

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.91.04

Данилов А. А.

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПРОФИЛЕМ В ВИДЕ ТРЕУГОЛЬНИКА РЕЛО ЛЕЗВИЙНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Рассмотрены схемы механической обработки некруглых наружных цилиндрических поверхностей с профилем равной ширины в виде треугольника Рело, формируемым методами обката, огибания и следа. Показано, что при профилировании поверхности методом огибания форма режущих лезвий не зависит от параметров формируемого профиля, благодаря чему по сравнению с методом обката упрощается конструкция режущего инструмента и обеспечивается возможность оснащать его круглыми стандартными сменными режущими пластинками. Экспериментально подтверждена возможность реализации схем полигонального формирования Рело-профиля на зубодолбежном станке методами огибания и прерывистого следа, обеспечивающих требуемую точность обработки.

Постановка задачи. В коробках скоростей металлорежущих станков и автомобилей, редукторах и трансмиссиях сельскохозяйственных и дорожных машин для передачи крутящего момента обычно применяются шлицевые соединения, которые характеризуются сложностью изготовления и пониженной усталостной прочностью деталей из-за концентраторов напряжения; повышенным уровнем шума в работе. Альтернативой им являются профильные моментопередающие соединения (ПМС), в которых передача крутящего момента осуществляется гладкими поверхностями с некруглым профилем (циклоидальным, синусоидальным, равноосным и др.) [1]. Такие соединения в сравнении со шлицевыми имеют эксплуатационные преимущества по усталостной прочности, износостойкости, уровню шума, коэффициенту полезного действия при меньшей до 50 % стоимости изготовления [2].

В мировой практике чаще применяются ПМС с трехгранным РК-3 профилем [3], для контроля которого, благодаря его равноосности, используются те же измерительные средства, что и для круглых цилиндрических поверхностей. Детали с РК-3 профилем обрабатывают на специальных станках со сложной кинематикой, которые в СНГ не производятся, что сдерживает применение ПМС в отечественном машиностроении. Другой существенный недостаток РК-3 профиля, обусловленный его геометрией, – значительное

распорное усилие при передаче крутящего момента, вызывающее заклинивание соединения, что ограничивает область применения РК-3 профиля неподвижными ПМС. Более простым в обработке по сравнению РК-3 профилем является близкий к нему по форме и эксплуатационным свойствам синусоидальный профиль [4], который не является равноосным, что усложняет его контроль, выполняемый калибрами или на контрольно-измерительной машине.

Заслуживает внимания профиль в виде треугольника Рело (Рело-профиль) [5] (рис. 1), стороны которого ограничены дугами окружностей одного радиуса, проведенных из вершин правильного треугольника ABC . Радиус этих окружностей равен ширине b треугольника Рело, от которой зависят радиус r вписанной в него окружности и радиус R_0 описанной окружности: $R_0 = b / \sqrt{3}$; $r = b \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)$ [5].

Технологическим преимуществом такой формы стороны профиля является то, что окружность, как известно [6], может быть получена двумя согласованными вращательными движениями производящей точки с равными угловыми скоростями вокруг параллельных осей, т. е. полигональным методом.

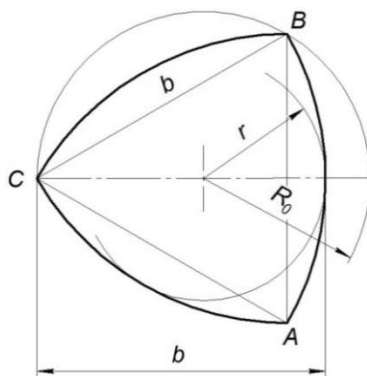


Рис. 1. Геометрия треугольника Рело

Как показали расчеты МКЭ [7], контактные упругие перемещения в моментопередающем соединении с Рело-профилем почти в три раза меньше, чем в соединениях с равноосным РК-3 и синусоидальными профилями при одинаковом передаваемом крутящем моменте и равных площадях поперечных сечений деталей соединений. Благодаря этому преимуществу Рело-профиль, в отличие от РК-3 и синусоидального профилей, может применяться как в подвижных, так и неподвижных соединениях, что исключает необходимость в двух типах профилей, например, РК-3 и К-4 [8], как это принято в машиностроении Германии. Важным свойством Рело-профиля является и то, что он при более простой геометрической форме обладает, как и РК-3 профиль, свойством равноосности и поэтому может контролироваться универсальными мерительными инструментами.

Учитывая отмеченные преимущества Рело-профиля, актуальным является разработка эффективных технологий формообразования моментопередающих поверхностей с таким профилем, т. е. методов формообразования, схем обработки и средств их реализации [9]. Экономически целесообразна реализация этих технологий на станках универсального назначения с различными системами управления для исключения необходимости создания специальных станков.

Следует отметить, что применение нерационального метода формообразования и схемы обработки профильной поверхности не обеспечивает высокую производительность даже при скоростной обработке на современных станках с ЧПУ. Известна, например, схема обработки некруглых поверхностей с РК-3 профилем на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ концевой фрезой при сообщении ей движения подачи относительно заготовки по винтовой линии [10]. Как отмечает автор этой технологии, «очевидным недостатком фрезерования профильных поверхностей является относительно невысокая технологическая производительность» [10, с. 14]. Низкая производительность в данном случае при достаточно высокой скорости резания ($v = 350$ м/мин) обусловлена применением нерационального метода формообразования и схемы обработки профильной поверхности, так как ее образующая и направляющая линии формируются прерывисто со скоростью подачи. По классификации академика Коновалова Е. Г. [11] такой метод формообразования относится к прерывистому классу П-П – наименее производительному по сравнению с другими методами формообразования. Из-за низкой производительности метод формообразования П-П не рекомендуется для обработки НМП с Рело-профилем.

Приведенный пример свидетельствует о необходимости обоснованного задания метода формообразования поверхности и схемы ее обработки.

Для повышения технологической производительности в работе [10] предлагается увеличить скорость резания. Другой путь повышения производительности – применение метода формообразования, при котором хотя бы одна производящая линия поверхности формируется непрерывно, а вся поверхность методом класса П-Н по классификации [11]. Учитывая изложенное, рассмотрим задачу выбора рационального метода формирования Рело-профиля лезвийным инструментом.

Обоснование выбора метода формирования Рело-профиля. Известны схемы обработки поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке, основанные на формировании профиля методом обката однопрофильным (рис. 2, а) или трехпрофильным (рис. 2, б) долбяками [12] с криволинейными режущими кромками. В процессе обработки долбяку 1 и заготовке 2 сообщают согласованные противоположно направленные вращательные движения, соответственно B_1 и B_2 (рис. 2, в).

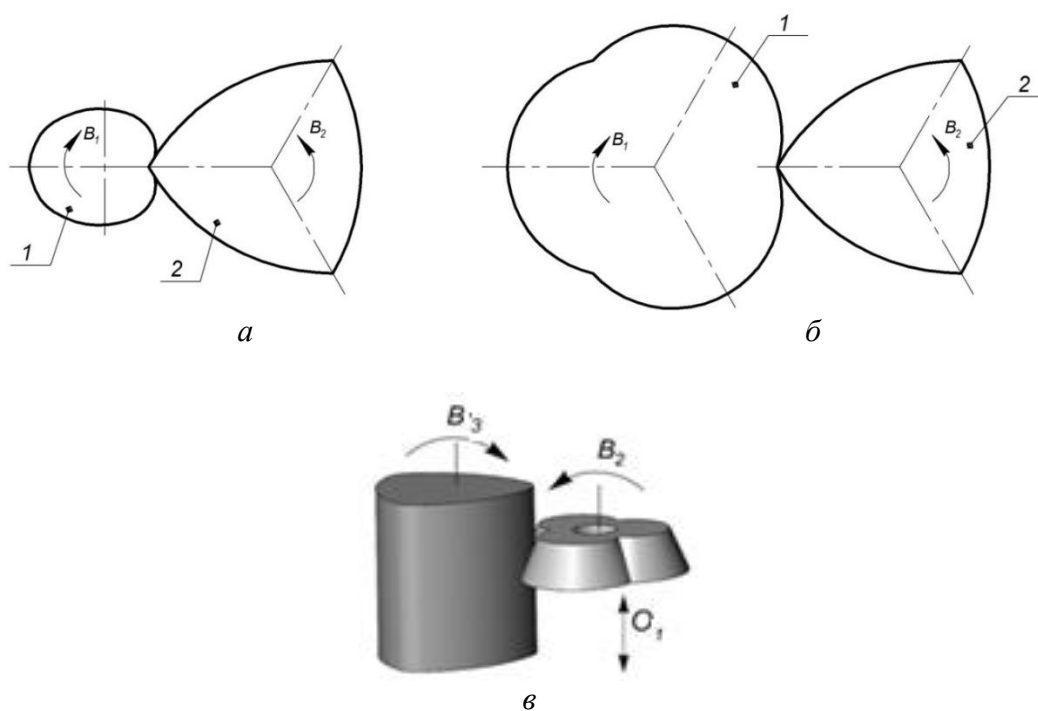


Рис. 2. Схемы формирования Рело-профиля методом обката однопрофильным (а) и трехпрофильным (б) долбяком и кинематическая схема обработки поверхности с таким профилем на зубодолбежном станке методом «обкат-след» (в)

Недостаток метода обката – зависимость формы режущих кромок инструмента от геометрии формируемого профиля, что обуславливает сложность геометрии режущего лезвия инструмента. Этот недостаток устраняется при формировании Рело-профиля методом полигонального огибания производящей окружностью [13] (рис. 3), так как ее радиус не влияет на формируемый профиль. Поэтому метод огибания положен в основу разработанной технологии формообразования наружных моментопередающих поверхностей с Рело-профилем [14].

Значение R определяется из схемы профилирования (см. рис. 3), согласно которой окружность 8 радиусом ρ , ограничивающая сторону AB треугольника Рело ABC , формируется как огибающая окружности радиусом r_1 , центр 6 которой перемещается относительно заготовки 1 по окружности 8 радиусом ρ_1 , эквидистантой окружности 7. Окружность 8 является траекторией точки 6 в движении относительно неподвижной заготовки 1. Аналитически установлено, что центр окружности 8 смещен влево от оси 3 вращения заготовки 1 на расстояние OC , равное R . С другой стороны, OC – радиус R_0 описанной вокруг треугольника Рело окружности (см. рис. 1), следовательно, $R = R_0$ и $R = \frac{b}{\sqrt{3}}$. В соответствии с расчетным значением R проектируется режущий инструмент.

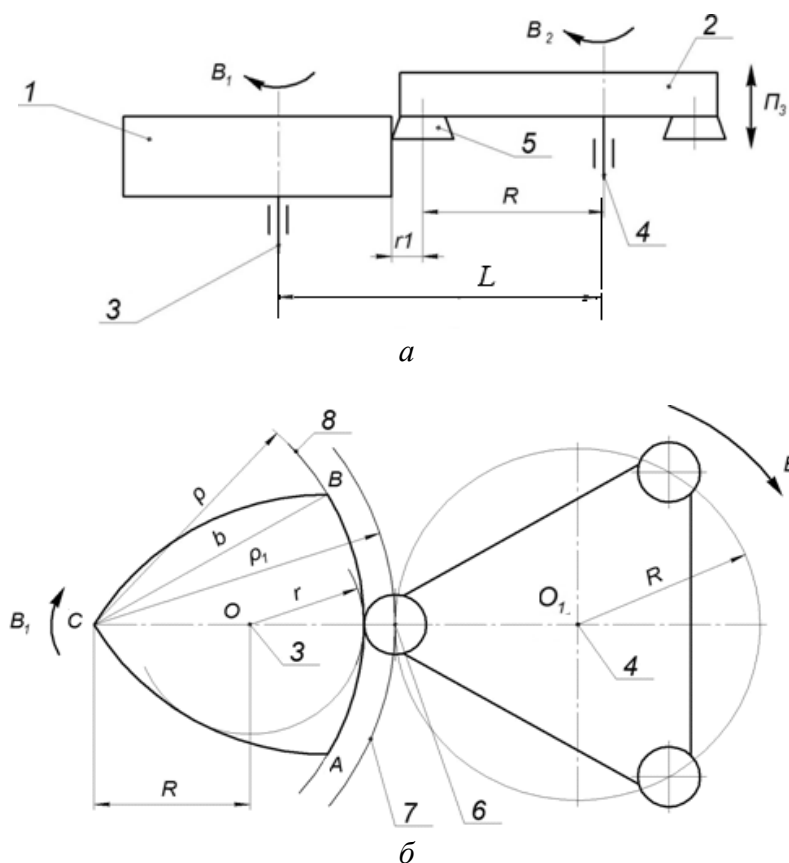


Рис. 3. Кинематическая схема долбления (а) и схема полигонального формирования Рело-профиля методом прерывистого огибания (б) производящей окружностью

Так как окружность 7 эквидистантна окружности 8, то ее центр также расположен в той же точке C , что и центр окружности 8. Поэтому линию 7 можно рассматривать как окружность, формирующую сторону AB треугольника Рело ABC шириной b . Окружность 7 образует полигональным методом на заготовке 1 профиль AB одной из граней поверхности детали. Поскольку угловые скорости заготовки 1 и режущего инструмента 2 равны, то два остальных его режущих лезвия формируют стороны CB и CA Рело-профиля.

Согласно рис. 3, $b = R + r$, следовательно, радиус r_1 круговой режущей кромки не влияет на ширину b формируемого треугольника Рело, что позволяет многократно перетачивать режущие лезвия 5 или заменять их для восстановления геометрических параметров, работоспособности и точности инструмента, что невозможно при обработке долбяком с криволинейными режущими кромками, так как от их формы зависит образуемый профиль (см. рис. 2). Благодаря этому формирование Рело-профиля методом огибания круговой режущей кромкой имеет существенные преимущества по сравнению с методом обката.

Из изложенного следует, что для формирования Рело-профиля полигональным методом не требуются станки со сложной кинематикой, как при обработке поверхностей с РК-3 профилем [2], а также станки с копироваль-

ными и числовыми системами управления. Полигональный метод относится к бескопирным методам кинематического профилирования поверхностей [6], которые, как известно, обеспечивают высокую точность формообразования поверхности, благодаря отсутствию погрешностей, присущих методу копирования при применении копировальных систем и погрешностей метода интерполяции при использовании систем ЧПУ.

Аналитически установлено, что при полигональном формировании Рело-профилем изменение скорости движения профилирования не превышает 3,3 % [15], что исключает необходимость оснащения станка механизмом стабилизации скорости движения профилирования и позволяет обрабатывать поверхности с Рело-профилем на универсальном зубодолбежном станке без его модернизации.

Достоверность результатов аналитического исследования подтверждена геометрическим моделированием процесса профилирования и экспериментально на универсальном зубодолбежном станке при обработке поверхностей с Рело-профилем инструментом, оснащенным круглыми режущими пластинками (рис. 4) [16].



a



б

Рис. 4. Рабочая зона станка (а) и образцы изделий (б) с Рело-профилем, сформированным методом огибания созданным режущим инструментом

Установлено, что формообразование поверхностей с Рело-профилем методом огибания инструментом с круглыми режущими пластинками обеспечивают на зубодолбежном станке нормальной точности шероховатость обработанных поверхностей $Ra = 1,01\text{--}1,15$ мкм [16]. На рис. 5 представлены результаты контроля контурографом-профилометром модели SV-S4500 шероховатости наружной поверхности изделия с Рело-профилем, обработанной инструментом с круглыми режущими пластинками диаметром 16 мм на зубодолбежном станке модели BC 5122 с круговой подачей 0,2 мм/двойной ход.

Заметим, что при $r_1 = 0$ производящий элемент инструмента из дуги окружности превращается в точку, поэтому формирование Рело-профиля методом прерывистого огибания трансформируется в метод прерывистого

следа. В этом случае обработка выполняется на зубодолбежном станке по той же кинематической схеме трехлезвийным инструментом с прямолинейными режущими кромками (рис. 6).

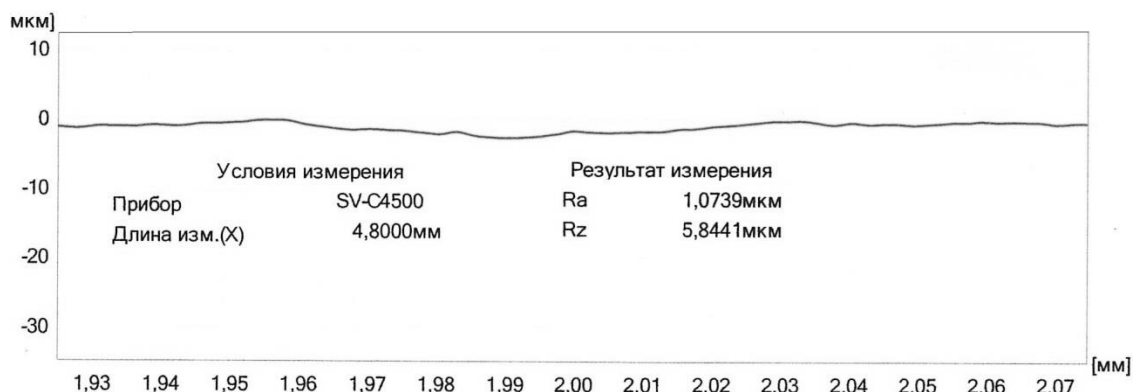


Рис. 5. Пример результатов контроля обработанной поверхности с Рело-профилем, образованным методом прерывистого огибания

Для упрощения реализации способа обработки инструмент может быть оснащен сменными многогранными режущими пластинками. Как установлено аналитически, при применении квадратных режущих пластинок статические главный ϕ и вспомогательный ϕ_1 углы в плане режущего лезвия равны 45° , а минимальное значение рабочих углов при обработке поверхности с профилем в виде треугольника Рело составляет 15° , что допустимо по условиям резания [17].

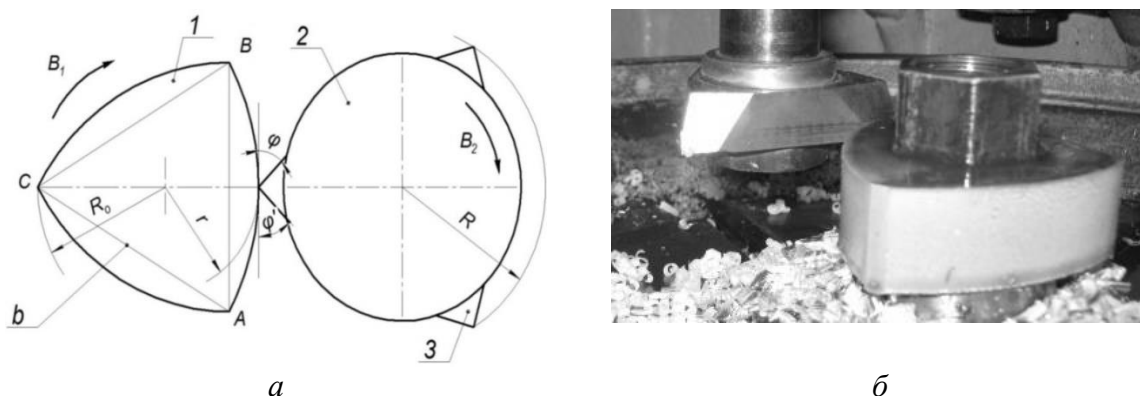


Рис. 6. Схема полигонального формирования Рело-профиля методом следа (а) и рабочая зона универсального зубодолбежного станка (б)

Экспериментально установлено, что предложенные методы формообразования поверхностей с Рело-профилем созданными инструментами обеспечивают на зубодолбежном станке нормальной точности 8–9 квалитеты точности его ширины [16], что соответствует требованиям, предъявляемым к точности моментопередающих поверхностей профильных соединений.

Это позволило реализовать в производстве разработанную технологию формообразования поверхностей с Рело-профилем простыми по конструкции лезвийными режущими инструментами.

Для повышения производительности станка путем сокращения вспомогательного времени за счет автоматизации цикла обработки целесообразно применять универсальные зубодолбежные станки с программируемыми контроллерами или системами ЧПУ, например, производства Витебского станкостроительного завода «Вистан».

Выводы:

1. Формирование лезвийными инструментами профиля наружной поверхности в виде треугольника Рело возможно методами обката, огибания и следа на зубодолбежном станке обкатного типа.

2. Недостаток метода обката – сложность режущего инструмента, так как форма его режущих лезвий зависит от параметров формируемого профиля.

3. Геометрия Рело-профиля, образуемого при обработке резанием методами огибания и следа, не влияет на форму режущих лезвий, что позволяет по сравнению с методом обката упростить конструкцию инструмента и выполнять его режущие лезвия в виде сменных стандартных круглых и многогранных пластин.

4. Формообразование наружных поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке нормального класса точности методами прерывистого следа и прерывистого огибания созданными инструментами обеспечивает требуемую точность обработки изделий с таким профилем.

ЛИТЕРАТУРА

1. ОСТ 92-4742-86 «Соединения профильные. Уравнения контурных кривых соединений, типы и основные размеры». Издание официальное. – М., 1986. – 22 с.
2. 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.
3. DIN 32711-79. Antriebselemente Polygonprofile P3G. Berlin: Beuth. – 3 s.
4. Синкевич, В. М. Новый вид профильных соединений в узлах судовых механизмов / В. М. Синкевич., Е. П. Микитюк // Вестник машиностроения. – 1990 – № 11. – С. 60–63.
5. Треугольник Рело. Сайт Википедии.
6. Карелин, Н. М. Бескопирная обработка цилиндрических деталей с криволинейными поперечными сечениями / Н. М. Карелин. – М.: Машиностроение, 1966. – 187 с.
7. Данилов, А. А. Сравнение профилей моментопередающих соединений деталей машин / А. А. Данилов // Оборудование – инструмент – качество: тезисы докл. 36-ой Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 7 апреля 2022 г.) / редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2022. – С. 18–20.
8. DIN 32712-79. Antriebselemente Polygonprofile P4C. Berlin: Beuth. – 3 s.
9. Смирнов, А. И. Анализ перспектив развития методов формообразования в машиностроении. – М.: НИИмаш, 1982. – 49 с.

10. Зенин, Н. В. Технологическое обеспечение качества трехгранного профиля бесшпоночных соединений в условиях серийного производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / МВТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2007. – 16 с.
11. Коновалов, Е. Г. Основы новых способов металлообработки. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 297 с.
12. Понкратов, П. А. Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей по методу обкатывания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / П. А. Понкратов; Юго-западн. госуд. ун-т. – Курск, 2013. – 20 с.
13. Способ обработки некруглых деталей с треугольным профилем равной ширины: Евразийский патент 031383 / А. А. Данилов, В. А. Данилов. – Оpubл. 28.12.2018.
14. Данилов, А. А. Технология формообразования наружных моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на универсальных станках: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Белорусский национ. техн. ун-т. – Минск, 2022. – 22 с.
15. Данилов, А. А. Анализ кинематики полигонального формирования профиля поверхности в виде треугольника Рело при обработке долблением / А. А. Данилов // Материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», (Минск, 27 апреля 2018 г.) в 4 т. – Минск: БНТУ, 2018. – Т. 1. – С. 36.
16. Пантелеенко, Ф. И. Обработка моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке / Ф. И. Пантелеенко, А. А. Данилов, И. К. Карась // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 4. – С. 54–60.
17. Ящерицын, П. И. Основы резания материалов и режущий инструмент / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко – Мн.: Выш. школа, 1981. – 560 с.

Поступила 11.10.2024

УДК 621.91.04

Данилов В. А., Данилов А. А.

РАЗВИТИЕ СХЕМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Представлены схемы формообразования моментопередающих поверхностей деталей машин с синусоидальным профилем, реализуемые на металлорежущих станках универсального назначения. Рассмотрены пути повышения универсальности и технологической производительности схем обработки таких поверхностей. Показано, что повышение универсальности схемы некругового точения синусоидальных поверхностей обеспечивается путем управления ориентацией траектории движения режущего инструмента относительно оси вращения заготовки на универсальном токарно-затылочном станке, а повышение технологической производительности – заменой возвратно-поступательного движения режущего инструмента его вращательным движением. Приведено сравнение по технологической производительности схем точения синусоидальной поверхности круглым резцом, эксцентрично установленным относительно оси его вращения.