

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.23.054.36.051.84:621.9(045)(476)

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
ЗУБЧАТОГО КОНТУРА НА ТОРЦАХ КОЛЬЦЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Данилов В.А. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Киселев Р.А., Яловский О.В. (УО «Полоцкий государственный университет», г. Новополоцк, Беларусь)

Рассмотрены пути повышения производительности и точности формообразования зубчатых контуров на торцах кольцевых деталей по схемам с совмещенными процессами резания и деления. Приведены примеры реализации прогрессивных схем обработки зубчатых контуров с применением созданных инструментов на широкоуниверсальном станке модели ВС-50. Описана кинематическая структура специализированного станка для обработки зубьев на торцах деталей по схемам с непрерывным делением и возможностью управления кинематическими и геометрическими параметрами реализуемых схем формообразования.

Введение

В силовых и точных трансмиссиях различных машин и оборудования, приборов и других устройств, благодаря надежности передачи крутящего момента и компактности конструкции, широко применяются детали с плоским зубчатым контуром типа кулачковых и храповых муфт. Существующие технологии их изготовления основаны обычно на последовательной обработке зубьев на фрезерных станках с применением метода прерывистого деления, что обуславливает относительно низкую производительность. В этой связи актуальной является интенсификация процессов формообразования зубчатых контуров в направлении повышения производительности и создания на этой основе прогрессивных методов обработки, станков и инструментов.

Эффективный путь интенсификации процессов механической обработки представляет применение рациональных способов формообразования, разработка которых относится к концептуальному проектированию металлорежущих станков, в значительной мере определяющему их технико-экономические показатели. Допущенные здесь ошибки, как показывает практика, не могут быть компенсированы на последующих этапах проектирования станка и реализации проекта. Поэтому разработка рациональных способов формообразования имеет первостепенное значение для создания прогрессивного специализированного станочного оборудования и режущих инструментов, обеспечивающих совершенствование технологии изготовления деталей с торцовым зубчатым контуром.

Более производительными и точными являются способы обработки зубчатых контуров, основанные на их кинематическом формировании при непрерывном движении деления [1], совмещенном с процессом резания. Высокая эффективность этих способов обработки подтверждается, например, опытом эксплуатации станков-профиляторов фирм «WERA» (Германия) и др., обеспечивающих существенное повышение производительности обработки зубчатых контуров по сравнению с традиционной технологией.

Кинематическое формирование зубчатого контура основано на согласованных вращательных движениях инструмента относительно заготовки, осуществляемых вокруг параллельных или скрещивающихся осей [2]. В статье рассматриваются пути совершенствования схем обработки первого типа, основанных на применении созданных режущих инструментов в виде резцовых головок на широкоуниверсальном станке модели ВС-50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан», использование которого позволяет отказаться от применения зарубежного оборудования, в частности, станков-профиляторов фирмы «WERA» (Германия).

Геометрия торцовых зубчатых контуров кольцевых деталей

Геометрические и установочные параметры разрабатываемых схем кинематического формирования зубчатого контура обусловлены его геометрией. В зависимости от функционального назначения зубчатые контуры характеризуются разнообразной геометрией зубьев (рисунок 1) и требованиями к точности исполнения, влияющими на технологичность изделий, выбор схемы обработки зубчатого контура, конструкцию режущего инструмента и станочного оборудования. В результате систематизации и анализа геометрии зубчатых контуров деталей машин [1] установлены приведенные на рисунке 1 геометрические признаки I-V, существенные для разработки технологической операции их обработки. Для каждого из этих признаков возможны конструктивные модификации, указанные на рисунке 1 арабскими цифрами.

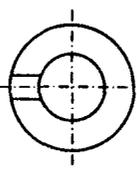
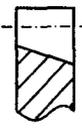
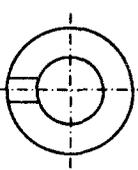
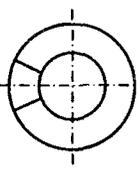
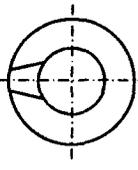
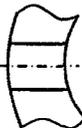
I Направление зубьев	II Профиль зубьев	III Форма дна впадины между зубьями	IV Сходимость рабочих сторон зубьев	V Форма рабочих сторон зубьев
1 	1  2 	1  2  3  4 	1  2  3 	1  2  3  4 

Рисунок 1. – Характеристика геометрии торцовых зубчатых контуров

Зубья могут иметь радиальное I-1 или косое I-2 направление и следующие типовые профили: треугольный симметричный II-1, треугольный несимметричный II-2, прямоугольный II-3, трапецидальный II-4 и фасонный II-5. В продольном направлении зубья различаются формой дна пазов между ними: прямая III-1, косая III-2, III-3 и криволинейная III-4 (обычно в виде дуги окружности). Боковые стороны зубьев могут быть параллельны IV-1, сходиться к центру IV-2 или к периферии IV-3, и при этом быть

прямолинейными V-1, вогнутыми V-2, выпуклыми V-3 или иметь кривизну разных знаков V-4, когда одна боковая сторона паза вогнутая, а другая выпуклая.

Муфты с треугольным профилем зубьев применяется для передачи относительно небольшого крутящего момента, характеризуются надежным и быстрым включением. Трапецеидальный профиль имеют зубья кулачковых муфт для передачи большего крутящего момента с высокой частотой вращения, а прямоугольный – кулачки муфт тяжело нагруженных трансмиссий. Муфты с несимметричным трапецеидальным и треугольным профилем зубьев, в частности храповые, используются в передачах с постоянным направлением вращения.

Боковые рабочие поверхности кулачков обычно выполняют плоскими, что зачастую не обеспечивает равномерность распределения на них контактного давления из-за погрешностей изготовления и сборки, а также относительного смещения полумуфт под нагрузкой. Поэтому более рациональной является криволинейная форма рабочих поверхностей кулачков, что, однако, усложняет их обработку. Например, для повышения долговечности муфта, применяемая в тракторах Минского тракторного завода, имеет кулачки с вогнутыми боковыми поверхностями у одной полумуфты и с выпуклыми у другой, очерченные дугами окружностей различного радиуса.

Благодаря этому при работе передачи исключается их кромочный контакт и увеличивается срок службы муфты. Типовая технология изготовления таких полумуфт основана на применении двух резцовых головок различного радиуса, что обуславливает необходимость ее совершенствования.

Прогрессивные схемы обработки плоских зубчатых контуров

Формирование торцового зубчатого контура в виде равномерно расположенных по окружности зубьев (кулачков), разделенных пазами, связано с необходимостью выполнения движения деления (поворота заготовки на угол между зубьями), которое может быть как прерывистым, так и непрерывным. Первый вариант, обычно применяемый при изготовлении кулачковых и храповых муфт, по сравнению со вторым характеризуется меньшей производительностью из-за прерывания процесса обработки во время выполнения движения деления, а также зачастую – и более низкой точностью расположения зубьев по окружности из-за погрешности делительного устройства. В этой связи одним из направлений совершенствования технологии обработки зубчатых контуров является совмещение во времени процессов резания и деления.

Количество исполнительных движений, необходимых для обработки равномерно расположенных пазов, минимально, если их профиль образуется методом копирования, а форма по длине – методом следа [3]. В данном случае характеристический образ инструмента конгруэнтен поперечному сечению паза, что обеспечивается соответствующим профилированием его режущей части.

Кинематическое формирование плоского зубчатого контура, как множества равномерно расположенных по окружности зубьев, обеспечивается для рассматриваемых схем обработки двухэлементарным исполнительным движением, образованным двумя согласованными вращательными движениями производящего контура вокруг параллельных осей. Реализация данной принципиальной схемы формообразования возможна тремя практическими схемами обработки, различающимися распределением вращательных движений между инструментом и заготовкой: оба движения сообщаются или инструменту или заготовке, третья схема – одно вращательное движение сообщается инструменту, а второе заготовке. Более универсальным и простым в реализации является третий вариант распределения движений между инструментом и заготовкой, пред-

ставленный на рисунке 2. Режущим инструментом здесь является резцовая головка 2 с расположенными на ней режущими зубьями 4.

При обработке зубчатого контура инструменту 2 и заготовке 1 сообщаются вращательные движения соответственно B_2 и B_1 вокруг своих осей 3 и 5, расположенных параллельно, а инструменту – также движение врезания Π_3 вдоль оси вращения заготовки для получения заданной глубины пазов. Расстояние L между этими осями может быть равно радиусу R резцовой головки, как показано на рисунке 2, или отличаться от него.

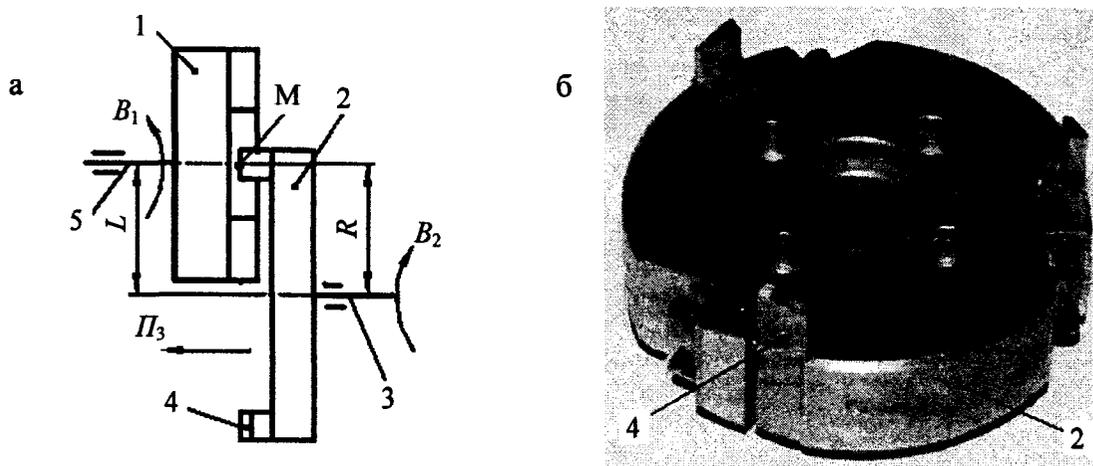


Рисунок 2. – Схема кинематического формирования зубчатого контура (а) резцовой головкой (б) на широкоуниверсальном станке модели ВС-50

Для обеспечения движения деления отношение i частот вращательных движений B_2 и B_1 пропорционально количеству зубьев

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{m}{k}, \quad (1)$$

где n_1 – частота вращения заготовки;

n_2 – частота вращения резцовой головки;

m – число нарезаемых зубьев;

k – целое число, меньшее числа m и не кратное ему.

В относительном движении траектория точки M , совершающей два вращательных движения, описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} x = L \cos \alpha - R \cos \alpha(i - 1); \\ y = L \sin \alpha + R \sin \alpha(i - 1), \end{cases} \quad (2)$$

где x, y – текущие координаты траектории, формируемой производящими элементами резцовой головки в прямоугольной системе координат с центром на оси вращения заготовки;

α – текущее значение угла поворота заготовки;

i – отношение частот вращательных движений резцовой головки и заготовки.

Число ветвей N образуемой циклоидальной кривой зависит от отношения i частот вращения заготовки и инструмента, а также от количества z режущих зубьев резцовой головки:

$$N = z \cdot i \cdot c, \quad (3)$$

где c – целое число, определяющее последовательность обработки пазов.

Если количество пазов, пропускаемых перед последующим резом, равно k , то c и k связаны между собой зависимостью

$$c = k + 1. \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует зависимость, определяющая условия формирования заданного количества зубьев на торце детали,

$$N = z \cdot i \cdot (k + 1). \quad (5)$$

Если отношение i частот вращательных движений выражается целым числом, то любая формируемая линия состоит из i конгруэнтных участков и является замкнутой. При этом соседние конгруэнтные участки соединяются между собой в точках образованной кривой, равномерно расположенных по окружности. Данное обстоятельство обеспечивает возможность многократного перемещения формообразующей точки по одной и той же траектории, что необходимо при обработке зубчатого контура методом врезания, так как каждый паз по глубине формируется за несколько резов (оборотов заготовки). Если значение i выражается дробным рациональным числом вида $i = N/q$ (где q – число, не имеющее общих множителей с N), то также образуется замкнутая кривая, состоящая из N конгруэнтных ветвей. Формообразующая точка, описывая многократно N ветвей, возвращается каждый раз в исходное положение, что позволяет использовать образуемую линию в качестве направляющей в схемах обработки зубчатых контуров с непрерывным движением деления.

При иррациональном значении i формообразующая точка, описывая бесконечное число пересекающихся ветвей, не возвращается в исходное положение, поэтому образуемая линия является незамкнутой. Данный случай не имеет практического значения при обработке зубчатых контуров.

Перемещение производящей точки по прямой, необходимое при обработке зубчатых контуров с прямолинейными пазами, обеспечивается при $L = R$ (рисунок 2а) и $i = 2$, т.к. траектория производящей точки в этом случае описывается уравнением прямой линии:

$$\begin{cases} x = 0; \\ y = 2L \sin \alpha. \end{cases} \quad (6)$$

Следует иметь в виду, что системой уравнений (6) описывается только средняя линия дна паза, формируемая точкой M режущей кромки, а его боковые стороны имеют эллиптическую форму. Требуемая точность обработки боковых поверхностей пазов достигается путем настройки соответствующего значения радиуса R инструмента, возможность осуществления которой должна обеспечиваться его конструкцией.

Так как отношение частот вращательных движений инструмента и заготовки в рассматриваемом случае равно двум, то число обработанных зубьев в 2 раза больше числа резцов в головке, и поэтому возможна обработка изделий только с четным числом зубьев.

Возможности схемы по форме рабочих поверхностей обрабатываемых пазов существенно расширяются при управлении расстоянием L между осями инструмента и заготовки. Требуемую форму обрабатываемого паза получают за счет настройки рас-

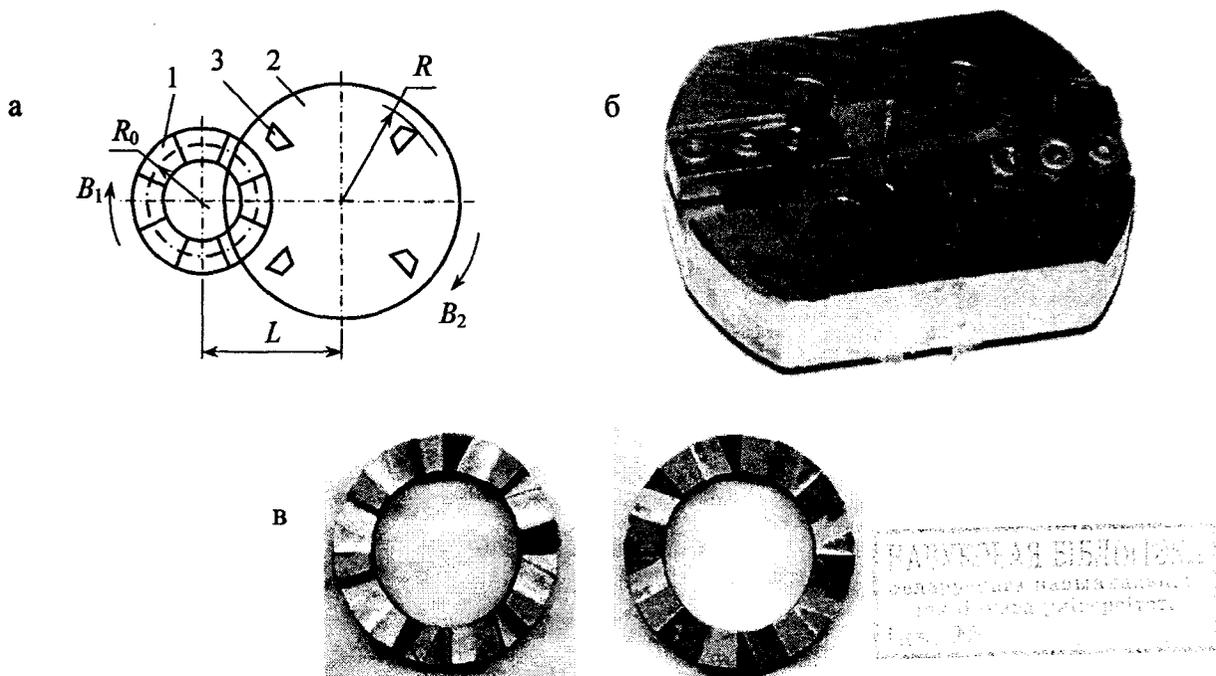
стояния L между осями инструмента и заготовки, а также радиуса R установки режущих элементов на резцовой головке. Например, при обработке сходящихся пазов указанное расстояние настраивают по зависимости [4]:

$$L = \sqrt{R^2 + R_0^2 \frac{i \pm 2}{i}}, \quad (7)$$

где R_0 – средний радиус расположения пазов.

Знак «минус» в (7) соответствует одинаково направленным вращательным движениям инструмента и заготовки, знак «плюс» – противоположно направленным.

Данная схема обработки реализована на станке модели ВС-50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан». Она позволяет одним инструментом (рисунок 3б) обрабатывать пазы с различными по форме боковыми сторонами – выпуклыми или вогнутыми (рисунок 3в), что важно для повышения долговечности кулачковых муфт за счет обеспечения рациональной формы контакта их рабочих поверхностей.



1 – заготовка; 2 – резцовая головка; 3 – резец;

а – кинематическая схема; б – режущий инструмент; в – образцы деталей

Рисунок 3. – Обработка зубчатого контура кулачковой муфты с управляемым межосевым расстоянием на станке модели ВС-50

В схеме обработки зубчатого контура по рисунку 2 профиль паза образуется методом копирования, поэтому его ширина равна длине проекции режущей кромки резца на плоскость, перпендикулярную оси паза (траектории исполнительного движения). Это ограничивает технологические возможности данной схемы по ширине пазов, так как с увеличением последней соответственно возрастает сила резания, что снижает виброустойчивость обрабатываемой системы. В этой связи данная схема предпочтительна при обработке относительно узких пазов.

Для исключения влияния ширины обрабатываемых пазов на виброустойчивость станка и повышения универсальности режущего инструмента целесообразно формировать паз по ширине не одновременно, а последовательно, т.е. не методом копирования,

а методом следа или комбинированным методом – сочетанием методов копирования и следа.

В этом случае требуемую ширину пазов обеспечивают не за счет параметров режущей части инструмента, а кинематически, сообщая заготовке 1 дополнительное вращение B_4 (рисунок 4). Поэтому процесс обработки состоит из последовательно выполняемых этапов врезания и профилирования.

На этапе врезания заготовке 1 сообщают вращение B_1 с частотой n_1 , а резцовой головке 2 – вращение B_2 с частотой n_2 в том же направлении, что и вращение B_1 . При

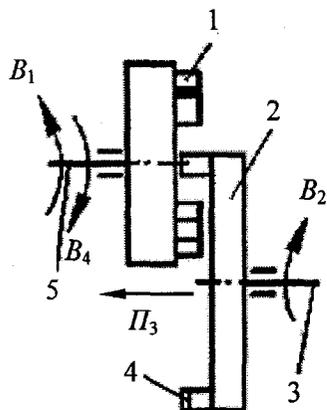


Рисунок 4. – Схема обработки зубчатого контура муфты с управляемой шириной пазов

этом $n_2/n_1 = 2$. Одновременно с движениями B_1 и B_2 резцовой головке сообщается также движение врезания $П_3$ вдоль оси 3. При переходе к этапу профилирования изменяется отношение частот вращательных движений заготовки и резцовой головки, имевшее место на этапе врезания. Тем самым создается движение профилирования – относительное перемещение режущих зубьев 4 резцовой головки и заготовки.

Отношение частот вращательных движений заготовки и резцовой головки задают в зависимости от скорости и направления движения профилирования по формуле

$$\frac{n_1}{n_2} = 0,5 \pm \frac{S}{\pi d n_2}, \quad (8)$$

где S – скорость движения профилирования;
 d – диаметр заготовки.

Знак «плюс» соответствует одинаково направленным вращению заготовки и движению профилирования, «минус» – противоположно направленным этим движениям.

Для обеспечения соотношения (8) частоту вращения заготовки изменяют по сравнению с этапом врезания на величину $\Delta n_1 = S/(\pi d)$. Практически это обеспечивается, например, при сообщении дополнительного вращения B_4 заготовке (рисунок 4) с частотой Δn_1 .

Благодаря тому, что после выполнения этапа врезания изменяют соотношение частот вращательных движений резцовой головки и заготовки и тем самым создают движение профилирования, можно обрабатывать пазы, ширина которых не зависит от длины режущей кромки зуба инструмента, а определяется временем этапа профилирования. Поэтому данная схема позволяет обрабатывать разнообразные детали с торцовым зубчатым контуром одним инструментом, что повышает его универсальность и позволяет сократить номенклатуру необходимых инструментов.

Технологические возможности кинематического формирования торцовых зубчатых контуров по числу и форме обрабатываемых зубьев значительно расширяются, если в процессе обработки изменять по определенному закону передаточное отношение частот вращательных движений инструмента и заготовки. Например, для обработки зубчатых контуров с нечетным числом прямолинейных пазов угловые скорости движений B_1 и B_2 задают такими, чтобы в течение одного оборота инструмента их отношение i принимало в зоне обработки значение, равное двум (условие формирования прямолинейного паза), а на остальном участке компенсировало вызванную несогласованность вращательных движений, нарушающую условие непрерывного деления.

Кинематическая цепь, соединяющая шпиндель 4 и суммирующий механизм 9 через устройства 7 и 8, может быть заменена подключенным к механизму 9 регулируемым двигателем, что целесообразно при оснащении станка системой ЧПУ. Такое решение упрощает настройку и повышает универсальность станка.

Следует иметь в виду, что для заданного значения i с увеличением числа нарезаемых зубьев пропорционально возрастает число резцов в головке, что усложняет ее конструкцию и заточку, а в ряде случаев, учитывая ограниченный диаметр резцовой головки, исключает возможность обработки зубчатых контуров с заданным числом зубьев. В этой связи заслуживает внимания схема обработки с дискретно-непрерывным движением деления, при которой заданное множество пазов создается как объединение нескольких групп пазов [6]. Паза каждой группы обрабатываются по схеме с непрерывным движением деления всеми резцами головки, а для перехода к обработке пазов следующей группы траекторию движения формообразования переносят (смещают) в новое геометрическое положение, для чего заготовке или инструменту сообщают поворот на определенный угол вокруг своей оси (дискретное движение деления). При такой схеме обработки упрощается конструкция резцовой головки и повышается ее универсальность, так как одной резцовой головкой можно обрабатывать детали с различным числом пазов.

Общее число обработанных пазов в этом случае $m = n N_{sp}$ (n – число групп резцов, N_{sp} – число впадин, обрабатываемых одной группой резцов). В общем случае дискретное движение деления выполняется целое число раз, равное отношению общего числа пазов у детали и числа пазов, обрабатываемых при непрерывном движении деления. После выполнения последнего движения деления режущие кромки возвращаются на начальную траекторию, что соответствует окончанию цикла обработки всех пазов детали.

Обработка пазов по схеме с дискретно-непрерывным делением возможна на специальных [6] или широкоуниверсальных станках. В обоих случаях кинематическая структура станка должна содержать кинематическую группу движения деления, последовательно соединенную с кинематической группой движения формообразования боковых сторон зубьев. Этому условию отвечает, в частности, кинематическая структура широкоуниверсального станка модели ВС50, который снабжен делительным механизмом для периодического поворота шпинделя с заготовкой, благодаря чему обеспечивается возможность обрабатывать паза по схеме с дискретно-непрерывным делением.

Заключение

Эффективным направлением повышения производительности и точности обработки зубчатых контуров на торцах кольцевых деталей является совмещение процессов резания и деления, что достигается при определенных геометрических и кинематических параметрах схемы формообразования, конструкции режущего инструмента и его установки относительно заготовки. Управление формообразованием за счет настройки параметров режущего инструмента и кинематики формообразования расширяет технологические возможности схем обработки в отношении количества зубьев контура и формы их рабочих поверхностей. Прогрессивные схемы обработки торцовых зубчатых контуров реализуются на отечественном станке модели ВС-50 с помощью созданных режущих инструментов.

Список использованных источников

1. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 316 с.
2. Данилов, В.А. Прогрессивные технологии формообразования торцовых зубчатых контуров деталей машин / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский. – Новополоцк: УО «Полоцкий государственный университет», 2015. – 220 с.
3. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
4. Способ формирования пазов на торце детали: пат. 5707 Респ. Беларусь, МПК В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель УО «Полоцкий государственный университет». – № а 2000051; заявл. 17.01.00; опубл. 30.12.03 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 4. – С. 125.
5. Станок для обработки пазов на торцах деталей: пат. 9191 Респ. Беларусь, МПК В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель УО «Полоцкий государственный университет». – № и 20120835; заявл. 24.09.12; опубл. 30.06.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – С. 183.
6. Станок для обработки пазов на торцах деталей: пат. 6350 Респ. Беларусь, МПК В23С3/00 / В.А. Данилов, О.В. Яловский; заявитель УО «Полоцкий государственный университет». – № и 20091006; заявл. 30.11.09; опубл. 30.06.10 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 3. – С. 165.

Danilov V.A., Kiselev R.A., Yalovsky O.V.

Improvement of the technology of gear processing on end surfaces of ring-shaped elements

The ways of improvement of performance and accuracy of gear processing on ring-shaped elements' end surfaces according to the patterns with combined cutting and division processes have been examined. Examples of realization of progressive gear processing patterns using tools designed on VS-50 superuniversal machine are given. The paper describes the kinematic structure of a task-specific machine for gear processing on elements' end surfaces according to the patterns with continuous division and the ability to control kinematic and geometrical parameters of implemented shape-generating patterns.

Поступила в редакцию 26.01.2017 г.