

УДК 621.91.04

## СИНТЕЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ КРУГОВОГО ТОЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ПРОФИЛЕМ В ВИДЕ ТРЕУГОЛЬНИКА РЕЛО

чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. **Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО**; **А.А. ДАНИЛОВ**  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрены известные методы формообразования некруглых моментопередающих поверхностей при обработке деталей с профилем в виде треугольника Рело. На основе их анализа и алгоритма синтеза кинематических схем обработки обоснована схема кругового точения профильных деталей с рациональным распределением исполнительных движений формообразования и деления между инструментом и заготовкой. Показано, что при сообщении главного движения инструменту, а движения деления заготовке и применении многолезвийного инструмента охватывающего типа обеспечивается по сравнению с известной схемой кругового точения повышение непрерывности процесса резания и производительности обработки. Разработаны варианты реализации предложенной схемы профилирования некруглых поверхностей на универсальном фрезерном станке при обработке коротких деталей и на специализированном станке для кругового точения длинных деталей. Спроектирована кинематическая структура станка для обработки деталей типа валов с профилем в виде многоугольника Рело.

**Ключевые слова:** многоугольники Рело, формообразование, круговое точение, схемы обработки, станки и инструменты.

**Введение.** В трансмиссиях различных машин и механизмов, приборах, инструментальных системах металлорежущих станков и другой технике наряду с традиционными шпоночными и шлицевыми соединениями применяются профильные соединения, в которых передача крутящего момента обеспечивается за счет соответствующей формы рабочих поверхностей сопряженных деталей. Профильные соединения по сравнению со шлицевыми имеют меньшую себестоимость при более высокой усталостной прочности, долговечности и других эксплуатационных преимуществах [1], что обуславливает актуальность их применения в технике. Профиль моментопередающей поверхности может быть ограничен непрерывной замкнутой контурной кривой или множеством пересекающихся линий (прямых, окружностей и др.), образующих многоугольник с прямолинейными или криволинейными сторонами. Контурные кривые могут быть равноосными, синусоидальными, циклоидальными и др. В машиностроении чаще применяется трехгранный профиль с равноосным контуром в виде линий равной ширины (РК-3 профиль), параметры которого регламентируются соответствующими стандартами [2; 3]. Технологическим преимуществом равноосного контура по сравнению с близкими к нему синусоидальным и циклоидальным контуром является неизменность расстояния между двумя любыми параллельными касательными к нему, что позволяет использовать при изготовлении деталей профильного соединения универсальные средства контроля.

Однако из-за сложной геометрии РК-профиля требуется дорогостоящее специальное станочное оборудование для обработки деталей профильного соединения. Поэтому практическое значение имеет применение более технологичных профильных соединений, в частности основанных на применении многоугольников Рело, также обладающих свойством равноосности.

Многоугольники Рело – это фигуры равной ширины с нечетным числом сторон в виде дуг окружности определенного радиуса. Шириной многоугольника Рело называется расстояние между любыми двумя параллельными касательными к контурной кривой, ограничивающей данную фигуру. Основными параметрами многоугольника Рело являются: число сторон (3, 5 и т.д.); ширина  $b$ ; радиусы описанной  $R_0$  и вписанной  $r$  окружностей (рисунок 1). Треугольник Рело – простейшая после круга фигура равной ширины, строящаяся на базе равностороннего треугольника  $ABC$  (см. рисунок 1), соседние вершины которого соединены между собой дугой окружности с радиусом, равным ширине  $b$  треугольника Рело. Через ширину  $b$  выражаются другие параметры треугольника Рело.

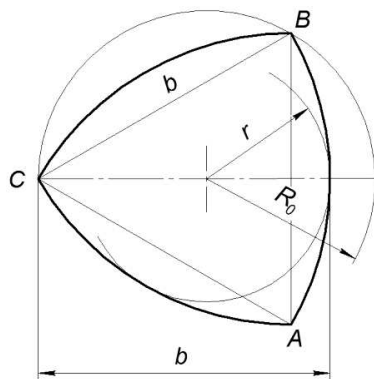


Рисунок 1. – Геометрические параметры треугольника Рело

На базе многоугольников Рело могут быть основаны профильные моментопередающие соединения типа вал-втулка, для обработки которых требуется разработка соответствующих методов и средств их реализации. Эта задача рассматривается нами применительно к обработке деталей с профилем в виде треугольника Рело на основе представленной на рисунке 2 последовательности синтеза схем обработки.

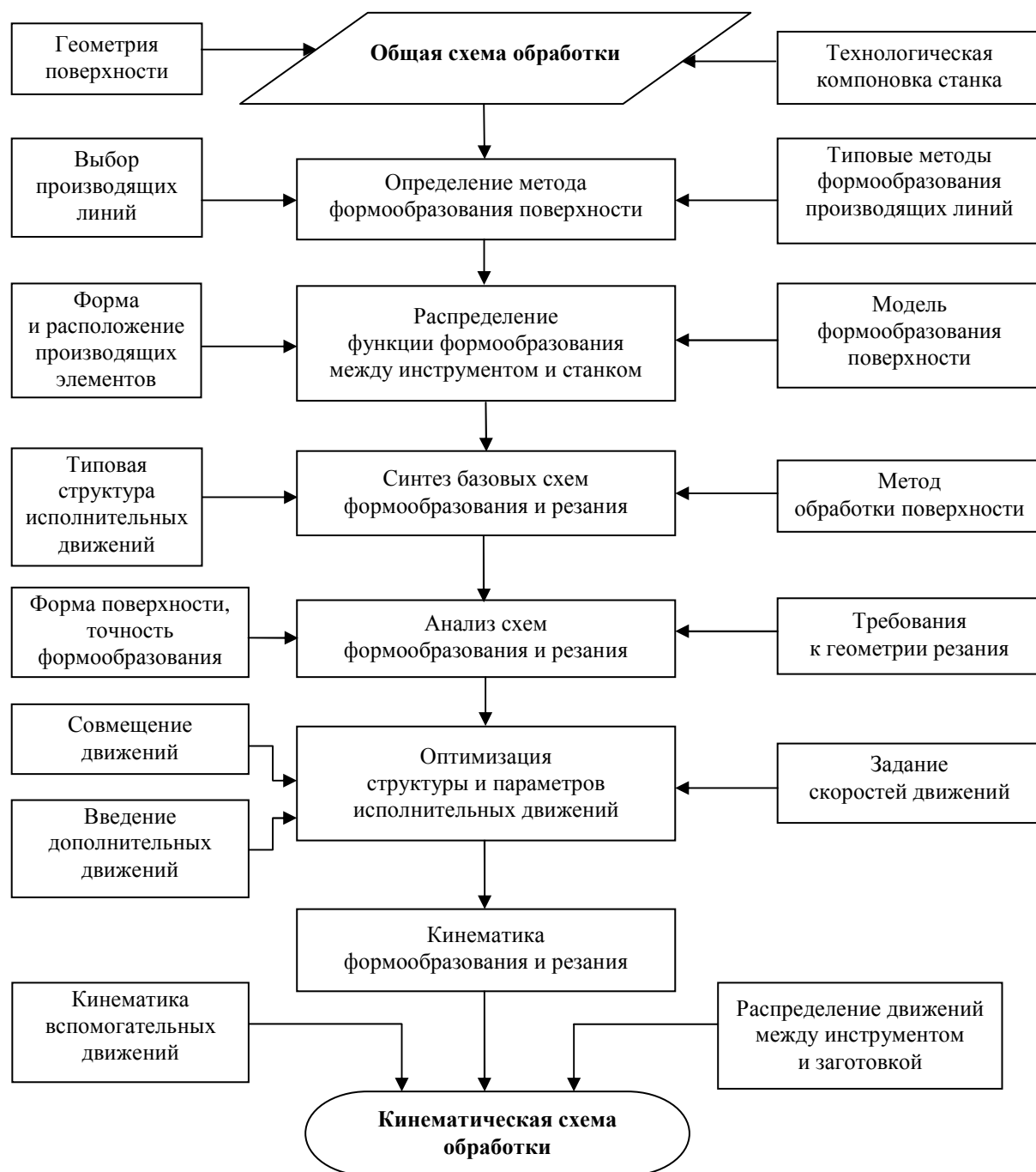


Рисунок 2. – Последовательность синтеза кинематической схемы обработки

**Схемы формообразования треугольника Рело.** Формирование треугольника Рело возможно методами, применяемыми при формообразовании других профилей [4]: копирования (обработка фасонными фрезами [5]); обката (обработка червячными фрезами [6] и долбяками [7]); касания (обработка концевыми [8] и специальными дисковыми [9] фрезами); следа (некруглое [10], полигональное [11; 12] и круговое [13] точение). Следует отметить, что известные исследования по обработке профильных моментопередающих поверхностей посвящены преимущественно формообразованию РК-профиля, циклоидального и синусоидального профилей. В работе [14] исследован процесс обработки внутренних поверхностей деталей с профилем в виде эквидистанты треугольника Рело.

Для решения рассматриваемой задачи требуется разработать новую или выбрать из известных рациональную схему формирования профиля в виде треугольника Рело, удовлетворяющую требованиям производительности и точности формообразования, простоте реализации. Выполнение этих требований достигается, как показано на рисунке 2, за счет следующих факторов: задание рациональной геометрии

производящих линий номинальной поверхности детали; методы их формообразования; распределение функции формообразования и исполнительных движений между режущим инструментом и кинематикой станка; выбор или разработка метода обработки и конструкции инструмента; оптимизация структуры и параметров исполнительных движений и других факторов с учетом требований к точности формообразования и геометрии резания (стабильности рабочих углов режущей части). На основе такого подхода проанализированы указанные выше методы формообразования применительно к обработке деталей с профилем в виде треугольника Рело.

Реализация методов копирования и обката требует применения специального фасонного режущего инструмента для каждого типоразмера обрабатываемых деталей, что экономически целесообразно лишь при определенных масштабах производства. Недостатком метода копирования при обработке фасонными инструментами является невозможность оптимизации скорости резания, так как она зависит от радиуса инструмента. Формирование профиля детали методом касания возможно на фрезерных и шлифовальных станках с копировальной или числовой системами управления. Обработка концевыми фрезами на вертикально-фрезерных станках с ЧПУ применяется для коротких деталей [8]. Заслуживает внимания метод следа, реализуемый простым режущим инструментом (резцом или резцовой головкой). Профилирование методом следа дуги окружности, центр которой не расположен на оси вращательного движения формообразования, возможно некруглым [10] и полигональным [12] точением, а при совмещении указанных центра и оси – круговым точением [13]. Для выбора рационального из них рассмотрим эти методы применительно к формированию треугольника Рело.

**Некруговое точение.** Профилирование некруглой поверхности методом следа, реализуемого некруглым точением, основано на сообщении заготовке 1 (рисунок 3, а) вращательного движения  $B_1$  вокруг ее оси  $L$ , а резцу – возвратно-поступательного движения  $O_2$  в плоскости вращения заготовки. При этом отношение частот возвратно-поступательного движения резца и вращения заготовки равно числу конгруэнтных участков сторон профиля.

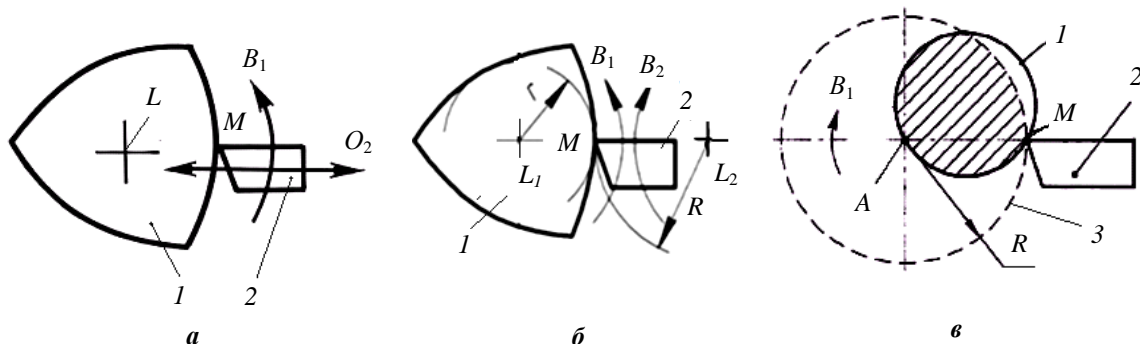


Рисунок 3. – Схемы профилирования детали некруглым (а), полигональным (б) и круговым (в) точением

Указанные элементарные движения образуют сложное движение профилирования  $\Phi(B_1O_2)$ , совершаемое производящей точкой  $M$  инструмента. Метод некруглого точения реализуется на специальных станках для профильного точения и модернизированных универсальных, например, токарно-затыловочных [1]. Его недостатком является низкая производительность из-за возвратно-поступательного движения исполнительного органа станка с резцом, вызывающего значительные знакопеременные нагрузки в механизмах станка, поэтому частота вращения заготовки не превышает  $100 \text{ мин}^{-1}$ . Следует отметить также отрицательное влияние на точность профилирования формирование окружности сложным исполнительным движением  $\Phi(B_1O_2)$ , которая ниже, чем при ее получении простым движением  $\Phi(B_1)$ .

Существенный недостаток некруглого точения, ограничивающий область его применения при обработке профильных деталей резанием, заключается в непрерывном изменении рабочих углов режущей части резца в зависимости от кривизны формируемой линии, что не позволяет оптимизировать условия резания. В этой связи необходимо оценить возможность применения некруглого точения для обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело. Так как угол при вершине треугольника Рело равен  $120^\circ$ , то при ее прохождении передний и задний углы режущей части резца скачкообразно изменяются в диапазоне  $\pm 60^\circ$ , что исключает возможность обработки деталей с таким профилем некруглым точением. По рассмотренной схеме возможна обработка некруглых поверхностей в виде треугольника Рело поверхностно-пластическим деформированием, например, выглаживанием, а также методами физико-технической обработки.

**Полигональное точение.** При полигональном точении формируемая линия образуется как траектория производящей точки  $M$ , совершающей одновременно одинаково направленные вращательные

движения  $B_1$  и  $B_2$  (рисунок 3, б). Одно из этих движений сообщается заготовке 1, а другое – режущему инструменту 2. При равных угловых скоростях вращательных движений указанная траектория представляет собой окружность [12], что при определенном значении радиуса  $R$  инструмента теоретически позволяет формировать сторону треугольника Рело. При оснащении инструмента тремя режущими элементами, равномерно расположенными по окружности радиусом  $R$ , формируются три пересекающиеся окружности, образующие треугольник Рело. В этом случае функция деления выполняется за счет конструкции инструмента, что упрощает схему обработки и конструкцию станка. Погрешность формирования окружности полигональным точением зависит от точности согласования двух вращательных движений и каждого из них, поэтому будет ниже, чем при обычном точении. Кроме того, как показало исследование, схема полигонального формирования треугольника Рело методом следа не может быть реализована при обработке резанием из-за недопустимого изменения рабочих углов режущей части инструмента. Она может быть использована для обработки профильных деталей поверхностно-пластическим деформированием.

**Круговое точение.** Выполнение стороны треугольника Рело в виде дуги окружности позволяет формировать ее методом кругового точения, т.е. одним вращательным движением, при условии, что оно осуществляется вокруг оси, проходящей через вершину треугольника Рело перпендикулярно плоскости вращения, расположенную напротив обрабатываемой его стороны. На этом основан известный способ обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело [13] (рисунок 3, в), согласно которому заготовке 1 сообщают вращательное движение  $B_1$  вокруг оси, проходящей через вершину  $A$  треугольника Рело.

Обработка производится резцом 2, его вершина (производящая точка  $M$ ) в относительном движении описывает окружность 3, радиус  $R$  которой равен ширине  $b$  (см. рисунок 1) треугольника Рело. Для формирования обработанной поверхности по длине резцу сообщается также движение подачи вдоль оси вращения заготовки. После обработки каждой грани детали заготовку переустанавливают так, чтобы ось ее вращения проходила через другую вершину треугольника Рело, и обрабатывают следующую грань детали.

Достоинства метода кругового точения – более высокая точность формирования окружности по сравнению с методами некругового и полигонального точения, так как она зависит только от точности кинематической пары вращения, а также стабильность рабочих углов резца.

Недостатком рассматриваемой схемы обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело является низкая производительность вследствие следующих причин:

- резец контактирует с заготовкой за время ее одного оборота вокруг оси вращения на небольшом угле, что обуславливает значительную прерывистость процесса обработки и многократное превышение времени холостого перемещения заготовки по окружности по сравнению с временем резания;
- эксцентричная установка заготовки относительно оси вращения влечет значительную неуравновешенность и ограничивает частоту ее вращения, а следовательно и скорость резания, и производительность обработки;
- нерациональная схема срезания припуска, которая характеризуется непрерывным возрастанием дисбаланса заготовки в процессе обработки по мере перемещения инструмента вдоль заготовки и срезания с нее слоя металла;
- для закрепления длинных заготовок требуется оснащение станка специальным приспособлением, что связано с увеличением вспомогательного времени и снижением производительности, а также существенно усложняет реализацию схемы обработки.

Отмеченные недостатки обусловлены нерациональным распределением движений между инструментом и заготовкой – сообщением заготовке вращения, необходимого для формирования окружности.

Интенсификация процесса обработки достигается при ином распределении исполнительных движений между инструментом и заготовкой, в частности при сообщении главного движения  $\Phi_v(B_1)$  инструменту. На этом основан способ обработки деталей с профилем равной ширины резцовой головкой, по которому режущему инструменту сообщается главное движение  $\Phi_v(B_1)$ , проиллюстрированное рисунком 4. При этом движение подачи  $\Phi_s(P_2)$  может сообщаться как резцовой головке, так и заготовке.

Многогранную поверхность с профилем в виде треугольника Рело обрабатывают на заготовке 1 инструментом в виде охватывающей резцовой головки 2 с несколькими режущими элементами 3, например, сменными режущими пластинками, которые устанавливают по окружности, радиус  $R$  которой равен ширине  $b$  треугольника Рело. Количество резцов в головке не зависит от числа обрабатываемых граней и может быть различным (например, резцовая головка 2 на рисунке 4, а имеет 3 резца, а на рисунке 4, б – 12 резцов). С увеличением количества резцов пропорционально уменьшается машинное время обработки. Максимальное количество резцов в головке определяется конструктивными факторами.

После обработки одной грани заготовке 1 сообщается поворот  $B_3$  (движение деления  $D(B_3)$ ) вокруг ее оси 7 на угол, равный углу между соседними гранями детали. Затем, как описано выше, обрабатывают вторую грань и так далее, до окончания обработки всех граней детали.

Вследствие того, что вращательное движение со скоростью резания сообщается не заготовке, а режущему инструменту, исключены инерционные нагрузки, обусловленные эксцентричным распо-

жением (неуравновешенностью) заготовки относительно оси ее вращения, что позволяет повысить скорость резания и, соответственно, производительность обработки. Кроме того, при обработке многолезцовой головкой многократно уменьшается время холостых ходов, в течение которых процесс резания не выполняется, благодаря чему возрастает доля машинного времени в цикле обработки и, соответственно, повышается производительность обработки.

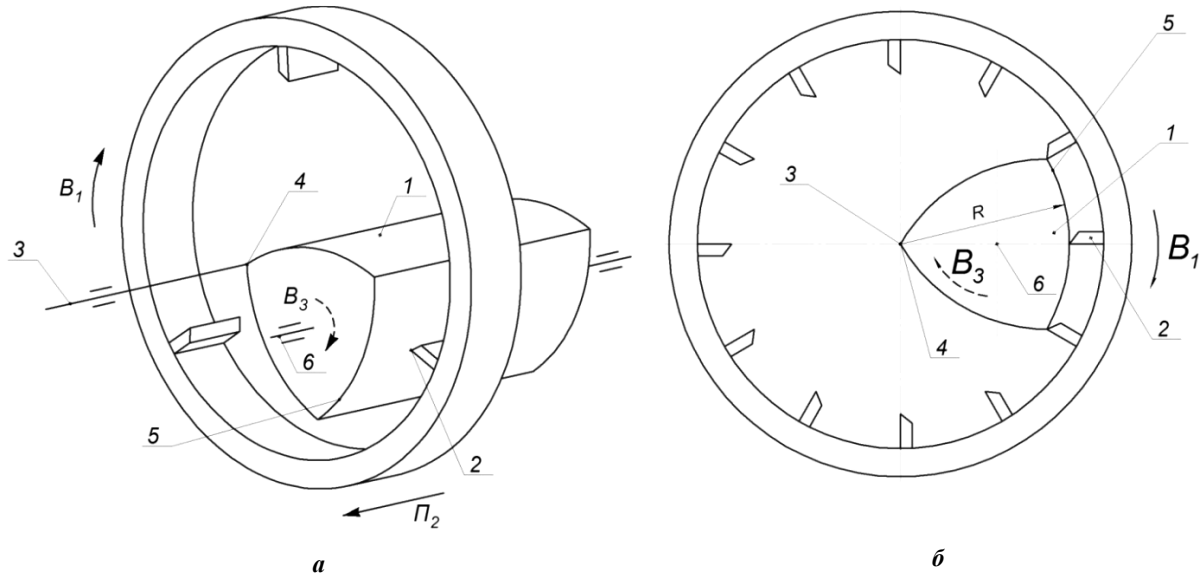


Рисунок 4. – Кинематическая схема обработки (а) и схема формирования профиля детали в виде треугольника Рело (б) охватывающей резцовой головкой

Наиболее значимо для повышения производительности обработки многогранных деталей применение режущего инструмента в виде охватывающей многолезцовой головки, благодаря чему машинное время обработки грани детали уменьшается по сравнению с известным способом [13] в количество раз, равное числу резцов головки.

Реализация кинематических схем механической обработки поверхностей деталей машин связана с созданием станочного оборудования и его инструментального оснащения. Первостепенное значение в создании станочного оборудования имеет этап функционального (концептуального и схемотехнического) проектирования [15], поскольку допущенные здесь ошибки не могут быть устранены на последующих этапах проектирования и конструирования. Важной задачей на этом этапе является синтез кинематической структуры станка.

**Синтез кинематической структуры станка для обработки валов с профилем в виде треугольника Рело.** Синтез кинематической структуры – важный этап схемотехнического проектирования станка, так как она является основой его кинематической схемы и компоновки, реализует функциональные связи в формообразующей системе. Рассмотрим эту задачу для реализации представленной выше схемы обработки валов с профилем в виде треугольника Рело. Задача решается на основе общих принципов анализа и синтеза кинематической структуры станков [16], к которым относятся следующие:

- любое исполнительное движение создается соответствующей кинематической группой;
- кинематическая группа содержит источник движения, внешнюю и внутреннюю связи с размещенными в них органами настройки параметров исполнительного движения;
- совокупность кинематических групп и межгрупповых связей образуют кинематическую структуру станка.

Таким образом, первым этапом разработки кинематической структуры станка является синтез кинематических групп исполнительных движений исходя из формы производящих линий поверхности, кинематики их формообразования и реализуемых функциональных связей.

Как показано выше, для формирования треугольника Рело по схеме кругового точения необходимы вращательное движение инструмента со скоростью резания и периодический поворот заготовки для обработки каждой следующей грани, т.е. движение деления. Для обработки детали по длине требуется простое движение подачи  $\Phi_s(P_2)$ . Кроме указанных движений формообразования на станке необходимы:

- перемещение инструмента в радиальном направлении – установочное движение и вспомогательное движение – его перемещение в обратном направлении в исходное положение;
- вспомогательное перемещение инструмента вдоль оси заготовки.

Исходя из схем формообразования и резания кинематическая структура станка для обработки конической детали с профилем в виде треугольника Рело (рисунок 5) содержит кинематические группы указанных исполнительных движений.

Заготовку 1 обрабатывают охватывающей резцовой головкой 2, снабженной резцами 3, которой двигателем  $M_1$  сообщают вращение  $B_1$  со скоростью резания вокруг оси 4, проходящей через вершину треугольника Рело, расположенную противоположно его обрабатываемой стороне. Поэтому образующей обработанной поверхности является дуга окружности.

Резцовая головка смонтирована на поперечном суппорте 5 станка, перемещение  $\Pi_3$  которого в радиальном направлении осуществляется посредством двигателя  $M_3$  и тягового устройства 6. Поперечный суппорт установлен на продольном суппорте 8, который имеет возможность продольного перемещения  $\Pi_2$  по станине 9 с помощью двигателя  $M_2$  и тягового устройства 10 для формирования детали по длине. В результате движений  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(\Pi_2)$  на заготовке 1 обрабатывается одна грань детали.

Для обработки следующей грани шпинделю 11 с заготовкой 1 от привода 12 с делительным устройством сообщается вокруг оси заготовки 7 поворот на угол, равный  $120^\circ$  (движение деления  $D(B_4)$ ), и далее описанным выше способом обрабатывается следующая грань детали.

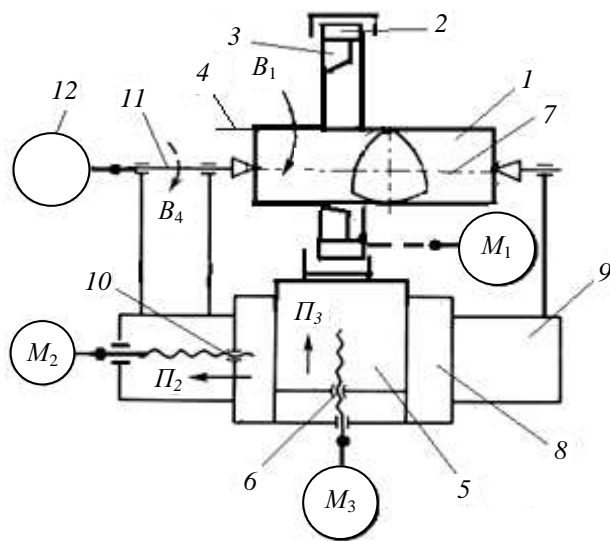


Рисунок 5. – Структурная схема станка для обработки круговым точением деталей с профилем в виде треугольника Рело

Предложенная схема кругового точения поверхностей с профилем в виде многоугольника Рело применительно к обработке коротких деталей может быть реализована также на горизонтально-фрезерном станке. В этом случае резцовая головка крепится на шпинделе станка, а заготовка – в универсальной делительной головке, установленной на его продольном столе. Движение подачи для формирования детали по длине осуществляется перемещением поперечного суппорта.

**Заключение.** Формирование производящей линии номинальной поверхности детали в виде многоугольника Рело возможно методами копирования, обката, касания и следа, из которых (как более простой в реализации) предпочтителен метод следа. Этот метод формообразования многоугольников Рело может быть осуществлен технологическими методами некруглого, полигонального и кругового точения, однако предпочтителен метод кругового точения, обеспечивающий постоянство рабочих углов режущей части инструмента. Из возможных схем кругового точения деталей с профилем в виде треугольника Рело рациональной является схема, основанная на сообщении вращательного движения резцовой головке охватывающего типа, обеспечивающая по сравнению со схемой с вращательным движением заготовки более благоприятные динамические условия работы станка и повышение производительности за счет увеличения доли машинного времени в цикле обработки и применения многолезвийного режущего инструмента. Разработана структурная схема специализированного станка, реализующего рациональную схему кругового точения деталей типа валов с профилем в виде многоугольника Рело.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тимченко, А.И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / А.И. Тимченко – М., 1993. – 41 с.

2. Antriebselemente Polygonprofile P3G : DIN 32711-79. – Berlin : Beuth. – 3 S.
3. Соединения профильные. Типы и размеры : ОСТ 92-4742-86.
4. Пантелеенко, Ф.И. Системный анализ и синтез рациональных методов профилирования некруглых поверхностей / Ф.И. Пантелеенко, А.А. Данилов // Актуальные проблемы в машиностроении. Т. 4, № 1. – Новосибирск : НГТУ, 2017. – С. 59–64.
5. Шитиков, А.Н. Проектирование сборных фрез для обработки наружного РК-профиля : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Шитиков. – Тула, 2007. – 20 с.
6. Волковский, С.В. Повышение эффективности формообразования равноосноконтурных поверхностей посредством создания режущего инструмента, реализующего метод огибания : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / С.В. Волковский. – Хабаровск, 2002. – 218 л.
7. Панкратов, П.А. Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей по методу обкатывания : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / П.А. Панкратов. – Курск, 2013. – 20 с.
8. Зенин, Н.В. Технологическое обеспечение качества трехгранного профиля бесшпоночных соединений в условиях серийного производства : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Н.В. Зенин. – М., 2007. – 132 с.
9. Максименко, Ю.А. Создание метода проектирования дисковых фрез с конструктивным исполнением радиальной подачи для обработки валов с РК- и К-профилем : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю.А. Максименко. – Курск, 2014. – 20 с.
10. Ворона, В.В. Расчет оснастки и операции токарной обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / В.В. Ворона. – Курск, 2008. – 202 с.
11. Разумов, М.С. Повышение производительности формообразования наружных поверхностей посредством планетарного механизма : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / М.С. Разумов. – Курск, 2011 – 158 с.
12. Данилов, А.А. Анализ и реализация схем полигонального течения многогранных поверхностей / А.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, В. Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11. – С. 19–27.
13. Способ обработки профильного вала равной ширины : пат. RU 2463129 / А.И. Барботько, П.А. Панкратов, М.С. Разумов. – Опубл. 10.10.2012.
14. Максимов, С.П. Повышение эффективности формообразования профильных соединений на базе «треугольника Рело» : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / С.П. Максимов. – Челябинск, 2005. – 184 л.
15. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 316 с.
16. Федотёнок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотёнок. – М. : Машиностроение, 1970. – 403 с.

Поступила 02.08.2017

## SYNTHESIS AND IMPLEMENTATION OF A RATIONAL SCHEME CIRCULAR TURNING OF PARTS WITH A PROFILE IN THE FORM OF THE RELO TRIANGLE

**F. PANTELEYENKO, A. DANILOV**

*The known methods of forming non-circular transmitting torque surfaces in the machining of workpieces with a profile in the form of the Relo Triangle considered in this article. Based on their analysis and synthesis algorithm of kinematic processing circuits are justified scheme circular turning of the relevant parts. It differs by rational distribution Executive movements shaping and dividing between the tool and the workpiece. The proposed scheme circular turning ensures the productivity and continuity of the process processing profile details. Options for implementation of the proposed scheme profiling non-circular surfaces on a universal and on a dedicated machine are developed. Kinematic structure of machine tool for processing of details such as shafts profile in the form of the Relo polygon are designed.*

**Keywords:** *the Relo polygons, shaping, circular turning, processing circuit, machine tools and tools.*