

УДК 621.913.3:621.833(083.74)(476)

ОБРАБОТКА МОМЕНТОПЕРЕДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПРОФИЛЕМ В ВИДЕ ТРЕУГОЛЬНИКА РЕЛО НА ЗУБОДОЛБЕЖНОМ СТАНКЕ

Пантелеенко Ф.И., Данилов А.А. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Карась И.К. (ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Беларусь)

Показаны преимущества моментопередающих соединений с профилем в виде треугольника Рело. Рассмотрены геометрия и методы полигонального формирования треугольника Рело при механической обработке. Представлены конструкции режущих инструментов для формирования треугольника Рело методами прерывистого следа и огибания. Приведены примеры реализации прогрессивных способов обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке созданными инструментами.

Ключевые слова: *моментопередающая поверхность, треугольник Рело, формирование, режущий инструмент, долбление.*

Введение

Профильные моментопередающие соединения (ПМС) имеют по сравнению со шлицевыми соединениями существенные преимущества по усталостной прочности, износостойкости, уровню шума и другим эксплуатационным характеристикам при меньшей на 30-40 % стоимости изготовления [1]. За рубежом они применяются в металлорежущих станках, кузнечнопрессовом оборудовании, строительных, дорожных и сельскохозяйственных машинах, промышленных роботах, приборах, инструментальных системах металлорежущих станков и технологической оснастке. Перспективным является их применение в горных машинах и оборудовании [2]. Моментопередающие поверхности (МП) могут иметь различные профили (циклоидаальный, синусоидаальный, равноосный и др.), из которых наибольшее распространение получил равноосный РК-3 профиль [3, 4]. Для обработки деталей с таким профилем необходимы специальные достаточно дорогие металлорежущие станки, аналоги которых в СНГ не производятся, что сдерживает применение ПМС в отечественном машиностроении. В этой связи обоснованным является применение ПМС с более технологичными, чем РК-3, профилями, например, синусоидаальным (С-3 профиль) и в виде треугольника Рело (Р-3 профиль).

Треугольник Рело представляет область пересечения трех одинаковых кругов радиусом ρ (рисунок 1) с центрами в вершинах правильного треугольника ABC , которые равномерно расположены на окружности радиусом R_0 . Негладкая замкнутая линия ABC , образованная тремя дугами окружности, ограничивающая эту фигуру, также называется треугольником Рело. Это простейшая после круга фигура равной ширины, т.к. расстояние между двумя любыми параллельными касательными T_1T_1 и T_2T_2 в ней постоянно. Оно называется шириной треугольника Рело b , от которой зависят его остальные параметры: радиус R_0 (диаметр D) описанной окружности $R_0 = \frac{b}{\sqrt{3}}$; радиус r (диаметр d) вписанной окружности $r = b \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)$; радиус кривизны ρ стороны треугольника, равный b .

Технологическим преимуществом Р-3 профиля по сравнению с РК-3 и С-3 профилями является выполнение сторон в виде дуг окружности, что упрощает его формирование и контроль. Р-3 профиль имеет значительно меньший угол при вершине, равный 120° , поэтому, как показали расчеты методом конечных элементов, в ПМС с Р-3 профилем по сравнению с РК-3 и С-3 профилями действуют меньшие распорные усилия в 3 и более раза при одинаковом передаваемом крутящем моменте. Это позволяет применять Р-3 профиль не только в неподвижных, но и в подвижных нагруженных ПМС, например, в карданных передачах, вместо четырехгранного К-профиля [5]. В таком соединении уменьшается, соответственно, и сила трения.

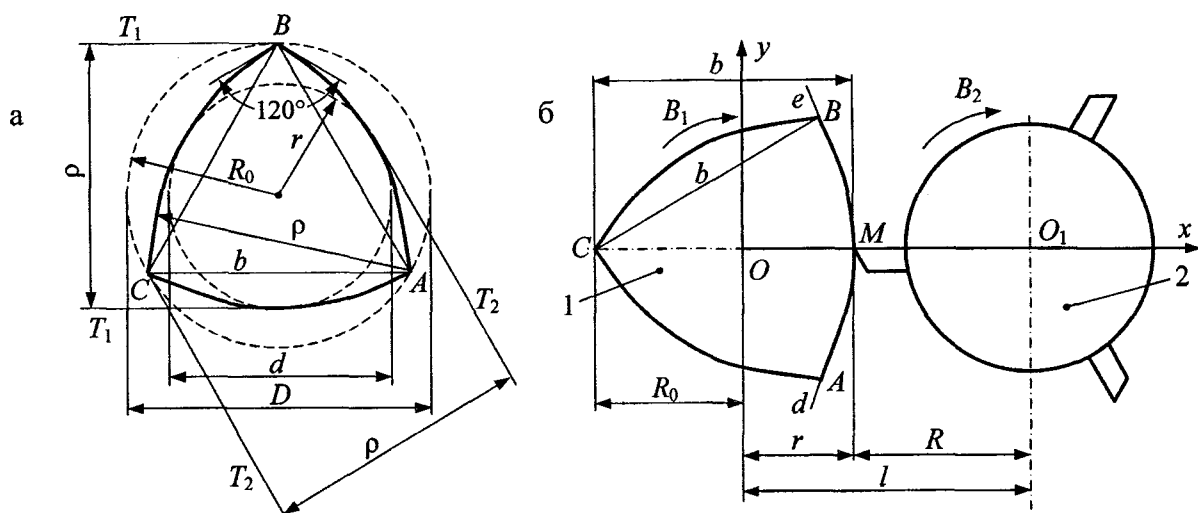


Рисунок 1. – Геометрия треугольника Рело (а) и схема его полигонального формирования методом следа (б)

Из изложенного следует целесообразность применения ПМС с Р-3 профилем, что требует разработки научно-технического и конструкторско-технологического обеспечения их производства, поскольку известные технологии обработки МП с таким профилем [6, 7] недостаточно производительны и сложны в реализации, так как основаны, как показал их анализ [8], на нерациональных методах формообразования и технологических методах обработки. Из экономических соображений предпочтительна обработка деталей с Р-3 профилем на универсальных станках за счет расширения их технологических возможностей. В статье рассмотрено решение этой задачи применительно к обработке таких деталей на зубодолбежных станках разработанными способами [8, 9].

Прогрессивные способы формообразования поверхностей с профилем в виде треугольника Рело

Аналитически доказана возможность и определены условия формирования стороны треугольника Рело полигональным методом, основанном на вращательных движениях B_1 заготовки 1 и B_2 инструмента 2 (рисунок 1б) вокруг параллельных осей. Если указанные вращательные движения направлены одинаково и имеют равные угловые скорости, то производящая точка M режущей части инструмента перемещается по траектории de , описываемой уравнениями:

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

где l – расстояние между осями инструмента и заготовки;

R – радиус инструмента;

α – угол поворота заготовки.

Уравнение (1) приводится к виду:

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

т.е. траектория de является окружностью, радиус l который при определенных условиях равен ширине b треугольника Рело, что свидетельствует о возможности его полигонального формирования. Доказано, что это достигается, если радиус инструмента

$$R = \frac{b}{\sqrt{3}}.$$

Исследованием изменения рабочих углов инструмента при полигональном формировании треугольника Рело методом непрерывного следа установлено, что рассмотренный метод профилирования нельзя применить для обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на станках для полигонального точения из-за недопустимого по условиям резания изменения переднего и заднего рабочих углов режущих лезвий инструмента в диапазоне $\pm 30^\circ$, что обусловлено совмещением движений профилирования и резания. Поэтому заслуживают внимания схемы полигонального профилирования поверхностей с Р-3 профилем, основанные на разделении движений профилирования и резания, при котором поверхность в поперечном сечении формируется со скоростью подачи, а в продольном направлении со скоростью резания.

Такая схема формообразования реализуется, например, долблением на зубодолбежном станке. При этом сторона треугольника Рело может формироваться методом обката [7], а также предложенными методами прерывистого следа [8] (рисунок 2а) и огибания [9] (рисунок 2б). Для формирования методом обката требуется сложный в изготовлении долбляк с криволинейными режущими кромками. Методы следа и огибания реализуются более простыми по конструкции инструментами, соответственно с прямолинейными и круговыми режущими кромками.

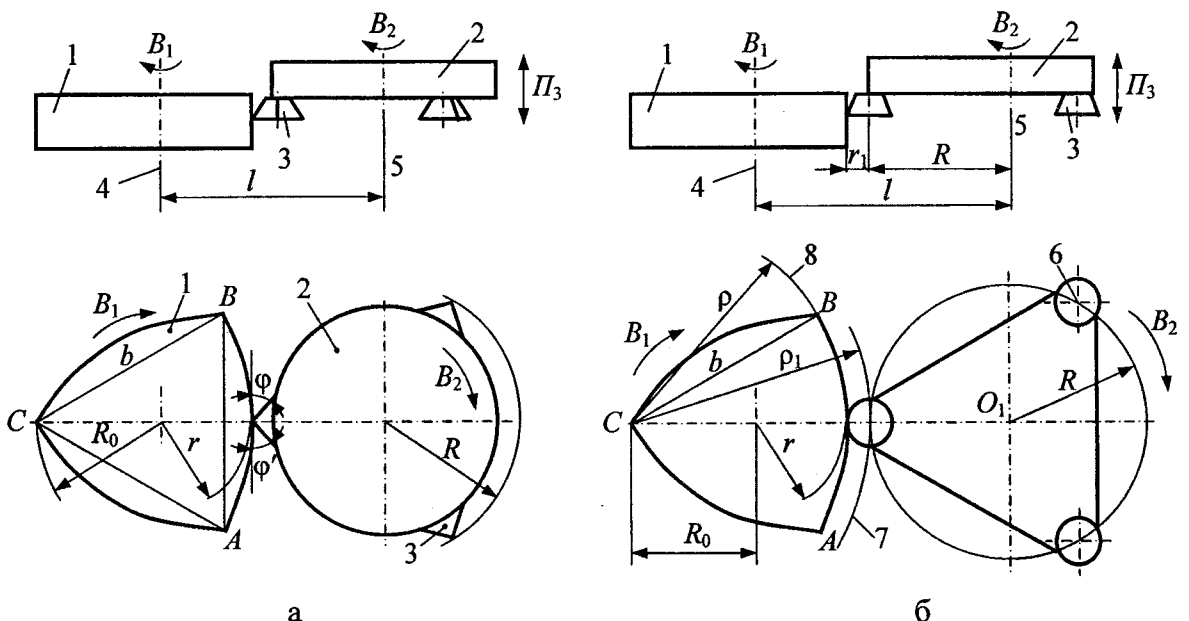


Рисунок 2. – Схемы полигонального формирования треугольника Рело методами прерывистого следа (а) и огибания (б)

Для полигонального формирования профиля детали методом прерывистого следа заготовке 1 (рисунок 2а) и режущему инструменту 2 с тремя равномерно расположенными по окружности определенного радиуса R режущими элементами 3 сообщают одинаково направленные вращательные движения, соответственно B_1 и B_2 , вокруг параллельных осей 4 и 5 с равными угловыми скоростями, которые образуют движение профилирования $\Phi_3(B_1B_2)$. Для обработки детали по длине заготовке и режущему инструменту сообщают также относительное возвратно-поступательное движение Π_3 со скоростью резания вдоль оси вращения заготовки. Режущие элементы могут быть выполнены в виде сменных квадратных пластин, у которых статические главный φ и вспомогательный φ' углы в плане равны 45° .

В процессе формирования стороны треугольника Рело таким инструментом непрерывно изменяются главный и вспомогательный рабочие углы в плане режущих элементов 3. Их минимальное значение для квадратных пластин составляет 15° . Непрерывное изменение указанных углов инструмента является причиной переменности высоты остаточных гребней (не срезанной части припуска). Этот недостаток устраняется при формировании треугольника Рело методом огибания инструментом с круговыми режущими кромками (рисунок 2б), обеспечивающими стабилизацию главного и вспомогательного углов в плане. Важно, что в этом случае режущие элементы могут быть выполнены в виде сменных круглых режущих пластинок, что существенно упрощает конструкцию инструмента и, соответственно, реализацию способа обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке по сравнению с известным способом обработки по методу обката [7].

Формирование треугольника Рело осуществляется тремя режущими лезвиями 3, центры 6 круговых режущих кромок которых радиусом r_1 равномерно располагают по окружности радиусом R . Расстояние l между осями 4 и 5 настраивают по зависимости

$$l = r + r_1 + R, \quad (3)$$

где r – радиус окружности, вписанной в треугольник Рело ABC .

В рассматриваемой схеме обработки окружность 8, ограничивающая сторону AB треугольника Рело ABC , формируется как огибающая окружности радиусом r_1 , поэтому центр этой окружности должен перемещаться относительно заготовки 1 по окружности 7, эквидистантой окружности 8, радиус ρ_1 которой больше радиуса ρ окружности 8 (ширины b треугольника Рело) на величину r_1 . Аналитически доказано и компьютерным моделированием подтверждено, что радиус ρ формируемой окружности 8 равен ширине b треугольника Рело, если $R = \frac{b}{\sqrt{3}}$. Окружность 8 формирует на заго-

товке 1 профиль AB одной из граней трехгранной поверхности детали. Так как угловые скорости заготовки 1 и режущего инструмента 2 равны, то две его другие круговые режущие кромки формируют остальные стороны CB и CA треугольника Рело ABC .

Из изложенного следует, что радиус r_1 круговой режущей кромки не влияет на ширину b формируемого треугольника Рело, что позволяет многократно перетачивать режущие лезвия и периодически заменять их. Благодаря этому, профилирование треугольника Рело методом огибания круговой режущей кромкой имеет существенные преимущества по сравнению с методом обката долбяком с криволинейными режущими кромками [7], износ которых влияет на точность профилирования треугольника Рело. Оснащение инструмента в предложенном способе сменными круглыми пластинками позволяет технически просто восстанавливать его режущую способность и точность, что невозможно при применении указанного известного способа обработки.

Реализация разработанных способов обработки моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке

Для реализации разработанных способов обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке созданы инструменты (рисунок 3) с прямолинейными 1 и круговыми 2, 3 режущими кромками для профилирования деталей, соответственно, методами прерывистого следа и огибания. Материал режущей части цельных долбяков – быстрорежущая сталь Р6М5, сменных круглых пластинок – твердый сплав ВК8. Экономичным является изготовление инструментов обоих типов из изношенных зуборезных долбяков с числом зубьев, кратным трем, путем удаления всех, кроме трех, равномерно расположенных по окружности зубьев (рисунок 3, поз. 2). При заточке им придается форма, соответствующая реализуемому методу профилирования поверхности – островершинная или закругленная.

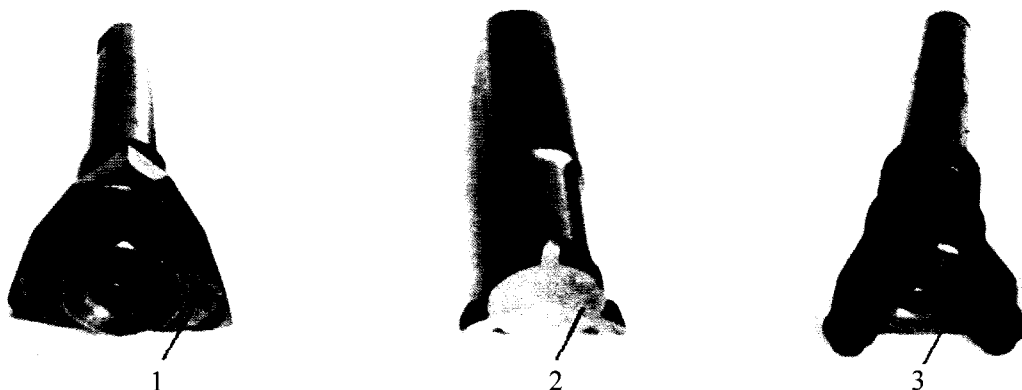


Рисунок 3. – Инструменты для обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке при профилировании методами прерывистого следа (1) и огибания (2, 3)

Экспериментальная проверка разработанных способов обработки поверхностей с профилем в виде треугольника Рело проведена на предприятии ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» на зубодолбежном станке модели 5122 изображенными на рисунке 3 инструментами. На рисунке 4 показаны примеры обработки на этом станке деталей при профилировании методами прерывистого следа и огибания. Обрабатывались детали с шириной треугольника Рело, равной 32, 42 и 53 мм. Режимы резания: частота двойных ходов долбяка – 200 дв.ход./мин; контурная подача 0,2-0,5 мм/дв.ход.

Шероховатость обработанных поверхностей определялась на контурографе-профилометре MITUTOYO SV-C4500, позволяющем измерять ее параметры Ra , Rz (мкм) и регистрировать профиль. Минимальная шероховатость обработанной поверхности $Ra = 1,01-1,15$ мкм получена при ее профилировании методом огибания инструментом с круговыми режущими кромками (рисунок 3 поз. 3), причем с уменьшением их радиуса высота шероховатости возрастает, что согласуется с теоретическими данными.

Для определения точности обработки контролировались следующие параметры профиля поверхности в виде треугольника Рело: предельное отклонение ширины каждой стороны треугольника Рело и максимальная разница в ширине трех сторон. Установлено, что более высокую точность ширины треугольника Рело обеспечивают долбя-

ки с цельной режущей частью (рисунки 3 поз. 1, 2), а меньшую – долбяк со сменными режущими пластинками, что обусловлено дополнительной погрешностью его изготовления из-за сборной конструкции. Во всех случаях точность указанных геометрических параметров треугольника Рело соответствует 8-9 квалитетам.

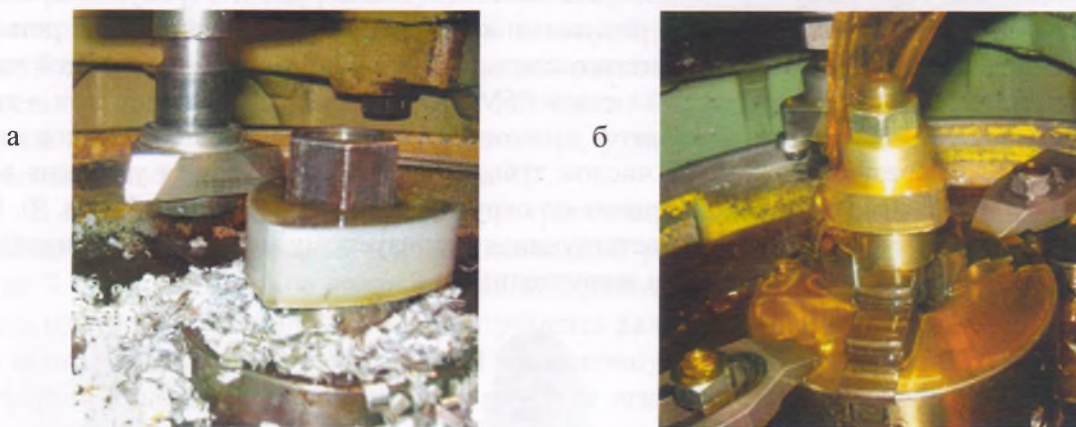


Рисунок 4. – Примеры обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело при его формировании методами прерывистого следа (а) и огибания (б)

Заключение

Известные способы обработки моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело малопроизводительны и сложны в реализации, так как основаны на нерациональных методах формообразования. Теоретически доказана и экспериментально подтверждена возможность формирования треугольника Рело методами прерывистого следа и огибания при разделении движений профилирования и резания. Созданы простые по конструкции режущие инструменты, позволяющие реализовать прогрессивные способы обработки поверхностей с таким профилем на зубодолбежных станках без их модернизации, что важно для снижения затрат на освоение производства профильных моментопередающих соединений.

Список использованных источников

1. Тимченко, А.И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / А.И. Тимченко; Московский технологич. ун-т «Станкин». – М., 1993. – 41 с.
2. Данилов, В.А. Научно-техническое обеспечение применения профильных моментопередающих соединений в горных машинах и оборудовании / В.А. Данилов, В.Я. Прушак // Горная механика. – 2009. – № 2. – С. 5-13.
3. DIN 32711-79. Antriebselemente Polygonprofile P3G. Berlin: Beuth. – 3 s.
4. Grossmann, Christoph. Fretting Fatigue of Shape Optimised Polygon-Shaft-Hub Connections / Christoph Grossmann. – Berlin, 2007. – 156 p.
5. DIN 32712-79. Antriebselemente Polygonprofile P4C. Berlin: Beuth. – 3 s.
6. Способ обработки профильного вала со сторонами равной ширины: пат. 2463129 РФ, МПК В23В5/44 / А.И. Барботько, П.А. Понкратов, М.С. Разумов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

профессионального образования «Юго-Западный государственный университет». – № 2011110843/02; заявл. 22.03.11; опубл. 10.10.2012 // Бюллетень № 28. – 2012.

7. Понкратов, П.А. Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей по методу обкатывания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / П.А. Панкратов; Юго-Западн. госуд. ун-т. – Курск, 2013. – 20 с.

8. Данилов, А.А. Анализ способов обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежных станках / А.А. Данилов // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тезисы докл. 32-ой междунауч.-техн. конф., Минск, 5 апр. 2017 г. / БНТУ; редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 63-65.

9. Способ обработки некруглых деталей с треугольным профилем равной ширины: Заявка ЕА 201650075А/20180430 / А.А. Данилов, В.А. Данилов. – Оpubл. 30.04.2018.

Panteleyencko F.I., Danilov A.A., Karas I.K.

Processing of torque-transmitting surfaces with a profile in the form of a Relo triangle on a gear-shaping machine

The advantages of torque transmission connections with the profile in the form of a relo triangle are shown. Considered geometry and polygon methods of formation of the relo triangle when machining. The designs of cutting tools for the formation of the relo triangle by methods of discontinuous trace and diffraction are presented. Examples of implementation of progressive ways of processing of details with a profile in the form of a relo triangle on the gear-shaping machine by the created tools are given.

Keywords: *torque transmitting surface, the Relo triangle, shaping, cutting tool, slotting.*

Поступили в редакцию 26.11.2018 г.