

## СТАНКИ, ИНСТРУМЕНТЫ И ПРИБОРЫ

УДК 621.91.04

### МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА СХЕМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ

*д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ, канд. техн. наук Р.А. КИСЕЛЕВ, О.В. ЯЛОВСКИЙ*  
(Полоцкий государственный университет)

*На основе системного подхода к разработке структуры и компонентов способа обработки резанием и общих положений теории формообразования поверхностей установлены принципы построения рациональных схем формообразования торцовых зубчатых контуров (ТЗК). С учетом их конструктивных особенностей дан анализ геометрических и кинематических методов формообразования производящих линий обрабатываемых поверхностей, выявлены особенности структуры исполнительных движений, предложена классификация и дан анализ методов формообразования ТЗК. Рассмотрены некоторые варианты реализации метода формообразования червячным и секторным инструментами, обеспечивающие интенсификацию обработки ТЗК по сравнению с применяемыми технологиями за счет рациональной схемы резания и совмещения процессов формообразования и деления.*

**Введение.** Торцовые зубчатые контура в виде равномерно расположенных по окружности пазов и выступов широко применяются в трансмиссиях машин и измерительных системах (кулачковые и храповые муфты, делительные и отсчетные устройства измерительных систем и т.п.). Применяемые технологии их обработки основаны, как правило, на дискретных процессах формообразования, что обуславливает относительно низкую производительность и точность. Повышение производительности и точности обработки ТЗК является актуальной проблемой в связи с увеличением объема производства указанного типа деталей и возрастанием предъявляемых к ним требований. Ее решение требует создания прогрессивных станков и инструментов, что связано с разработкой эффективных схем формообразования ТЗК. Важность решения этой задачи обусловлена тем, что синтез кинематических схем обработки относится к концептуальному проектированию металлорежущего станка, определяющему его основные технико-экономические характеристики – точность, производительность, универсальность. Ошибки, допущенные на этой стадии создания станка, не могут быть компенсированы при его конструировании и технологической подготовке производства.

В соответствии с функциональным назначением ТЗК характеризуются разнообразной геометрией и требованиями к точности и относительному расположению пазов [1], что предопределяет множество возможных схем их обработки, необходимость их анализа и выбора рациональной для конкретных условий. Методические аспекты решения этой задачи являются предметом анализа в данной статье на основе общих положений теории формообразования поверхностей [2, 3], принципов синтеза рациональных схем формообразования поверхностей резанием [4] и исследований авторов по данной проблеме.

**Общие принципы синтеза рациональных схем формообразования поверхностей резанием.** Качественные и количественные характеристики способа формообразующей обработки зависят от его основных структурных компонентов (рис. 1), к которым относятся [5]:

- *метод (вид) обработки*, определяемый совокупностью физических, химических и иных процессов, связанных с удалением или перераспределением материала заготовки, например: фрезерование, шлифование, электрохимическая обработка;

- *схема формообразования* поверхности, так как любую поверхность можно обработать одним методом, например фрезерованием, но разными комбинациями движений, сообщаемых инструменту и изделию при различном их взаимном расположении и направлении относительного перемещения. Схема формообразования определяется траекторией этого перемещения и формой характеристического образа инструмента, числом инструментов и их расположением, характером обработки (многоцикловая или одноцикловая), т.е. общей схемой обработки, а также кинематикой формообразования – сочетанием и соотношением скоростей и направлений элементарных движений, сообщаемых инструменту относительно заготовки. Кинематика формообразования и резания является основой кинематической схемы обработки – совокупности абсолютных элементарных движений, сообщаемых инструменту и заготовке в процессе обработки, а также делительных и установочных движений;

- *формообразующая система* как совокупность технических средств, составляющих её базисную, инструментальную, кинематическую, транспортную (манипуляционную), энергетическую, управляющую, контрольно-измерительную и другие подсистемы.

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 [6]:

- задание рационального распределения функции формообразования между инструментальной и кинематической подсистемами;
- синтез прогрессивной схемы формообразования поверхности;
- разработка или выбор эффективного метода обработки и реализующего его режущего инструмента;
- оптимизация структуры формообразующих компонентов обрабатывающей системы.

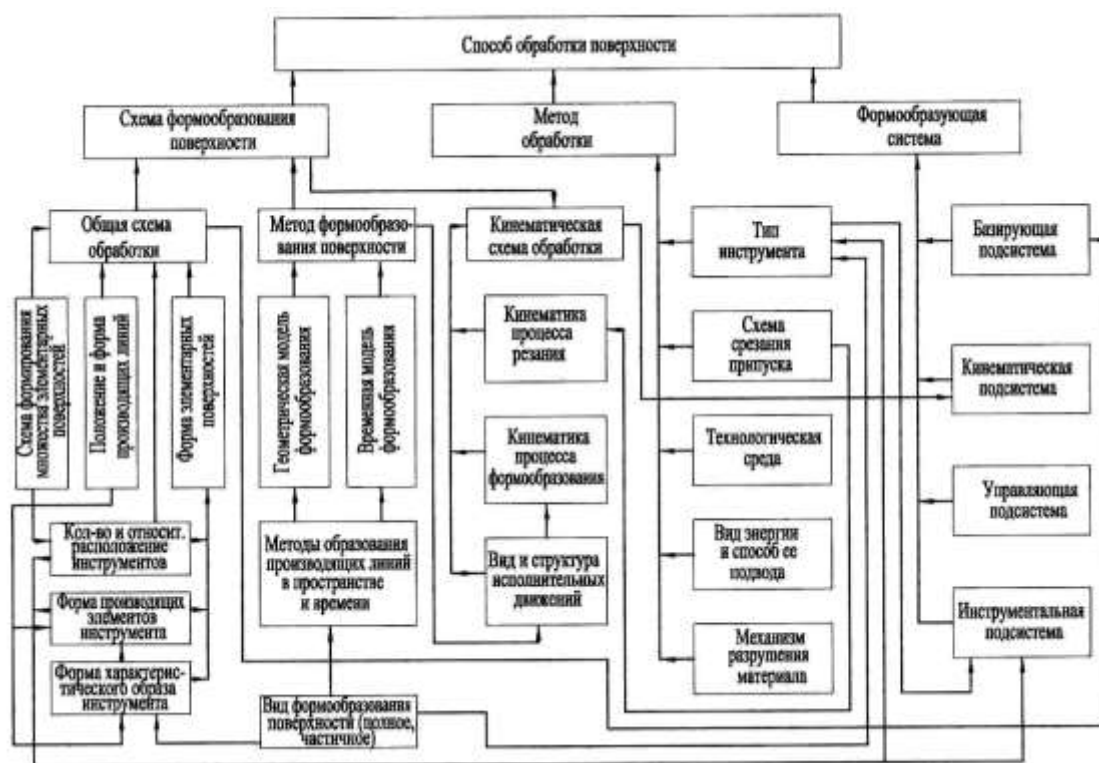


Рис. 1. Структурная модель способа формообразующей обработки

Основная функция формообразования – образование заданной поверхности – может быть обеспечена или только кинематикой станка (при производящих элементах в виде множества отдельных точек), или совместно кинематикой станка и инструментом (при линейной форме производящих элементов). При выборе конкретного варианта распределения функции формообразования между инструментальной и кинематической подсистемами следует учитывать, что при перенесении ее функции на инструмент упрощается кинематика станка, однако усложняется форма производящих элементов инструмента и снижается его универсальность.

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.

Из общих принципов синтеза кинематики формообразования поверхностей резанием [4] применительно к обработке ТЗК следует выделить следующие:

- перенесение функции кинематики формообразования на инструмент, что обеспечивает упрощение кинематики станка и повышение его кинематической точности;
- синтез структуры исполнительных движений, обеспечивающей благоприятные условия резания и работы механизмов станка;
- совмещение исполнительных движений для упрощения кинематической схемы обработки и повышения производительности;
- введение дополнительных движений, задание рационального сочетания скоростей и направлений элементарных движений или регулирование их скорости для управления формообразованием, схемой и условиями резания;
- рациональное распределение элементарных движений между исполнительными органами станка для обеспечения его универсальности.

Изложенные принципы построения общих схем обработки и кинематики формообразования составляют основу модели синтеза кинематических схем обработки, которая в структурном виде представлена на рисунке 2. Она является важным компонентом способа обработки, поскольку связывает схему формообразования поверхности, метод обработки, технологическую компоновку и кинематическую подсистему формообразующей системы станка (см. рис. 1), тем самым служит основой для проектирования кинематической структуры и кинематической схемы станка.



Рис. 2. Алгоритм синтеза кинематической схемы обработки

Рассмотрим задачи синтеза и анализа схем формообразования ТЗК, исходя из вышепредставленных положений.

**Синтез схем формообразования торцовых зубчатых контуров.** Синтез схемы формообразования любой поверхности осуществляется исходя из ее геометрии, от которой зависят форма и положение производящих линий (образующей и направляющей) и характер обработки (за один или множество циклов), а также метода формообразования.

**Геометрия торцовых зубчатых контуров.** При синтезе схем обработки поверхностей данного класса важны геометрические характеристики ТЗК, существенные для их формообразования с непрерывным движением деления. Классификация ТЗК, основанная на выделении этих характеристик, применительно к кулачковым муфтам и деталям измерительных систем типа индукторов антиблокировочных систем автомобилей в виде дисков с равномерно расположенными на торце пазами, дана в работе [1]. Такими характеристиками (признаками) являются: направленность пазов; поперечный профиль кулачков (зубьев); форма впадины (дна паза); сходимосты и форма боковых граней пазов. Для каждого признака установлены также типовые модификации ТЗК, характеризующие их геометрические параметры, например, определяющие форму профиля: треугольный симметричный, треугольный несимметричный, прямоугольный, трапецидальный, фасонный, ограниченный дугами окружностей, эвольвент, циклоидальных и других кривых. Пазы (зубья) могут иметь радиальное или косое направление, прямолинейную или криволинейную форму впадины. Боковые стороны зубьев могут быть параллельны, сходиться к центру или

к периферии, быть прямолинейными, вогнутыми, выпуклыми или иметь кривизну разных знаков, когда одна грань вогнутая, а другая выпуклая.

**Формирование производящих линий 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 для перемещения траектории движения формообразования в новое положение исходя из количества обрабатываемых пазов. Движение деления может осуществляться дискретно или непрерывно.

При обработке резанием форма каждой из производящих линий может быть образована геометрическим или кинематическим методами. В первом случае ее материальным носителем является исполнительная кинематическая пара: поступательная – при обработке прямолинейных пазов или 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 устройства для выполнения операции деления (обычно универсальной делительной головки). Так обрабатывают пазы с прямолинейными боковыми сторонами. Прямолинейность пазов обеспечивается в данном случае направляющими станка.

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 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. В большинстве случаев предпочтителен не сложный в реализации и обеспечивающий 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 [7]. Кроме того, образованная одним производящим элементом линия может содержать множество конгруэнтных участков, благодаря чему одновременно с формообразованием осуществляется также деление, что исключает дискретный характер последнего, присущий геометрическому методу формирования. При этом обеспечивается идентичность конструктивных элементов ТЗК и возможность управления траекторией исполнительного движения, благодаря чему повышается точность формообразования пазов ТЗК и их относительного расположения.

Необходимое для обработки всех пазов количество направляющих линий обеспечивается, при необходимости, установкой на режущем инструменте определенного количества  $z = m / m'$  производящих элементов, где  $m$  – число обрабатываемых пазов ТЗК,  $m'$  – число конгруэнтных участков траектории, формируемой одним производящим элементом [8].

**Структура исполнительных движений при обработке ТЗК.** 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. Каждая из производящих линий может быть образована различным количеством и различным сочетанием элементарных движений, не одинаковыми 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, т.е. движения, сообщаемые инструменту относительно заготовки для получения формы этой линии и срезания с заготовки слоя металла. Эти движения могут выполняться раздельно или быть совмещенными

в одно движение. Если исполнительное движение осуществляется со скоростью резания, что имеет место при образовании профиля методом следа, то 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 ( $Усм$ ) и вспомогательных ( $Всп$ ) перемещений [3]. Простые и сложные исполнительные движения создаются соответственно одним или несколькими взаимосвязанными элементарными движениями: вращательным ( $B$ ), поступательным ( $П$ ), качательным ( $K$ ), 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 формируемой поверхности ТЗК целесообразно принять контур плоского поперечного сечения паза, а в качестве направляющей – линию, определяющую форму паза 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 паза 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, т.е. является установочным движением.

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

**Методы формообразования ТЗК.** Метод формообразования любой поверхности определяется возможными сочетаниями методов образования ее производящих линий – образующей и направляющей [2, 3].

При синтезе схем обработки поверхность ТЗК рассматривается как след характеристического образа инструмента в относительном движении. Если обе боковые поверхности и дно паза формируются одновременно, то форма характеристического образа инструмента определяется совокупностью их производящих линий. При выборе одной из производящих линий в качестве образующей следует учитывать, что производительность формообразования максимальна, если характеристический образ инструмента конгруэнтен образующей формируемой поверхности. Для повышения непрерывности процесса формообразования за направляющую следует принимать линию максимальной длины. В большинстве случаев ею является линия, определяющая форму дна паза по длине.

Непрерывное формирование множества пазов ТЗК обеспечивается 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 [8]. При этом режущие зубья должны быть установлены равномерно с определенной точностью, которая определяется исходя из требуемой точности шага пазов ТЗК.

Каждая из производящих линий может генерироваться одним из базовых методов (копирования –  $Kп$ , следа –  $Сл$ , касания –  $Кс$ , обката –  $Об$ ) или их сочетанием, т.е. комбинированным методом, например,  $Kп + Сл$  [5]. Учитывая, что процесс формообразования во времени может осуществляться одновременно ( $E$ ), непрерывно ( $H$ ) или прерывисто ( $П$ ) [2], вид генерации линии во времени, при необходимости, указывается в обозначении геометрической схемы формообразования, соответственно индексами « $n$ » и « $п$ », например,  $Слп$ ,  $Слн$ ,  $Обп$ ,  $Обн$  и т.д. Метод формообразования поверхности в значительной мере определяет схему срезания припуска, например, при схеме  $Слп - Слн$ , боковая поверхность паза формируется последовательно за определенное количество резов, т.е. материал по глубине паза срезается послойно.

В зависимости от геометрии и ширины паза возможно одновременное или последовательное формирование его поверхностей. Одновременная обработка боковых поверхностей и дна возможна только для пазов с параллельными боковыми сторонами. Во всех других случаях необходимо предусматривать раздельную обработку этих поверхностей. Для широких пазов, по условиям динамики процесса резания, формирование дна предпочтительно осуществлять отдельно, что должно обеспечиваться схемой и циклом обработки [9].

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

Множество методов формообразования ТЗК определяется возможными сочетаниями методов получения профиля паза и его формы по длине, а также заданной последовательностью формирования поверхностей пазов [10]. На рисунке 3 представлены некоторые из основанных на этом принципе методов формообразования ТЗК.

		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. 3. Геометрические методы формообразования ТЗК

По схеме  $a$  ( $Kn-Kn$ ) образующая и направляющая линии создаются одновременно методом копирования, т.е. без движения формообразования, что имеет место при штамповке, электрофизической и электрохимической обработке. Движение  $\Pi_1$  – установочное. Для данной схемы характерны:

- высокая производительность процесса формообразования, благодаря одновременности формирования обеих производящих линий;
- зависимость точности и качества получаемой поверхности от точности инструмента, который является материальным носителем информации о ее геометрии;
- сложность инструмента и его неуниверсальность;
- невозможность формирования закрытых пазов из-за особенностей конструкции инструмента и метода генерации поверхности;
- зависимость размеров получаемого зубчатого контура от мощности оборудования.

Формирование поверхности по схеме  $b$  ( $Kn-Ob$ ) обеспечивается движением формообразования  $\Phi_v(B_1, B_2)$  и установочным движением  $Усм(\Pi_3)$ . По этой схеме возможно накатывание мелкозубых ТЗК.

Для формирования ТЗК по схеме  $v$  ( $Kn-Cl$ ) необходимы движения формообразования  $\Phi_v(\Pi_1)$ , деления  $D(B_3)$  и установки  $Усм(\Pi_2)$ . Простая геометрия инструмента и возможность обработки закрытых пазов являются преимуществами этой схемы. Ее недостаток – дискретность движения деления.

Схема  $z$  ( $Kn-Kc$ ) широко применяется на практике для обработки ТЗК на универсальных фрезерных станках дисковыми фрезами с применением делительной головки. Торцовый зубчатый контур образуется за счет движений формообразования  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_{s1}(\Pi_2)$ , установки  $Усм(\Pi_3)$  и деления  $D(B_4)$ . При параллельных осях движений  $B_1$  и  $B_4$  пазы по длине формируются по окружности, радиус которой равен радиусу инструмента. В этом случае движение подачи  $\Phi_{s1}(\Pi_2)$  совмещается с движением резания  $\Phi_v(B_1)$ , а движение  $Усм(\Pi_3)$  заменяется движением врезания. Преимуществами данной схемы по сравнению с предыдущей являются повышение производительности обработки и стойкости инструмента.

По схеме  $ж$  ТЗК формируются методом ( $Ob-Cl$ ), которому соответствует технологический метод зуботочения инструментом в виде круглого зуборезного долбяка. Движением обкатки  $\Phi_v(B_2, B_3)$  формируется профиль нарезаемых зубьев, а движением  $\Phi_s(\Pi_1)$  – их форма по длине. Методу присущи высокая производительность и точность формообразования, благодаря непрерывности процесса деления, однако он осуществим только на специальном станке.

Схема  $з$  ( $Ob-Kc$ ) основана на применении червячного инструмента. Для ее реализации необходимы два движения формообразования:  $\Phi_v(B_1, B_2)$  и  $\Phi_s(\Pi_3)$ , а также установочное движение  $Усм(\Pi_4)$ .

Особенностями этой схемы являются:

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

Схема  $к$  ( $Cl-Ob$ ) основана на применении инструмента в виде круглого зуборезного долбяка, что обеспечивает высокую точность формообразования и универсальность. Торцовый зубчатый контур формируется движениями  $\Phi_v(\Pi_1)$  и  $\Phi_{s1}(B_2, B_3)$ . При обработке глубоких пазов необходимо также движение врезания  $Vp(\Pi_4)$ .

При обработке резцовой головкой по схеме  $л$  ( $Cl-Cl$ ) обе производящие линии формируются методом следа с согласованными круговой подачей и движением врезания. Схема отличается универсальностью, благодаря возможности обработки пазов различной формы в продольном и поперечном направлениях.

Схема  $м$  ( $Cl-Kc$ ) реализуется дисковым инструментом (шлифование, фрезерование) движениями резания  $\Phi_v(B_1)$ , профилирования  $\Phi_{s1}(\Pi_2, \Pi_3)$ , подачи вдоль обрабатываемого паза  $\Phi_{s2}(\Pi_4)$  и деления  $D(B_5)$ , которое носит дискретный характер. Применение схемы целесообразно для обработки пазов с пологими впадинами, длина которых меньше их ширины.

Обработка пазов по схеме  $о$  ( $Kc-Ob$ ) производится дисковым инструментом тремя движениями формообразования:  $\Phi_v(B_1)$ ,  $\Phi_{s1}(\Pi_2)$  и  $\Phi_{s2}(\Pi_3, K_4)$  при дискретном движении деления  $D(B_5)$ . При сложной кинематике формообразования данная схема не имеет преимуществ по производительности и точности по сравнению с другими схемами формообразования.

Схема *n* (*Kc – Cl*) соответствует фрезерованию (шлифованию) пазов с использованием согласованных в двух направлениях подач  $\Phi_{s1}(P_2)$  и  $\Phi_{s2}(P_3)$ . Высокая цикличность относительных перемещений и дискретность движения деления  $D(B_5)$  усложняют реализацию схемы.

Схема *p* (*Kc – Kc*), при которой обе производящие линии формируются методом касания, имеет высокую универсальность, благодаря возможности при применении ЧПУ управлять формой обрабатываемых пазов во всех направлениях, однако многоцикловой характер формообразования отрицательно влияет на производительность.

Из приведенных на рисунке 3 методов формообразования заслуживает внимания высокопроизводительный метод, основанный на применении режущего инструмента червячного или дискового типа (схема 3). В зависимости от схемы резания, конструктивных особенностей инструмента и его установки относительно заготовки данный метод реализуется множеством схем обработки, некоторые из которых приведены на рисунке 4.

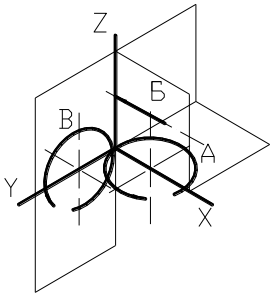
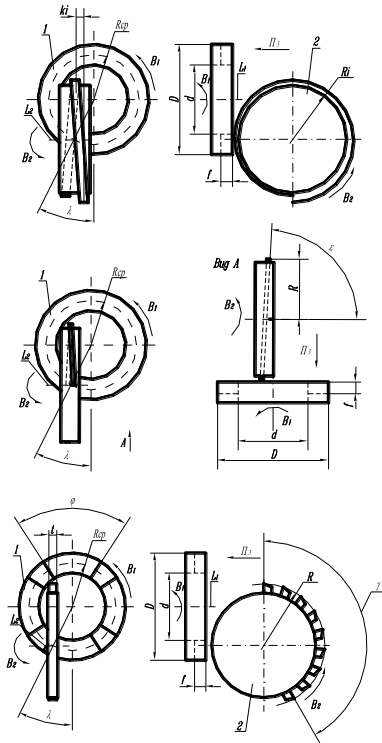
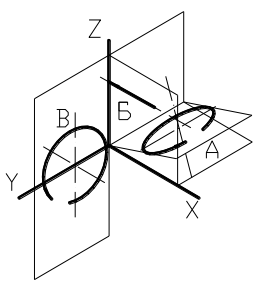
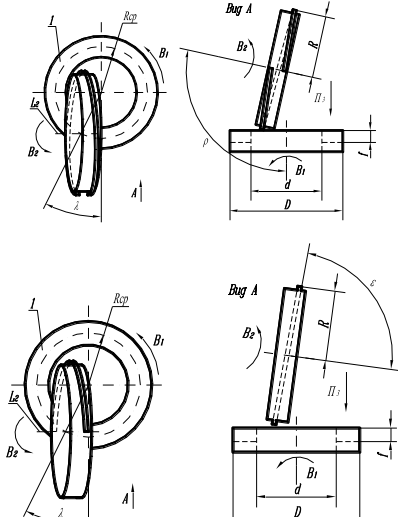
№ п/п	Кинематические схемы резания	Схемы обработки
1		
2		

Рис. 4. Кинематические схемы обработки ТЗК



На всех изображенных схемах показана обработка прямолинейных радиально ориентированных пазов глубиной  $f$ , расположенных между концентричными окружностями диаметрами  $D$  и  $d$ .

Представленные на рисунке 4 схемы резания 1 и 2 различаются взаимным расположением осей  $L_2$  и  $L_1$  вращательных движений инструмента 2 и заготовки 1 – при обработке по схеме 1 они скрещиваются под прямым углом, а по схеме 2 – под непрямым углом.

По схеме 1.1 ТЗК обрабатывают инструментом червячно-улиточного типа. Инструменту и заготовке сообщают согласованные вращательные движения, соответственно  $B_2$  и  $B_1$ , с частотами  $n_2$  и  $n_1$  вокруг их геометрических осей. При этом инструмент устанавливают на среднем радиусе  $R_{cp}$  так, чтобы образовался определенный угол  $\lambda$  между плоскостью вращения последнего режущего зуба и плоскостью, проходящей через ось вращения заготовки перпендикулярно оси вращения инструмента. Вершины режущих зубьев расположены на различном расстоянии  $R_i$  от оси вращения, поэтому каждый паз формируется за один оборот инструмента методом протягивания, что и обеспечивает высокую производительность обработки.

Однако неуниверсальность инструмента ограничивает область рационального применения данной схемы массовым производством. Этот недостаток частично исключается при обработке ТЗК инструментом, у которого режущие зубья расположены на части окружности (секторным инструментом) [11]. Расположение режущих зубьев на различных радиусах  $R_i$  достигается в этом случае эксцентricностью установки инструмента относительно оси его вращения, а изменение шага между обрабатываемыми пазами – его наклоном на угол  $\varepsilon$  по отношению к этой оси (схема 1.2). Такая установка инструмента, как показали теоретические и экспериментальные исследования, обеспечивает плавное увеличение силы резания при врезании инструмента в заготовку и ее уменьшение при выходе режущих зубьев из контакта с ней, что создает благоприятные динамические условия работы обрабатывающей системы. Благодаря эксцентricной установке инструмента отпадает необходимость в движении врезания, т.е. функция кинематики формообразования передается инструменту, что упрощает кинематику станка.

На использовании секторного инструмента основана также схема 1.3, по которой 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, при этом каждый паз формируется за несколько резов последовательно по ширине, т.е. методом следа или сочетанием методов следа и копирования, что позволяет обрабатывать ТЗК с широкими пазами типа муфт, крыльчаток и т.п. [12].

Схема 2.1 имеет по сравнению со схемой 1.1 более широкие технологические возможности за счет установки червячной фрезы под углом  $\rho$  к оси вращения заготовки [13]. Это позволяет вести обработку не улиточным, а более простым цилиндрическим червячным инструментом. Кроме того, изменение угла наклона инструмента позволяет частично компенсировать погрешности его изготовления по шагу расположения режущих элементов.

Обработка ТЗК по схеме 2.2 осуществляется секторным инструментом, режущие элементы которого расположены по окружности в угловом секторе, не превышающем половины дуги окружности. Инструмент установлен с эксцентricитетом относительно геометрической оси и под углом  $\varepsilon$  к оси вращения, величина которого определяется геометрией ТЗК. Схема отличается от аналогичной схемы 1.2 установкой оси вращения инструмента под углом к плоскости вращения заготовки, что позволяет управлять точностью формообразования пазов.

Таким образом, формообразование ТЗК возможно множеством методов и схем обработки, что с учетом их достоинств и недостатков, требований к универсальности и производительности, влияния наладки обрабатывающей системы на точность формообразования пазов [14] и других ограничений позволяет выбрать рациональные схемы для эффективного использования и модернизации имеющегося, а также проектирования нового станочного оборудования.

**Методика синтеза методов и схем формообразования ТЗК.** Из изложенного следует, что создание эффективных технологий обработки ТЗК связано с синтезом рациональных схем их формообразования на основе изложенных выше положений. Как показано выше, применительно к ТЗК существенное значение имеют следующие:

- перенесение функции кинематики формообразования на инструмент;
- непрерывность движения деления;
- 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 обрабатывающей системы.

Последовательность синтеза методов и схем формообразования ТЗК в структурном виде представлена на рисунке 5.

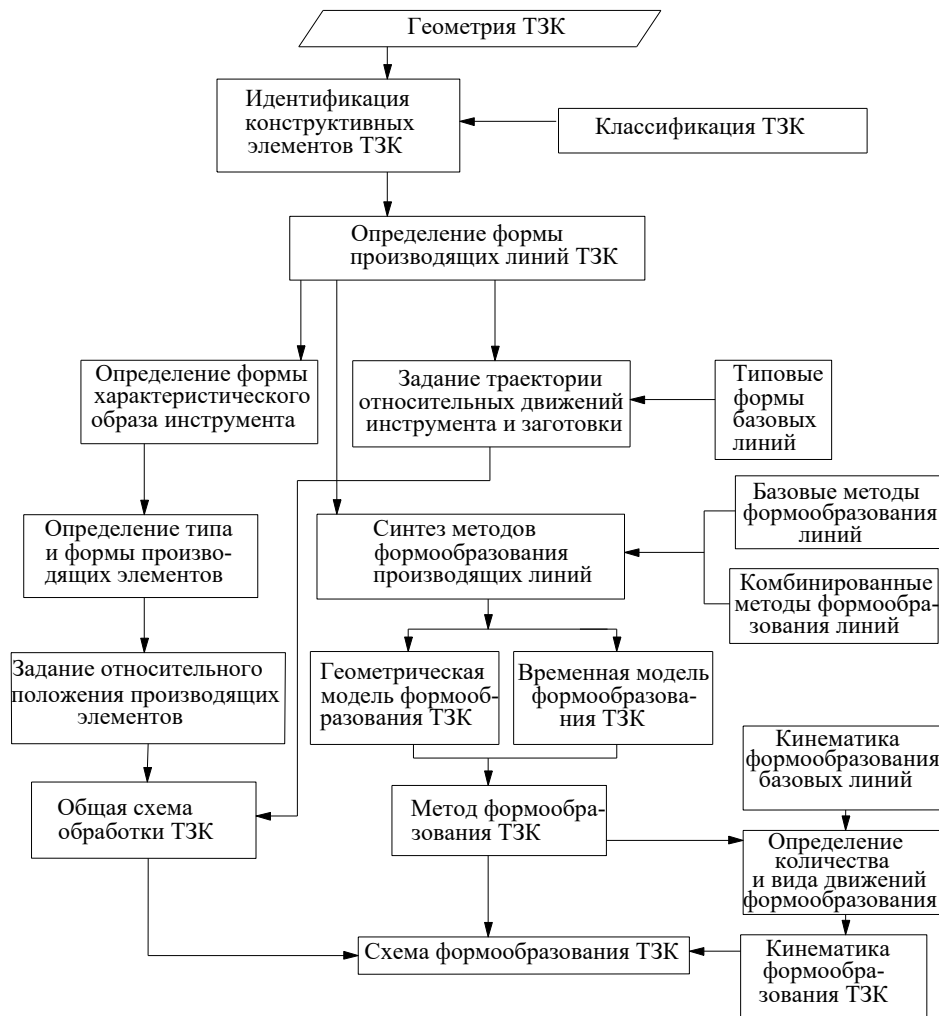


Рис. 5. Алгоритм синтеза схемы формообразования ТЗК

Исходными данными для решения этой задачи являются: геометрия ТЗК; типовые формы базовых производящих линий; базовые и комбинированные методы их формообразования; кинематика формообразования производящих линий. На этой основе для формируемого ТЗК в указанной на рисунке 5 последовательности устанавливаются компоненты схемы формообразования: общая схема обработки, метод и кинематика формообразования.

На изложенных методических положениях основаны новые способы обработки ТЗК [11 – 13, 15 – 18], общим для которых является непрерывность процесса деления. Практическая их реализация применительно к обработке торцовых муфт и индукторов антиблокировочных систем автомобилей на универсальных зубофрезерных и специальных станках [19] показала возможность интенсификации обработки ТЗК за счет рациональных схем формообразования, что подтверждается повышением в 2...3 раза технологической производительности по сравнению с традиционной технологией.

**Выводы**

1. Методической основой синтеза схем формообразования, обеспечивающих интенсификацию процессов обработки ТЗК, является системный подход, учитывающий взаимосвязь основных компонентов способа обработки – схемы формообразования, метода обработки и обрабатывающей системы.

2. Синтез схем формообразования ТЗК, включающий определение формы производящих линий, характеристического образа, типа и формы производящих элементов инструмента; задание их относительного положения и траектории перемещения производящих элементов; синтез методов формообразования производящих линий должен осуществляться с учетом характеристик ТЗК, существенных для обеспечения непрерывности и точности формообразования.

3. Особенностью обработки ТЗК при непрерывном процессе деления является кинематическое формирование боковых поверхностей пазов, которое обеспечивает универсальность схем обработки, а также возможность управлять точностью формообразования за счет задания их геометрических и кинематических параметров.

4. Обеспечением при синтезе схемы формообразования непрерывности процесса деления в сочетании с рациональной схемой резания, в частности круговым протягиванием, достигается значительное повышение производительности обработки ТЗК.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов, В.А. Синтез схем формообразования торцовых зубчатых контуров / В.А. Данилов., Р.А. Киселев // Теория и практика машиностроения. – 2005. – № 1. – С. 83 – 87.
2. Федотенок, А.А. Кинематические связи в металлорежущих станках / А.А. Федотенок. – М.: Машгиз, 1960 – 297 с.
3. Коновалов, Е.Г. Основы новых способов металлообработки / Е.Г. Коновалов. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 297 с.
4. Данилов, В.А. Общие принципы синтеза рациональных технологий формообразования сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов // Мир технологий. – 2003. – № 1. – С. 61 – 71.
5. Данилов, В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 264 с.
6. Данилов, В.А. Интенсификация технологий формообразования сложных поверхностей на этапе проектирования станочного оборудования / В.А. Данилов // Машиностроение: сб. науч. тр. / под ред. И.П. Филонова. – Минск: Технопринт, 2001. – Вып. 17. – С. 200 – 204.
7. Данилов, В.А. Кинематическое формирование производящих линий поверхности при обработке резанием на базе циклоидальных кривых / В.А. Данилов, Л.А. Данилова // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2004. – № 12. – С. 44 – 53.
8. Данилов, В.А. Анализ условий формирования пазов на торцах деталей методом кинематического профилирования / В.А. Данилов, О.В. Яловский // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 2. – С. 14 – 16.
9. 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: сб. науч. тр. / под ред. И.П. Филонова. – Минск: Технопринт, 2000. – Вып. 16. – С. 109 – 114.
10. 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-т. / под ред. Б.М. Хрусталева. – Минск: БНТУ, 2005. – Т. 1, Вып. 21. – С. 119 – 124.
11. Инструмент для обработки пазов на торцах деталей: пат. 553 Респ. Беларусь, МПК<sup>7</sup> В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20010263; заявл. 06.11.2001; опубл. 03.06.2002 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2002.
12. Инструмент для обработки пазов на торце детали и способ обработки пазов на торце детали: пат. 6934 Респ. Беларусь, МПК<sup>7</sup> В23С3/28. / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № a20000141; заявл. 15.02.2000; опубл. 30.03.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005.
13. Способ обработки пазов на торцах деталей: пат. 7846 Респ. Беларусь, МПК<sup>7</sup> В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 20010554; заявл. 22.06.2001; опубл. 10.11.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005.
14. 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. Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2003. – Т. 2, № 4. – С. 217 – 220.
15. Способ формирования пазов на торце детали: пат. 5707 Респ. Беларусь, МПК<sup>7</sup> В23С3/28. / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 2000051; опубл. 22.07.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003.
16. Способ обработки пазов на торцах деталей: Пат. 6063 Респ. Беларусь, МПК<sup>7</sup> В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 19980652; опубл. 02.12.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003.
17. Способ обработки пазов на торцах деталей и станок для его осуществления: пат. 6165 Респ. Беларусь, МПК<sup>7</sup> В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а19990206; опубл. 30.06.2004 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004.
18. Способ обработки пазов с треугольным профилем на торце детали: пат. 7041 Респ. Беларусь, МПК<sup>7</sup> В23С3/28. / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель Полоц. гос. ун-т. № a20000916; Опубл. 14.01.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005.
19. 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.

Поступила 10.01.2007