

– состоит из четырех массивов экспериментальных данных и совокупности четырех разнородных АЧХ и ФЧХ боковой силы и стабилизирующего момента, построенных при боковых колебаниях шины по (1.1);

– формируются с помощью весовых коэффициентов в виде дисперсии однофакторного дисперсионного анализа – суммы межгрупповой i и внутригрупповой j дисперсий;

– допускает одновременное оценивание четырех кинематических и жесткостных характеристик шин.

5. Предложенный метод может быть распространен для параметрической идентификации процесса качения упругих шин в других режимах движения колеса (в ведущем, тормозном, ведомом и т. д.), механико-математические модели которых содержат более четырех кинематических и жесткостных характеристик шин.

6. Проанализированы противоречивые выводы работы [2], которые, как правило, не адекватны практике качения колеса с упругой шиной по твердой поверхности.

7. В выводах статьи [16] сказано, что при качении в динамике шара на плоскости аппроксимация реакций неголономных связей силами вязкого или сухого трения приводит к аналогичным результатам.

8. В связи с тем, что теория неголономного качения упругой шины по твердой поверхности академика М.В. Келдыша обладает уникальной общностью успешного применения в практике проектирования и дальнейшей модернизации, практически, всех гражданских и военных колесных транспортных средств, как для упругих шин, так и для твердых тел (см. пункты 1–5 выводов), говорить в работе [2] о «несостоятельности» теории [1] – не корректно.

9. Что касается теории [2], то ее применение на практике возможно лишь для твердых тел [16] и, по всей видимости, невозможно для катящихся упругих шин.

ЛИТЕРАТУРА

15. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел // – М.: Мир, 1986. – 349 с.

16. Иванов, А. П. Сравнение моделей трения в динамике шара на плоскости / А. П. Иванов // Нелинейная механика. – М.: – 2010. – Т. 6, № 4. – С. 907–912.

Поступила 26.05.2020

УДК 621.91.04

Данилов А.А.

СИНТЕЗ РАЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ ОБРАБОТКИ ПРОФИЛЬНЫХ МОМЕНТОПЕРЕДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Белорусский национальный технический университет»

Минск, Беларусь

Рассмотрены пути синтеза эффективных схем обработки поверхностей с профилем в виде треугольника Рело и синусоидальным профилем, включающие рациональное разделение функции формообразования между станком, инструментом и приспособлением, а также распределение движений между заготовкой и инструментом, совмещение или разделение движений профилирования и резания, оптимизацию структуры и относительной ориентации исполнительных движений. Приведены примеры

использования этих путей при разработке признанных изобретениями способов обработки поверхностей с указанными типами профилей.

Ключевые слова: моментопередающая поверхность, профилирование, профиль в виде треугольника Рело, синусоидальный профиль, формообразование поверхности, синтез схем обработки.

Введение. Синтез реализуемых на станке схем обработки является одной из главных задач его функционального проектирования, так как допущенные при ее решении ошибки не могут быть устранены на последующих этапах его конструирования [1].

Анализ известных способов обработки моментопередающих поверхностей (МП) с синусоидальным профилем [2, 3] и профилем в виде треугольника Рело [4, 5] показал, что их недостатки в виде сложности реализации и низкой производительности обусловлены неэффективными схемами обработки, что определяет необходимость разработки более совершенных схем. Решение этой задачи возможно на основе теории формообразования поверхностей [1, 6–8], возможных методов формообразования МП [9] и известных способов интенсификации процессов обработки [1].

На основе такого подхода разработаны способы обработки МП с синусоидальным профилем [10, 11] и профилем в виде треугольника Рело [12, 13], устраняющие недостатки известных способов [2–5]. Основные этапы синтеза кинематических схем обработки включают рассматриваемые ниже задание метода и кинематики формообразования поверхности.

Задание метода формообразования поверхности. Метод формообразования поверхности определяется сочетанием методов ее профилирования и формирования по длине. При выборе из возможных [9] метода профилирования многогранных МП существенными являются следующие факторы:

Во-первых, возможность формирования профиля МП геометрическим, кинематическим, и комбинированным методами, от выбора которого зависит сложность кинематики формообразования и конструкции режущего инструмента. Например, кинематическое профилирование грани формируемой поверхности в виде дуги окружности методом следа обеспечивается вращательным движением производящего элемента (вершины режущего лезвия) вокруг ее оси. Этот метод положен в основу предложенного способа обработки МП с профилем в виде треугольника Рело круговым точением [13]. Его преимуществами по сравнению с известным [5] является простота реализации и более высокая точность формообразования, т.к. отклонение сформированного профиля от окружности определяется только точностью кинематической пары вращения шпинделя, несущего заготовку. Если центр формируемой окружности не совпадает с центром вращательного движения заготовки, то она может быть образована полигональным методом, т.е. двумя согласованными вращательными движениями инструмента и заготовки [14].

Во-вторых, из множества возможных предпочтительны методы профилирования поверхности, при которых форма режущих лезвий не влияет на формируемый профиль. Как показано в [9], применительно к профилю в виде треугольника Рело это достигается методами следа и огибания.

В-третьих, изменение рабочих углов режущего лезвия в процессе обработки не должно превышать допускаемую величину. Исходя из этого, на основе аналитического исследования уточняются геометрические параметры схемы профилирования МП и геометрические параметры схемы ее обработки, при которых эти углы стабильны или изменяются в допустимых пределах. Например, стабилизация указанных углов обеспечивается при профилировании некруглой поверхности методом касания, что нашло применение при обработке МП на фрезерных станках с ЧПУ [15].

В-четвертых, формирование МП по длине (направляющей) возможно разными методами [9]. При этом в зависимости от реализуемого метода обработки возможно как полное,

так и частичное формирование направляющей линии. Ее полное формообразование обеспечивают комбинированные методы, например, сочетанием методов копирования и следа [9].

Синтез кинематической схемы обработки. Кинематическая схема обработки, как совокупность движений инструмента и заготовки, зависит от метода профилирования поверхности и формирования ее по длине, распределения функции формообразования между станком, инструментом и приспособлением, структуры исполнительных движений, их совмещения или разделения, направлений элементарных движений, образующих движение профилирования [1]. Кинематическая схема обработки должна обеспечивать не только формообразование заданной поверхности с требуемыми точностью, производительностью и микрорельефом, но и эффективные условия резания. Из возможных путей выполнения этих условий при обработке МП следует выделить следующие:

1. Применение, при возможности, метода профилирования поверхности, при котором исключается влияние геометрии режущих лезвий на формируемый профиль и тем самым упрощается конструкция инструмента. Например, профиль поверхности в виде треугольника Рело может быть образован методами обката [4] или огибания [16]. В первом случае режущее лезвие инструмента имеет криволинейную форму, зависящую от геометрии профиля формируемой поверхности, что усложняет изготовление и переточку режущего инструмента. При профилировании же методом огибания режущие лезвия имеют круговую форму и поэтому могут быть выполнены в виде стандартных круглых режущих пластин, что существенно упрощает конструкцию режущего инструмента, его изготовление и эксплуатацию.

2. Рациональное распределение функции формообразования между станком, инструментом и приспособлением.

От распределения функции формообразования между инструментом и станком зависят их сложность и универсальность. Например, при использовании инструмента с точечным производящим элементом функция кинематики формообразования (профилирование МП с заданными геометрическими параметрами) обеспечивается только станком, что определяет сложность его кинематики, но широкую универсальность по форме обрабатываемых поверхностей. Выполнение функции профилирования инструментом, что характерно для метода копирования, усложняет его конструкцию, но упрощает кинематику станка и обеспечивает более высокую производительность формообразования по сравнению с другими методами профилирования. На этом основан, в частности, способ обработки профильных валов фасонной фрезой [17], который при соответствующей форме инструментальной поверхности применим для обработки поверхностей с разным профилем, в частности, синусоидальным и в виде треугольника Рело.

Перенесение функции кинематики формообразования со станка на инструмент, например, за счет сообщения его производящим элементам конструктивной подачи [1, 18], позволяет упростить кинематическую схему обработки и соответственно кинематику станка, обеспечивает возможность обрабатывать МП различными методами на универсальных станках иного назначения за счет расширения их технологических возможностей. На этом основаны способы обработки МП эксцентрично установленными инструментами (рис. 1), реализуемые благодаря упрощенной кинематике на универсальных станках. Например, приведенные на рис. 1 схемы профилирования МП реализованы на широкоуниверсальном зубошлицефрезерном станке модели ВС-50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан» [1]. Во всех этих схемах заготовке 1 и инструменту 2 сообщают согласованные вращательные движения, соответственно B_1 и B_2 вокруг осей L_1 и L_2 . Управление формируемым профилем обеспечивается заданием отношения частот указанных вращательных движений и эксцентриситета еустановки инструмента.

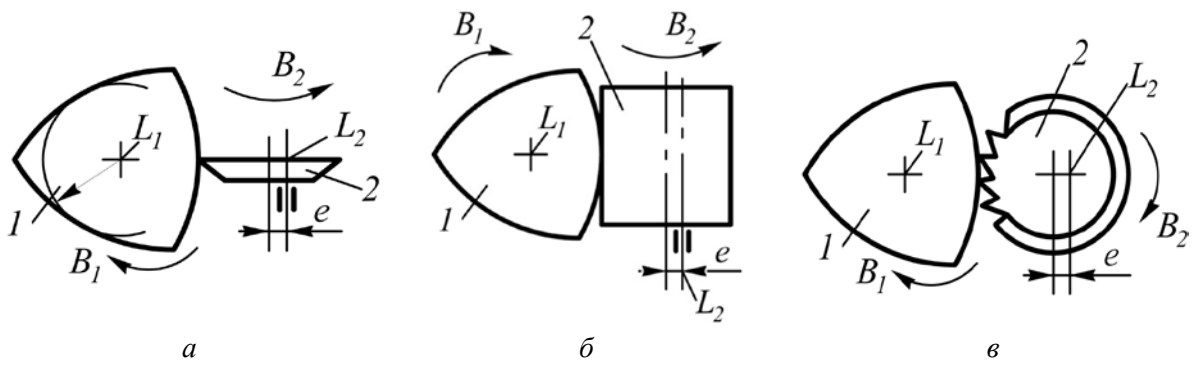


Рис. 1. Схемы профилирования некруглых поверхностей эксцентрично установленными: круглым резцом *a*; цилиндрическим инструментом (фрезой, опилователем, шлифовальным кругом и др.) *б*; дисковой фрезой *в*.

Необходимое для формирования некруглого профиля радиальное перемещение производящих элементов инструмента обеспечивается здесь за счет их расположения на различных расстояниях от оси его вращения, благодаря чему упрощается кинематика станка без усложнения конструкции инструмента.

Аналогично при перераспределении функции формообразования между инструментом и заготовкой упрощается кинематическая схема обработки МП, профилируемой методом обката (рис. 2).

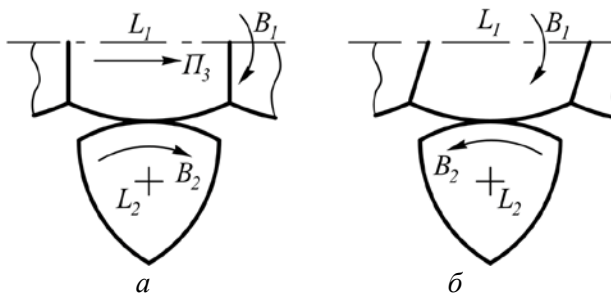


Рис. 2. Схемы профилирования НП в виде треугольника Рело методом обката при совмещении (*a*) и разделении (*б*) движений профилирования и резания

По схеме *a* МП профилируется движением $\Phi_s(P_3B_2)$, кинематически не связанным с независимым движением резания $\Phi_v(B_1)$, поэтому в процессе обработки необходимо сообщать одновременно движения трем исполнительным органам станка, что усложняет его конструкцию.

При перенесении же функции движения P_3 на инструмент (рис. 2, *б*) за счет придания его инструментальной поверхности винтовой формы (червячная фреза или абразивный червячный круг) МП формируется совмещенным

движением профилирования и резания $\Phi_{vs}(B_1B_2)$, вследствие чего существенно упрощается кинематика и конструкция станка, но усложняется инструмент.

Известно применение червячного инструмента для обработки поверхностей с РК-3 профилем [19]. При соответствующей конструкции такого инструмента могут быть обработаны МП с другой формой профиля.

Важной функцией формообразования многогранных МП является формирование множества его равномерно расположенных по окружности конгруэнтных участков. При выполнении этой функции инструментом упрощается кинематика станка. На таком распределении функции формообразования основан разработанный способ долбления деталей с профилем в виде треугольника Рело [12]. Перенесение функции формообразования на приспособление для выполнения им движения деления также позволяет упростить кинематику станка и применять для обработки таких МП универсальные станки, кинематика которых не обеспечивает функцию деления. Этот прием использован в способе обработки поверхностей с профилем в виде треугольника Рело круговым точением [13], который может быть реализован на универсальных фрезерных и расточных станках, оснащенных устройством для периодического поворота заготовки

(движения деления) при переходе к обработке следующей грани МП. Такое решение задачи эффективно для мелкосерийного производства деталей с таким профилем, так как отпадает необходимость в специальном станке.

3. Синтез рациональной структуры исполнительных движений, обеспечивающей благоприятные условия резания и работы механизмов станка за счет исключения реверсивного движения его исполнительного органа, несущего режущий инструмент, например, путем замены его возвратно-поступательного движения вращательным. На этом основан способ точения МП с синусоидальным профилем, когда возвратно-поступательное движение призматического резца [3, 4] заменено вращательным движением эксцентрично установленного круглого резца [1] (см. рис. 1, а). Этот принцип положен также в основу кинематики формообразования нового способа обработки таких поверхностей круглым резцом [10].

Исходя из структуры исполнительных движений, формируются кинематика формообразования и кинематика резания, как основа кинематической схемы обработки.

4. Совмещение исполнительных движений профилирования и резания для упрощения кинематической схемы обработки МП (см. рис. 1) или, наоборот, разделение этих движений для управления топологией обработанной поверхности с целью улучшения качества ее обработки. Совмещение движений, упрощая кинематику станка, ограничивает, однако, возможность управления высотой неровностей на обработанной поверхности в виде не срезанной части припуска, что может потребовать последующую обработку МП для обеспечения заданного качества, например, шевингованием, шлифованием и т.п., аналогично тому, как это применяется при обработке зубьев цилиндрических колес червячной фрезой с последующим шевингованием.

Разделение движений профилирования и резания (рис. 3) усложняет кинематическую схему обработки, но позволяет управлять высотой отклонений обработанной поверхности от номинальной в виде не срезанной части припуска за счет независимого регулирования скорости движения профилирования. На этом основаны представленные на рис. 3 схемы профилирования МП при окончательной их обработке цилиндрическими (а, б) и дисковыми [в, г] инструментами.

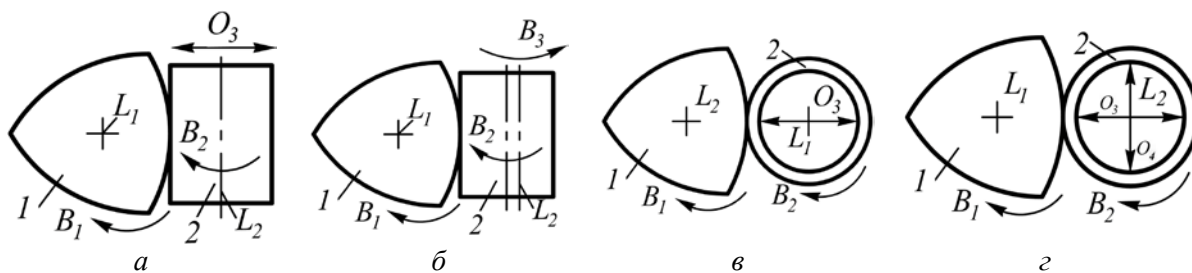


Рис. 3. Схемы формирования некруглого профиля методами огибания (а, б) и касания (в, г) при разделении движений резания и профилирования

Разделение движений профилирования и резания позволяет также улучшить условия резания, например, за счет стабилизации или уменьшения диапазона изменения рабочих углов инструмента.

В частности, схема в (см. рис. 3) применяется для шлифования МП на специальных и модернизированных универсальных круглошлифовальных станках, на станках с ЧПУ. По схеме г, основанной на сообщении вращающемуся шлифовальному кругу осциллирующих движений O_3 и O_4 , осуществляется шлифование деталей с РК-3 профилем на профилешлифовальном станке модели AFD 630–2500 фирмы FORTUNA (Германия) [20] и других станках.

5. Совмещение движений формообразования и деления для обеспечения возможности обработки всех граней МП за один ход, повышения непрерывности и производительности процесса обработки. На этом основаны разработанные схемы формирования поверхностей с профилем в виде треугольника Рело методами прерывистого следа и огибания [16].

6. Задание рационального сочетания направлений элементарных движений, образующих движение профилирования, т. к. от него зависят технологические возможности схемы профилирования и сложность ее реализации. Например, схема профилирования треугольника Рело методом огибания [12] основана на одинаково направленных вращательных движениях инструмента и заготовки. По сравнению с известным способом профилирования такой поверхности методом обката [4], при котором оно осуществляется при противоположно направленных этих движениях, существенно упрощается конструкция режущего инструмента, т. к. формируемый профиль не зависит от геометрии режущих лезвий.

Задание рационального сочетания направлений элементарных движений важно также для улучшения условий резания и повышения производительности обработки МП. Решение этой задачи требует проведения сравнительного анализа возможных схем обработки МП. Объектом исследования может быть изменение рабочих углов режущего лезвия, производительность формообразования при заданной точности профилирования. Например, полигональное точение МП по попутной схеме производительнее, чем по встречной при одинаковой скорости резания. По результатам исследования принимается решение по выбору схемы обработки МП.

7. Обоснование распределения элементарных движений между инструментом и заготовкой, что важно для синтеза или выбора компоновки станка, обеспечения его универсальности, улучшения динамики процесса обработки. Известно, что для обработки круглых цилиндрических поверхностей на крупногабаритных заготовках вращательное движение профилирования сообщают не заготовке, а резцу, что позволяет многократно увеличить скорость резания и соответственно производительность обработки. На этом принципе основан способ кругового точения МП с профилем в виде треугольника Рело [13]. При сообщении вращательного движения инструменту он может быть выполнен в виде охватывающей многолезвийной головки, что позволяет повысить технологическую производительность по сравнению с известным способом обработки [5] пропорционально числу режущих лезвий.

Рассмотрим пример синтеза и реализации схемы обработки поверхности с профилем в виде треугольника Рело, формируемого методом прерывистого следа [9]. В соответствии с [9] полигональное профилирование некруглой поверхности с профилем в виде треугольника Рело *ABC* (рис. 4) возможно методом прерывистого следа, например, при обработке долблением.

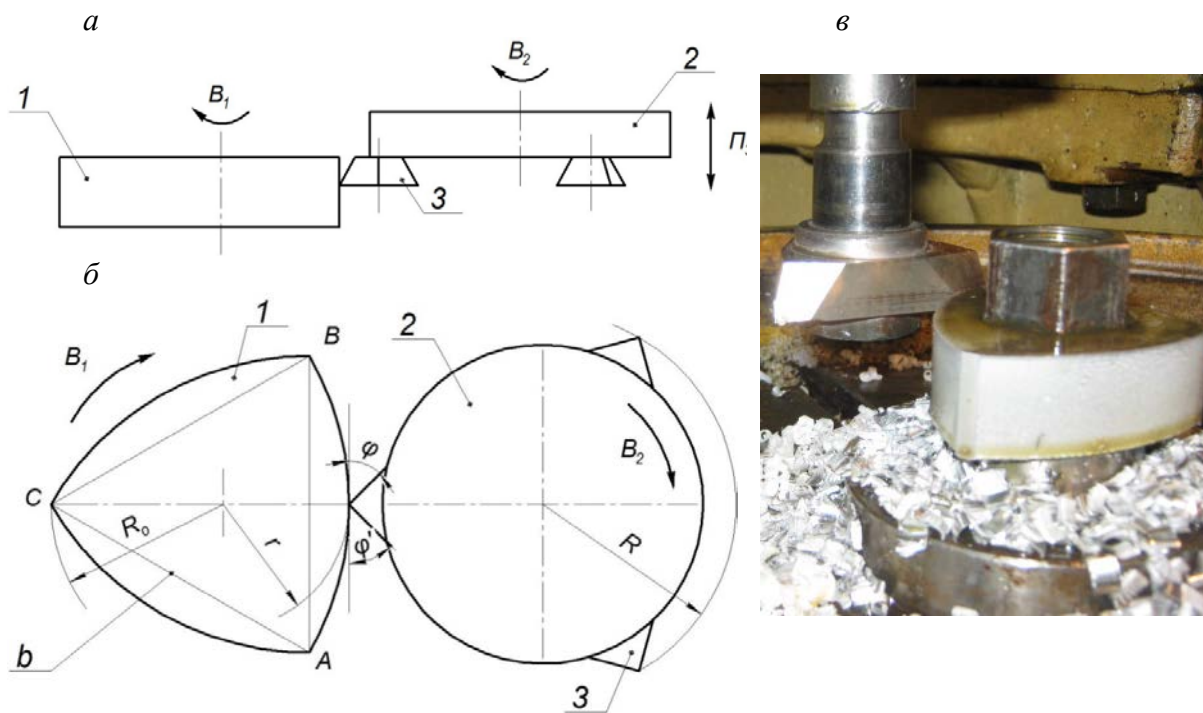


Рис. 4. Кинематическая схема долбления (а), схема формирования профиля поверхности в виде треугольника Рело (б) методом прерывистого следа и пример реализации способа обработки на зубодолбежном станке (в)

Заготовке 1 радиусом R_0 и инструменту 2 с тремя равномерно расположенными по окружности радиусом R режущими лезвиями 3 сообщают согласованные одинаково направленные вращательные движения, соответственно B_1 и B_2 , образующие движение профилирования $\Phi_s(B_1B_2)$. Аналитически установлено, что полигональное формирование треугольника Рело обеспечивается, если радиус R инструмента связан с шириной b треугольника Рело зависимостью

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

Одновременно инструмент 2 совершает поступательное движение Π_3 со скоростью резания. Таким образом, в данном случае движения резания и профилирования выполняются в разных плоскостях, т. е. разделены, благодаря чему обеспечивается постоянство переднего и заднего рабочих углов режущего лезвия. Переменными в данном случае являются главный ϕ и вспомогательный ϕ' углы в плане.

Если статические главный и вспомогательный углы в плане $\phi = \phi' = 45^\circ$, то, учитывая геометрию треугольника Рело, минимальное значение рабочих углов в плане составляет допустимое значение 15° , что соответствует нахождению вершины режущего лезвия в вершине формируемого треугольника Рело. Таким образом, при обработке деталей с профилем в виде треугольника Рело долблением рабочие углы режущего лезвия изменяются в допустимых пределах, благодаря чему обеспечивается возможность реализации схемы полигонального профилирования на зубодолбежном станке, как показано на рис. 4. в.

Рассмотренная схема основана на следующих указанных выше положениях синтеза рациональных схем обработки:

– форма режущих лезвий не влияет на формируемый профиль, т. к. их производящими элементами являются точки;

– обеспечение изменения рабочих углов режущих лезвий в допустимых пределах;

– рациональное распределение функции формообразования между станком и инструментом, что выражается в формировании трех равномерно расположенных по окружности конгруэнтных участков профиля за счет конструкции инструмента (оснащение его тремя равномерно расположенными по окружности производящими элементами, что обеспечивает выполнение инструментом функции деления);

– рациональная структура исполнительного движения профилирования, образуемого двумя равномерными вращательными движениями, задание скорости и направлений их вращения, обеспечивающих формирование треугольника Рело;

– разделение движений профилирования и резания, что позволило по сравнению с полигональным точением стабилизировать значения переднего и заднего рабочих углов инструмента и обеспечить возможность обработки поверхности с профилем в виде треугольника Рело;

– рациональное распределение движений между инструментом и заготовкой, что позволило реализовать эту схему обработки на универсальном зубодолбежном станке.

На основе изложенных положений разработан также реализованный в промышленности [16] способ обработки МП с профилем в виде треугольника Рело, формируемым методом огибания, обеспечивающим по сравнению с методом обката [4] упрощение конструкции инструмента и повышение точности формообразования.

Заключение. Таким образом, синтез эффективных схем обработки профильных МП с синусоидальным профилем и профилем в виде треугольника Рело возможен на основе: применения методов формообразования, при которых геометрия режущего лезвия не влияет на формируемый профиль [12]; оптимизации структуры [10] и относительной ориентации траекторий [11] исполнительных движений; рационального распределения движений между инструментом и заготовкой [13]; совмещения или разделения движений профилирования и резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 316 с.

2. Синкевич, В. М. Исследование технологии изготовления профильных бесшпоночных соединений узлов судовых механизмов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В. М. Синкевич; Ленингр. кораблестр. ин-т. – Л., 1985. – 21 с.

3. Ворона, В. В. Расчет оснастки и операции токарной обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / В. В. Ворона; Юго-западн. госуд. ун-т. – Курск, 2008. – 202 с.

4. 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.

5. Способ обработки профильного вала равной ширины: пат. RU 463129 / А. И. Барботько, П. А. Понкратов, М. С. Разумов. – Оpubл. 10.10.2012.

6. Коновалов, Е. Г. Основы новых способов металлообработки / Е. Г. Коновалов. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 297 с.

7. Радзевич, С. П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории / С. П. Радзевич. – Киев: Растан, 2001. – 592 с.

8. Родин, П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П. Р. Родин. – Киев: Вища школа, 1977. – 192 с.

9. Пантелеенко, Ф. И. Классификация методов формообразования и синтез на ее основе схем обработки профильных моментопередающих поверхностей / Ф. И. Пантелеенко, А. А. Данилов // Наука и техника. – 2020. – №4. – С. 280–287.

10. Способ точения из заготовки некруглого вала с сечением в виде равномерно расположенных по окружности выступов: пат. ВУ 21958 / А. А. Данилов, В. А. Данилов. – Оpubл. 28.02.2018.

11. Способ обработки некруглых деталей с равномерно расположенными по окружности выступами: Евразийский патент № 034377 / А. А. Данилов, В. А. Данилов. – Оpubл. 31.01.2020.

12. Способ обработки некруглых деталей с треугольным профилем равной ширины: Евразийский патент 031383 / А. А. Данилов, В. А. Данилов. – Оpubл. 28.12.2018.

13. Способ получения детали с сечением в виде треугольника Рело из заготовки лезвийным режущим инструментом пат. ВУ 22235 / А. А. Данилов, В. А. Данилов. – Оpubл. 30.04.2018.

14. 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.

15. Зенин, Н. В. Технологическое обеспечение качества трехгранного профиля бесшпичных соединений в условиях серийного производства: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Н. В. Зенин; МВТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2007. – 132 с.

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. 59–65.

17. Шитиков, А.Н. Проектирование сборных фрез для обработки наружного РК-профиля: автореферат дис. ... к.т.н. 05.02.07 / А. Н. Шитиков; Тульск. госунар. ун-т. – Тула, 2007. – 20 с.

18. 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: 05.02.07 / Ю. А. Максименко; Юго-западн. госуд. ун-т. – Курск, 2014. – 20 с.

19. 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 с.

20. 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.

Поступила 14.04.2020

УДК 621. 91. 01

Данилов В.А.¹, Селицкий А.Н.²

СТАНОЧНОЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РОТАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

1. Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

2. Полоцкий государственный университет

Новополоцк, Беларусь

Обоснована возможность обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей на универсальных зубошлицефрезерных станках эксцентрично установленным круглым резцом. Определены требования к кинематической структуре специализированных станков для ротационного точения таких поверхностей. Рассмотрена пред-