

Рис. 4. Расчетное изменение координаты z_1 : (перемещение стола с деталью в вертикальном направлении) при двукратном увеличении коэффициента диссипации

Для повышения эффективности методики необходим анализ точности решения системы дифференциальных уравнений обоими математическими методами, а также совершенствование подходов к составлению структурных схем реальных систем, на основании которых составляются исходные дифференциальные уравнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин, Б.В. Расчет динамических характеристик металлорежущих станков. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. – 112с.

УДК 621.91.04

Пантелеенко Ф.И., Данилов А.А.

АНАЛИЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ СХЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ В ВИДЕ ТРЕУГОЛЬНИКА РЕЛО МЕТОДОМ НЕПРЕРЫВНОГО СЛЕДА

Белорусский национальный технический университет»

г. Минск, Беларусь

Рассмотрены схемы некруглого, кругового и полигонального формирования методом непрерывного следа профиля поверхности в виде треугольника Рело. Установлены область рационального применения и пути реализации этих схем при обработке некруглых поверхностей резанием и поверхностным пластическим деформированием. Показана эффективность способа кругового точения деталей с таким профилем по сравнению с известным, основанного на применении охватывающего многолезвийного режущего инструмента и сообщении ему вращательного движения со скоростью резания. Аналити-

чески доказана возможность, определены геометрические и кинематические условия формирования профиля в виде треугольника Рело полигональным методом. Установлены закономерности и диапазон изменения рабочих углов инструмента, что позволило определить рациональную область применения этого метода профилирования.

Введение. В машиностроении наряду с традиционными шлицевыми и шпоночными соединениями находят применение обладающие по сравнению с ними эксплуатационными и технологическими преимуществами некруглые моментопередающие соединения с равноосным РК-профилем, с синусоидальным, циклоидальным и другими видами профилей [1], некоторые методы формирования которых рассмотрены в [1-11] и др. Актуальны разработка и реализация рациональных методов профилирования и основанных на них технологий формообразования моментопередающих поверхностей [12].

Заслуживают внимания в качестве моментопередающих профили в виде многоугольников Рело – фигур равной ширины с нечетным числом сторон в виде дуг окружности определенного радиуса [13]. Их общим свойством являются постоянство расстояния (ширины многоугольника) между любыми двумя параллельными касательными к контурной кривой, ограничивающей данную фигуру. Отмеченное свойство многоугольников Рело позволяет применять для контроля деталей с таким профилем универсальные инструменты – штангенциркули, микрометры и другие, что является его технологическим преимуществом по сравнению с синусоидальным, циклоидальным и другими некруглыми профилями деталей моментопередающих соединений. Свойством равноосности обладает и менее технологичный РК-3 профиль [14], имеющий более сложную геометрию по сравнению с треугольником Рело.

Основными параметрами многоугольника Рело являются число сторон (3, 5 и т.д.), ширина b , радиусы описанной R_0 и вписанной r окружностей (рис. 1). На базе многоугольников Рело могут быть основаны профильные моментопередающие соединения типа вал-втулка, для обработки которых требуется разработка соответствующих технологий формообразования, т.е. методов обработки, инструментов и станочного оборудования.

Простейшей после круга фигурой равной ширины является треугольник Рело, в основу которого положен равносторонний треугольник ABC (см. рис. 1), соседние вершины которого соединены между собой дугой окружности, радиус которой равен ширине b треугольника Рело.

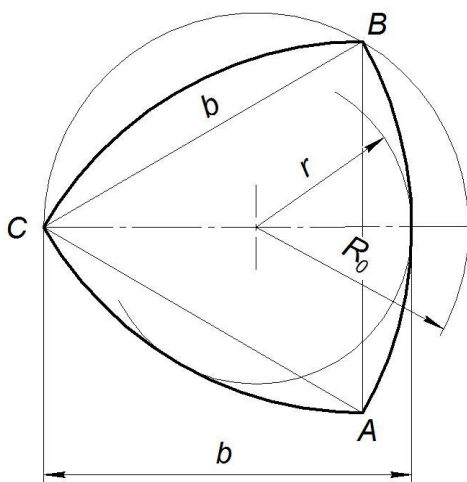


Рис. 1. Геометрические параметры профиля поверхности в виде треугольника Рело

Формирование многоугольного профиля детали, в частности, в виде треугольника Рело, возможно методами следа (некруглое [2], круглое [3] и полигональное [4-6] точение), копирования (обработка фасонными инструментами – фрезами [7], шлифовальными кругами и др.), обката (обработка червячными фрезами [8] и абразивными кругами, долбяками [9]), касания (обработка концевыми [10] и специальными дисковыми [11] фрезами и комбинированными методами. В статье рассматриваются более простые в реализации схемы профилирования треугольника Рело методом непрерывного следа, при которых производящим элементом инструмента является точка.

Анализ схем профилирования треугольника Рело. Множество возможных схем формирования поверхностей с профилем в виде многоугольника Рело методом непрерывного следа обусловлено тем, что оно возможно некруглым, круглым и полигональным точением. Во всех этих случаях обеспечивается полное профилирование формируемой поверхности, которое осуществляется со скоростью резания. Рассмотрим эти методы.

Некруглое точение. Профилирование многогранной детали методом следа, реализуемого некруглым точением, основано на сообщении заготовке 1 (рис. 2, 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 сторон граней.

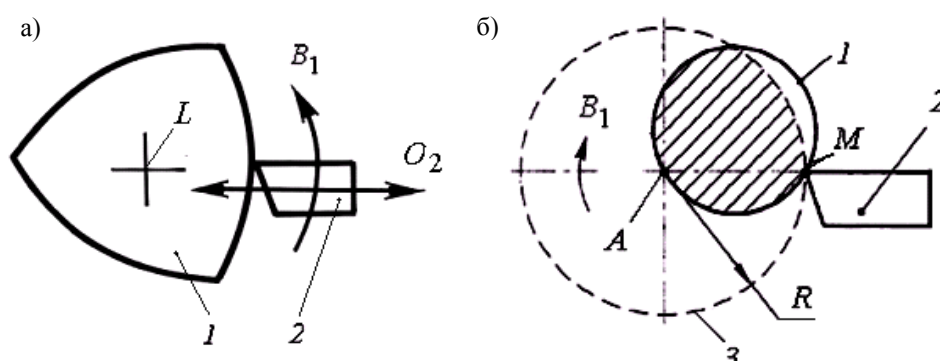


Рис. 2. Схемы профилирования детали некруглым (а) и круговым (б) точением

Указанные элементарные движения образуют сложное движение профилирования $\Phi(B_1O_2)$. Метод некруглого точения реализуется на специальных станках и модернизированных универсальных, например, токарно-затыловочных станках. Рассмотрим возможность применения некруглого точения для обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело. Так как угол при его вершине равен 120° , то при ее прохождении передний и задний рабочие углы инструмента скачкообразно изменяются в диапазоне $\pm 60^\circ$, что исключает возможность обработки деталей с таким профилем резанием. По рассмотренной схеме обработки возможно выглаживание некруглых поверхностей на указанных станках.

Круговое точение. Выполнение стороны треугольника Рело в виде дуги окружности позволяет формировать ее методом кругового точения, т.е. одним вращательным движением $\Phi(B)$, 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 [3] (рис. 2, б), согласно которому заготовке 1 сообщают вращательное движение B_1 вокруг оси, проходящей через вершину A треугольника Рело.

Обработка производится резцом 2, вершина которого (производящая точка M) в относительном движении описывает окружность 3, радиус R которой равен ширине b

(см. рис. 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.

Достоинством рассмотренного метода кругового точения является стабильность рабочих углов резца, а недостатком – низкая производительность, по следующим причинам:

- 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 со временем резания;

- эксцентричная установка заготовки относительно оси вращения обуславливает значительную неуравновешенность и ограничивает частоту ее вращения и, следовательно, скорость резания и производительность обработки;

- для закрепления длинных заготовок требуется оснащение станка специальным приспособлением, что связано с увеличением вспомогательного времени и снижением производительности.

Отмеченные недостатки известной схемы обработки обусловлены нерациональным распределением движений между инструментом и заготовкой – сообщением ей вращения, необходимого для формирования окружности.

Интенсификация процесса обработки достигается при ином распределении исполнительных движений между инструментом и заготовкой, в частности, при сообщении главного движения $\Phi_1(B_1)$ режущему инструменту (рис. 3). Движение подачи $\Phi_2(\Pi_2)$ может сообщаться как инструменту, так и заготовке. Для обработки следующей грани заготовке 1 сообщается поворот B_3 вокруг её оси b на угол, равный углу между соседними гранями детали. Вследствие того, что вращательное движение сообщается не заготовке, а режущему инструменту, исключены инерционные нагрузки, обусловленные эксцентричным расположением (неуравновешенностью) заготовки относительно оси ее вращения, что позволяет повысить скорость резания и соответственно производительность обработки.

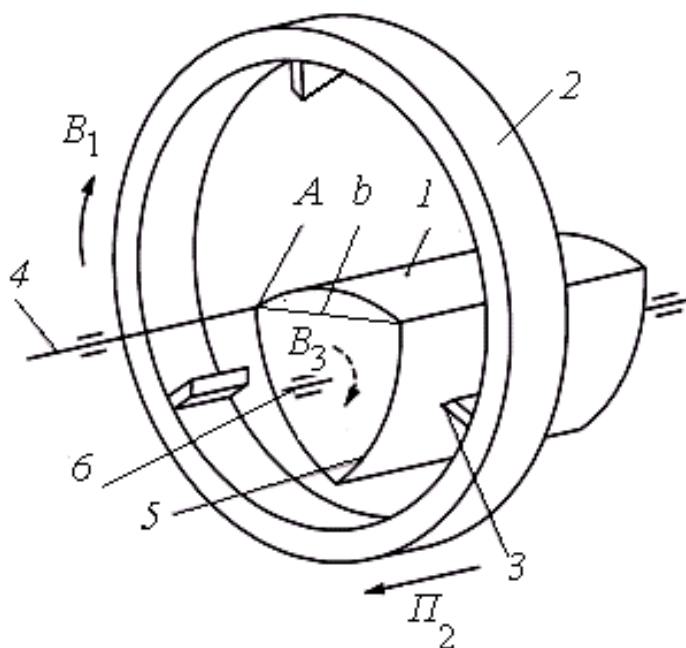


Рис. 3. Кинематическая схема кругового точения детали с профилем в виде треугольника Рело охватывающим инструментом

В процессе обработки режущему инструменту в виде резцовой головки 2 сообщают вращение вокруг оси 4, проходящей через вершину A треугольника Рело, которая расположена противоположно его обрабатываемой стороне 5. Вершины режущих зубьев 3 головки расположены по окружности, радиус которой равен ширине b треугольника Рело. Количество режущих зубьев в головке не зависит от числа обрабатываемых граней и определяется конструктивными факторами. С его увеличением пропорционально 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.

Рассмотренный способ кругового точения может быть реализован на станке для вихревого точения валов охватывающей резцовой головкой, на горизонтально-фрезерном станке при установке заготовки в делительной головке.

Полигональное профилирование. Недостатком рассмотренных способов кругового точения многогранников с профилем равной ширины является невозможность обработки всех граней детали за один ход, необходимость выполнения движения деления, что усложняет цикл обработки и конструкцию станка. Поэтому заслуживает внимания метод полигонального профилирования, при котором многоугольный профиль детали формируется за один цикл за счёт согласованных вращательных движений заготовки и инструмента с равномерно расположенными по окружности производящими элементами.

Рассмотрим общую схему полигонального профилирования многогранной поверхности (рис. 4). Заготовке 1 и инструменту 2 с рабочими элементами 3 сообщают согласованные вращательные движения соответственно B_1 и B_2 вокруг параллельных осей.

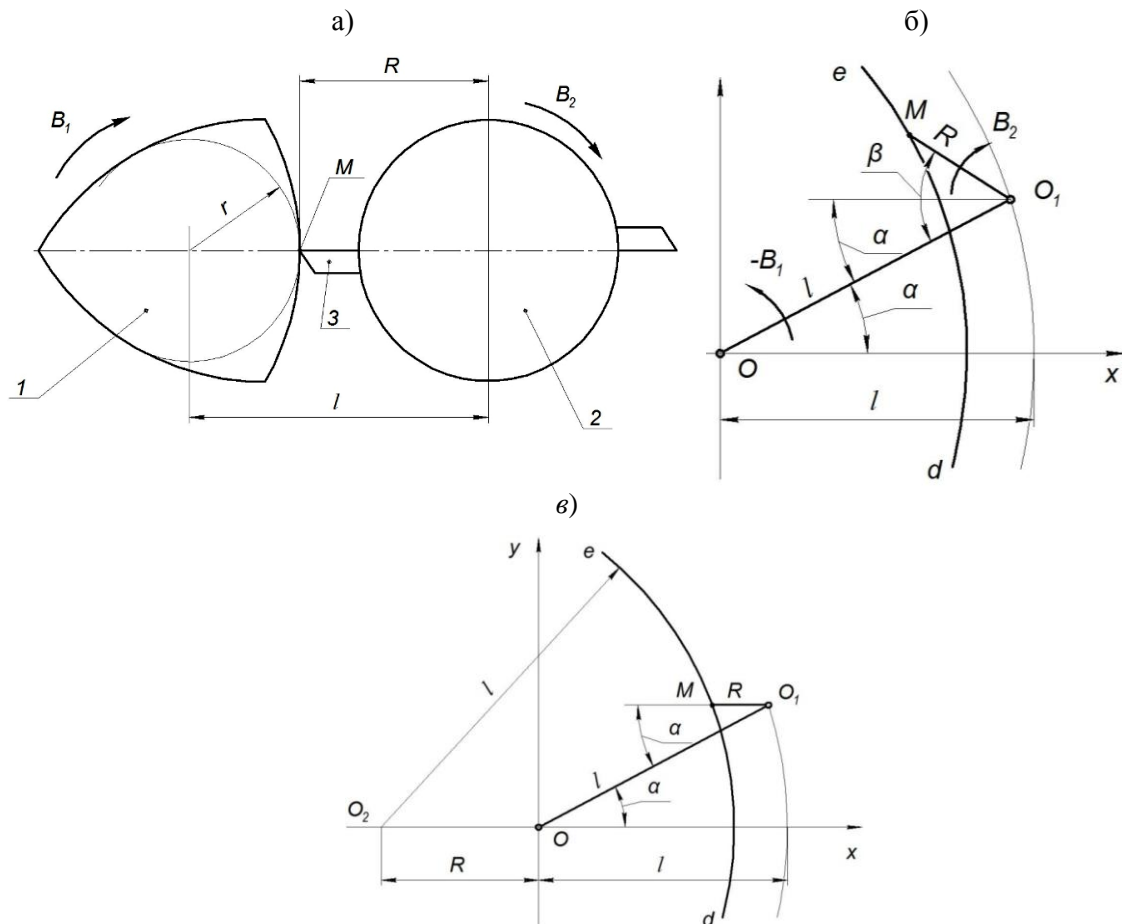


Рис. 4. Полигональное формирование некруглых поверхностей:
 а – кинематическая схема обработки; б – общая схема профилирования;
 в – схема профилирования грани по окружности

Профиль поверхности формируется производящей точкой M инструмента. На рисунке 4, б изображена схема его расположения относительно неподвижной заготовки. В этом случае инструмент совершает два вращательных движения: B_2 вокруг своей оси O_1 и $-B_2$ – вращение, противоположное вращению B_1 заготовки, показанному на рисунке 4, а. При сообщении производящей точке M указанных вращательных движений она перемещается по линии de , уравнение которой в системе координат XOY имеет вид:

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

где l – расстояние между осями O и O_1 вращательных движений производящей точки M инструмента;

β – угол поворота инструмента вокруг своей оси O_1 , соответствующий углу α поворота заготовки вокруг её оси O ;

R – радиус инструмента (вращения производящей точки M).

Обозначим $\beta/\alpha = i$, где i – отношение угловых скоростей инструмента и заготовки. Тогда $\beta = \alpha i$ и уравнения (1) можно представить в виде:

$$\begin{cases} x = l \cdot \cos \alpha - R \cdot \cos \alpha(i - 1) \\ y = l \cdot \sin \alpha - R \cdot \sin \alpha(i - 1). \end{cases} \quad (2)$$

Уравнения (2) описывают множество циклоидальных кривых, которыми могут быть окружности, эллипсы, гипо- и эпициклоиды и другие линии [4]. В частном случае, при $i=1$, уравнения (2) приводятся к виду:

$$\begin{cases} x = l \cdot \cos \alpha - R \\ y = l \cdot \sin \alpha, \end{cases} \quad (3)$$

откуда следует, что

$$y^2 + (x + R)^2 = l^2. \quad (4)$$

Согласно уравнению (4) линия, формируемая производящей точкой M , представляет собой окружность, радиус которой равен l , а её центр смещён влево от начала координат по оси x на расстояние, равное радиусу R вращения производящей точки M (рис. 4, в).

Следовательно, по рассмотренной схеме можно профилировать некруглые детали, очерченные пересекающимися дугами окружностей, образующими, в частности, многоугольники Рело.

Определим условия формирования при полигональном течении треугольника Рело (рис. 5) за один цикл, т.е. без движения деления и выполнения его функции за счет конструкции инструмента.

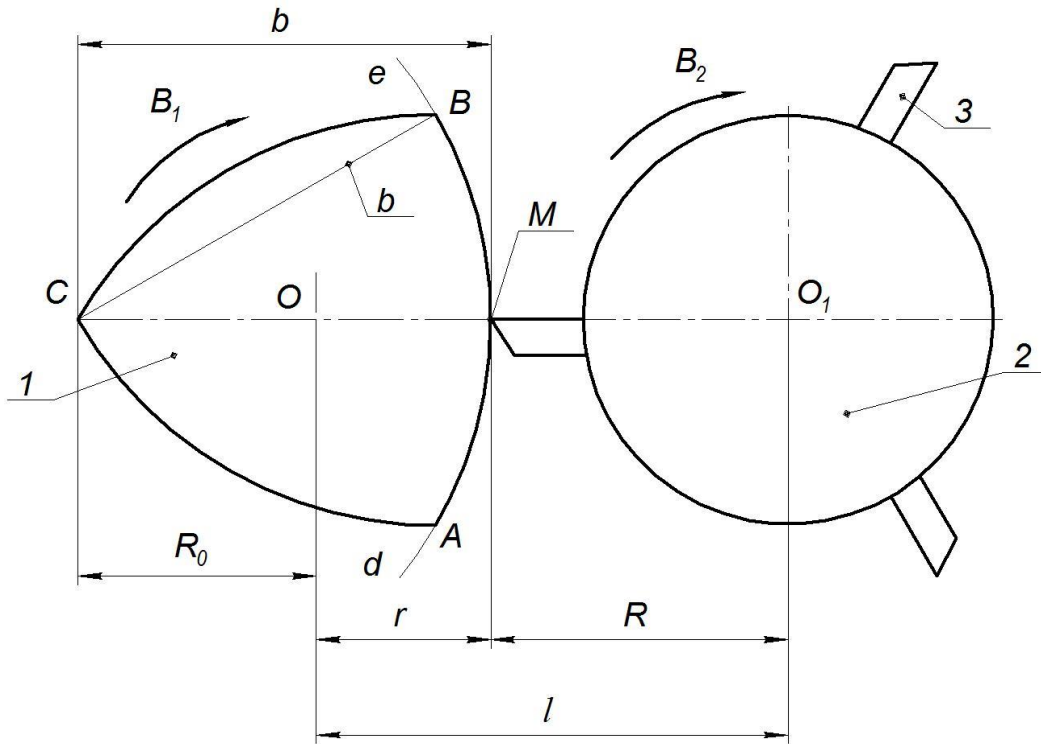


Рис. 5. Кинематическая схема полигонального формирования профиля детали в виде треугольника Рело

Так как угловые скорости заготовки 1 и инструмента 2 равны, то для формирования профиля детали в виде треугольника Рело за один цикл инструмент 2 должен иметь три рабочих элемента 3 , которые установлены на ней равномерно по окружности радиусом R . Образование профиля в виде треугольника Рело возможно лишь при определенном значении радиуса инструмента R . Определим его значение.

Из рисунка 5 следует, что

$$l = r + R \quad (5)$$

С другой стороны l – это радиус дуги de окружности, по которой перемещается точка M (вершина резца). Так как формируемый профиль – треугольник Рело, то центр этой окружности должен быть расположен в его вершине C . Следовательно,

$$BC = l = R_0 + r. \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) следует, что $R = R_0$. Следовательно, радиус инструмента должен быть равен радиусу окружности, описанной вокруг треугольника Рело, который в свою очередь равен радиусу окружности, описанной вокруг соответствующего равно-стороннего треугольника. Радиус окружности, описанной вокруг равностороннего тре-угольника, определяется по формуле

$$R_0 = \frac{b}{\sqrt{3}},$$

где b – длина стороны этого треугольника.

Таким образом, радиус R инструмента зависит от ширины треугольника Рело в соответствии зависимостью

$$R = \frac{b}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$

Рассмотрим возможность реализации рассмотренной схемы формообразования треугольника Рело методом полигонального точения, характерным для которого является изменение рабочих углов инструмента в процессе обработки и, следовательно, изменение условий резания, так как радиус кривизны формируемой производящей точкой линии относительно оси заготовки – переменная величина. Определим изменение рабочих (кинематических) углов режущей части инструмента при профилировании грани формируемой поверхности по окружности. Положение вершины резца I (производящей точки M) на стороне AB (рис. 6, *a*) треугольника Рело определяется углом σ между осью OX и прямой CM .

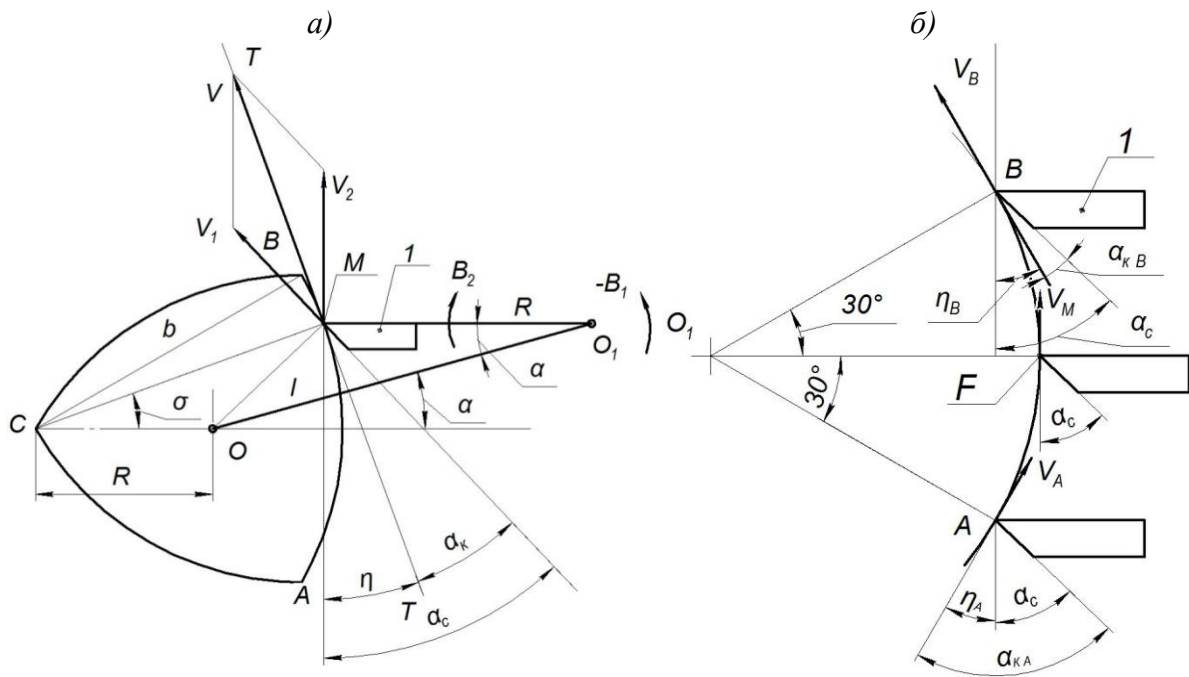


Рис. 6. Схема профилирования грани поверхности по окружности (*a*) и характер изменения рабочих углов инструмента на ширине грани (*б*)

Сторона AB очерчена по окружности, поэтому касательная TT к ней в точке M перпендикулярна прямой CM . Следовательно, угол η между этой касательной и осью OY равен углу σ .

Скорость V движения резания, равная геометрической сумме скоростей V_1 и V_2 (соответственно заготовки и резца), направлена вдоль касательной TT , поэтому изменение η рабочих (кинематических) углов режущей части в каждой точке формируемой линии равно углу поворота α производящей точки вокруг противоположно расположенной вершины треугольника Рело: $\eta = \sigma$. Кинематический задний угол α_k резца меньше его статического угла α_c на величину угла η : $\alpha_k = \alpha_c - \eta$. Следовательно, угол α_k непрерывно изменяется вдоль формируемой стороны BC . Определим диапазон изменения этого угла.

На рис. 6, *б* показаны положения резца относительно заготовки в вершинах A и B и в середине F стороны AB треугольника Рело. В среднем положении резца значения кинематического α_k и статического α_c заднего углов равны, т.к. $\eta=0$. В крайних положениях A и B значение η максимально: с учетом геометрии треугольника Рело $\eta_{\max}=30^\circ$, поэтому

кинематический задний угол в этих точках имеет предельные значения: максимальное – в *A* и минимальное в *B*.

Для исключения затирания между задней поверхностью резца и обработанной поверхностью рабочий задний угол не должен быть меньше некоторого значения α_0 . С учётом этого определяется задний угол заточки резца $\alpha_3 = \eta_{\max} + \alpha_0$. Например, если $\alpha_0 = 5^\circ$, то при полигональном точении детали с профилем «треугольник Рело» задний угол заточки резца $\alpha_3 = 35^\circ$.

Таким образом, максимальное изменение переднего и заднего углов резца на длине формируемой стороны треугольника Рело составляет $\pm 30^\circ$. В таком же диапазоне изменяется и передний угол резца при обработке детали с профилем «треугольник Рело», что затрудняет процесс резания. Более рациональным является применение рассмотренной схемы формообразования для обработки деталей с профилем «треугольник Рело» методом поверхностно-пластического деформирования, например, выглаживанием. Обработка осуществляется по схеме профилирования (см. рис. 5) инструментом, рабочие элементы *З* которого выполнены в виде выглаживателей или накатных устройств. Такой способ обработки реализуется на многооперационных станках с ЧПУ с функцией полигонального точения, на широкоуниверсальном зубошлицефрезерном станке модели ВС-50 и других станках с двумя параллельными шпинделями, совершающими согласованные по скорости и направлению вращательные движения.

Выводы

1. Полное формообразование профиля поверхности в виде треугольника Рело возможно по схемам некруглого, кругового и полигонального формирования. Аналитически доказана возможность и определены кинематические и геометрические условия полигонального формирования треугольника Рело при механической обработке.

2. Изменение переднего и заднего рабочих углов инструмента в широких пределах при схемах непрерывного некруглого и полигонального профилирования исключает возможность обработки деталей с таким профилем резанием. Эти методы профилирования рекомендуются для обработки некруглых поверхностей поверхностно-пластическим деформированием (выглаживанием, накатыванием) на универсальных металлорежущих станках соответствующими инструментами.

3. Применение многолезвийного режущего инструмента охватывающего типа при сообщении ему вращательного движения со скоростью резания обеспечивает существенное повышение производительности обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело круговым точением по сравнению с известным способом обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимченко А.И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08. – М., 1993. – 41 с.
2. Ворона В. В. Расчет оснастки и операции токарной обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Ворона. – Челябинск, 2008 г. – 19с.
3. Патент № 2463129 РФ, МПК⁷ В 23 В 5/44. Способ обработки профильного вала со сторонами равной ширины / Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С. – Оpubл. 10.10.2012, Бюл. №28.
4. Карелин, Н.М. Бескопирная обработка цилиндрических деталей / Н.М. Карелин. – М. Машиностроение, 1966. –187 с.
5. Разумов, М.С. Повышение производительности формообразования многогранных наружных поверхностей посредством планетарного механизма: автореф. дис. ...канд. техн. наук / Разумов М.С. – Курск, 2011г. – 20 с.
6. Данилов, А.А. Анализ и реализация схем полигонального точения многогранных поверхностей/ А.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11, с. 19-27.

7. Шитиков А. Н. Проектирование сборных фасонных фрез для обработки наружного РК-профиля: автореферат дис. ...к.т.н. 05.03.01. – Тула, 2007. – 18 с.
8. Волковский, С.В. Повышение эффективности формообразования равноосноконтурных поверхностей посредством создания режущего инструмента реализующего метод огибания: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.В. Волковский. – Хабаровск, 2002. – 19 с.
9. Понкратов, П.А. Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей: автореф. дис. ...канд. техн. наук / П.А.Понкратов.– Курск, 2013. – 20 с.
10. Зенин, Н.В. Технологическое обеспечение качества трехгранного профиля бесшпуночного соединения в условиях серийного производства: автореф. дис. ...канд. техн. наук / Н.В. Зенин. – Москва, МГТУ им Н.Э. Баумана, 2007. – 16 с.
11. 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 г. – 20 с.
12. Пантелеенко, Ф.И. Системный анализ и синтез рациональных методов профилирования некруглых поверхностей / Ф.И. Пантелеенко, А.А. Данилов // Актуальные проблемы в машиностроении. Том 4, №1. – Новосибирск: НГТУ, 2017. – С. 59-64.
13. . Постоянной ширины кривая // Математический энциклопедический словарь / Гл. ред. Ю. В. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1988.– 847 с.
14. DIN 32711-79. Antriebselemente Polygonprofile P3G. Berlin: Beuth. -3 s.

УДК 658.56.012:621(075.8)51-7

Романчак В.М., Василенок В.Д.

ИЗМЕРЕНИЕ НЕФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Физическая величина отличаются от нефизической величины способом измерения. Для нефизической величины предлагается проводить измерения путем субъективного оценивания в шкале порядка, а кроме того использовать понятие последовательности одинаково отличающихся объектов. В качестве примера применения теории анализируется функциональная связь, между физической величиной и нефизической величиной, устанавливаемая эмпирическим законом.

Под величиной в метрологии понимают нематериальное свойство, общее в качественном отношении ко многим объектам, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них [1].

Измерить нефизическую величину можно в шкале порядка [1]. Недостатком такой шкалы является то, что арифметические операции в порядковой шкале недопустимы. У нефизических величин, которые существуют только в сознании людей, нет размеров - поэтому их нельзя делить или вычитать [1]. Размер нефизической величины определим косвенно. Для этого вводится понятие последовательности одинаково отличающихся объектов. Номер объекта в такой последовательности служит рейтингом. Используя рейтинг можно построить математическую модель для нахождения нефизической величины, причем значения ее уже можно будет вычитать или делить.

Измерение величины. Любое измерение представляет собой сравнение размеров опытным путем [1]. В метрологии числовому результату сравнения соответствуют только два способа – разность и отношение размеров величин [1]. Вместо отношения будет удобно рассматривать логарифм отношения.