЗК, алгоритма и модели синтеза схем формообразования ТЗК резанием;

- создание прогрессивных схем формообразования прерывистых поверхностей деталей с ТЗК;

- разработка и исследование методов интенсификации и управления процессами формообразования данного типа прерывистых поверхностей;

- теоретическое и экспериментальное исследование новых схем обработки ТЗК;

- реализация прогрессивных схем формообразования ТЗК в виде структурных и кинематических схем специальных станков и их инструментального оснащения.

Обобщены теоретические и практические разработки в области технологии формообразования ТЗК, выполненные по заданию научно-технических программ в сотрудничестве с промышленными предприятиями.

Вклад авторов в написание монографии:

*д-р техн. наук, проф. Данилов В.А.* – разделы 1.1, 1.2; глава 2; раздел 7.1;

*канд. техн. наук Киселев Р.А.* – раздел 1.3; главы 3, 5, 6; разделы 7.2–7.4;

*Яловский О.В.* – раздел 1.4; глава 4.



# Глава 1

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ

Важным этапом проектирования технологий формообразования поверхностей резанием является разработка или выбор эффективных общих и кинематических схем обработки [7, 12]. Методические аспекты решения этих задач являются предметом анализа в данной главе применительно к механической обработке ТЗК. Эти задачи относятся к концептуальному проектированию обрабатывающих систем станочного оборудования, определяющему его основные технико-экономические показатели.

Формообразование зубчатых контуров на торцах кольцевых деталей в виде равномерно расположенных по окружности пазов и выступов возможно множеством методов, что обуславливает необходимость их синтеза, анализа и выбора рациональных для конкретных условий производства. Интенсификация процессов обработки таких поверхностей является актуальной проблемой в связи с увеличением объема производства указанного типа деталей и необходимостью создания соответствующих станков и инструментов. Отмеченные задачи рассматриваются ниже на основе развития общих положений теории формообразования поверхностей [4, 57, 58, 65, 73].

### 1.1. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЗАНИЕМ

**Виды формообразования.** Обработка любой поверхности на станке основана на воспроизведении процесса формообразования соответствующей номинальной поверхности за счет относительного движения заготовки и инструмента. Режущие элементы инструмента, контактирующие в процессе обработки с номинальной поверхностью изделия, являются производящими или формообразующими. Ими может осуществляться полное или частичное формообразование заданной поверхности. *Полное формообразование* возможно, если обеспечено отображение производящих элементов инструмента на все точки номинальной поверхности. При *частичном формообразовании* обработанная поверхность отличается от номинальной, так как производящие элементы в процессе обработки соприкасаются только с некоторыми принадлежащими ей точками. Это является одной из причин образования на обработанной поверхности микронеровностей.

За время контакта каждого из режущих элементов с заготовкой создается элементарная поверхность, образующая которой является одновременно образующей поверхности резания. Геометрические параметры элементарной поверхности обусловлены формой режущего элемента, его ориентацией, траекторией движения относительно заготовки и обеспечиваются соответствующими компонентами формообразующей системы. Множество элементарных поверхностей, образующее обработанную поверхность, определяется расположением режущих элементов на исходной инструментальной поверхности и параметрами движения формообразования. Данное множество может состоять из одного или нескольких элементов.

При формировании обработанной поверхности одной элементарной последняя может совпадать с номинальной поверхностью или иметь с ней некоторое множество общих точек, образующих *поверхность, линию, систему этих элементов* или *дискретных точек*. В первом случае осуществляется полное, а во втором – частичное формообразование номинальной поверхности изделия. При образовании обработанной поверхности множеством элементарных поверхностей, каждая из которых принадлежит номинальной, достигается ее полное формообразование. В противном случае она представляет собой огибающую одного или нескольких семейств контактирующих с ней элементарных поверхностей.

Для решения задач синтеза схем формообразования используется кинематический метод, согласно которому поверхность рассматривается как множество последовательных положений (след) образующей линии, движущейся в пространстве по траектории, заданной направляющей линией (первая геометрическая модель формообразования [73]), или как огибающая исходной инструментальной поверхности (вторая геометрическая модель формообразования) [58]. Форма этих следа или огибающей в сечении, перпендикулярном направлению относительного движения, является характеристическим образом инструмента. Если в качестве образующей поверхности принять характеристический образ инструмента, процесс ее формообразования можно рассматривать как относительное перемещение характеристического образа инструмента [57].

Задание характеристического образа инструмента, его положения и перемещения в системе отсчета, связанной с заготовкой, определяет *общую схему обработки*. Следует отметить, что для повышения универсальности схемы формообразования целесообразно использовать инструмент, характеристический образ которого может трансформироваться с целью приближения к форме образующей номинальной поверхности изделия кон-

структивным или кинематическим методами [7], что необходимо учитывать при разработке формообразующей системы станка.

**Методы формообразования линий и поверхностей.** В реальных условиях обработки производящие линии поверхности формируются в пространстве движениями инструмента и заготовки и производящими элементами инструмента, которыми могут быть материальные линии (режущие кромки) или точки. В первом случае производящие линии образуются методами копирования (*Kn*) или обката (*Об*), во втором – следа (*Сл*) или касания (*Кс*) [73]. Они различаются кинематикой формообразования и материальными носителями образуемой линии. При методе копирования материальным носителем образуемой линии является инструмент; при методе следа – станок; при остальных методах – инструмент и станок (конструкция направляющих исполнительных органов и кинематические связи между ними). При перенесении материального носителя формы образуемой линии с инструмента на станок конструкция инструмента упрощается, а станка усложняется и наоборот, что следует учитывать при проектировании обрабатывающей системы.

Метод формообразования поверхности определяется возможным сочетанием указанных методов формообразования ее производящих линий при условии, что скорость генерации образуемой больше или равна скорости генерации направляющей, например: *Kn – Kn*; *Kn – Сл*; *Kn – Об*; *Сл – Сл*; *Об – Сл*; *Об – Кс* и т.д. Такой принцип представления процессов формообразования производящих линий положен в основу классификации геометрических методов формообразования поверхностей [73].

Каждая из производящих линий во времени может быть образована одновременно (мгновенно) – *Е*, непрерывно – *Н*, прерывисто – *П*, поэтому возможны следующие временные методы формообразования поверхностей: одновременные *Е – Е*; одновременно-непрерывные *Е – Н*; одновременно-прерывистые *Е – П*; непрерывные *Н – Н*; полупрерывистые *Н – П*; прерывистые *П – П* и комбинированные. На этом основана известная классификация временных методов формообразования поверхностей [57]. Способ генерации поверхности во времени задается на основе известных положений исходя из условия максимальной производительности при обеспечении требований к стойкости инструмента, динамике процесса резания, микрогеометрии обрабатываемой поверхности и т.д.

Поскольку процесс формообразования поверхности одновременно осуществляется в пространстве и времени, то классификация методов формообразования должна отражать в комплексе как геометрические, так и

временные признаки. Такая универсальная классификация может быть основана на объединении обеих известных систем, принимая во внимание то, что геометрические модели обладают большей информативностью о процессе формообразования, чем временные. Данное обстоятельство учитывается тем, что метод генерации линии во времени отражается соответствующим индексом в обозначении геометрического метода ее формообразования [7]. Например, непрерывный и прерывистый процессы образования линий методом обката обозначаются соответственно  $Об_n$ ,  $Об_n$ .

В общем случае синтез метода формообразования поверхности включает определение формы ее производящих линий и характеристического образа инструмента, направления и траектории их относительного перемещения, способа генерации поверхности в пространстве и времени.

## 1.2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ СИНТЕЗА РАЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЗАНИЕМ

Качественные и количественные характеристики способа формообразующей обработки резанием определяются в первую очередь структурой способа, совершенством его структурных компонентов, к которым, как показано на рисунке 1.1, относятся следующие [7]:

- совокупность физических, химических и иных процессов, связанных с удалением материала резанием, его поверхностно-пластическим или объемным деформированием, определяющая метод обработки;
- схема формообразования в пространстве и времени поверхности с заданными формой и размерами;
- потоки материалов, энергии и информации, осуществляемые посредством формообразующей системы.

Указанные компоненты выделены из следующих соображений.

Способы обработки резанием различаются, прежде всего, типом инструмента, видом используемой энергии, способом ее подвода, технологической средой, механизмом разрушения материала, схемой срезания припуска. Указанные признаки определяют *первый компонент способа обработки – метод (вид) обработки*, например, фрезерование, шлифование, электрохимическая обработка и т.д.

Любую поверхность можно обработать одним методом, но разными комбинациями движений, сообщаемых инструменту и изделию, при различных направлениях и траекториях исполнительных движений. Так, обработка плоской поверхности торцовой фрезой возможна при сообщении

заготовке относительно инструмента прямолинейной или круговой подачи. В данном случае один метод обработки (фрезерование) присущ двум различным схемам формообразования плоской поверхности, реализуемым разными станками. Следовательно, способы обработки различаются также схемами формообразования – *второй компонент способа обработки*.

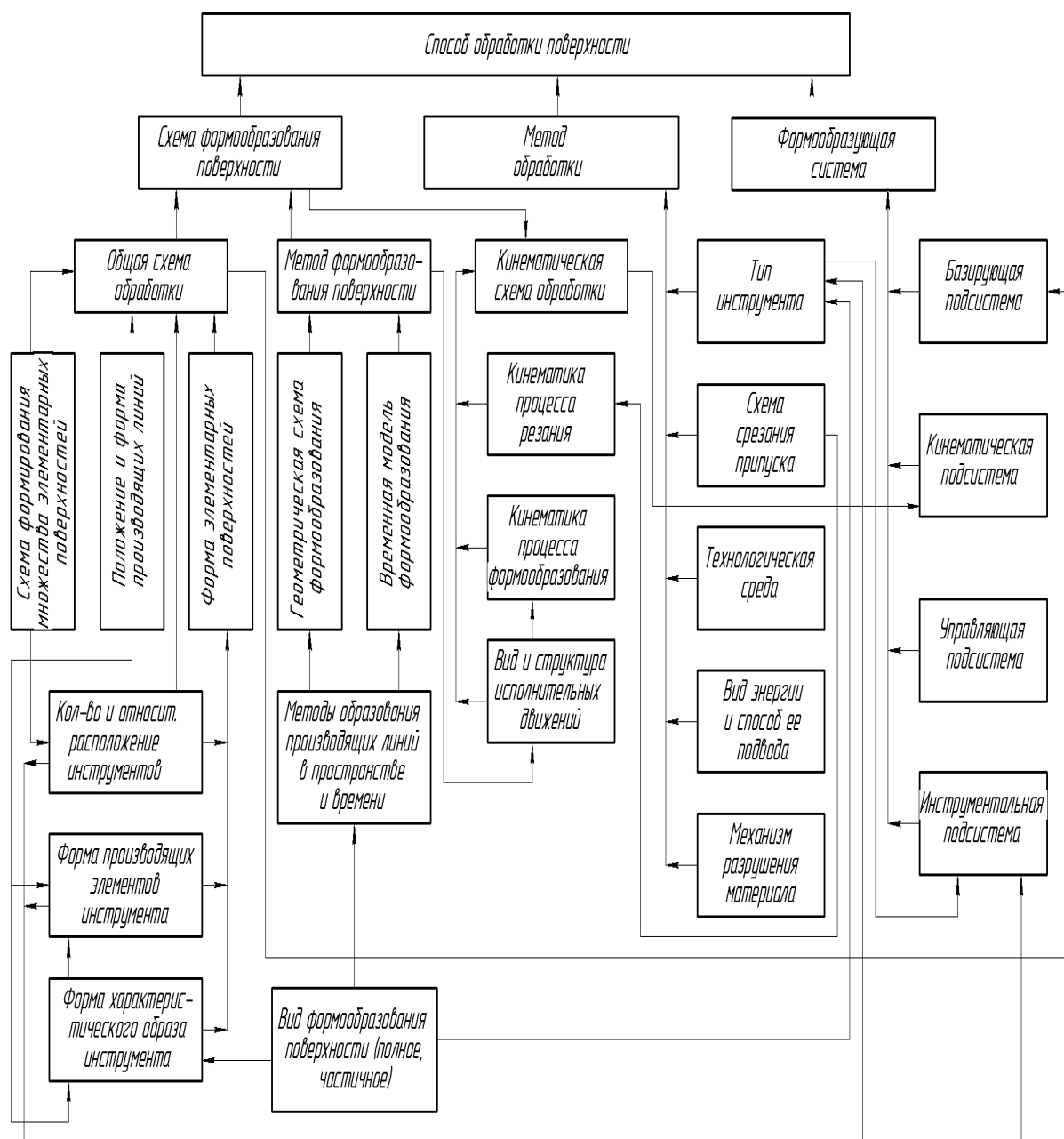


Рис. 1.1. Структурная модель способа формообразующей обработки

Возможные схемы формообразования любой поверхности различаются взаимным расположением и направлением относительного перемещения инструмента и обрабатываемой поверхности, формами траектории

этого перемещения и характеристического образа инструмента, числом инструментов и их расположением, характером обработки (многоцикловая или одноцикловая), то есть общими схемами обработки, а также кинематикой формообразования – сочетанием и соотношением скоростей и направлений элементарных движений, сообщаемых инструменту относительно заготовки. Кинематика формообразования поверхности определяется пространственными и временными характеристиками методов генерации её производящих линий. К пространственным характеристикам относится, в частности, форма производящих линий, а к временным – закон возникновения их во времени в смысле непрерывности. Кинематика формообразования и кинематика резания является основой кинематической схемы обработки – совокупности абсолютных элементарных движений, сообщаемых инструменту и заготовке в процессе обработки, а также делительных и установочных движений.

Принятая схема формообразования поверхности и метод обработки реализуются формообразующей системой – совокупностью технических средств, составляющих её базирующую, инструментальную, кинематическую, транспортную (манипуляционную), энергетическую, управляющую, контрольно-измерительную и другие подсистемы – *третий компонент способа обработки*.

При таком представлении способ обработки может рассматриваться как технология формообразования, под которой понимается совокупность метода обработки и реализующего его оборудования [69].

Возможные способы обработки заданной поверхности могут различаться всеми или отдельными своими структурными компонентами. Например, при нарезании резьбы резцом в зависимости от распределения между инструментом и заготовкой элементарных вращательного и поступательного движений, создающих исполнительное винтовое движение, то есть в зависимости от кинематической схемы обработки возможны четыре способа формообразования. Данное обстоятельство с учетом разнообразных по форме обрабатываемых поверхностей обуславливает многообразие возможных способов обработки. Отсюда следует необходимость их исследования и сопоставительного анализа при синтезе или выборе рациональных для заданной поверхности с учетом технологических ограничений и условий производства.

Представленная на рисунке 1.1 структурная модель отражает взаимосвязь основных компонентов способа обработки. Например, схема формообразования поверхности как совокупность общей схемы обработки и метода формообразования является основой синтеза кинематической схе-

мы обработки, определяющей структуру кинематической подсистемы формообразующей системы станка.

Целенаправленное изменение любых из входящих в указанные компоненты признаков обуславливает иные технико-экономические показатели способа обработки. Так, например, переход от полного формообразования поверхности к частичному влечет за собой, как следует из структуры модели способа, изменение всех его основных компонентов – схемы формообразования поверхности, метода обработки и формообразующей системы станка.

Решение задачи синтеза рациональных схем формообразования поверхности относится к функциональному проектированию станочного оборудования, так как допущенные здесь ошибки не могут быть компенсированы на последующих стадиях его конструирования, технологической подготовки и организации производства. Сюда относятся также этапы выбора технологического метода обработки и синтеза структуры формообразующей системы станка.

Выделение указанных этапов обусловлено их качественным различием: если на первом анализируются разрешающие возможности различных технологических методов в отношении определенных показателей эффективности, на втором исследуются геометрические и кинематические схемы образования поверхности, то на третьем – структура компонентов формообразующей (обрабатывающей) системы станка. Вместе с тем решаемые на этих этапах задачи объединены общей целью – создание эффективной технологии формообразования, что обуславливает необходимость их комплексного рассмотрения на основе научно обоснованного подхода к созданию прогрессивного станочного оборудования и режущих инструментов для интенсификации процессов формообразования [9].

Возможность обработки заданной поверхности разными методами обуславливает также необходимость их сравнительного анализа для выбора эффективного, что относится к первому из указанных этапов синтеза способа обработки. Сравнение методов обработки должно основываться не на отдельных частных случаях, а на их физических возможностях. В этой связи критерии сравнения методов обработки должны определяться в зависимости от точности формообразования, отражать цикловой характер процессов обработки и другие, характерные для них факторы. Кроме производительности и точности формообразования при сравнении методов обработки важно учитывать также кинематические и динамические условия работы инструмента, определяющие требования к станочному оборудованию [69].

Решение задач второго из указанных этапов базируется на общих положениях теории формообразования поверхностей резанием исходя из вида отображения производящих элементов инструмента на номинальную поверхность изделия, формы контакта и характера их взаимодействия, возможности её полного или частичного формообразования одной или множеством элементарных поверхностей. Это является базой для синтеза рациональных методов генерации и схем обработки поверхностей.

Для оценки эффективности схем формообразования наряду с применяемыми количественными показателями (производительность, точность) важны качественные (упорядоченность, универсальность, сложность реализации) и функциональные характеристики (рис. 1.2).

Учет взаимосвязи этих характеристик, а также зависимости сложности кинематики формообразования и инструмента от выбора материального носителя формы производящих линий номинальной поверхности позволяет задать рациональное распределение функции формообразования между кинематической и инструментальной подсистемами станка [7], что важно для их проектирования.

Структура способа обработки обуславливает необходимость комплексного подхода к рассматриваемой проблеме путем оптимизации как процессов формообразования и резания, так и средств их реализации. Поэтому общими путями интенсификации технологий формообразования на стадии функционального проектирования станков являются:

- задание рационального распределения функции формообразования между инструментальной и кинематической подсистемами;
- синтез рациональной схемы формообразования поверхности;
- разработка или выбор эффективного метода обработки и реализующего его режущего инструмента;
- оптимизация структуры формообразующих компонентов обрабатываемой системы [8, 9].

Основная функция формообразования – образование заданной поверхности – может быть обеспечена или только кинематикой станка, или совместно кинематикой станка и инструментом, или только инструментом. При выборе конкретного варианта следует учитывать, что при перенесении функции формообразования на инструмент упрощается кинематика станка, однако усложняется форма производящих элементов инструмента и снижается его универсальность.



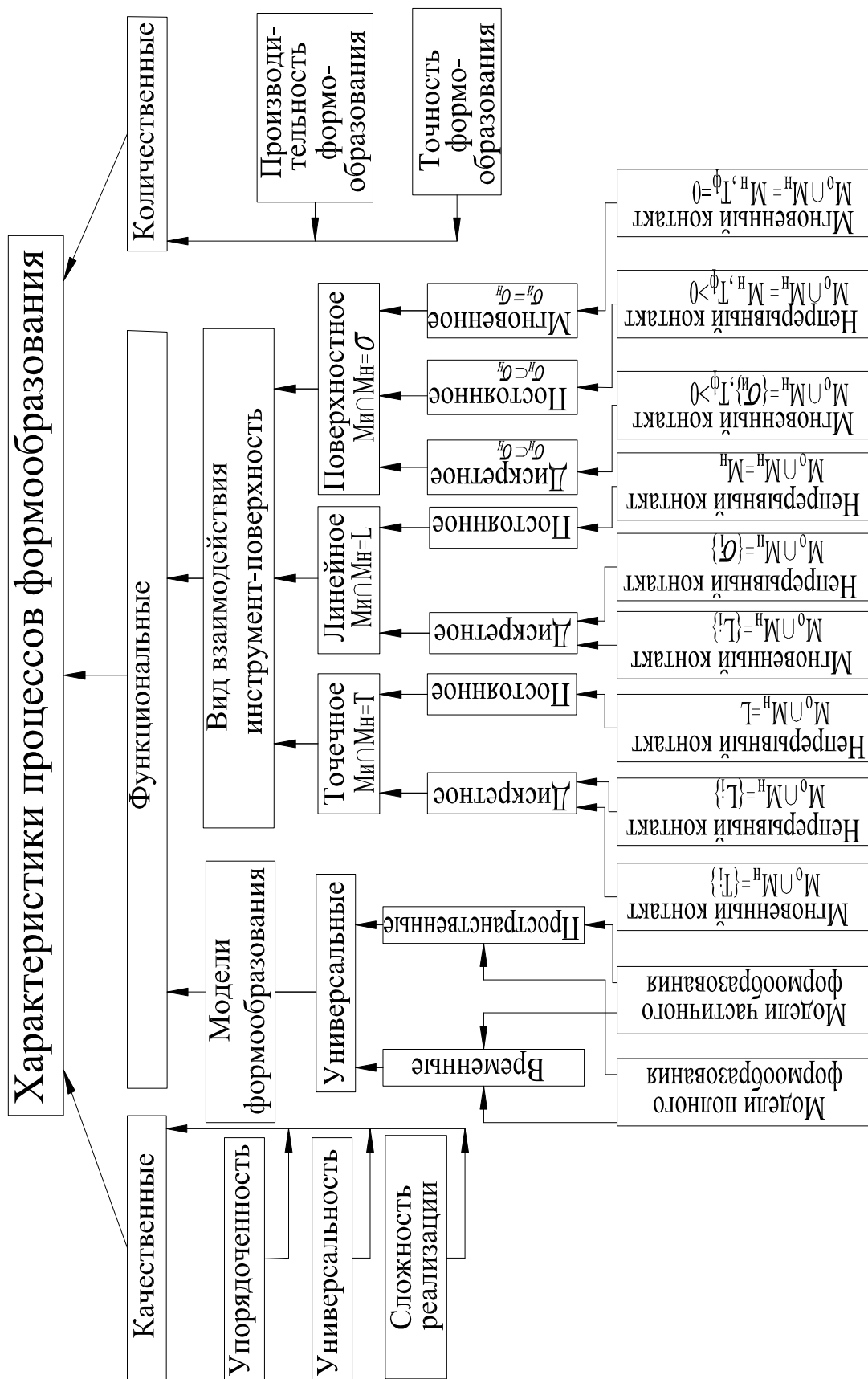


Рис. 1.2. Характеристики процесса формообразования

*Синтез общих схем обработки* поверхностей резанием включает задание на основе их аналитического исследования цикличности процесса.

Обязательным является также сравнение возможных схем и выбор из них эффективной на основе зависимостей общих показателей эффективности – технологической производительности и точности формообразования от основных параметров общей схемы обработки, то есть направления относительного перемещения инструмента и заготовки, формы характеристического образа инструмента, кинематики и цикличности процесса формообразования.

Важность синтеза рациональной кинематики формообразования обусловлена тем, что она как основа кинематической схемы обработки в значительной степени влияет на сложность кинематики, производительность и универсальность станка. К основным принципам синтеза кинематики формообразования относятся:

- обоснование распределения функции кинематики формообразования между инструментом и станком;
- синтез структуры исполнительных движений, обеспечивающей благоприятные условия резания и работы механизмов станка за счет исключения геометрическим или кинематическим методами реверсивных движений исполнительных органов, замены возвратно-поступательных движений вращательными;
- совмещение исполнительных движений для упрощения кинематической схемы обработки и повышения производительности;
- введение движений для стабилизации условий резания, управления точностью формообразования, схемой или условиями резания;
- задание рационального сочетания скоростей и направлений элементарных движений;
- рациональное распределение элементарных движений между исполнительными органами станка для повышения его универсальности [9].

Изложенные принципы построения общих схем обработки и кинематики формообразования составляют основу модели синтеза кинематических схем обработки сложных поверхностей, которая в структурном виде представлена на рисунке 1.3.

Заключительный этап функционального проектирования связан с синтезом кинематики станка, которая обеспечивает реализацию принятых методов формообразования и резания и является основой его кинематической схемы и компоновки.

Изложенные положения положены в основу решаемых ниже задач синтеза и анализа технологий формообразования ТЗК.

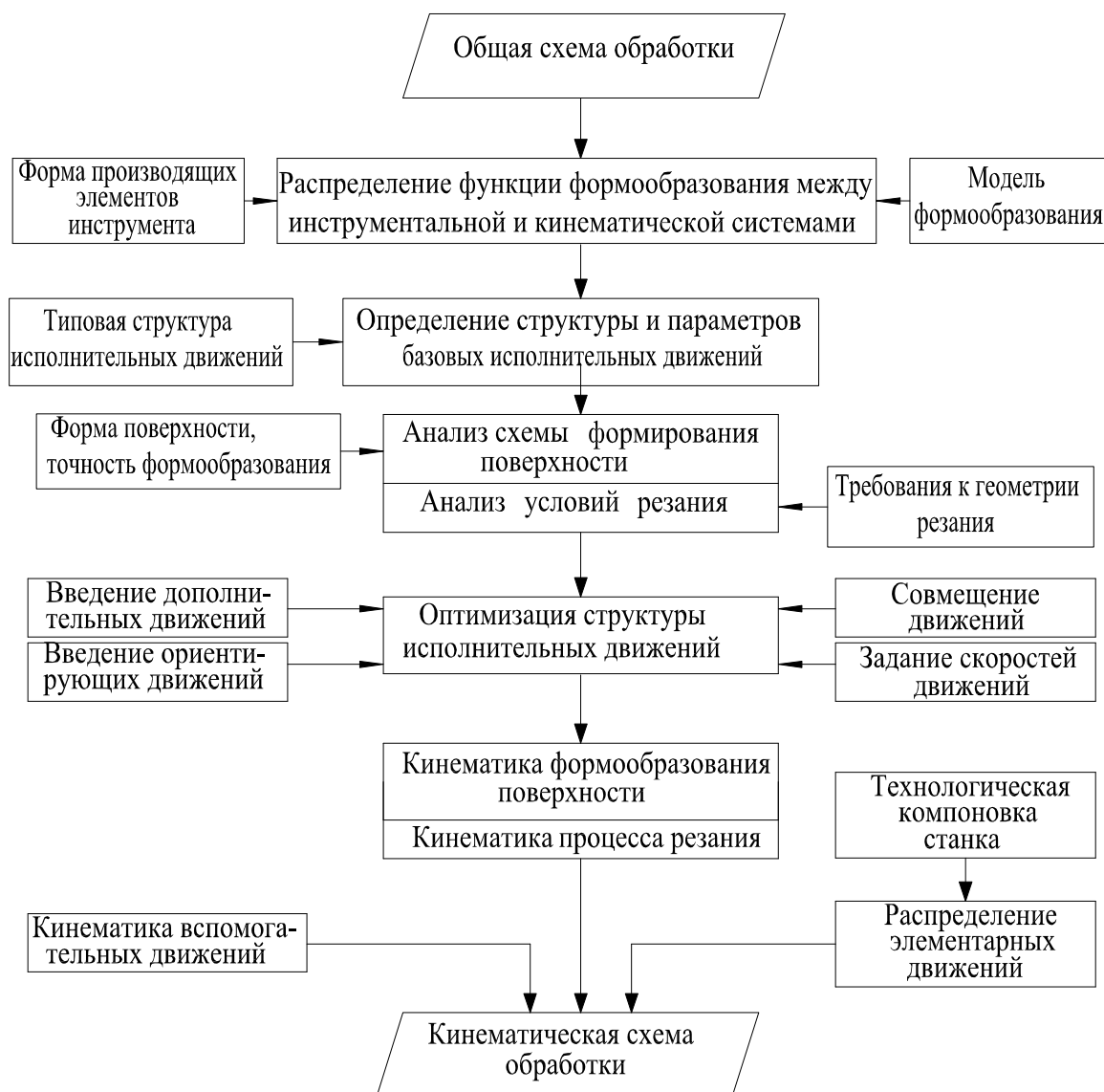


Рис. 1.3. Алгоритм синтеза кинематических схем обработки ложных поверхностей

### 1.3. СИНТЕЗ СХЕМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ

#### 1.3.1. Геометрия торцовых зубчатых контуров

Торцовые зубчатые контуры нашли широкое применение в трансмиссиях и измерительных системах машин благодаря своей компактности и надежности. Они характеризуются разнообразной геометрией и требованиями по относительному расположению пазов, что определяется их функциональным назначением.

При разработке схем обработки поверхностей данного класса, основанных на непрерывном процессе деления, важно выявить геометрические характеристики ТЗК, существенные для процесса формообразования. Объектом анализа являются муфты кулачкового типа [1, 63, 68], а также детали измерительных систем типа дисков с равномерно расположенными на торце пазами, в частности индукторы антиблокировочной системы (АБС) автомобилей.

Зубчатый контур имеют стандартные муфты с резиновой звездочкой, кулачковые и зубчатые. В конструкциях последних применяют различные профили кулачков (рис. 1.4). Треугольный профиль (рис. 1.4, а) обеспечивает легкость и быстроту включения благодаря большому числу кулачков (обычно 15–60). Угол профиля  $\alpha = 30\text{--}45^\circ$ . Такой профиль применяется в муфтах, передающих небольшой крутящий момент.

Трапецеидальный профиль (рис. 1.4, б) обеспечивает передачу больших крутящих моментов при высоких частотах вращения. Угол профиля  $\alpha$  составляет  $3\text{--}5^\circ$ , число кулачков от 3 до 15.

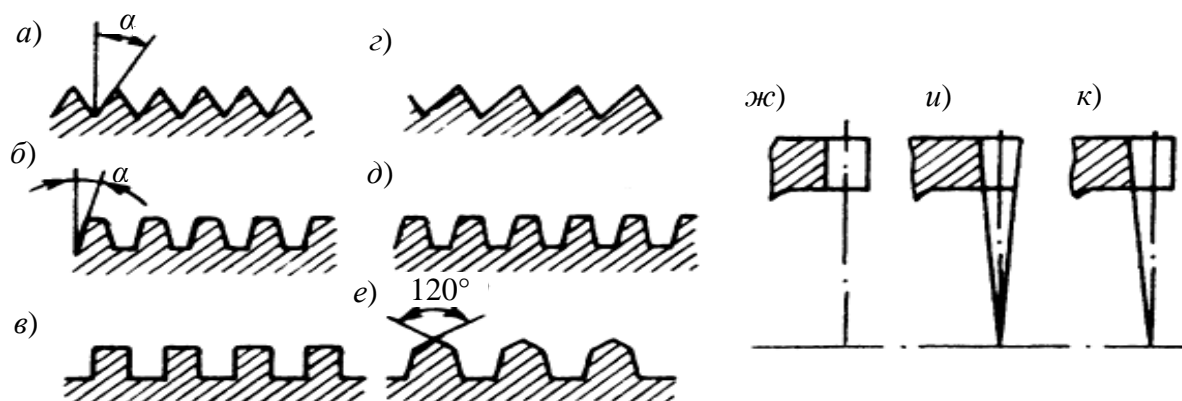


Рис. 1.4. Разновидности профилей кулачков муфт

Прямоугольный профиль (рис. 1.4, в) применяют в муфтах тяжелонагруженных трансмиссий машин.

В муфтах для соединения валов с постоянным направлением вращения используются несимметричные треугольные и трапецеидальные профили (рис. 1.4, г, д). Для облегчения включения муфты применяют подрезание головки кулачков (рис. 1.4, е). Форма кулачков в продольном сечении показана на рисунке 1.4, ж, и, к. Треугольный профиль имеет уменьшающуюся к оси муфты высоту (рис. 1.4, и), так как шаг пропорционален радиусу, а профили во всех сечениях подобны. Прямоугольный профиль имеет постоянную высоту. Кулачки с трапецеидальным профилем изготавливают либо постоянной высоты, либо уменьшающейся к центру (рис. 1.4, к).

Рабочие поверхности кулачков обычно выполняют плоскими, что теоретически обеспечивает правильный контакт боковых поверхностей кулачков в рабочем положении муфты (для муфт с трапецеидальным и треугольным профилями). В муфтах, работающих под большой нагрузкой, применяют более сложные в изготовлении винтовые рабочие поверхности. Для нарезания методом огибания на зуборезных станках целесообразно применять кулачки, очерченные дугой окружности.

При выборе технологического метода обработки следует учитывать материал кулачковых муфт, которые изготавливают из сталей марок 20Х, 12ХНЗА и др., имеющих после цементации и закалки твердость 54–60 HRC<sub>3</sub>. Муфты крупных размеров изготавливают из стали 45 или 45Л, а в ответственных конструкциях – из стали 40Х, 40ХН и др.

Кулачки пружинно-кулачковых муфт имеют трапецеидальный или треугольный профиль (рис. 1.5). Их рабочие поверхности могут быть плоскими или винтовыми, которые обеспечивают лучший контакт рабочих поверхностей и более высокую точность срабатывания муфты.

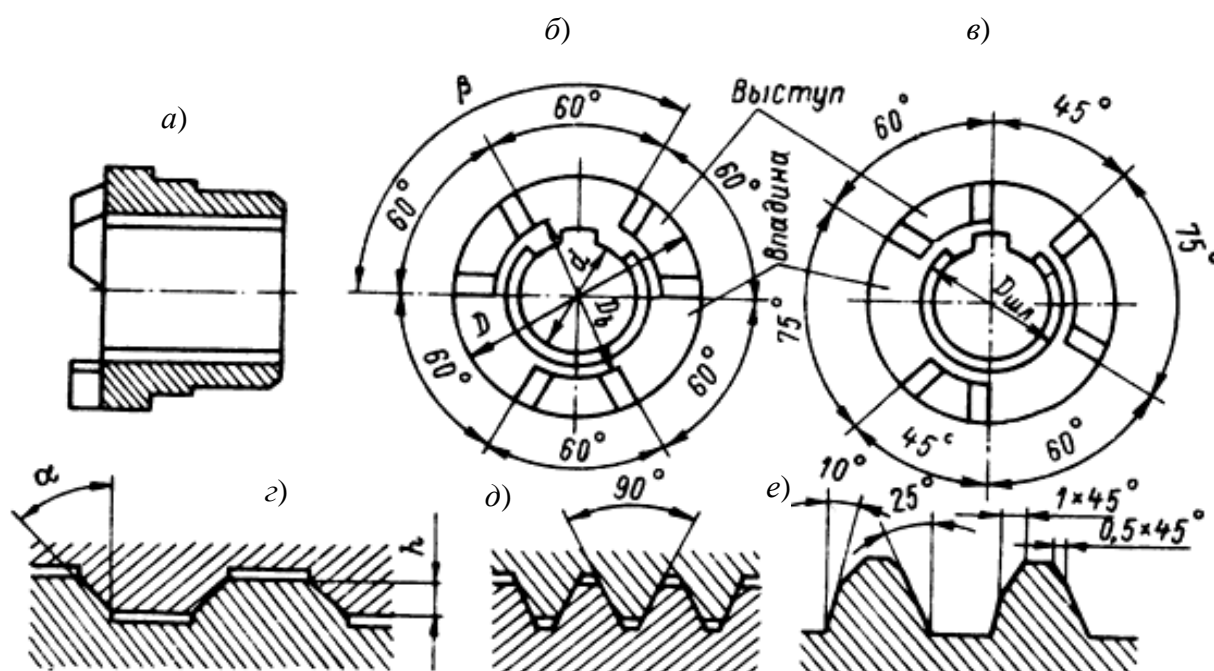


Рис. 1.5. Профили и расположение кулачков муфт

Число кулачков в полумуфте составляет 3–15. При одинаковом шаге расположения кулачков на полумуфтах (рис. 1.5, б) каждый кулачок одной полумуфты может войти в зацепление с любым кулачком другой полумуфты. Неточность изготовления в этом случае значительно влияет на характер распределения нагрузки между кулачками и, в конечном счете, на

точность срабатывания. Поэтому для повышения последней шаг расположения выступов и сопряженных впадин рекомендуется делать неодинаковым (рис. 1.5, *в*), что при проскальзывании полумуфт обусловит зацепление лишь одинаковой пары кулачков и впадин. На рисунке 1.5, *д*, *е* показаны профили мелкозубых муфт. Угол профиля  $\alpha$  (рис. 1.5, *г*) может быть  $30^\circ$ ,  $45$  или  $60$ .

В пружинно-шариковых муфтах шарики контактируют с боковыми поверхностями призматических канавок (рис. 1.6, *а*, *б*), которые имеют постоянный угол наклона  $\alpha$ .

Профиль кулачков, представленный на рисунке 1.6, *б*, применяется в некоторых предохранительных муфтах.

Использование радиусного профиля кулачков (рис. 1.6, *в*) муфт обеспечивает уменьшение динамических нагрузок в приводе, возникающих при срабатывании муфты.

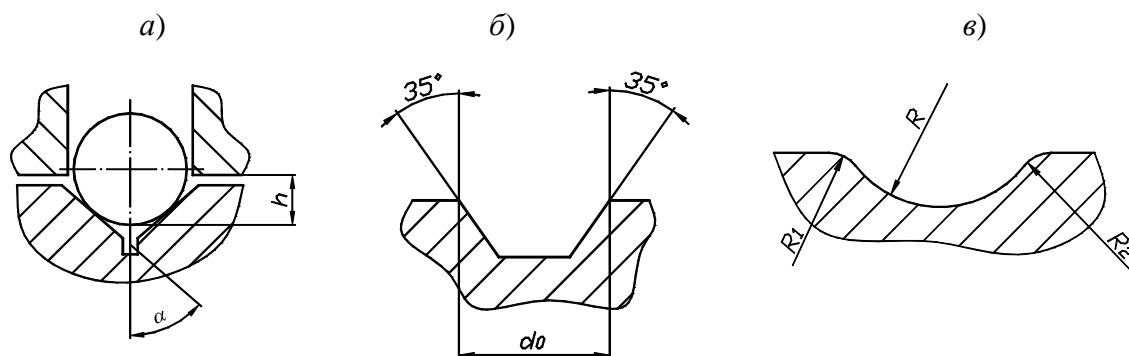


Рис. 1.6. Призматические (*а*, *б*) и радиусные (*в*) профили канавок в пружинно-шариковых муфтах

В отдельных случаях кулачки муфт имеют криволинейные боковые поверхности, форма которых обусловлена эксплуатационными или технологическими требованиями. Например, муфты 50-2409015-А и 50-2409016-А тракторов Минского тракторного завода имеют кулачки с вогнутыми боковыми поверхностями у одной полумуфты (рис. 1.7, *а*) и выпуклыми у другой (рис. 1.7, *б*), благодаря чему исключается в процессе эксплуатации их кромоочный контакт и увеличивается срок службы.

Для упрощения изготовления боковые поверхности кулачков очерчены дугами окружности, радиус которой равен радиусу инструмента.

Для передачи крутящего момента в одном направлении предпочтительны ТЗК храпового типа. Профиль их кулачков показан на рисунке 1.8 на примере полумуфты конструкции Минского тракторного завода.

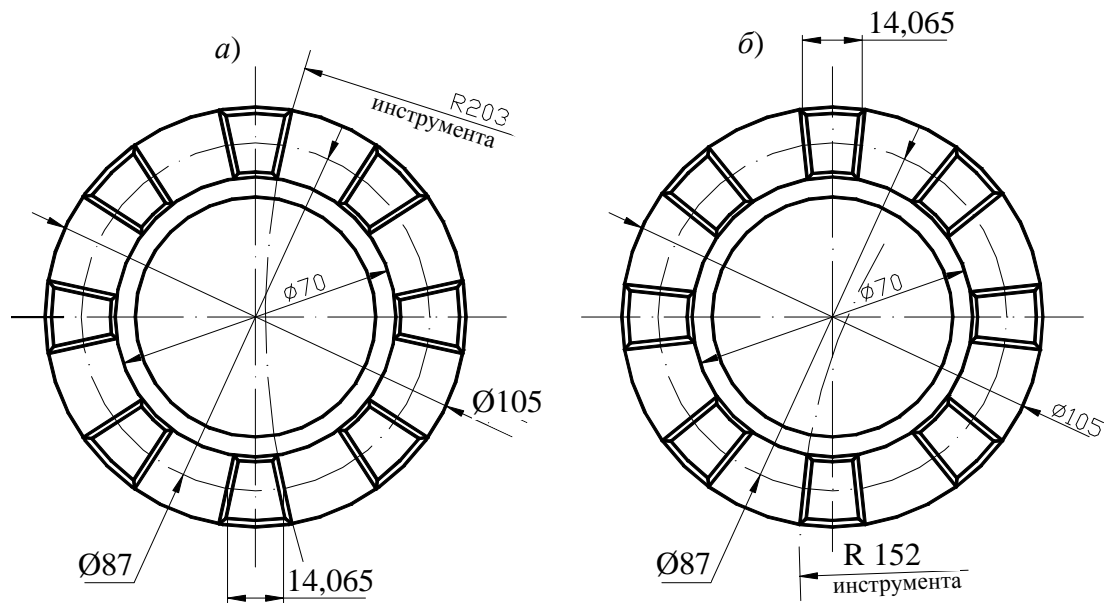


Рис. 1.7. Полумуфты с вогнутыми (а) и выпуклыми (б) криволинейными боковыми поверхностями кулачков

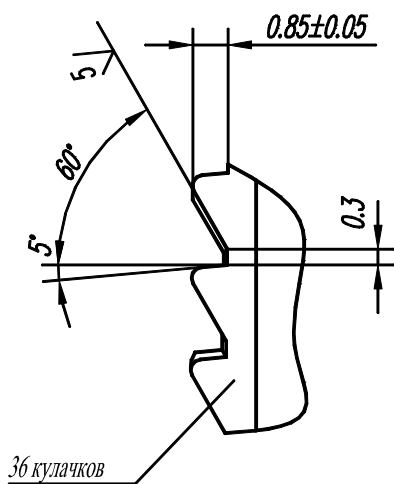


Рис. 1.8. Профиль кулачков храповой полумуфты

Торцовые зубчатые контуры применяют также во фланцевых соединениях преимущественно для соединения валов, а также для крепления на валах деталей дискового и барабанного типа [55]. Для передачи больших крутящих моментов служат торцовые шлицы треугольного профиля (рис. 1.9, а).

В слабонагруженных соединениях количество торцовых шлицев обычно уменьшают, объединяя их в отдельные секторы на участках расположения стягивающих болтов (рис. 1.9, б) или между ними (рис. 1.9, в), или уменьшают высоту шлицевого пояса (рис. 1.9, г, д).

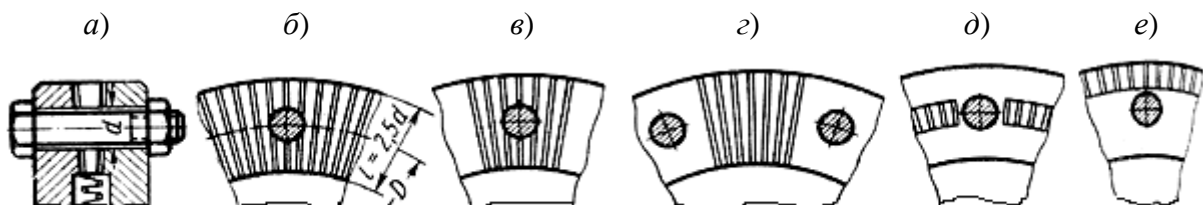


Рис. 1.9. Фланцы с торцовыми шлицами

К торцовым зубчатым контурам можно отнести поверхности гидродинамических опор жидкостного трения (рис. 1.10), снабженных равно-

мерно расположенными по окружности маслораспределительными канавками. Они могут быть сквозные (рис. 1.10, а) или глухие (рис. 1.10, б), косые (рис. 1.10, в) и спиральные (рис. 1.10, г).

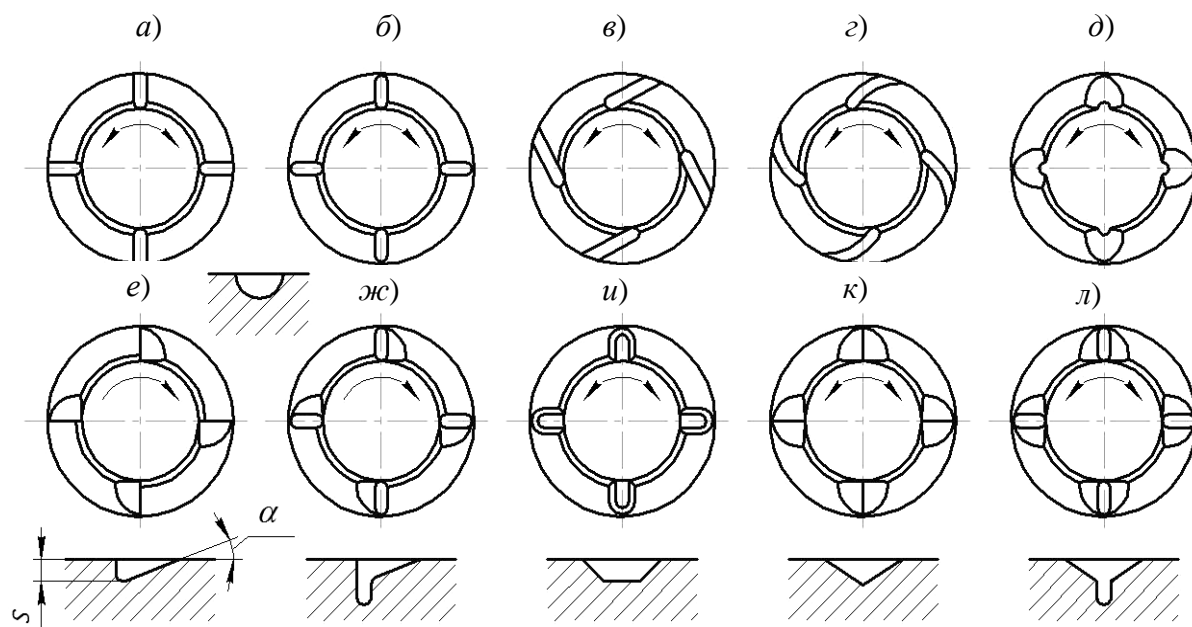


Рис. 1.10. Форма рабочих поверхностей опор жидкостного трения

Канавки имеют глубину  $s = 0,5\text{--}1$  мм для толстых и  $s = 0,3\text{--}0,5$  мм для тонких шайб (рис. 1.10, е) и снабжены скосами под углом  $\alpha = 5\text{--}15^\circ$  по направлению вращения (рис. 1.10, е, ж). В реверсивных узлах скосы делают по обе стороны канавки (рис. 1.10, д, и–л).

Кроме рассмотренных областей, ТЗК применяются также в деталях измерительных систем, в частности в системах АБС автомобилей, эффективность работы которых определяет точность изготовления роторов (индукторов), представляющих собой плоский зубчатый контур. Типовую конструкцию ротора антиблокировочной системы имеет индуктор АБС 543266-3538222 (рис. 1.11), применяемый, например, в автомобилях семейства МАЗ. Если в муфтах основное требование предъявляется к геометрии боковых поверхностей кулачков, то здесь важно обеспечить точность относительного расположения пазов, которая определяется допуском на их угловой шаг.

Таким образом, детали ТЗК широко применяются во многих изделиях машиностроения. Они характеризуются различной геометрией и требованием к относительному расположению пазов. Детали с ТЗК изготавливаются из материалов широкой номенклатуры, но в основном ограничивают-



ся конструкционными сталями, что позволяет применять для их качественной и производительной обработки резание как наиболее экономичный способ формообразования.

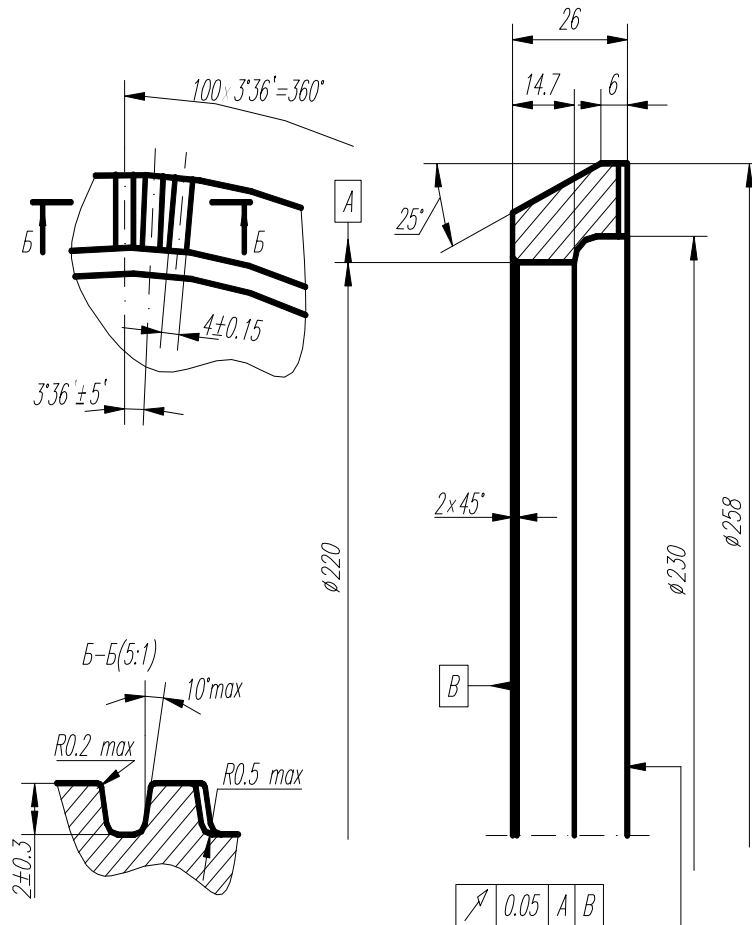


Рис. 1.11. Индуктор автомобильной системы АБС 543266-3538222

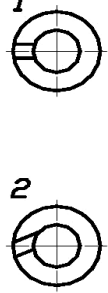
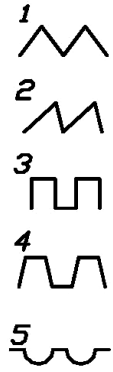

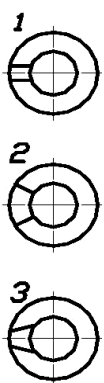
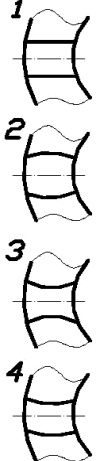
На основе анализа геометрии и конструктивных особенностей ТЗК различного назначения разработана их классификация (табл. 1.1) [27]. В качестве определяющих выбраны конструктивные признаки (характеристики) ТЗК, существенные для синтеза схем формообразования: I – направленность пазов; II – поперечный профиль кулачков (зубьев); III – форма впадины (дна паза); IV – сходимость боковых граней; V – форма боковых граней. В пределах каждого признака установлены типовые модификации ТЗК, указанные в таблице 1.1 арабскими цифрами.

Пазы (зубья) могут иметь радиальное (I-1) или косое (I-2) направление. Наибольшее применение получили следующие их профили: треугольный симметричный (II-1), треугольный несимметричный (II-2), прямоуголь-

ный (II-3), трапецидальный (II-4), фасонный (II-5), который может быть очерчен дугами окружностей, эвольвент, циклоидальных и других кривых.

Таблица 1.1

Геометрия торцовых зубчатых контуров

Направление пазов	Поперечный профиль колпачков	Продольный профиль колпачков	Сходимость боковых граней	Профиль боковых граней
I	II	III	IV	V
				

В продольном направлении пазы различаются формой боковых поверхностей, которая может быть прямой (III-1), косой (III-2, III-3) и криволинейной (III-4), обычно в виде дуги окружности.

Боковые стороны зубьев могут быть параллельными (IV-1), сходиться к центру (IV-2) или к периферии (IV-3) и при этом быть прямолинейными (V-1), вогнутыми (V-2), выпуклыми (V-3) или иметь кривизну разных знаков (V-4), когда одна грань вогнутая, а другая выпуклая.

Данная классификация позволяет в формализованном (кодовом) виде представить геометрию любого ТЗК, что важно для выбора или синтеза соответствующей схемы его формообразования и описания этой схемы. Например, ТЗК индуктора системы АБС автомобилей семейства МАЗ с прямоугольными пазами по данной классификации имеет код 14111, а храповой муфты – 12221.

Положенный в основу предложенной классификации принцип позволяет в формализованном виде представить также технологические возможности схем формообразования ТЗК в виде множества определителей их существенных признаков, каждый из которых соответствует опреде-

ленному геометрическому признаку (см. табл. 1.1), обеспечиваемому рассматриваемой схемой формообразования. Поэтому в общем случае формализованное представление схемы обработки ТЗК включает в себя пять определителей, соответствующих признакам I, II, III, IV и V. При этом если схема формообразования позволяет получить все рассматриваемое множество ТЗК по данному признаку, определитель задается знаком X, иначе в нем указываются только те признаки, которые обеспечиваются этой схемой.

### **1.3.2. Методы формирования производящих линий при обработке пазов**

Каждый из пазов ТЗК формируется в результате относительного перемещения его образующей и направляющей линий. Поскольку ТЗК содержит множество равномерно расположенных по окружности пазов, то для их обработки требуется сформировать множество конгруэнтных направляющих линий. В реальных процессах обработки резанием это обуславливает необходимость в движении деления, которое может осуществляться дискретно или непрерывно.

При обработке на станках каждая из направляющих линий может быть образована геометрическим или кинематическим методами. В первом случае ее материальным носителем является исполнительная кинематическая пара: поступательная – при обработке прямолинейных пазов; вращательная – при обработке круговых пазов. Движение деления, необходимое для обработки всех пазов ТЗК, создается в данном случае периодическим поворотом заготовки вокруг своей оси.

Геометрическое формирование направляющих линий в сочетании с дискретным движением деления характерно для широко применяемого на практике процесса обработки ТЗК на фрезерных станках с использованием делительной головки. Так обрабатывают пазы с прямолинейными боковыми сторонами. Прямолинейность пазов обеспечивается в данном случае направляющими стола.

Геометрическое формирование направляющих линий в виде дуг окружностей применяется при обработке резцовой головкой ТЗК деталей типа кулачковых муфт с круговыми зубьями. Сообщением последней вращения и относительно перемещения вдоль оси вращения (движения врезания) производится обработка каждого из пазов ТЗК. Форма пазов по длине определяется радиусом расположения резцов относительно оси вращения головки. Периодический поворот заготовки для обработки всех пазов осуществляется, как и в предыдущем случае, делительным устройством.

Недостатком геометрического метода получения направляющих линий является неуниверсальность по форме обрабатываемых пазов (прямолинейные или круговые). Кроме того, дискретный характер движения деления отрицательно влияет на производительность обработки и точность расположения пазов ТЗК по окружности.

Кинематический метод получения направляющих линий основан на сообщении производящей точке сложного движения по требуемой траектории, создаваемого несколькими элементарными (вращательными, качательными, поступательными) движениями. Заслуживает внимания простой в реализации и обеспечивающий наиболее благоприятные динамические условия работы исполнительных механизмов станка метод получения линий двумя согласованными вращательными движениями.

По сравнению с геометрическим кинематический метод обладает более широкими технологическими возможностями, так как соответствующей настройкой соотношения скоростей указанных вращательных движений обеспечивается различная форма образуемых направляющих линий. Кроме того, образованная одним производящим элементом линия может содержать множество конгруэнтных участков, благодаря чему одновременно с процессом формообразования осуществляется также процесс деления, что исключает дискретный характер последнего, присущий геометрическому методу формирования линий.

Необходимое для обработки всех пазов количество направляющих линий обеспечивается, при необходимости, установкой на режущем инструменте определенного количества  $z = m/k$  производящих элементов, где  $m$  – число обрабатываемых пазов ТЗК;  $k$  – число конгруэнтных участков траектории, формируемой одним производящим элементом.

### **1.3.3. Исполнительные движения при обработке пазов**

Синтез кинематики формообразования включает в себя задание структуры исполнительных движений и соотношения скоростей составляющих их элементарных движений, так как эти данные в значительной степени определяют производительность, универсальность, сложность реализации и другие технико-экономические показатели станочного оборудования. Основой для решения указанных задач является метод формообразования заданной поверхности, то есть сочетание методов образования ее производящих линий – образующей и направляющей. Каждая из производящих линий может быть образована различным количеством и различным сочетанием элементарных движений, не одинаковым по сложности их реализации и влиянию на условия работы режущего инструмента и механизмов

станка. В этой связи выбор рациональной структуры исполнительного движения формообразования имеет важное практическое значение.

Для формообразования производящей линии необходимы движения профилирования и резания, то есть движения, сообщаемые инструменту относительно заготовки для получения формы этой линии и срезания с заготовки слоя металла. Эти движения могут выполняться отдельно или быть совмещенными в одно движение. Если исполнительное движение осуществляется со скоростью резания, что имеет место при образовании профиля методом следа, зачастую для образования производящей линии предпочтительно сочетание нереверсивных движений, обеспечивающих по сравнению с реверсивными более высокие производительность и точность обработки.

Формообразующая обработка резанием основана на сообщении инструменту и заготовке относительных исполнительных движений формообразования ( $\Phi$ ), врезания ( $Bp$ ), деления ( $D$ ), а также установочных ( $Ucm$ ) и вспомогательных ( $Bcn$ ) перемещений [73]. Простые и сложные исполнительные движения создаются соответственно одним или несколькими взаимосвязанными элементарными движениями (вращательное  $B$ , поступательное  $П$ ), которые сообщаются инструменту и (или) заготовке.

Структура исполнительных движений в наибольшей степени зависит от формы создаваемой линии и метода ее формообразования. Для упрощения исполнительных движений и их реализации на станке производящие линии заданной поверхности обычно принимают плоскими или расположенными на поверхностях вращения в соответствии с координатными перемещениями исполнительных органов станка. Исходя из этого в качестве образующей прерывистой поверхности целесообразно принять контур плоского поперечного сечения пазы, а в качестве направляющей – линию, определяющую форму боковой поверхности пазы по длине.

Предпочтительны, как более простые в реализации, схемы образования производящих линий одно- и двухэлементарными исполнительными движениями. Формообразование пазов по этим схемам возможно инструментами с производящими элементами в виде дискретных точек и линий.

Двухэлементарное исполнительное движение (согласованные вращения инструмента и заготовки) служит для образования пазы по длине (направляющей), при этом составляющая сложного движения (вращение шпинделя станка с заготовкой) одновременно является движением деления. Поэтому обработка прерывистых поверхностей в виде пазов осуществляется при непрерывном движении деления, благодаря чему обеспечиваются более высокая производительность и точность по сравнению с обработкой пазов по методу единичного деления.

Поступательное перемещение инструмента вдоль оси вращения заготовки обеспечивает движение врезания для получения заданной глубины пазов, а его перемещение перпендикулярно указанной оси – необходимое относительное расположение инструмента и заготовки, то есть является установочным движением.

Таким образом, исполнительное движение для образования направляющей паза является сложным, а для формирования профиля паза – простым при совмещении движений деления и формообразования.

#### **1.3.4. Методика синтеза методов и схем формообразования торцовых зубчатых контуров**

Обработка ТЗК осуществляется преимущественно по технологиям, не удовлетворяющим современным требованиям по качеству и производительности, что обусловлено прерывистым процессом деления, характерным для применяемых технологий. Создание более эффективных технологий связано с синтезом рациональных кинематических схем обработки на основе изложенных выше универсальных принципов, из которых применительно к ТЗК важны следующие [27]:

- перенесение функции кинематики формообразования на инструмент;
- совмещение исполнительных движений формообразования и деления для упрощения кинематической схемы обработки и повышения производительности;

- задание параметров схемы обработки и исполнительных движений, обеспечивающих благоприятные условия резания и работы механизмов станка.

На основе изложенных выше методических принципов с учетом особенностей геометрии ТЗК определены общие положения и условия, выполнение которых обеспечивает синтез рациональных методов и схем кинематического формообразования ТЗК при механической обработке. Сущность этих положений и условий состоит в следующем.

1. При синтезе общих схем обработки поверхность ТЗК следует рассматривать как след характеристического образа инструмента в относительном движении, который конгруэнтен одной из производящих линий формируемой поверхности. При одновременном формообразовании двух боковых поверхностей и дна паза характеристический образ определяется совокупностью их производящих линий. За направляющую принимается линия, определяющая форму дна паза по длине.

2. Непрерывное формирование множества пазов ТЗК необходимо обеспечивать кинематическим методом (при одном производящем элементе)

или сочетанием кинематического и геометрического методов (при нескольких производящих элементах). Во втором случае количество формируемых пазов и режущих зубьев составляет  $m$  и  $z$  соответственно, поэтому кинематическим условием непрерывного формообразования является выполнение соотношения  $i = m/(zp)$ , где  $i$  – отношение угловых скоростей собственного и переносного вращательных движений инструмента;  $p$  – число, определяющее последовательность формирования пазов. При этом режущие зубья должны быть установлены равномерно с точностью, которая определяется расчетом исходя из требуемой точности шага пазов ТЗК.

3. В зависимости от геометрии (см. табл. 1.1) и ширины паза возможно одновременное или последовательное формирование его поверхностей. Одновременная обработка боковых поверхностей и дна возможна только для пазов типов IV-1, V-1, V-4. Во всех других случаях необходимо предусматривать отдельную обработку этих поверхностей. Для широких пазов, по условиям динамики процесса резания, формирование дна предпочтительно осуществлять отдельно, что должно обеспечиваться циклом обработки пазов ТЗК.

4. Множество методов формообразования ТЗК определяется возможными сочетаниями методов получения профиля паза и его формы по длине, а также заданной последовательностью формирования поверхностей пазов. При этом каждая из обеих производящих линий паза может быть образована методами следа ( $Сл$ ), касания ( $Кс$ ), копирования ( $Кп$ ), обката ( $Об$ ) и возможными сочетаниями этих методов (например,  $Об + Сл$ ,  $Кп + Сл$ ), а процесс формообразования во времени может осуществляться одновременно ( $Е$ ), непрерывно ( $Н$ ) или прерывисто ( $П$ ). Вид генерации линии во времени (прерывистый, непрерывный), при необходимости, указывается в обозначении геометрической схемы формообразования соответственно индексами « $n$ » и « $n$ », например,  $Сл_n$ ,  $Сл_n$ ,  $Об_n$ ,  $Об_n$  и т.д.

С учетом геометрии пазов одновременное или раздельное формообразование их боковых поверхностей возможно по схемам  $Сл_n - Сл_n$ ,  $Кп - Сл_n$ ,  $Кп - Кс$ ,  $Об_n - Сл_n$ ,  $Об_n - Кс$ . При совмещенной обработке боковых поверхностей и дна пазов формообразование последнего возможно методами  $Кп - Сл_n$ ,  $(Кп + Сл) - Сл_n$ ,  $Кп_n - Кс$  и др. Такая форма представления процессов формирования поверхностей является объективной основой классификации методов формообразования торцовых зубчатых контуров по пространственно-временным признакам.

Метод формообразования поверхности в значительной мере определяет схему срезания припуска, например, при схеме  $Сл_n - Сл_n$  боковая по-

верхность паза формируется последовательно за определенное количество резов, то есть материал по глубине паза срезается послойно.

5. Синтез схемы формообразования ТЗК, определяющей вид характеристического образа (точка, множество точек, линия, множество линий, поверхность) и форму производящих элементов инструмента, а также исполнительные движения, базируется на принятых методах формообразования его поверхностей. Задание указанных компонентов определяет схему его формообразования.

Из изложенного следует, что синтез схемы формообразования осуществляется на основе общей схемы обработки заданной поверхности и включает следующие основные этапы:

- распределение, исходя из метода формообразования, функции формообразования между инструментальной и кинематической системами станка;
- определение структуры и параметров базовых исполнительных движений;
- анализ схемы профилирования поверхности и условий резания исходя из ее формы, точности формообразования и требований к геометрии резания;
- оптимизация структуры исполнительных движений путем исключения реверсивных и введения дополнительных движений, совмещения или разделения движений различного функционального назначения, задания рационального сочетания скоростей элементарных движений.

На изложенных выше положениях основана предлагаемая методика синтеза методов и схем формообразования ТЗК, которая представлена в виде блок-схемы на рисунке 1.12.

Кинематика формообразования является основой кинематической схемы обработки заданной поверхности, которую рекомендуется разрабатывать в следующей последовательности:

- 1) исследовать геометрию заданной поверхности;
- 2) определить метод формообразования поверхности, количество и структуру необходимых исполнительных движений формообразования, врезания, деления и др., например,  $\Phi_v (B_1)$ ,  $\Phi_s (B_2Пз)$ ,  $Д (B_4)$  и т.д. Установить настраиваемые параметры исполнительных движений;
- 3) с учетом аналогичных станков выбрать технологическую компоновку станка, то есть количество исполнительных органов и их взаимное расположение. Распределить элементарные движения между заготовкой и инструментом;
- 4) установить для сложных движений соотношение скоростей элементарных движений, обеспечивающее требуемую траекторию исполнительного движения;



5) оценить влияние неравномерности элементарных движений на скорость сложного исполнительного движения и производительность формообразования. При необходимости определить условие постоянства скорости и пути его реализации;

6) оценить влияние переменности формы обрабатываемой поверхности на изменение рабочих углов инструмента. При недопустимом их изменении ввести ориентирующее движение (одно или несколько) для стабилизации этих параметров и уточнить структуру исполнительных движений;

7) ввести необходимые вспомогательные движения.



Рис. 1.12. Алгоритм синтеза схемы формообразования ТЗК

При синтезе схем обработки ТЗК целесообразно использовать эффективные решения, присущие схемам другого функционального назначения. В частности, перенесение функции кинематики формообразования на инструмент при одновременном обеспечении благоприятных динамических условий резания достигается эксцентричной установкой режущего инструмента при обработке некруглых поверхностей [7].

При такой установке инструмента движение подачи обеспечивается не кинематикой станка, а конструкцией инструмента. При этом динамика процесса резания характеризуется плавным нарастанием и уменьшением силы резания соответственно при врезании зубьев инструмента в заготовку и выходе из контакта с ней. Такой прием использован при синтезе схем обработки ТЗК секторными инструментами, о чем будет сказано ниже – в главе 3.

В общем случае задача синтеза кинематической схемы обработки имеет множество решений, что обуславливает необходимость их сравнительного анализа для выбора рационального.

#### 1.4. СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ

Рассмотрим применение изложенной выше методики синтеза методов формообразования поверхностей применительно к обработке ТЗК.

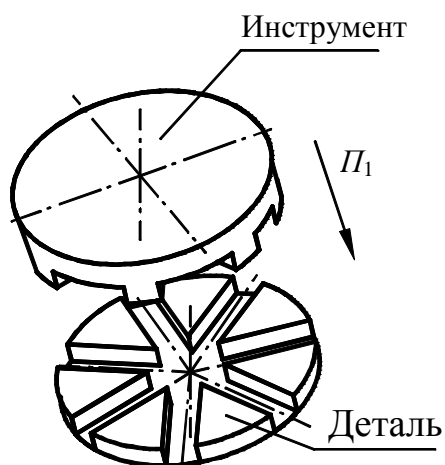


Рис. 1.13. Схема обработки ТЗК методом  $(Kn - Kn)$

Исходя из возможных сочетаний методов формообразования производящих линий поверхностей ТЗК, производящих элементов и исполнительных движений возможны следующие методы формообразования пазов ТЗК.

1. Метод  $(Kn - Kn)$  – обе производящие линии создаются одновременно. По данной схеме ТЗК образуется, например, путем штамповки (рис. 1.13), то есть без движения формообразования. Для ее реализации необходимо лишь одно установочное движение  $P_1$ .

Отличительные особенности данной схемы получения ТЗК:

- высокая производительность формообразования;
- материальным носителем геометрии получаемых поверхностей является инструмент, поэтому точность и качество получаемых поверхностей зависят от точности его изготовления;

- невозможность формирования закрытых пазов, что обусловлено методом генерации поверхности и конструкцией инструмента;
- неуниверсальность и сложность изготовления инструмента;
- зависимость геометрических параметров получаемого зубчатого контура от мощности оборудования, жесткости обрабатываемой системы.

2. Метод (*Кп – Об*), реализуемый, например, при накатывании мелкозубых плоских зубчатых контуров (рис. 1.14). Для генерации поверхностей этим методом требуется одно движение формообразования  $\Phi_v(B_1 B_2)$ , а также установочное движение  $Уст(П_3)$ . При этом материальным носителем информации о геометрии получаемых поверхностей является инструмент. Данный метод не позволяет производить механическую обработку ТЗК резанием. Движение деления происходит непрерывно в процессе качения инструмента относительно заготовки. Данный метод по сравнению с рассмотренным выше обладает более широкими технологическими возможностями.

3. Метод (*Кп – Сл*) (рис 1.15) реализуется движениями формообразования  $\Phi_v(П_1)$ , деления  $Д(B_3)$  и установки  $Уст(П_2)$ .

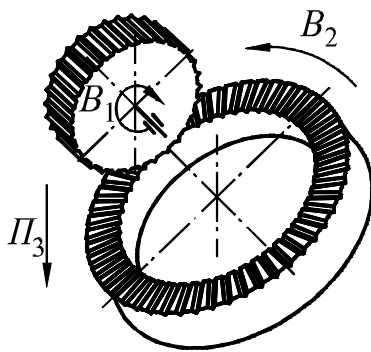


Рис. 1.14. Схема обработки ТЗК методом (*Кп – Об*)

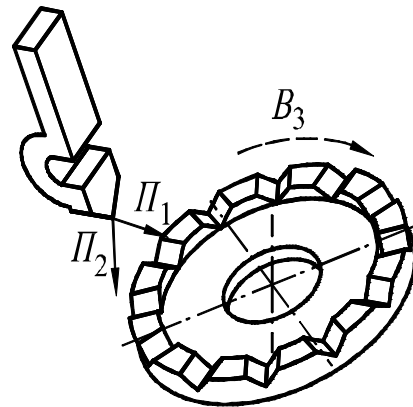


Рис. 1.15. Схема обработки ТЗК методом (*Кп – Сл*)

Отличительные особенности метода (*Кп – Сл*):

- более простая геометрия инструмента по сравнению с другими схемами формообразования;
- точность профиля паза определяется точностью выполнения производящих элементов инструмента;
- возможна обработка закрытых пазов;
- дискретность движения деления, что связано с увеличением вспомогательного времени и отрицательно влияет на точность формообразования ТЗК по шагу расположения зубьев.

Повышение производительности возможно при обработке двух пазов за один проход, а также одновременно нескольких деталей.

4. Метод ( $Kn - Kc$ ), которому соответствует обработка пазов ТЗК дисковым инструментом, например фасонным фрезерованием (рис. 1.16). Для его реализации необходимы два движения формообразования  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_{s1}(P_2)$ , установочное движение  $Усм(P_3)$  и движение деления  $D(B_4)$ . В случае если профиль паза по длине описан окружностью радиусом, равным радиусу инструмента, необходимость в движении подачи  $\Phi_{s1}(P_2)$  отпадает.

При схеме формообразования ( $Kn - Kc$ ), в отличие от схемы ( $Kn - Cl$ ), обработка осуществляется множеством режущих кромок, что позволяет повысить производительность и стойкость инструмента. Однако необходим более сложный режущий инструмент. Схема позволяет формировать открытые и закрытые пазы.

5. Метод ( $Ob - Ob$ ) основан на формировании обеих производящих линий методом обката (рис. 1.17). Схема реализуется двумя движениями формообразования:  $\Phi_v(B_1 B_2)$  – качение накатного инструмента по заготовке;  $\Phi_s(B_3)$  – движение подачи, заключающееся в повороте оси вращения инструмента в вертикальной плоскости. Необходимо также движение установки заготовки относительно инструмента  $Усм(P_4)$ .

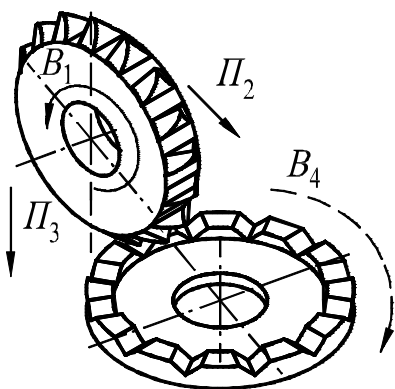


Рис. 1.16. Схема формирования ТЗК методом ( $Kn - Kc$ )

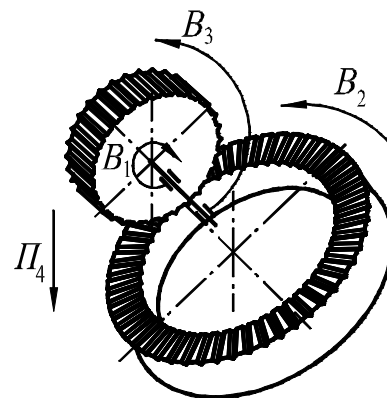


Рис. 1.17. Схема формирования ТЗК методом ( $Ob - Ob$ )

По сравнению со схемой, представленной на рисунке 1.14, рассматриваемая позволяет формировать пазы большей длины, при этом усилие, действующее со стороны инструмента на заготовку, меньше, поскольку меньше площадь их контакта. Недостатками данной схемы являются меньшая производительность формообразования и сложность реализации движения  $B_3$ , что связано с усложнением кинематики оборудования.

6. Метод (*Об – Сл*), которому соответствует зубочение ТЗК инструментом в виде круглого зуборезного долбяка (рис. 1.18). Режущий инструмент совершает поступательное движение подачи  $\Pi_1$  и вращательное движение  $B_2$ , согласованное с вращением заготовки  $B_3$ . Указанные элементарные движения образуют движения формообразования:  $\Phi_v(B_2 B_3)$  и  $\Phi_s(\Pi_1)$ . Движение  $\Pi_4$  является установочным. Благодаря непрерывности всех движений метод обеспечивает высокую производительность.

7. Метод (*Об – Кс*) реализуется при обработке ТЗК инструментом червячного типа (рис. 1.19). Для этого необходимы два движения формообразования  $\Phi_v(B_1 B_2)$  и  $\Phi_s(\Pi_3)$ , а также установочное движение  $Усм(\Pi_4)$ .

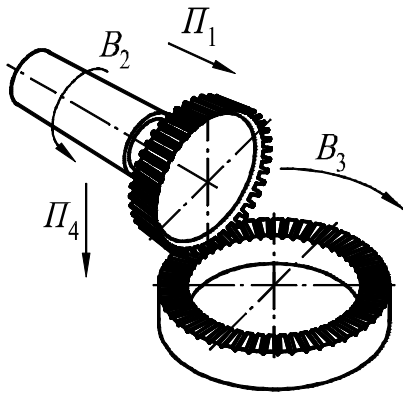


Рис. 1.18. Схема формирования ТЗК методом (*Об – Сл*)

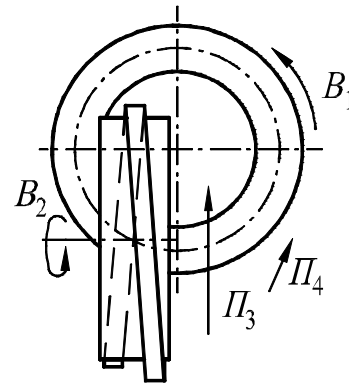


Рис. 1.19. Схема формирования ТЗК методом (*Об – Кс*)

Особенностями метода (*Об – Кс*) являются:

- высокая производительность вследствие непрерывности процесса деления;
- возможность управления производительностью формообразования за счет числа режущих элементов при условии постоянства точности формообразования;
- ограниченность формы получаемых пазов в продольном направлении;
- невозможность формирования закрытых пазов;
- сложность инструмента и его неуниверсальность.

Рациональная область применения данного метода обработки – серийное и массовое производство.

8. Метод (*Сл – Об*), реализуемый при обработке ТЗК инструментом в виде круглого зуборезного долбяка (рис. 1.20) двумя движениями формообразования: движением резания  $\Phi_v(\Pi_1)$  и движением подачи  $\Phi_{s1}(B_2 B_3)$ . При обработке глубоких пазов необходимо также движение врезания  $Вр(\Pi_4)$ .

Метод обладает высокой производительностью, поскольку наличие обката в значительной степени сокращает вспомогательное время. Его недостатками являются сложность инструмента и невозможность формирования закрытых пазов.

9. Метод двойного следа (*Сл – Сл*). Формирование ТЗК этим методом обеспечивает схема обработки резцовыми головками с использованием согласованных круговой подачи и движения врезания (рис. 1.21). Для получения пазов заданной формы необходимы движения формообразования  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_{s1}(B_3\Pi_4)$ .

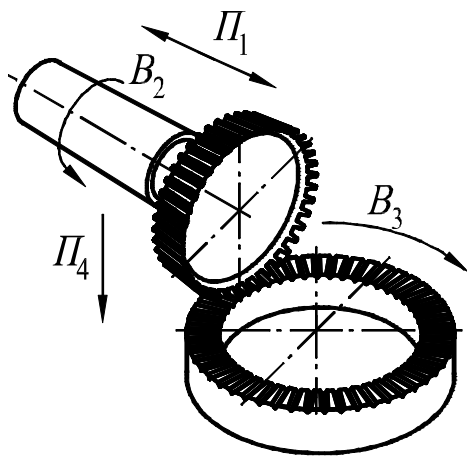


Рис. 1.20. Схема формирования ТЗК методом (*Сл – Об*)

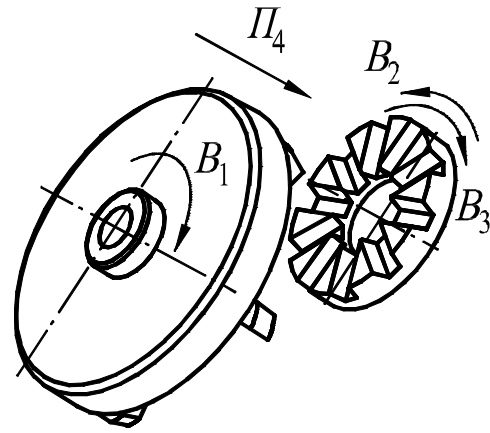


Рис. 1.21. Схема формирования ТЗК методом (*Сл – Сл*)

Особенности метода (*Сл – Сл*):

- широкие возможности управления формой пазов в продольном и поперечном направлениях;
- более простая настройка инструмента по сравнению с другими схемами обработки;
- возможность обработки закрытых пазов.

10. Метод (*Сл – Кс*) присущ схеме шлифования (фрезерования) впадин пазов (рис. 1.22, а), при этом формирование производящих линий осуществляется в последовательности, представленной на рисунке 1.22, б.

Для реализации данного метода генерации ТЗК необходимы следующие движения формообразования:  $\Phi_v(B_1)$  – движение резания; быстрая подача профилирования  $\Phi_{s1}(\Pi_2 \Pi_3)$ ; медленное относительное перемещение заготовки и инструмента вдоль обрабатываемого паза  $\Phi_{s2}(\Pi_4)$ . Требуется также движение деления  $D(B_5)$ , которое носит дискретный характер.

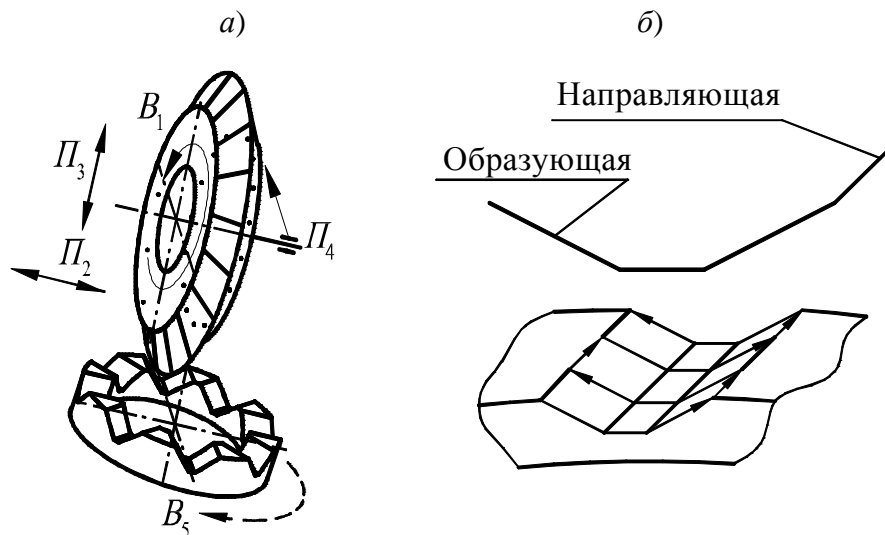


Рис. 1.22. Схема формирования ТЗК методом (Сл – Кс):  
 а – кинематическая схема обработки;  
 б – последовательность генерации производящих линий

Особенности данной схемы формирования ТЗК:

- меньшая производительность по сравнению с другими схемами, что обусловлено методом генерации поверхностей ТЗК и дискретным движением деления  $D(B_5)$ ;
- сложная кинематика формообразования;
- несложный по конструкции и в изготовлении инструмент;
- невозможность обработки закрытых пазов;
- схема позволяет обрабатывать впадины пазов, длина которых меньше их ширины.

11. Метод (Кс – Об) реализуется схемой, представленной на рисунке 1.23. Используется при шлифовании (фрезеровании) пазов дисковым инструментом и формировании их впадин

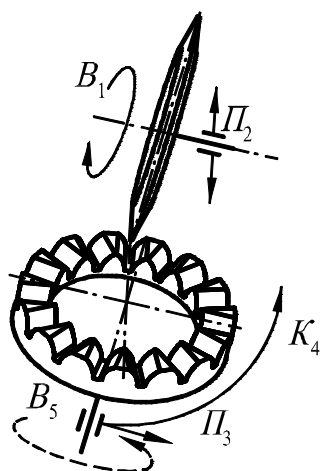


Рис. 1.23. Схема формирования ТЗК методом (Кс – Об)

трema движениями формообразования: движением резания  $\Phi_v(B_1)$  и движениями подачи  $\Phi_{s1}(P_2)$  и  $\Phi_{s2}(P_3K_4)$ .

Основные особенности схемы обработки:

- меньшая производительность формообразования, обусловленная сочетанием методов касания и обката, а также дискретным характером движения деления  $D(B_5)$ ;

- схема не позволяет получать закрытые пазы;

- возможность управлять формой паза в его поперечном сечении;
- сложность реализации движения подачи  $\Phi_{s_2}(P_3K_4)$ .

12. Метод (*Сл – Кс*) соответствует фрезерованию (шлифованию) пазов при согласованных в двух направлениях подачах  $P_2$  и  $P_3$  (рис. 1.24, *а*). Последовательность образования производящих линий представлена на рисунке 1.24, *б*.

Метод получения пазов основывается на трех движениях формообразования:  $\Phi_v(B_1)$ ,  $\Phi_{s1}(P_2)$ ,  $\Phi_{s2}(P_3)$ .

Данному методу присущи:

- невысокая производительность формообразования из-за большого числа циклов относительных перемещений и дискретности движения деления  $D(B_5)$ ;
- простота конструкции инструмента;
- ограниченные возможности по обработке закрытых пазов.

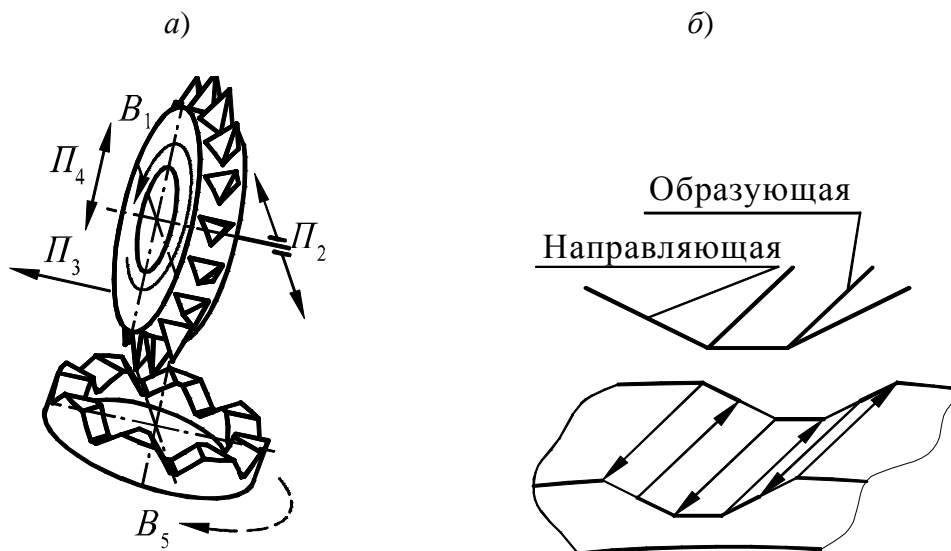


Рис. 1.24. Схема формирования ТЗК методом (*Кс – Сл*):

*а* – кинематическая схема обработки;

*б* – расположение производящих линий

13. Метод двойного касания (*Кс – Кс*). Ему соответствует фрезерование пазов пальцевой фрезой (шлифование шлифовальными головками) с использованием согласованных в трех направлениях подач (рис. 1.25). Каждая из криволинейных производящих линий образуется двумя движениями  $\Phi_v$  и  $\Phi_{s1}$  или  $\Phi_{s2}$ . Для осуществления этого метода теоретически требуются четыре движения формообразования, но поскольку движение резания  $\Phi_v$  участвует в создании обеих производящих линий, то достаточно трех движений.



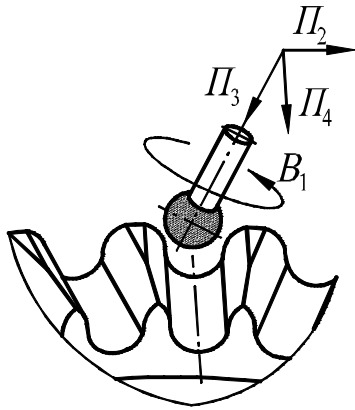


Рис. 1.25. Схема формирования ТЗК методом (Кс – Кс)

Производительность обработки, обусловленная многоцикловым характером формирования поверхностей.

Рассмотренные выше методы формообразования пазов ТЗК в систематизированном виде показаны на рисунке 1.26 как возможные сочетания методов формообразования производящих линий.

Практически не реализуются методы (Об – Кп), (Сл – Кп), (Кс – Кп), представленные на рисунке 1.26,  $\delta$ ,  $и$ ,  $н$ , так как скорость генерации образующей производящей линии не может быть меньше, чем направляющей.

Таким образом, формообразование ТЗК возможно множеством представленных методов и схем обработки, что с учетом установленных их достоинств и недостатков и исходя из требований к универсальности и производительности позволяет выбрать рациональные в конкретных условиях схемы для эффективного использования и модернизации имеющегося, а также при проектировании нового станочного оборудования.

Из изложенного выше следует, что количество исполнительных движений, необходимых для обработки равномерно расположенных пазов, минимально, если их профиль образуется методом копирования, а форма по длине – методом следа. В данном случае характеристический образ инструмента конгруэнтен поперечному сечению паза, что обеспечивается соответствующим профилированием его режущих элементов.

Вращательный характер элементарных движений, составляющих исполнительное движение формообразования множества пазов по длине, а также непрерывность движения деления обуславливают необходимость выполнения режущего инструмента в виде резцовой головки с равномерно расположенными по окружности режущими элементами. Последние могут быть размещены на наружной или на торцовой поверхности корпуса резцовой головки. В первом случае для обработки пазов, расположенных на

Кинематика формообразования основана на трех исполнительных движениях:  $\Phi_v(B_1)$  – движение резания;  $\Phi_{s1}(P_2P_3)$  и  $\Phi_{s2}(P_3P_4)$  – движения подачи.

Особенности данного метода:

- высокая универсальность, обусловленная возможностью управления формой производящих линий поверхностей пазов при обработке;

- возможность обрабатывать как открытые, так и закрытые пазы;

- относительно низкая производи-

торцах деталей, оси вращения инструмента и заготовки должны представлять собой скрещивающиеся прямые, а во втором – располагаться параллельно друг другу.

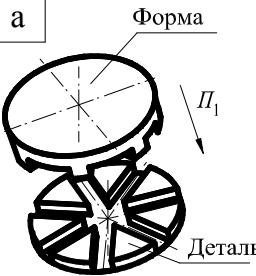
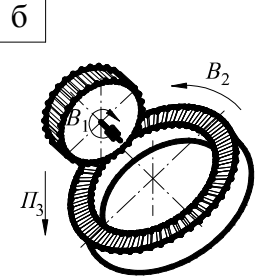
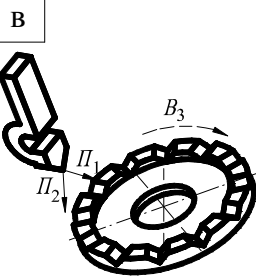
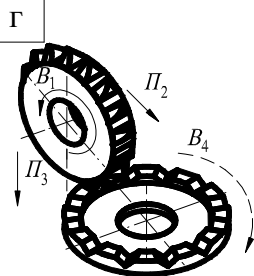
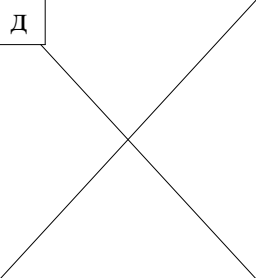
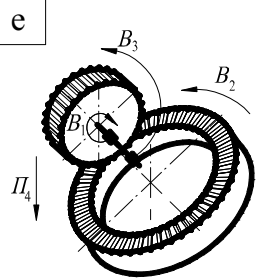
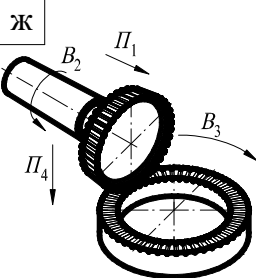
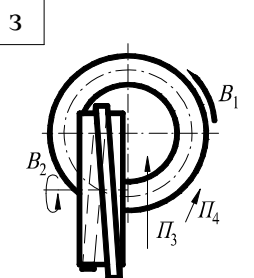
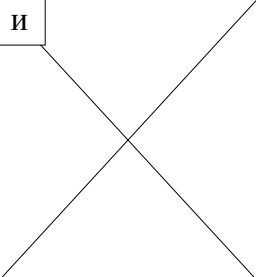
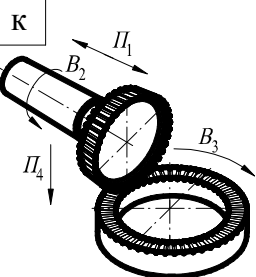
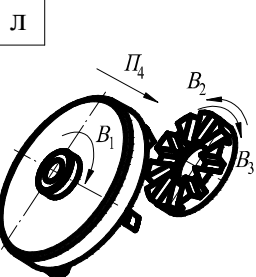
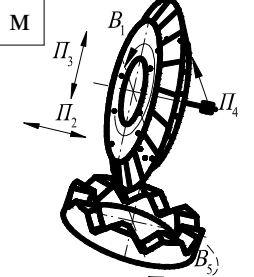
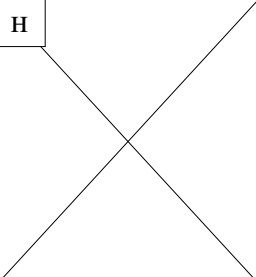
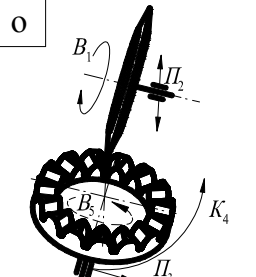
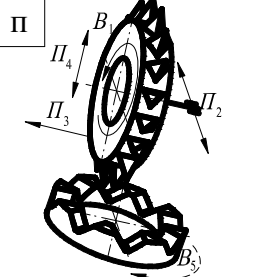
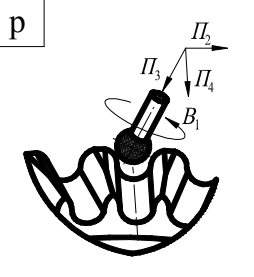
		Методы воспроизведения направляющей линии			
		Копирование	Обкат	След	Касание
Методы воспроизведения образующей линии	Копирование	а 	б 	в 	г 
	Обкат	д 	е 	ж 	з 
	След	и 	к 	л 	м 
	Касание	н 	о 	п 	р 

Рис. 1.26. Методы геометрического образования поверхностей торцовых зубчатых контуров

Схемы обработки пазов со скрещивающимися осями инструмента и заготовки могут быть реализованы на всех зубошлицефрезерных станках, у которых ось инструмента и ось заготовки расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях и скрещиваются при определенном расстоянии между ними.

## **Глава 2**

# **АНАЛИЗ СХЕМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ НА БАЗЕ ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ КРИВЫХ**

Производящие линии поверхностей пазов торцового зубчатого контура, то есть их образующие и направляющие, могут быть получены геометрическим и кинематическим методами. Заслуживает внимания более универсальный кинематический метод, при котором линия формируется как след производящей точки при сообщении ей сложного движения по требуемой траектории, создаваемого несколькими элементарными (вращательными, поступательными, качательными) движениями. В зависимости от сочетания этих движений, их скоростей и направлений, а также геометрических параметров схемы формирования образуются разнообразные линии, для использования которых в качестве производящих линий при обработке ТЗК требуется знать их геометрические свойства и управлять ими для получения заданной поверхности. Задача рассматривается для случая формирования направляющих линий двумя согласованными вращательными движениями вокруг параллельных осей.

### **2.1. СХЕМЫ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ЛИНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ**

Сообщением производящей точке двух согласованных вращательных движений может быть получен широкий класс кинематических кривых, в частности трохойд. В общем случае трохойда образуется как след точки, определенным образом связанной с замкнутой плоской линией (окружностью, эллипсом и т.д.), которая катится без скольжения по другой плоской линии [2]. В зависимости от формы последней и кинематических параметров взаимосвязанных движений образуемая линия может быть замкнутой или незамкнутой.

В данном случае рассматриваются только замкнутые линии, обеспечивающие непрерывность процесса формообразования и возможность многократного повторения траектории исполнительного движения, что важно при обработке резанием поверхностей с регулярно повторяющимся профилем, в частности, некруглых цилиндров и торцовых зубчатых контуров. Таким свойством обладают, например, циклоидальные линии, которые являются частными случаями трохойд. По принятой в математике схеме анализа циклоидальная линия рассматривается как траектория точ-

ки, определенным образом расположенной в плоскости производящей окружности, катящейся без скольжения по неподвижной окружности [6].

Принципиальные схемы образования циклоидальных кривых различаются относительным расположением производящей и направляющей окружностей и положением формообразующей точки в плоскости, связанной с производящей окружностью. Указанные окружности могут иметь между собой внешнее (рис. 2.1, а) или внутреннее (рис. 2.1, б) касание. При этом формообразующая точка  $M$  может быть расположена внутри, вне или на производящей окружности.

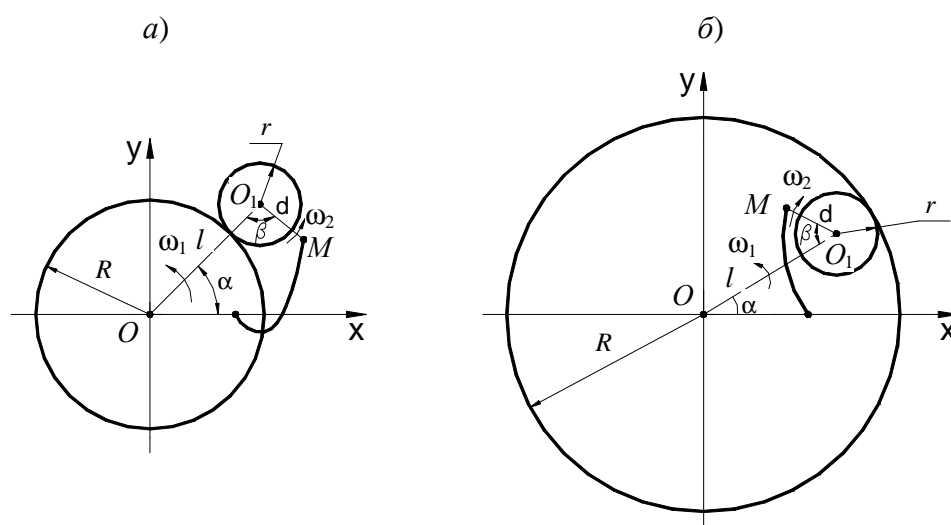


Рис. 2.1. Принципиальные схемы формирования циклоидальных кривых:  
а – эпициклоидальных кривых; б – гипоциклоидальных кривых

В зависимости от формы касания (внешнее или внутреннее) производящей и направляющей окружностей класс образуемых кривых делится на два подкласса:

- 1) эпициклоидальные кривые, образуемые при качении производящей окружности по направляющей окружности и их внешнем касании;
- 2) гипоциклоидальные кривые, образуемые при качении производящей окружности по направляющей окружности при их внутреннем касании [3].

Во втором случае, когда радиус производящей окружности больше, чем направляющей, формируются перициклоидальные кривые.

К геометрическим параметрам схем формирования циклоидальных кривых относятся:

- радиус  $R$  направляющей и радиус  $r$  производящей окружностей;
- расстояние  $d$  между формообразующей точкой  $M$  и центром  $O_1$  производящей окружности.

Производными геометрическими параметрами рассматриваемых схем являются:

- расстояние  $l$  между центрами  $O$  и  $O_1$  направляющей и производящей окружностей, которое при внешнем их касании составляет  $l = R + r$ , а при внутреннем касании  $l = R - r$ ;

- коэффициент  $\lambda = r/d$ , определяющий расположение формообразующей точки относительно центра производящей окружности, который независимо от вида контакта направляющей и производящей окружностей может удовлетворять одному из трех условий:  $\lambda < 1$ ;  $\lambda = 1$ ;  $\lambda > 1$  [2].

Следует отметить, что в схемах обработки, основанных на разделении вращательных движений между инструментом и заготовкой, параметр  $l$  является расстоянием между их осями, а параметр  $d$  – радиусом режущего инструмента. Кинематическим параметром рассматриваемых схем, влияющим на форму образуемой линии, является отношение  $i = \omega_2 / \omega_1$  угловой скорости  $\omega_2$  вращения формообразующей точки  $M$  вокруг центра  $O_1$  производящей окружности и угловой скорости  $\omega_1$  поворота центра  $O_1$  производящей окружности относительно центра  $O$  направляющей окружности. Отношение  $i$  угловых скоростей назовем *кинематическим коэффициентом* схемы формообразования линии.

Учитывая, что производящая окружность катится по направляющей окружности без скольжения, имеем

$$i = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{R}{r} = \frac{\beta}{\alpha}, \quad (2.1)$$

где  $\beta$  – угол поворота производящей точки  $M$  от начального положения, соответствующий углу  $\alpha$  поворота центра  $O_1$  относительно центра  $O$ .

За начальное примем такое положение, когда точки  $O$ ,  $O_1$  и  $M$  расположены на одной прямой, а точка  $M$  находится между точками  $O$  и  $O_1$  и, следовательно, формирует наиболее близкую к центру  $O$  точку образуемой линии.

При внешнем зацеплении производящей и направляющей окружностей угловые скорости  $\omega_1$  и  $\omega_2$  имеют одинаковые, а при внутреннем касании – противоположные направления, поэтому при аналитических расчетах для схемы по рисунку 2.1, *a* принимается  $i > 0$ , а для схемы по рисунку 2.1, *б* –  $i < 0$ .

В реальных схемах обработки резанием формообразующая точка  $M$  материализуется посредством режущего инструмента (вершины резца, точки на оси фрезы), который должен совершать относительно заготовки планетарное движение. Практически это возможно двумя путями:

1) с помощью планетарного зубчатого механизма. В этом случае исполнительный орган станка, несущий режущий инструмент, должен совершать относительно неподвижной заготовки такое же движение, как сателлит планетарного зубчатого механизма. Поэтому образуемые таким механизмом линии иногда называют сателлитными [2];

2) относительное планетарное движение инструмента и заготовки создается согласованными вращательными движениями исполнительных органов станка непланетарного типа, несущих заготовку и инструмент, что удобно представить с помощью рычажного механизма-построителя [53].

Геометрические схемы для определения траектории исполнительного движения при отсутствии планетарного механизма представлены на рисунке 2.2.

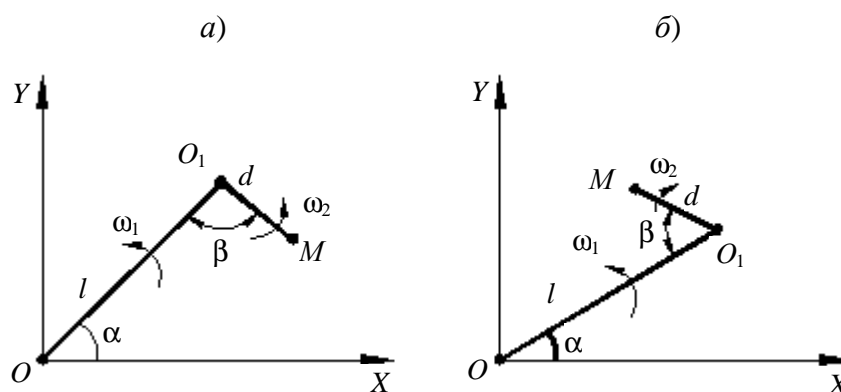


Рис. 2.2. Геометрические схемы формирования производящих линий:  
 $a$  – в виде эпициклоидальных кривых;  $b$  – в виде гипоциклоидальных кривых

Следует отметить, что величины и направления угловых скоростей указанных вращательных движений этих органов могут отличаться от аналогичных параметров в соответствующих принципиальных схемах формирования циклоидальных кривых (рис. 2.1,  $a$  и рис. 2.1,  $b$ ), что позволяет существенно расширить технологические возможности станка по форме обрабатываемых поверхностей. Кроме того, благодаря отсутствию в данном случае реального планетарного зубчатого механизма упрощается конструкция и повышается жесткость формообразующей системы станка.

## 2.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ЛИНИЙ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ

Для использования циклоидальных кривых в качестве производящих линий при обработке поверхностей резанием необходимо знать влияние на их форму геометрических и кинематических параметров схем формообразования.

Известно [3], что если производящая точка принадлежит подвижной окружности ( $d = r$ ), то формируются обыкновенные циклоидальные кривые (эпи- или гипоциклоида). Если производящая точка расположена внутри производящей окружности ( $d < r$ ), то образуются укороченные циклоидальные кривые. Если же производящая точка находится вне подвижной окружности ( $d > r$ ), то формируются удлиненные циклоидальные кривые. Это качественная оценка формы этих линий. Их геометрические свойства зависят от значений параметров  $R$ ,  $r$ ,  $d$ . При этом с учетом циклического характера процесса формирования линия может состоять из множества последовательно образованных конгруэнтных участков. Данное обстоятельство позволяет использовать некоторые циклоидальные кривые в качестве производящих линий множества определенным образом расположенных относительно друг друга одинаковых поверхностей что важно, например, при обработке деталей с регулярно повторяющимся профилем, в частности ТЗК.

Для анализа зависимости геометрии формируемых линий от настраиваемых параметров  $i$ ,  $d$ ,  $l$  требуется их аналитическое описание. Приведенные в литературе [2, 3, 6, 50] уравнения циклоидальных кривых не содержат в явном виде необходимые параметры настройки, что затрудняет практическое применение известных аналитических зависимостей при реализации схем обработки на станках. Более удобным является определение формируемой линии как траектории конечной точки многосвязного механизма [53]. С учетом этого и практического приложения результатов анализа будем рассматривать уравнения формируемых линий как функции настраиваемых кинематических и геометрических параметров.

Траектория точки  $M$ , перемещающейся в плоскости  $XOY$ , согласно рисунку 2.2,  $a$ , при выполнении указанного выше требования к начальному положению производящей точки  $M$ , описывается параметрическими уравнениями:

$$\begin{cases} x = l \cos \alpha + d \cos(\pi - \beta - \alpha), \\ y = l \sin \alpha - d \sin(\pi - \beta - \alpha), \end{cases} \quad (2.2)$$

где  $l = R + r$  (см. рис. 2.1,  $a$ ).

На основании (2.1)  $\pi - \beta - \alpha = \pi - a(i + 1)$ . Тогда

$$\begin{cases} x = l \cos \alpha - d \cos(\pi - \alpha(i + 1)), \\ y = l \sin \alpha - d \sin(\pi - \alpha(i + 1)); \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\begin{cases} x = l \cos \alpha - d \cos(i + 1)\alpha, \\ y = l \sin \alpha - d \sin(i + 1)\alpha. \end{cases} \quad (2.4)$$

Применительно к планетарной схеме формирования эпициклоидальных кривых (см. рис. 2.1, *a*), для которых  $l = R + r$ ,  $R/r = i$ , система уравнений (2.4) приводится к виду

$$\begin{cases} x = r(i + 1) \cos \alpha - d \cos(i + 1)\alpha, \\ y = r(i + 1) \sin \alpha - d \sin(i + 1)\alpha. \end{cases} \quad (2.5)$$

Если ввести относительный коэффициент  $\lambda = r/d$ , имеем

$$\begin{cases} x = d(\lambda(i + 1) \cos \alpha - \cos(i + 1)\alpha), \\ y = d(\lambda(i + 1) \sin \alpha - \sin(i + 1)\alpha). \end{cases} \quad (2.6)$$

Из (2.5) и (2.6) следует, что форма образуемой линии при заданном значении  $i$  зависит от соотношения параметров  $r$  и  $d$ , задаваемого коэффициентом  $\lambda$ . По рассматриваемой схеме обыкновенные, укороченные и удлиненные циклоидальные кривые формируются соответственно при  $\lambda = 1$ ,  $\lambda > 1$  и  $\lambda < 1$ .

Заметим, что требуемое значение  $\lambda$  технически проще обеспечить за счет настройки параметра  $d$ , чем  $r$ . Это связано с тем, что, например, в обрабатывающих устройствах планетарного типа перенастройка параметра  $r$  связана с изменением чисел зубьев сателлита и, следовательно, конструкции планетарного механизма, так как  $r$  – это радиус делительной окружности сателлита, что технически сложно.

В станках непланетарного типа параметр  $r$  относится к воображаемому планетарному механизму, а настраиваемыми являются расстояние  $l$  между осями вращательных движений инструмента и заготовки и расстояние  $d$  между производящей точкой  $M$  и осью ее вращения. В этой свя-



зи целесообразно уравнения формируемой линии выразить через настраиваемые параметры  $i$ ,  $d$  и коэффициент  $\eta = l/d$ . С учетом этого систему уравнений (2.4) можно записать в виде

$$\begin{cases} x = d(\eta \cos \alpha - \cos(i+1)\alpha), \\ y = d(\eta \sin \alpha - \sin(i+1)\alpha). \end{cases} \quad (2.7)$$

Система (2.7) представляет параметрические уравнения всего семейства эпициклоидальных кривых: обыкновенных при  $\eta = i+1$ , укороченных при  $\eta > i+1$ , удлинённых при  $\eta < i+1$ .

Аналогично, при соблюдении того же требования к начальному положению производящей точки  $M$ , ее траектория при формировании гипоциклоидальных кривых в соответствии с рисунком 2.2, б описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x = l \cos \alpha - d \cos(i-1)\alpha, \\ y = l \sin \alpha + d \sin(i-1)\alpha. \end{cases} \quad (2.8)$$

С учетом того, что в данном случае  $l = R - r$  (см. рис. 2.1, б), и используя только настраиваемые параметры, получаем общие параметрические уравнения семейства обыкновенных, укороченных и удлинённых гипоциклоидальных кривых:

$$\begin{cases} x = d(\lambda(i-1) \cos \alpha - \cos(i-1)\alpha), \\ y = d(\lambda(i-1) \sin \alpha + \sin(i-1)\alpha), \end{cases} \quad (2.9)$$

или

$$\begin{cases} x = d(\eta \cos \alpha - \cos(i-1)\alpha), \\ y = d(\eta \sin \alpha + \sin(i-1)\alpha). \end{cases} \quad (2.10)$$

При  $\lambda = 1$  или  $\eta = i-1$  формируются обыкновенные, при  $\lambda > 1$  или  $\eta > i-1$  – укороченные и при  $\lambda < 1$  или  $\eta < i-1$  – удлинённые гипоциклоиды, которые описываются уравнениями (2.9) или (2.10) при соответствующих значениях  $\lambda$  или  $\eta$ . Следует отметить, что при замене величины  $i$  на  $-i$  уравнения, описывающие эпициклоиды, преобразуются в уравнения,

описывающие гипоциклоиды, что позволяет использовать общий тип уравнений для задания этих кривых.

В отличие от известных зависимостей [2, 3, 6, 50], в приведенных выше уравнениях циклоидальных кривых переменными являются только параметры  $(i, l, d)$  схем формирования и их отношения ( $\lambda$  или  $\eta$ ), необходимые для настройки формообразующей системы станка. Это важно для реализации конкретных кинематических схем обработки независимо от структуры станков, основанных на сообщении планетарного движения профилирования либо инструменту, либо заготовке или взаимосвязанных вращательных движениях инструмента и заготовки в соответствии со значением кинематического коэффициента. В этой связи рассмотрим влияние указанных параметров на форму образуемых линий.

### 2.3. АНАЛИЗ ФОРМЫ ТРАЕКТОРИИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Из множества формируемых по рассматриваемым схемам кривых в качестве траекторий исполнительных движений (производящих линий) практический интерес представляют те, которые удовлетворяют условию замкнутости.

Если отношение  $i$  угловых скоростей  $\omega_2$  и  $\omega_1$  выражается целым числом, то любая формируемая линия состоит из  $i$  конгруэнтных участков и является замкнутой. При этом соседние конгруэнтные участки соединяются между собой в точках образованной кривой, равномерно расположенных по окружности. Данное обстоятельство обеспечивает возможность многократного перемещения формообразующей точки по одной и той же траектории, что требуется при обработке ТЗК. Если кинематический коэффициент выражается дробным рациональным числом вида  $i = N/q$ , то также образуется замкнутая кривая, состоящая из  $N$  конгруэнтных ветвей. Формообразующая точка, описывая многократно  $N$  ветвей, возвращается каждый раз в исходное положение, что позволяет использовать образуемую линию в качестве направляющей в схемах обработки с непрерывным движением деления.

При иррациональном значении кинематического коэффициента формообразующая точка, описывая бесконечное число пересекающихся ветвей, не возвращается в исходное положение, поэтому образуемая линия является незамкнутой. Данный случай не имеет практического значения при синтезе схем обработки ТЗК.

### 2.3.1. Форма образуемых линий при целом значении кинематического коэффициента

При  $i = 1$  уравнения (2.4) имеют вид

$$\begin{cases} x = l \cos \alpha - d \cos 2\alpha, \\ y = l \sin \alpha - d \sin 2\alpha, \end{cases}$$

или на основании (2.7)

$$\begin{cases} x = d(\eta \cos \alpha - \cos 2\alpha), \\ y = d(\eta \sin \alpha - \sin 2\alpha). \end{cases} \quad (2.11)$$

Формируемая линия (рис. 2.3) является улиткой Паскаля [4].

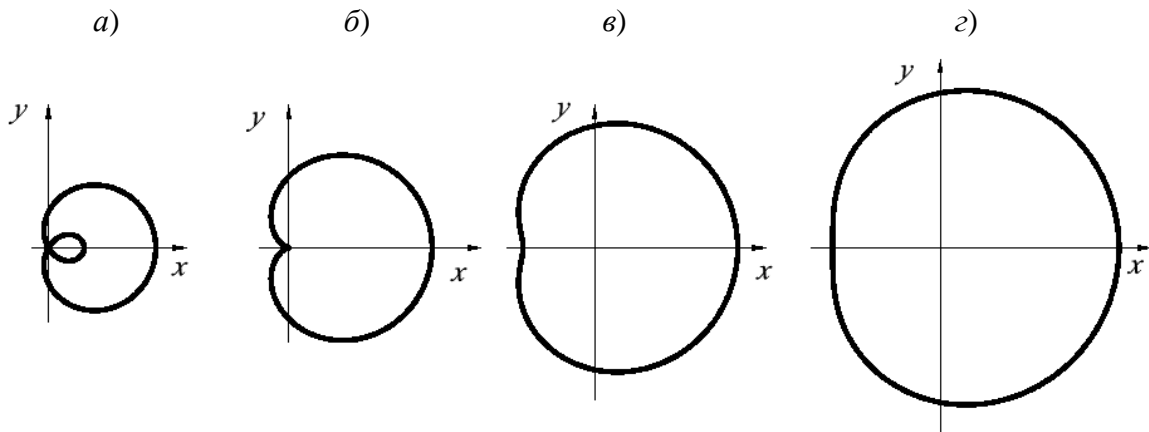


Рис. 2.3. Форма образуемых кривых при  $i = 1$ :

$$a - \eta < 2; \quad b - \eta = 2; \quad v, z - \eta > 2$$

Эта кривая симметрична относительно оси  $OX$  и в зависимости от соотношения значений  $l$  и  $d$  (параметра  $\eta$ ) может иметь внутреннюю петлю (рис. 2.3, *a*), точку возврата (рис. 2.3, *b*), точку перегиба (рис. 2.3, *v*) или овальную форму с положительной во всех точках кривизной (рис. 2.3, *z*).

В частном случае, когда  $\eta = 2$ , запишем

$$\begin{cases} x = d(2 \cos \alpha - \cos 2\alpha), \\ y = d(2 \sin \alpha - \sin 2\alpha). \end{cases} \quad (2.12)$$

Уравнения (2.12) описывают разновидность обыкновенной эпициклоиды – кардиоиду [3]. Она симметрична относительно оси  $OX$  и имеет одну точку возврата (см. рис. 2.3, *b*).

Применительно к схеме, представленной на рисунке 2.2, б, в соответствии с (2.8) при  $i = 1$  имеем

$$\begin{cases} x = l \cos \alpha - d, \\ y = l \sin \alpha, \end{cases} \quad (2.13)$$

или

$$(x + d)^2 + y^2 = l^2. \quad (2.14)$$

Следовательно, формируемая линия представляет собой окружность, смещенную относительно начала координат (рис. 2.4, а).

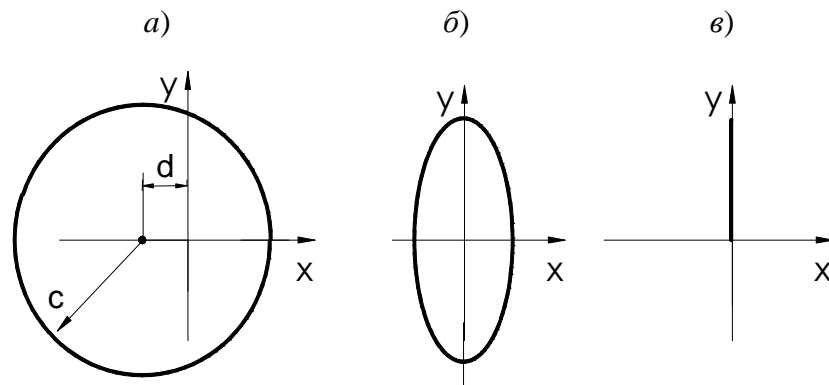


Рис. 2.4. Частные случаи формируемых линий:  
а – окружность; б – эллипс; в – прямая

Данный метод формообразования окружности может служить основой бескопирного способа образования эксцентрично расположенных цилиндрических поверхностей.

При  $i = 2$  на основании (2.8)

$$\begin{cases} x = (l - d) \cos \alpha, \\ y = (l + d) \sin \alpha, \end{cases} \quad (2.15)$$

или

$$\frac{x^2}{(l - d)^2} + \frac{y^2}{(l + d)^2} = 1. \quad (2.16)$$

Следовательно, при любых значениях  $l$  и  $d$  линия формируется в виде эллипса, малая полуось которого выражается как  $l - d$ , а большая – как  $l + d$  (рис. 2.4, б). Данная схема служит основой проектирования формообразующей системы станка для обработки эллиптических цилиндров. С уменьшением разности  $l - d$  эллипс сжимается вдоль малой оси, что позволяет использовать формируемые линии для профилирования с заданной точностью многогранных поверхностей при обработке на специальных станках [7]. При  $l = d$  эллипс трансформируется в проходящую через начало координат прямую, описываемую следующим уравнением:

$$\begin{cases} x = 0, \\ y = 2l \sin \alpha. \end{cases} \quad (2.17)$$

Производящая точка в этом случае совершает возвратно-поступательное перемещение (рис. 2.4, в), и поэтому образуемая линия может быть принята, например, в качестве направляющей линии при обработке по методу кинематического формообразования прямолинейных радиально расположенных пазов ТЗК деталей типа муфт.

При  $i = 3$  и  $\lambda = 1$  ( $\eta = 2$ ) формируемая линия в соответствии с (2.9) описывается уравнениями:

$$\begin{cases} x = d(2 \cos \alpha - \cos 2\alpha), \\ y = d(2 \sin \alpha + \sin 2\alpha). \end{cases} \quad (2.18)$$

Она является обыкновенной гипоциклоидой (кривой Штейнера [6]), состоящей из трех конгруэнтных участков, образующих при любом, отличном от нуля, значении  $d$  треугольник с вогнутыми сторонами (рис. 2.5, а).

Если  $i = 4$  и  $\lambda = 1$  ( $\eta = 3$ ), образуется обыкновенная гипоциклоида

$$\begin{cases} x = d(3 \cos \alpha - \cos 3\alpha), \\ y = d(3 \sin \alpha + \sin 3\alpha), \end{cases} \quad (2.19)$$

представляющая собой четырехугольник (рис. 2.5, б) с конгруэнтными вогнутыми сторонами (астроиду [6]). Линии типа кривой Штейнера, астроиды и эллипсы могут быть приняты в качестве производящих линий поверхностей ТЗК. В первых двух случаях конгруэнтные участки образуемой линии связаны между собой в точках возврата, равномерно расположенных по окружности радиусом  $r_0 = l + d$ , что следует учитывать при определении

параметров схемы формообразования производящей линии исходя из параметров обрабатываемой поверхности.

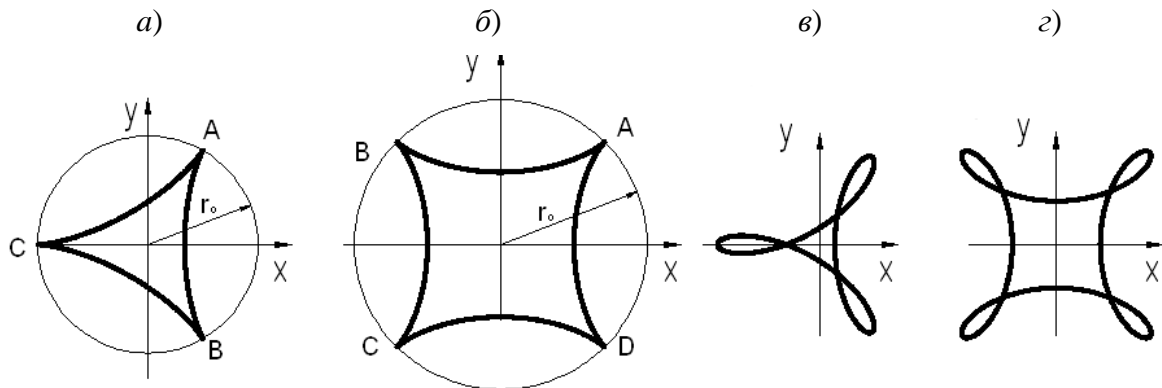


Рис. 2.5. Форма образуемых кривых при целых значениях кинематического коэффициента:  
 $a - i = 3, \lambda = 1$ ;  $b - i = 4, \lambda = 3$ ;  $v - i = 3, \lambda = 2/3$ ;  $z - i = 4, \lambda = 2/3$

Управление формой образуемых кривых при заданном целом значении  $i$  обеспечивается за счет соотношения геометрических параметров  $d$  и  $l$  (коэффициента  $\eta$ ) схемы обработки. Так, если  $\eta < 2$  при  $i = 3$  или  $\eta < 3$  при  $i = 4$ , то представленные на рисунке 2.5,  $a, b$  обыкновенные гипоциклоиды переходят в удлинённые, которые отличаются наличием петель и узловых точек. На рисунках 2.5,  $v, z$  изображены удлинённые гипоциклоиды при  $i = 3, \lambda = 2/3$ , при  $i = 4, \lambda = 2/3$  соответственно.

Наличие петель у формируемых кривых расширяет возможности их применения в качестве направляющих производящих линий при обработке, например, на торцах деталей пазов с криволинейными боковыми сторонами, так как такими линиями могут служить соответствующие по форме участки петель, расположенные за узловыми точками циклоидальной кривой. Тем самым обеспечивается возможность формирования боковых поверхностей пазов выпуклой или вогнутой формы.

Аналогично, за счет изменения настраиваемых параметров достигается управление формой эпициклоидальных кривых. Рассмотрим это, например, для схемы формирования эпициклоиды, когда  $i = 3$ .

При  $\lambda = 1$  согласно (2.6) формируется обыкновенная эпициклоида (рис. 2.6,  $a$ ), описываемая уравнениями:

$$\begin{cases} x = d(4 \cos \alpha - \cos 4\alpha), \\ y = d(4 \sin \alpha - \sin 4\alpha). \end{cases} \quad (2.20)$$

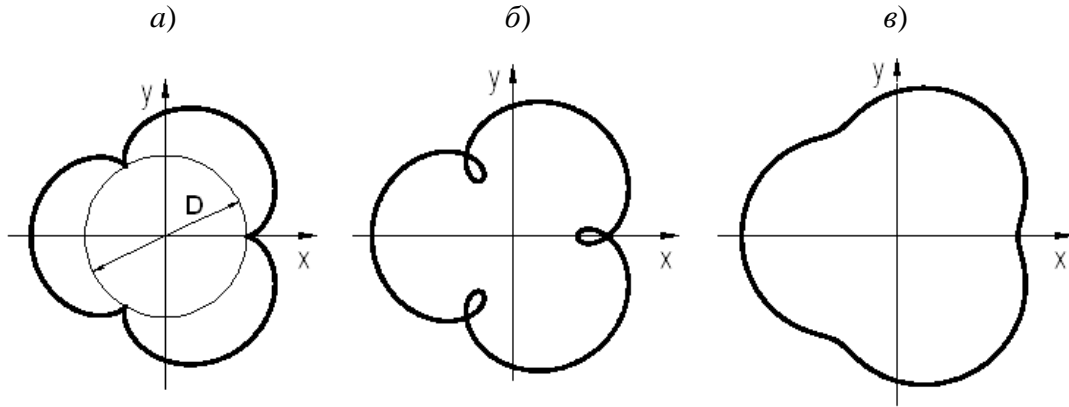


Рис. 2.6. Формы образуемых кривых эпициклоидального типа при целом значении кинематического коэффициента ( $i = 3$ ):  
 $a - \lambda = 1$ ;  $b - \lambda = 2/3$ ;  $v - \lambda = 2$

Эпициклоида имеет три конгруэнтных участка, соседние из которых соединяются между собой в точках возврата, расположенных на окружности диаметром  $D = 6d$ . При  $\lambda = 2$  формируется укороченная эпициклоида

$$\begin{cases} x = d(8\cos\alpha - \cos 4\alpha), \\ y = d(8\sin\alpha - \sin 4\alpha), \end{cases} \quad (2.21)$$

у которой вместо точек возврата имеются три точки перегиба и все ее точки расположены над окружностью диаметром  $D$  (рис. 2.6, в).

Если же  $\lambda = 2/3$ , образуется удлиненная эпициклоида, имеющая три петли (рис. 2.6, б), отдельные участки которых могут использоваться в качестве направляющих линий, например, в схемах обработки пазов ТЗК.

$$\begin{cases} x = d\left(\frac{8}{3}\cos\alpha - \cos 4\alpha\right), \\ y = d\left(\frac{8}{3}\sin\alpha - \sin 4\alpha\right). \end{cases} \quad (2.22)$$

### 2.3.2. Форма образуемых линий при дробном значении кинематического коэффициента

Как отмечено выше, дробное значение кинематического коэффициента должно выражаться рациональным числом вида  $i = N/q$ . В этом случае образуется замкнутая линия, имеющая  $N$  конгруэнтных ветвей, форма которых зависит от значения  $q$  а также параметров  $d$ ,  $\lambda(\eta)$ . Поэтому схемы, основанные на дробном значении кинематического коэффициента, обладают более широкими возможностями по форме образуемых линий по

сравнению со схемами с его целым значением. Рассмотрим это применительно к схемам образования линий при  $i = 3/4$  (рис. 2.7).

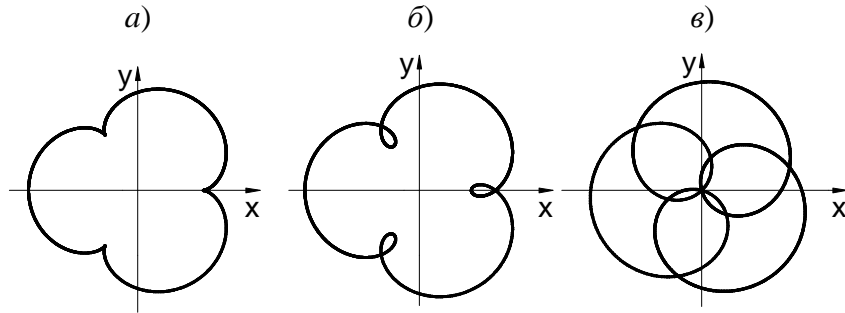


Рис. 2.7. Форма образуемых гипоциклоидальных кривых при дробном значении кинематического коэффициента ( $i = 3/4$ ):  
 $a - \lambda = 1$ ;  $b - \lambda = 2$ ;  $v - \lambda = 4$

Если  $\lambda = 1$ , формируется обыкновенная гипоциклоида

$$\begin{cases} x = -d \left( \frac{\cos \alpha}{4} + \cos \frac{\alpha}{4} \right), \\ y = -d \left( \frac{\sin \alpha}{4} + \sin \frac{\alpha}{4} \right) \end{cases} \quad (2.23)$$

с точками возврата (рис. 2.7, *a*).

При  $\lambda = 2$  образуется гипоциклоида

$$\begin{cases} x = -d \left( \frac{\cos \alpha}{2} + \cos \frac{\alpha}{4} \right), \\ y = -d \left( \frac{\sin \alpha}{2} + \sin \frac{\alpha}{4} \right) \end{cases} \quad (2.24)$$

с тремя петлями (рис. 2.7, *b*).

Идентичность формы кривых на рисунках 2.6, *a*, *b* и на рисунке 2.7, *a*, *b* указывает на то, что при определенных значениях параметров эпициклоиды и гипоциклоиды совпадают друг с другом.

Если  $\lambda = 4$  ( $\eta = 1$ ), образуется удлиненная гипоциклоида, ветви которой пересекаются в начале координат (рис. 2.7, *v*).

$$\begin{cases} x = -d \left( \cos \alpha + \cos \frac{\alpha}{4} \right), \\ y = -d \left( \sin \alpha + \sin \frac{\alpha}{4} \right). \end{cases} \quad (2.25)$$



Общим свойством кривых, сформированных при  $\eta=1$ , целых и дробных значениях кинематического коэффициента, является то, что все ветви любой кривой пересекаются в начале координат.

На рисунке 2.8 приведены примеры гипоциклоидальных, а на рисунке 2.9 – эпициклоидальных кривых, сформированных при  $\eta=1$  и различных значениях кинематического коэффициента.

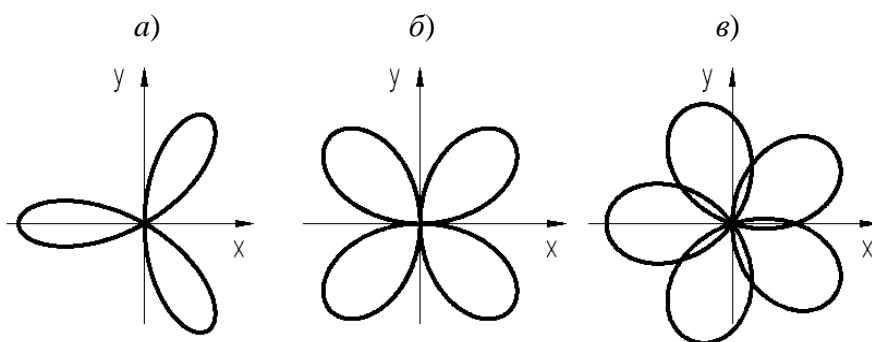


Рис. 2.8. Формы гипоциклоидальных кривых при  $\eta=1$ :  
 $a-i=3$ ;  $b-i=4$ ;  $c-i=5$

Гипоциклоидальные кривые, изображенные на рисунке 2.8, являются замкнутыми и содержат конгруэнтные участки, симметричные относительно прямых, проходящих через центр  $O$ . По форме они подобны кривым типа «розы» [6]. Аналогичную форму имеют и фигуры, образованные пересечением ветвей эпициклоидальных кривых (см. рис. 2.9). Такие кривые рационально использовать при обработке регулярно расположенных пазов и канавок на торцах кольцевых деталей.

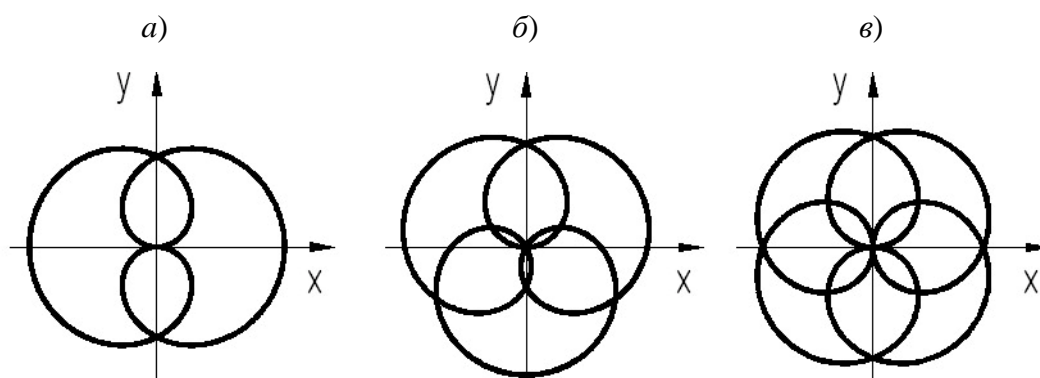


Рис. 2.9. Формы эпициклоидальных кривых при  $\eta=1$ :  
 $a-i=2$ ;  $b-i=3$ ;  $c-i=4$

Результаты анализа зависимости геометрии замкнутых циклоидальных кривых от параметров схемы их формирования в обобщенном виде

представлены на рисунке 2.10 с указанием основных кинематических и геометрических условий их образования, что упрощает выбор производящих линий при синтезе схем обработки резанием периодически повторяющихся поверхностей, в частности поверхностей ТЗК.

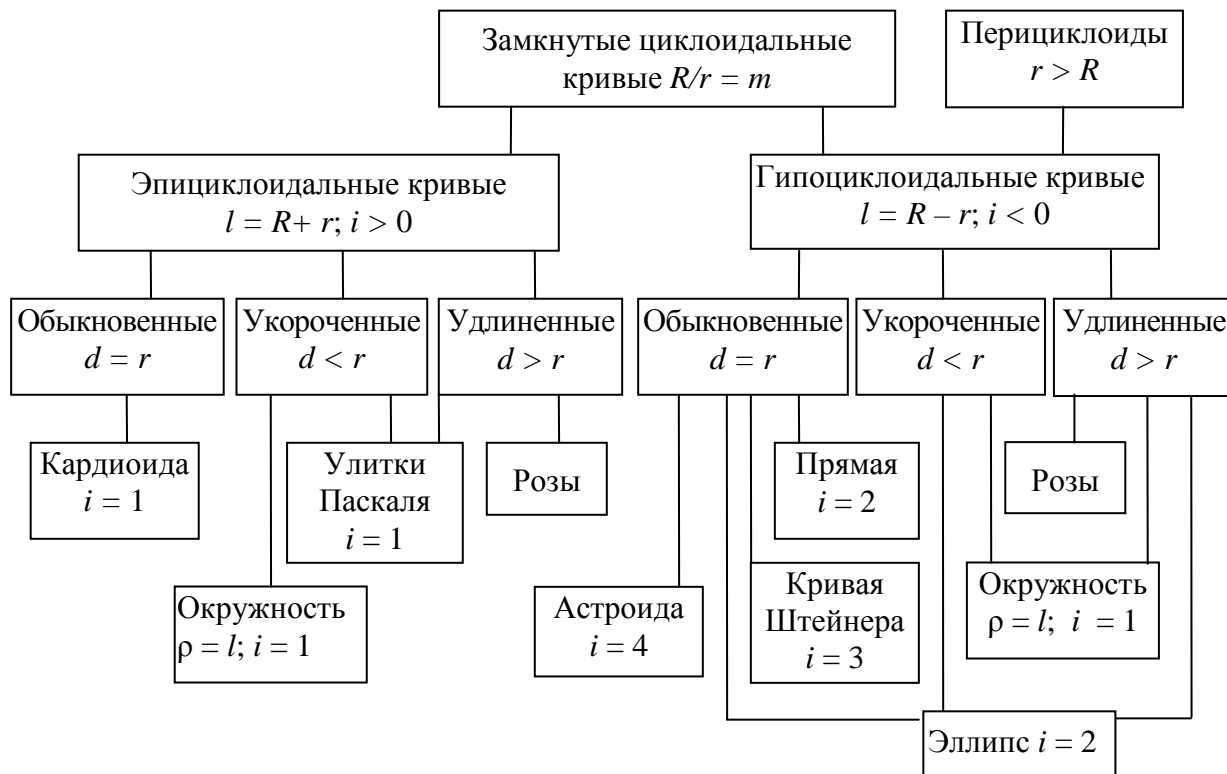


Рис. 2.10. Типы циклоидальных кривых в зависимости от параметров схем формирования

Изображенные на рисунках 2.3–2.9 кривые получены методом компьютерного моделирования, применение которого существенно упрощает анализ зависимости их геометрической формы от кинематических и геометрических параметров схемы формообразования.

#### 2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ЛИНИЙ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ

Основным кинематическим параметром схемы формирования линии является абсолютная скорость перемещения характеристического образа инструмента, которая в реальных процессах обработки ТЗК может быть скоростью резания или скоростью движения подачи. В обоих случаях данный параметр определяет производительность формообразования, которая пропорциональна скорости перемещения характеристического образа инструмента по направляющей линии.

Скорость  $v$  точки, движущейся по кривой, заданной в параметрическом виде, определяется зависимостью

$$v = \sqrt{x'^2 + y'^2}, \quad (2.26)$$

где  $x'$ ,  $y'$  – первые производные от уравнений, определяющих координатные перемещения  $x = x(t)$  и  $y = y(t)$  производящей точки.

Определим скорость точки  $M$  при эпициклоидальной форме направляющей линии формируемой поверхности (см. рис. 2.2, *a*). Для данного случая на основании (2.7) имеем:

$$\begin{cases} x' = d(-\eta \sin \alpha + i \sin(i-1)\alpha) d\alpha / dt, \\ y' = d(\eta \cos \alpha + i \cos(i-1)\alpha) d\alpha / dt. \end{cases} \quad (2.27)$$

Учитывая, что  $d\alpha / dt$  представляет собой угловую скорость  $\omega_1$  вращения звена  $OO_1$  (см. рис. 2.2, *a*), абсолютная скорость точки  $M$  от параметров схемы формообразования описывается уравнением

$$v = d\omega_1 \sqrt{\eta^2 + i^2 + 2\eta i \cos i\alpha}. \quad (2.28)$$

Аналогично, скорость точки  $M$  при гипоциклоидальной форме направляющих линий (см. рис. 2.2, *б*) определяется зависимостью

$$v = d\omega_1 \sqrt{\eta^2 + i^2 - 2\eta i \cos i\alpha}. \quad (2.29)$$

Уравнения (2.28) и (2.29) преобразуются в более удобные для анализа выражения:

$$v = d\omega_2 \sqrt{p^2 + 1 + 2pi \cos i\alpha}; \quad (2.30)$$

$$v = d\omega_2 \sqrt{p^2 + 1 - 2pi \cos i\alpha}, \quad (2.31)$$

где  $\omega_2 = \omega_1 \alpha$  – угловая скорость звена  $O_1M$ ;  $p = \eta/i$ .

Оценим изменение скорости исполнительного движения по эпициклоидальной траектории. Из уравнения (2.30) следует, что скорость принимает максимальное значение  $v_{max}$ , если  $\cos i\alpha = 1$ , и минимальное  $v_{min}$ , если  $\cos i\alpha = -1$ . Это имеет место при  $i\alpha = 2\pi k$  и  $i\alpha = (2k+1)\pi$  соответственно, где  $k$  – целое число.

Поэтому

$$v_{\max} = d\omega_2(p+1); \quad (2.32)$$

$$v_{\min} = d\omega_2(p-1). \quad (2.33)$$

Таким образом, скорость относительного движения в данном случае изменяется в диапазоне

$$R_v = v_{\max} / v_{\min} = (p+1)/(p-1), \quad (2.34)$$

или

$$R_v = (l+di)/(l-di) = (\eta+i)/(\eta-i). \quad (2.35)$$

В таком диапазоне изменяется скорость исполнительного движения лишь в том случае, если вся траектория используется для формирования направляющей линии заданной поверхности. Обычно для этого служит определенный участок циклоидальной кривой, что сужает фактический диапазон изменения скорости исполнительного движения.

В случае перемещения инструмента по гипоциклоидальной траектории (2.10) максимальное и минимальное значения скорости этого перемещения в соответствии с зависимостью (2.29) выражаются теми же зависимостями (2.32) и (2.33) соответственно. Однако максимальное значение скорости  $v_{\max}$  имеет место при  $\cos i\alpha = -1$  ( $i\alpha = (2k+1)\pi$ ), а минимальное  $v_{\min}$  – при  $\cos i\alpha = 1$  ( $i\alpha = 2k\pi$ ), где  $k$  – целое число. В этой связи диапазон изменения скорости  $R_v$  перемещения инструмента по гипоциклоидальной траектории также выражается зависимостью (2.35).

Длина участка циклоидальной кривой, используемого для формирования паза, при заданном отношении  $i$  угловых скоростей  $\omega_2$  и  $\omega_1$  зависит от значений угла  $\alpha$ , соответствующих его начальной и конечной точкам. Если  $\alpha_1$  ( $\alpha_2$ ) – значение угла  $\alpha$ , соответствующее начальной (конечной) точкам участка кривой, то скорости исполнительного движения  $v_1$  в начальной точке и  $v_2$  в конечной точке определяются зависимостями:

$$v_1 = d\omega_2 \sqrt{p^2 + 1 \pm 2pi \cos i\alpha_1}; \quad (2.36)$$

$$v_2 = d\omega_2 \sqrt{p^2 + 1 \pm 2pi \cos i\alpha_2}, \quad (2.37)$$

где знак «плюс» принимается при эпициклоидальной, а «минус» – при гипоциклоидальной траектории движения.

Абсолютное изменение скорости  $\Delta v = v_2 - v_1$  на длине обрабатываемого паза составит

$$\Delta v = d\omega_2(\sqrt{p^2 + 1 \pm 2p \cos i\alpha_2} - \sqrt{p^2 + 1 \pm 2p \cos i\alpha_1}). \quad (2.38)$$

На основании (2.32) и (2.33) максимальное изменение скорости исполнительного движения  $\Delta v_{\max} = v_{\max} - v_{\min}$  равно

$$\Delta v_{\max} = 2d\omega_2. \quad (2.39)$$

Нестабильность скорости движения более точно определяется ее относительным изменением  $\delta v = \Delta v / v_1$ . Для рассматриваемого случая изменение скорости  $\delta v$  относительно ее значения  $v_1$  в начальный момент обработки описывается зависимостью

$$\delta v = \sqrt{\frac{p^2 + 1 \pm 2p \cos i\alpha_2}{p^2 + 1 \pm 2p \cos i\alpha_1}} - 1. \quad (2.40)$$

Выражение (2.40) позволяет сравнивать рассматриваемые схемы по стабильности скорости исполнительного движения с помощью коэффициента относительной нестабильности

$$K_{\delta v} = \delta v_1 / \delta v_2, \quad (2.41)$$

который в соответствии с (2.40) выражается зависимостью

$$K_{\delta v} = \frac{\sqrt{\frac{p^2 + 1 + 2p \cos i\alpha_2}{p^2 + 1 + 2p \cos i\alpha_1}} - 1}{\sqrt{\frac{p^2 + 1 - 2p \cos i\alpha_2}{p^2 + 1 - 2p \cos i\alpha_1}} - 1}. \quad (2.42)$$

Анализ выражения (2.42) показывает, что при гипоциклоидальной траектории исполнительного движения относительное изменение его скорости меньше, чем в случае эпициклоидальной траектории. С этой точки зрения при синтезе схем приближенного формообразования пазов предпочтительны схемы обработки с использованием гипоциклоидальных траекторий движения.

Одним из основных путей оптимизации схем обработки резанием при криволинейной траектории исполнительного движения является стабилиза-

ция его скорости, что повышает производительность, стойкость инструмента и качество обработки. Для рассматриваемых схем формообразования в соответствии с (2.30) и (2.31) данная задача может быть решена только за счет управления угловой скоростью  $\omega_2$ . При этом значение передаточного отношения  $i$  должно сохраняться неизменным при любом текущем значении угла  $\alpha$ , так как от значения  $i$  зависит форма образуемой поверхности. Данное условие выполняется лишь при синхронном изменении угловых скоростей  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Как следует из указанных зависимостей, скорость исполнительного движения во всех точках формируемой линии постоянна, если

$$\omega_2 = \frac{v}{d\sqrt{p^2 + 1 \pm 2pi \cos i\alpha}}. \quad (2.43)$$

Следует отметить, что несоблюдение условия (2.43) с кинематической точки зрения не влияет на форму обработанной поверхности, поэтому оно может обеспечиваться как точно, так и приближенно, что упрощает практическую реализацию задачи стабилизации скорости исполнительного движения.

Из изложенного выше можно сделать следующие *выводы*:

1) траектории исполнительных движений при обработке поверхностей с производящими линиями циклоидального типа целесообразно представлять с помощью соответствующих механизмов-построителей в виде математических зависимостей координат точек профиля от кинематических и геометрических параметров, аналогичных параметрам схем их профилирования на металлорежущих станках;

2) управление формой образуемых линий достигается заданием кинематического коэффициента, а также абсолютных значений и соотношения геометрических параметров, определяющих положение производящей точки и центров взаимосвязанных вращательных движений, формирующих данную линию, что должно обеспечиваться при проектировании формообразующей системы станка;

3) при синтезе схем приближенного формообразования пазов, боковые стороны которых очерчены эпициклоидальными или гипоциклоидальными кривыми, предпочтительно использовать направляющие гипоциклоидального типа, как обеспечивающие изменение в более узком диапазоне скорости исполнительного движения;

4) стабилизация скорости движения формообразования по циклоидальной траектории обеспечивается синхронным изменением угловых скоростей при постоянном значении кинематического коэффициента.

## Глава 3

### ОБРАБОТКА ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ ПРИ СКРЕЩИВАЮЩИХСЯ ОСЯХ ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ

Обработка ТЗК возможна по различным кинематическим схемам, каждая из которых, исходя из ее достоинств и недостатков, имеет определенную область применения. Анализ этих схем позволяет выявить эффективные пути интенсификации при совершенствовании существующих и разработке новых технологий формообразования.

На практике ТЗК обычно обрабатывают на фрезерных станках дисковой фрезой, ось вращения которой скрещивается под прямым углом с осью заготовки. Перед обработкой каждого следующего паза заготовку поворачивают с помощью делительного устройства, обычно универсальной делительной головки, на угол между пазами. Дискретный характер движения деления отрицательно влияет на производительность и точность обработки ТЗК по шагу расположения пазов. В этой связи предпочтительны схемы обработки, основанные на непрерывном движении деления, совмещенном с движением формообразования, образованным согласованными вращательными движениями заготовки и инструмента. Формообразование прерывистых поверхностей на торцах деталей возможно при параллельных и скрещивающихся осях инструмента и заготовки.

В данной главе рассматривается второй случай для резцовых головок, дисковых и червячных инструментов.

#### 3.1. СХЕМЫ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ РЕЗЦОВЫМИ ГОЛОВКАМИ

Торцовый зубчатый контур образуется вследствие сообщения заготовке  $1$  (рис. 3.1) и резцовой головке  $2$  с равномерно расположенными по окружности режущими элементами согласованных вращательных движений  $B_1$  и  $B_2$  с частотами вращения  $n_1$  и  $n_2$  вокруг скрещивающихся под прямым углом осей  $L_1$  и  $L_2$ . Для обработки пазов на заданную глубину заготовке и инструменту сообщают также относительное перемещение  $P_3$  – движение врезания. Данная схема предназначена для обработки коротких пазов, так как их впадина профилируется по окружности, которая при небольшой длине паза и определенном радиусе резцовой головки с достаточной точностью приближается к прямой. Она позволяет обрабатывать тор-

цовые зубчатые контуры с четным и нечетным количеством пазов и является базовой для синтеза схем обработки инструментами с периферийным расположением производящих элементов.

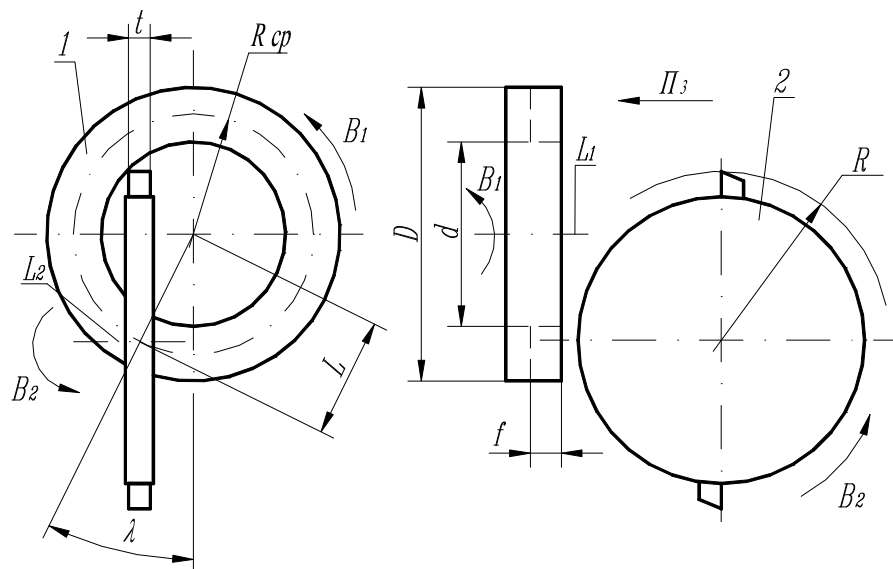


Рис. 3.1. Схема обработки торцового зубчатого контура резцовой головкой

Формообразование пазов с прямолинейными впадинами при непрерывном процессе деления возможно при сообщении инструменту подачи вдоль паза и связанного с ним поворота инструмента вокруг оси, перпендикулярного направлению подачи [15]. Данная схема может быть реализована на специальных станках с ЧПУ.

В рассматриваемой схеме параметр  $L = R_{CP}$ , где  $R_{CP}$  – средний радиус расположения обрабатываемых пазов (см. рис. 3.1).

Определим основные параметры инструмента и схемы обработки.

Резцовую головку устанавливают так, чтобы образовался угол  $\lambda$  между плоскостью ее вращения и плоскостью, проходящей через ось вращения заготовки и точку пересечения оси резцовой головки с плоскостью вращения ее режущих элементов. Угол  $\lambda$  задается исходя из того, чтобы обеспечить перемещение режущих зубьев инструмента вдоль обрабатываемых пазов:

$$\lambda = \arcsin \frac{V_1}{V_2}, \quad (3.1)$$

где  $V_1 = 2\pi R_{CP} n_1$  – скорость заготовки на окружности радиусом  $R_{CP}$ ;  $V_2 = 2\pi R n_2$  – окружная скорость инструмента;  $R$  – радиус резцовой головки.



Для обеспечения непрерывности процесса деления отношение  $i = n_2/n_1$  указанных частот задается по зависимости

$$i = \frac{m}{z}, \quad (3.2)$$

где  $m$  – число обрабатываемых пазов;  $z$  – число резцов головки.

Следовательно,

$$\lambda = \arcsin \frac{R_{CP}}{Ri}. \quad (3.3)$$

Рассмотрим относительное движение точки  $C$ , принадлежащей режущей кромке резца, в системе координат  $XOY$ , жестко связанной с деталью и ориентированной так, чтобы начало координат  $O$  совпадало с осью вращения заготовки (рис. 3.2).

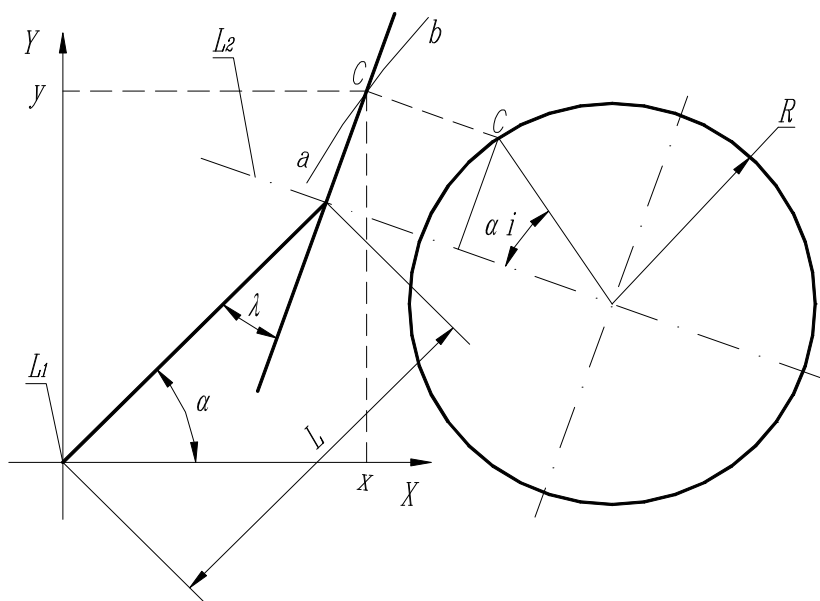


Рис. 3.2. Схема к математической модели формообразования пазов резцовой головкой

Траектория относительного движения не изменится, если детали и инструменту сообщить дополнительное вращение вокруг оси  $L_1$  в направлении, противоположном вращению детали. Если это дополнительное вращение совершать с угловой частотой  $n_1$ , деталь и система координат  $XOY$  будут неподвижны, ось  $L_2$  получит вращение вокруг  $L_1$  с частотой  $n_1$ , а точка  $C$ ,

вращаясь вокруг  $L_2$  с частотой  $n_2$ , в проекции на плоскость вращения заготовки будет перемещаться по линии  $ab$ . Форма последней определяется отношением скоростей вращательных движений и геометрическими параметрами схемы обработки. Согласно рисунку 3.2 линия  $ab$  описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} x = L \cos \alpha + R \sin(\alpha i) \cos(\alpha + \lambda), \\ y = L \sin \alpha + R \sin(\alpha i) \sin(\alpha + \lambda), \end{cases} \quad (3.4)$$

где  $\alpha$  – угол поворота заготовки или резцовой головки в относительном движении.

Определим радиус кривизны траектории, описываемой точкой, принадлежащей режущей кромке резца в месте пересечения ее со средним радиусом расположения пазов. Радиус кривизны  $R_\kappa$  линии, заданной параметрическим уравнением, определяется по известной зависимости:

$$R_\kappa = \frac{(x'^2 + y'^2)^{3/2}}{|x'y'' - x''y'|}. \quad (3.5)$$

С учетом (3.4)

$$x' = -L \sin \alpha + Ri \cos(\alpha i) \cos(\alpha + \lambda) - R \sin(\alpha i) \sin(\alpha + \lambda), \quad (3.6)$$

$$y' = L \cos \alpha + Ri \cos(\alpha i) \sin(\alpha + \lambda) + R \sin(\alpha i) \cos(\alpha + \lambda), \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} x'' = & -L \cos \alpha - Ri^2 \sin(\alpha i) \cos(\alpha + \lambda) - Ri \cos(\alpha i) \sin(\alpha + \lambda) - \\ & - Ri \cos(\alpha N) \sin(\alpha + \lambda) - R \sin(\alpha i) \cos(\alpha + \lambda), \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} y'' = & -L \sin \alpha - Ri^2 \sin(\alpha i) \sin(\alpha + \lambda) + Ri \cos(\alpha i) \cos(\alpha + \lambda) + \\ & + Ri \cos(\alpha i) \cos(\alpha + \lambda) - R \sin(\alpha i) \sin(\alpha + \lambda). \end{aligned} \quad (3.9)$$

Из уравнений (3.5)–(3.9)

$$R_\kappa = \frac{Ri \cos \lambda}{2}, \quad (3.10)$$

откуда следует, что профиль боковых граней формируемых пазов приближается к прямолинейному при увеличении радиуса резцовой головки и пе-

редаточного отношения  $i$ . Поэтому рассматриваемый способ предпочтителен для обработки деталей с большим количеством пазов ( $m > 30$ ), для которых отклонение траектории от прямолинейной на всей ширине формируемого венца не превышает допустимую величину.

Для выполнения в процессе формообразования операции деления, то есть перехода от обработки одного паза к другому, должно выполняться условие (3.2). Если число режущих элементов инструмента кратно количеству формируемых пазов, погрешность по угловому шагу пазов складывается из кинематической погрешности станка и неточности относительного расположения режущих элементов. В противном случае инструментальные погрешности переносятся на ширину обрабатываемых пазов, что должно учитываться при профилировании режущих элементов.

Для повышения точности обработки торцового зубчатого контура резцовую головку устанавливают относительно оси заготовки с тангенциальным  $h$  и радиальным  $L$  смещениями так, чтобы отклонения  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  (рис. 3.3, б) от прямолинейности обработанных боковых граней паза на внешнем и внутреннем диаметрах зубчатого контура были равны.

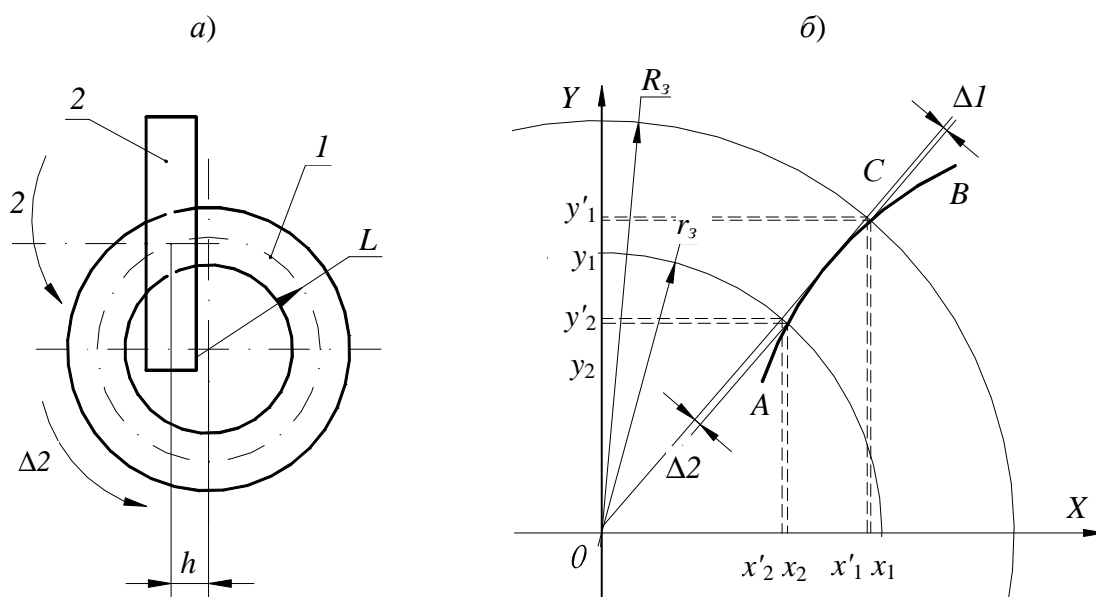


Рис. 3.3. Схема установки (а) резцовой головки при обработке торцового зубчатого контура и траектория ее режущей кромки (б)

Определим значение параметра установки  $L$  для выполнения этого условия. В процессе обработки точка, принадлежащая режущей кромке инструмента, описывает в относительном движении в проекции на плос-

кость, перпендикулярную оси заготовки, траекторию  $AB$  (см. рис. 3.3, б), определяемую системой уравнений:

$$\begin{cases} x = L \sin \alpha - R \sin(i\alpha) \sin(\alpha + \lambda), \\ y = L \cos \alpha - R \sin(i\alpha) \cos(\alpha + \lambda). \end{cases} \quad (3.11)$$

Данная траектория пересекается с внешним радиусом заготовки  $R_3$  с координатами  $x_1$  и  $y_1$  с внутренним радиусом заготовки  $r_3$  с координатами  $x_2$  и  $y_2$ , определяемыми из уравнений:

$$\begin{cases} x_1 = L \sin \alpha - R \sin(i\alpha) \sin(\alpha + \lambda), \\ y_1 = L \cos \alpha - R \sin(i\alpha) \cos(\alpha + \lambda), \\ x_1^2 + y_1^2 = R_3^2; \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\begin{cases} x_2 = L \sin \alpha - R \sin(i\alpha) \sin(\alpha + \lambda), \\ y_2 = L \cos \alpha - R \sin(i\alpha) \cos(\alpha + \lambda), \\ x_2^2 + y_2^2 = r_3^2. \end{cases}$$

Прямолинейная боковая грань задается лучом  $OC$ , пересекающимся с внешним и внутренним радиусами заготовки в точках с координатами  $x'_1$ ,  $y'_1$ , и  $x'_2$ ,  $y'_2$  соответственно.

Отклонения от прямолинейности боковых граней паза определяются выражениями:

$$\Delta_1 = \sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (y_1 - y'_1)^2}, \quad (3.13)$$

$$\Delta_2 = \sqrt{(x_2 - x'_2)^2 + (y_2 - y'_2)^2}.$$

Как следует из уравнения (3.12), траектория относительного движения точки, принадлежащей режущей кромке, проходит через точку с координатами  $x = 0$ ,  $y = L$ , которая принадлежит одному из семейства лучей  $OC$ . Тогда

$$\Delta_1 = \sqrt{(x_1)^2 + (y_1 - R_3)^2}, \quad (3.14)$$

$$\Delta_2 = \sqrt{(x_2)^2 + (y_2 - r_3)^2}.$$

Исходя из условия равенства отклонений от прямолинейности боковых граней паза представленные выражения можно привести к виду:

$$x_1^2 + (y_1 - R_3)^2 = x_2^2 + (y_2 - r_3)^2. \quad (3.15)$$

На основании (3.12) и (3.15) имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} x_1 = L \sin \alpha - R \sin(i\alpha) \sin(\alpha + \lambda), \\ y_1 = L \cos \alpha - R \sin(i\alpha) \cos(\alpha + \lambda), \\ x_1^2 + y_1^2 = R_3^2; \\ x_1^2 + (y_1 - R_3)^2 = x_2^2 + (y_2 - r_3)^2, \\ x_2 = L \sin \alpha - R \sin(i\alpha) \sin(\alpha + \lambda), \\ y_2 = L \cos \alpha - R \sin(i\alpha) \cos(\alpha + \lambda), \\ x_2^2 + y_2^2 = r_3^2, \end{cases} \quad (3.16)$$

решение которой определяет значение искомого параметра настройки  $L$ .

Производительность формообразования  $Q$  для рассматриваемой схемы обработки выражается зависимостью

$$Q = \frac{fS n_2}{i}, \quad (3.17)$$

где  $f$  – глубина обрабатываемых пазов;  $S$  – подача за один оборот заготовки.

За один оборот заготовки во всех пазах снимается припуск, соответствующий подаче на зуб  $S_z$ , то есть

$$S = S_z. \quad (3.18)$$

Скорость резания  $V$  при обработке по рассматриваемой схеме формообразования равна геометрической сумме окружных скоростей инструмента и заготовки и определяется уравнением

$$V = 2\pi n_2 \sqrt{R^2 - \left(\frac{R_{CP}}{i}\right)^2}. \quad (3.19)$$

Из выражения (3.19) следует зависимость для определения частоты вращения инструмента при заданной скорости резания

$$n_2 = \frac{V}{2\pi\sqrt{R^2 - \left(\frac{R_{CP}}{i}\right)^2}}. \quad (3.20)$$

Тогда в соответствии с уравнениями (3.2), (3.17), (3.18) и (3.20)

$$Q = fS_z \frac{V_z}{2\pi m \sqrt{R^2 - \left(\frac{R_{CPz}}{m}\right)^2}}. \quad (3.21)$$

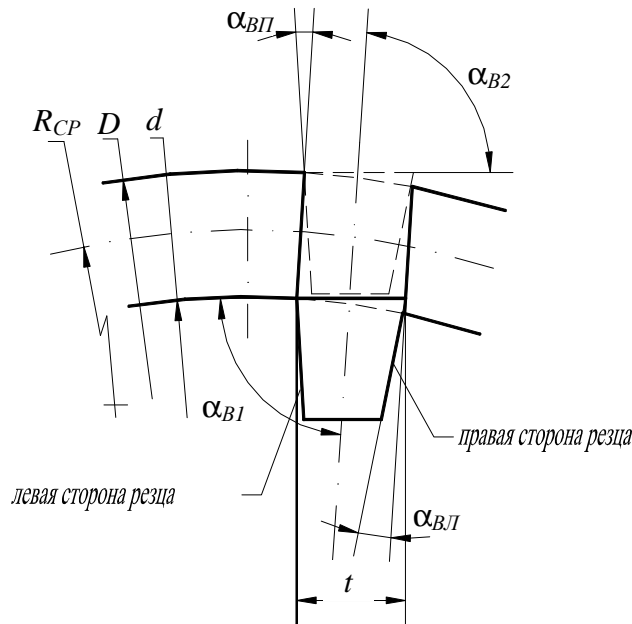


Рис. 3.4. Схема для определения заднего угла режущих элементов

Из (3.21) следует, что при заданных скоростях резания и подачи производительность возрастает с увеличением числа зубьев резцовой головки.

В процессе обработки непрерывно изменяется относительное положение резца и боковых граней паза, вследствие чего его задние вспомогательные углы переменны. Необходимо отметить, что при установке режущей кромки перпендикулярно к плоскости вращения инструмента значения этих углов для левой и правой сторон режущего элемента (рис. 3.4) неодинаковы и изменяются в пределах  $\Delta$ .

Для левой стороны резца:

$$\Delta_L = \alpha_{B2} - \alpha_{B1} = \arctg \frac{2\left(\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)}{\sqrt{D^2 - \left(\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)^2}} - \arctg \frac{2\left(\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)}{\sqrt{d^2 - \left(\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)^2}}. \quad (3.22)$$

Для правой стороны реза:

$$\Delta_{II} = \operatorname{arctg} \frac{2\left(-\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)}{\sqrt{d^2 - \left(-\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{2\left(-\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)}{\sqrt{D^2 - \left(-\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)^2}}. \quad (3.23)$$

Значения задних вспомогательных углов должны исключать возможность затирания.

Для левой стороны реза:

$$\alpha_{ВЛ} \geq 90 - \operatorname{arctg} \frac{2\left(\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)}{\sqrt{d^2 - \left(\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)^2}} + \alpha_3, \quad (3.24)$$

где  $\alpha_3$  – задний угол, необходимый из условий резания.

Для правой стороны реза:

$$\alpha_{ВП} \geq 90 - \operatorname{arctg} \frac{2\left(-\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)}{\sqrt{D^2 - \left(-\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)^2}} + \alpha_3. \quad (3.25)$$

### 3.2. СХЕМЫ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ ДИСКОВЫМИ И ЧЕРВЯЧНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

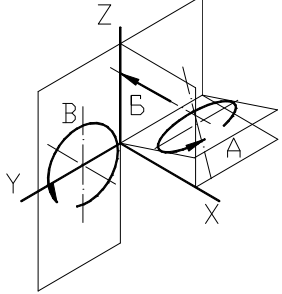
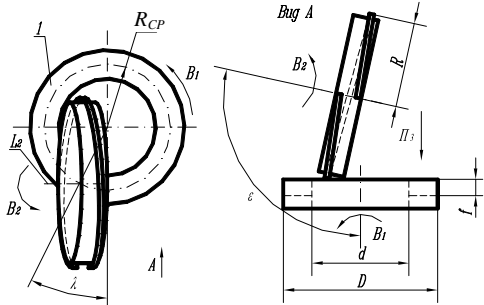
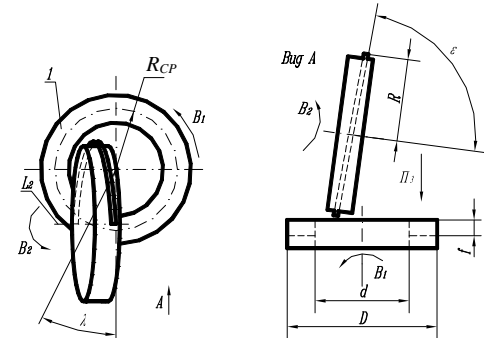
Для предварительной обработки впадин между зубьями колес применяется производительный метод кругового протягивания, реализуемый с помощью дискового инструмента в виде круговой протяжки, режущие зубья которой расположены в определенном угловом секторе (табл. 3.1, схема 1.1) [64]. В процессе обработки впадины инструменту 2 сообщают непрерывное вращательное движение  $B_2$ , а заготовке 1 периодически дискретное движение  $B_1$  – поворот на угол между соседними впадинами (движение деления). Это движение осуществляется после обработки впадины в то время, когда заготовка находится по отношению к инструменту в секторе, не имеющем режущих зубьев. Формирование паза по глубине осуществляется за счет конструкции инструмента – расположения режущих зубьев на различных радиусах.

Таблица 3.1

Кинематические схемы обработки пазов на торцах деталей  
дисковыми и червячными инструментами

№	Кинематические схемы резания	Схемы обработки	
1		1.1	
2		2.1 2.2 2.3	



№	Кинематические схемы резания	Схемы обработки	
3		3.1	
		3.2	

При необходимости инструменту может сообщаться также дополнительное поступательное движение  $\Pi_3$ . Недостатком данной схемы является дискретность процесса деления, что является источником накопленной погрешности шага расположения пазов.

Кинематическая схема обработки (см. табл. 3.1, схема 2), относящаяся к седьмой группе по классификации [5], основана на совмещении движений деления и формообразования. Тем самым исключается недостаток применяемых схем обработки дисковыми инструментами – дискретность процесса деления. Эта схема позволяет обрабатывать пазы инструментом червячно-улиточного типа (см. табл. 3.1, схема 2.1), которому, как и заготовке, сообщают согласованные вращательные движения соответственно  $B_2$  и  $B_1$  с частотами  $n_2$  и  $n_1$  вокруг скрещивающихся под прямым углом осей.

Инструмент устанавливают так, чтобы образовался определенный угол  $\lambda$  между плоскостью вращения последнего режущего зуба в витке и плоскостью, проходящей через ось вращения заготовки перпендикулярно оси вращения инструмента, а отношение частот  $n_2$  и  $n_1$  соответственно инструмента и заготовки задают равным числу обрабатываемых пазов  $m$ .

$$i = \frac{n_2}{n_1} = m. \quad (3.26)$$

Зависимость (3.26) справедлива и для всех других приведенных в таблице 3.1 схем обработки ТЗК червячными и секторными инструментами.

Рассматриваемая схема формообразования позволяет повысить производительность обработки и обеспечивает точность, определяемую точностью инструмента и кинематики станка. Вместе с тем этой схеме присущи неуниверсальность инструмента, сложность его изготовления и переточки, что ограничивает эффективную область ее применения массовым производством.

Это частично исключается в схеме формообразования пазов секторным инструментом, наклоненным к плоскости его вращения под определенным углом  $\varepsilon$  (см. табл. 3.1, схема 2.3) [78]. Благодаря такой установке инструмента его режущая часть может рассматриваться как часть витка червячного инструмента. Основное отличие и преимущество данной схемы, в сравнении с предыдущей, – простота конструкции инструмента, у которого расположение режущих зубьев на различных радиусах достигается эксцентричной установкой режущего сектора, а изменение шага – его наклоном к оси вращения. Остальные параметры настройки системы сохраняются с учетом указанных различий.

Кроме того, при изменении геометрии обрабатываемого изделия представляется возможным изменить наклон режущего сектора в соответствии с шагом расположения формируемых пазов, что обеспечивает расширение технологических возможностей инструмента.

Паз по ширине при обработке инструментом червячно-улиточного типа и наклонным секторным инструментом формируется методом копирования, поэтому ширина паза однозначно определяется толщиной режущей части. Идея использовать сектор из нескольких режущих зубьев реализована также в схеме обработки, при которой он расположен перпендикулярно оси вращения (см. табл. 3.1, схема 2.2). В этом случае используется та же кинематическая схема обработки, но паз по ширине формируется не методом копирования, а сочетанием методов копирования и следа, так как ширина паза обеспечивается несколькими последовательными резами, число которых равно числу режущих зубьев.

Согласно этой схеме обработки заготовке и инструменту сообщают согласованные вращательные движения  $B_1$  и  $B_2$  вокруг скрещивающихся под прямым углом осей и относительное движение подачи  $P_3$  вдоль оси вращения заготовки. Размер сектора и другие параметры настройки обрабатывающей системы определяются геометрией формируемого зубчатого контура.

Данная схема позволяет формировать торцовые зубчатые контуры с широкими пазами типа муфт, крыльчаток и т.п.

Повышение универсальности схемы обработки достигается за счет обеспечения возможности изменения положения плоскости вращения инструмента относительно заготовки (см. табл. 3.1, схема 3). В частности, при обработке червячным инструментом (схема 3.1) торцовых зубчатых контуров заготовке и инструменту сообщают согласованные вращательные движения  $B_1$  и  $B_2$  соответственно с частотами  $n_1$  и  $n_2$  вокруг скрещивающихся под углом  $\varepsilon$  осей. При этом инструмент устанавливают так, чтобы образовался определенный угол  $\lambda$  между плоскостью вращения формообразующих элементов и плоскостью, проходящей через ось вращения заготовки и точку пересечения оси вращения инструмента с плоскостью вращения его режущих элементов. Достоинством данной схемы является более простое по сравнению с обработкой пазов спиральным червячным инструментом относительное расположение режущих элементов за счет установки инструмента под углом  $\varepsilon$  к оси вращения заготовки. Для компенсации наклона здесь необходима соответствующая ориентация режущих элементов относительно корпуса инструмента. Вследствие скрещивания осей под углом  $\varepsilon$  также изменяется характеристический образ инструмента, что должно учитываться при определении его геометрических параметров. Однако изменение угла наклона инструмента позволяет частично компенсировать погрешности его изготовления по шагу расположения режущих элементов.

Отсутствие стандартов на конструктивные параметры торцовых зубчатых контуров не позволяет унифицировать геометрию червячных инструментов, поэтому предпочтительна схема обработки с более простым по конструкции секторным инструментом с возможностью коррекции его шага.

Этому условию отвечает схема обработки секторным инструментом с коррекцией его положения (см. табл. 3.1, схема 3.2).

Согласно схеме заготовке и инструменту сообщают согласованные вращательные движения  $B_1$  и  $B_2$  вокруг скрещивающихся осей и относительное движение подачи  $P_3$  вдоль оси вращения заготовки, режущие элементы инструмента располагают по окружности в угловом секторе, не превышающем половины дуги окружности, инструмент устанавливают с эксцентриситетом относительно геометрической оси и под углом  $\rho$  к оси вращения. Величина угла  $\rho$  и параметры настройки системы определяются геометрией торцового зубчатого контура.

В результате проведенного выше анализа кинематических схем формообразования пазов на торцах деталей установлены основные предъявляемые к ним исходя из направлений интенсификации требования – повышение производительности и точности обработки. В общем случае для универсальных схем обработки это достигается за счет усложнения кинематики формообразования и, соответственно, обрабатывающей системы станка, что выражается в увеличении числа движений, их взаимосвязей и степеней свободы по относительной ориентации. Реализация конкретных схем обработки связана с необходимостью их исследования, математического и физического моделирования.

### **3.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ ИНСТРУМЕНТАМИ ЧЕРВЯЧНОГО И СЕКТОРНОГО ТИПОВ**

Возможности анализа процессов формообразования значительно расширяются при математическом моделировании с применением вычислительной техники. Для исключения ошибок при разработке математической модели необходимо:

- определить задачи, решаемые с помощью модели;
- определить входные, выходные и управляемые параметры рассматриваемого процесса;
- выявить взаимное влияние существенных признаков;
- определить составляющие компоненты модели и их достаточность;
- обеспечить возможность использования вычислительной техники;
- предусмотреть возможность модификации модели с учетом дополнительных условий и критериев эффективности.

К основным задачам, решаемым с помощью математического моделирования схемы формообразования торцовых зубчатых контуров, относятся определение:

- геометрических параметров формируемых поверхностей;
- технологических возможностей схемы формообразования;
- степени влияния и взаимодействия отдельных параметров схемы формообразования на показатели эффективности;
- путей интенсификации процесса обработки.

При анализе моделей формообразования рассматриваются два основных объекта: заготовка и инструмент. Дополнительные объекты могут

вводиться в модель как уточняющие. Выбор объектов математической модели определяет входные, выходные и управляющие параметры. Выходные параметры обусловлены целью обработки – формирование поверхности с заданными геометрией и точностью. Управляемыми параметрами являются геометрические характеристики инструмента, наладочные параметры относительной установки и перемещения инструмента и заготовки.

Взаимное влияние указанных параметров, универсальность (гибкость) моделей, возможности их модификации будут рассмотрены ниже при анализе математических моделей конкретных схем формообразования.

### 3.3.1. Обработка торцовых зубчатых контуров червячными инструментами

Определим параметры схемы при обработке ТЗК червячным одновитковым инструментом со спиральным расположением режущих элементов (см. табл. 3.1, схема 2.1). По данной схеме одновитковый инструмент устанавливается так, чтобы образовался угол  $\lambda$  между плоскостью вращения последнего режущего элемента в витке и плоскостью, проходящей через ось вращения заготовки и точку пересечения оси инструмента и плоскости вращения его последнего режущего элемента, величина которого

$$\lambda = \arcsin \frac{R_{CP}}{R_k m}, \quad (3.27)$$

где  $R_{CP}$  – средний радиус расположения пазов;  $R_k$  – радиус, соответствующий последнему режущему элементу в витке;  $m$  – число формируемых пазов.

При необходимости, когда срезаемый припуск не удается распределить между режущими элементами витка, инструменту сообщается движение подачи  $P_3$ .

Семейство линий, описываемых точками  $C_i$ , принадлежащими различным режущим элементам спирального инструмента (рис. 3.5), в проекции на плоскость вращения заготовки определяется системой уравнений:

$$\begin{cases} x_i = R_{CP} \cos \alpha + k_i \sin(\alpha + \lambda) + R_i \sin(\alpha m + \beta_i) \cos(\alpha + \lambda), \\ y_i = R_{CP} \sin \alpha - k_i \cos(\alpha + \lambda) + R_i \sin(\alpha m + \beta_i) \sin(\alpha + \lambda), \end{cases} \quad (3.28)$$

где  $k_i$  – величина, определяющая относительное расположение режущих элементов вдоль оси вращения инструмента, когда все относительные от-

счеты производятся от последнего резца витка, для которого  $k = 0$ ;  $\beta_i$  – величина, определяющая угловое относительное расположение режущих элементов;  $R_i$  – радиус вершины  $i$ -го режущего элемента.

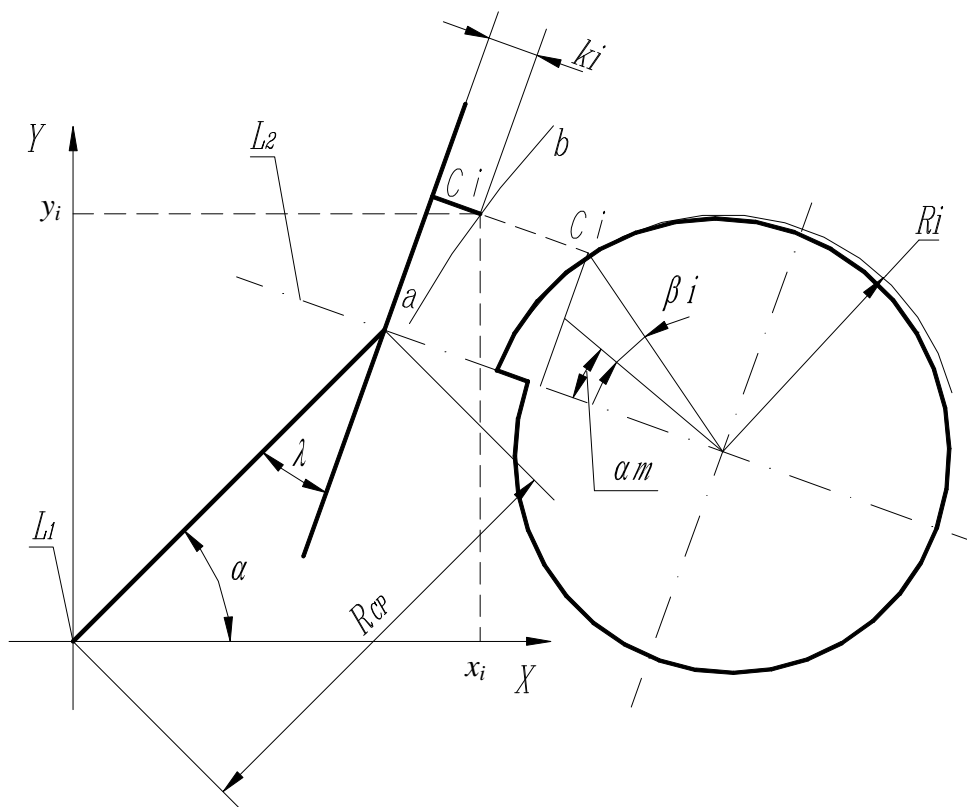


Рис. 3.5. Схема к математической модели формообразования торцовых зубчатых контуров одновитковым спиральным инструментом

При равномерном распределении припуска между режущими элементами выполняется условие:

$$R_{i+1} = R_i + S_z, \quad (3.29)$$

где  $S_z$  – подача на зуб в спиральном инструменте.

Если  $z$  резцов равномерно расположены по всему периметру сектора спирали, определяемого углом  $\chi$ , реализуется следующее условие:

$$\beta_{i+1} = \beta_i - \frac{\chi}{z}. \quad (3.30)$$

Определим геометрические параметры винтовой линии, на которой должны располагаться режущие элементы одновиткового спираль-

ного инструмента, чтобы обеспечить их перемещение вдоль обрабатываемых пазов.

Для обработки пазов торцового зубчатого контура с угловым шагом  $\delta$  спираль, на которой расположены режущие элементы, описывается зависимостью

$$k_i = R_{CP} \cos \lambda \sin \left( \lambda + \frac{\beta_i \delta}{2\pi} \right) - R_{CP} \sin \lambda. \quad (3.31)$$

Уравнение винтовой линии с учетом того, что ее шаг выражается формулой

$$T = R_{CP} \cos \lambda \sin(\lambda + \delta) - R_{CP} \sin \lambda, \quad (3.32)$$

имеет вид

$$k_i = \frac{(\cos \lambda \sin(\lambda + \delta) - \sin \lambda) R_{CP} \beta_i}{2\pi}. \quad (3.33)$$

При расположении режущих элементов одновиткового инструмента по винтовой линии отклонение величины относительного расположения режущих элементов вдоль оси вращения инструмента по отношению к номинальному и с учетом уравнений (3.31) и (3.33) составит

$$\Delta = R_{CP} \cos \lambda \left( \frac{\beta_i \sin(\lambda + \delta)}{2\pi} - \sin \left( \lambda + \frac{\beta_i \delta}{2\pi} \right) \right) - R_{CP} \sin \lambda \left( \frac{\beta_i}{2\pi} - 1 \right). \quad (3.34)$$

Из (3.34) следует, что уравнение винтовой линии в качестве закона расположения режущих элементов на исходной инструментальной поверхности может быть использовано только при формообразовании торцовых зубчатых контуров деталей большого диаметра с большим числом пазов.

Уравнение (3.28) является простейшей математической моделью рассмотренной схемы формообразования. В общем случае согласно поставленной задаче определения геометрических характеристик формируемых поверхностей необходимо ввести в модель параметры формируемой поверхности по оси  $Z$ , что определяется относительным движением подачи вдоль оси вращения заготовки.

Тогда математическая модель примет вид

$$\begin{cases} x_i = R_{CP} \cos \alpha + k_i \sin(\alpha + \lambda) + R_i \sin(\alpha m + \beta_i) \cos(\alpha + \lambda), \\ y_i = R_{CP} \sin \alpha - k_i \cos(\alpha + \lambda) + R_i \sin(\alpha m + \beta_i) \sin(\alpha + \lambda), \\ z_i = R_l (1 - \cos(\alpha m + \beta_i)) - \frac{(\alpha m + \beta_i) \cdot S}{2\pi}, \end{cases} \quad (3.35)$$

где  $S$  – подача на оборот инструмента.

Форма режущей кромки инструмента является постоянным параметром, поэтому след ее движения можно учесть путем геометрического построения его профиля относительно базовой точки, траектория которой описывается уравнением (3.28). При этом необходимо учитывать неизменность ориентации режущей кромки относительно корпуса инструмента.

Схема 3.1 (см. табл. 3.1) реализуется более простым по конструкции инструментом, поскольку не требуется спиральное расположение режущих элементов. Инструмент устанавливают так, чтобы в плоскости вращения заготовки образовался угол  $\lambda$  между плоскостью вращения формообразующих элементов и плоскостью, проходящей через ось вращения заготовки и точку пересечения оси вращения инструмента с плоскостью вращения его режущих элементов. Значение угла  $\lambda$  в данном случае определяется по зависимости

$$\lambda = \arcsin \frac{R_{CP}}{Rm}, \quad (3.36)$$

где  $R_{CP}$  – средний радиус расположения пазов;  $R$  – радиус инструмента.

Угол скрещивания осей  $\varepsilon$  рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{f}{R_{CP} \cos \lambda \sin(\lambda + \delta) - R_{CP} \sin \lambda}. \quad (3.37)$$

Здесь  $f$  – глубина формируемых пазов;  $\delta$  – угловой шаг расположения пазов.

Семейство линий, описываемых точками, принадлежащими различным режущим элементам червячного инструмента, согласно рисунку 3.6 определяется системой уравнений:

$$k_i = \frac{R_{CP} \cos \lambda \sin \left( \lambda + \frac{\beta_i \delta}{2\pi} \right) - R_{CP} \sin \lambda}{\sin \varepsilon}, \quad (3.38)$$





Анализ математических моделей рассмотренных схем формообразования показывает, что однозначная зависимость геометрии инструмента от параметров изделия ограничивает область рационального применения червячных инструментов крупносерийным и массовым производством.

### 3.3.2. Обработка торцовых зубчатых контуров секторными инструментами

Как показано выше, обработка ТЗК секторными инструментами возможна по схемам, различающимся расположением режущего сектора относительно оси вращения: при обработке по схеме 2.2 (см. табл. 3.1) он расположен перпендикулярно этой оси, при обработке по схеме 3.2 – наклонно. Рассмотрим эти схемы.

**Обработка перпендикулярно расположенным секторным инструментом.** В этом случае секторный инструмент устанавливают так, чтобы значение угла  $\lambda$  между плоскостью вращения инструмента и плоскостью, проходящей через ось вращения заготовки и точку пересечения оси инструмента с плоскостью вращения его режущих элементов, удовлетворяло условию:

$$\lambda = \arcsin \frac{Lp}{m}, \quad (3.42)$$

где  $L$  – расстояние между осями инструмента и заготовки;  $p$  – число пропускаемых пазов в процессе формообразования;  $m$  – число формируемых пазов.

Угловая величина сектора, в котором должны быть расположены режущие элементы, определяется по формуле

$$\gamma = \frac{\varphi m}{p}, \quad (3.43)$$

где  $\varphi$  – ширина паза по наружному диаметру заготовки.

Для формирования пазов по глубине инструменту сообщают прямолинейное перемещение  $l_3$  вдоль оси вращения заготовки.

Семейство линий, описываемых точками, принадлежащими различным режущим элементам секторного инструмента, согласно рисунку 3.7 определяется системой уравнений:

$$\begin{cases} x_i = L \cos \alpha + R \sin(\alpha m + \beta_i) \cos(\alpha + \lambda), \\ y_i = L \sin \alpha + R \sin(\alpha m + \beta_i) \sin(\alpha + \lambda). \end{cases} \quad (3.44)$$

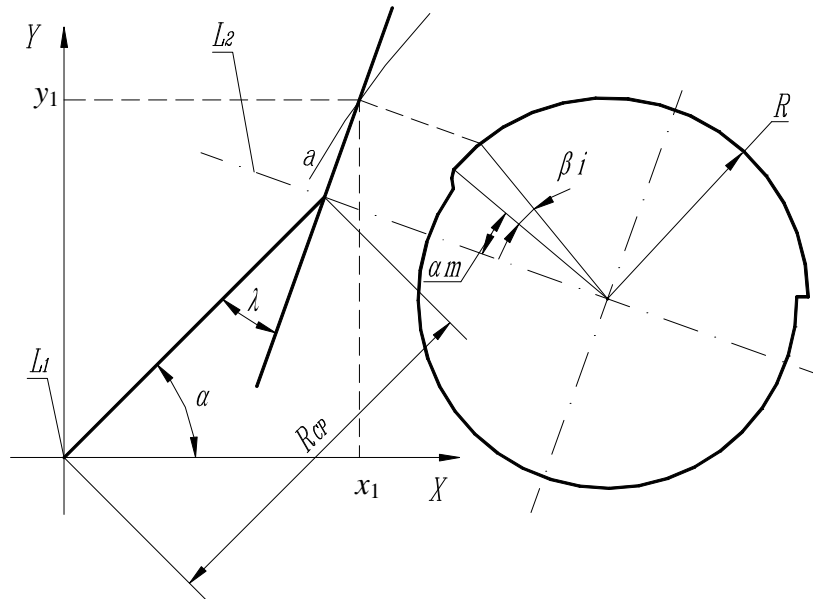


Рис. 3.7. Схема к математической модели формообразования торцовых зубчатых контуров секторным инструментом

Количество  $z$  режущих элементов определяется из неравенства

$$z \geq \frac{\varphi}{2 \arcsin\left(\frac{t}{D}\right)}, \quad (3.45)$$

где  $t$  – ширина реза;  $D$  – наружный диаметр заготовки.

Математическая модель рассматриваемой схемы формообразования имеет вид

$$\begin{cases} x_i = L \cos \alpha + R \sin(\alpha m + \beta_i) \cos(\alpha + \lambda), \\ y_i = L \sin \alpha + R \sin(\alpha m + \beta_i) \sin(\alpha + \lambda), \\ z_i = R(1 - \cos(\alpha m + \beta_i)) - \frac{(\alpha m + \beta_i)S}{2\pi}. \end{cases} \quad (3.46)$$

Определим радиус кривизны траектории, описываемой точкой, принадлежащей режущей кромке реза, в месте пересечения ее со средним радиусом расположения пазов.

С учетом того, что по данной схеме боковые грани формируются крайними режущими элементами режущего сектора, а также ввиду идентичности траекторий по глубине, нет необходимости рассматривать их

множество в режущем секторе. Поэтому для анализа примем упрощенную математическую модель:

$$\begin{cases} x = L \cos \alpha + R \sin(\alpha m) \cos(\alpha + \lambda), \\ y = L \sin \alpha + R \sin(\alpha m) \sin(\alpha + \lambda). \end{cases} \quad (3.47)$$

На основании (3.5) и (3.47) в данном случае

$$R_k = \frac{Rm \cos \lambda}{2}. \quad (3.48)$$

Выражение (3.48) ввиду идентичности участков траектории движения режущей кромки в области пересечения ее со средним радиусом положения пазов характеризует радиус кривизны для всех боковых граней пазов обработанной детали. Откуда видно, что профиль боковых граней формируемых пазов приближается к прямолинейному при увеличении радиуса резцовой головки и числа пазов  $m$  при условии, что они формируются последовательно без пропуска пазов. Зависимость (3.48) позволяет определить геометрические характеристики инструмента в соответствии с требуемой геометрией боковых граней пазов.

**Обработка наклоненным секторным инструментом.** В этом случае для формирования торцового зубчатого контура инструмент устанавливают под углом  $\rho$  к оси его вращения и с эксцентриситетом  $e$  относительно этой оси (рис. 3.8).

Для обеспечения требуемой ориентации профилирующего резца угол  $\epsilon$  скрещивания осей инструмента и заготовки устанавливают равным углу  $\rho$  наклона инструмента. Определим параметры  $e$  и  $\rho$ .

В процессе обработки заготовке 1 (рис. 3.8, а, б) и инструменту 2 сообщают согласованные вращательные движения  $B_1$  и  $B_2$ . Плоскость вращения последнего режущего элемента, обеспечивающего профилирование паза, устанавливают на определенном расстоянии  $h$  от оси вращения заготовки, а расстояние между осями инструмента и заготовки задают равным  $H$ .

При обработке радиально расположенных пазов

$$h = R_{CP} \sin \lambda; \quad (3.49)$$

$$H = R_{CP} \cos \lambda, \quad (3.50)$$

где  $R_{CP}$  – средний радиус расположения пазов;  $\lambda$  – угол установки инструмента относительно заготовки.

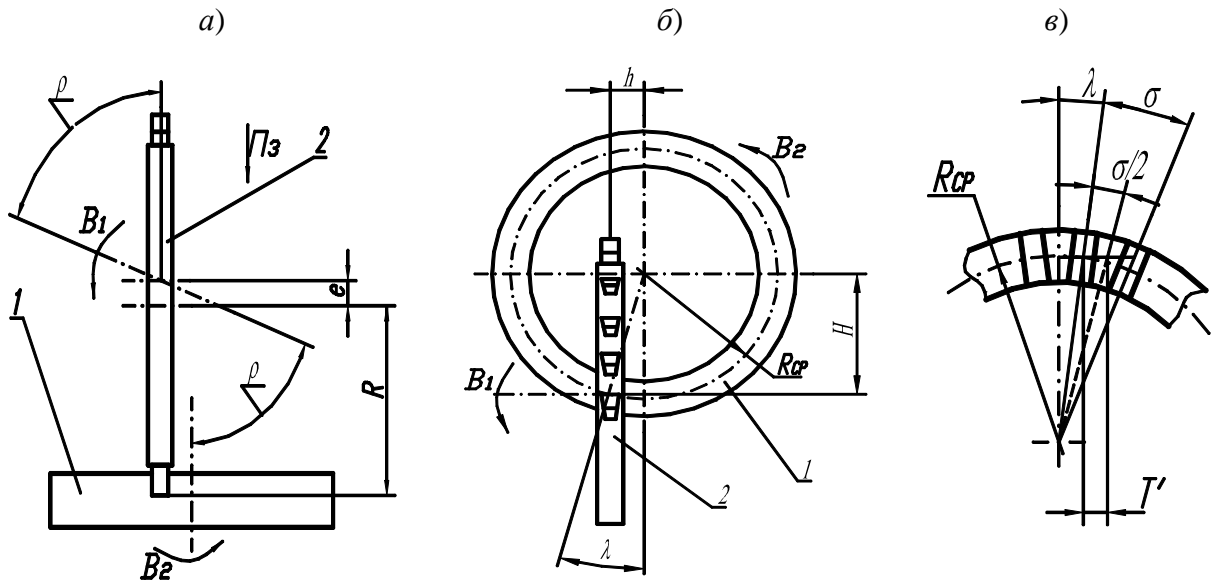


Рис. 3.8. Схема обработки торцевого зубчатого контура наклонным секторным инструментом:  
*a, б* – расположение режущего инструмента 2 относительно заготовки 1;  
*в* – параметры пазов зубчатого контура

Так как последний режущий элемент сектора является профилирующим, то для него необходимо обеспечить направление относительной скорости резания вдоль паза. Поэтому значение угла  $\lambda$  в рассматриваемом случае составляет

$$\lambda = \arcsin \frac{R_{CP}}{m(R+e)\sin\rho}, \quad (3.51)$$

где  $m$  – число формируемых пазов;  $e$  – эксцентриситет установки инструмента;  $R$  – радиус инструмента.

Определим эксцентриситет  $e$  установки режущего сектора инструмента. Согласно рисунку 3.8,  $в$  половина линейного шага  $T'$  расположения пазов от точки контакта последнего режущего элемента с зубчатым сектором определяется из равенства

$$T' = R_{CP} \left( \cos \lambda \operatorname{tg} \left( \lambda + \frac{\delta}{2} \right) - \sin \lambda \right), \quad (3.52)$$

где  $\delta$  – угловой шаг расположения пазов.

Расстояние между положениями первого и последнего режущих элементов сектора в проекции на плоскость, перпендикулярной оси вращения заготовки, определяется по формуле

$$T' = (R - e) \sin(2\rho). \quad (3.53)$$

На основании (3.52) и (3.53)

$$R_{CP} \left( \cos \lambda \operatorname{tg} \left( \lambda + \frac{\delta}{2} \right) - \sin \lambda \right) = (R - e) \sin(2\rho), \quad (3.54)$$

откуда следует зависимость для определения угла наклона инструмента

$$\rho = \frac{1}{2} \arcsin \frac{R_{CP} \left( \cos \lambda \operatorname{tg} \left( \lambda + \frac{\delta}{2} \right) - \sin \lambda \right)}{(R - e)}. \quad (3.55)$$

Для обеспечения заданной глубины пазов режущие элементы получают поступательное перемещение  $l_3$  вдоль оси вращения заготовки (движение врезания) на расстояние  $S$  за один оборот заготовки.

Из рисунка 3.8, *a* следует, что разность высот  $F$  между первым и последним режущим элементом секторного инструмента в нижнем их положении составляет

$$F = R + e + (R - e) \cos(2\rho). \quad (3.56)$$

Формирование паза на полную глубину возможно, если

$$F \geq S_o, \quad (3.57)$$

где  $S_o$  – величина подачи инструмента за один оборот заготовки.

Тогда

$$S_o \leq R + e + (R - e) \cos(2\rho), \quad (3.58)$$

откуда

$$e = \frac{S_o - R - R \cos(2\rho)}{1 - \cos(2\rho)}. \quad (3.59)$$



Величина  $k_i$ , определяющая относительное расположение режущих элементов вдоль оси вращения инструмента, равняется

$$k_i = \sqrt{(R_i \cos \beta_i + R)^2 - \left( (R_i \cos \beta_i + R) \cos \left( \frac{\pi}{2} - \rho \right) \right)^2}. \quad (3.62)$$

### 3.3.3. Анализ технологических возможностей схем обработки на основе математических моделей

Для анализа технологических возможностей схем обработки торцовых зубчатых контуров различными инструментами на основе разработанных математических моделей удобно использовать вычислительную технику.

На рисунке 3.10 представлен алгоритм решения этой задачи, по которому, исходя из параметров инструмента и детали, производится расчет параметров настройки системы и координат траектории точки, принадлежащей режущей кромке.

Результаты расчета вводят в массив данных. Приращение  $\Delta\alpha$  угла поворота  $\alpha$  заготовки определяет точность расчета траектории.

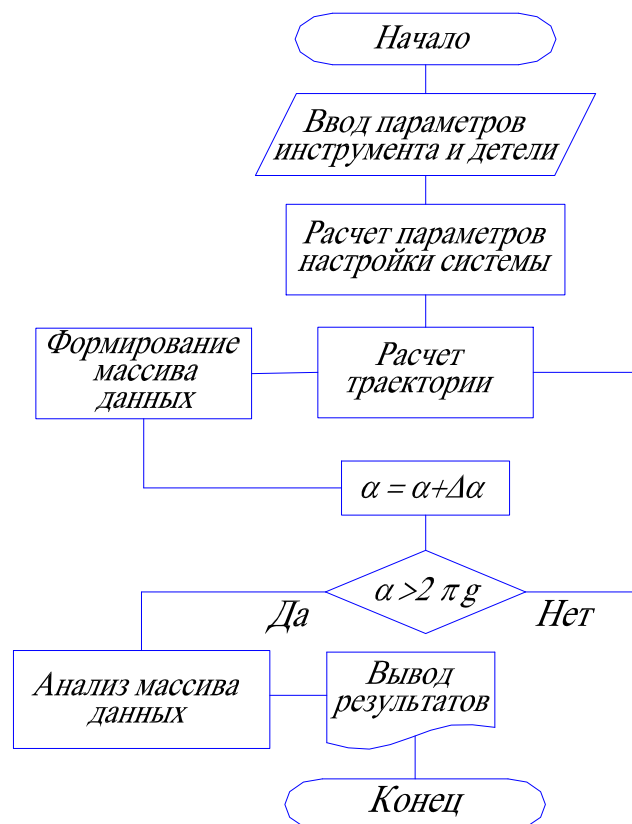


Рис. 3.10. Блок-схема алгоритма анализа математической модели



На основе приведенного алгоритма разработана упрощенная программа для оценки технологических возможностей схемы формообразования секторным инструментом.

```

SCREEN 12
CLS
REM "Ввод параметров инструмента и заготовки"
L = 43.75
R = 60
N = 8
R2 = 52.5
R3 = 35
REM "Расчет параметров настройки системы"
R4 = (R2 + R3) / 2
G = ATN((R4 / (R * N) / (1 - (R4 / (R * N)) ^ 2) ^ .5))
CIRCLE (350, 150), R2, 4
REM "Расчет и вывод траектории"
FOR A = 0 TO 10 STEP .003
X3 = L * SIN(A) - R * SIN(A * N) * SIN(A + G)
Y3 = L * COS(A) - R * SIN(A * N) * COS(A + G)
PSET (X3 + 350, Y3 + 150)
NEXT A

```

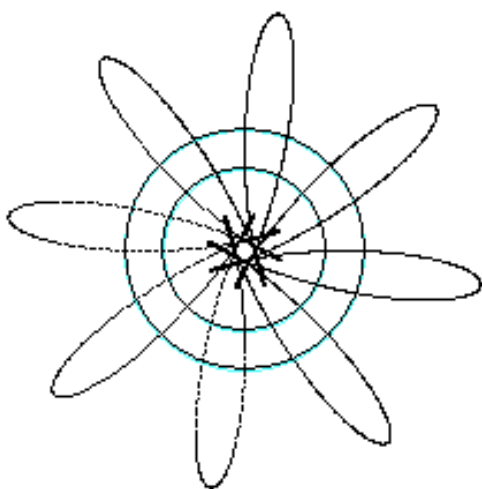


Рис. 3.11. Компьютерная модель траектории исполнительного движения при формировании торцевого зубчатого контура

Результатом расчета по данной программе является траектория движения режущей кромки (рис. 3.11), характеризующая технологические возможности схемы формообразования.

Изменение входных характеристик позволяет проводить оценку относительных перемещений инструмента и заготовки, что важно на начальном этапе при выборе оптимальных параметров инструмента для дальнейшего его расчета, а также визуальной оценки правильности определения параметров обрабатываемой системы.

### 3.4. ПРОФИЛИРОВАНИЕ ПАЗОВ МЕТОДОМ КОПИРОВАНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ДВИЖЕНИИ ДЕЛЕНИЯ

Технология обработки ТЗК по схемам с непрерывным делением обеспечивает по сравнению с дискретным более высокие производительность и точность формообразования [16]. Практическая реализация этой технологии связана с решением задачи профилирования обрабатываемых пазов при условии непрерывности вращательных движений инструмента и заготовки [29]. Традиционно при такой кинематике профилирования боковые поверхности пазов (зубьев) формируются методом обката, что не всегда целесообразно. В частности, это относится к пазам с плоскими боковыми поверхностями, которые предпочтительнее получать методом копирования, так как упрощается геометрия режущей части инструмента. Такая форма пазов характерна, например, для индукторов АБС автомобилей. На практике важно определить условия, когда при одновременных вращательных движениях инструмента и заготовки пазы профилируются методом копирования.

Рассмотрим эту задачу на основе математической модели, описывающей траекторию движения режущих элементов инструмента, на примере схемы обработки, по которой результирующая скорость (скорость резания) относительных движений инструмента и заготовки направлена вдоль паза.

В процессе формообразования каждый режущий элемент движется по своей траектории 1, 2, 3 и т.д. (рис. 3.12, а), которая определяется параметрами настройки обрабатываемой системы и геометрией инструмента.

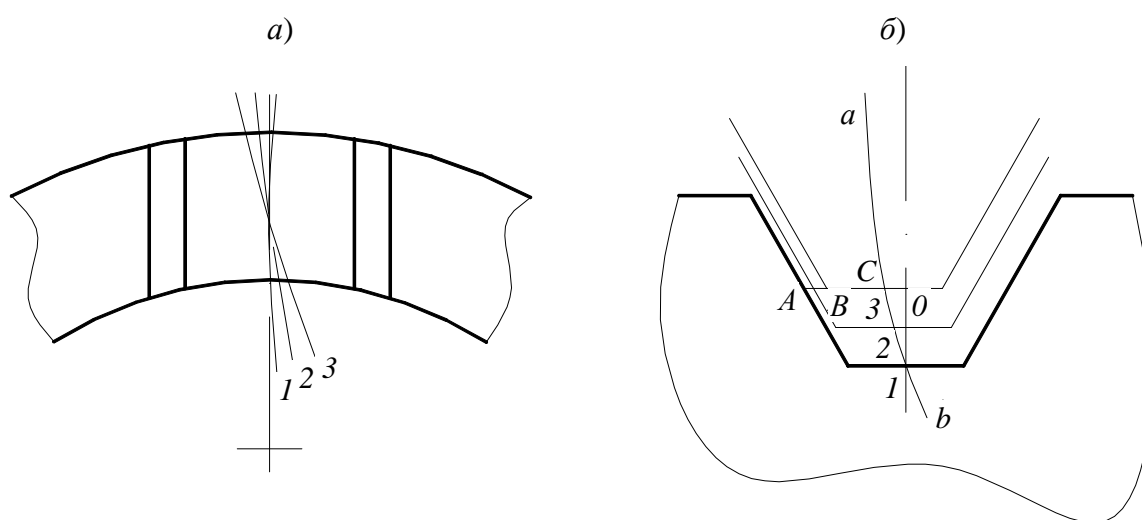


Рис. 3.12. Траектории (а) и положение (б) режущих элементов в относительном движении при обработке паза

Обкат исключается, если выполняется условие  $BC < AO$  (рис. 3.12, б) на внешнем и внутреннем диаметре торцового зубчатого контура для всех режущих элементов, участвующих в формировании торцового зубчатого контура, при условии обеспечения равномерной подачи на зуб. В этом случае боковые режущие кромки резца не выходят за пределы профиля, формируемого методом копирования последним режущим элементом резцового сектора.

Координаты точек пересечения режущими элементами наружного и внутреннего диаметра заготовки можно определить следующими системами уравнений, описывающими траекторию движения точки, принадлежащей режущей кромке, и условия контакта режущего элемента с внутренним и внешним диаметром заготовки:

$$\begin{cases} x = L \cos \alpha + R_i \sin(\alpha m + \beta_i) \cos(\alpha - \lambda) - k_i \sin(\alpha - \lambda), \\ y = L \sin \alpha + R_i \sin(\alpha m + \beta_i) \sin(\alpha - \lambda) + k_i \cos(\alpha - \lambda), \\ \left(\frac{D}{2}\right)^2 = x^2 + y^2; \end{cases} \quad (3.63)$$

$$\begin{cases} x = L \cos \alpha + R_i \sin(\alpha m + \beta_i) \cos(\alpha - \lambda) - k_i \sin(\alpha - \lambda), \\ y = L \sin \alpha + R_i \sin(\alpha m + \beta_i) \sin(\alpha - \lambda) + k_i \cos(\alpha - \lambda), \\ \left(\frac{d}{2}\right)^2 = x^2 + y^2, \end{cases} \quad (3.64)$$

где  $L$  – параметр установки инструмента относительно заготовки;  $\lambda$  – угол установки инструмента относительно заготовки;  $k_i$  – величина осевого смещения  $i$ -го режущего элемента относительно последнего в режущем секторе;  $m$  – количество пазов в торцовом зубчатом контуре;  $R_i$  – радиус расположения  $i$ -го режущего элемента;  $\beta_i$  – угол расположения  $i$ -го режущего элемента на инструменте относительно последнего в режущем секторе;  $D$  – наружный,  $d$  – внутренний диаметр зубчатого контура.

Решение систем уравнений (3.63) и (3.64) дает значения координат пересечения центральной точки режущих элементов с внешним и внутренним диаметром заготовки. Необходимо отметить, что анализ всего множества корней рассматриваемых систем уравнений не требуется, так как они

по своим функциональным характеристикам идентичны. Достаточно рассмотреть параметры, относящиеся только к одному пазу.

Результаты расчета по каждому  $i$ -му режущему элементу согласно (3.63) и (3.64) представляем соответственно в виде матриц  $A$  и  $B$ .

$$A = \begin{vmatrix} \beta_1 & R_1 & x_{11} & y_{11} \\ \beta_2 & R_2 & \dots & \\ \dots & & & \\ \beta_{i-1} & R_{i-1} & x_{(i-1)1} & y_{(i-1)1} \\ \beta_i & R_i & x_{i1} & y_{i1} \end{vmatrix}; \quad (3.65)$$

$$B = \begin{vmatrix} \beta_1 & R_1 & x_{12} & y_{12} \\ \beta_2 & R_2 & \dots & \\ \dots & & & \\ \beta_{i-1} & R_{i-1} & x_{(i-1)2} & y_{(i-1)2} \\ \beta_i & R_i & x_{i2} & y_{i2} \end{vmatrix}. \quad (3.66)$$

Преобразуем результаты, представленные в матрицах  $A$  и  $B$ , в матрицу  $C$ , учитывая, что первый столбец отображает угловое расположение режущих элементов на инструменте и  $\beta_i = 0$ . Вторые столбцы матриц  $A$  и  $B$  преобразуем согласно условию  $t_i = R_i - R_1 \Rightarrow t_1 = 0$ .

Если столбец матрицы  $A$  идентичен соответствующему столбцу матрицы  $B$ , то в матрице  $C$  пишется один столбец, в противном случае в матрицу вводятся оба столбца.

$$C = \begin{vmatrix} \beta_1 & 0 & x_{11} & x_{12} & y_{11} & y_{12} \\ \beta_2 & t_2 & \dots & & & \\ \dots & & & & & \\ \beta_{i-1} & t_{i-1} & x_{(i-1)1} & x_{(i-1)2} & y_{(i-1)1} & y_{(i-1)2} \\ 0 & t_i & x_{i1} & x_{i2} & y_{i1} & y_{i2} \end{vmatrix}. \quad (3.67)$$

Каждая строка матрицы  $C$  содержит информацию о траектории движения  $i$ -го режущего элемента, формирующего паз на глубине  $t_i$ . Комплексный анализ всей выборки результатов, представленных в рассматриваемой матрице, позволяет установить наличие или отсутствие обката по каждому режущему элементу.

Анализ [27] показал, что наибольшее применение в конструкциях деталей типа муфт нашли ТЗК с поперечным профилем в виде ломаной линии (рис. 3.13), формирование которого возможно инструментом с такой же формой режущих элементов.

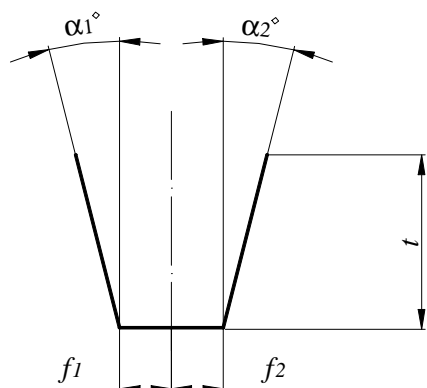


Рис. 3.13. Профиль формируемого паза

По данной схеме режущий элемент можно представить в формализованном виде пятью параметрами ( $t, f_1, f_2, \alpha_1, \alpha_2$ ).

В частности, профиль режущего элемента, формирующего пазы храповой муфты, описывается следующим образом:

$$t = 0,85 \text{ мм}; \quad f_1 = 0; \quad f_2 = 0,3 \text{ мм}; \quad \alpha_1 = 5^\circ; \quad \alpha_2 = 6^\circ.$$

Рассмотрим условие отсутствия обката при обработке торцового зубчатого контура режущими элементами с профилем, описываемым параметрами  $t, f_1, f_2, \alpha_1, \alpha_2$  для  $i$ -го уровня матрицы  $C$ :

$$f_1 + y_{i1} \leq f_1 + (t - t_i) \operatorname{tg}(\alpha_1),$$

$$f_2 + y_{i1} \leq f_2 + (t - t_i) \operatorname{tg}(\alpha_2),$$

$$f_1 + y_{i2} \leq f_1 + (t - t_i) \operatorname{tg}(\alpha_1),$$

$$f_2 + y_{i2} \leq f_2 + (t - t_i) \operatorname{tg}(\alpha_2).$$

Представим приведенные условия в виде матриц  $D$  и  $F$ :

$$D = \begin{vmatrix} (t - t_1) \operatorname{tg} \alpha_1 \\ \dots \\ (t - t_{(i-1)}) \operatorname{tg} \alpha_1 \\ (t - t_i) \operatorname{tg} \alpha_1 \end{vmatrix}, \quad (3.68)$$

$$F = \begin{vmatrix} (t - t_1) \operatorname{tg} \alpha_2 \\ \dots \\ (t - t_{(i-1)}) \operatorname{tg} \alpha_2 \\ (t - t_i) \operatorname{tg} \alpha_2 \end{vmatrix}. \quad (3.69)$$

Таким образом, при обработке торцового зубчатого контура по рассматриваемой схеме обкат отсутствует, если каждый параметр пятого и шестого столбцов матрицы  $C$  меньше или равен соответствующему параметру в матрицах  $D$  и  $F$ . Применение матриц для анализа схемы формообразования позволяет выполнять его на ЭВМ.

По рассчитанным значениям координат представляется возможным построить кривую  $ab$  (см. рис. 3.12, б) в координатах, по оси абсцисс которых откладывается значение  $y$  (пятый и шестой столбцы матрицы  $C$ ), а по оси ординат – глубина резания  $t$  (второй столбец матрицы  $C$ ).

Анализ полученных кривых позволяет визуально оценивать возникновение обката при обработке пазов с заданным поперечным профилем и параметрами настройки обрабатывающей системы.

Рассмотрим характер изменения кривых для четырех различных вариантов расположения режущих элементов.

1. По винтовой спирали:

$$k_i = b\beta_i, \quad (3.70)$$

где  $b$  – параметр, характеризующий винтовую линию.

2. По линии, определяемой геометрическими характеристиками торцового зубчатого контура:

$$k_i = L(\cos \lambda \operatorname{tg}(\lambda + \beta_i) - \sin \lambda). \quad (3.71)$$

3. На эксцентрично установленном секторном инструменте с нулевым углом наклона.

4. На эксцентрично установленном наклонном секторном инструменте:

$$k_i = (R - R_i \cos \beta_i) \sin \rho, \quad (3.72)$$

где  $\rho$  – угол наклона секторного инструмента.

Результаты расчета указанных типов инструментов по системам уравнений (3.63), (3.64) с использованием зависимостей (3.70)–(3.72) отображены графически на рисунке 3.14.

На графиках показаны кривые следов контакта центральной точки режущих элементов с наружным и внутренним диаметром детали по каждому инструменту. Сплошной линией отображен след контакта с наружным диаметром, штрихпунктирной – с внутренним диаметром зубчатого

контура. В частности, кривые  $1$  и  $1'$  относятся к инструменту с расположением режущих элементов по простой винтовой линии,  $2$  и  $2'$  – по траектории, определяемой геометрическими характеристиками ТЗК, и т.д.

Характер кривых существенно зависит от геометрических характеристик обрабатываемой детали. Расстояние между кривыми (например,  $1$  и  $1'$ ) уменьшается при увеличении диаметра обрабатываемой детали, количества пазов и уменьшении ширины зубчатого венца, что позволяет обрабатывать пазы с более крутым углом подъема боковых стенок при отсутствии обката. По результатам расчетов определена пространственная схема снятия припуска (рис. 3.15).

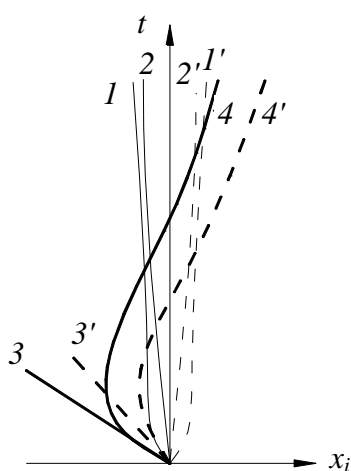


Рис. 3.14. Следы контакта центральной точки режущих элементов с наружным и внутренним диаметром торцового зубчатого контура

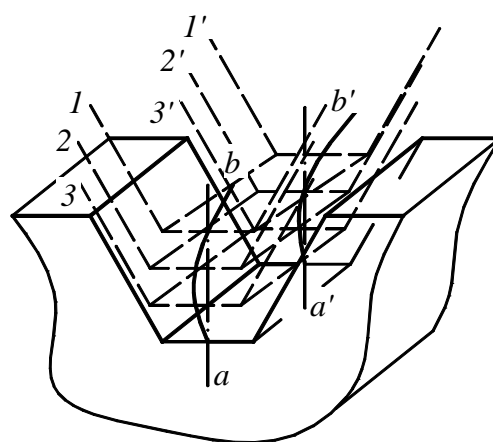


Рис. 3.15. Пространственная схема снятия припуска при обработке торцовых зубчатых контуров по схеме с непрерывным движением деления

С достаточной точностью можно считать прямолинейным движение режущих элементов в пределах зубчатого венца. Данное допущение применимо только к ТЗК с шириной венца, много меньшей радиуса расположения режущих элементов на инструменте.

Схема иллюстрирует процесс формирования ТЗК методом копирования и пути обеспечения формирования их данным методом. К ним относятся:

- анализ возможности формирования методом копирования ТЗК с определенными параметрами;
- оптимизация геометрии инструмента (выбор закона расположения режущих элементов на инструменте, выбор оптимальных радиусов расположения режущих элементов, оптимизация профилей режущих элементов) и параметров настройки обрабатывающей системы, обеспечивающих формирование ТЗК методом копирования.

При обработке ТЗК по схеме, когда результирующая скорость (скорость резания) относительного движения инструмента и заготовки направлена к детали, необходимо использовать следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} x = L \cos \alpha - R_i \sin(\alpha m + \beta_i) \cos(\alpha + \lambda) - k_i \sin(\alpha + \lambda), \\ y = L \sin \alpha - R_i \sin(\alpha m + \beta_i) \sin(\alpha + \lambda) + k_i \cos(\alpha + \lambda), \\ \left(\frac{D}{2}\right)^2 = x^2 + y^2; \end{cases} \quad (3.73)$$

$$\begin{cases} x = L \cos \alpha - R_i \sin(\alpha m + \beta_i) \cos(\alpha + \lambda) - k_i \sin(\alpha + \lambda), \\ y = L \sin \alpha - R_i \sin(\alpha m + \beta_i) \sin(\alpha + \lambda) + k_i \cos(\alpha + \lambda), \\ \left(\frac{d}{2}\right)^2 = x^2 + y^2. \end{cases} \quad (3.74)$$

Анализ систем уравнений (3.73) и (3.74) показал, что характер кривых, описывающих след контакта режущих элементов с наружным и внутренним диаметром детали, идентичен кривым, относящимся к ранее рассмотренной схеме.

Таким образом, при обработке ТЗК с непрерывными вращательными движениями инструмента и заготовки возможно профилирование пазов методом копирования, что существенно упрощает геометрию инструмента и технологию его заточки.

### **3.5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ ИНСТРУМЕНТАМИ ЧЕРВЯЧНОГО И СЕКТОРНОГО ТИПОВ**

Сравнение схем обработки для выбора из них рациональной выполняется по определенным критериям, в качестве которых целесообразно принимать общие для всех схем обработки показатели эффективности – производительность и точность формообразования [77]. Кроме них в некоторых случаях необходимо использовать и другие критерии: универсальность, простота реализации, неравномерность и непрерывность процесса резания и др. Сравним схемы обработки ТЗК по технологической производительности, количественно характеризуемой основным временем обработки  $T_o$ .



Для сопоставления различных схем обработки введем коэффициент относительной эффективности по производительности обработки  $K_T$ , равный отношению основного времени обработки по сравниваемым схемам:

$$K_T = \frac{T_{o_i}}{T_{o_j}}. \quad (3.75)$$

На основе анализа схем обработки получены зависимости для определения основного времени обработки торцового зубчатого контура различными инструментами.

*Резцовая головка:*

$$T_o = \frac{\left(\frac{h}{S_z} + 1\right)m}{n_2 Z}, \quad (3.76)$$

где  $n_2$  – частота вращения инструмента;  $Z$  – число режущих элементов;  $m$  – число обрабатываемых пазов;  $h$  – глубина паза;  $S_z$  – подача на зуб.

*Червячный инструмент (улитка):*

$$T_o = \frac{\left(\frac{h}{S} + 1\right)m}{n_2}. \quad (3.77)$$

Здесь  $S$  – разность между высотами над плоскостью зубчатого венца между первым и последним режущими элементами инструмента.

*Червячный наклонный инструмент:*

$$T_o = \frac{\left(\frac{h}{T \operatorname{tg} \varepsilon} + 1\right)m}{n_2}, \quad (3.78)$$

где  $T$  – линейный шаг расположения пазов на заготовке;  $\varepsilon$  – угол наклона червячного инструмента.

*Секторный инструмент:*

$$T_o = \frac{\left(\frac{h}{S_z} + 1\right)m}{n_2}. \quad (3.79)$$

Комбинированный (секторный наклонный) инструмент:

$$T_o = \frac{\left(\frac{h}{2e} + 1\right)m}{n_2}, \quad (3.80)$$

где  $e$  – эксцентриситет установки инструмента.

Сравнение схем обработки по производительности возможно, если они позволяют получать изделия с одинаковыми геометрическими и физико-техническими характеристиками обработанных поверхностей. Для этого рассматриваемые схемы формообразования были сопоставлены с помощью формулы, определяющей их технологические возможности (табл. 3.2). Это позволило выделить схемы формообразования, обеспечивающие обработку ТЗК с одинаковой геометрией.

Таблица 3.2

Результаты сравнения рассматриваемых схем формообразования ТЗК

№ п/п	Режущий инструмент	Характеристика технологических возможностей схемы обработки	Коэффициент сравнения по производительности $K_T$
1	Резцовая головка	X; X; X; 1; 1, 4	1
2	Червячный инструмент (улитка)	X; 1, 2, 4; X; 1; 1, 4	$\frac{\left(\frac{h}{S_z} + 1\right)}{Z \left(\frac{h}{S} + 1\right)}$
3	Червячный наклонный инструмент	X; 1, 2, 4; X; 1; 1, 4	$\frac{\left(\frac{h}{S_z} + 1\right)}{Z \left(\frac{h}{T \cdot \text{tg}\epsilon} + 1\right)}$
4	Секторный наклонный	X; 1, 2, 4; X; 1; 1, 4	$\frac{\left(\frac{h}{S_z} + 1\right)}{Z \left(\frac{h}{2e} + 1\right)}$

Эффективность рассматриваемых схем обработки определяется относительно базовой схемы обработки резцовой головкой.

Из результатов, представленных в таблице 3.2, следует, что максимальную производительность обеспечивает схема обработки, для которой знаменатель в выражении для  $K_T$  имеет минимальное значение. Поэтому значение знаменателя  $A$  можно использовать для оценки производительности схем формообразования ТЗК (табл. 3.3). Исключением общих параметров, входящих в коэффициент  $A$  сравнения данных схем формообразования, получены значения более удобного для анализа параметра  $W$ .

Таблица 3.3

Характеристика схем формообразования

№ п/п	Наименование инструмента	Значение величины $A$	Значение параметра $W$
1	Червячный инструмент (улитка)	$Z \left( \frac{h}{S} + 1 \right)$	$W = S$
2	Червячный наклонный инструмент	$Z \left( \frac{h}{T \cdot \operatorname{tg} \epsilon} + 1 \right)$	$W = T \cdot \operatorname{tg} \epsilon$
3	Секторный наклонный	$Z \left( \frac{h}{2e} + 1 \right)$	$W = 2e$

Анализ данных таблицы 3.3 показывает, что наибольшую производительность имеет схема формообразования, которой соответствует максимальное значение этого параметра.

Из анализа значений  $W$  рассматриваемых схем формообразования следует, что при определенных условиях необходимую производительность можно обеспечить по каждой схеме обработки за счет соответствующих параметров инструмента и элементов режима резания. Поэтому при равенстве производительности формообразования критерием выбора схемы обработки могут быть универсальность схемы обработки, простота ее реализации и др.

Сопоставление полученных результатов с математическими моделями схем формообразования показывает, что такие же выводы о производительности следуют из анализа математических моделей рассмотренных схем формообразования. В частности, математические модели схем формообразования червячным инструментом типа улитки (3.28) и секторным наклонным инструментом (3.60) идентичны, на основе чего можно сделать вывод о возможности достижения одинаковой производительности формообразования при применении этих схем.

Схема с червячным наклонным инструментом будет иметь такую же производительность при выполнении условия:

$$k_i = (k_l - R \cos(\alpha m + \beta_i) \operatorname{tg} \varepsilon) \cos \varepsilon, \quad (3.81)$$

что можно обеспечить за счет геометрии инструмента.

С точки зрения простоты реализации предпочтительной является схема формообразования секторным наклонным инструментом, что определяется его конструкцией и возможностью ее корректировки. При этом, обладая высокой непрерывностью обработки, данная схема характеризуется благоприятными условиями резания [24], что в совокупности обеспечивает ее преимущества по сравнению с другими возможными схемами обработки ТЗК.

### **3.6. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ СЕКТОРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

Основными параметрами, определяющими геометрию формируемого торцового зубчатого контура, являются:

- параметр установки инструмента относительно заготовки ( $L$ );
- угловой параметр установки инструмента относительно заготовки ( $\lambda$ );
- параметр, определяющий отношение частот вращения инструмента и заготовки ( $m(i)$ );
- радиус расположения режущих элементов ( $R$ );
- угловая величина расположения режущих элементов, определяющая величину сектора ( $\beta_i$ );
- геометрический профиль режущих элементов.

Влияние указанных параметров на геометрические характеристики торцового зубчатого контура показано на рисунке 3.16.

Так, параметр  $L$  установки инструмента относительно заготовки определяет: направление пазов, так как он входит в формулу (3.42) для расчета угла установки инструмента; продольный профиль кулачков; сходимость боковых граней, зависящей от траектории движения режущих элементов. Радиус расположения режущих элементов  $R$  влияет на направление пазов, так как входит в формулу (3.36) угла установки инструмента, на форму дна паза (радиус его кривизны) и профиль боковых граней, что, как и в предыдущем случае, обусловлено зависимостью от  $R$  траектории

движения режущих элементов. Параметр  $m$  в соответствии с (3.42) определяет направление пазов и профиль боковых граней, что следует из формулы (3.48) радиуса их кривизны  $R_k$ .

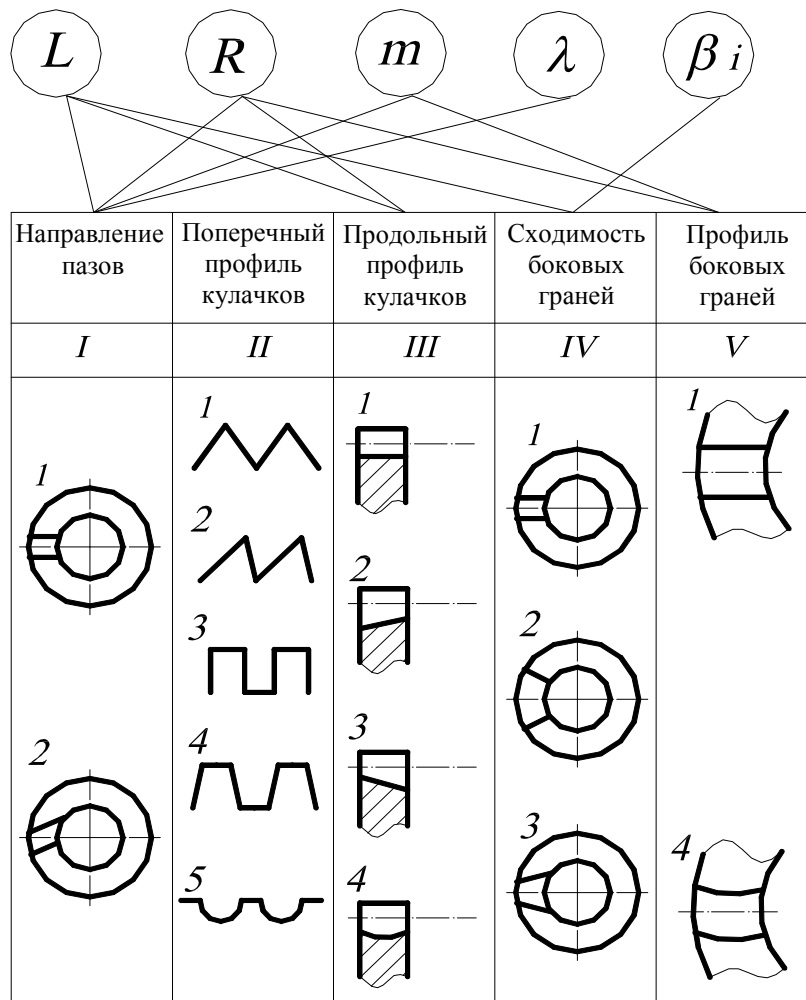


Рис. 3.16. Влияние параметров настройки обрабатывающей системы на геометрические характеристики торцового зубчатого контура

Уравнение (3.48) позволяет вычислить радиус кривизны линии в любой точке, однако не отражает форму траектории на участке, определяющем геометрию боковой грани паза, из-за его протяженности. В этой связи формируемую линию представим в виде дуги окружности, проходящей через три точки (рис. 3.17):  $A(X_1; Y_1)$ ,  $B(X_2; Y_2)$ ,  $C(X_3; Y_3)$ .

Уравнение окружности в общем виде имеет вид:

$$(X - a)^2 + (Y - b)^2 = R_k^2. \quad (3.82)$$

Тогда для нахождения радиуса кривизны  $R_k$  необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} (X_1 - a)^2 + (Y_1 - b)^2 = R_k^2, \\ (X_2 - a)^2 + (Y_2 - b)^2 = R_k^2, \\ (X_3 - a)^2 + (Y_3 - b)^2 = R_k^2. \end{cases} \quad (3.83)$$

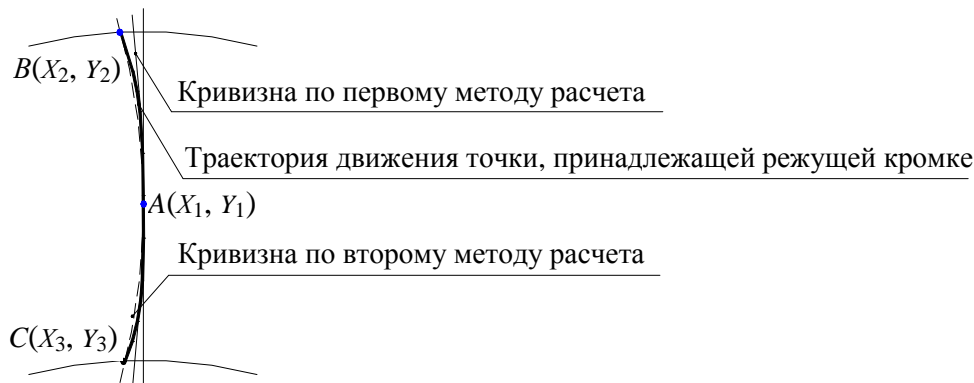


Рис. 3.17. Схема к расчету радиуса кривизны боковых граней

Координаты трех точек находятся из математической модели, описываемой системой уравнений (3.44) при следующих значениях  $\alpha$ :

$$\alpha = 0, \quad \alpha = \frac{1}{N} \arcsin\left(\frac{h}{2L}\right), \quad \alpha = -\frac{1}{N} \arcsin\left(\frac{h}{2L}\right), \quad (3.84)$$

где  $h$  – ширина формируемого паза.

С учетом того, что при  $\alpha = 0$  координатами точки  $A$  будут  $X_1 = 0$ ,  $Y_1 = L$ , система уравнений для нахождения радиуса кривизны примет вид

$$\begin{cases} a^2 + (L - b)^2 = R_k^2, \\ (X_2 - a)^2 + (Y_2 - b)^2 = R_k^2, \\ (X_3 - a)^2 + (Y_3 - b)^2 = R_k^2. \end{cases} \quad (3.85)$$

Решение системы (3.85) определяет радиус кривизны образуемой линии. Угловой параметр установки инструмента относительно заготовки задает направление пазов.

Угловая величина расположения режущих элементов  $\beta$ , задающая величину сектора, влияет на сходимость боковых граней. Установлено, что значение  $\beta$  определяется по зависимости

$$\beta = \frac{\varphi m}{p}, \quad (3.86)$$

где  $\varphi$  – угловая ширина паза по наружному диаметру заготовки;  $p$  – число пропускаемых пазов между последовательно обрабатываемыми пазами.

Из изложенного выше следует не только зависимость геометрии ТЗК от параметров настройки обрабатывающей системы, но и их взаимное влияние. Например, изменение радиуса  $R$  расположения режущих элементов вызывает необходимость корректировки углового параметра установки инструмента относительно заготовки.

При использовании наклонного секторного эксцентрично установленного инструмента при обработке торцовых зубчатых контуров необходимо решить задачи по настройке обрабатывающей системы и управлению схемой обработки.

Возможны два варианта настройки положения инструмента по этой схеме формообразования.

Первый вариант характеризуется тем, что оси вращения инструмента и заготовки скрещиваются под прямым углом. В этом случае наклон инструмента должен обеспечивать необходимое расстояние между плоскостями вращения первого и последнего режущего элементов секторного инструмента.

Разность между высотами  $S$  над плоскостью зубчатого венца первого и последнего режущих элементов, расположенных в 180-градусном секторе при его эксцентричной установке, должна удовлетворять условию:

$$S \geq S_0. \quad (3.87)$$

Здесь  $S_0$  – величина подачи инструмента за один оборот заготовки.

Условие (3.87) выполняется при установке инструмента с эксцентриситетом  $e$ :

$$e = \frac{S}{2 \sin(\rho)}, \quad (3.88)$$

где  $\rho$  – угол наклона инструмента к оси его вращения.

Наклон инструмента к оси вращения влияет на линейную скорость режущих элементов, что следует учесть при его ориентации относительно заготовки.

Угол установки инструмента определяется по зависимости (3.51).

Рассмотренный вариант установки инструмента имеет недостаток – для исключения влияния угла наклона инструмента на ориентацию профиля паза режущие элементы необходимо профилировать с учетом данного угла. Этот недостаток исключается, если оси вращения инструмента и заготовки скрещиваются между собой под углом  $\rho$  (рис. 3.18).

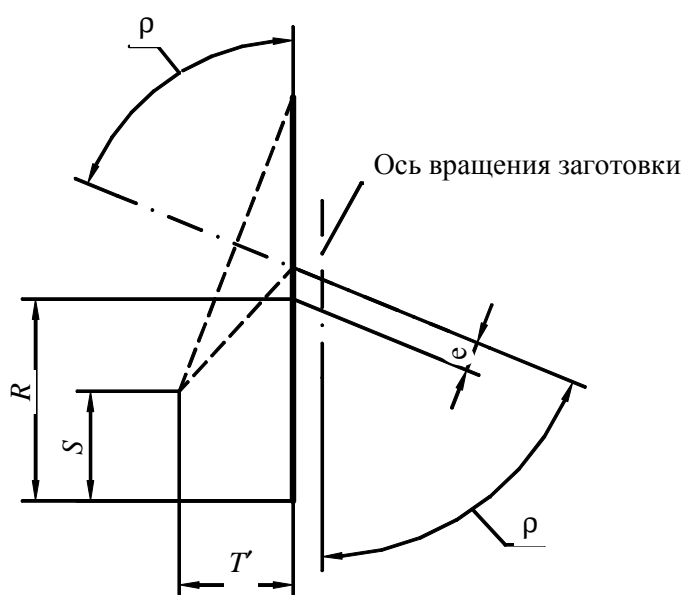


Рис. 3.18. Схема установки наклонного секторного инструмента с возможностью коррекции

При такой установке не требуется учитывать угол наклона инструмента при профилировании режущих элементов, так как последний профилирующий режущий элемент в секторе имеет правильную ориентацию, что является существенным преимуществом данного варианта настройки.

Возможность настройки по этому варианту должна обеспечиваться конструкцией станка. Например, на зубофрезерном оборудовании эту функцию выполняет механизм поворота суппорта, несущего инструментальный шпиндель.



### 3.7. КИНЕМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ СЕКТОРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

#### 3.7.1. Кинематические условия формирования пазов на торце детали

Формообразование пазов по схеме с непрерывным движением деления характеризуется изменением направления скорости результирующего движения точек, принадлежащих режущей кромке инструмента [34].

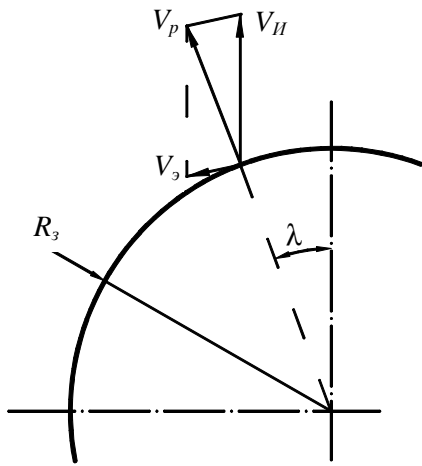


Рис. 3.19. Схема направления скоростей при обработке торцового зубчатого контура

Анализ изменения направления вектора скорости позволяет установить геометрию формируемого торцового зубчатого контура и изменение рабочих углов инструмента.

Принцип, положенный в основу обработки торцовых зубчатых контуров секторными и червячными инструментами, заключается в ориентации скорости движения формообразования вдоль обрабатываемого паза (рис. 3.19). Это основное кинематическое условие формирования пазов.

Скорость движения формообразования при обработке по рассматриваемой схеме является скоростью результирующего движения  $V_p$  движений заготовки и инструмента:

$$\vec{V}_p = \vec{V}_3 + \vec{V}_H, \quad (3.89)$$

где  $V_3$ ,  $V_H$  – скорости заготовки и инструмента соответственно.

Так как

$$V_H = R\omega, \quad (3.90)$$

$$V_3 = R_3\omega_3, \quad (3.91)$$

то

$$V_p = \sqrt{(R_3\omega_3)^2 - (R\omega)^2 + 2R\omega R_3\omega_3 \cos(\lambda)}. \quad (3.92)$$

Здесь  $R$  и  $R_3 = L$  – радиусы инструмента и заготовки соответственно;  $\omega$  и  $\omega_3$  – угловые скорости инструмента и заготовки соответственно.

Учитывая, что скорость направлена по касательной к траектории исполнительного движения, можно определить направление результирующей скорости, зная траекторию относительного движения точки, принадлежащей режущей кромке. Данная траектория описывается системой уравнений (3.44), которая для одного режущего элемента имеет вид:

$$\begin{cases} x = L \cos \alpha + R \sin(\alpha m) \cos(\alpha + \lambda), \\ y = L \sin \alpha + R \sin(\alpha m) \sin(\alpha + \lambda), \\ z = R(1 - \cos(\alpha m)) - \frac{(\alpha m) \cdot S}{2\pi}. \end{cases} \quad (3.93)$$

Изменение направления вектора скорости резания проанализируем через его проекции на оси декартовой системы координат:

$$V_x = \frac{dx}{dt}; \quad V_y = \frac{dy}{dt}; \quad V_z = \frac{dz}{dt}. \quad (3.94)$$

При равномерной частоте вращения заготовки

$$\alpha = At. \quad (3.95)$$

Тогда с учетом (3.94) и (3.95) имеем

$$\begin{cases} x' = (L \cos(At) + R \sin(Atm) \cos(At + \lambda))', \\ y' = (L \sin(At) + R \sin(Atm) \sin(At + \lambda))', \\ z' = \left( R(1 - \cos(Atm)) - \frac{(Atm) \cdot S}{2\pi} \right)'. \end{cases} \quad (3.96)$$

Из уравнений (3.96) следует, что кинематическое управление формообразованием ТЗК возможно изменением отношения частот вращения заготовки и инструмента, а также геометрических параметров схемы обработки, влияющих на форму обработанной поверхности. В обоих случаях достигается изменение ориентации траектории движения режущих элемен-

тов относительно заготовки и, следовательно, направления скорости исполнительного движения (скорости резания).

Необходимость в управлении направлением скорости исполнительного движения обусловлена изменением ее ориентации при обработке ТЗК (рис. 3.20). При перемещении режущей кромки инструмента из положения на заготовке с радиусом  $R_3$  и углом  $\lambda$  в положение с радиусом  $R'_3$  и углом  $\lambda'$  изменяется согласно (3.91) значение  $R'_3$  и, соответственно, направление результирующей скорости. Это приводит к изменению направления паза.

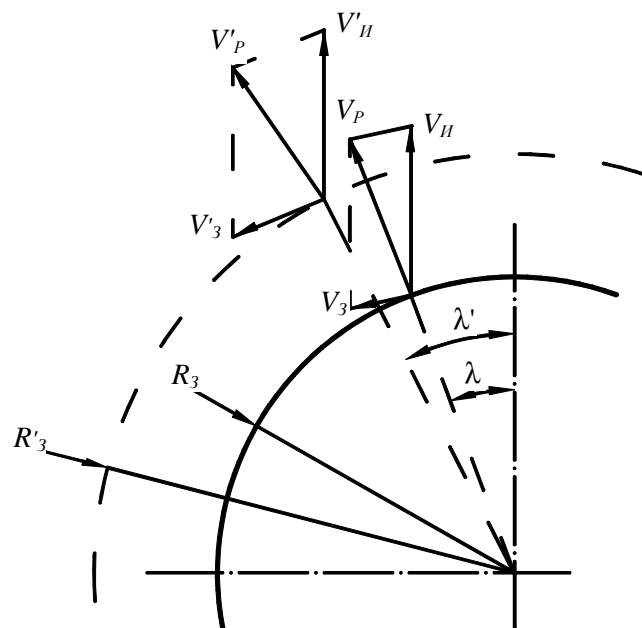


Рис. 3.20. Изменение направления скорости исполнительного движения

Таким образом, схемы формообразования, обеспечивающие управление скоростью результирующего движения, позволяют формировать ТЗК с требуемой геометрией.

### 3.7.2. Управление формообразованием путем изменения отношения частот вращения инструмента и заготовки

Данный метод управления обеспечивает возможность настройки обрабатывающей системы на различное количество формируемых пазов за счет задания отношения  $i$  частот вращательных движений инструмента и заготовки. В частности, при обработке секторным инструментом  $i = m$ , что соответствует последовательной обработке пазов.

Пазы могут обрабатываться не только последовательно в порядке их расположения по окружности, но и по схеме, когда каждый обрабатываемый паз отстоит от предыдущего, обработанного на несколько пазов. В этом случае

$$i = \frac{m}{p}, \quad (3.97)$$

где  $p$  – число пропускаемых пазов между последовательно обрабатываемыми пазами.

Если  $p > 1$ , каждый следующий паз обрабатывается через  $p$  пазов.

Использование такого вида настройки определяется геометрией боковых поверхностей зубьев формируемого торцового зубчатого контура, также необходимо при обработке многозаходным инструментом.

В общем случае рассматриваемый параметр настройки не является постоянным и может изменяться по определенному закону.

Определим изменение передаточного отношения между инструментом и заготовкой для возможности управления направлением скорости результирующего движения  $V_p$ .

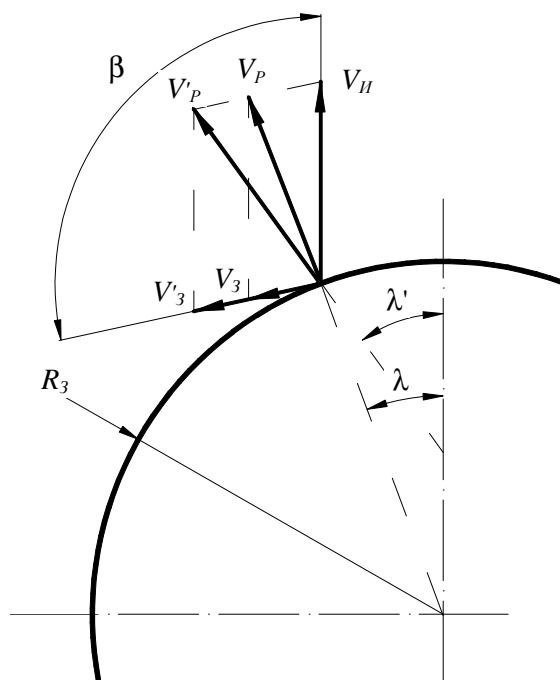


Рис. 3.21. Направление скоростей движений при обработке торцовых зубчатых контуров

Из рисунка 3.21 следует, что при неизменной установке инструмента и заготовки угол  $\beta$  между векторами скоростей инструмента  $V_H$  и заготовки  $V_3$  остается постоянным. В частном случае при радиальном направлении скорости результирующего движения  $\beta = \lambda + \pi/2$ .

На основании теоремы синусов

$$\frac{V_P}{\sin(\beta)} = \frac{V_3}{\sin(\lambda)} = \frac{V_H}{\sin(\beta - \lambda)}. \quad (3.98)$$

Изменение направления скорости результирующего движения будем производить за счет угла  $\lambda$ .

Исходя из (3.51), (3.89)–(3.91) и (3.98) имеем

$$\frac{V_P}{\sin(\beta)} = \frac{R_3 \omega_3}{\sin(\lambda)} = \frac{R \omega_3 m}{\sin(\beta - \lambda)}, \quad (3.99)$$

откуда

$$m = \frac{R_3 \sin(\beta - \lambda)}{R \sin(\lambda)}. \quad (3.100)$$

Тогда изменение передаточного отношения при необходимости изменения направления скорости результирующего движения на величину  $\Delta\lambda$  составит

$$\Delta i = \frac{R_3}{R} \left( \frac{\sin(\beta - \lambda)}{\sin(\lambda)} - \frac{\sin(\beta - \lambda - \Delta\lambda)}{\sin(\lambda + \Delta\lambda)} \right). \quad (3.101)$$

Анализ выражения (3.101) показывает, что рассмотренный способ управления более эффективен при меньшем радиусе заготовки и большем радиусе инструмента, так как при меньшем изменении отношения частот вращения инструмента и заготовки обеспечивается большее отклонение в направлении скорости результирующего движения.

Этот вывод подтверждается графиками (рис. 3.22), из которых следует, что величина  $\Delta i$  ( $\Delta m$ ) зависит от  $\beta$  и  $\lambda$ : чем больше данные величины, тем проще осуществлять управление рассматриваемым способом.

Например, для изменения направления скорости результирующего движения на  $1^\circ$  при  $\beta = 95^\circ$ ,  $\lambda = 3^\circ$  и отношении  $R_3 / R = 0,63$  требуется изменить передаточное отношение  $\Delta i$  на величину, равную 2,9. При обработке торцового зубчатого контура с настройкой обрабатывающей системы на передаточное отношение между инструментом и заготовкой, равное 80, это составляет 3,6 % от общего передаточного отношения. Такое изменение практически не сказывается на динамике процесса обработки.

Для обеспечения лучшей динамики процесса обработки рекомендуется при управлении анализируемым параметром изменять частоту вращения заготовки, которая существенно меньше частоты вращения инструмента.

Рассматриваемый способ управления применим не только для управления геометрией формируемого торцового зубчатого контура, но также при обеспечении возможности формирования поперечного профиля пазов методом копирования.

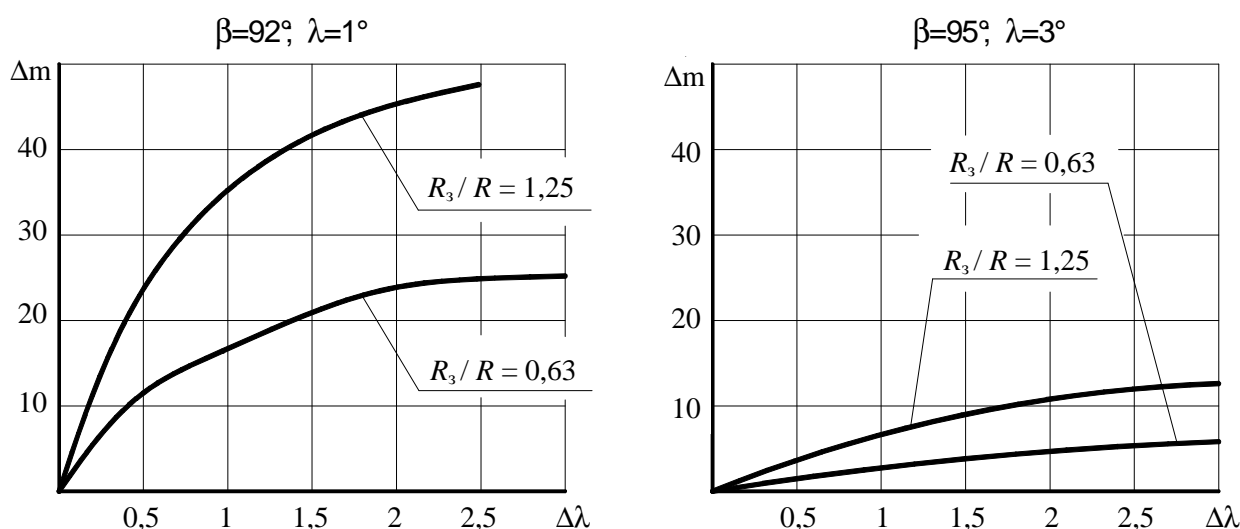


Рис. 3.22. Изменение передаточного отношения в зависимости от необходимого изменения ориентации направления скорости результирующего движения

Практическая реализация предлагаемого метода кинематического управления может быть осуществлена различными механизмами, в частности с использованием некруглых зубчатых колес [81].

Таким образом, применение кинематических способов управления формообразованием ТЗК секторными инструментами обеспечивает решение двух задач: 1) обработка торцовых зубчатых контуров различной геометрии; 2) повышение точности формообразования.

### 3.7.3. Управление формообразованием за счет параметров схемы обработки

Рассмотрим данный способ управления применительно к обработке пазов с требуемой плоскостностью дна, формируемого циклоидальной кривой. Для получения такой траектории инструменту кроме вращательного движения сообщается также дополнительное сложное движение, например, посредством эксцентрика (рис. 3.23). Здесь точка  $O$  является центром вращения эксцентрика, точка  $A$  – центром вращения инструмента. Параметр  $e$  – эксцентриситет установки;  $R$  – радиус инструмента.

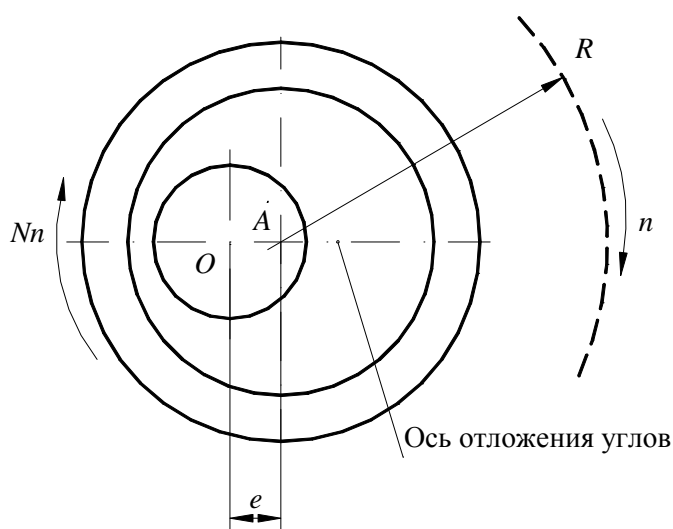


Рис. 3.23. Схема формирования дна паза по циклоидальной кривой

Для определения траектории исполнительного движения удобно данную схему представить механизмом-построителем (рис. 3.24), движение конечной точки последнего звена которого описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} x = R \cos \alpha - e \cos(m\alpha), \\ y = R \sin \alpha - e \sin(m\alpha). \end{cases} \quad (3.102)$$

Изменением параметров  $R$  и  $e$  обеспечивается приближение с требуемой точностью траектории результирующего движения к заданной форме дна паза. В данном случае скорость  $V$  формообразующей точки,

принадлежащей режущей кромке, определяется в соответствии с рисунком 3.24 по формуле

$$V^2 = V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos(N\alpha - \alpha), \quad (3.103)$$

где  $V_1$  ( $V_2$ ) – составляющая результирующей скорости, обусловленная вращением эксцентрика (инструмента).

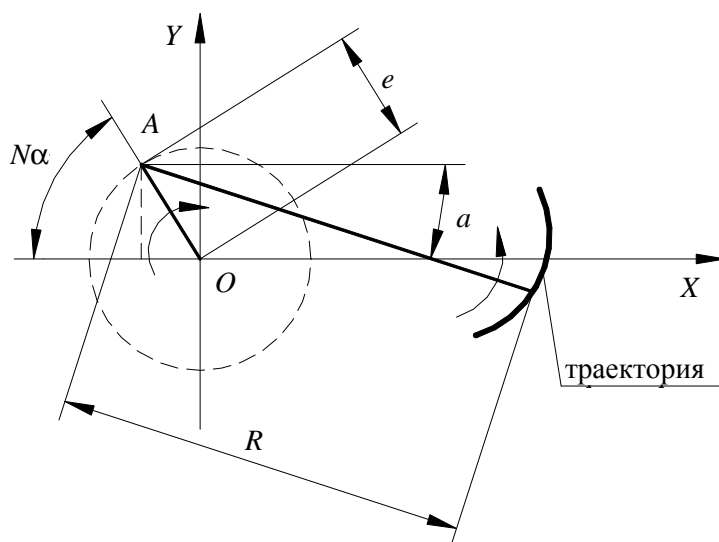


Рис. 3.24. Схема механизма-построителя траектории исполнительного движения

Из формулы (3.103) следует, что режущая кромка имеет наибольшую скорость на периферии зубчатого венца.

Частота вращения  $n$  инструмента при заданной скорости резания  $V$  составляет

$$n = \frac{V}{2\pi\sqrt{N^2e^2 + R^2 - 2eNR \cos(N\alpha - \alpha)}}. \quad (3.104)$$

Такой способ управления формообразованием реализуется, например, устройствами планетарного типа.

Кинематические способы управления формообразованием ТЗК за счет изменения параметров схемы обработки не ограничиваются управлением, как в рассмотренном примере, параметрами установки инструмента; возможно также изменение параметров установки заготовки или одновременно инструмента и заготовки. Общим во всех случаях является цикличность этих процессов, причем количество циклов кратно количеству формируемых пазов.



## Глава 4

### ОБРАБОТКА ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ОСЯХ ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ

Формирование множества равномерно расположенных по окружности поверхностей обеспечивается двухэлементарным исполнительным движением, образованным двумя согласованными вращательными движениями производящих элементов вокруг параллельных осей. Реализация данной принципиальной схемы формообразования циклоидальных кривых применительно к обработке пазов ТЗК возможна тремя практическими схемами, различающимися распределением вращательных движений между инструментом и заготовкой: 1) оба движения сообщаются инструменту; 2) оба движения сообщаются заготовке; 3) одно вращательное движение сообщается инструменту, а второе – заготовке.

Третья схема более универсальна – она проще в реализации, чем первая и вторая, основанные на сообщении планетарного движения исполнительному органу станка, несущему соответственно инструмент или заготовку. В этой связи рассмотрим третью схему. Обработка ТЗК по данной схеме формообразования осуществляется инструментом с расположенными на торце режущими зубьями при сообщении ему вращательного движения вокруг оси, параллельной оси вращения заготовки (рис. 4.1). Расстояние между осями вращательных движений может быть равно радиусу окружности, по которой расположены режущие зубья (рис. 4.1, *а*), или отличаться от него (рис. 4.1, *б*). Ниже рассматриваются вопросы, относящиеся к анализу технологических возможностей и реализации этих схем обработки.

#### 4.1. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ С НЕПРЕРЫВНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ДЕЛЕНИЯ

По известной схеме обработки пазов на торцах деталей, представленной на рисунке 4.1, *а*, инструменту 2 и заготовке 1 сообщаются вращательные движения соответственно  $B_2$  и  $B_1$  вокруг их параллельных осей 3 и 5, а инструменту – движение врезания  $P_3$  вдоль оси вращения заготовки [53]. Расстояние  $l$  между этими осями равно радиусу  $R$  резцовой головки. Форма обработанных пазов зависит от отношения  $i$  угловых скоростей движений

$B_1$  и  $B_2$  и расстояния  $l$ . В частности, при  $i = 2$ ,  $l = R$  и одинаково направленных вращательных движениях инструмента и заготовки формообразующая точка перемещается по эллипсу, проходящему через ось вращения заготовки. С увеличением  $R$  траектория формообразующей точки приближается к прямой, что обеспечивает возможность обработки с допускаемой погрешностью прямолинейных пазов. Так как отношение частот вращательных движений инструмента и заготовки равно двум, то в этом случае число пазов в 2 раза больше числа резцов в головке, поэтому возможна обработка ТЗК только с четным числом пазов.

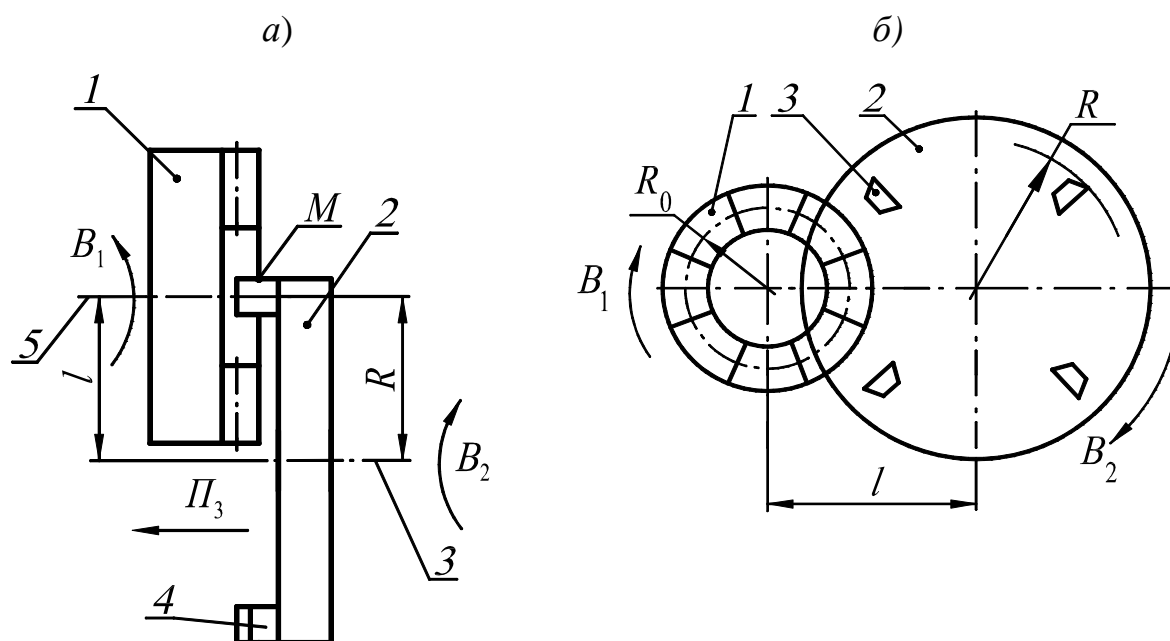


Рис. 4.1. Схемы обработки пазов торцевой резцовой головкой при  $R = l$  (а) и  $R \neq l$  (б)

Данная схема является базовой для синтеза схем обработки ТЗК торцовыми режущими инструментами.

Например, задавая расстояние  $l$  между осями инструмента и заготовки, не равным радиусу резцовой головки  $R$  (см. рис. 4.1, б), можно управлять траекторией исполнительного движения и, следовательно, геометрией обрабатываемых поверхностей. На этом основана, в частности, схема, обеспечивающая обработку как четного, так и нечетного числа пазов ТЗК с выпуклыми и вогнутыми боковыми поверхностями [80].

Режущий инструмент выполнен в виде резцовой головки 2, которая оснащена резцами 3, равномерно расположенными по окружности радиу-

са  $R$ . Для обеспечения движения деления отношение  $i$  частот движений  $B_2$  и  $B_1$  пропорционально количеству пазов  $m$ :

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{m}{k}, \quad (4.1)$$

где  $n_1$  – частота вращения заготовки;  $n_2$  – частота вращения резцовой головки;  $k$  – целое число, меньшее  $m$  и не кратное ему.

Для формирования паза по глубине резцовой головке сообщают прямолинейное перемещение (движение врезания) вдоль оси заготовки.

Требуемую форму обрабатываемого паза получают за счет настройки расстояния между осями инструмента и заготовки, а также радиуса установки режущих элементов на резцовой головке. При обработке сходящихся пазов указанное расстояние настраивают по зависимости

$$l = \sqrt{R^2 + R_0^2 \frac{i \pm 2}{i}}, \quad (4.2)$$

где  $R$  – радиус инструмента;  $R_0$  – средний радиус расположения пазов;  $i$  – отношение частот вращательных движений инструмента и заготовки; знак «минус» соответствует одинаково направленным, знак «плюс» – противоположно направленным вращательным движениям инструмента и заготовки.

В схеме обработки по рисунку 4.1,  $a$  профиль паза образуется методом копирования, поэтому его ширина равна длине проекции режущей кромки резца на плоскость, перпендикулярную оси паза (траектории исполнительного движения). Это ограничивает технологические возможности данных схем по ширине пазов, так как с ее увеличением соответственно возрастает сила резания, что снижает виброустойчивость обрабатываемой системы. В этой связи данная схема предпочтительна при обработке узких пазов.

Для исключения влияния ширины обрабатываемых пазов на виброустойчивость станка и повышения универсальности режущего инструмента целесообразно формировать паз по ширине не одновременно, а последовательно, то есть не методом копирования ( $Kn$ ), а методом следа ( $Cl$ ) или комбинированным методом ( $Kn + Cl$ ). На этом принципе основана схема обработки пазов на торцах деталей [13], которая от рассмотренной отличается тем, что требуемую ширину пазов обеспечивают не за счет параметров

режущей части инструмента, а кинематически, сообщая заготовке дополнительное вращение  $B_4$  для профилирования пазов по ширине (рис. 4.2).

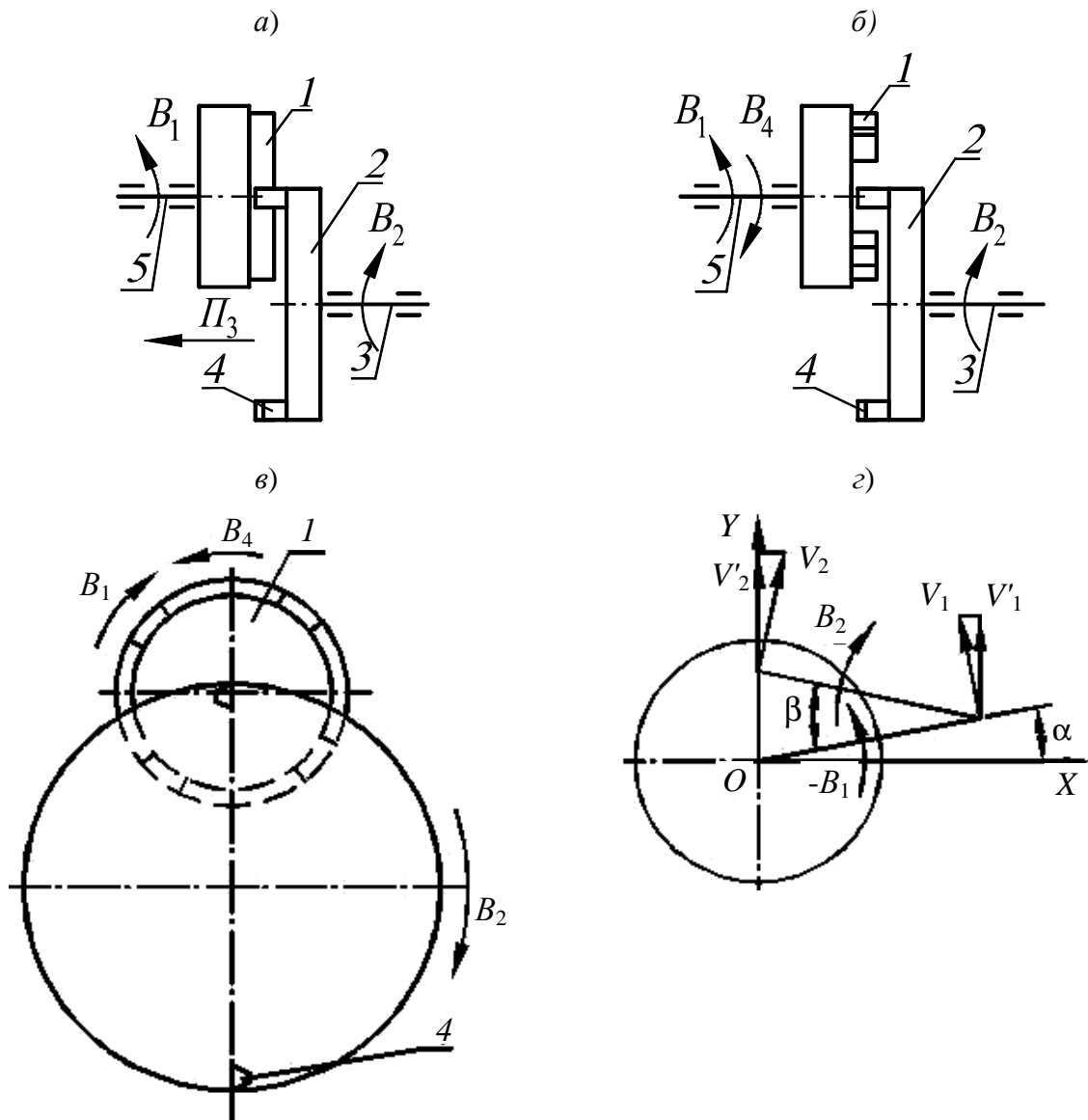


Рис. 4.2. Схема обработки с управляемой шириной пазов:  
 а (б) – кинематическая схема обработки на этапе врезания (профилирования);  
 в – относительное расположение инструмента и заготовки;  
 з – кинематика относительного движения

В данном случае процесс обработки состоит из последовательно выполняемых этапов врезания и профилирования.

На этапе врезания заготовке сообщают вращение  $B_1$  с частотой  $n_1$ , а резцовой головке – вращение  $B_2$  с частотой  $n_2$  в том же направлении, что и вращение  $B_1$ . При этом  $n_2/n_1 = 2$ . Одновременно с движениями  $B_1$  и  $B_2$  резцовой головке сообщается также движение врезания  $\Pi_3$  вдоль оси  $3$ .

Скорость перемещения режущих зубьев относительно заготовки на этапе врезания (скорость резания) равна алгебраической сумме проекций  $V_1'$  и  $V_2'$  соответственно скоростей  $V_1$  и  $V_2$  на ось  $Y$  (рис. 4.2,  $z$ ). При переходе к этапу профилирования изменяется отношение частот вращательных движений заготовки и резцовой головки, имевшее место на этапе врезания. Тем самым создается движение профилирования – относительное перемещение режущих зубьев резцовой головки вдоль контура заготовки.

Отношение частот вращательных движений заготовки и резцовой головки задают в зависимости от скорости и направления движения профилирования по формуле

$$\frac{n_1}{n_2} = 0,5 \pm \frac{S}{\pi d n_2}, \quad (4.3)$$

где  $S$  – скорость движения профилирования;  $d$  – диаметр заготовки; знак «плюс» соответствует одинаково направленным вращению заготовки и движению профилирования, знак «минус» – противоположно направленным этим движениям.

Для обеспечения соотношения (4.3) частоту вращения заготовки изменяют по сравнению с этапом врезания на величину  $\Delta n_1 = \frac{S}{\pi d}$  или частоту вращения резцовой головки на  $\Delta n_2 = \frac{2S}{\pi d}$ . Практически это обеспечивается, например, при сообщении дополнительного вращения  $B_4$  заготовке или резцовой головке соответственно с частотой  $\Delta n_1$  или  $\Delta n_2$ . Поэтому в первом случае частоту вращения заготовки  $n_1$  на этапе профилирования задают по формуле

$$n_1 = 0,5 n_2 \pm \frac{S}{\pi d}, \quad (4.4)$$

а во втором – изменяют частоту вращения резцовой головки

$$n_2 = 2 n_1 \pm \frac{2S}{\pi d}. \quad (4.5)$$

В обоих случаях скорость движения профилирования

$$S = S_z z n_2, \quad (4.6)$$

где  $S_z$  – подача на зуб резцовой головки за один ее оборот.

Благодаря тому, что после выполнения этапа врезания изменяют соотношение частот вращательных движений резцовой головки и заготовки и тем самым создают движение профилирования, обеспечивается возможность обрабатывать пазы, ширина которых не зависит от длины режущей кромки зуба инструмента, а определяется временем этапа профилирования. Поэтому данная схема позволяет обрабатывать более широкий диапазон деталей и обеспечивает универсальность инструмента.

Последовательное формирование обрабатываемых пазов по ширине может быть обеспечено не только кинематически за счет введения дополнительного вращения, но и конструктивно при переносе функции кинематики профилирования на режущий инструмент, аналогично тому, как это показано для секторного инструмента (см. главу 3).

Ниже рассматриваются вопросы, относящиеся к анализу условий и точности кинематического формообразования прямых и круговых пазов, технологических возможностей схем их обработки резцовыми головками различных типов.

## **4.2. ФОРМИРОВАНИЕ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ С ПРЯМЫМИ И КРУГОВЫМИ ПАЗАМИ**

### **4.2.1. Обеспечение заданного числа пазов**

В относительном движении траектория точки, совершающей два вращательных движения, представляет собой циклоидальную кривую. Для схемы обработки с параллельно расположенными осями заготовки и инструмента (см. рис. 4.1) при одинаково направленных движениях  $B_1$  и  $B_2$  она описывается системой уравнений (2.8). При обработке пазов резцовой головкой параметр  $d$  в этих уравнениях равен ее радиусу  $R$ . С учетом этого уравнения (2.8) можно представить в виде

$$\begin{cases} x = l \cos \alpha - R \cos(\alpha(i-1)), \\ y = l \sin \alpha + R \sin(\alpha(i-1)), \end{cases} \quad (4.7)$$

где  $x, y$  – текущие координаты траектории, формируемой производящими элементами резцовой головки в прямоугольной системе координат с центром на оси вращения заготовки;  $l$  – расстояние между осями резцовой головки и заготовки;  $R$  – радиус резцовой головки;  $\alpha$  – текущее значение уг-

ла поворота заготовки;  $i$  – отношение частот вращательных движений резцовой головки и заготовки.

Анализ схемы обработки [25] показывает, что число ветвей образуемой гипоциклоиды зависит от отношения частот вращения заготовки и инструмента, а также от количества режущих зубьев резцовой головки. Если отношение указанных частот принимает иррациональное значение, траектория движения точки режущей кромки не замыкается. Поэтому при бесконечно большом числе оборотов заготовки и инструмента формируются не пазы, а плоская поверхность. Для получения пазов на торце детали при иррациональном значении  $i$  необходимо управление длительностью процесса формообразования, которая характеризуется временем начала и завершения процесса обработки, то есть определенным числом оборотов инструмента и заготовки. Такая схема сложна в реализации. Если же отношение частот вращения заготовки и инструмента выражается рациональным числом, то траектория исполнительного движения является замкнутой, что значительно упрощает реализацию схемы обработки.

Зависимость между количеством ветвей гипоциклоиды и отношением частот вращения инструмента и заготовки при рациональном значении этого отношения, а также числом режущих зубьев резцовой головки описывается формулой

$$N = z i c, \quad (4.8)$$

где  $z$  – число режущих зубьев резцовой головки для формирования  $N$  ветвей циклоидальной кривой;  $c$  – коэффициент кратности (целое число, определяющее последовательность обработки пазов).

Если количество пазов, пропускаемых перед последующим резом, равно  $k$ , то  $c$  и  $k$  связаны между собой зависимостью

$$c = k + 1. \quad (4.9)$$

Из (4.8) и (4.9) имеем

$$N = z i (k + 1). \quad (4.10)$$

Зависимость (4.10) позволяет выполнять настройку станка на требуемое число ветвей гипоциклоиды. Конечной же целью реализации схемы обработки является настройка станка на заданное количество пазов. Для их формирования необходимо удалить материал из областей заготов-

ки, которые лежат внутри ветвей траектории исполнительного движения (внутренняя выборка материала), или из областей, расположенных вне ветвей (внешняя выборка материала). Вид выборки материала зависит от требуемой формы паза (выпуклая, вогнутая, прямая).

Анализ формы траектории точек режущей кромки показывает, что если пазы имеют выпуклые боковые поверхности, то их формирование должно осуществляться точкой режущего зуба, наименее удаленной от центра вращения инструмента. В этом случае формирование паза происходит за счет внешней выборки материала заготовки. При обработке пазов с вогнутыми боковыми поверхностями формообразование осуществляется точкой режущего зуба, наиболее удаленной от оси вращения инструмента, поэтому имеет место внутренняя выборка материала. Для прямых пазов вид выборки материала принимается исходя из обеспечения требуемой ширины паза и рациональных условий резания.

Таким образом, для получения на торце заготовки определенного числа пазов отношение частот вращательных движений инструмента и заготовки ( $i$ ), а также число режущих зубьев должны удовлетворять условию (4.10), при этом схема удаления припуска определяется в зависимости от формы их боковых поверхностей [25].

Для заданного значения  $i$  с увеличением числа пазов пропорционально возрастает число резцов в головке, что усложняет ее конструкцию

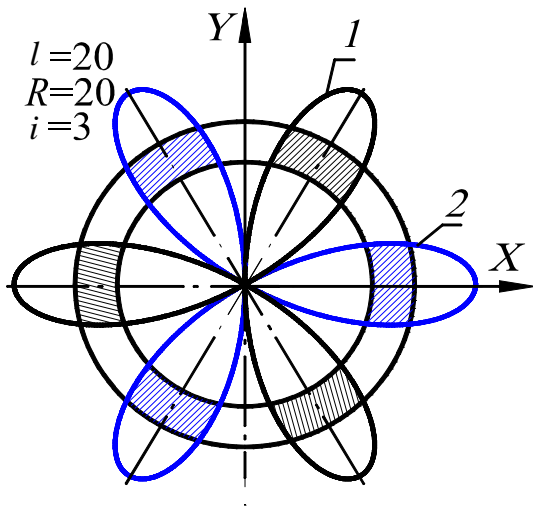


Рис. 4.3. Схема формирования траектории исполнительного движения при дискретно-непрерывном движении деления:

- 1 – первоначальная траектория;
- 2 – смещенная траектория

и заточку, а в ряде случаев, учитывая ограниченный диаметр резцовой головки, исключает возможность обработки ТЗК с заданным числом пазов. Данное обстоятельство в большей степени проявляется, когда паз обрабатывают не одним, а группой резцов, что имеет место для широких пазов.

В этой связи заслуживает внимания схема обработки с дискретно-непрерывным движением деления, при которой заданное множество пазов создается как объединение нескольких групп пазов (рис. 4.3). Пазы каждой группы обрабатываются по схеме с непрерывным движением деления всеми резцами головки, а для



перехода к обработке пазов следующей группы траекторию движения формообразования переносят (смещают) в новое геометрическое положение, для чего заготовке или инструменту сообщают поворот на определенный угол вокруг своей оси (дискретное движение деления). При такой схеме обработки упрощается конструкция резцовой головки и повышается ее универсальность, так как одной резцовой головкой можно обрабатывать детали с различным числом пазов. Общее число обработанных пазов в этом случае  $m = n N_{zp}$ , где  $n$  – число групп резцов,  $N_{zp}$  – число впадин, обрабатываемых одной группой резцов.

Рассмотрим на примере обработки шести пазов на торце детали (см. рис. 4.3) с вогнутыми боковыми сторонами ( $i = 3$ ) реализацию схем с непрерывным и дискретно-непрерывным делением. Расстояние между осями заготовки и резцовой головки равно радиусу последней:  $l = R = 20$  мм.

При обработке по схеме с непрерывным делением резцовая головка должна иметь 2 группы резцов ( $n = 2$ ), в частном случае 2 резца. Каждая из групп резцов обеспечивает обработку трех впадин ( $N_{zp} = 3$ ) – заштрихованные участки, ограниченные траекторией 1. Таким образом, первая группа резцов формирует впадины, перемещаясь по траектории 1, а вторая – по траектории 2. При обработке пазов по схеме с дискретно-непрерывным делением головка имеет одну группу резцов (или один резец), перемещающихся, например, по траектории 1, которыми обрабатываются 3 впадины.

По окончании их обработки за счет дополнительного дискретного движения деления (поворота заготовки или инструмента) траектория движения резцов смещается в новое геометрическое положение (с траектории 1 на траекторию 2) и обрабатываются еще 3 впадины. Таким образом, все пазы обрабатываются одной группой резцов (одним резцом). Благодаря этому количество резцов в головке уменьшается в два раза и, следовательно, упрощается ее конструкция.

В общем случае дискретное движение деления выполняется целое число раз, равное отношению общего числа пазов у детали и числа пазов, обрабатываемых при непрерывном движении деления. После выполнения последнего движения деления режущие кромки возвращаются на начальную траекторию, что соответствует окончанию цикла обработки всех пазов детали. При выполнении дискретного движения деления должна быть исключена возможность контакта резцов с заготовкой, что обеспечивается в цикле обработки вспомогательными движениями отвода и подвода резцо-

вой головки к заготовке. При  $i > 1$  дискретное движение деления следует выполнять за счет поворота заготовки, что позволяет уменьшить инерционные нагрузки в механизме деления.

Обработка пазов по схеме с дискретно-непрерывным делением возможна на специальных или широкоуниверсальных станках. В обоих случаях кинематическая структура станка должна содержать простую кинематическую группу движения деления, последовательно соединенную со сложной кинематической группой движения формообразования боковых сторон пазов. Этому условию отвечает, в частности, кинематическая структура широкоуниверсального станка модели ВС-50, который снабжен делительным механизмом для периодического поворота шпинделя с заготовкой, благодаря чему обеспечивается возможность обрабатывать пазы по схеме с дискретно-непрерывным делением.

#### **4.2.2. Оценка неустойчивости скорости исполнительного движения**

Скорость исполнительного движения при обработке ТЗК резцовой головкой по рассматриваемой схеме является скоростью резания и выражается зависимостью:

$$V = 2\pi n_2 \sqrt{(l^2 + R^2 i^2 \pm 2lRi \cos \alpha)}, \quad (4.11)$$

где  $n_2$  – частота вращения заготовки; знак «плюс» соответствует одинаково, а «минус» – противоположно направленным вращениям инструмента и заготовки [21].

Поскольку уравнение (4.11) содержит переменный параметр  $\alpha$ , то скорость резания является переменной величиной. С практической точки зрения важно знать величину ее изменения, так как неустойчивость скорости резания негативно влияет на качество обработанной поверхности, стойкость инструмента и динамику процесса резания. Относительное изменение скорости резания составляет

$$\delta V = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}}, \quad (4.12)$$

где  $V_{\max}$  – максимальное,  $V_{\min}$  – минимальное значение скорости резания.

Применительно к рассматриваемой схеме обработки

$$\delta V = \frac{\sqrt{l^2 + R^2 i^2 + i(R^2 + l^2 - r_{\max}^2)} - \sqrt{l^2 + R^2 i^2 + i(R^2 + l^2 - r_{\min}^2)}}{\sqrt{l^2 + R^2 i^2 + i(R^2 + l^2 - r_{\max}^2)}}, \quad (4.13)$$

где  $r_{\max}$  ( $r_{\min}$ ) – радиус заготовки, которому соответствует максимальное (минимальное) значение скорости резания.

Уравнение (4.11) позволяет определить, в каких точках траектории скорость резания принимает наибольшее и наименьшее значения при постоянных частотах вращения заготовки и инструмента. Первая производная  $V'(\alpha)$  имеет вид

$$V'(\alpha) = \mp \frac{2\pi n_2 l R i^2 \sin(\alpha i)}{\sqrt{(l^2 + R^2 i^2 \pm 2l R i \cos(\alpha i))}}, \quad (4.14)$$

где знак «плюс» соответствует одинаково, а «минус» – противоположно направленным вращательным движениям инструмента и заготовки.

Как следует из (4.14), скорость резания имеет предельные значения в точках траектории движения формообразования, для которых  $\sin \alpha i = 0$  или  $l^2 + R^2 i^2 \pm 2l R i \cos \alpha i = 0$ . Этим условиям соответствуют следующие значения параметра  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\pi t}{i}, \quad (4.15)$$

где  $t$  – любое целое число,  
или

$$\alpha = \mp \frac{1}{i} \arccos\left(\frac{l^2 + R^2 i^2}{2l R i}\right) + \frac{2\pi t}{i}. \quad (4.16)$$

На длине обрабатываемого паза параметр  $\alpha$  изменяется от  $\alpha_{\min}$  до  $\alpha_{\max}$ . Эти значения определяются из уравнения траектории движения точки режущей кромки. В случае если наибольшее и наименьшее значения скорости движения формообразования достигаются вне области формирования паза, функция скорости на длине паза является монотонной. В соот-

ветствии с этим ее предельные значения имеют место при входе инструмента в контакт с заготовкой, а также при выходе из него, то есть в точках, расположенных на  $r_{\max}$  и  $r_{\min}$ . Если колебание скорости резания на длине паза превышает допускаемое значение, необходимо предусмотреть возможность управления кинематикой формообразования.

Заданная скорость резания обеспечивается настройкой частот вращения заготовки и инструмента. Исходя из скорости резания находятся частоты вращения исполнительных органов станка. Частота вращения заготовки определяется по зависимости

$$n_2 = \frac{V}{2\pi} \sqrt{(l^2 + R^2 i^2 \pm i(R^2 + l^2 - r_{\max}^2))}, \quad (4.17)$$

а частота вращения инструмента  $n_1$  задается в  $i$  раз больше частоты вращения заготовки.

#### 4.2.3. Погрешность формообразования пазов

**Погрешность формообразования прямых пазов.** Погрешность формообразования является важнейшей составляющей погрешности механической обработки, особенно криволинейных поверхностей и при приближенных методах формообразования. Поэтому определение погрешности формообразования и условий ее минимизации при настройке обрабатывающей системы имеет важное значение для повышения точности обработки.

В общем случае обработки пазов, формируемых при произвольных значениях параметров  $i$ ,  $l$  и  $R$ , траектория исполнительного движения представляет кривую линию, вследствие чего возможно только приближенное формообразование прямолинейных пазов. Погрешность формообразования представляет отклонение их боковых поверхностей от прямолинейности. Ее величину необходимо учитывать при определении и настройке параметров схемы обработки.

Рассмотрим обработку ТЗК с прямолинейными пазами, учитывая, что область допуска на прямолинейность боковой поверхности паза находится между двумя прямыми. Одна из них определяет номинальное положение паза, а другая параллельна первой и отстоит от нее на расстоянии, равном величине допуска. Для данного случая погрешность формообразования определяется на основе математической модели при условии, что левая сторона формируемого паза в системе координат  $XOY$ , свя-

занной с заготовкой, проходит через первую четверть этой системы и задается уравнением

$$y = k_1 x + f_1. \quad (4.18)$$

Требуется определить координаты точки  $A'$  (рис. 4.4, а) пересечения траектории  $1$  формообразующей точки режущей кромки с окружностью радиуса  $r_1$  (минимального радиуса торцового зубчатого контура) и координаты точки  $A$  пересечения номинальной прямой  $2$  с данной окружностью и далее повернуть эту прямую вокруг оси  $O$  вращения заготовки таким образом, чтобы точки  $A$  и  $A'$  совпали. При таком повороте прямая  $2$  займет положение прямой  $2'$ . В этом случае расчетная схема будет иметь вид, как показано на рисунке 4.4, б.

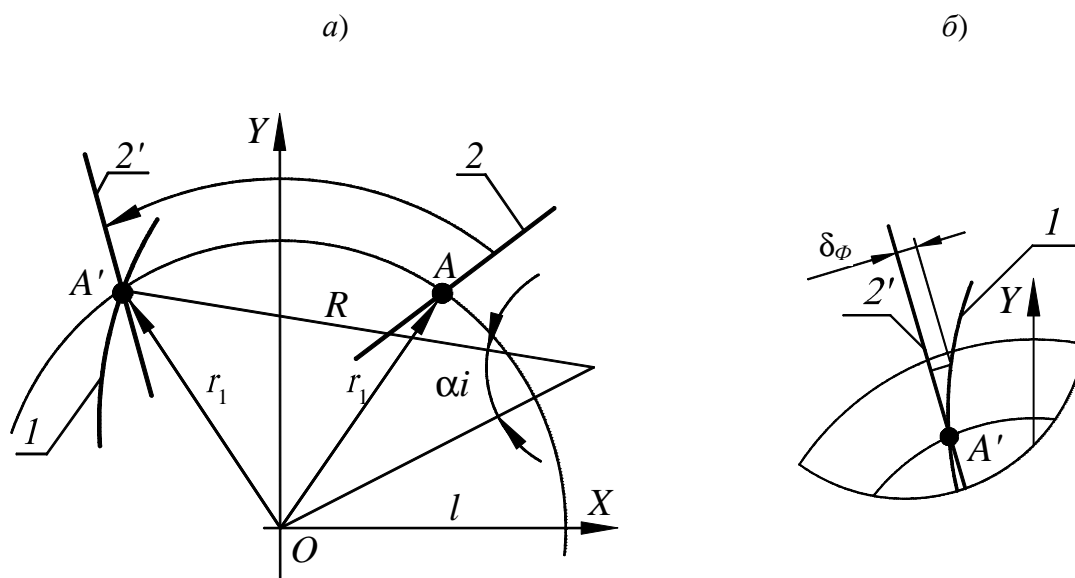


Рис. 4.4. Схема к определению погрешности формообразования прямых пазов

Изменение погрешности формообразования вдоль боковой поверхности паза описывается следующей зависимостью:

$$\delta_\phi = |kx_o - y_o + f| / \sqrt{1 + k^2}. \quad (4.19)$$

Здесь  $k$  – коэффициент приведенной прямой:

$$k = \operatorname{tg} \left( \operatorname{arctg}(k_1) + \operatorname{arccos} \left( \left( 2r_1^2 - (x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2 \right) / 2r_1^2 \right) \right). \quad (4.20)$$

В выражении (4.20)  $x_1, y_1$  – координаты точки пересечения траектории формообразующей точки с внутренней окружностью ТЗК;  $x_2, y_2$  – координаты точки пересечения прямой, ограничивающей сторону паза с внутренней окружностью ТЗК.

Указанные координаты определяются по формулам:

$$x_1 = l \cos \left( \frac{1}{i} \arccos \left( \frac{l^2 + R^2 - r_1^2}{2lR} \right) \right) - R \cos \left( \left( 1 - \frac{1}{i} \right) \arccos \left( \frac{l^2 + R^2 - r_1^2}{2lR} \right) \right); \quad (4.21)$$

$$y_1 = l \sin \left( \frac{1}{i} \arccos \left( \frac{l^2 + R^2 - r_1^2}{2lR} \right) \right) + R \sin \left( \left( 1 - \frac{1}{i} \right) \arccos \left( \frac{l^2 + R^2 - r_1^2}{2lR} \right) \right); \quad (4.22)$$

$$x_2 = \left( -k_1 f_1 \pm \sqrt{k_1^2 f_1^2 - (k_1^2 + 1) (f_1^2 - r_1^2)} \right) / (k_1^2 + 1); \quad (4.23)$$

$$y_2 = k_1 x_2 + f_1. \quad (4.24)$$

Коэффициент  $f$  приведенной прямой определяется по уравнению

$$f = -kx_1 + y. \quad (4.25)$$

Подставляя в уравнение (4.19) координаты  $x_o$  и  $y_o$  определенной точки траектории исполнительного движения, можно вычислить погрешность формообразования в соответствующей точке направляющей боковой поверхности паза. Граничные значения величин  $x_o$  и  $y_o$  определяются путем подстановки уравнений (4.26) и (4.27):

$$\alpha_1 = \frac{1}{i} \arccos \left( \frac{l^2 + R^2 - r_1^2}{2lR} \right), \quad (4.26)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{i} \arccos \left( \frac{l^2 + R^2 - r_2^2}{2lR} \right), \quad (4.27)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы внутренней и внешней окружностей ТЗК в уравнении траектории точки режущей кромки.

Из приведенных зависимостей следует, что при заданных параметрах  $l, i, r_1$  и  $r_2$  величина погрешности формообразования определяется значе-

нием радиуса  $R$  резцовой головки, настройкой которого обеспечивается заданная точность формообразования прямолинейных пазов.

**Погрешность формообразования круговых пазов.** Общим случаем получения пазов, направляющими боковых поверхностей которых служат дуги окружностей, является вариант, когда они формируются при различных значениях параметров  $i$ ,  $l$  и  $R$ . Поэтому в большинстве случаев возникает погрешность формообразования, так как траектория исполнительного движения не является окружностью. Тогда область допускаемых отклонений расположена между двумя концентрическими окружностями, одна из которых радиусом  $R_n$  описывает номинальное положение паза, а радиус второй отличается от радиуса первой на величину допуска. С учетом этого величина погрешности формообразования определяется исходя из условия, что направляющая номинальной боковой поверхности формируемого паза описывается следующим уравнением:

$$(y - a)^2 + (x - b)^2 = R_n. \quad (4.28)$$

Алгоритм решения задачи включает: определение координаты точки  $A$  пересечения траектории  $l$  формообразующей точки режущей кромки с внутренней окружностью ТЗК радиуса  $r_1$  (рис. 4.5, *а*) и поворот центра окружности  $2$ , определяющей номинальную поверхность боковой поверхности паза относительно оси вращения заготовки так, чтобы эта окружность проходила через точку  $A$ . При таком перемещении окружность  $2$  займет положение, соответствующее расположению окружности  $2'$ . В результате получаем расчетную схему, приведенную на рисунке 4.5, *б*.

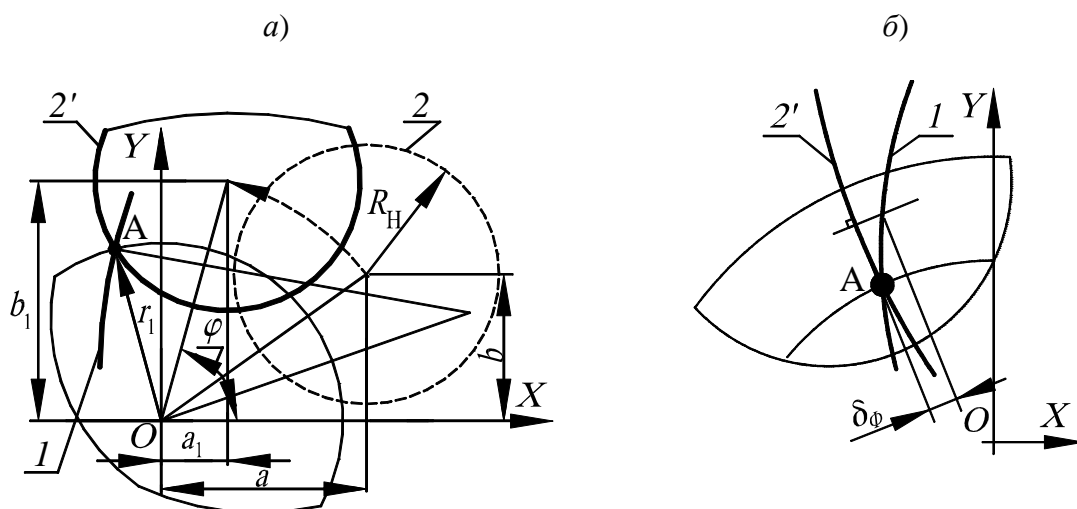


Рис. 4.5. Расчетная схема определения погрешности формообразования круговых пазов

Уравнение, описывающее изменение величины погрешности формообразования по длине паза для каждой точки траектории, имеет вид

$$\delta_{\varphi} = R_n - \sqrt{(a_1 - x_o)^2 + (b_1 - y_o)^2}, \quad (4.29)$$

где  $R_n$  – радиус окружности – направляющей номинальной боковой поверхности паза;  $a_1, b_1$  – параметры в уравнении приведенной окружности, которые определяются по зависимостям:

$$a_1 = \sqrt{a^2 + b^2} \cos \varphi, \quad (4.30)$$

$$b_1 = \sqrt{a^2 + b^2} \sin \varphi. \quad (4.31)$$

Здесь  $\varphi$  – угол, на который необходимо повернуть центр номинальной окружности для совмещения точки пересечения внутренней окружности ТЗК с траекторией формообразующей точки и точки пересечения этой окружности с направляющей номинальной боковой поверхностью паза.

Угол  $\varphi$  определяется по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \varphi = & (1/(i-1)) \arccos\left(\left(R^2 + l^2 - r_1^2\right)/2lR\right) + \arccos\left(\left(l^2 + r_1^2 - R^2\right)/2lR\right) - \\ & - \arcsin\left(\frac{R_n}{r_1} \sqrt{1 - \frac{R_n^2 + a^2 + b^2 - r_1^2}{4R_n^2(a^2 + b^2)}}\right). \end{aligned} \quad (4.32)$$

На основе приведенных зависимостей определяются настраиваемые параметры схемы обработки исходя из заданной погрешности формообразования боковых поверхностей круговых пазов.

### **4.3. МОДИФИКАЦИЯ СХЕМ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ**

Поверхности, ограничивающие паз ТЗК, могут быть образованы различными методами, различающимися формой производящих элементов и кинематикой формообразования, постоянством или переменностью геометрических и кинематических параметров схемы обработки. Реализация таких схем обработки связана с управлением процессом формообразования. Модифицированные схемы обработки строятся на основе базовой



схемы, характеризующейся формированием пазов по длине двухэлементарным исполнительным движением в виде согласованных вращательных движений резцовой головки и заготовки вокруг параллельных осей и формированием пазов по ширине копированием (см. рис. 4.1).

Ниже рассмотрены особенности формирования пазов по базовой и модифицированным схемам обработки торцовых зубчатых контуров резцовыми головками, обеспечивающими кинематическое управление формообразованием.

#### 4.3.1. Формирование торцовых зубчатых контуров по базовой схеме

Базовая схема обработки торцового зубчатого контура (см. рис. 4.1) позволяет формировать пазы шириной  $H$  не более  $2b$  (рис. 4.6), где  $b$  – длина режущей кромки. Поверхность 2 паза образуется методом  $(Kn + Cl)$ , а боковые поверхности 1 (3) могут формироваться следующими методами:

- $(Cl + Cl)$ , если производящим элементом является точка;
- $(Kn + Cl)$ , если производящим элементом является линия, которая по длине больше или равна длине образующей боковой поверхности паза;
- сочетанием методов  $(Kn + Cl)$  и  $(Cl + Cl)$ , если протяженность производящей линии меньше длины образующей формируемой поверхности.

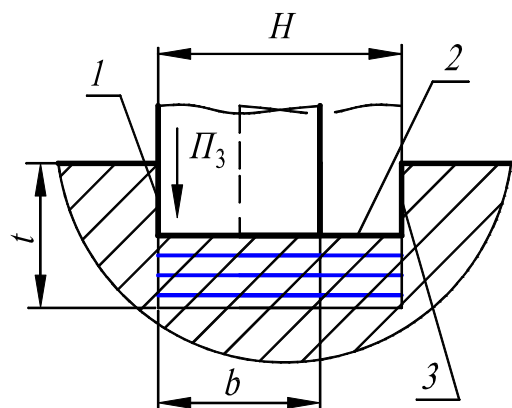


Рис. 4.6. Схема снятия припуска при обработке пазов на этапе врезания

Дном паза может быть не только поверхность, как рассмотрено выше, но и линия. В последнем случае она формируется методом следа точечным производящим элементом по окончании обработки боковых поверхностей 1 и 3.

Для рассмотренной схемы характерен метод геометрического профилирования, поскольку настроенные параметры обрабатывающей системы в процессе обработки не изменяются.

Кинематика формообразования данной схемы обеспечивает различные по форме траектории исполнительного движения:

- эллиптические – для обработки пазов с близкими к прямолинейным параллельным боковыми поверхностями (условно прямолинейными);
- в виде дуг окружностей – для круговых пазов при условии, что траектории режущих кромок соприкасаются или отстоят одна от другой;
- в виде участков гипоциклоидальных кривых, в том числе и с петлями.

Последний случай относится к получению выпуклых боковых поверхностей пазов и осуществим при значительной вытянутости петель в пределах внешнего и внутреннего диаметров торцового зубчатого контура, обеспечивающей возможность при определенном расположении и длине режущих кромок удалить материал внутри петли.

Данная схема обычно применяется при обработке узких открытых пазов, боковые поверхности которых в продольном направлении очерчены параллельными прямыми. Ширина пазов соответствует длине режущей кромки, а ее максимальное значение ограничено жесткостью обрабатываемой системы. Возможности схемы при обработке пазов другой формы в значительной степени обусловлены условиями выборки материала внутри области паза из-за опасности возникновения вибраций и потери устойчивости обрабатываемой системы.

Для исключения зависимости ширины обрабатываемых пазов от длины режущей кромки и, следовательно, повышения универсальности режущего инструмента целесообразно формировать паз по ширине не одновременно, а последовательно, то есть не методом копирования, а методом следа или комбинированным методом (*Kn + Cl*).

#### **4.3.2. Формирование торцовых зубчатых контуров при последовательном и одновременном выполнении движений врезания и профилирования**

При обработке ТЗК с последовательным выполнением движений врезания и круговой подачи (см. рис. 4.2) на первом этапе выполняется процесс врезания, как описано выше для базовой схемы. По окончании первого этапа выполняется второй – профилирование посредством круговой подачи, которую создают, сообщая заготовке или инструменту дополнительное вращательное движение  $B_4$  (см. рис. 4.2). В результате траектории режущих кромок становятся незамкнутыми и изменяют свое положение относительно первоначальных, которые они занимали при выполнении этапа врезания.

При выполнении второго этапа (рис. 4.7) боковые поверхности и дно паза могут обрабатываться в следующей последовательности:

1) боковые поверхности 1 или 3 паза формируются по окончании этапа врезания, часть поверхности 2 (дна паза) – на этапе врезания, а оставшаяся ее часть – на этапе профилирования. Поверхности 3 или 1 форми-

руются на этапе профилирования. Этот случай соответствует схеме обработки с односторонним профилированием (рис. 4.8);

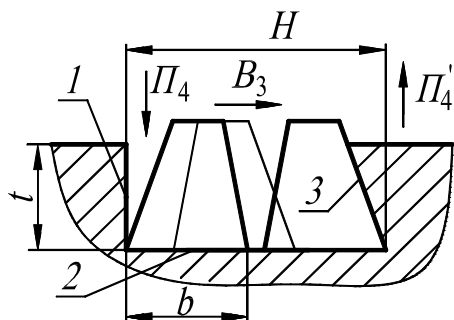


Рис. 4.7. Двухэтапная схема формирования пазов

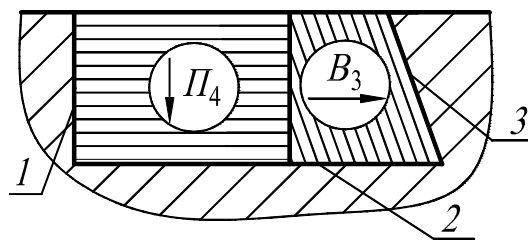


Рис. 4.8. Схема выборки материала при одностороннем профилировании пазов

2) дно паза формируется при выполнении обоих этапов так, что в зависимости от формы производящего элемента возможны следующие варианты генерации:

- методом  $(Сл - Сл)$ , если производящим элементом является точка;
- методом  $((Кп - Сл) - Сл)$ , когда производящий элемент – линия;

3) боковые поверхности пазов в зависимости от последовательности формирования профиля паза образуются на этапе профилирования методом  $(Кп - Сл)$ . В случае если производящим элементом является точка, эта поверхность формируется после окончания этапа профилирования. Поверхность образуется за счет подачи  $П'_4$ , направленной противоположно подаче  $П_4$ . В этом случае поверхность генерируется методом  $(Сл - Сл)$ ;

4) часть поверхности 2 (рис. 4.9) формируется по окончании этапа врезания. После включения движения круговой подачи обрабатывается часть поверхности 2 с формированием поверхности 1 (3). По окончании формирования поверхности 1 (3) изменяется направление круговой подачи, и процесс обработки ведется до окончания формирования поверхности 3 (1) и несформированной части поверхности 2. Этот случай соответствует схеме обработки пазов с двусторонним профилированием.

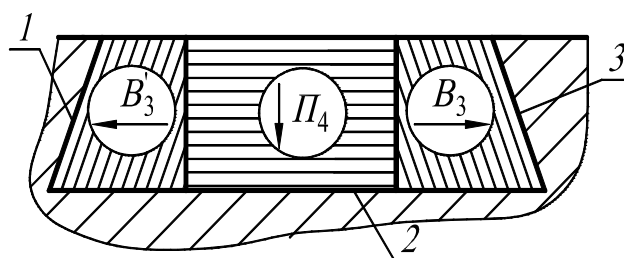


Рис. 4.9. Схема выборки материала при двустороннем профилировании пазов

Дно паза образуется, как и в предыдущем случае, в зависимости от формы вспомогательного элемента разными методами:

- $((Kn + Cl) - Cl)$  – в случае, когда производящий элемент – линия;
- $(Cl - Cl)$  – если производящий элемент – точка.

Боковые поверхности  $1$  и  $3$  формируются методом  $(Kn + Cl)$ .

Рассматриваемая схема предназначена для обработки широких пазов, боковые поверхности которых в продольном направлении очерчены

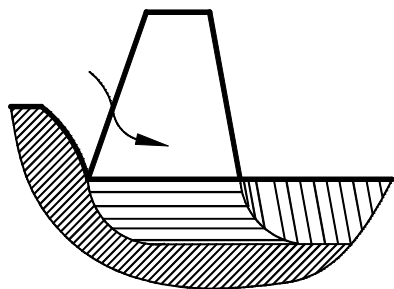


Рис. 4.10. Схема формирования пазов при совмещении движений врезания и круговой подачи

параллельными или сходящимися к центру прямыми, окружностями, кривыми семейства гипоциклоид.

При одновременном выполнении движений врезания и круговой подачи (рис. 4.10) боковые поверхности  $1$  и  $3$  паза формируются сложным исполнительным движением подачи  $\Phi_s(B_3P_4)$ , которое сообщается точечному производящему элементу. В зависимости от характера и взаимной ориентации испол-

нительных движений  $B_3$  и  $P_4$ , а также последовательности и длительности их выполнения в цикле обработки возможно получение пазов с различным профилем. При этом их боковые поверхности формируются методами  $(Cl - Cl)$ , а дно паза –  $(Kn - Cl)$  или  $(Cl - Cl)$ .

Схема имеет более широкие технологические возможности по форме профиля обработанных пазов.

#### 4.3.3. Обработка торцовых зубчатых контуров при переменном межосевом расстоянии

Данная схема обработки основана на том, что, как следует из уравнений (4.2), форма траектории исполнительного движения, образованного согласованными вращательными движениями резцовой головки и заготовки, зависит от расстояния  $l$  между осями вращательных движений.

Изменение траектории исполнительного движения за счет параметра  $l$  можно использовать для выборки материала и профилирования требуемой формы боковых поверхностей пазов. В соответствии с данной схемой настройка на число пазов и форму их боковых поверхностей выполняется, как описано выше, а выборка материала осуществляется с учетом длины режущей кромки и ширины пазов.

При обработке торцового зубчатого контура по рассматриваемой схеме вначале выполняется этап врезания, как в базовой схеме. Дальнейшая выборка материала и формирование боковых поверхностей пазов производится при сообщении заготовке и резцовой головке относительного перемещения в плоскости их вращения, которое сопровождается изменением расстояния  $l$  между осями их вращательных движений.

Настройка на число пазов осуществляется, как и в рассмотренных выше схемах, а настройка на параметр  $R_{\text{паз}}$  (радиус боковой поверхности паза) ведется так, чтобы при изменении параметра  $l$  выполнить выборку материала и при этом получить боковые поверхности с заданным значением радиуса  $R_{\text{паз}}$ . Например, при формировании выпуклых зубьев (рис. 4.11) вначале выполняется врезание в область, заключенную между двумя номинальными боковыми сторонами паза, в результате чего происходит частичная выборка материала. Затем, изменяя параметр  $l$  (в данном случае уменьшая его), производят окончательную выборку материала.

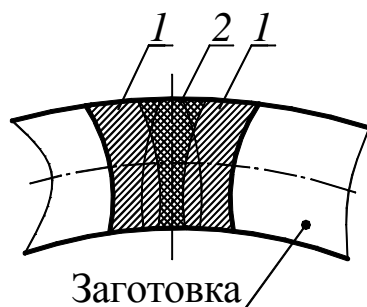


Рис. 4.11. Схема получения выпуклых круговых зубьев при переменном расстоянии между осями заготовки и инструмента:  
 1 – области паза, сформированные на этапе врезания;  
 2 – область паза, сформированная в результате изменения параметра  $l$

При выходе профилирующих кромок резцов на требуемые траектории формируются боковые стороны паза заданной формы. При этом для завершения процесса профилирования пазов необходимо, чтобы при неизменном значении  $l$  заготовка совершила дополнительно некоторое число оборотов.

По данной схеме обработки боковые поверхности пазов генерируются методами  $(Kn + Cl)$ , а дно в зависимости от формы вспомогательного элемента формируется методами  $(Kn - Cl)$  или  $(Kn - Cl) - Cl$ .

Для рассматриваемой схемы характерен как метод геометрического, так и метод кинематического профилирования.

Относительным движением инструмента и заготовки могут создаваться следующие траектории:

- эллиптические – для получения пазов с близкими к прямолинейным параллельными боковыми сторонами;
- дуги окружности – для получения круговых пазов;
- соответствующие участки гипоциклоид.

Схема применима для получения узких и широких пазов, боковые поверхности которых в продольном направлении очерчены параллельными прямыми, окружностями (выпуклыми, вогнутыми) или другими циклоидальными кривыми. Возможности схемы в ряде случаев ограничиваются условием осуществления полной выборки материала внутри области паза, то есть протяженностью режущей кромки. Особенность данного способа управления формообразованием пазов как с целью профилирования, так и с целью выборки материала заключается в том, что ширина пазов не зависит от длины режущей кромки. Кроме этого, при соответствующей форме режущей части резцов этот метод позволяет удалять материал из труднодоступных областей, то есть обрабатывать как открытые, так и закрытые пазы.

Зачастую сложно одновременно получить заданную форму боковых поверхностей пазов, обеспечить требуемую их ширину, а также выполнить выборку материала внутрипазовой области одним из рассмотренных выше способов управления формообразованием. В этих случаях следует использовать различные комбинации рассмотренных способов формирования ТЗК, что должно быть обеспечено обрабатывающей системой станка.

#### **4.4. АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ**

При обработке ТЗК резцовыми головками управление формообразованием возможно методами, которые основаны как на изменении кинематических параметров при настройке, так и в процессе обработки установочных параметров схемы обработки, а именно:

- отношения  $i$  частот вращательных движений резцовой головки и заготовки;
- расстояния  $l$  между их осями;
- соотношения скоростей движений врезания и круговой подачи;
- соотношения скоростей движения врезания и изменения параметра  $l$ .

**Профилирование при согласованных движениях врезания и круговой подачи.** В данном случае движение врезания и круговой подачи со-

вмещены во времени, благодаря чему за счет задания определенного соотношения скоростей этих движений можно управлять профилем формируемого паза (см. рис. 4.10).

Рассмотрим данный метод управления.

С целью формирования паза глубиной  $H_p$  при подаче врезания  $S$  (мм/об заг.) достаточно, чтобы заготовка повернулась на  $m$  оборотов, причем

$$m = H_p / S + 1, \quad (4.33)$$

где  $H_p$  – глубина паза мм;  $S$  (мм/об заг.) – подача врезания за один оборот заготовки.

В зависимости (4.33) единица учитывает дополнительный оборот заготовки, сообщаемый ей по завершении движения врезания для формирования дна паза. В результате траектория формообразующей точки по окончании профилирования сместится на угол  $\beta$ .

Таким образом, за все время обработки заготовка поворачивается на угол

$$\alpha_{вр} = 2\pi(H_p / S + 1), \quad (4.34)$$

включая поворот на угол

$$\alpha_{под.вр.} = 2\pi H_p / S, \quad (4.35)$$

который выполняется ею во время движения врезания.

Угол, на который должна повернуться заготовка по окончании врезания по отношению к первоначальному положению траектории, составляет

$$\alpha_{под.вр.} = 2\pi \Delta H_p / S. \quad (4.36)$$

Приращение угла поворота заготовки во время профилирования определяется зависимостью

$$\Delta\beta = \frac{\beta S}{2\pi \Delta H_p}. \quad (4.37)$$

Исходя из вышесказанного уравнение траектории формообразующей точки режущей кромки будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} x = l \cos \left( \alpha \left( 1 + \frac{\beta S}{2\pi \Delta H p} \right) \right) - R \cos(\alpha(i-1)), \\ y = l \sin \left( \alpha \left( 1 + \frac{\beta S}{2\pi \Delta H p} \right) \right) + R \sin(\alpha(i-1)), \\ z = \frac{\alpha S}{2\pi}. \end{cases} \quad (4.38)$$

**Управление формообразованием путем изменения межосевого расстояния.** При обработке пазов ТЗК по схеме с переменным расстоянием  $l$  между осями заготовки и резцовой головки обработка торцового зубчатого контура выполняется в два этапа – врезания и последующего профилирования, каждому из которых соответствует определенная схема

выборки материала (рис. 4.12).

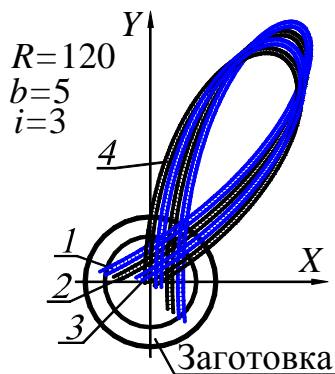


Рис. 4.12. Схема выборки материала при формировании пазов с уменьшающимся межосевым расстоянием, мм:  
1 – траектория режущей кромки при  $l = 150$ ;  
2 – при  $l = 140$ ; 3 – при  $l = 130$ ; 4 – при  $l = 120$

Врезание осуществляется на заданную глубину паза при постоянном значении параметра  $l$ . Затем, постепенно увеличивая или уменьшая параметр  $l$ , осуществляют этап профилирования, в результате чего по сравнению с этапом врезания изменяется траектория режущей кромки. Окончательное формирование пазов осуществляется при неизменном значении параметра  $l$ .

В зависимости от того, как настроена схема при осуществлении врезания, возможны два варианта профилирования боковых поверхностей паза. В *первом случае* при врезании формируются боковые стороны методом  $(Сл - Сл)$ . При выполнении второго этапа дно впадины формируется методом  $(Сл - Сл)$  или комбинированным методом  $((Кп - Сл) - Сл)$ , что зависит от формы производящего элемента. Особенность такого метода профилирования заключается в том, что производящий элемент, формирующий боковую поверхность паза, участвует в обработке только на



этапе врезания, причем удаление материала из внутривпадной области ведется режущими кромками, которые формируют дно впадины, а также неформообразующими режущими кромками. Это благоприятно сказывается на стойкости режущих кромок, профилирующих боковые стороны паза. Во втором случае параметры схемы настраиваются таким образом, что на этапе врезания осуществляется выборка материала, а по окончании врезания – частично формируется дно. Далее обрабатывается дно впадины, как и в первом случае. По окончании этапа профилирования формируются боковые поверхности паза, сочетанием методов (Кп – Сл). Профилирование осуществляется в результате уменьшения параметра  $l$  до значения  $l_\phi$ , при котором осуществляется окончательное формирование боковых поверхностей. Значение параметра  $l_\phi$  определяется из условия обеспечения требуемой точности формообразования, полной выборки материала, отсутствия подрезания уже сформированных элементов паза. Недостатком такой схемы обработки является то, что в работе постоянно участвуют режущие кромки, профилирующие боковые поверхности паза, а преимуществом – возможность обработки пазов с поднутрением.

**Выполнение внутренней выборки материала при формировании пазов на основе непересекающихся траекторий.** Этот случай представлен на рисунке 4.13.

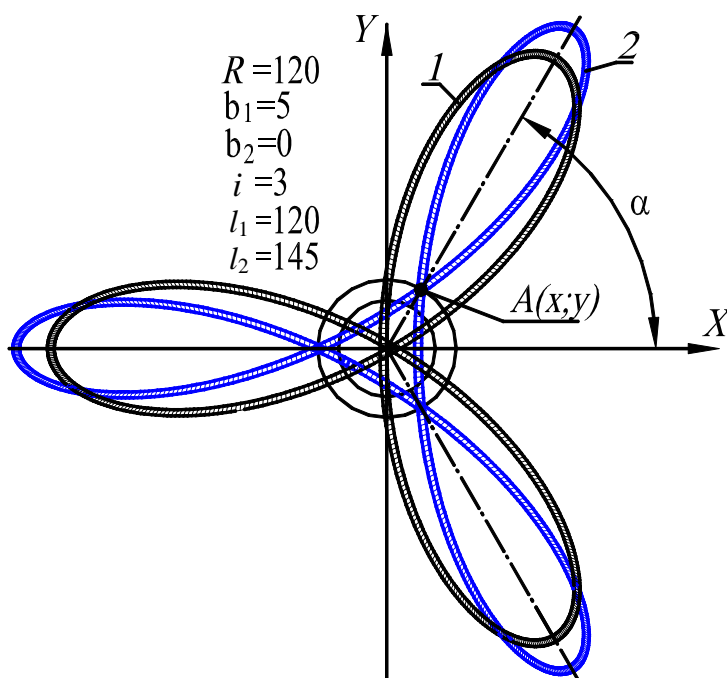


Рис. 4.13. Определение пределов изменения межосевого расстояния при формировании пазов непересекающимися ветвями циклоида и внутренней выборке материала

Полная выборка материала обеспечивается, если траектория наиболее удаленной от оси вращения инструмента точки режущей кромки на этапе удаления пересекает траекторию на этапе приближения к точке, принадлежащей внешней окружности заготовки (точке  $A$ ). Координаты этой точки определяются из системы уравнений:

$$\begin{cases} y = tg(\pi/i), \\ x = \pm \sqrt{r_{\max}^2 - tg^2(\pi/i)}. \end{cases} \quad (4.39)$$

Учитывая, что траектория точки режущей кромки описывается выражениями (4.7), имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \sqrt{r_{\max}^2 - tg^2(\pi/i)} = l \cos(\alpha) - R_{\max} \cos(\alpha(i-1)), \\ tg(\pi/i) = l \sin(\alpha) + R_{\max} \sin(\alpha(i-1)). \end{cases} \quad (4.40)$$

Искомое значение  $l$  определяется решением системы (4.40). Оно соответствует значению, при котором изменение межосевого расстояния от  $l_\phi$  до  $l$  обеспечивает возможность полной выборки материала из внутрипазовой области.

**Выполнение внешней выборки материала при формировании пазов на основе непересекающихся траекторий.** При выполнении внешней выборки материала (рис. 4.14) положение точки  $A(x; y)$ , как и в предыдущем случае, определяется для наиболее удаленной от центра вращения инструмента точки режущей кромки из системы уравнений:

$$\begin{cases} y = tg\left(\frac{\pi(i+n)}{ni}\right), \\ x = \pm \sqrt{r_{\max}^2 - tg^2\left(\frac{\pi(i+n)}{ni}\right)}. \end{cases} \quad (4.41)$$

С учетом (4.41) имеем

$$\begin{cases} \pm \sqrt{r_{\max}^2 - tg^2\left(\frac{\pi(i+n)}{ni}\right)} = l \cos(\alpha) - R_{\max} \cos(\alpha(i-1)), \\ tg\left(\frac{\pi(i+n)}{ni}\right) = l \sin(\alpha) + R_{\max} \sin(\alpha(i-1)). \end{cases} \quad (4.42)$$

Решение системы уравнений (4.42) дает искомое значение параметра  $l$ . Следует иметь в виду, что не все ТЗК могут быть обработаны по схеме с переменным параметром  $l$ . Поэтому для оценки реализуемости рассматриваемой схемы необходимо установить соотношение основных параметров, при которых возможно выполнение профилирования и выборки материала.

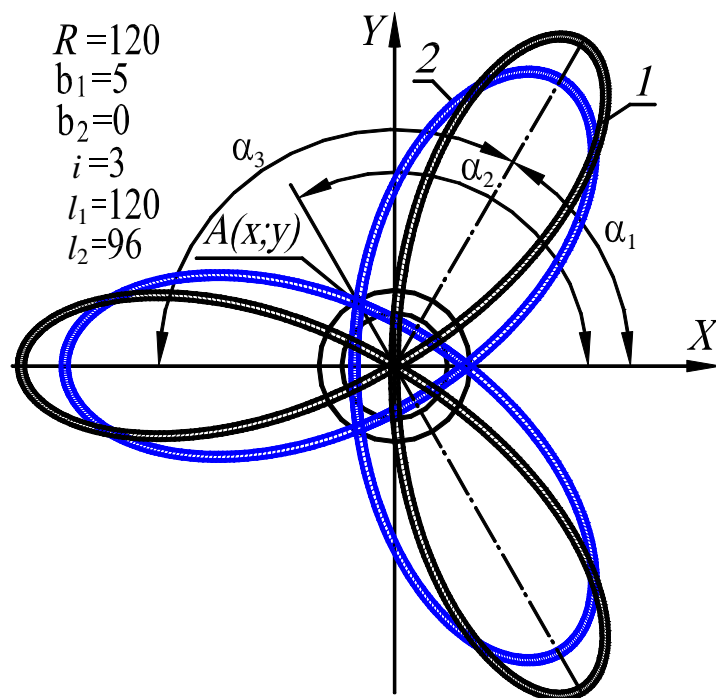


Рис. 4.14. Определение диапазона изменения межосевого расстояния при формировании пазов непересекающимися ветвями циклоида и внешней выборке материала

**Профилирование при изменении межосевого расстояния, совмещенном с врезанием.** При профилировании за счет совмещенных движений врезания и изменения межосевого расстояния формообразующая точка режущей кромки перемещается из точки  $A$  в точку  $B$  (рис. 4.15, *a*). Это возможно, если  $l_n \neq l_k$ , где  $l_n$  – начальное значение параметра  $l$ , при котором формообразующая точка впервые вступает в контакт с обрабатываемой заготовкой;  $l_k$  – конечное значение параметра  $l$ , при котором движение, обеспечивающее изменение параметра  $l$ , прекращается. При продолжении движения врезания возможно получение иной формы пазы (рис. 4.15, *б*).

С целью формирования пазов заданного профиля необходимо, чтобы движение, изменяющее параметр  $l$ , было связано с движением врезания.

При изменении параметра  $l$  от  $l_n$  до  $l_k$  на высоте паза от  $H_{p1}$  до  $H_{p2}$  за время движения врезания заготовка повернется на угол

$$\alpha_{H_{p1}-H_{p2}} = 2\pi\Delta H_p / S, \quad (4.43)$$

где  $\Delta H_p = |H_{p1} \text{ до } H_{p2}|$ .

За это время параметр  $l$  изменяется на величину  $\Delta l = |l_n - l_k|$  в соответствии с заданным профилем паза.

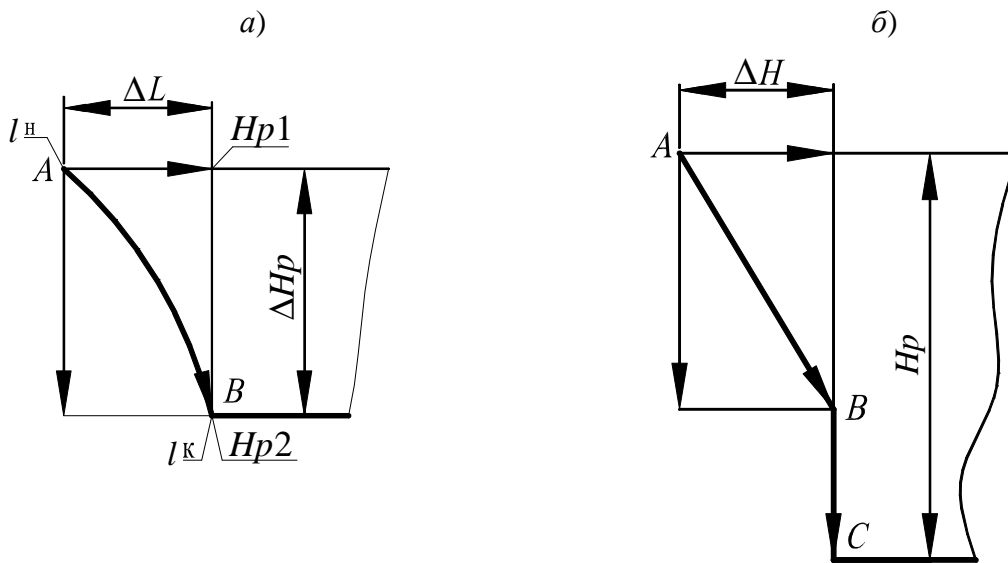


Рис. 4.15. Особенности профилирования при изменении межосевого расстояния

#### 4.5. АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ

Геометрическое управление формообразованием пазов основано на задании параметров режущего инструмента и настройке геометрических параметров схемы обработки для обеспечения условий формирования их поверхностей. При обработке торцовых зубчатых контуров резцовыми головками при параллельных осях инструмента и заготовки к таким параметрам относятся: количество режущих элементов резцовой головки, их радиальное и угловое относительное расположение, расстояние между указанными осями. Изменяя эти параметры, можно получать ТЗК, различающиеся числом равномерно или неравномерно расположенных пазов, а также формой их боковых поверхностей.

Рассмотрим **основные геометрические методы управления формообразованием ТЗК.**

**Управление расположением и числом обрабатываемых пазов.** Одной из задач управления формообразованием ТЗК является обеспечение с заданной точностью взаимного расположения пазов на торце детали, которое может быть равномерным или неравномерным. В обоих случаях это достигается соответствующим расположением режущих зубьев в резцовой головке. Так, если пазы ТЗК должны располагаться равномерно по окружности, то режущие зубья устанавливаются в резцовой головке с одинаковым угловым шагом. При наличии в головке  $z$  равномерно расположенных режущих зубьев центральный угол между соответствующими точками двух соседних режущих кромок определяется зависимостью  $\beta = 2\pi/z$ , а угол  $\mu$  между осями симметрии двух смежных пазов (рис. 4.16, а)

$$\mu = \frac{2\pi}{zi}. \quad (4.44)$$

Если  $\beta \neq 2\pi/z$ , что имеет место при неравномерном расположении пазов (рис. 4.16, б), то

$$\mu = \frac{\beta}{i}. \quad (4.45)$$

Таким образом, устанавливая определенным образом резцы головки, можно управлять шагом расположения пазов на заготовке. Этот метод позволяет управлять числом формируемых пазов, так как оно однозначно связано с числом режущих элементов в резцовой головке.

В общем случае резцы могут быть объединены в несколько групп. Если  $z$  резцов, входящих в одну из групп, равномерно расположенных по окружности, перемещаются по конгруэнтным траекториям, они формируют  $N$  пазов в соответствии с (4.8), причем их количество можноратно увеличить за счет расположения в резцовой головке дополнительного количества групп резцов. Если  $z$  резцов расположено равномерно на резцовой головке, угол  $\chi$  между ними составляет

$$\chi = \frac{2\pi}{z}. \quad (4.46)$$

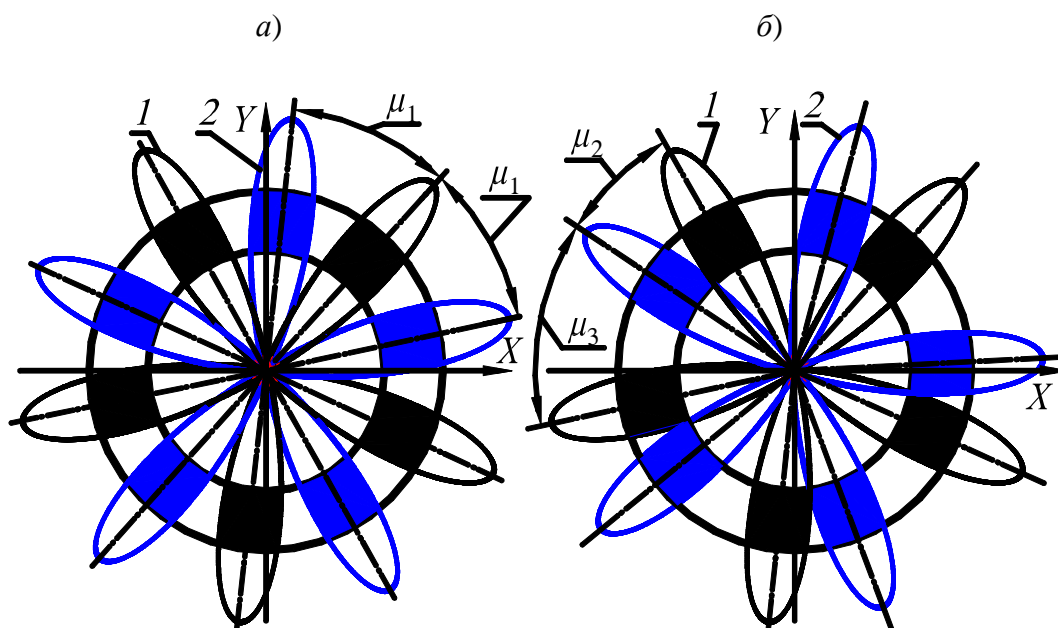


Рис. 4.16. Управление положением пазов:  
*a* – пазы расположены равномерно; *б* – пазы расположены неравномерно

Следующие  $z$  резцов при равномерном распределении пазов по окружности располагаются по отношению друг к другу аналогичным образом, но по отношению к резцам предыдущей группы они должны быть смещены на угол

$$\delta = \frac{2\pi}{zn}, \quad (4.47)$$

где  $n$  – число групп резцов.

С учетом геометрического профилирования число пазов будет определяться по формуле:

$$N = \sum_{k=1}^n N_k, \quad (4.48)$$

где  $N_k$  – число пазов, формирующихся  $k$ -й группой резцов.

Для формирования заданного числа пазов не обязательно задавать максимальное число режущих зубьев в группах. Фактически по условию получения необходимого числа пазов достаточно одного режущего зуба в каждой группе. Рассмотренный способ управления расширяет технологические возможности данного метода формообразования. Следует отметить, что в ряде случаев применение геометрического способа управления явля-

ется наиболее эффективным. Это относится, например, к обработке пазов, боковые стороны которых очерчены дугами окружности ( $i = 1$ ) или эллипса ( $i = 2$ ).

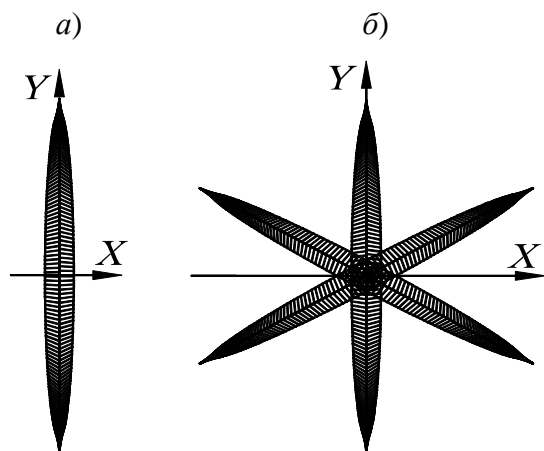


Рис. 4.17. Схема формирования пазов:  
*a* – одной режущей кромкой;  
*б* – несколькими равномерно  
 расположенными режущими кромками

В последнем случае может быть обеспечена высокая точность формообразования прямолинейных пазов, так как траектория формообразующей точки режущей кромки, профилирующей боковую сторону паза, представляет вытянутый эллипс (рис. 4.17, *a*), который на участке, прилегающем к малой его оси, незначительно отклоняется от прямой. Поэтому данная схема является основной для кинематического формирования прямолинейных пазов с параллельными боковыми сторонами.

При формировании круговых пазов (рис. 4.18) двумя согласованными вращательными движениями с равными угловыми скоростями траектория

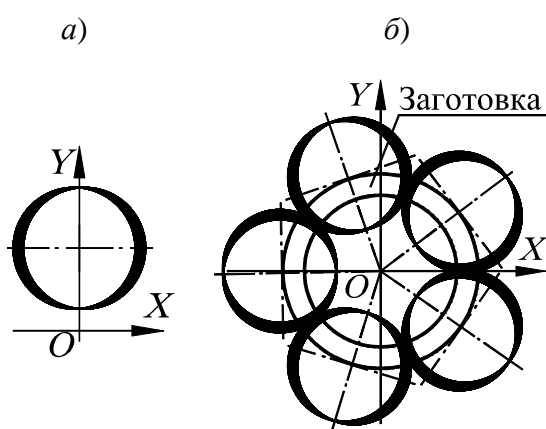


Рис. 4.18. Геометрическое профилирование круговых пазов:

*a* – траектория режущей кромки;  
*б* – расположение траекторий режущих кромок при формировании множества пазов

движения формообразования представляет собой окружность. В этом случае каждый режущий элемент формирует одну окружность (рис. 4.18, *a*), поэтому число пазов будет соответствовать числу режущих элементов (рис. 4.18, *б*).

**Управление шириной формируемых пазов.** В рассмотренных выше схемах обработки профиль паза образуется методом копирования, поэтому его ширина равна длине проекции режущей кромки на плоскость, перпендикулярную оси паза (траектории исполнительного движения).

Это ограничивает технологические возможности данных схем по ширине пазов, так как с увеличением последней соответственно возрастает сила резания, что снижает виброустойчивость обрабатываемой системы.

В данном случае каждая режущая кромка формирует 2 паза, а при наличии  $n$  резцов обрабатывается  $2n$  пазов (см. рис. 4.17, *б*).

Для исключения влияния ширины обрабатываемых пазов на виброустойчивость станка и повышения универсальности режущего инструмента целесообразно формировать паз по ширине не одновременно, а последовательно, то есть не методом копирования, а методом следа или комбинированным методом копирования и следа. В этом случае требуемую ширину пазов обеспечивают не за счет параметров режущей части инструмента, а кинематически, сообщая заготовке дополнительное вращение в течение профилирования паза по ширине [13]. Реализация кинематического метода управления формообразованием пазов по ширине возможна только на специальных станках, обеспечивающих последовательное выполнение этапов врезания и профилирования.

Рассмотрим более простой в реализации геометрический метод управления шириной обрабатываемых пазов. Широкие возможности для реализации геометрических способов управления формообразованием пазов по ширине обеспечивает способ, основанный на обработке заданной совокупности пазов группой режущих зубьев. Это позволяет качественно изменить процесс формообразования по сравнению со схемой, когда паз по ширине формируется методом копирования одним режущим зубом. Такая конструкция резцовой головки позволяет, например, расширить технологические возможности зубошлицефрезерного оборудования и обеспечить управление шириной формируемых пазов при отсутствии кинематических цепей соответствующих органов управления, необходимых для осуществления кинематического метода управления шириной паза.

Расширение технологических возможностей станка осуществляется в данном случае при перенесении функции кинематики формообразования на инструмент, что связано с усложнением конструкции резцовой головки. Поэтому применение такого инструмента должно быть обосновано экономически. Резцовые головки, реализующие данный метод, как правило, допускают большее количество переточек до замены режущих зубьев вследствие увеличения суммарной ширины режущих кромок, участвующих в формировании паза по ширине, а также повышают стабильность процесса резания. Это увеличивает период их стойкости и точность формообразования, а также упрощает заточку и настройку резцовой головки за счет многократной переточки элементов, не выполняющих формообразующую функцию.

Режущие зубья резцовых головок, обеспечивающих управление шириной формируемых пазов, размещаются по секционному принципу. Отметим возможные методы секционирования режущих зубьев в резцовой головке, сходные по своей сути (группирование резцов для обработки не-



которой совокупности впадин), но отличающиеся по методу исполнения и реализуемым свойствам:

1) *метод несмежного секционирования*. При этом методе режущие зубья группы расположены в инструменте (рис. 4.19, а) с определенным центральным углом, позволяющим режущим зубьям каждой секции участвовать в обработке одной группы впадин. При этом каждая впадина обрабатывается всеми резцами секции;

2) *метод смежного секционирования*, в соответствии с которым режущие зубья группы располагаются один за другим в пределах секции (рис. 4.19, б);

3) *метод комбинированного секционирования*, при котором резцы резцовой головки имеют расположение, присущее первым двум методам (рис. 4.19, в).

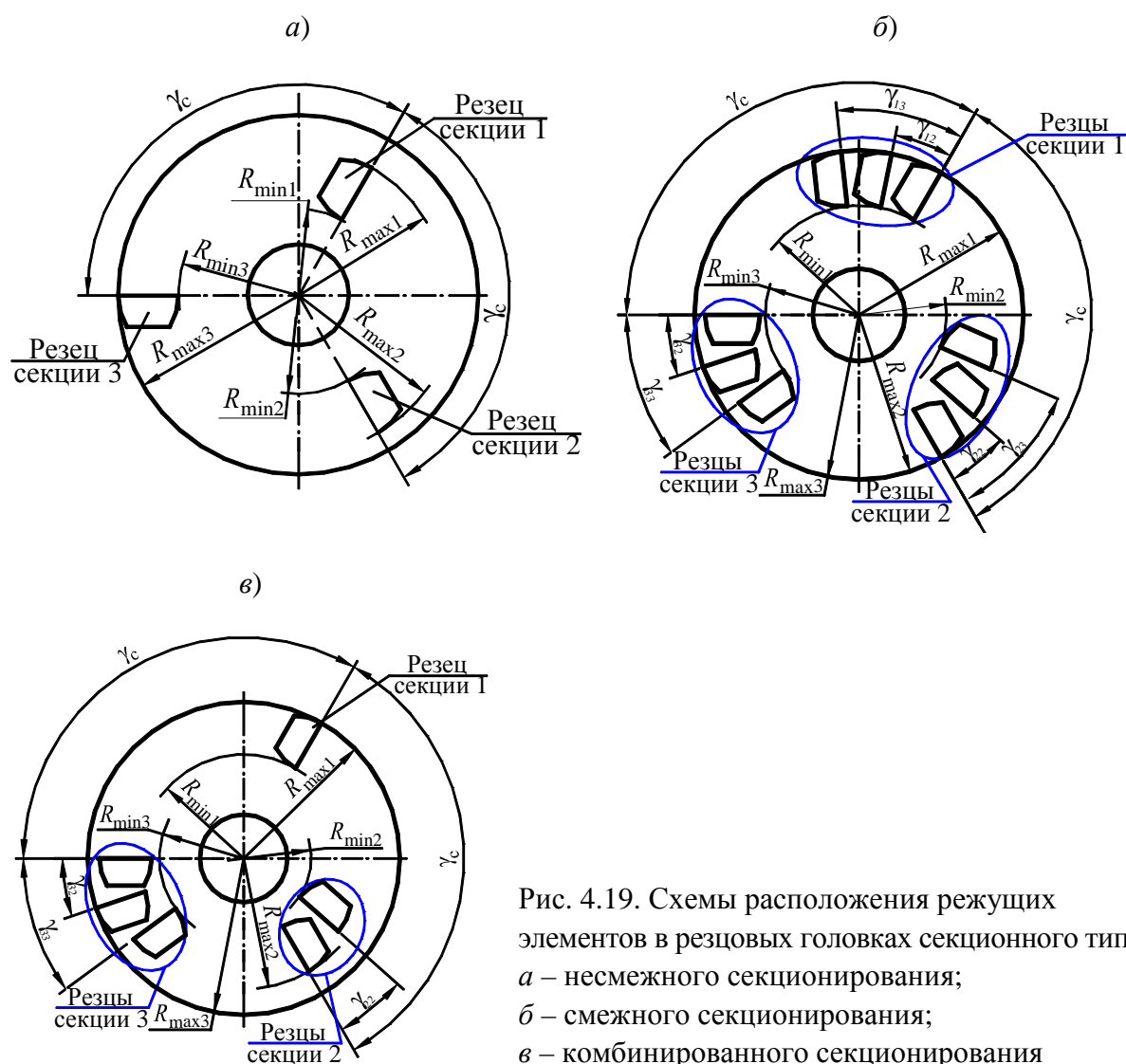


Рис. 4.19. Схемы расположения режущих элементов в резцовых головках секционного типа:  
 а – несмежного секционирования;  
 б – смежного секционирования;  
 в – комбинированного секционирования

Методы секционирования применимы при следующих условиях:

1) *условие перекрытия*. В соответствии с данным условием каждая последующая режущая кромка секции должна входить в область заготовки не позднее, чем предыдущая выйдет из нее. Выполнение данного условия обеспечивает более равномерную работу режущих элементов резцовой головки в пределах секции. Это характерно при использовании метода смежного секционирования;

2) *условие разгрузки формообразующих элементов режущих кромок*. Заключается в том, что формообразующие режущие кромки должны по возможности последними вступать в обработку (при использовании метода смежного секционирования и в некоторых случаях несмежного секционирования), то есть они должны вести обработку по областям с выбранным материалом. Это позволяет:

- увеличить протяженность формообразующих режущих кромок благодаря снижению силы резания или уменьшить упругие деформации инструмента, обусловленные его податливостью;

- не ослаблять поперечное сечение державок формообразующих режущих зубьев благодаря уменьшению объема срезаемой стружки и т.д.

При одновременном выполнении условий 1 и 2 в ряде случаев удается обеспечить благоприятные условия работы формообразующих элементов резцов, что по сравнению с традиционным способом расположения позволяет повысить их стойкость и точность обработки. Благодаря этому возможно формирование не только узких, но и достаточно широких впадин сочетанием методов копирования и следа;

3) *условие технологичности воспроизведения производящего контура*. В большинстве случаев технически сложно обеспечить воспроизведение сложного профиля впадины одной формообразующей режущей кромкой по методу ( $Kn + Cl$ ). Метод секционирования позволяет функцию одного производящего контура распределить между несколькими режущими кромками, изготовление которых более технологично. Необходимо, однако, учитывать, что с увеличением числа режущих зубьев, несущих формообразующие режущие кромки, может усложниться настройка резцовой головки;

4) *условие рационального распределения припуска*. В соответствии с этим условием возможна реализация эффективных схем резания (генераторной, профильной и т.д.);

5) *условие обеспечения полной выборки материала*. Ширина режущих кромок должна быть достаточной для осуществления выбора материала из внутривпадной области.

**Метод несмежного секционирования.** Когда профилирование ведется множеством резцов, для которых выполняется условие  $N = zic$ , и при этом они равномерно расположены по окружности, такие резцы составляют группу. Ее особенность заключается в том, что точки режущих кромок всех резцов группы, расположенных на одной окружности, перемещаются по единой траектории. При формировании пазов, когда ширины каждой режущей кромки в отдельности недостаточно, чтобы сформировать впадину, возможно распределение удаляемого припуска между резцами этой группы. Получение требуемой ширины  $b_{mp}$  режущей кромки за счет ее равномерного распределения между  $z$  режущими кромками резцов группы возможно при определенном их расположении (рис. 4.20):

$$b_k = \frac{b_{mp}}{z}. \quad (4.49)$$

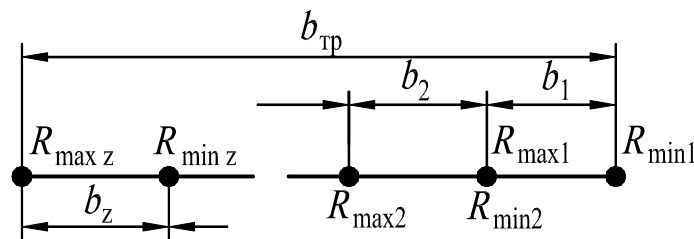


Рис. 4.20. Расположение режущих кромок при реализации несмежного секционирования

При радиальном расположении режущих кромок, когда  $R_{\min k}$  – радиус резцовой головки, на котором расположена точка  $k$ -й режущей кромки, наиболее приближенной к центру вращения инструмента, а  $R_{\max k}$  – радиус наиболее удаленной точки  $k$ -й режущей кромки, расположение точек, ограничивающих режущие кромки на радиусах, подчиняется условию:

$$\begin{cases} R_{\min k-1} = R_{\max k}, \\ R_{\max z} - R_{\min 1} = b_{mp}. \end{cases} \quad (4.50)$$

Ширина каждой из режущих кромок должна назначаться с учетом особенностей процесса резания и быть обоснована, поскольку протяженность режущей кромки ограничена жесткостью обрабатываемой системы,

условиями формирования и отвода стружки и т.д. Таким образом, с учетом ограничения ширины режущей кромки процессом резания  $b_k \leq [b_{рез}]$  система (4.50) будет иметь вид:

$$\begin{cases} R_{\min k-1} = R_{\max k}, \\ R_{\max z} - R_{\min 1} = b_{mp}, \\ R_{\max k} - R_{\min k} \leq [b_{рез}]. \end{cases} \quad (4.51)$$

Недостатком сочетания расположения и протяженности режущих кромок в соответствии с (4.50) или (4.51) является то, что на обработанной поверхности могут образовываться заусенцы, обусловленные несплошностью производящего контура, образованного множеством режущих кромок. Для устранения этого необходимо расчетное значение протяженности режущих кромок по возможности увеличить и расположить их с перекрытием, что обеспечивается, если

$$\sum_{k=1}^z R_{\max k} - R_{\min k} \geq b_{mp}. \quad (4.52)$$

В рассмотренном случае резцы группы располагаются на резцовой головке равномерно по окружности.

**Метод смежного секционирования.** В соответствии с этим методом резцы группы располагаются последовательно один за другим. Данный метод по сравнению с методом несмежного секционирования позволяет: управлять процессом удаления припуска; увеличивать протяженность режущей кромки; в ряде случаев обеспечить разгрузку формообразующих элементов резцов; снизить негативное влияние ударных нагрузок на них.

Для получения пазов с использованием метода последовательного секционирования необходимо, чтобы резцы, расположенные внутри одной группы, при обработке заготовки располагались так, чтобы процесс деления был невозможен.

В случае если режущие кромки располагаются радиально и ограничивающие их точки лежат на одинаковых окружностях, угол между смежными резцами в пределах секции должен подчиняться условию  $\beta_{в.с.} \leq [\beta]$ , в то время как для резцов, принадлежащих двум сопряженным секциям,  $\beta_{м.с.} > [\beta]$ .

Предельное граничное значение угла  $[\beta]$  можно найти из системы уравнений, приняв за искомое значение параметра  $\alpha$  значение  $\alpha \in \left[0, \frac{\pi}{i}\right]$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} [\beta] = \alpha(i-1) - \arccos\left(\frac{l(\cos(\alpha) - \cos(\alpha_{\max})) + R_1 \cos(\alpha_{\max}(i-1))}{R}\right), \\ 0 = l(\sin(\alpha) - \sin(\alpha_{\max})) + \\ + R_1 \left( \sin\left(\arccos\left(\frac{l(\cos(\alpha) - \cos(\alpha_{\max})) + R_1 \cos(\alpha_{\max}(i-1))}{R_2}\right)\right) - \sin(\alpha_{\max}(i-1)) \right), \\ \alpha_{\max} = \frac{1}{i} \arccos\left(\frac{l^2 + R^2 - r_{\max}^2}{2lR}\right), \end{array} \right. \quad (4.53)$$

где  $l$  – расстояние между осями вращения заготовки и инструмента;  $R_1$  – радиус, на котором располагается наиболее удаленная от центра вращения инструмента точка режущей кромки;  $R_2$  – радиус, на котором располагается наиболее приближенная к центру вращения инструмента точка режущей кромки;  $r_{\max}$  – наибольший (внешний) радиус окружности, ограничивающей ТЗК;  $i$  – отношение частот вращения инструмента и заготовки;  $\alpha$  – параметр, при котором траектория точки  $k$ -й режущей кромки радиуса  $R_1$  пересекается с траекторией точки  $k+1$  режущей кромки, расположенной на радиусе  $R_2$ ;  $\alpha_{\max}$  – параметр, при котором точка  $k$ -й режущей кромки пересекает внешнюю окружность заготовки.

Если определить значение предельного угла, при котором прекращается процесс деления  $[\beta]$ , и задаться углом между двумя сопряженными резцами в пределах секции  $\beta_{e.c.}$ , можно оценить возможность реализации варианта секционирования в каждом конкретном случае. Для этого необходимо определить расстояние между наиболее удаленными и наиболее приближенными к центру вращения точками двух смежных резцов по формуле

$$m_{1,2} = R_{1,2} \sqrt{2(1 - \cos(\beta_{e.c.}))}, \quad (4.54)$$

а также расстояние между соответствующими точками по дугам соответствующих окружностей резцовой головки:

$$m_{d1,d2} = R_{1,2} \beta. \quad (4.55)$$

В зависимости от полученных при расчете параметров возможно множество исполнения резцовых головок. Если расстояние между режущими зубьями внутри секции позволяет разместить их в отдельности, то головка имеет традиционную конструкцию, а при ограниченном расстоянии между режущими зубьями секция может быть выполнена в виде зубчатой вставки.

Из изложенного следует, что управление формообразованием пазов торцовых зубчатых контуров по схеме обработки с параллельными осями заготовки и инструмента достигается геометрическим методом за счет задания расположения его режущих элементов. Применение этого метода обеспечивает возможность управления количеством, расположением и параметрами формируемых пазов, а также позволяет упростить кинематику станков перенесением ее формообразующей функции на инструмент.

Для инструментов, обеспечивающих управление формообразованием пазов торцовых зубчатых контуров, целесообразно применять секционный принцип размещения режущих элементов, реализуемый методами не смежного, смежного и комбинированного секционирования при выполнении условий перекрытия, разгрузки формообразующих элементов, технологичности воспроизведения производящего контура, рационального распределения припуска между режущими элементами, полной выборки ими материала.

Схемы с параллельными осями инструмента и заготовки при обработке торцовых зубчатых контуров резцовыми головками могут быть реализованы на широкоуниверсальном зубошлицефрезерном станке модели ВС-50 с помощью поставляемого со станком сменного обрабатывающего модуля (см. главу 7).

## **Глава 5**

### **ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ ПО СХЕМЕ С НЕПРЕРЫВНЫМ ДЕЛЕНИЕМ**

Обработка ТЗК по рассмотренным выше схемам характеризуется циклическим изменением силы резания вследствие периодически повторяющихся процессов врезания и выхода режущих зубьев из контакта с заготовкой. Эти процессы имеют малую длительность, поэтому связанные с ними динамические нагрузки могут быть значительными, особенно если они изменяются с большой частотой.

Врезание сопровождается резким возрастанием нагрузки на шпиндель и упругих деформаций элементов привода, что отрицательно влияет на стойкость инструмента и качество обработки. Эти факторы определяются геометрией и установкой инструмента относительно заготовки, податливостью элементов станка, оснастки и инструмента.

Выход режущих лезвий инструмента из зоны резания характеризуется быстрым снятием нагрузки с механизмов станка. Если изменение скорости возникающих при этом колебаний шпинделя превышает среднюю скорость его вращения, раскрываются зазоры в зубчатых передачах и шлицевых соединениях привода главного движения. В этом случае возрастают уровень шума и интенсивность изнашивания деталей, возможно произвольное расцепление кулачковых муфт, снижение стойкости инструмента и т.п.

Частота повторяющихся циклов нагружения и разгружения исполнительных механизмов станка зависит от метода обработки, конструкции инструмента, скорости резания и параметров обрабатываемой системы.

#### **5.1. ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ**

Качество обработки зависит от реализуемой схемы формообразования, схемы срезания припуска, режима резания, жесткости и виброустойчивости обрабатываемой системы. Характер возникающих в обрабатываемой системе колебаний определяется ее конструктивными особенностями, схемой формообразования и изменением сил резания в процессе обработки. От параметров колебаний зависит стойкость режущего инструмента, энергозатраты на процесс обработки, долговечность оборудования и т.д. Поэто-

му для оценки эффективности схем формообразования важен анализ динамики процессов обработки.

Рассмотрим эту задачу для схемы обработки ТЗК секторным инструментом (см. табл. 3.1, схема 2.2), режущие элементы которого спрофилированы по форме паза и расположены в определенном угловом секторе.

При обработке поверхностей этим методом силы резания изменяются циклически. Частота повторяющихся циклов определяется методом формообразования пазов по ширине, конструктивными особенностями инструмента, скоростью резания и параметрами настройки обрабатываемой системы.

Рассмотрим случай, когда обработка производится инструментом, имеющим в секторе  $z$  режущих элементов, со скоростью резания  $V$  при частоте вращения  $n$ . Тогда частота  $f$  повторения циклов равна частоте контакта режущих элементов инструмента с заготовкой и составляет

$$f = \frac{nz}{60}. \quad (5.1)$$

Формообразование пазов по ширине лезвийным инструментом возможно одновременно методом копирования или в сочетании с методом следа. Сила резания в схемах обработки одним и равномерно расположенными резцами при одновременном формировании паза по ширине переменна по направлению. Изменяется также соотношение ее проекций в системе координат станка. При этом момент сопротивления  $M$ , который преодолевает привод станка, одинаков для всех контактов инструмента с заготовкой

$$M = M_{\max} = M_i + M_{x.x.}, \quad (5.2)$$

где  $M_i$  – момент сопротивления от сил резания;  $M_{x.x.}$  – момент холостого хода.

При обработке инструментом секторного типа паз формируется по ширине множеством резов, поэтому общий момент сопротивления равен сумме моментов, приходящихся на каждый режущий элемент, и момента холостого хода

$$M = \sum_{I=1}^{z_k} M_i + M_{x.x.}. \quad (5.3)$$

Здесь  $z_k$  – число режущих элементов, находящихся в контакте с заготовкой на ширине паза [24].



Из уравнения (5.3) следует, что в данном случае момент сопротивления от сил резания зависит от количества режущих элементов, одновременно контактирующих с заготовкой. Максимально возможное их число  $z_{\max}$  связано с шириной формируемого венца и геометрическими параметрами инструмента и определяется при перекрывании резцовым сектором ширины венца зависимостью

$$z_{\max} = \frac{2 \arcsin\left(\frac{2R}{h}\right)}{\psi} + 1, \quad (5.4)$$

где  $h$  – ширина формируемого венца;  $\psi$  – угловой шаг расположения режущих элементов.

В предельном случае

$$z_{\max} = z_{\text{общ}}, \quad (5.5)$$

где  $z_{\text{общ}}$  – общее количество режущих элементов в секторе.

Зависимости (5.3)–(5.5) позволяют определить максимальный момент сопротивления от сил резания, действующих на инструмент:

$$M_{\max} = \sum_{i=1}^{z_{\max}} M_i. \quad (5.6)$$

Для сравнения характера изменения моментов сопротивления от сил резания необходимо определить продолжительность их действия в течение цикла. Для схемы с единовременным формированием паза по ширине она равна времени контакта режущего элемента с заготовкой и определяется по формуле

$$t = \frac{\arcsin \frac{2R}{h}}{\pi n}. \quad (5.7)$$

Для схемы с последовательным формированием паза по ширине время контакта определяется взаимодействием всего режущего сектора с заготовкой:

$$t = \frac{2 \arcsin \frac{2R}{h} + \psi z_{\text{общ}}}{2\pi n}. \quad (5.8)$$

Если для схемы с единовременным формированием паза по ширине время действия максимального момента сопротивления равно времени контакта с заготовкой:

$$t_M = t, \quad (5.9)$$

то для схемы с последовательным формированием паза по ширине оно зависит от времени перекрытия обрабатываемого венца резцовым сектором и определяется по зависимости

$$t_M = \left| \frac{\Psi z_{\text{общ}} - 2 \arcsin \frac{2R}{h}}{2\pi n} \right|. \quad (5.10)$$

Модуль в формуле (5.10) учитывает тот случай, когда резцовый сектор не может перекрыть ширину венца.

Необходимо отметить, что по схеме с последовательным формированием паза по ширине имеет место колебание максимального момента сопротивления сил резания на протяжении времени  $t_M$ , обусловленное выходом из зоны контакта с заготовкой одних резцов и вступлением в контакт других. Произвести оценку этих колебаний можно через  $z_{\text{max}}$ . Общее число колебаний максимального момента сопротивления сил резания определяется из уравнения

$$N = z_{\text{общ}} - z_{\text{max}}. \quad (5.11)$$

Необходимо также отметить, что для схемы с последовательным формированием паза по ширине характерна ступенчатость нарастания максимального момента сопротивления от сил резания. Эту ступенчатость можно учесть через время  $t_n$ , определяемое по формуле

$$t_n = \frac{\Psi}{2\pi n}. \quad (5.12)$$

На основании изложенного выше построены диаграммы изменения моментов сопротивления от сил резания (рис. 5.1), позволяющие оценить динамику процессов обработки разными инструментами и схемами резания.

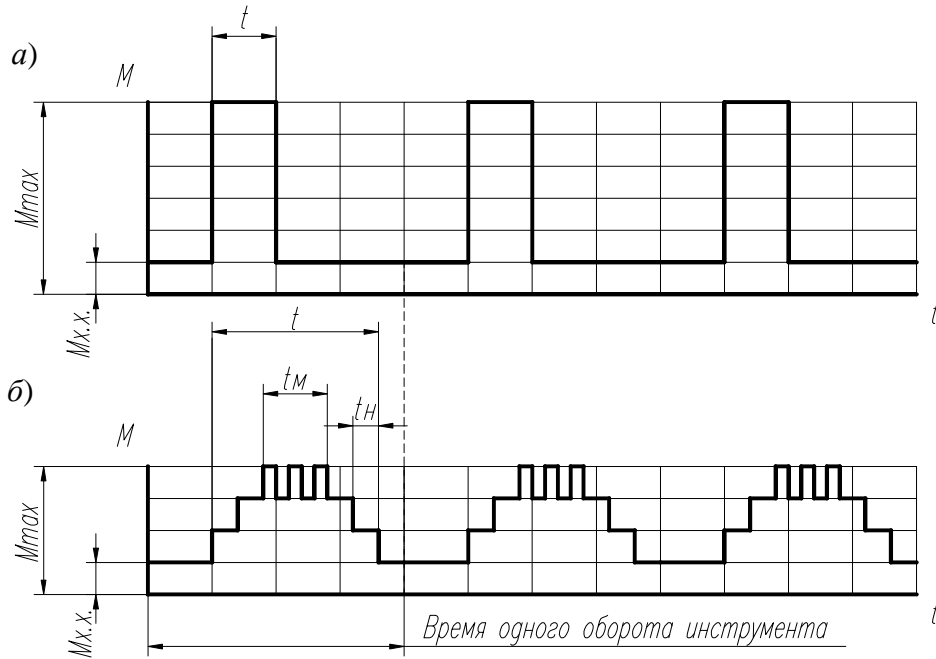


Рис. 5.1. Характер изменения момента сопротивления от сил резания:  
 а – при обработке одним резцом; б – при обработке секторным инструментом

Как следует из формул (5.4)–(5.8),  $M_{\max}$  имеет неодинаковые значения для различных схем формообразования и зависит от конструкции инструмента. Практический интерес представляет случай, когда значение  $M_{\max}$  минимально. Это условие имеет место при минимальных значениях  $M_i$  и  $z_{\max}$ , что обеспечивается оптимизацией конструкции инструмента.

На рисунке 5.2 представлены графики зависимостей максимального момента сопротивления от общего количества режущих элементов для трех различных случаев обработки, характеризующихся коэффициентом

$$k = \frac{z - 1}{z_{\text{общ}} - 1}.$$

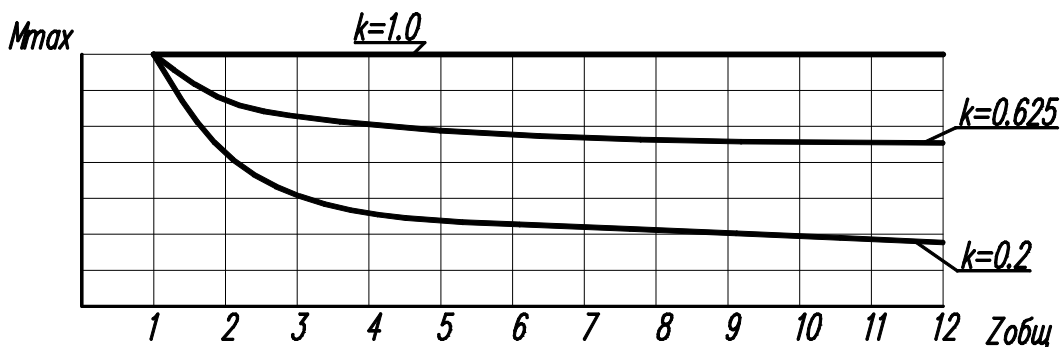


Рис. 5.2. Изменение момента сопротивления от сил резания

Из графиков (см. рис. 5.2) следует, что  $M_{\max}$  стремится к пределу, определяемому конструктивными особенностями инструмента.

Результаты проведенного анализа позволяют оценить динамику процессов обработки и управлять ими путем оптимизации конструкции инструмента и схемы резания.

## 5.2. ИЗМЕНЕНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПАЗОВ СЕКТОРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Секторный инструмент является общим случаем для всех рассматриваемых схем формообразования ТЗК. Поэтому для оценки характера изменения сил резания примем данный инструмент.

Составляющая  $P_z$  сил резания определяется по известной зависимости

$$P_z = C_{Pz} b^{X_{Pz}} a^{Y_{Pz}}, \quad (5.13)$$

где  $b$  – ширина среза;  $a$  – толщина среза;  $C_{Pz}$ ,  $X_{Pz}$ ,  $Y_{Pz}$  – постоянная и показатели степени для конкретных условий обработки.

При обработке различных материалов  $C_{Pz} = 1500 \dots 2000$ ,  $X_{Pz} = 1$ ,  $Y_{Pz} = 0,75$ .

Таким образом, изменение сил резания определяется схемой срезания припуска и величиной параметров, входящих в формулу (5.13).

Рассмотрим влияние этих факторов.

**Схема срезания припуска.** Перемещаясь по криволинейной траектории, создаваемой вращением и поступательным перемещением, лезвие зуба

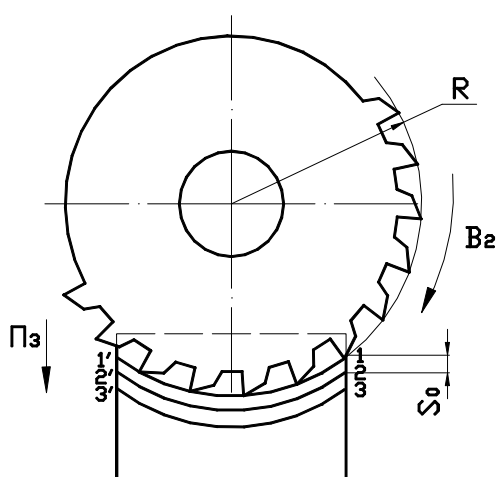


Рис. 5.3. Схема срезания припуска секторным инструментом

инструмента в точке 1 (рис. 5.3) вступает в контакт с заготовкой, врезается в нее и за рабочий ход, который кончается в точке 1', срезает с заготовки и превращает в стружку некоторый объем металла. Закончив рабочий цикл в точке 1', лезвие зуба инструмента продолжает движение по своей траектории вне пределов заготовки, пока не окажется в точке 2.

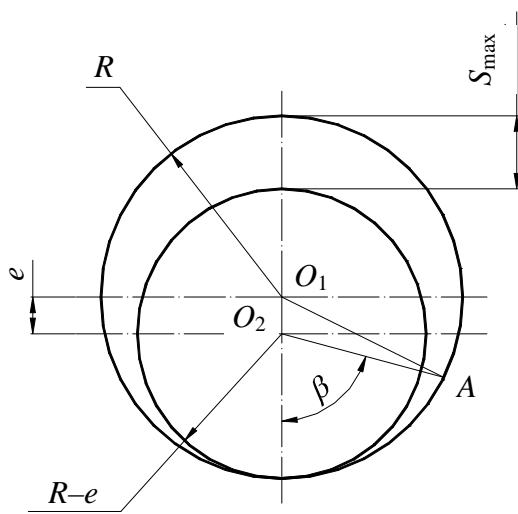
За один полный оборот инструмент перемещается перпендикулярно своей оси на величину подачи  $S_0$ . Поэтому следующие точки 2 и 2' начала и конца очередного рабочего цикла смещаются на  $S_0$  в направлении движения подачи  $P_z$ .

**Толщина срезаемого слоя.** Толщина срезаемого слоя при равномерном расположении режущих элементов на секторном инструменте с эксцентриситетом является непостоянной величиной и определяется по формуле

$$a_i = S_{i+1} - S_i, \quad (5.14)$$

где  $S_i$  – глубина реза  $i$ -м режущим элементом, которая при эксцентричной установке инструмента согласно рисунку 5.4 составит

$$S_i = -e \cos \beta_i + \sqrt{(e \cos \beta_i)^2 - e^2 + R^2} - R + e. \quad (5.15)$$



Изменение толщины срезаемого слоя, описываемое зависимостями (5.14) и (5.15), представлено в виде графика на рисунке 5.5.

Из графика видно, что толщина срезаемого слоя плавно изменяется с постепенным возрастанием в начале и уменьшением в конце обработки паза, что удовлетворяет требованиям с точки зрения динамики процесса резания.

Рис. 5.4. Схема установки дискового инструмента с эксцентриситетом

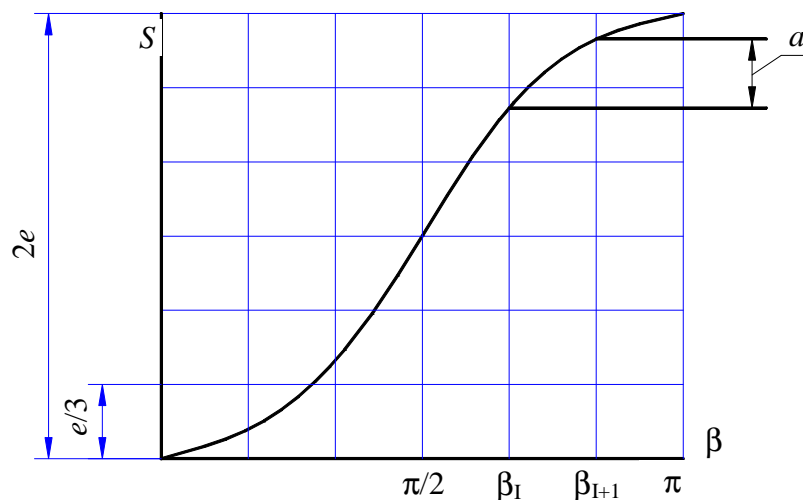


Рис. 5.5. Изменение толщины срезаемого слоя в зависимости от угла поворота инструмента

**Ширина срезаемого слоя.** Ширина  $b$  слоя, срезаемого зубом инструмента, зависит от параметров относительной установки инструмента и заготовки, а также от геометрии режущих элементов. В простейшем случае, когда режущая кромка параллельна оси вращения инструмента, ширина среза рассчитывается по формуле

$$b = B \cdot \cos \lambda, \quad (5.16)$$

где  $B$  – ширина режущего элемента.

Если режущие кромки расположены под углом  $\omega$  к оси вращения инструмента, например, для оптимизации процесса резания, то

$$b = B \cdot \cos(\lambda - \omega). \quad (5.17)$$

Таким образом, ширина срезаемого слоя постоянна в процессе обработки.

Результаты проведенного анализа позволяют установить общую закономерность изменения силы резания в процессе формообразования секторным инструментом. Подставляя в формулу (5.13) полученные зависимости (5.14), (5.16), получаем искомую зависимость

$$P_z = C_{P_z} (B \cos(\lambda))^{x_{P_z}} (S_{i+1} - S_i)^{y_{P_z}}. \quad (5.18)$$

Закономерность распределения сил резания между режущими элементами секторного инструмента графически представлена на рисунке 5.6.

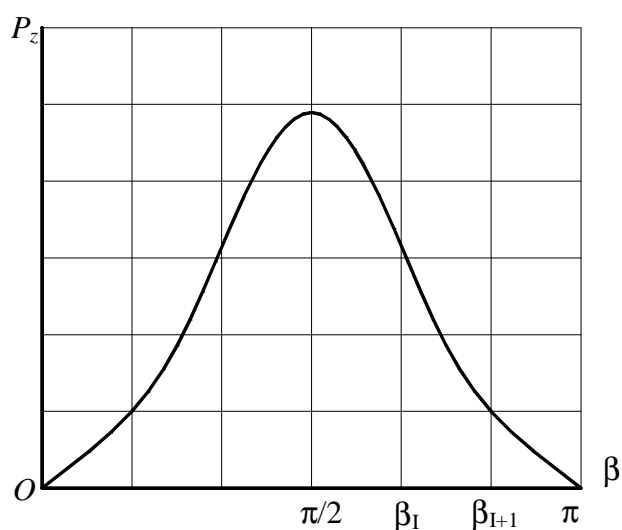


Рис. 5.6. Характер распределения сил резания между режущими элементами инструмента

Таким образом, главная составляющая силы резания по рассматриваемой схеме формообразования – переменная величина, следовательно, и момент сопротивления от сил резания  $M_i$ , равный

$$M_i \approx P_z \cdot R_i, \quad (5.19)$$

также является переменным, что необходимо учитывать при анализе характера изменения нагрузки на инструмент от сил резания.

### 5.3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ

Рассматриваемая схема обработки ТЗК секторным инструментом может быть реализована на широкоуниверсальных зубошлицефрезерных станках или на специальном оборудовании.

Из экономических соображений зачастую целесообразно применение универсальных станков при условии обеспечения динамической устойчивости процесса обработки, который по динамическим характеристикам отличается от типовых процессов обработки, характерных для этих станков.

Применение иного метода обработки может отрицательно влиять на основные показатели динамического качества станка: запас и степень устойчивости, чувствительность к внешним воздействиям, быстроедействие (время затухания переходных процессов) и др. В этой связи при использовании универсальных станков важно применять удовлетворяющий по динамике метод обработки, а также обеспечить возможность управления ею за счет параметров схемы резания и инструмента с исключением необходимости изменения конструкции станка.

Для уменьшения динамических нагрузок и крутильных колебаний в приводе известны следующие пути, которые реализованы в новой технологии обработки ТЗК секторным инструментом:

1) *исключение возможности возникновения в процессе обработки резонанса*, то есть выполнение за счет режимов резания условия

$$f_c \gg f_U \quad \text{или} \quad f_c \ll f_U, \quad (5.20)$$

где  $f_U$  – частота врезания режущих зубьев инструмента;  $f_c$  – собственная частота системы привода исполнительных органов станка, определяемая по формуле (5.21).

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2 e}}. \quad (5.21)$$

Здесь  $J_1$  – момент инерции шпинделя с заготовкой;  $J_2$  – момент инерции инструмента;  $e$  – податливость упругой связи динамической системы привода.

Из (5.21) следует, что выполнение условия (5.20) технически просто может быть обеспечено без изменения конструкции узлов станка за счет параметров инструмента, определяющих его момент инерции;

2) *улучшение демпфирующей способности привода*, то есть уменьшение амплитуды и ускорения затухания колебаний при врезании и выходе инструмента, что обычно обеспечивается введением в привод вращения инструмента упругого элемента. В рассматриваемом случае это неприемлемо из-за необходимости обеспечения постоянного передаточного отношения между заготовкой и инструментом. Поэтому задача уменьшения амплитуды колебаний должна решаться путем плавного изменения нагрузки, благодаря рациональному распределению срезаемого припуска между режущими зубьями инструмента. Это достигается при обработке секторным инструментом за счет его эксцентричной установки;

3) *выполнение условия замкнутости кинематической цепи*:

$$\frac{M_1}{n f_c J_1} (1 - 2,1 \cdot \eta) \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{M_{mp} + M_0}{M_1}\right)^2}{(1 - 2,1 \cdot \eta)^2}} \leq 0,65, \quad (5.22)$$

где  $M_0$  – постоянная составляющая крутящего момента;  $M_1$  – амплитуда переменной части крутящего момента, имеющей вид импульсов с крутым задним фронтом;  $M_{mp}$  – момент сил трения, действующих на шпиндель;  $n$  – частота вращения шпинделя;  $\eta$  – относительное демпфирование динамической системы привода.

Если в (5.22) параметры, определяемые станком, рассматривать как постоянные, на которые нельзя воздействовать, не изменяя его конструкцию, то имеем

$$\frac{M_1}{n f_c} C_1 \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{M_{mp} + M_0}{M_1}\right)^2}{C_2}} \leq 0,65, \quad (5.23)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные величины.



Из (5.23) следует, что управление динамикой процесса обработки по рассматриваемому критерию достигается за счет частоты вращения шпинделя.

Для сравнительной оценки динамики процессов обработки пазов указанными инструментами и выбора из них рационального были проведены экспериментальные исследования. Использовался комплект аппаратуры

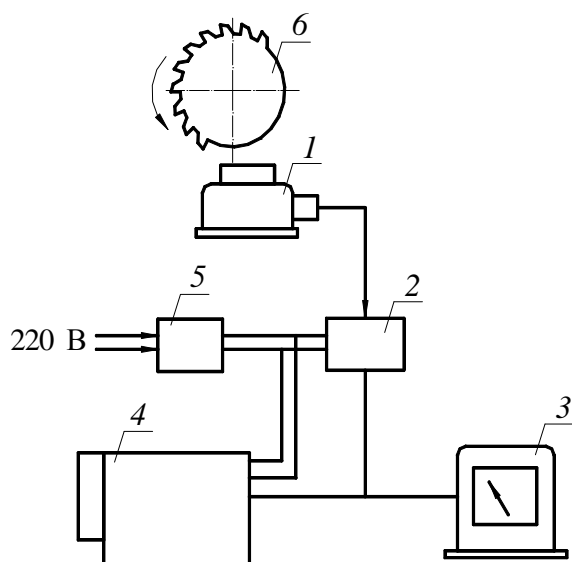


Рис. 5.7. Блок-схема комплекта аппаратуры для измерения сил резани

для измерения сил резания, включающий: универсальный динамометр УДМ-1200 1 (рис. 5.7); тензометрический усилитель ТА-5 2; светолучевой осциллограф Н-115 4; блок измерительных стрелочных приборов 3; стабилизатор напряжения 5.

Обработка осуществлялась инструментом 6 – секторным или резцовой головкой с одинаковыми параметрами режущих зубьев. Исследования проведены на горизонтально-фрезерном станке модели 6Р81 резцовой головкой радиуса 80 мм и секторным инструментом такого же радиуса с расположением режущих зубьев на угле 180°. Количес

тво режущих зубьев – 14. Экспериментальный комплекс для проведения исследований показан на рисунке 5.8.

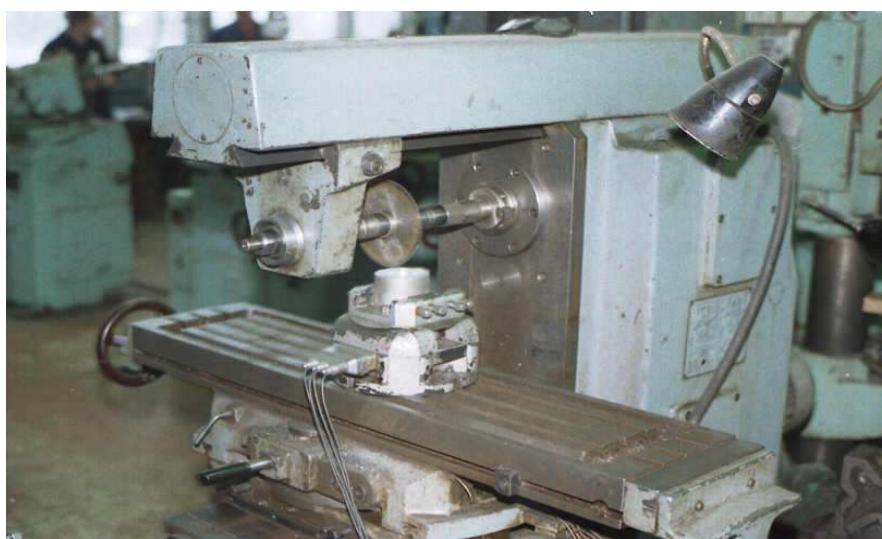


Рис. 5.8. Общий вид экспериментальной установки для исследования процесса обработки пазов

Пазы глубиной 3 и шириной 2 мм обрабатывались на заготовке с шириной венца 19,5 мм из материала АЛЗ обоими типами инструментов при частоте вращения  $100 \text{ мин}^{-1}$ , что соответствует скорости резания  $V = 50,5 \text{ м/мин}$ , и с подачей на зуб – 0,2 мм.

На рисунке 5.9, *а* показано изменение главной составляющей сил резания при обработке резцовой головкой, на рисунке 5.9, *б* – эксцентрично установленным секторным инструментом. Глубина резания, приходящаяся на режущий зуб, в обоих случаях одинакова.

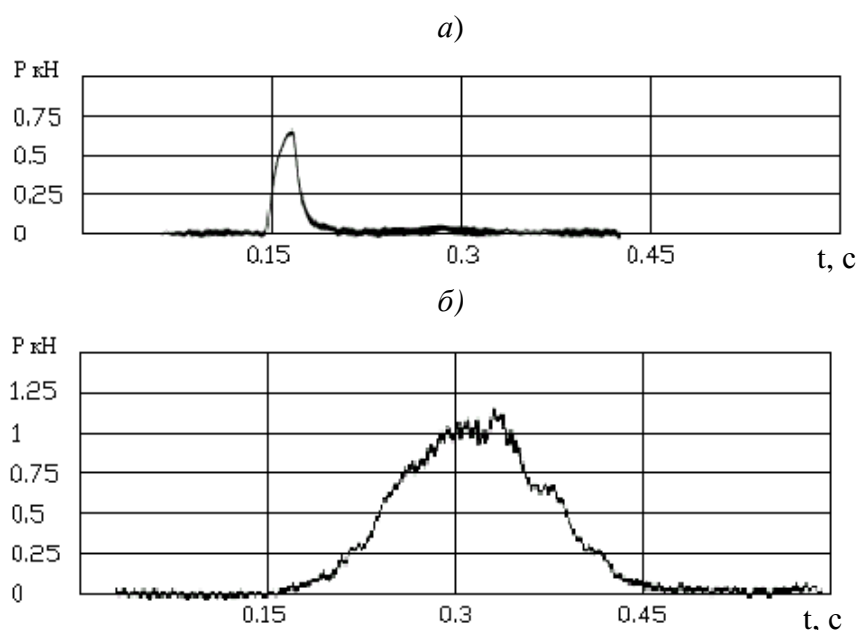


Рис. 5.9. Изменение главной составляющей силы резания при обработке пазов

Малое время контакта инструмента с заготовкой (0,06 с при обработке резцовой головкой и 0,5 с при обработке секторным инструментом) указывает на сходство характера изменения силы резания во времени для этих инструментов. Импульс  $S$ , сообщаемый заготовке при вступлении ее в контакт с режущим зубом, выражается зависимостью

$$S = \int_0^{\tau} P(t) dt \quad (5.24)$$

и равен площади фигуры, очерченной кривой  $P(t)$ , (см. рис. 5.9).

На основании полученных осциллограмм установлены величины импульсов для главной составляющей силы резания по каждому типу инструмента: при обработке резцовой головкой импульс  $S_1$ , создаваемый одним режущим зубом,  $S_1 = 0,0217 \text{ кНс}$ ; для инструмента секторного типа импульс  $S_2$ , создаваемый за один его оборот,  $S_2 = 0,171 \text{ кНс}$ .

Следует отметить, что для формирования одинаковых по глубине пазов в первом случае необходимо сообщить инструменту в 15 раз больше импульсов, что обусловлено подачей на зуб, равной 0,2 мм. Следовательно, приведенная величина импульса  $S'_1$  в первом случае составит  $S'_1 \approx 0,304$  кНс.

Из сопоставления полученных результатов следует, что импульс  $S$ , необходимый для формирования паза секторным инструментом, в 1,78 раза меньше, чем суммарное количество импульсов, затрачиваемое на формирование такого же паза резцовой головкой. Этим, а также более длительным временем контакта инструмента с заготовкой можно объяснить отсутствие ударных нагрузок при обработке в производственных условиях секторным инструментом на станках моделей ВС 50-9601 и ВС 30П-9253 пазов индукторов АБС автомобилей, высокую его стойкость, отсутствие выкрашивания режущих зубьев, имеющего место при обработке резцовыми головками.

Результаты исследований свидетельствуют о динамической устойчивости процесса обработки ТЗК на универсальных зубошлицефрезерных станках секторным режущим инструментом. При этом рациональные схемы срезания припуска и его распределения между режущими зубьями секторного инструмента позволяют существенно уменьшить динамические нагрузки и крутильные колебания в приводе главного движения, снизить энергетические затраты и увеличить срок службы инструмента по сравнению с обработкой пазов резцовыми головками.

#### **5.4. ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРИ ЕЕ ПРОЕКТИРОВАНИИ**

Характер изменения сил резания был установлен при анализе процесса обработки ТЗК секторным инструментом. Результаты данного анализа согласуются с экспериментальными данными по динамической устойчивости системы.

Экспериментально установлено изменение главной составляющей силы резания (рис. 5.10, кривая 1), которое в упрощенном виде может быть представлено в виде синусоидальной зависимости 2, описываемой уравнением:

$$P = F \left( \sin(\omega t) + \left| \sin(\omega t) \right| \right), \quad (5.25)$$

где  $F$  – коэффициент главной составляющей силы резания;  $\omega$  – угловая частота колебаний;  $t$  – время.

Изменение силы резания при обработке ТЗК по рассмотренной схеме приводит к возникновению в обрабатывающей системе колебаний, источником которых является процесс резания. Для исключения явления резонанса при проектировании обрабатывающей системы необходимо обеспечить определенный разрыв между частотой ее собственных колебаний и частотой изменения сил резания.

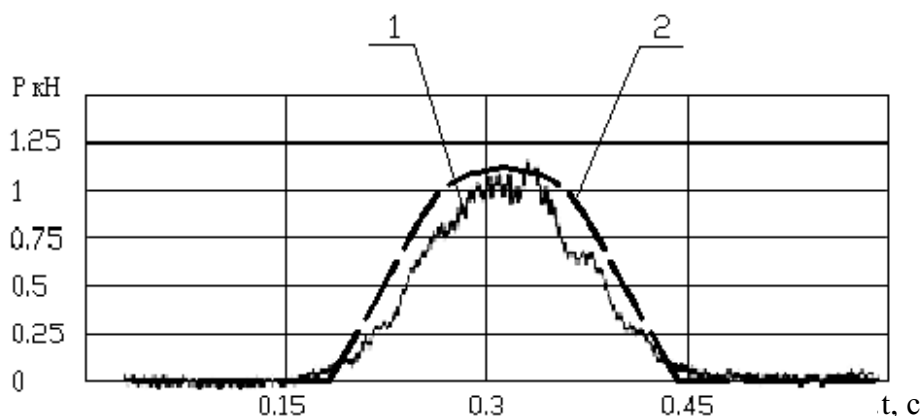


Рис. 5.10. Изменение главной составляющей силы резания при обработке торцового зубчатого контура

В частности, применительно к рассматриваемой схеме формообразования пазов задача сводится к определению частоты собственных колебаний инструментальной оправки или критической скорости, при которой теряется ее устойчивость и возникают недопустимые поперечные отклонения оси от геометрически правильного положения [37]. Такое состояние наиболее вероятно при совпадении угловой скорости вала с угловой частотой его собственных поперечных колебаний.

Критическая скорость вала с насаженным на него неуравновешенным диском определяется из условий равенства центробежной силы, под действием которой прогиб вала увеличивается, и восстанавливающей силы упругого вала

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{C}{m}}, \quad (5.26)$$

где  $C$  – жесткость вала;  $m$  – неуравновешенные вращающиеся массы.

Известно, что для устойчивого вращения вала между его рабочей угловой скоростью  $\Omega$  и критической скоростью  $\omega_{кр}$  должно быть выдержанно определенное соотношение, а именно: при работе в докритической зоне  $\omega_1 \geq 1,3\Omega$ ; при работе в надкритической зоне  $\omega_1 < 1,4\Omega$ .

Прогиб вала в рассматриваемом случае создается под действием не только центробежной силы, но и составляющей силы резания, нормальной к оси вращения вала. Действие данной силы носит внешний характер, поэтому обрабатываемая система имеет вынужденные колебания. В этом случае устойчивость системы оценивается коэффициентом демпфирования (коэффициент затухания или коэффициент сопротивления). При экспериментальном исследовании резонансной кривой данный коэффициент определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{\Delta\omega}{\omega_{кр}} \sqrt{\frac{A^2}{A_r^2 - A^2}}, \quad (5.27)$$

где  $A_r$  – амплитуда резонансных колебаний;  $A$  – избранная амплитуда вынужденных колебаний;  $\Delta\omega$  – разность частот, соответствующих равным амплитудам  $A$  на обеих ветвях резонансной кривой.

При анализе вынужденных колебаний необходимо учитывать, что силы резания изменяются по двум частотам, одна из которых соответствует изменению суммарной силы резания, а вторая определяется частотой входа и выхода из контакта с заготовкой режущих элементов.

Таким образом, обрабатываемая система испытывает воздействие внешних сил, характеризуемых двумя гармониками, при этом их составляющие воспринимаются колебательной системой по-разному, так как каждая имеет свой определенный, соответствующий ей коэффициент динамического усиления  $\nu$ . Величина коэффициента усиления в системе с одной степенью свободы для каждой из гармонических составляющих находится из уравнения:

$$A = \frac{A_0}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \gamma^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} = \nu A_0, \quad (5.28)$$

где  $A_0$  – перемещения от статической силы, равной амплитуде ее колебаний.

Основной динамический эффект обычно дают те гармонические составляющие сил резания (периодические силы), частоты которых близки к резонансным, так называемые околорезонансные гармонические, что определяется соотношением  $\omega/\omega_0$ . Поэтому кривая перемещения будет значительно отличаться от кривой изменения, вызывающей его динамической силы (см. рис. 5.10), что в общем случае влияет на геометрию обработанной поверхности.

Результатом поперечных колебаний инструмента при обработке пазов может быть, например, волнистость поверхности дна паза, показанная на рисунке 5.11, *а* в виде расположенного на ней выступа *l*.

Анализ обработанной поверхности позволяет выявить взаимосвязь характеристик ее качества с изменением силы резания с учетом режима обработки, конструктивных параметров инструмента и станка и исключить недопустимое влияние колебаний в обрабатывающей системе на геометрию обработанной поверхности (рис. 5.11, *б*).

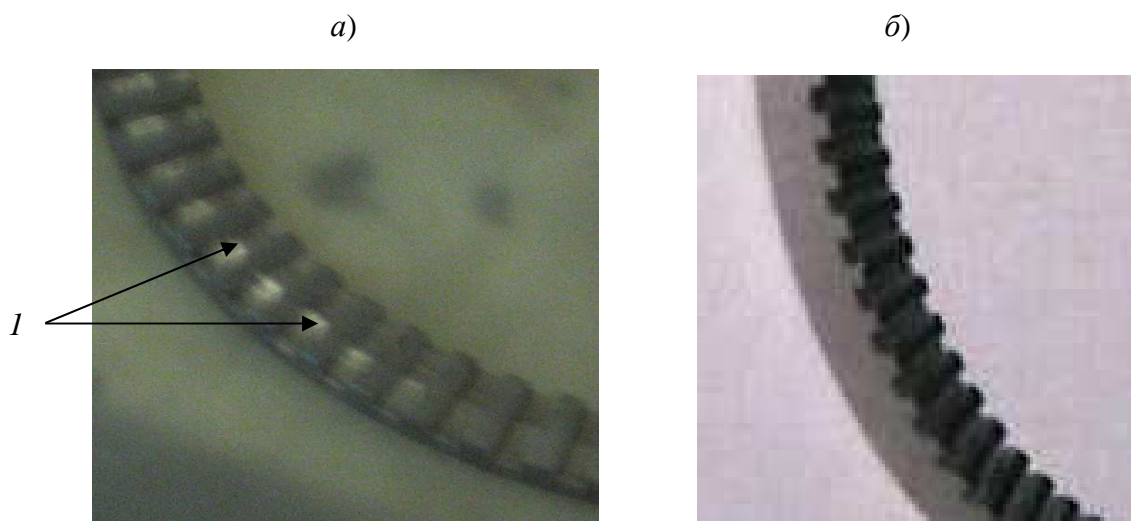


Рис. 5.11. Элемент обработанного торцового зубчатого контура:  
*а* – при наличии колебаний; *б* – при отсутствии заметных колебаний

Такой подход к определению параметров обрабатывающей системы был использован при проектировании специальных станков моделей ВС 50-9061 и ВС 30П-9253 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан» для обработки деталей с ТЗК, что обеспечило их высокую виброустойчивость и требуемое качество обработки различных типоразмеров индукторов АБС автомобилей, реализуемой на них.

Кроме рассмотренных поперечных колебаний оправка с режущим инструментом подвержена также крутильным колебаниям. Частота собственных крутильных колебаний определяется по формуле:

$$\omega_k = \frac{\beta}{l} \sqrt{\frac{Gg}{\rho}}, \quad (5.29)$$

где  $G$  – модуль упругости материала оправки при сдвиге;  $l$  – длина оправки;  $\rho$  – удельный вес материала стержня;  $\beta$  – корень уравнения частот.

Последствием действия крутильных колебаний в обрабатывающей системе является увеличение ее кинематической погрешности и нагрузки на элементы передач.

Таким образом, вышеизложенное свидетельствует об актуальности вопроса эффективного гашения колебаний в обрабатывающей системе. В частности, для гашения крутильных колебаний целесообразно применение демпферов (гасителей), основанных на введении сил трения в колебательную систему. Эффективность данного решения подтверждается опытом его применения в зубофрезерных станках. Например, в станке Lees-Bradner (США) применен демпфер сухого трения, состоящий из свободно вращающегося маховика, который поджимается с двух сторон фрикционными кольцами. Необходимо отметить, что применение демпферов такого типа эффективно только при значительных амплитудах колебаний. Поэтому при выборе типа демпфера необходимо исходить из кинематических особенностей обрабатывающей системы и схемы формообразования.

Например, фирмой «Ferrofluidics Corporation» для систем с шаговым двигателем, в которых ротор переводится из одного углового положения в другое под действием одиночного электрического импульса или серии таких импульсов, используется магнитожидкостный демпфер. При прерывистом вращении ротора применение такого демпфера позволяет существенно повысить точность позиционирования благодаря тому, что он поглощает энергию паразитных вибраций в процессе перехода на другую частоту вращения, из-за которых время перехода резко возрастает. Магнитножидкостный инерционный демпфер снижает также амплитуду резонансных колебаний, что исключает скачкообразное падение выходного момента.

Результаты исследования и рассмотренные пути обеспечения динамической устойчивости процесса обработки пазов на торцах детали использованы при создании инструментального оснащения (резцовых головок и режущих инструментов секторного типа) станков моделей ВС 50-9601 и ВС 30П-9253, а также реализованы при отработке на этих станках технологии нарезания плоского зубчатого контура индукторов системы АБС автомобилей.

## **Глава 6**

### **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ТОЧНОСТЬ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

Обрабатывающая система, реализующая схему формообразования и технологический метод обработки, должна обеспечивать заданную точность ТЗК, которая определяется точностью размеров, формы и расположения поверхностей пазов [20, 22]. Совокупность отклонений этих параметров от номинальных значений определяет погрешность обработки.

Анализ точности формообразования торцовых зубчатых контуров связан с определением ее зависимости от погрешности параметров обрабатывающей системы. На основе этой зависимости можно установить допустимые отклонения геометрических параметров режущего инструмента и заготовки, параметров их относительной установки на станке, что необходимо при конструировании режущего инструмента, технологической оснастки и обоснования требований к кинематической и геометрической точности станка, точности его настройки.

При прочих равных условиях точность обработки ТЗК обусловлена погрешностью формообразования его поверхностей. При определении погрешности формообразования не учитываются динамические, упругие и тепловые погрешности, обусловленные виброустойчивостью и жесткостью обрабатывающей системы, а также тепловыделением в ней. Таким образом, рассматривается абсолютно жесткая, находящаяся в термokonстантном объеме и не подверженная внешнему воздействию обрабатывающая система при постоянном отношении частот вращения инструмента и заготовки. В такой системе на погрешность обработки влияет только точность исполнения и относительного положения элементов обрабатывающей системы.

#### **6.1. ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ РЕЗЦОВОЙ ГОЛОВКОЙ**

##### **6.1.1. Факторы, влияющие на точность обработки**

Для обрабатывающей системы с резцовой головкой можно выделить множество факторов, влияющих на точность параметров формируемых поверхностей ТЗК (рис. 6.1).



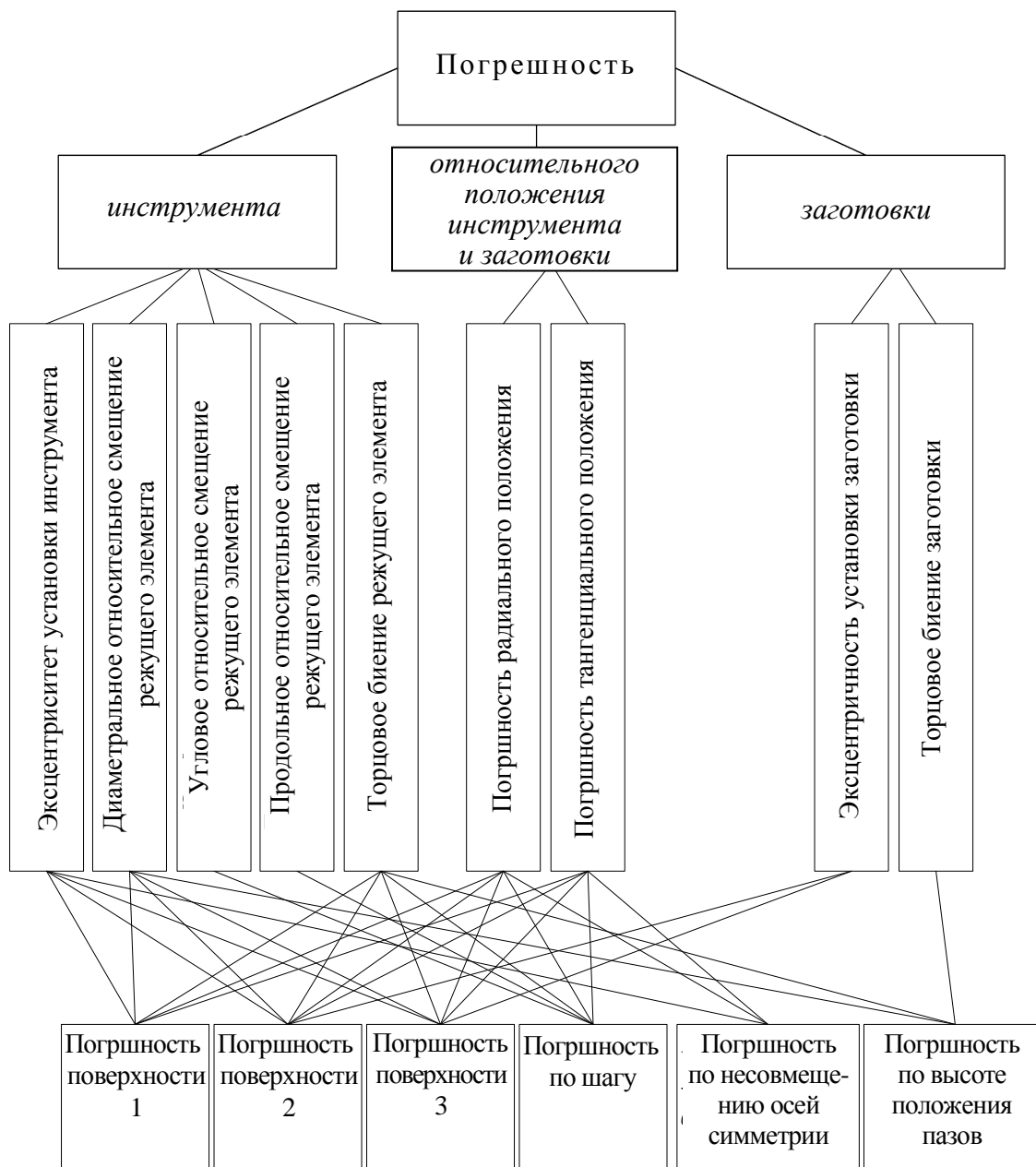


Рис. 6.1. Взаимосвязь погрешностей параметров обрабатывающей системы с точностью формируемого зубчатого контура

1. Для инструмента:

- эксцентриситет установки инструмента  $\Delta l$  (рис. 6.2, а);
- диаметральное относительное смещение режущих элементов  $\Delta D$  (рис. 6.2, а);
- угловое относительное смещение режущих элементов  $\Delta \lambda$  (рис. 6.2, а);
- продольное относительное смещение режущих элементов  $\Delta l$  (рис. 6.2, б);
- торцовое биение инструмента (определяется углом наклона)  $\Delta \beta$  (рис. 6.2, в).

2. Для заготовки:
  - эксцентricность установки заготовки  $e$  (рис. 6.3, а);
  - торцовое биение заготовки  $\delta$  (рис. 6.3, в).
3. Для относительного положения инструмента и заготовки:
  - погрешность радиального положения  $\Delta r$  (рис. 6.3, б);
  - погрешность тангенциального положения  $\Delta t$  (рис. 6.3, б).

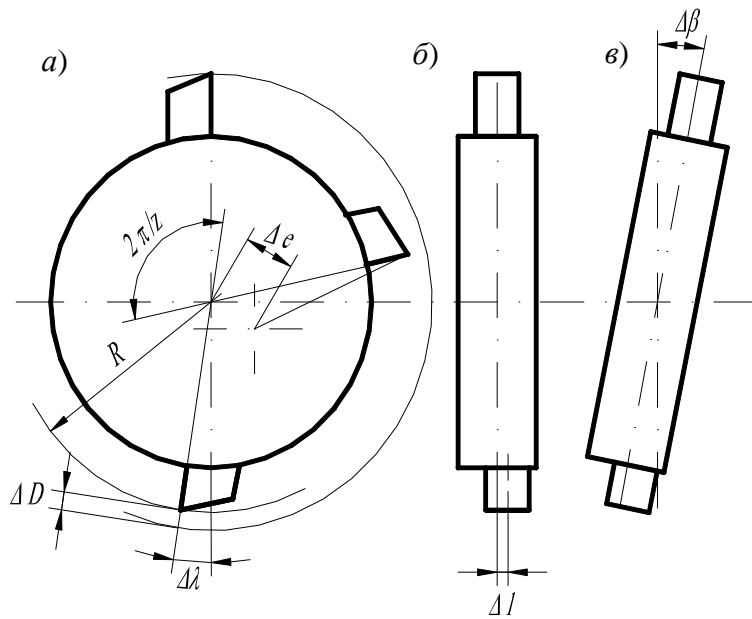


Рис. 6.2. Погрешности инструмента, влияющие на точность формообразования

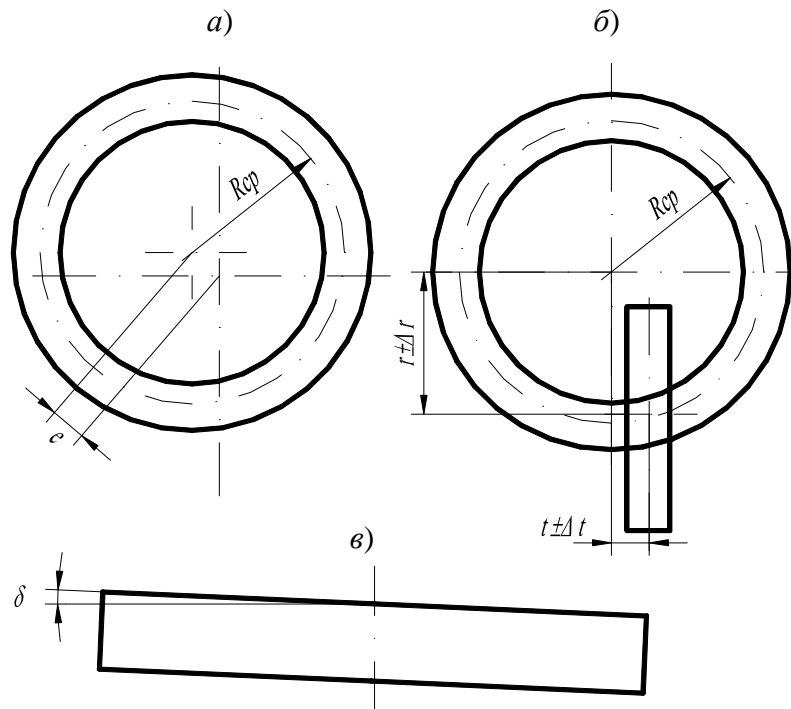


Рис. 6.3. Погрешности установки инструмента и заготовки

Влияние погрешности относительного положения элементов системы на точность обработки можно определить сравнением параметров получаемых элементов (профилей) с номинальной геометрией. Степень влияния отдельных элементов определяется при отсутствии погрешности установки элементов системы по другим параметрам.

При обработке резцовой головкой одновременно формируются три поверхности паза – боковые стороны 1, 3 и дно 2 (рис. 6.4, а), что обуславливает возможность возникновения погрешностей по каждой из них, их относительного положения и комплексной погрешности их ориентации.

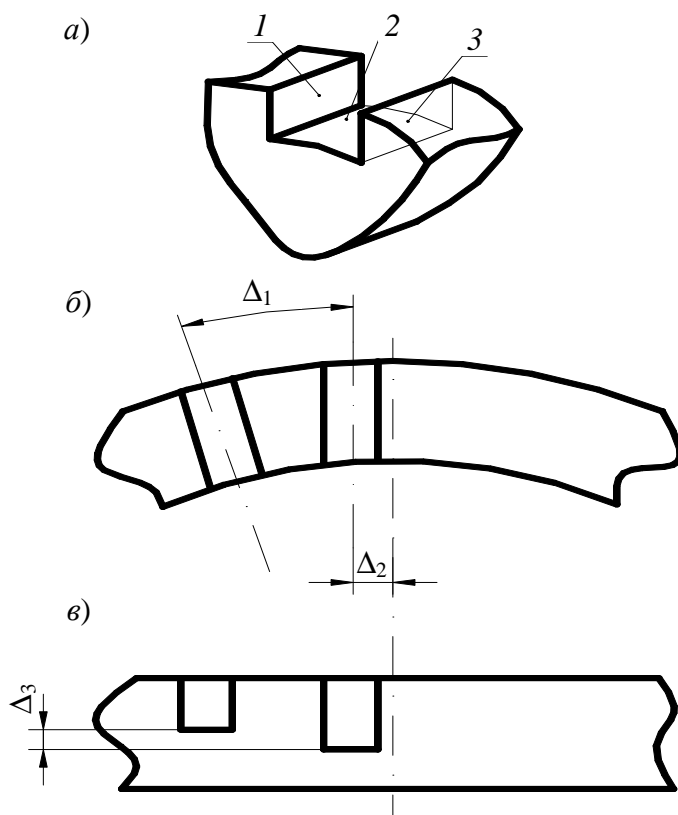


Рис. 6.4. Формируемые поверхности и погрешности их обработки:  
 а – относительное расположение формируемых поверхностей;  
 б – погрешность расположения пазов по окружности;  
 в – погрешность расположения пазов по высоте

На комплексную погрешность ориентации пазов влияют следующие факторы:

- погрешность по шагу  $\Delta_1$  (рис. 6.4, б);
- погрешность совмещения осей симметрии паза и заготовки  $\Delta_2$  (рис. 6.4, б);
- погрешность положения пазов по высоте  $\Delta_3$  (рис. 6.4, в).

Рассмотрим взаимосвязь погрешности настройки элементов системы с погрешностью формируемого зубчатого контура.

### 6.1.2. Влияние погрешности геометрических параметров инструмента на точность обработки

На погрешности ТЗК, зависящие от инструмента, влияют следующие факторы.

*Эксцентриситет установки режцовой головки*, который, изменяя номинальную траекторию инструмента, вызывает:

1. Погрешность  $\Delta$  формирования поверхности 2 паза (см. рис. 6.4).

Из рисунка 6.5 имеем

$$\Delta = \sqrt{(R + \Delta_e)^2 - \frac{h^2}{4}} - \sqrt{R^2 - \frac{h^2}{4}} - \Delta_e. \quad (6.1)$$

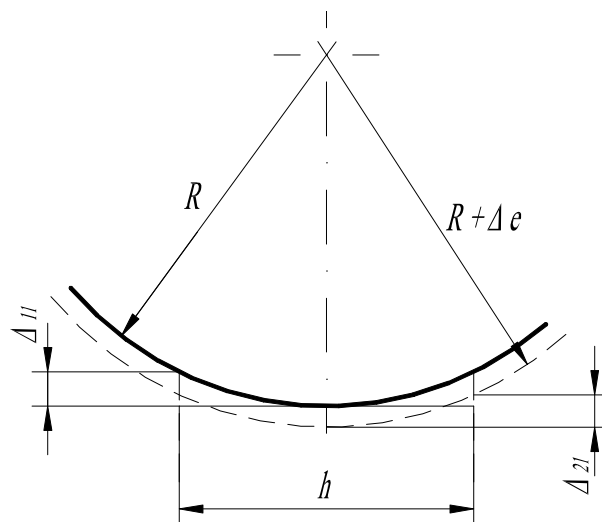


Рис. 6.5. К определению погрешности поверхности 2 из-за эксцентричной установки инструмента

2. Погрешность формы боковых поверхностей 3 и 1, а также несомещение осей симметрии паза и заготовки.

Данная погрешность возникает из-за изменения диаметра инструмента, что ведет к отклонению фактической траектории движения режущей кромки от номинальной. Определение величины отклонения рассмотрено ниже на основе математической модели схемы формообразования.

3. Угловое смещение  $\Delta\lambda$  режущих элементов, приводящее к погрешности относительного расположения пазов ТЗК, возможно определить из нижепредставленной формулы (6.2).

$$\Delta\lambda = \frac{2\pi}{Z} - 2 \left( \arctg \left( \frac{R \sin\left(\frac{\pi}{Z}\right)}{\left(R \cos\left(\frac{\pi}{Z}\right) - \Delta e\right)} \right) \right). \quad (6.2)$$

Данная зависимость следует из рисунка 6.2, а, согласно которому при наличии эксцентриситета установки инструмента изменяется угол между его режущими лезвиями, что и вызывает угловое смещение режущих элементов.

**Диаметральное относительное смещение режущих элементов.** В данном случае кроме погрешностей, вызванных изменением диаметра положения режущих элементов, возникает погрешность по высоте пазов  $\Delta_3$ . Величина этой погрешности равна диаметральному относительному смещению режущих элементов.

**Угловое относительное смещение режущих элементов.** Такое смещение приводит к возникновению погрешности шага расположения пазов. Так как обработка пазов ведется режущими элементами периодически, то и погрешность по шагу расположения пазов будет характеризоваться определенной периодичностью, при условии кратности числа режущих элементов числу пазов. В противном случае происходит «разбивка» пазов, исключаящая возникновение погрешности по шагу, но приводящая к увеличению их ширины по сравнению с ее номинальным значением.

При наличии углового смещения режущий элемент не вступает в контакт с заготовкой в расчетной точке, а получает дополнительное угловое смещение  $\Delta\lambda$ . Так как инструмент кинематически связан с заготовкой, то она повернется на угол

$$\Delta_1 = \frac{\Delta\lambda z}{m}, \quad (6.3)$$

где  $z$  – число режущих элементов;  $m$  – число обрабатываемых пазов.

**Продольное относительное смещение режущих элементов.** При обработке по рассматриваемой схеме возникает погрешность шага расположения пазов

$$\Delta_1 = \arcsin \frac{\Delta l}{R_{CP}}, \quad (6.4)$$

где  $R_{CP}$  – радиус положения пазов (радиус установки инструмента).

Кроме того, из-за наличия продольного смещения режущих элементов изменяются параметры относительного положения инструмента и заготовки, что приводит к комплексной погрешности расположения и ориентации пазов. Она будет определена ниже на основе математической модели схемы формообразования.

**Торцовое биение инструмента.** При наличии торцового биения инструмента изменяются параметры его установки, что приводит к возникновению погрешности шага расположения пазов и их ориентации. Так как данная погрешность является комплексной, то целесообразно оценивать ее, используя математическую модель схемы формообразования пазов.

### 6.1.3. Влияние погрешности заготовки на точность обработки

**Эксцентриситет установки заготовки.** При эксцентричной установке заготовки изменяется форма дна паза (поверхности 2, см. рис. 6.4, а). Допускаемая погрешность определяется допуском на глубину пазов.

Из рисунка 6.6 следует, что

$$\Delta = \Delta_{12} - \Delta_{22} = \sqrt{R^2 - \frac{h^2}{4}} - \sqrt{R^2 - \frac{(h-e)^2}{4}}. \quad (6.5)$$

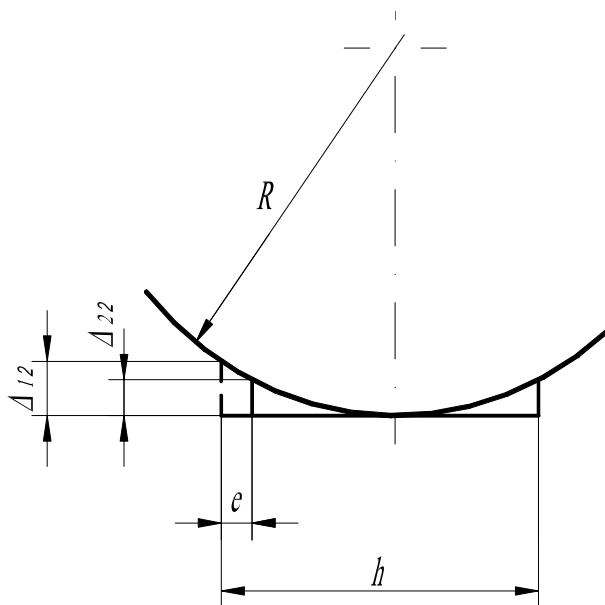


Рис. 6.6. Схема для определения погрешности дна паза при эксцентричной установке заготовки

**Торцовое биение заготовки.** В этом случае возникает погрешность по высоте пазов, величина которой равна биению заготовки.

#### 6.1.4. Влияние погрешности относительного расположения инструмента и заготовки на точность обработки

Неточность настройки относительного расположения инструмента и заготовки оказывает комплексное влияние на точность формирования зубчатого контура. Оценить ее удобнее на основе математической модели.

В математической модели схемы формообразования, описывающей траекторию движения любой точки режущей кромки, параметрами установки инструмента относительно заготовки являются расстояние между их осями и угол поворота инструмента относительно заготовки. Эти параметры аналитически связаны с величинами  $r$  и  $t$  (см. рис. 6.3):

$$\begin{aligned} r &= R_{CP} \cos \lambda, \\ t &= R_{CP} \sin \lambda, \end{aligned} \quad (6.6)$$

где  $R_{CP}$  – расстояние между скрещивающимися осями инструмента и заготовки.

Наличие погрешностей радиальной  $\Delta r$  и тангенциальной  $\Delta t$  установки инструмента приводят к изменению траектории движения режущей кромки, которая в этом случае описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} r + \Delta r = (R_{CP} + \Delta R_{CP}) \cos(\lambda + \Delta\lambda), \\ t + \Delta t = (R_{CP} + \Delta R_{CP}) \sin(\lambda + \Delta\lambda). \end{cases} \quad (6.7)$$

Подставив полученные значения погрешностей в математическую модель, можно определить величину отклонения траектории. Расчет величины отклонения траектории на основе математической модели приводится ниже.

По математической модели не выявляется погрешность формирования дна пазов, которая поэтому определяется отдельно.

Погрешность из-за неточного относительного радиального положения инструмента и заготовки идентична погрешности при эксцентричной установке заготовки с тем отличием, что она одинакова для всех пазов.

Погрешность из-за тангенциального смещения инструмента сводится также к погрешности от эксцентричности установки заготовки. При этом необходимо отметить существенное влияние направления погрешности. Если погрешность вызывает увеличение параметра  $t$  тангенциальной установки (см. рис. 6.3), то

$$e = r - \sqrt{R_{CP}^2 - (t + t\Delta)^2}. \quad (6.8)$$

Если же она приводит к уменьшению величины  $t$ , то

$$e = \sqrt{R_{CP}^2 - (t - t\Delta)^2} - r. \quad (6.9)$$

Следовательно, при различной направленности погрешности тангенциальной установки инструмента точность формирования поверхности 2 (дна паза) различна.

### 6.1.5. Погрешность схемы формообразования пазов

Кроме погрешностей, возникающих из-за неточности настройки компонентов обрабатывающей системы, при обработке пазов ТЗК образуются погрешности, обусловленные схемой формообразования. К ним относится, в частности, отклонение боковых граней пазов от прямолинейности. Она определяется по математической модели схемы формообразования, описывающей траекторию движения точки, принадлежащей режущей кромке.

Система уравнений, представляющая математическую модель схемы формообразования зубчатых контуров на торце, в простейшем случае имеет вид (3.4). Для раскрытия механизма возникновения погрешности и определения ее абсолютной величины рассмотрим схему, представленную на рисунке 6.7.

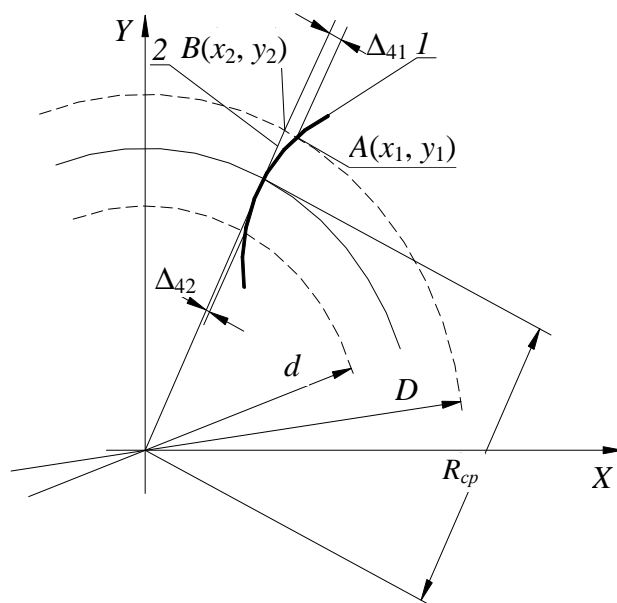


Рис. 6.7. К определению погрешностей, определяемых схемой формообразования



Из нее следует, что наибольшая величина погрешности имеет место на периферии зубчатого контура, заданного диаметрами  $D$  и  $d$ .

Обозначим  $\Delta_{41}$  погрешность, относящуюся к диаметру  $D$ , и  $\Delta_{42}$ , относящуюся к диаметру  $d$  заготовки.

Последовательность нахождения абсолютной величины погрешности рассмотрим на примере определения  $\Delta_{41}$ .

Пусть  $1$  – траектория точки, принадлежащей режущей кромке,  $2$  – заданная (номинальная) траектория режущей кромки.

Траектория  $1$  пересекает внешний диаметр заготовки  $D$  в точке  $A$  с координатами  $(x_1, y_1)$ . Траектория  $2$  пересекает внешний диаметр заготовки  $D$  в точке  $B(x_2, y_2)$ .

Координаты точки  $A$  определяются решением системы уравнений, состоящей из математической модели схемы формообразования и уравнения окружности максимального диаметра зубчатого контура:

$$\begin{cases} X_1 = R_{CP} \sin \alpha - R \sin(i\alpha) \sin(\alpha + \lambda), \\ Y_1 = R_{CP} \cos \alpha - R \sin(i\alpha) \cos(\alpha + \lambda), \\ X_1^2 + Y_1^2 = \frac{D^2}{4}. \end{cases} \quad (6.10)$$

Координаты точки  $B$  находятся из системы уравнений

$$\begin{cases} X_2 = Y_2 \operatorname{tg} \lambda, \\ X_2^2 + Y_2^2 = \frac{D^2}{4}. \end{cases} \quad (6.11)$$

Зная координаты точек  $A$  и  $B$ , находим погрешность  $\Delta_{41}$ :

$$\Delta_{41} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}. \quad (6.12)$$

Аналогично определяется погрешность  $\Delta_{42}$ .

Управляемыми параметрами, влияющими на величины  $\Delta_{41}$  и  $\Delta_{42}$ , являются радиус  $R$  режущей головки и отношение  $i$  частот вращения инструмента и заготовки. Остальные параметры схемы являются неуправляемыми, так как однозначно определяются геометрией обрабатываемой заготовки.

### 6.1.6. Определение погрешности обработки на основе математической модели схемы формообразования

Траектория движения точки, принадлежащей режущей кромке, в проекции на плоскость, перпендикулярной оси вращения заготовки, описывается системой уравнений (3.4).

Траектория движения точки может искажаться, вызывая погрешность обработки, при изменении одной или нескольких настраиваемых величин, входящих в систему уравнений (3.4). Такими величинами являются  $R_{CP}$ ,  $R$ ,  $i$ ,  $\lambda$ . Так как  $\lambda = f(R_{CP}, R, i)$ , то изменение траектории определяется погрешностями величин  $R_{CP}$ ,  $R$ ,  $i$ , связанных следующей зависимостью:

$$\lambda = \arccos\left(\frac{R_{CP}}{Ri}\right). \quad (6.13)$$

Тогда траектория движения точки, принадлежащей режущей кромке, в проекции на плоскость, перпендикулярной оси вращения заготовки, с учетом возможных погрешностей описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} X = (R_{CP} \pm \Delta R_{CP}) \sin \alpha - (R \pm \Delta R) \sin(i\alpha) \sin\left(\alpha + \arccos\frac{(R_{CP} \pm \Delta R_{CP})}{(R \pm \Delta R)i}\right), \\ Y = (R_{CP} \pm \Delta R_{CP}) \cos \alpha - (R \pm \Delta R) \sin(i\alpha) \cos\left(\alpha + \arccos\frac{(R_{CP} \pm \Delta R_{CP})}{(R \pm \Delta R)i}\right). \end{cases} \quad (6.14)$$

Погрешность обработки боковых сторон пазов можно оценить по координатам двух точек, принадлежащих траектории движения режущей кромки. Для более точной оценки рассматриваемые точки должны принадлежать внешнему  $D$  и внутреннему  $d$  диаметру зубчатого контура (рис. 6.8).

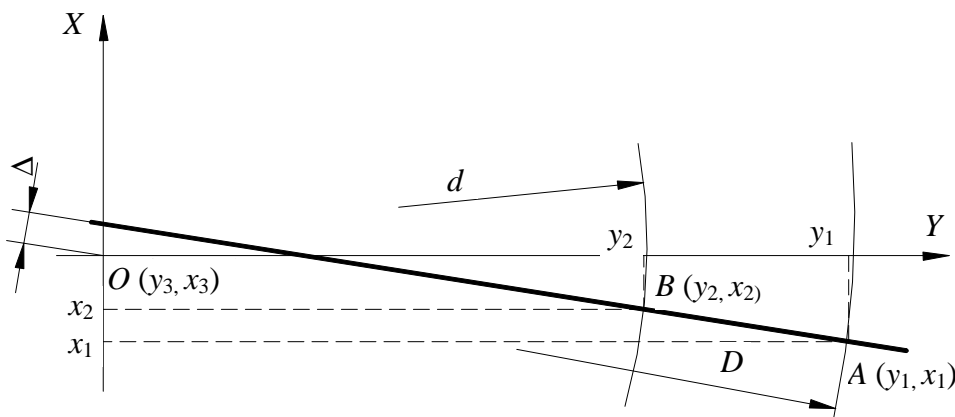


Рис. 6.8. Расчетная схема к определению погрешности формообразования

Уравнение прямой  $AB$

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \quad (6.15)$$

приводится к виду

$$Ax + By + C = 0, \quad (6.16)$$

где  $A = y_2 - y_1$ ;  $B = -(x_2 - x_1)$ ;  $C = -(x_1y_2 - x_2y_1)$ .

Расстояние  $\Delta_2$  от точки  $O(x_3, y_3)$  до прямой  $AB$  (см. рис. 6.8) составит

$$\Delta_2 = \left| \frac{Ax_3 + By_3 + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right|. \quad (6.17)$$

Так как  $x_3 = 0$  и  $y_3 = 0$ , то

$$\Delta_2 = \left| \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right| = \left| \frac{x_1y_2 - x_2y_1}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \right|. \quad (6.18)$$

### **6.1.7. Алгоритм расчета погрешности обработки торцового зубчатого контура резцовой головкой**

Результатом вышеизложенного анализа влияния погрешностей элементов обрабатывающей системы на точность формообразования является алгоритм расчета погрешности обработки ТЗК резцовой головки (рис. 6.9).

Этот алгоритм включает четыре этапа:

- ввод данных по анализируемой схеме формообразования и расчет параметров настройки системы;
- расчет погрешности траектории на внешнем диаметре торцового зубчатого контура;
- расчет погрешности траектории на внутреннем диаметре торцового зубчатого контура;
- расчет погрешности по симметричности расположения пазов, траектории движения режущей кромки и вывод полученных результатов.

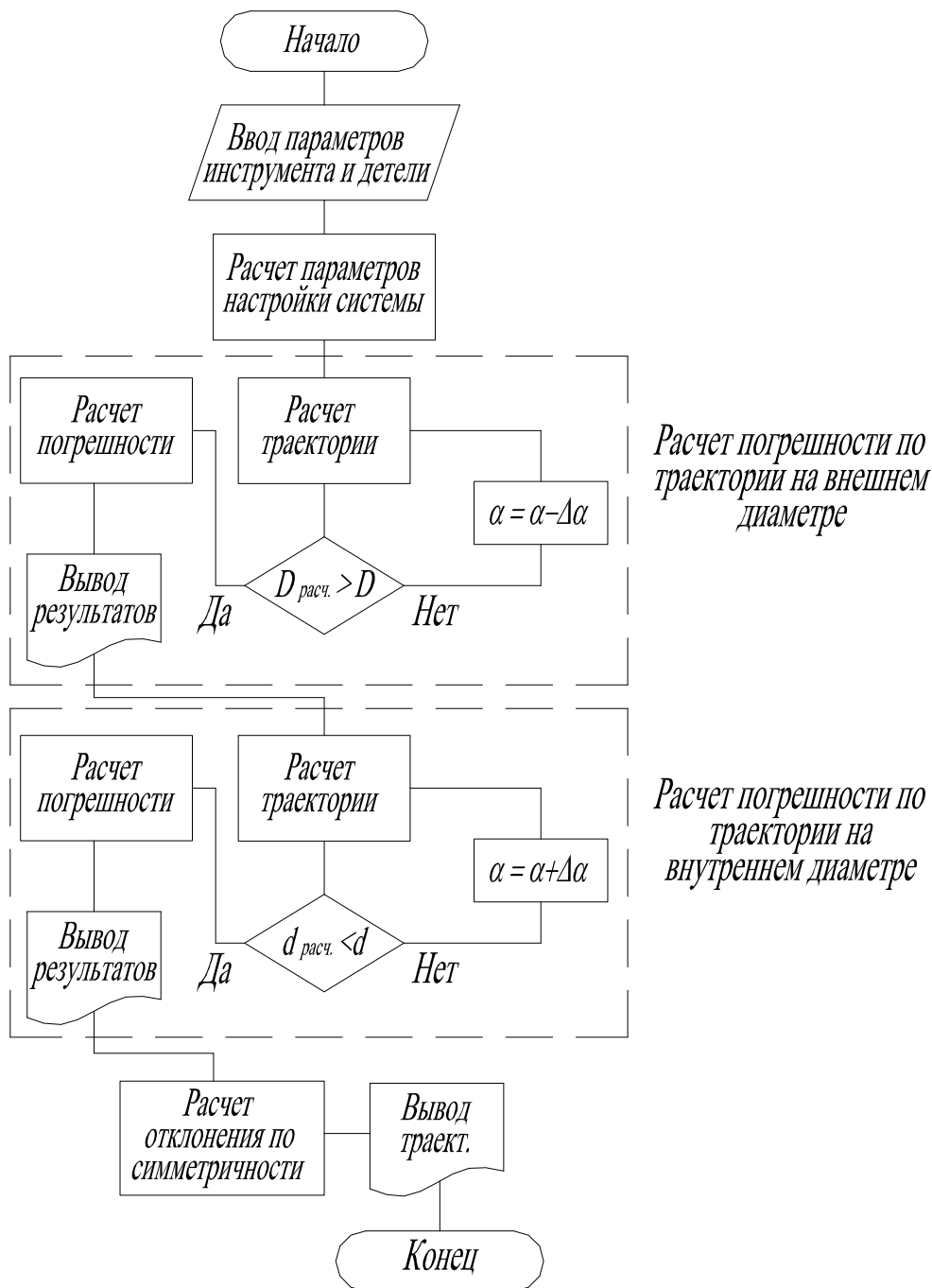


Рис. 6.9. Алгоритм расчета погрешности формообразования торцовых зубчатых контуров

Данный алгоритм реализован представленной ниже программой в среде программирования Qbasic:

```

CLS
SCREEN 12
COLOR 2
LOCATE 10, 10
  
```

```

REM "ВВОД ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ"
INPUT "ВВЕДИТЕ РАДИУС ИНСТРУМЕНТА -"; R
LOCATE 11, 10
INPUT "ВВЕДИТЕ РАДИУС УСТАНОВКИ ИНСТРУМЕНТА -"; L
LOCATE 12, 10
INPUT "ВВЕДИТЕ ВНЕШНИЙ РАДИУС ЗАГОТОВКИ -"; E
LOCATE 13, 10
INPUT "ВВЕДИТЕ ВНУТРЕННИЙ РАДИУС ЗАГОТОВКИ -"; F
LOCATE 14, 10
INPUT "ВВЕДИТЕ ПЕРЕДАТОЧНОЕ ОТНОШЕНИЕ -"; N
CLS

```

```

REM "РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ
МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ"

```

```

T = L1 ^ 2 / (R1 * N)
TR = (L1 ^ 2 - (L1 ^ 2 / (R1 * N)) ^ 2) ^ .5)
G = ATN(T / TR)
L = (T ^ 2 + TR ^ 2) ^ .5
PRINT "ИНСТРУМЕНТ СМЕЩАЕТСЯ НА "; L * TAN(G); "ММ."

```

```

10 REM РАСЧЕТ ПО ТРАЕКТОРИИ 1

```

```

FOR A = 0 TO -10 STEP -.00001
Y = L * SIN(A) - R * SIN(N * A) * SIN(A + G)
X = L * COS(A) - R * SIN(N * A) * COS(A + G)
IF (X ^ 2 + Y ^ 2) > E ^ 2 THEN GOTO 100
NEXT A

```

```

100 REM РАСЧЕТ ПО ТРАЕКТОРИИ 2

```

```

PRINT "X1="; X; "..."; "Y1="; Y
W = 0: Q = E
PRINT "X2="; Q; "..."; "Y2="; W
Z1 = ((Q - X) ^ 2 + (W - Y) ^ 2) ^ .5
X1 = X: Y1 = Y
PRINT "ПОГРЕШНОСТЬ НА ВНЕШНЕМ ДИАМЕТРЕ ЗАГОТОВКИ "; Z1

```

```

200 REM РАСЧЕТ ПО ТРАЕКТОРИИ 1

```

```

FOR A = 0 TO 10 STEP .00001
Y = L * SIN(A) - R * SIN(N * A) * SIN(A + G)
X = L * COS(A) - R * SIN(N * A) * COS(A + G)
IF (X ^ 2 + Y ^ 2) < F ^ 2 THEN GOTO 300
NEXT A

```

300 REM РАСЧЕТ ПО ТРАЕКТОРИИ 2

PRINT "X1="; X; "..."; "Y1="; Y

W = 0: Q = F

PRINT "X2="; Q; "..."; "Y2="; W

Z2 = ((Q - X) ^ 2 + (W - Y) ^ 2) ^ .5

X2 = X: Y2 = Y

PRINT "ПОГРЕШНОСТЬ НА ВНУТРЕННЕМ ДИАМЕТРЕ

ЗАГОТОВКИ "; Z2

COLOR 5

FOR A = 0 - 3.1415962# / (N \* 10) TO 0 + 3.1415962# / (N \* 10) STEP .00005

Y = L \* SIN(A) - R \* SIN(N \* A) \* SIN(A + G)

X = L \* COS(A) - R \* SIN(N \* A) \* COS(A + G)

PSET (X \* 7 - F \* 5, Y \* 10 + 240)

NEXT

CIRCLE (0 - F \* 5, 0 + 240), E \* 7, 2, 6.15, .1

CIRCLE (0 - F \* 5, 0 + 240), F \* 7, 2, 6.15, .1

LOCATE 23, 20

COLOR 2

PRINT "ТРАЕКТОРИЯ ТОЧКИ ПРИНАДЛЕЖАЩЕЙ"

LOCATE 24, 25

PRINT "РЕЖУЩЕЙ КРОМКЕ"

LOCATE 26, 5

PRINT "R="; R; " L="; L; " R внешн.="; E; " R внутр."; F; " N="; N

PRINT "D="; (X1 \* Y2 - X2 \* Y1) / ((Y2 - Y1) ^ 2 + (X2 - X1) ^ 2) ^ .5

END

## **6.2. Влияние погрешностей элементов обрабатывающей системы на точность обработки торцовых зубчатых контуров секторным инструментом**

Отметим, что большинство результатов, относящихся к определению погрешности обработки пазов резцовой головкой, применимы и к секторному инструменту. Поэтому в дальнейшем сохраняются принятые ранее обозначения поверхностей и их погрешностей.

### **Погрешности обработки пазов, определяемые инструментом**

На погрешности, определяемые инструментом, влияют следующие факторы:

- **эксцентриситет установки инструмента.** Эксцентриситет установки инструмента, как и при обработке резцовой головкой, влияет на фактический диаметр инструмента, от которого зависит погрешность формирования поверхности 2 (см. рис. 6.4). Эта погрешность рассчитывается по формуле (6.1). При эксцентричной установке инструмента образуется также погрешность, выражаемая неточностью боковых поверхностей пазов и несовмещением осей симметрии паза и заготовки. Данная погрешность возникает из-за изменения диаметра инструмента, что ведет к отклонению траектории движения режущих кромок первого и последнего режущего элемента формообразующего сектора. Величина отклонения определяется на основе математической модели схемы обработки ТЗК резцовой головкой.

- **диаметральное относительное смещение режущих элементов.** В данном случае кроме погрешностей, вызванных изменением диаметра расположения режущих элементов, возникает погрешность по высоте положения в пределах паза, что определяет точность выполнения его дна. Величина этой погрешности равна диаметральному относительному смещению режущих элементов;

- **угловое относительное смещение режущих элементов.** Это смещение приводит к возникновению погрешности по ширине формируемых пазов. Так как боковые грани пазов формируются первым и последним режущими элементами сектора, то только их угловое смещение будет определять точность выполнения пазов по ширине. Угловое относительное смещение всех остальных режущих элементов будет сказываться только на динамике процесса резания;

- **продольное относительное смещение режущих элементов.** Влияние этой погрешности аналогично угловому относительному смещению режущих элементов;

- **торцовое биение инструмента.** Торцовое биение инструмента вызывает изменение параметров его установки. Это приводит к возникновению погрешностей по ориентации и ширине пазов. Так как данная погрешность является комплексной, то удобнее всего оценивать ее, используя математическую модель схемы формообразования пазов.

### **Погрешности, определяемые заготовкой**

- **эксцентриситет установки заготовки.** Вследствие эксцентриситетности установки заготовки происходит изменение формы дна паза (по-

верхность 2, см. рис. 6.4, а). Она ограничивается допуском на глубину пазов и определяется по формуле (6.5);

- *торцовое биение заготовки*. Вызывает погрешность по высоте в пределах паза, величина которой равна величине биения.

### **Погрешность, определяемая относительным расположением инструмента и заготовки**

Наличие этой погрешности оказывает комплексное воздействие на точность формирования зубчатого контура. Поэтому производить оценку точности обработки удобнее всего на основе математической модели процесса формообразования.

Методический подход, используемый при анализе погрешностей обработки пазов секторным инструментом, аналогичен описанному выше для резцовой головки.

## **6.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКОВ НА ПАРАМЕТРЫ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

При проектировании режущего инструмента требуется установить допустимые отклонения его конструктивных параметров от номинальных значений в зависимости от требуемой точности обработки. Данная задача рассматривается ниже применительно к обработке резцовой головкой индукторов (роторов) системы АБС автомобилей семейства МАЗ (см. рис. 1.11).

Исходя из служебного назначения более высокие требования при обработке зубчатого индуктора (ротора) предъявляются к шагу расположения пазов. На точность этого параметра оказывают влияние следующие факторы:

- продольное относительное смещение режущих элементов;
- угловое относительное смещение режущих элементов;
- отклонение направления паза, определяемое схемой формообразования (погрешность схемы формообразования).

В общем виде погрешность  $\Delta$  шага расположения пазов выражается зависимостью

$$\Delta^{\circ} = (\Delta_{\text{I}}^{\circ} + \Delta_{\text{II}}^{\circ} + \Delta_{\text{III}}^{\circ})k, \quad (6.19)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий долю погрешности обработки в суммарной погрешности, вызываемой факторами, не зависящими от инструмента;  $\Delta_{\text{I}}^{\circ}$  – часть углового допуска по шагу расположения пазов, опреде-



ляемая относительным смещением режущих элементов; величина  $\Delta_I^\circ$  прямо пропорциональна продольному относительному смещению режущих элементов  $\Delta l$  и определяется по формуле (6.4);  $\Delta_{II}^\circ$  – часть допуска, обусловленная относительным угловым смещением режущих элементов  $\Delta_y$ , которое состоит из двух погрешностей:

$$\Delta_y = \Delta_{y1} + \Delta\lambda, \quad (6.20)$$

где  $\Delta_{y1}$  – угловое смещение режущих элементов, зависящее от точности их установки;  $\Delta\lambda$  – угловое смещение режущих элементов, обусловленное эксцентricностью установки инструмента (определяется по формуле (6.2)), для которой

$$\Delta e = \Delta h + \Delta p, \quad (6.21)$$

где  $\Delta h$  – эксцентricность, связанная с допуском по посадке инструмента на оправку;  $\Delta p$  – эксцентricность, обусловленная радиальным биением шпинделя станка;  $\Delta_{III}^\circ$  – часть допуска по шагу расположения пазов, определяемая схемой формообразования.

При линейном выражении величина  $\Delta_{III}^\circ$  прямо пропорциональна погрешности схемы формообразования  $\Delta_\phi$ , а при угловом выражении она идентична  $\Delta_I^\circ$ :

$$\Delta_{III}^\circ = \arcsin\left(\frac{2\Delta_\phi}{d}\right). \quad (6.22)$$

С учетом вышеизложенного зависимость для расчета погрешности шага расположения обработанных пазов имеет вид:

$$\Delta^\circ = \left( \arcsin\left(\frac{2\Delta_{II}}{d}\right) + \frac{(\Delta_{y1} + \Delta\lambda)Z}{m} + \arcsin\left(\frac{2\Delta_\phi}{d}\right) \right) k. \quad (6.23)$$

В уравнении (6.23) неизвестны величины  $\Delta_{II}$ ,  $\Delta_{y1}$  и  $\Delta\lambda$ . Если задаться двумя из них, то можно определить третью величину. Эта зависимость является исходной для определения допустимых отклонений конструктивных параметров режущего инструмента при его проектировании.

При дальнейшем анализе необходимо установить отклонения, определяемые относительным продольным и угловым смещением режущих

элементов. Относительное смещение режущих элементов  $\Delta_{II}$  зависит от погрешности изготовления корпуса и резцов, которая может быть установлена исходя из технологических соображений по зависимости

$$\Delta_{II} = \Delta_{II1} + \Delta_{II2}, \quad (6.24)$$

где  $\Delta_{II1}$  – погрешность изготовления корпуса;  $\Delta_{II2}$  – погрешность изготовления резца.

При этом

$$\Delta_{II2} = \Delta'_{II2} + \Delta''_{II2}, \quad (6.25)$$

где  $\Delta'_{II2}$  – погрешность изготовления установочных элементов резца;  $\Delta''_{II2}$  – погрешность заточки резца, обеспечивающая взаимозаменяемость режущих элементов.

Угловое смещение режущих элементов определяется выражением

$$\Delta_{y1} = \Delta'_{y1} + \Delta''_{y1} + \Delta'''_{y1}, \quad (6.26)$$

где  $\Delta'_{y1}$  – допуск, определяемый угловым расположением пазов;  $\Delta''_{y1}$  – допуск, определяемый погрешностями изготовления режущих элементов;  $\Delta'''_{y1}$  – допуск, определяемый погрешностями изготовления корпуса.

В качестве примера рассмотрим определение значений допусков параметров резцовой головки для обработки индуктора антиблокировочной системы автомобиля.

При решении этой задачи рассчитываются или задаются следующие параметры:

1) угловое смещение режущих элементов, определяемое эксцентricностью установки инструмента. Исходя из посадки между инструментом и оправкой ( $H7/h6$ )  $\Delta_h = 0,042$  мм. При допустимом радиальном биении шпинделя станка  $\Delta_p = 0,008$  мм исходное значение углового смещения режущих элементов в соответствии с формулами (6.2) и (6.21) составит  $\Delta\lambda = 0,029252^\circ = 1,77'$ ;

2) погрешность, обусловленная схемой формообразования. Рассчитана по приведенной выше программе и представлена в таблице 6.1 для различных вариантов конструкции резцовой головки.

Погрешность, определяемая схемой формообразования

№	Деталь				Инструмент		Погрешность, мм	
	Обозначение индуктора АБС	$D$ , мм	$D_{CP}$ , мм	$d$ , мм	$Z_{II}$	$R$ , мм		$Z_u$
1	543266-3538222	258	244	230	100	75	1	0,007
2							4	0,026
3							8	0,054
4	54321-3538212	148	140	132			1	0,004
5							4	0,009
6							8	0,017

Из таблицы следует, что для индукторов АБС 543266-3538222 и 9758-3538222-10 погрешность формообразования максимальна при обработке резцовой головкой с восемью режущими элементами и составляет  $\Delta_{\phi} = 0,054$  мм;

3) угловое смещение режущих элементов. Для его определения примем:  
 - допуск на угловое расположение пазов нормальной точности по 7-му качеству:  $\Delta'_{v1} = 1'15''$ ;

- допуск на размеры режущих элементов по 9-му качеству:  $\Delta''_{v1} = 1'$ ;

- допуск на размеры корпуса по 9-му качеству:

$$\Delta'''_{v1} = 1' \quad , \quad \Delta_{v1} = 1' + 1' + 1'15'' = 3,25'$$

Для принятых значений допусков в соответствии с формулой (6.23) имеем

$$10' = \left( \arcsin\left(\frac{2\Delta_{II}}{230}\right) + \frac{(3,25' + 1,77')8}{100} + \arcsin\left(\frac{2 \cdot 0,054}{230}\right) \right) 2,$$

откуда  $\Delta_{II} = 0,1529$  мм.

Таким образом, для обработки резцовой головкой торцового зубчатого контура индуктора АБС с требуемой точностью необходимо обеспечить продольное относительное смещение режущих элементов не более 0,1529 мм, что соответствует 9–10 квалитетам.

Изложенные выше результаты исследования точности обработки ТЗК использованы при проектировании режущих инструментов для обработки индукторов АБС автомобилей (см. главу 7).

## Глава 7

# РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ ПО СХЕМАМ С НЕПРЕРЫВНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ДЕЛЕНИЯ

Реализация рассмотренных выше способов обработки ТЗК по схеме с непрерывным делением связана с созданием соответствующих режущих инструментов и станочного оборудования.

### 7.1. СТАНОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ

Для обработки ТЗК в условиях серийного производства могут применяться как специальное станочное оборудование, так и модернизированные станки иного технологического назначения. На оборудовании обоих типов при соответствующем инструментальном оснащении реализуются высокопроизводительные процессы формообразования прерывистых поверхностей с периодически повторяющимся профилем по методу непрерывного деления.

Эффективным станочным оборудованием для обработки деталей с периодически повторяющимся профилем типа кулачковых муфт, шлицевых валов и т.п. являются, как показывает опыт эксплуатации станков-профиляторов немецких фирм «Wera», «Fortuna» и др., станки, работающие по методу кинематического профилирования. Высокая стоимость данного типа импортного оборудования ограничивает возможность его применения в отечественной промышленности, что обуславливает актуальность создания собственных аналогичных станков и их инструментального оснащения, реализующих прогрессивные процессы формообразования таких поверхностей.

Задача оснащения производства станками для обработки торцовых зубчатых контуров в зависимости от конкретных условий может решаться по следующим направлениям: проектирование специального оборудования с необходимым инструментальным оснащением; расширение технологических возможностей близких по кинематической структуре универсальных станков за счет обеспечения необходимых параметров настройки и оснащения их сменными обрабатывающими модулями; создание специальных станков на базе универсальных [41].



поперечного перемещения  $P_4$  от двигателя  $M_3$  относительно каретки  $IV$ . Последняя имеет возможность перемещения  $P_3$  по направляющим станины станка от двигателя  $M_2$ . Двигатели  $M_2$  и  $M_3$  управляются системой ЧПУ, обеспечивающей взаимосвязь движений  $P_3$  и  $P_4$  при обработке некруглых конических или фасонных поверхностей. Настройка скорости движения  $\Phi_v(B_1B_2)$  обеспечивается гитарой  $i_v$  внешней связи 3–4, по которой вращение от двигателя  $M_1$  передается во внутреннюю связь. Данная структурная схема обеспечивает реализацию на этом станке рассмотренных выше схем обработки торцовых зубчатых контуров резцовыми головками и секторными инструментами при скрещивающихся осях вращательных движений инструмента и заготовки.

Для реализации схем обработки, основанных на вращательных движениях инструмента и заготовки вокруг параллельных осей, используется сменный обрабатывающий модуль  $VI$  с горизонтально расположенным инструментальным шпинделем  $VII$ , который устанавливается вместо модуля  $V$ .

Во всех случаях обработка осуществляется методом кинематического профилирования, основанном на исполнительном движении  $\Phi_v(B_1B_2)$ . Необходимые наладочные и установочные перемещения бабки 3 и каретки 4, движения врезания и подачи обеспечиваются двигателями  $M_2$  и  $M_3$  от системы ЧПУ.

Перспективным направлением решения проблемы обеспечения станочным оборудованием производства деталей с ТЗК является расширение технологических возможностей универсальных станков для выполнения на них соответствующих схем формообразования. Такой подход реализован в широкоуниверсальном зубошлифцефрезерном станке модели ВС-50 (рис. 7.2) [11].

Этот станок создан совместно Витебским специальным конструкторским бюро зубообрабатывающих, шлифовальных и заточных станков (разработка рабочего проекта станка) с Полоцким государственным университетом (обоснование кинематической структуры станка, разработка и исследование схем формообразования некруглых и прерывистых поверхностей, разработка методики настройки станка, проектирование специальных режущих инструментов) и Витебским станкостроительным заводом (изготовление станка и специальных режущих инструментов) в результате выполнения ими двух заданий Государственной научно-технической программы «Создать и освоить в производстве новые базовые модели конкурентноспособного металлообрабатывающего оборудования и инструмента» (ГНТП «Станки и инструмент»).

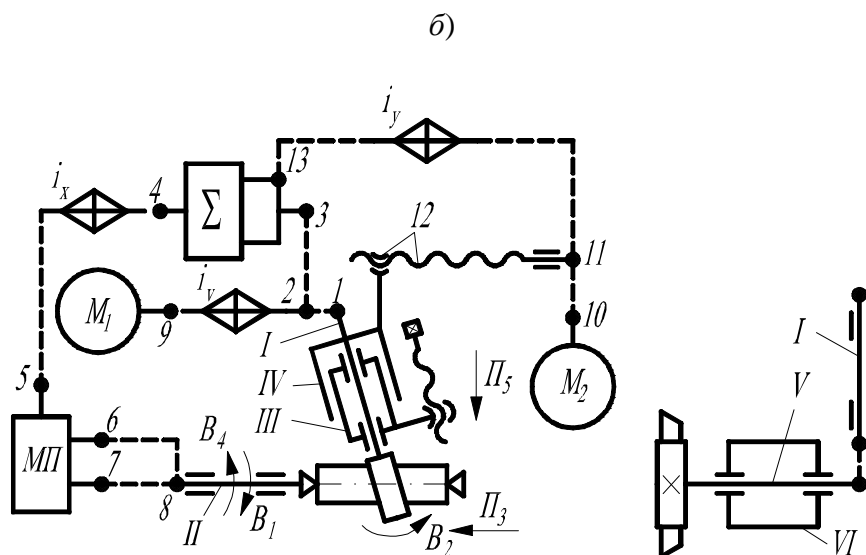
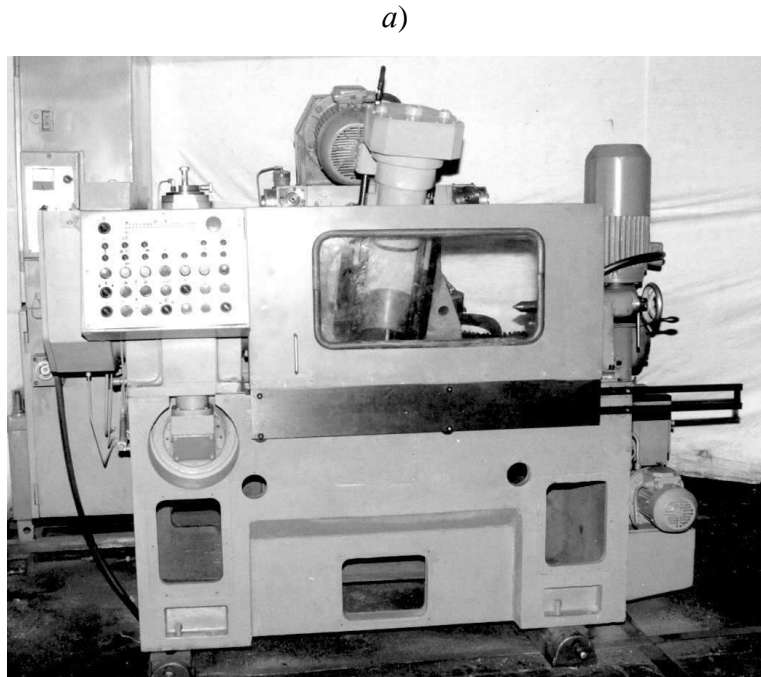


Рис. 7.2. Широкоуниверсальный зубошлицефрезерный станок модели ВС-50:  
 а – общий вид станка; б – структурная схема станка

Благодаря особенностям кинематики и сменным обрабатывающим модулям станок позволяет: нарезать прямозубые и косозубые цилиндрические зубчатые колеса и шлицевые валы червячными, модульными дисковыми и концевыми фрезами; обрабатывать наружные и внутренние резьбы дисковыми и гребенчатыми фрезами; шпоночные пазы, винтовые канавки и многогранники – концевыми фрезами; червяки – дисковыми фрезами и долбяками, а также некруглые и прерывистые поверхности с периодически повторяющимся профилем, включая зубчатые контуры на торцовых и на-

ружных поверхностях деталей, по методу кинематического профилирования разнообразными инструментами с точечными и линейчатыми производящими элементами; обрабатывать плоские поверхности и многогранники концевыми или торцовыми фрезами.

Широкие технологические возможности станка обеспечиваются кинематическими связями между исполнительными органами (рис. 7.2, б) и сменными модулями для установки соответствующих инструментов.

Инструментальный шпиндель  $I$  (см. рис. 7.2, б) соединен кинематической цепью внутренней связи  $1-2-3-\Sigma-4-i_x-5-MII-6-8$ , содержащей суммирующий механизм  $\Sigma$ , гитару деления  $i_x$  и переключающий механизм  $MII$ , со шпинделем  $II$ , несущим обрабатываемое изделие.

Благодаря наличию переключающего механизма  $MII$  данная цепь содержит две ветви:  $5-MII-6-8$ ;  $5-MII-7-8$ , участки 6–8 и 7–8 которых имеют различные передаточные отношения. Такая структура внутренней связи обеспечивает широкие технологические возможности станка модели ВС-50, в частности по числу обрабатываемых пазов на торцах деталей и зубьев шестерен.

Кинематически со шпинделем  $I$  связан инструментальный шпиндель  $V$  сменного обрабатывающего модуля  $VI$ , который устанавливается на суппорте  $III$  станка и обеспечивает параллельное расположение шпинделей  $II$  и  $V$ .

Кинематическая структура, конструкция и созданное инструментальное оснащение станков моделей ВС-400Ф2 и ВС-50 обеспечивают обработку:

- пазов на торцевых поверхностях деталей типа кулачковых и храповых муфт и других изделий;
- пазов на наружных поверхностях деталей типа шлицевых валов, звездочек, храповых колес и т.п. резцовыми головками;
- некруглых наружных поверхностей резцовыми головками, эксцентрично установленными цилиндрическими, дисковыми, ротационными и комбинированными инструментами.

Специальное станочное оборудование для обработки ТЗК было создано на базе универсальных зубообрабатывающих станков производства Витебского станкостроительного завода в рамках Региональной научно-технической программы «Инновационное развитие Витебской области». По заданию «Разработать и исследовать прогрессивные способы формообразования прерывистых поверхностей и режущие инструменты для повышения универсальности зубошлицефрезерных станков» (исполнители Полоцкий государственный университет и Витебский станкостроитель-



ный завод) этой программы созданы два специальных станка: модели ВС50-9601 на базе широкоуниверсального зубошлицефрезерного станка ВС-50 и ВС30П-9253 (рис. 7.3) на базе универсального зубофрезерного станка модели ВС30П.

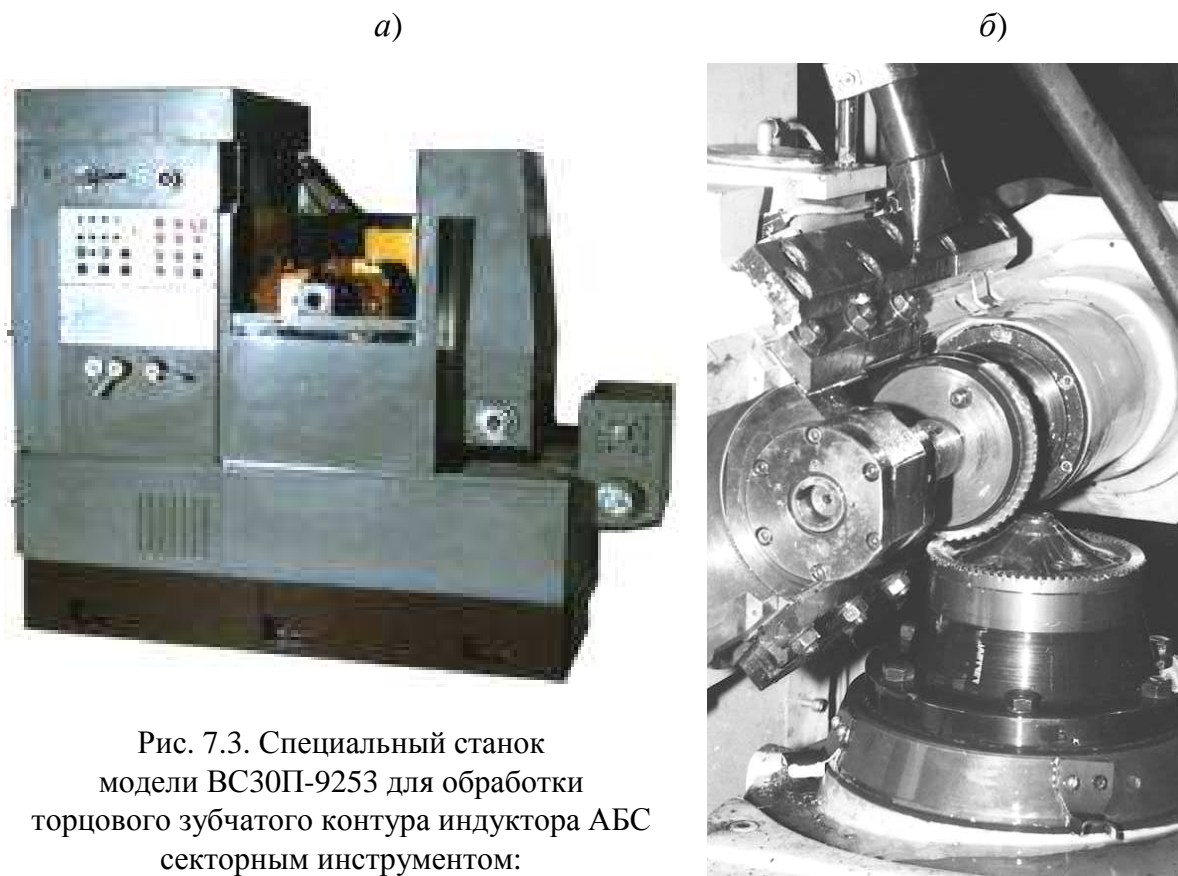


Рис. 7.3. Специальный станок модели ВС30П-9253 для обработки торцового зубчатого контура индуктора АБС секторным инструментом:  
*a* – общий вид станка; *б* – рабочая зона станка

Указанные модели станков изготовлены соответственно для Минского автомобильного завода и Канашского автоагрегатного завода (Россия) для обработки индукторов системы АБС автомобилей. Оба станка реализуют схемы нарезания плоских зубчатых контуров на торцах деталей резцовыми головками и секторными инструментами по методу кругового протягивания с непрерывным движением деления. Созданные станки и оборудование обеспечивают по сравнению с применяемой технологией нарезания торцовых зубчатых контуров по схеме с дискретным движением деления повышение в 2,5–4 раза производительности обработки при более высокой точности шага расположения пазов. Кроме повышения производительности и уровня автоматизации производства, созданные станки исключают необходимость в приобретении аналогичного импортного оборудования типа станков-профиляторов фирмы «Wera» (Германия).

## 7.2. РЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ

Конструкция режущего инструмента для обработки зубчатого контура в части количества и расположения режущих элементов во многом определяется реализуемой схемой формообразования и кинематической схемой обработки. Здесь рассматриваются два типа созданных инструментов для обработки ТЗК по прогрессивным схемам с непрерывным движением деления: резцовые головки и инструменты секторного типа [31].

### 7.2.1. Инструменты типа резцовых головок

Обработка ТЗК возможна резцовыми головками с радиальным или осевым расположением режущих элементов. Головки первого типа применяются в схемах обработки при сообщении заготовке и инструменту согласованных вращательных движений вокруг скрещивающихся осей (см. рис. 3.1), а инструменты второго типа – при параллельном расположении указанных осей (см. рис. 4.1).

Резцовая головка с радиальным расположением режущих элементов (рис. 7.4) представляет собой корпус 1 с равномерно расположенными по окружности пазами. В них с помощью прихватов закреплены резцы 2, спрофилированные по форме обрабатываемых пазов. Резцовая головка устанавливается на станке посредством стандартной оправки.

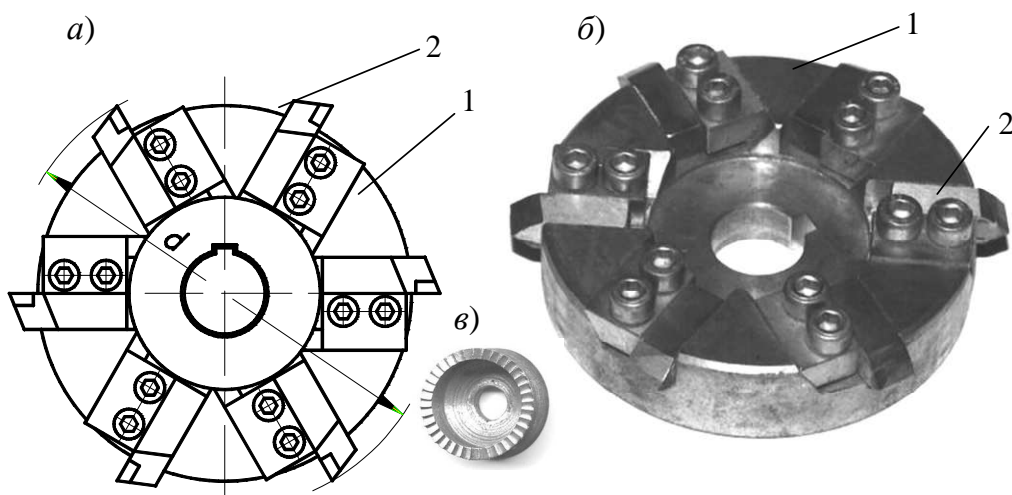


Рис. 7.4. Конструкция резцовой головки (а, б)  
и деталь (в) с обработанным ею ТЗК:  
1 – корпус; 2 – резец

Резцовые головки с радиальным расположением режущих элементов наиболее эффективны при обработке торцовых зубчатых контуров с короткими пазами, так как с уменьшением длины пазов уменьшается погрешность их формообразования.

Инструмент данного типа может использоваться также для обработки зубчатого контура на наружных цилиндрических и конических деталях (рис. 7.5 и 7.6) [14]. В этом случае рекомендуется, чтобы конструкция узла крепления резца обеспечивала установку его передней поверхности под углом к оси вращения инструмента, равным, в частности, углу скрещивания ее с осью вращения заготовки. При выполнении данного условия резцы профилируются по форме обрабатываемых пазов, которые могут быть ограничены прямыми и кривыми линиями (детали типа шлицевых валов с прямоугольными, треугольными, эвольвентными и другой формы пазами, зубчатых и храповых колес, звездочек и т.п. (рис. 7.5, в)).

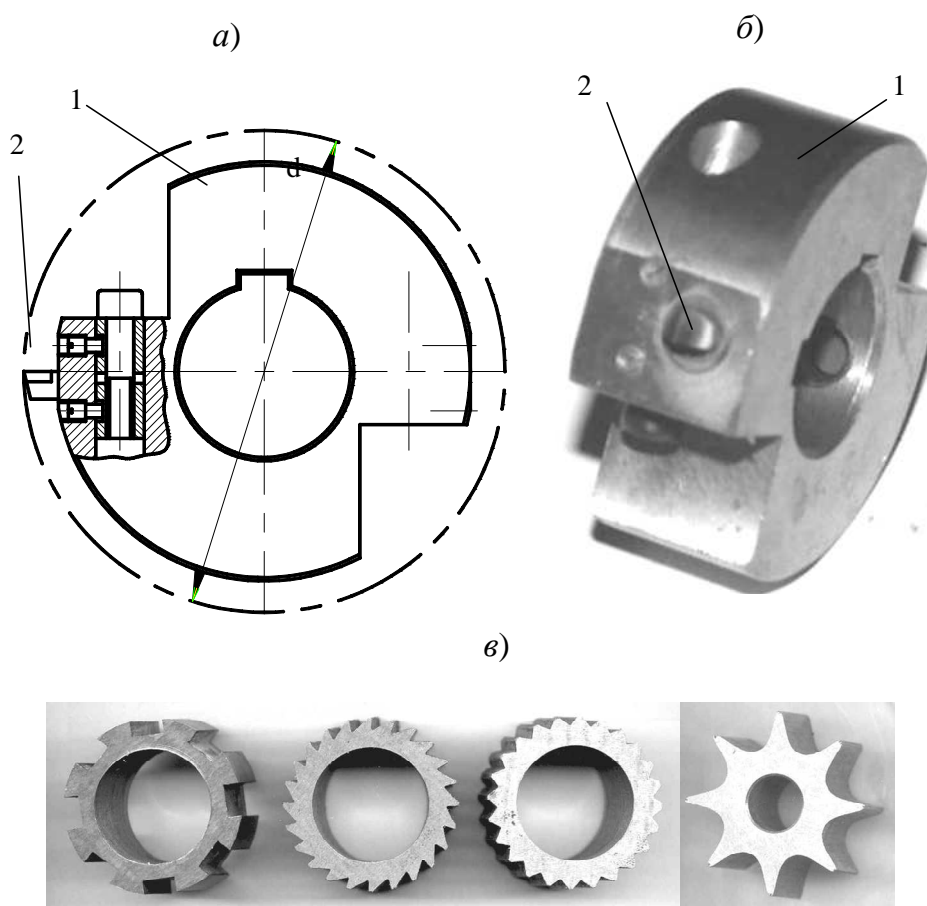


Рис. 7.5. Конструкция резцовой головки (а, б) и образцы деталей (в) с зубчатым контуром на наружной поверхности:  
1 – корпус; 2 – резец

Обработка таких деталей производится на универсальных зубофрезерных станках (рис. 7.6).

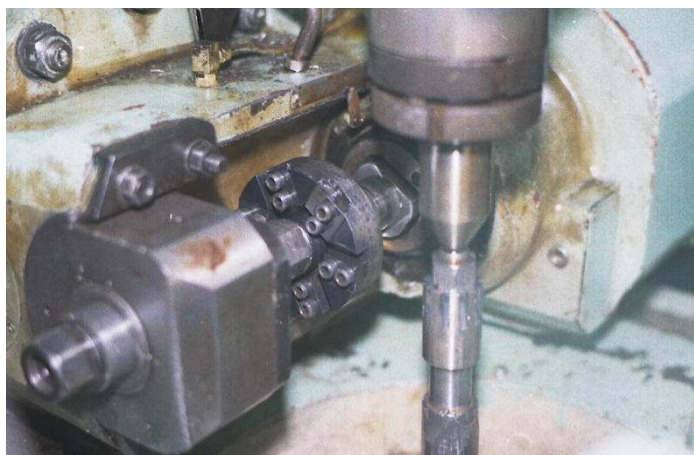


Рис. 7.6. Установка резцовой головки на зубофрезерном станке модели 5B312 при обработке зубчатого контура на наружной поверхности

Для реализации схемы обработки с параллельными осями инструмента и заготовки (см. рис. 4.1, *a*) используется резцовая головка с режущими зубьями 2 (рис. 7.7), расположенными на торцевой поверхности корпуса 1.

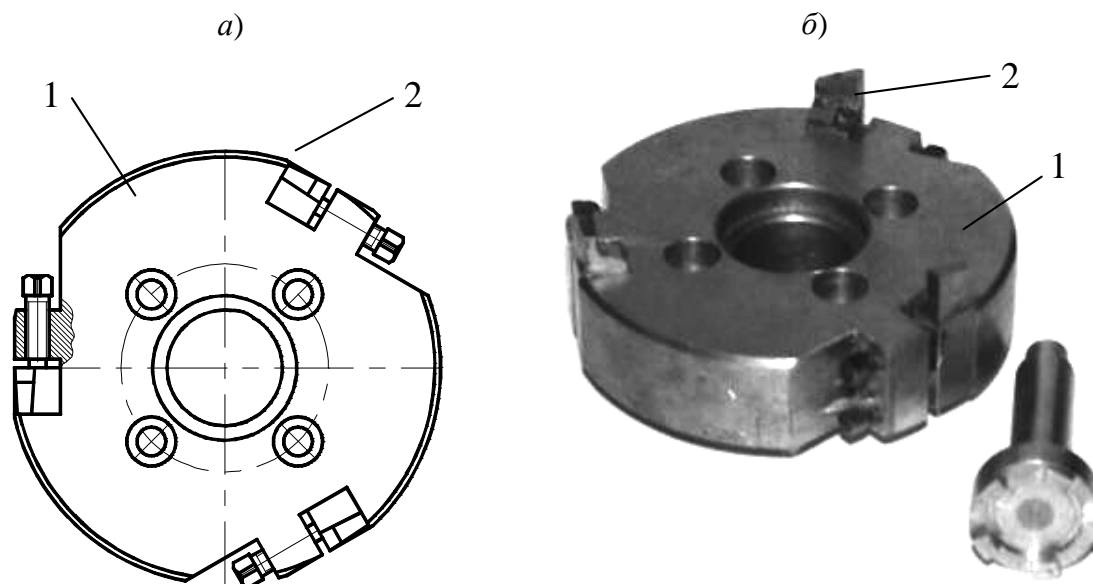


Рис. 7.7. Инструмент к станку модели ВС-50 для обработки торцового зубчатого контура: *a* – конструкция инструмента; *б* – общий вид инструмента с обработанной деталью

Резцовые головки этого типа в зависимости от геометрии ее режущей части и параметров схемы формообразования позволяют обрабатывать ТЗК

трех видов: с пазами, имеющими по длине одинаковую ширину (первый вид); с пазами переменной ширины – со сходящимися к оси детали гранями (второй вид); с расходящимися к периферии гранями (третий вид).

В первом случае профиль паза формируется методом копирования и определяется формой режущей части резцов. В продольном направлении боковые поверхности пазов очерчены по циклоидальным кривым, кривизна которых зависит от радиуса инструмента. При обработке прямолинейных пазов его значение задается исходя из допускаемого отклонения боковой поверхности паза от прямолинейности, а также допускаемого изменения рабочих углов режущих лезвий.

Торцовые зубчатые контуры с пазами второго и третьего видов обрабатываются по схеме, представленной на рисунке 4.1, б. Для ее реализации на станке модели ВС-50 создан инструмент (рис. 7.8), конструкция которого позволяет устанавливать резцы 2 и 3 в корпусе 1 на различных расстояниях от оси вращения.

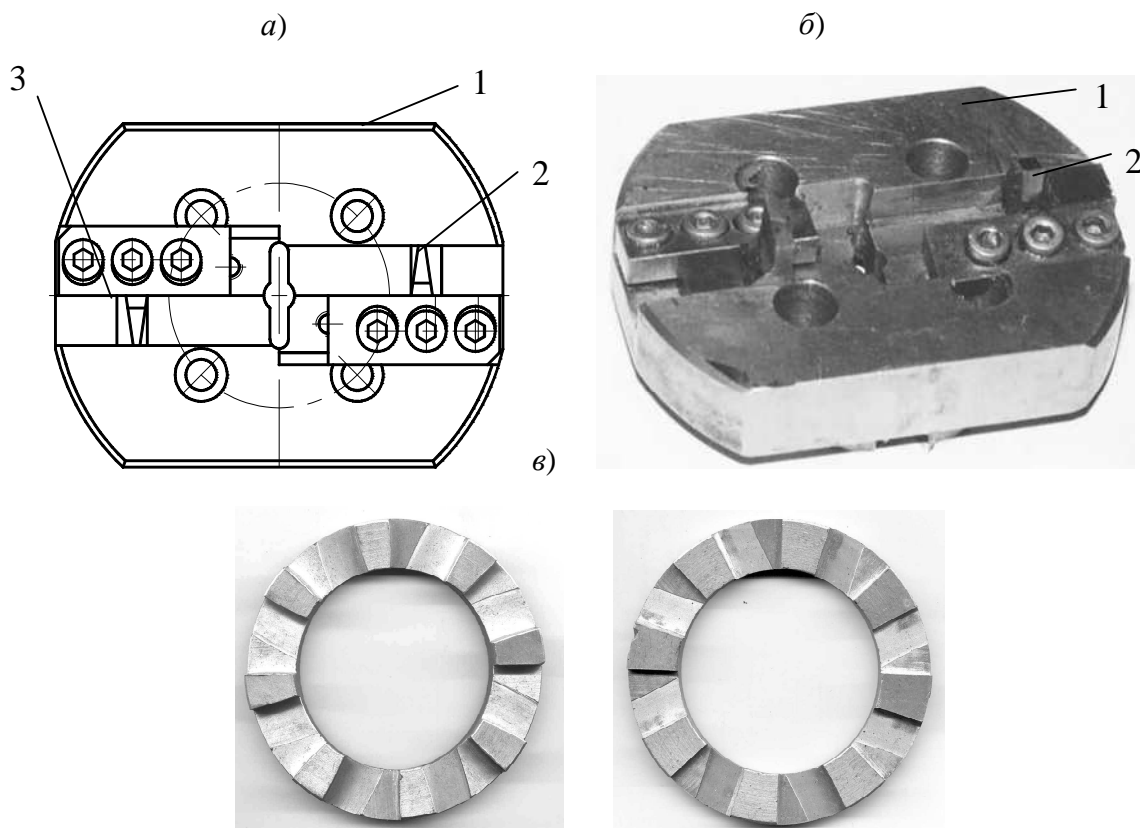


Рис. 7.8. Инструмент к станку модели ВС-50 для обработки сходящихся и расходящихся пазов: а, б – конструкция инструмента; в – обработанные детали с выпуклыми и вогнутыми боковыми сторонами пазов

Это в сочетании с настройкой расстояния между осями инструмента и заготовки, отношения частот и направления их вращательных движений обеспечивает возможность управлять траекторией движения формообразования и благодаря этому обрабатывать пазы с выпуклыми или вогнутыми боковыми поверхностями (рис. 7.8, в). При такой форме боковых поверхностей обеспечивается более благоприятная форма контакта полумуфт по сравнению с выполнением обеих контактирующих поверхностей выпуклыми или плоскими, исключая возникновение кромочного контакта при эксплуатации.

### 7.2.2. Секторные инструменты

Особенностью конструкции секторного инструмента является то, что режущие элементы расположены на части окружности, то есть в определенном угловом секторе. Поэтому основной частью такого инструмента является режущий сектор 2 (рис. 7.9), выполненный, например, в виде дисковой фрезы с неполным числом зубьев. Режущий сектор установлен на оправке 1 и зажимается между фланцами 3.

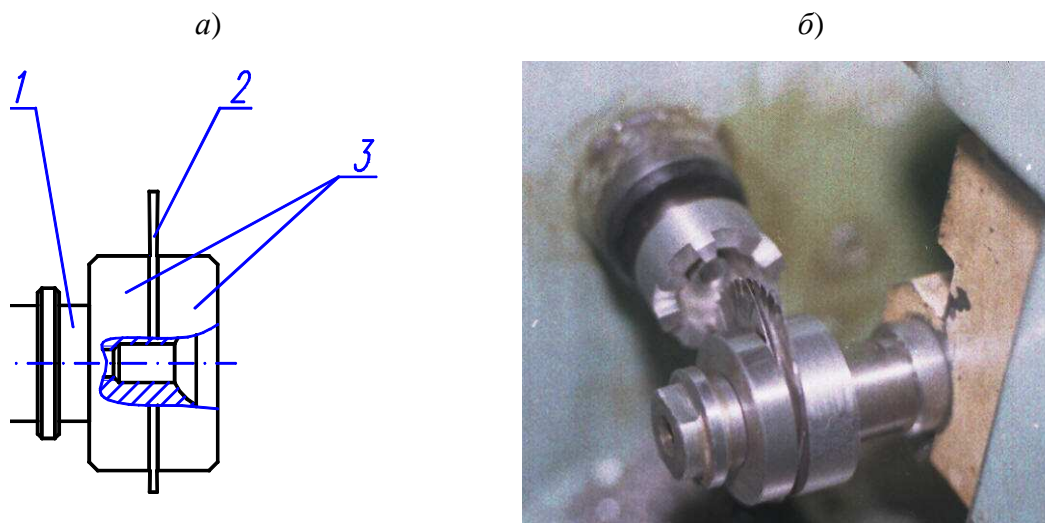


Рис. 7.9. Конструкция секторного инструмента (а) первого типа и пример его применения (б) для обработки широких пазов на зубофрезерном станке модели 5А308П

В зависимости от реализуемого способа обработки используются два типа секторных инструментов, различающихся расположением режущего сектора относительно оси вращения инструмента:

- режущий сектор расположен перпендикулярно оси вращения [82];
- режущий сектор расположен под углом к оси вращения [78].

Секторный инструмент первого типа (рис. 7.9, а) предназначен для обработки ТЗК по схеме 2.2, таблица 3.1. Благодаря тому, что каждый паз обрабатывается по ширине не одним, а последовательно несколькими резами (режущими зубьями), этот инструмент позволяет при меньшей нагрузке на них обрабатывать пазы, ширина которых многократно превышает толщину режущей части инструмента (рис. 7.9, б). При этом одновременно по всей ширине (методом копирования) обеспечиваются более благоприятные по сравнению с формированием паза динамические условия резания, что является резервом повышения производительности обработки, долговечности инструмента и оборудования.

Количество режущих элементов, формирующих паз заданной ширины, определяется по (3.45).

Анализ схемы формообразования и описывающей ее математической модели, представленной в виде системы уравнений (3.44), показал невозможность формирования рассмотренным инструментом пазов со сходящимися в центре заготовке гранями.

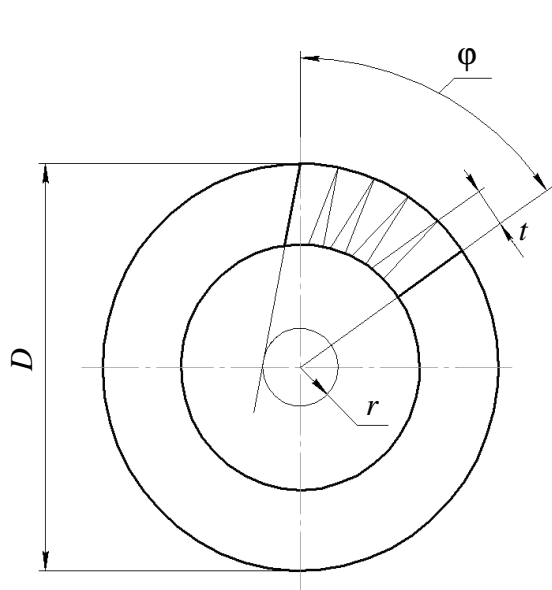


Рис. 7.10. Схема формирования паза на торце

При обработке пазов инструментом, представленным на рисунке 7.9, прямые продолжающие боковые грани формируемых пазов будут являться касательными к окружности с радиусом  $r$  (рис. 7.10), определяемым установкой инструмента относительно заготовки, и шириной режущих элементов  $t$ . Наличие такого геометрического параметра в формируемых пазах на торце детали обуславливает возникновение кромочного контакта, что недопустимо.

Исключение данного негативного эффекта обеспечивается особым расположением режущих элементов в резцовом секторе. Сущность такой настройки инструмента заключается в том, что точки первого 1 и последнего 2 режущих элементов сектора, формирующих боковые грани паза, располагаются на одной линии (рис. 7.10). Это возможно осуществить путем применения двухсекторной конструкции инструмента.

Развертка инструмента с предлагаемой схемой расположения режущих элементов представлена на рисунке 7.11. Анализ схемы резания, ре-

лизуемой данным инструментом, позволяет предложить ряд рекомендаций по его заточке.

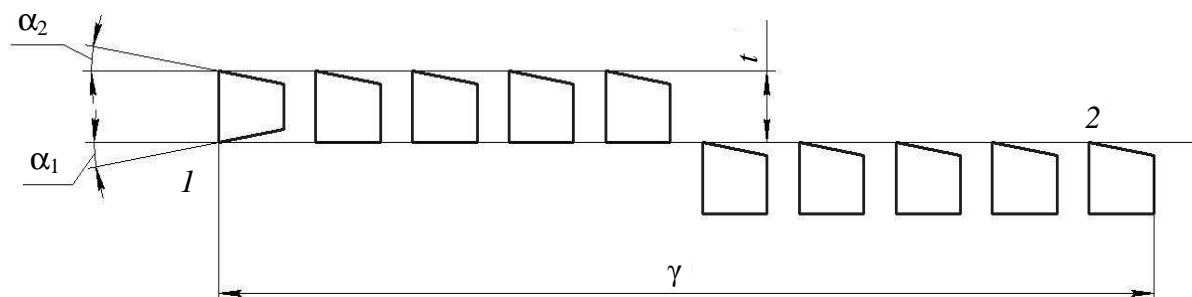


Рис. 7.11. Развертка инструмента с двухсекторным расположением режущих элементов

Формирование задних углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , обеспечивающих исключение затирания по задней поверхности режущего элемента, необходимо только на первом режущем элементе (см. рис. 7.11), на остальных режущих элементах достаточно односторонней заточки со стороны направления резания. Оптимальная величина задних углов определяется комплексом параметров:

$$\alpha \geq 90 - \operatorname{arctg} \frac{2 \left( \frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda \right)}{\sqrt{d^2 - \left( \frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda \right)^2}} + \alpha_3, \quad (7.1)$$

где  $\alpha_3$  – задний угол, необходимый из условий резания;  $R_{CP}$  – средний радиус расположения пазов на торце;  $d$  – внутренний диаметр пазов на торце.

Данная конструкция инструмента основана на взаимосвязи между геометрией формируемого торцового зубчатого контура и геометрией инструмента в виде изменения величины углового сектора, которая обеспечивается его конструктивными особенностями. Такой инструмент имеет широкие технологические возможности при обработке различных по форме торцовых зубчатых контуров. Это выражается в обширной номенклатуре поверхностей, которые можно обработать данным инструментом за одну установку заготовки.

На рисунке 7.12, а представлены муфта и крыльчатки различной геометрии, на рисунке 7.12, б – торцовые зубчатые контуры со сложной геометрией пазов.





Рис. 7.12. Торцовые зубчатые контуры, обработанные разработанными инструментами за одну установку

Секторный инструмент второго типа (секторный наклонный инструмент) разработан по заданию РНТП «Инновационное развитие Витебской области» для оснащения специально созданных станков моделей ВС50-9601 и ВС30П-9253 (см. рис. 7.2, 7.3) для обработки индукторов АБС автомобилей (рис. 7.13). Он обеспечивает реализацию схемы 2.3 обработки ТЗК, представленной в таблице 3.1.

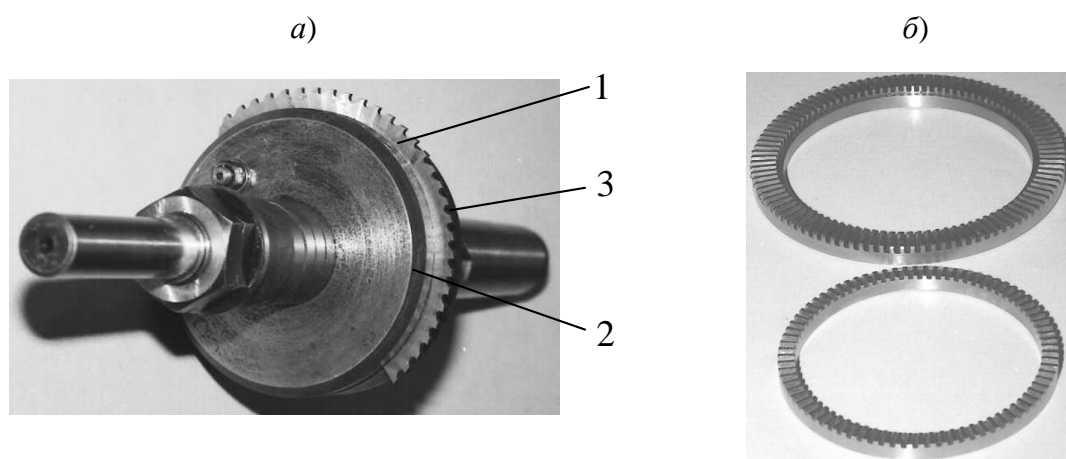


Рис. 7.13. Секторный инструмент (а) и образцы обработанных им индукторов АБС (б): 1 – режущий сектор; 2, 3 – прижимные диски

Инструмент содержит плоский режущий сектор 3 (рис. 7.14), который установлен на оправке 5 через эксцентричную втулку 4 и зажимается между двумя дисками 1 и 2. Необходимая ориентация режущего сектора 3 относительно эксцентричной втулки 4, а последней относительно оправки 5

обеспечивается за счет шпонки 6, диска 1 и штифта 7. Угол наклона режущего сектора к оси оправки определяется по (3.55), а эксцентриситет его установки зависит от глубины паза. Данная конструкция позволяет переналаживать инструмент на обработку различных зубчатых контуров (рис. 7.13, б), что обеспечивает его универсальность.

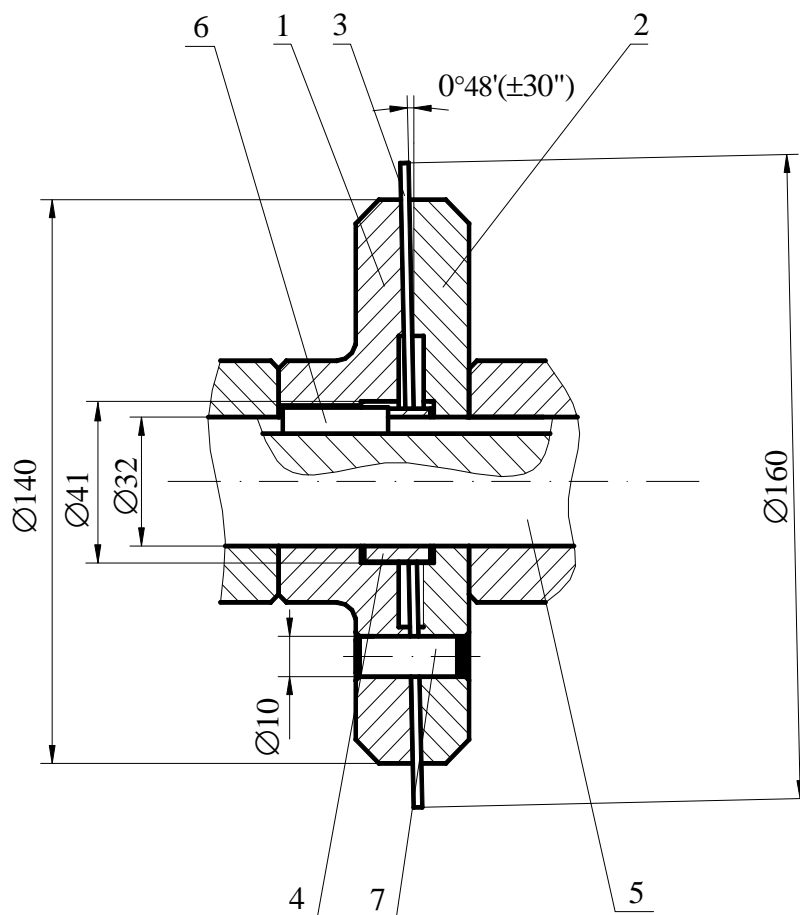


Рис. 7.14. Конструкция секторного наклонного инструмента

Благодаря наклону инструмента относительно оси его вращения создается винтовое расположение режущих элементов, необходимое для непрерывного движения деления, а установка инструмента с эксцентриситетом относительно оси вращения обеспечивает возможность обработки каждого паза за один оборот инструмента методом кругового протягивания, что обеспечивает высокую производительность процесса обработки торцового зубчатого контура.

Создание движения врезания за счет эксцентричной установки режущего сектора упрощает кинематику и существенно улучшает динамику работы станка.

### 7.3. НАСТРОЙКА СТАНКОВ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ТОРЦОВОГО ЗУБЧАТОГО КОНТУРА

Наладка и настройка станков с механическими связями для обработки ТЗК включают такие операции, как:

- расчет и настройка частоты вращения инструментального шпинделя;
- настройка гитары деления;
- определение и настройка величины подачи;
- установка изделия;
- определение параметров установки инструмента;
- установка межцентрового расстояния между инструментом и заготовкой;
- установка осевого смещения инструмента;
- установка упоров для задания длины ходов исполнительных органов станка в соответствии с циклом работы (глубины врезания, холостых перемещений).

Рассмотрим особенности их выполнения при обработке секторным наклонным инструментом.

**Расчет и настройка частоты вращения шпинделя инструмента.** Скорость резания  $V$  при обработке торцевого зубчатого контура с непрерывным движением деления равна геометрической сумме окружных скоростей инструмента и заготовки в зоне их контакта и определяется по следующей формуле:

$$V = 2\pi n_2 \sqrt{R^2 + r^2 - Rr \frac{1}{m} \sin \left( \chi - \arcsin \left( \frac{r}{Rm} \cos \chi \right) \right)}, \quad (7.2)$$

где  $R$  – радиус инструмента;  $r$  – радиус установки инструмента относительно заготовки;  $m$  – количество обрабатываемых пазов;  $\chi$  – угол, задающий направление пазов.

Поэтому частота вращения инструмента для заданной скорости резания определяется зависимостью

$$n_2 \leq \frac{V}{2\pi \sqrt{R^2 + r^2 - Rr \frac{1}{m} \sin \left( \chi - \arcsin \left( \frac{r}{Rm} \cos \chi \right) \right)}}. \quad (7.3)$$

Частота вращения инструмента в явном виде не влияет на геометрические параметры обработанного ТЗК и может настраиваться приближенно в соответствии с (7.3) исходя из возможностей станка.

С достаточной точностью частоту вращения инструмента для деталей типа ротор с числом пазов 80–120, когда окружная скорость заготовки значительно меньше окружной скорости инструмента, можно определять по формуле

$$n_2 \leq \frac{V}{2\pi R}. \quad (7.4)$$

**Настройка гитары деления** производится исходя из условия, что частота вращения заготовки должна быть в  $m$  раз меньше частоты вращения инструмента, где  $m$  – число обрабатываемых пазов.

**Определение и настройка подачи.** Подача (движение врезания) настраивается в тех случаях, когда глубина пазов больше удвоенного значения эксцентриситета установки инструмента.

Настраиваемая величина подачи  $S$  связана с эксцентриситетом установки инструмента следующим образом:

$$S \leq 2e. \quad (7.5)$$

Значение эксцентриситета установки инструмента должно удовлетворять условию:

$$e \leq \frac{S_z z}{2}, \quad (7.6)$$

где  $S_z$  – подача на зуб;  $z$  – число режущих элементов в резцовом секторе.

Значение  $S_z$  – принимается по нормативам режимов резания и уточняется экспериментально.

**Определение параметров установки инструмента.** Параметры установки инструмента  $\lambda$  и  $\rho$  определяются из уравнений (3.51) и (3.55).

После установки собранного инструмента на оправку необходимо проконтролировать точность его положения: вершина первого зуба режущего сектора должна располагаться на наименьшем, а последнего – на наибольшем радиусе от оси вращения инструмента, что обеспечивается эксцентричной втулкой. Разность между радиусами расположения вершин первого и последнего зубьев режущего сектора должна составлять двой-

ной эксцентриситет. В противном случае необходимо проверить правильность установки эксцентричной втулки и ориентации режущего сектора относительно корпуса.

По найденному значению угла установки  $\lambda$  по уравнениям (3.49) и (3.50) рассчитываются расстояние  $h$  (см. рис. 3.8) от оси вращения заготовки до плоскости вращения последнего режущего элемента и расстояние  $H$  между осями инструмента и заготовки. Указанные расстояния настраиваются при наладке станка.

Параметром установки, требующим обязательной проверки, является угол  $\rho$  наклона режущего сектора к оси вращения инструмента. Его значение рекомендуется контролировать путем измерения осевого смещения первого и последнего режущего элемента резцового сектора в их нижнем положении. Требуемая величина смещения  $T'$  (рис. 7.15) определяется из уравнения (3.53).

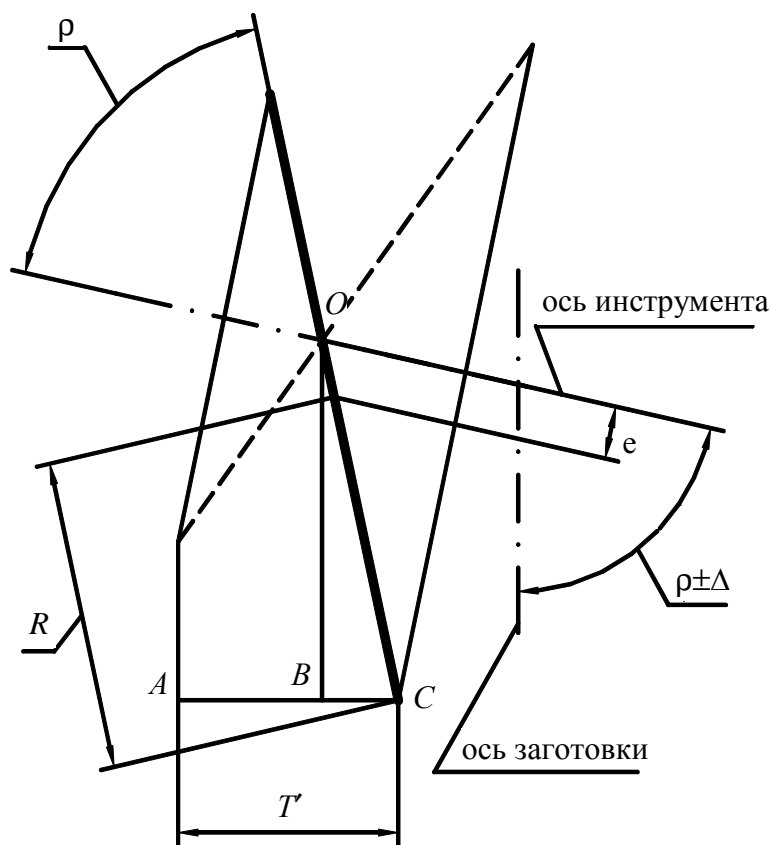


Рис. 7.15. Схема к определению коррекции угла установки секторного наклонного инструмента

Величина допуска на значение данного параметра зависит от допуска на ширину формируемых пазов с учетом ширины режущих элементов, в

которую включен запас на переточку. В случае недопустимой величины погрешности по данному параметру, необходимо проверить правильность сборки инструмента и точность изготовления прижимных дисков, либо провести коррекцию установки инструмента за счет изменения угла наклона оси его вращения к оси вращения заготовки соответствующим поворотом суппорта вокруг горизонтальной оси. Необходимая коррекция  $\Delta$  определяется из уравнения:

$$T' = \left( R - \frac{e}{\sin \rho} \right) \sin(2\rho \pm \Delta) + \left( R + \frac{e}{\sin \rho} \right) \sin(\Delta), \quad (7.7)$$

которое получено исходя из того, что половинный шаг, или расстояние  $T'$  между плоскостями вращения первого и последнего режущих элементов сектора, составляет (см. рис. 7.15)

$$T' = AB + BC, \quad (7.8)$$

где

$$AB = \left( R - \frac{e}{\sin \rho} \right) \sin(2\rho \pm \Delta); \quad (7.9)$$

$$BC = \left( R + \frac{e}{\sin \rho} \right) \sin(\Delta). \quad (7.10)$$

По описанным выше операциям осуществляется наладка и настройка специальных станков моделей ВС-50-9601 и ВС30П-9253, предназначенных для обработки роторов АБС автомобилей.

#### **7.4. ОБРАБОТКА ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ**

Рассмотренные выше способы обработки ТЗК различными инструментами по методу непрерывного деления могут быть реализованы также на универсальных зубо-и шлицефрезерных станках обкатного типа. В частности, для обработки небольших по размерам деталей типа кулачковых и храповых муфт удобно использовать зубофрезерный станок горизонтальной компоновки модели 5А308П (рис. 7.16) при его оснащении соответствующими инструментами. Возможность перенастройки отношения частот

инструмента и заготовки, а также их взаимного расположения позволяет обрабатывать на этом станке одним инструментом широкую номенклатуру деталей с различным количеством пазов разной формы (рис. 7.17).

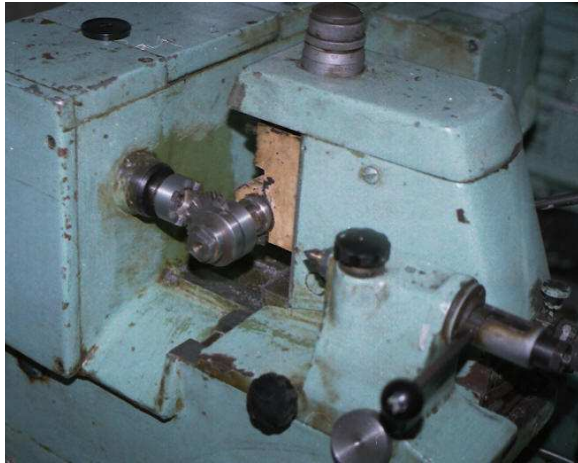


Рис. 7.16. Станок модели 5А308П, настроенный на обработку кулачковой муфты секторным инструментом



Рис. 7.17. Образцы деталей с пазами различной формы, обработанных на станке модели 5А308П секторным инструментом

Рассмотрим пример настройки станка модели 5А308П на обработку храповой муфты секторным эксцентрично установленным инструментом [83].

Особенности схемы обработки (рис. 7.18) обусловлены горизонтальной компоновкой станка и геометрией храповой муфты, в частности наклонным расположением дна пазов под углом  $\delta$  к ее оси.

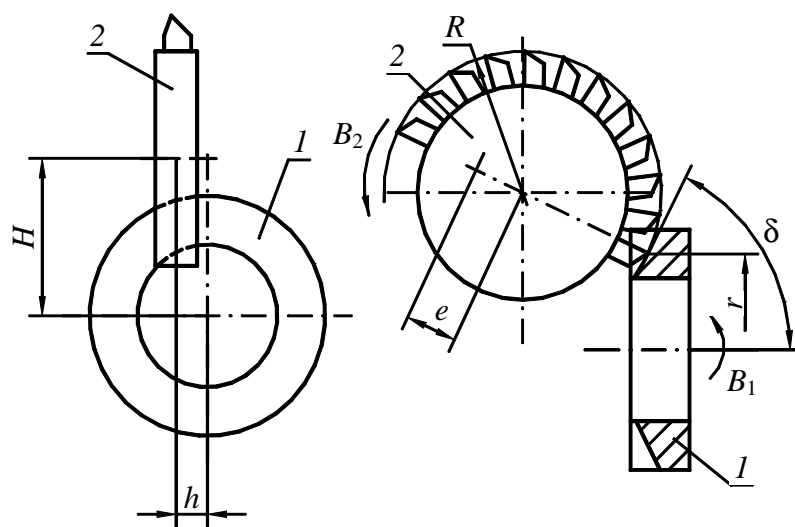


Рис. 7.18. Схема обработки храповой муфты секторным инструментом на станке модели 5А308П

С учетом этого плоскость вращения инструмента устанавливают на расстоянии  $h$  от оси вращения заготовки, которое составляет

$$h = r^2 / ((R + e)m), \quad (7.11)$$

где  $r$  – средний радиус пазов;  $m$  – число обрабатываемых пазов;  $R$  – радиус инструмента;  $e$  – эксцентриситет установки инструмента.

Расстояние  $H$  между осями вращения инструмента и заготовки задают по зависимости

$$H = r \cos \arcsin \left( r / ((R + e)m) \right) + (R + e) \cos \delta, \quad (7.12)$$

где  $\delta$  – угол конуса впадин (см. рис. 7.18).

Вариант реализации данной схемы обработки на станке модели 5А308П и образцы обработанных муфт показаны на рисунке 7.19.

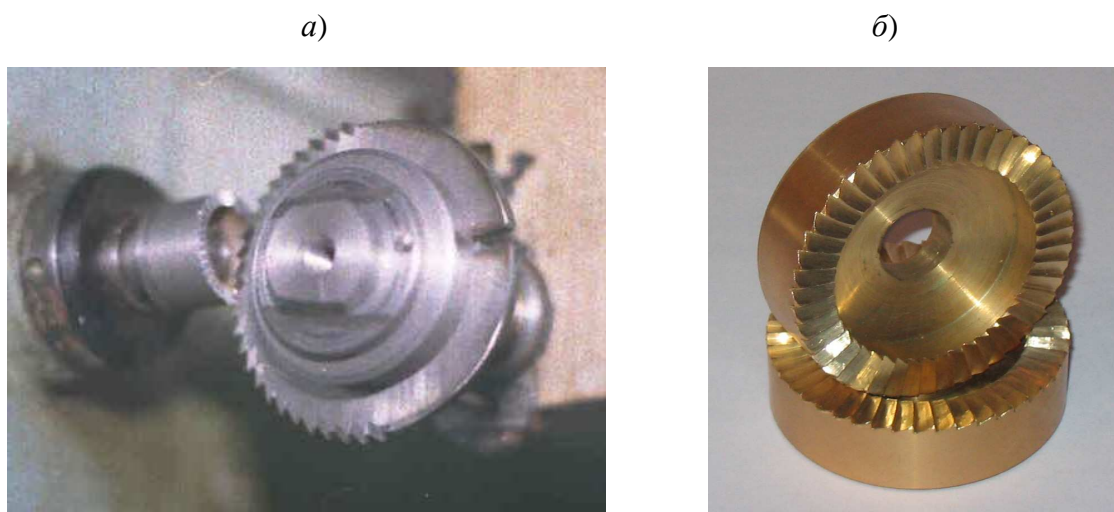


Рис. 7.19. Рабочая зона станка модели 5А308П при обработке храповой муфты (а) и образцы обработанных муфт (б)

Режущие зубья расположены по дуге, не превышающей половины длины окружности, на которой находятся их вершины. Инструмент устанавливают с эксцентриситетом относительно оси вращения, значение которого  $e = 0,5f$  ( $f$  – глубина паза).

Отношение  $i$  частот вращательных движений задается прямо пропорционально количеству пазов  $m$ :  $i = n_2 / n_1 = m$ , где  $n_1$  – частота вращения заготовки;  $n_2$  – частота вращения инструмента. За счет эксцентричной



установки инструмента при его вращении осуществляется движение врезания со средней подачей на зуб

$$S_z = f / z,$$

где  $z$  – число режущих зубьев.

За один оборот инструмента осуществляется обработка одной впадины на полную глубину, благодаря чему обеспечивается высокая производительность. Например, основное время обработки зубчатого контура храповой муфты 64226-3501171 диаметром 26 мм, имеющей 36 зубьев, составляет 10 секунд.

Схемы формообразования с непрерывным движением деления могут эффективно применяться на универсальных станках при декоративной обработке торцовых поверхностей вращающимся инструментом (рис. 7.20).



Рис. 7.20. Рабочая зона станка модели 5А308П при обработке декоративного орнамента на торце (а) и образцы обработанных деталей (б)

За счет относительной установки инструмента и заготовки, настройки станка и геометрии режущей части могут быть получены различные декоративные орнаменты на торцах деталей типа ручек, маховичков и т.п.

Примеры использования различных схем формообразования ТЗК представлены также в патентах [78–86].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема создания прогрессивных технологий формообразования ТЗК рассмотрена на основе системного подхода и структурной модели способа обработки, отражающей взаимосвязь его основных компонентов – схемы формообразования, метода обработки и обрабатывающей системы, что позволило решить ряд задач, относящихся к этапу функционального проектирования.

Во-первых, исходя из общих положений теории формообразования поверхностей и особенностей геометрии ТЗК, предложен алгоритм (методика) синтеза схем их формообразования, включающий: определение формы производящих линий ТЗК, характеристического образа инструмента, типа и формы его производящих элементов; задание относительного положения и траектории перемещения производящих элементов; синтез методов формообразования производящих линий ТЗК.

Во-вторых, предложена классификация признаков ТЗК деталей машин разнообразного функционального назначения (деталей трансмиссий машин, измерительных устройств и др.), отражающая характеристики геометрии ТЗК, существенные для определения методов формирования поверхности: направленность пазов, поперечный профиль зубьев (кулачков), форма впадины, сходимости и форма боковых граней. Эта классификация использована как база при синтезе методов и схем формообразования ТЗК конкретных изделий.

В-третьих, исходя из геометрии ТЗК, типовых методов формообразования производящих линий и исполнительных движений при обработке пазов, предложено множество методов формообразования ТЗК, анализ которых с применением математического и физического моделирования позволил установить рациональные и область их эффективного применения.

В качестве объекта исследования приняты схемы обработки ТЗК с непрерывным движением деления резцовыми головками, червячными и им подобными инструментами, которые, как показано, обеспечивают высокую производительность и обладают более широкими технологическими возможностями по сравнению с традиционной технологией формообразования, основанной на дискретном движении деления.

Особенностью обработки ТЗК при непрерывном процессе деления является кинематическое формирование боковых поверхностей пазов, в частности на базе циклоидальных кривых. Управление формой образуе-

мых линий, как следует из анализа математических моделей процессов их образования, достигается кинематическим и геометрическим методами, а стабилизация скорости исполнительного движения обеспечивается синхронным изменением угловых скоростей элементарных движений при постоянном значении кинематического коэффициента.

Основным преимуществом методов обработки ТЗК червячными инструментами является высокая производительность, благодаря непрерывности процесса обработки и возможности реализации процесса протягивания. Такой же эффект достигается и при обработке более простым по конструкции и в реализации секторным наклонным инструментом, представляющим разновидность инструментов червячного типа. Математическое и компьютерное моделирование процесса формообразования ТЗК секторными инструментами с использованием предложенного алгоритма позволило оптимизировать параметры инструмента и схемы обработки.

Кинематическое формирование боковых поверхностей прямолинейных и круговых пазов ТЗК характеризуется погрешностью, обусловленной отклонением траектории исполнительного движения от заданной формы. Результаты аналитического исследования позволяют управлять точностью формообразования за счет геометрических параметров схемы обработки.

Анализ эффективности схем обработки ТЗК показал, что она может быть повышена также в направлении расширения технологических возможностей за счет комбинированных методов формообразования, совмещения этапов врезания и круговой подачи, управления параметрами кинематической схемы обработки, в частности расстояния между осями инструмента и заготовки.

На основе математического моделирования схем обработки резцовыми головками, червячными и секторными инструментами определены геометрические и кинематические условия формообразования пазов при непрерывном движении деления, установлены зависимости, характеризующие процесс их профилирования и изменение геометрии режущей части инструмента, позволяющие определить технологическую производительность. В результате этого исследования предложены алгоритмы поднастройки обрабатывающей системы с целью обеспечения точности формообразования и необходимых кинематических углов резания. Проанализированы возможности управления процессом формообразования и схемой срезания припуска, предложены практические решения по управлению процессами формообразования геометрическими и кинематическими методами.

Исследовано влияние параметров инструмента на динамику процесса обработки пазов, что позволило выявить пути управления им за счет оптимизации конструкции инструмента и схем резания.

Для исследованных типов инструментов разработаны рациональные конструктивные схемы и установлены аналитические зависимости для определения их геометрических и установочных параметров, положенные в основу методики их расчета.

Для обоснования допускаемых отклонений конструктивных параметров инструментов исследовано влияние погрешности настройки элементов обрабатывающей системы на точность формообразования ТЗК. Установлены составляющие погрешности обработки, обусловленные схемой формообразования, эксцентриситетом установки инструмента и заготовки, их торцовым биением и неточностью относительного расположения, тангенциальным, осевым и радиальным смещением режущих элементов. В результате разработана методика определения геометрических параметров режущих инструментов и допусков на точность их изготовления, исходя из условий обеспечения требуемой точности обработки зубчатого контура и рациональных условий резания, что позволило создать инструментальное оснащение станков, в частности для обработки индукторов АБС автомобилей, храповых муфт и др.

Результаты исследований процессов формообразования ТЗК опубликованы в работах [16–49]. Они положены в основу практических разработок по технологии формообразования ТЗК. Для реализации предложенной технологии обработки ТЗК индукторов АБС автомобилей разработанными режущими инструментами созданы специальные станки, которые обеспечивают не только необходимое качество обработки, но и повышает производительность в 3–4 раза по сравнению с традиционной технологией обработки. Технология обработки ТЗК при непрерывном движении деления реализована также на универсальном оборудовании, что упрощает ее практическую реализацию.

Предложенные способы обработки ТЗК, станки и инструменты для его реализации защищены патентами Республики Беларусь [78–86].

Промышленная реализация созданных технологий формообразования ТЗК в виде способов обработки, станков и режущих инструментов решает актуальную проблему создания конкурентоспособного отечественного оборудования для интенсификации процессов обработки прерывистых поверхностей деталей машин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя / В.И. Анурьев. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 2. – 559 с.
2. Боренштейн, Ю.П. Механизмы для воспроизведения сложного профиля: справ. пособие / Ю.П. Боренштейн. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
3. Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – М.: Наука, 1997. – 870 с.
4. Голембиевский, А.И. Системный анализ процесса зубодолбления / А.И. Голембиевский; под ред. В.А. Петрова. – Минск: Наука и техника, 1993. – 152 с.
5. Грановский, Г.И. Кинематика резания / Г.И. Грановский. – М.: Машгиз, 1948. – 199 с.
6. Гусак, А.А. Линии и поверхности / А.А. Гусак, Г.М. Гусак. – Минск: Выш. шк., 1985. – 220 с.
7. Данилов, В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 264 с.
8. Данилов, В.А. Интенсификация технологий формообразования поверхностей на этапе проектирования станочного оборудования / В.А. Данилов // Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр. – Вып. 17; под ред. И.П. Филонова. – Минск: Технопринт, 2001. – С. 200–204.
9. Данилов, В.А. Общие принципы синтеза рациональных технологий формообразования сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов // Мир технологий. – 2003. – № 1. – С. 61–71.
10. Данилов, В.А. Интенсификация процессов формообразования сложных поверхностей на основе рациональных схем обработки / В.А. Данилов // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения: материалы междунар. науч.-техн. конф. «Технология-2003», Орел, 25–27 сент. 2003 г. / Орловск. гос. техн. ун-т. – Орел, 2003. – С. 172–175.
11. Данилов, В.А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием / В.А. Данилов // Инженер-механик. – 2003. – № 3(20). – С. 26–31.
12. Данилов, В.А. Проектирование кинематики металлорежущих станков: пособие по курсу «Конструирование и расчет станков» / В.А. Данилов. – Новополюк: ПГУ, 2008. – 228 с.
13. Способ обработки пазов на торцах деталей: а. с. 1798055 СССР, МКИ<sup>5</sup> В23С 3/28 / В.А. Данилов; опубл. // Бюл. Изобрет. – 1993. – № 8.
14. Способ обработки пазов дисковой фрезой: а. с. 1798056 СССР, МКИ<sup>5</sup> В23С 3/28 / В.А. Данилов; опубл. // Бюл. Изобрет. – 1993. – № 8.
15. Способ обработки пазов на торцах деталей: а. с. 1798253 СССР, МКИ<sup>5</sup> В23С3/00 / В.А. Данилов, Л.А. Данилова; опубл. // Открытия. Изобрет. – 1993. – № 8.

16. Данилов, В.А. Анализ схем обработки поверхностей с периодически повторяющимся зубчатым профилем при непрерывном процессе деления / В.А. Данилов, Л.А. Данилова, Р.А. Киселев // *Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр.* – Вып. 16; под ред. И.П. Филонова. – Минск: Технопринт, 2000. – С. 109–114.
17. Данилов, В.А. Высокопроизводительный способ обработки плоских зубчатых контуров / В.А. Данилов, Р.А. Киселев // *Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. тр.; под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя.* – Минск: Технопринт, ПГУ, 2001. – С. 681–685.
18. Данилов, В.А. Определение параметров схемы формообразования и геометрии червячного инструмента для непрерывной обработки плоского зубчатого контура / В.А. Данилов, Р.А. Киселев // *Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр.* – Вып. 17; под ред. И.П. Филонова. – Минск: Технопринт, 2001. – С. 205–209.
19. Данилов, В.А. Прогрессивные схемы формообразования плоских прерывистых поверхностей / В.А. Данилов, Р.А. Киселев // *Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр.* – Вып. 18; под ред. И.П. Филонова. – Минск: Технопринт, 2002. – С. 13–17.
20. Данилов, В.А. Влияние параметров настройки обрабатывающей системы на точность формообразования пазов / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский // *Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин: темат. сб.; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика.* – Минск: Технопринт; Новополоцк: ПГУ, 2003. – С. 346–348.
21. Данилов, В.А. Анализ схемы обработки прерывистых поверхностей на торцах детали при непрерывном движении деления / В.А. Данилов, О.В. Яловский // *Теория и практика машиностроения.* – 2003. – № 1. – С. 16–18.
22. Данилов, В.А. Анализ влияния наладки обрабатывающей системы на точность формообразования пазов на торцах деталей / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикл. науки.* – 2003. – № 4, т. 2. – С. 217–220.
23. Данилов, В.А. Управление формообразованием при обработке резанием / В.А. Данилов, В.А. Терентьев, Л.А. Данилова // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикл. науки.* – 2004. – № 1. – С. 40–51.
24. Данилов, В.А. Обеспечение динамической устойчивости процесса обработки пазов на торцах деталей по схеме с непрерывным делением / В.А. Данилов, Р.А. Киселев // *Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр.: в 2-х т.* Вып. 20, т. 2; под ред. И.П. Филонова. – Минск: Технопринт, 2004. – С. 22–28.
25. Данилов, В.А. Анализ условий формирования пазов на торцах деталей методом кинематического профилирования / В.А. Данилов, О.В. Яловский // *Теория и практика машиностроения: междунар. науч.-техн. журнал.* – 2004. – № 2. – С. 14–16.

26. Данилов, В.А. Кинематическое формирование производящих линий поверхности при обработке резанием на базе циклоидальных кривых / В.А. Данилов, Л.А. Данилова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикл. науки. – № 12. – 2004. – С. 44–53.
27. Данилов, В.А. Синтез схем формообразования торцовых зубчатых контуров / В.А. Данилов, Р.А. Киселев // Теория и практика машиностроения: междунар. науч.-техн. журнал. – 2005. – № 1. – С. 83–87.
28. Данилов, В.А. Синтез и анализ технологических возможностей методов формообразования торцовых зубчатых контуров / В.А. Данилов, О.В. Яловский // Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр.: в 2-х т. Вып. 21, т. 1; под ред. Б.М. Хрусталева. – Минск: БНТУ, 2005. – С. 119–124.
29. Данилов, В.А. Профилирование пазов при обработке торцовых зубчатых контуров по схеме с непрерывным движением деления / В.А. Данилов, Р.А. Киселев // Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр.: в 2-х т. Вып. 21, т. 1; под ред. Б.М. Хрусталева. – Минск: БНТУ, 2005. – С. 167–173.
30. Прогрессивные технологии формообразования изделий с торцовым зубчатым контуром / В.А. Данилов [и др.] // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии». – Могилев, 2005. – С. 38–39.
31. Данилов, В.А. Прогрессивные инструменты для обработки торцовых зубчатых контуров резанием / В.А. Данилов, Р.А. Киселев // Современные технологии металлообработки: материалы междунар. науч.-техн. конф.; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Минск: Экоперспектива, 2005. – С. 377–380.
32. Данилов, В.А. Оптимизация схем обработки торцовых зубчатых контуров секторным инструментом / В.А. Данилов, Р.С. Киселев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикл. науки. – 2006. – № 6. – С. 106–110.
33. Данилов, В.А. Прогрессивная технология обработки торцовых зубчатых контуров по методу кругового протягивания / В.А. Данилов, А.А. Корозеев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. Ч. I. – Могилев: ГУВПО «Белорус.-рос. ун-т», 2006. – С. 45–46.
34. Данилов, В.А. Анализ кинематических способов управления формообразованием торцовых зубчатых контуров при непрерывном движении деления / В.А. Данилов, Р.А. Киселев // Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр. Вып. 22. – Минск: БНТУ, 2007. – С. 207–211.
35. Данилов, В.А. Методические основы синтеза схем формообразования торцовых зубчатых контуров / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикл. науки. – 2007. – № 2. – С. 82–92.
36. Данилов, В.А. Управление схемой получения торцовых зубчатых контуров путем наложения круговой подачи / В.А. Данилов, О.В. Яловский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. Ч. I. Могилев: ГУВПО «Белорус.-рос. ун-т». – 2006. – С. 49.

37. Данилов, В.А. Колебания в обрабатывающей системе при обработке торцовых зубчатых контуров / В.А. Данилов, Р.А. Киселев // Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр. Вып. 23. – Минск: БНТУ, 2007. – С. 170–173.
38. Данилов, В.А. Повышение производительности и универсальности методов обработки торцовых зубчатых контуров / В.А. Данилов, О.В. Яловский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 3 ч. Ч. 1. – Могилев: Белорус.-рос. ун-т. – 2008. – С. 29–30.
39. Данилов, В.А. Обеспечение универсальности металлорежущих станков на основе управляемых схем формообразования // Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр. Вып. 24, т. 2. – Минск: БНТУ, 2009. – С. 194–197.
40. Данилов, В.А. Совершенствование технологии обработки торцовых зубчатых контуров / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский // Металлообработка: оборудование – инструмент – качество: междунар. науч.-техн. конф., Минск, 8–9 апр. 2009 г. – Минск: ПЧУП «Бизнесофсет», 2009. – С. 35–36.
41. Данилов, В.А. Опыт создания станочного оборудования по проектам научно-технических программ / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, В.А. Терентьев // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII междунар. науч.-техн. конф.: в 3-х т. Т. II; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк; УО «ПГУ», 2009. – С. 300–304.
42. Данилов, В.А. Управление формообразованием торцовых зубчатых контуров геометрическим методом / В.А. Данилов, О.В. Яловский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикл. науки. – 2009. – № 2. – С. 99–106.
43. Данилов, В.А. Прогрессивные технологии формообразования торцовых зубчатых контуров / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикл. науки. – 2010. – № 2. – С. 12–20.
44. Данилов, В.А. Синтез схем формообразования пазов на торцах кольцевых деталей / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 3 ч. Ч. 1. – Могилев: Белорус.-рос. ун-т. – 2010. – С. 40–41.
45. Данилов, В.А. Схемы обработки пазов на торцах деталей по методу непрерывного деления / В.А. Данилов, О.В. Яловский // Металлообработка: оборудование – инструмент – качество: междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7–8 апр. 2010 г. – Минск: ПЧУП «Бизнесофсет», 2010. – С. 80–82.
46. Данилов, В.А. Синтез и реализация универсальных схем формообразования торцовых зубчатых контуров / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикл. науки. – 2011. – № 2. – С. 2–10.
47. Данилов, В.А. Интенсификация механической обработки торцовых зубчатых контуров деталей машин / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 12–13 апр. 2011 г. – Минск: Бизнесофсет, 2011. – С. 54–56.



48. Данилов, В.А. Прогрессивные способы обработки торцовых зубчатых контуров / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский // Инновационные технологии в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., посв. 35-летию машиностр. фак. Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 19–20 окт. 2011 г. / Полоц. гос. ун-т; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2011. – С. 121–123.
49. Данилов, В.А. Автоматизация обработки торцовых зубчатых контуров на основе рациональных схем формообразования / В.А. Данилов, Р.А., Киселев, О.В. Яловский // Автоматизация технологических процессов и производств: материалы республ. науч.-техн. семинара, Минск, 14 марта 2012 г. – Минск: МИНСКЭКСПО, 2012. – С. 35–36.
50. Дружинский, И.А. Сложные поверхности: математическое описание и технологическое обеспечение: справочник / И.А. Дружинский. – Л.: Машиностроение, 1985. – 263 с.
51. Ермаков, Ю.М. Разработка высокопроизводительных способов механической обработки и металлорежущих станков на основе исследования взаимосвязи способов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ю.М. Ермаков; Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. – М., 1994. – 32 с.
52. Канне, М.М. Технологическое обеспечение качества высоконагруженных передач с эвольвентными зубчатыми колесами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / М.М. Канне; Белорус. гос. политехн. акад. – Минск, 1996.
53. Карелин, Н.М. Бескопирная обработка цилиндрических деталей / Н.М. Карелин. – М.: Машиностроение, 1966. – 187 с.
54. Киселев, Р.С. Обработка торцовых зубчатых контуров по схеме с непрерывным делением / Р.С. Киселев, В.А. Данилов // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VI междунар. науч.-техн. конф.: в 3-х т. Т. II; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2007. – С. 66–69.
55. Коганов, И.А. Прогрессивная обработка зубчатых профилей и фасонных поверхностей / И.А. Коганов. – Тула: Приок. кн. изд-во, 1970. – 183 с.
56. Козерук, А.С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / А.С. Козерук; Белорус. гос. политехн. акад. – Минск, 1997. – 34 с.
57. Коновалов, Е.Г. Основы новых способов металлообработки / Е.Г. Коновалов. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 297 с.
58. Лашнев, С.И. Формообразование зубчатых деталей реечными и червячными инструментами / С.И. Лашнев. – М.: Машиностроение, 1971. – 212 с.
59. Лашнев, С.И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ / С.И. Лашнев, М.И. Юликов. – М.: Машиностроение, 1975. – 391 с.

60. Маляренко, А.Д. Технологические основы управляемого формообразования / А.Д. Маляренко, И.П. Филонов. – Минск: ВУЗ–ЮНИТИ БГПА, 1999. – 212 с.
61. Ничков, А.Т. Основы комплексного исследования процесса зубофрезерования и оптимизации его конструктивных и технологических параметров в простых и комбинированных схемах нарезания зубчатых колес червячными фрезами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / А.Т. Ничков; Тульск. политехн. ин-т. – Тула, 1991. – 43 с.
62. Олифиренко, М.И. Прогрессивные процессы зубодолбления / М.И. Олифиренко. – Киев: Техника, 1988. – 190 с.
63. Орлов, П.И. Основы конструирования: в 3-х кн. / П.И. Орлов. – М.: Машиностроение, 1977. – Кн. 2. – 574 с.
64. Производство зубчатых колес: справочник / С.Н. Калашников [и др.]; под общ. ред. Б.А. Тайца. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
65. Радзевич, С.П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ / С.П. Радзевич. – Киев: Вища шк., 1991. – 191 с.
66. Решетов, Д.Н. Точность металлорежущих станков / Д.Н. Решетов, В.Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
67. Родин, П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П.Р. Родин. – Киев: Вища шк., 1977. – 192 с.
68. Ряховский, О.А. Справочник по муфтам / О.А. Ряховский, С.С. Иванов. – М.: Политехника, 1991. – 384 с.
69. Смирнов, А.И. Анализ перспектив развития методов формообразования в машиностроении / А.И. Смирнов. – М.: НИИмаш, 1982. – 49 с.
70. Тарапанов, А.С. Управление процессом зубодолбления / А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. – М.: Машиностроение, 1999. – 128 с.
71. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учеб. пособие / В.Е. Антонюк [и др.]. – Минск: Технопринт, 2003. – 766 с.
72. Устюжанин, В.А. Обработка цилиндрических зубчатых колес способом фрезестрогания в условиях многономенклатурного производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В.А. Устюжанин; Куйбыш. политехн. ин-т. – Куйбышев, 1989. – 16 с.
73. Федотенок, А.А. Кинематические связи в металлорежущих станках / А.А. Федотенок. – М.: Машгиз, 1960. – 297 с.
74. Филонов, И.П. Управление формообразованием прецезионных поверхностей деталей машин и приборов / И.П. Филонов, Ф.Ф. Климович, А.С. Козерук. – Минск: Дизайн ПРО, 1995. – 208 с.
75. Харлампиев, И.С. Обкатывающее протягивание зубчатых колес / И.С. Харлампиев. – М.: Машиностроение, 1981. – 211 с.

76. Шнейдер, Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю.Г. Шнейдер. – Л.: Машиностроение, 1972. – 240 с.
77. Этин, А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийными инструментами / А.О. Этин, М.Е. Юхвид. – М.: АО ЭНИМС, 1994. – 185 с.
78. Инструмент для обработки пазов на торцах деталей: пат. 553 ВУ. МПК<sup>7</sup> В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев. – № и 20010263; Дата публ.: 2002.06.03.
79. Способ формирования пазов на торце детали: пат. 5707 ВУ. МПК<sup>7</sup> В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев. – № а 2000051; дата публ.: 2003.07.22.
80. Способ обработки пазов на торцах деталей: пат. 6063 ВУ. МПК<sup>7</sup> В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев. – № а 19980652; дата публ. 2003.12.02.
81. Способ обработки пазов на торцах деталей и станок для его осуществления: пат. 6165 ВУ. МПК<sup>7</sup> В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев. – № а 19990206; дата опубл. 2004.06.30.
82. Инструмент для обработки пазов на торцах деталей: пат. 1550 ВУ. МПК<sup>7</sup> В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев. – № и 20040066; дата публ. 2004.09.30.
83. Способ обработки пазов на торце детали: пат. 7041 ВУ. МПК<sup>7</sup> В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев. – № а 20000916; дата публ. 2005.01.14.
84. Способ обработки пазов на торцах деталей: пат. 7846 ВУ. МПК<sup>7</sup> В23С3/28 / Данилов В.А., Киселев Р.А. – № а 20010554; дата публ. 2005.11.10.
85. Инструмент для обработки пазов на торце детали и способ обработки пазов на торце детали: пат. 6934 ВУ. МПК<sup>7</sup> В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев. – № а 20000141; дата публ. 2005.03.30.
86. Способ обработки пазов на торце заготовки: пат. 9765 ВУ. МПК<sup>7</sup> В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев. – № а 20040988; дата публ. 2007.06.28.

*Научное издание*

ДАНИЛОВ Виктор Алексеевич  
КИСЕЛЁВ Руслан Анатольевич  
ЯЛОВСКИЙ Олег Васильевич

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОРЦОВЫХ  
ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Редактор *Р. Н. Авласенок*

Дизайн обложки *Е. Н. Бурцевой*

Подписано в печать 17.11.2015. Формат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 12,76. Уч.-изд. л. 12,32. Тираж 100 экз. Заказ 1514.

Издатель и полиграфическое исполнение :  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/305 от 22.04.2014

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014

ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк