

В.В., Спиридонов Н.В., Кудина А.В.; заявитель – УО «БГАТУ». – а 20100538, заявлено 2010.04.09; зарегистрировано в Госреестре изобретений 2012.05.11.

3. Кураш В.В. Композиционный состав для электродуговой наплавки износостойкого покрытия : пат. № 15167 Республика Беларусь, С1, 2011.12.30, МПК В23К 9/04 (2006.0 / Кураш В.В., Лисай Н.К., Кудина А.В.; заявитель – УО «БГАТУ». – а 20100419, заявлено 2010.03.18; зарегистрировано в Госреестре изобретений 2011.08.11.

4. Кураш В.В. Исследование интенсивности изнашивания нового состава износостойкого металлопокрытия для трибоповерхностей деталей машин. /В.В.Кураш, А.В.Кудина, Ю.Т.Антонишин, А.В.Кривицкий // Агропанорама. Мн.: изд-во УО БГАТУ, 2012г. № 5. - С.13 - 17.

5. Спиридонов Н.В. Электродуговая наплавка металлоповерхностей колеблющимся электродом в среде защитного газа. / Спиридонов Н.В., Кудина А.В., Кураш В.В. // Наука и техника. Мн.: изд-во УО БНТУ, 2013г. № 4. – С. 3 – 8.

УДК 621.91.04

Данилов В.А., Данилов А.А.,

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕМ МНОГОГРАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ
ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ**

Белорусский национальный технический университет»

г. Минск, Беларусь

Полоцкий государственный университет

г. Новополоцк, Беларусь

Рассмотрены кинематический, геометрический и комбинированный способы обеспечения формы, количества, относительного расположения и конгруэнтности граней сложнопрофильных многогранных поверхностей при профилировании методами копирования, следа, обката и касания. Дана характеристика этих методов по управляемости формообразованием, показана роль кинематической и инструментальной подсистем обрабатывающей системы станка при реализации различных способов управления профилированием. Установлены рациональные пути управления профилированием многогранных поверхностей при продольном некруглом и полигональном точении, обработке инструментами с конструктивным перемещением режущих кромок для обеспечения точности и производительности формообразования.

Введение. Прогрессивным видом моментопередающих соединений в машинах, приборах, инструментальных системах и других устройствах являются профильные соединения, обладающие по сравнению с традиционными шлицевыми существенными эксплуатационными и технологическими преимуществами [1]. Одной из причин ограниченного их применения в отечественном машиностроении является нерешенность задач научно-технического и конструкторско-технологического обеспечения их производства [2]. К ним относится, в частности, задача управления формообразованием сложных (с неплоскими гранями) многогранных поверхностей для обеспечения требуемой точности и качества обработки.

Профилирование многогранных поверхностей деталей машин при формообразующей обработке резанием возможно методами копирования, следа, касания и обката, различающихся типом производящих элементов, формой их контакта и результатом взаимодействия с номинальной поверхностью, видом формообразования (полное или частичное) и другими существенными признаками [3]. С точки зрения реализации практическое значение имеет выявление и оценка методов управления формообразованием многогранных поверхностей для обеспечения требуемых параметров профиля, что важно при проектировании станочного оборудования и режущих инструментов, отладки процессов их обработки на станках иного технологического назначения.

Для обеспечения заданной точности формообразования реализуемая схема обработки должна обеспечивать возможность управления макро и микрогеометрией обработанной поверхности исходя из влияния на них параметров схем профилирования и резания. При решении подобных задач, в соответствии с основным положением теории формообразования поверхностей [4], рассматриваются только отклонения обработанной поверхности от номинальной, обусловленные схемами формообразования и резания без учета погрешностей, связанных с деформациями технологической системы и обрабатываемого материала. Исходя из этого положения рассматривается управление геометрическими параметрами многогранных поверхностей, определяющих геометрию, точность, собираемость и работоспособность профильного соединения. К ним относятся форма, количество, относительное расположение и конгруэнтность граней сопрягаемых поверхностей.

Управление формообразованием в общем случае возможно кинематическим, геометрическим (конструктивным) и комбинированным способами. Кинематический способ заключается в согласовании движений инструмента и заготовки и управлении параметрами исполнительного движения. Геометрический способ управления возможен за счет конструкции инструмента и его установки относительно заготовки. Комбинированный способ основан на сочетании кинематического и геометрического способов. Рассмотрим использование этих способов управления формообразованием при профилировании многогранных поверхностей указанными методами.

Анализ методов профилирования по управляемости формообразованием. *Метод копирования* (например, фасонными фрезами или абразивными инструментами) является геометрическим, т.к. требуемый профиль граней обеспечивается за счет геометрии режущей части инструмента [5], выполняющего функцию материального носителя профиля граней. Это обуславливает неуниверсальность метода копирования и необходимость в специальных режущих инструментах, применение которых экономически оправдано лишь для определенного типа производства.

Число граней при профилировании методом копирования может обеспечиваться кинематически за счет движения деления – периодического поворота заготовки вокруг ее оси перед обработкой каждой следующей грани или за счет конструкции инструмента. В первом случае точность взаимного расположения граней зависит от точности выполнения движения деления, т.е. от точности делительного устройства станка. Из-за увеличения в процессе эксплуатации станка погрешности делительного устройства снижается точность углового положения обработанных граней. Этот недостаток устраняется во втором случае, благодаря переносу функции кинематики формообразования на инструмент для одновременного формирования всех граней поверхности, что характерно, например, для протягивания внутренних многогранных поверхностей. В этом случае точность взаимного расположения и конгруэнтность граней определяется точностью изготовления более сложного режущего инструмента.

Кинематическое профилирование многогранной поверхности основано на периодическом изменении расстояния между производящими элементами инструмента и осью обрабатываемого изделия, которое может осуществляться несколькими взаимосвязанными элементарными движениями, сообщаемыми инструменту и заготовке. Исходя из требования простоты реализации, предпочтительны схемы обработки двухэлементарными движениями формообразования.

Метод следа применительно к профилированию многогранных поверхностей реализуется, например, продольным некруглым точением или полигональным точением (рис. , общими признаками которых являются выполнение производящего элемента в виде точки и полное формообразование профиля грани. Различаются эти методы структурой движения профилирования.

При обработке сложной многогранной поверхности продольным некруглым точением (рис. 1, а) количество формируемых граней обработанной поверхности и их форма зависят от соотношения скоростей вращательного B_1 и осциллирующего O_2 движений соответственно заготовки 1 и резца 2, образующих сложное движение профилирования $\Phi_v(B_1, O_2)$. Осциллирующее движение резца 2 создается, например, кривошипно-шатунным механизмом, кривошип 3 которого длиной l совершает вращательное движение B_3 , согласованное с

вращением заготовки B_1 так, что углу φ поворота последней соответствует угол ψ поворота кривошипа. Поэтому количество обработанных граней m составляет $m=n_2/n_1$, где n_2 — частота осциллирующего движения O_2 , дв. ход/мин; n_1 —частота вращения заготовки B_1 , мин⁻¹. При этом форма граней зависит от закона осциллирующего движения O_2 .

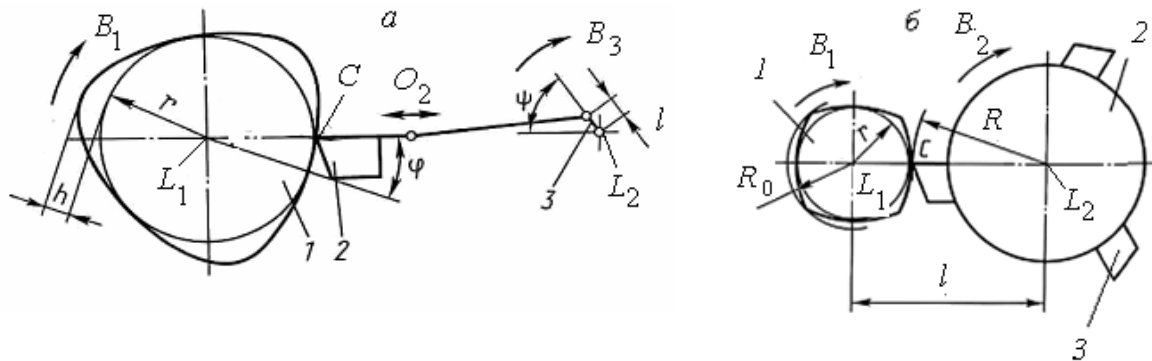


Рис. 1. – Схемы профилирования многогранных поверхностей методом следа при продольном некруглом (а) и полигональном (б) точении

При гармоническом законе, создаваемом при равномерном вращении B_3 кривошипа 3, на заготовке 1 формируется синусоидальный (синоидный) профиль, уравнение которого в полярной системе координат r и j имеет вид:

$$r = r + l(1 - \cos mj),$$

где r — радиус вписанной в профиль окружности.

Учитывая, что $r+l=R_c$, где R_c — средний радиус профиля, имеем

$$r = R_c - l \cos mj ;$$

$$r = R_c \left(1 - \frac{l}{R_c} \cos mj\right). \quad (1)$$

Профиль обработанной поверхности имеет m равномерно расположенных по окружности выступов, высота которых для полных (не срезанных по внешнему диаметру) профилей $h=2l$, где l — длина кривошипа 3.

При заданном значении среднего радиуса R_c профиля грани настройкой длины l кривошипа (и соответственно параметра l/R_c) осуществляется управление формой граней, которая в зависимости от значения этого параметра может быть выпуклой или выпукловогнутой. Требуемая точность настройки длины l кривошипа должна обеспечиваться конструкцией соответствующего устройства станка. Кривизна во всех точках профиля положительна, т.е. он не имеет вогнутых участков, если

$$l/R_c \leq 1/(m^2 + 1). \quad (2)$$

Учет зависимости (при проектировании профильных соединений позволяет исключить менее технологичные многогранные поверхности с выпукло-вогнутым профилем граней, накладывающим ограничения на радиус инструмента, который в этом случае для обеспечения условия проходимости не должен превышать радиус кривизны вогнутого участка профиля грани.

Технологические возможности схемы продольного некруглого точения по форме профилей многогранных поверхностей существенно расширяются при применении вместо кривошипно-шатунного копировального (кулачкового) механизма. Материальным носителем формируемого профиля в этом случае является копир, заменой которого при настройке станка обеспечивается управление формообразованием. Это технически просто реализуется, например, на универсальных токарно-затыловочных станках при установке вместо кулачка затылования кулачка профилирования соответствующей формы, что позволяет при подготовке производства профильных соединений исключить затраты на приобретение специального станка.

Возможно применение однопрофильного или многопрофильного кулачка. Для обеспечения конгруэнтности профилей всех граней и равномерности их расположения по окружности рекомендуется применять более простые в изготовлении однопрофильные кулачки, а требуемое количество граней получать настройкой отношения частот вращения кулачка и заготовки. Одновременно с конгруэнтностью граней поверхности при таком исполнении кулачка обеспечивается по сравнению с многопрофильным кулачком более высокая точность углового расположения граней.

При применении же многопрофильного кулачка, число рабочих участков у которого равно количеству граней, требования к форме профиля, конгруэнтности и относительному расположению граней, обеспечиваются кулачком, что усложняет его конструкцию и обуславливает жесткие требования к точности изготовления.

Существенным технологическим преимуществом рассмотренной схемы является возможность обработки на станке при одной настройке сопрягаемых наружных и внутренних многогранных поверхностей соединений типа вал-втулка, что важно при единичном и мелкосерийном производстве профильных соединений. Вместе с тем, этой схеме присуща относительно низкая производительность вследствие ограничений на значение частоты вращения заготовки из-за интенсивных динамических нагрузок в механизмах станка, возникающих из-за осциллирующего движения исполнительного органа, несущего режущий инструмент, с частотой, в m раз превышающей частоту вращения заготовки.

Указанный недостаток не присущ схеме полигонального точения сложных многогранных поверхностей, при которой их профилирование осуществляется движением $\Phi_v(B_1B_2)$, образованным двумя согласованными равномерными вращательными движениями B_1 и B_2 , которые могут быть по-разному распределены между инструментом и заготовкой. В схеме полигонального точения по рис. 1, б движение B_1 сообщается заготовке 1, а вращение B_2 – резцовой головке 2, оснащенной z резцами 3. Данная схема получила применение на специализированных станках для обработки многогранных поверхностей, например на станках-профиляторах фирмы WERA (Германия), на широкоуниверсальном станке модели BC50 производства ОАО «Вистан» и на современных многооперационных токарных станках с дополнительным инструментальным шпинделем для комплексной обработки деталей с круглыми и многогранными поверхностями.

Анализ схемы полигонального точения многогранных поверхностей показывает, что изменение переднего и заднего рабочих углов резца на ширине грани меньше при одинаково направленных вращательных движениях заготовки и резцовой головки, как показано на рис. 1, б. Траектория производящей точки С (вершины резца) в этом случае представляет циклоидальную кривую [6], форма которой зависит от геометрических параметров схемы обработки (l, r) и отношения i частот вращательных движений инструмента и заготовки в соответствии с уравнениями

$$\begin{cases} x = l \cos a - R \cos(i-1)a \\ y = l \sin a + R \sin(i-1)a \end{cases}, \quad (3)$$

где $l = R + r$ – расстояние между осями заготовки и резцовой головки;

R – радиус резцовой головки;

r – радиус вписанной в многоугольный профиль окружности;

a – текущее значение угла поворота заготовки;

$i = n_2/n_1$ – отношение частот вращения резцовой головки n_2 и заготовки n_1 .

Анализ уравнений (3) показывает, что управляемыми в схеме полигонального точения многогранных поверхностей являются параметры i и R . От значения i зависит вид формируемой линии: например, при $i=1$ она представляет собой окружность, при $i=2$ – эллипс и т.д. Возможность настройки параметра i в соответствии с требуемым профилем граней должна обеспечиваться наличием в станке между его исполнительными органами, несущими инструмент и заготовку, настраиваемой функциональной связи механического, электромеханического или мехатронного типов.

Радиус резцовой головки R влияет на кривизну образуемой линии. Например, в соответствии с уравнением окружности, формируемой согласно (3) при $i=1$,

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

ее радиус, равный l , составляет $l = R + r$, т.е. зависит от радиуса резцовой головки. Аналогично этот параметр влияет на форму эллипса, уравнение которого при $i=2$, в соответствии (3), имеет вид

$$\frac{x^2}{r^2} + \frac{y^2}{(r + 2R)^2} = 1 \quad (5)$$

Так как радиус резцовой головки изменяется при переточке резцов, то для сохранения точности формообразования требуется поднастройка с необходимой точностью их радиального положения, что должно обеспечиваться ее конструкцией.

Требуемое количество граней поверхности при полигональном точении обеспечивается конструктивно за счет установки в резцовой головке соответствующего числа z резцов. При заданных значениях параметров i и m и последовательном формировании граней оно определяется по зависимости

$$z = m/i. \quad (6)$$

Например, при $i=2$ для обработки четырехгранной поверхности резцовая головка должна иметь два резца, а шестигранной поверхности – три резца.

Точность углового расположения обработанных граней зависит от точности относительного углового расположения резцов, рассчитываемой при определении требований к точности изготовления резцовой головки.

Управление профилем граней поверхности, обработанной полигональным точением, возможно также за счет изменения относительного расположения осей вращательных движений заготовки 1 и резцовой головки 2 (рис. 2), так как в этом случае изменяется форма траектории производящих элементов в проекции на плоскость, перпендикулярную оси вращения заготовки. Эти оси могут быть параллельны, как рассмотрено выше, скрещиваться

под углом δ (рис. 2, а) или пересекаться под углом φ (рис. 2, б), что должно учитываться при проектировании компоновки станков для обработки многогранных изделий.

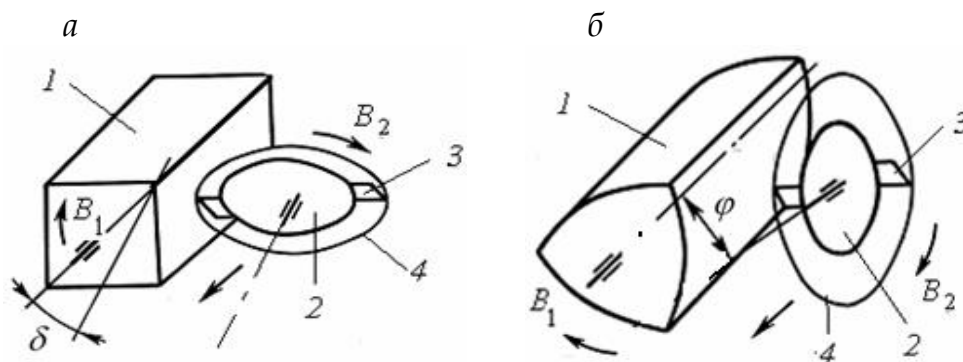


Рис. 2. – Модифицированные схемы вихревого точения многогранных поверхностей при скрещивающихся (а) и пересекающихся (б) осях заготовки и резцовой головки

Если указанные оси скрещиваются, то производящие элементы резцов 3 перемещаются по траектории 4, проекция которой на плоскость вращения заготовки представляет собой эллипс, длинная ось которого перпендикулярна оси вращения заготовки. В результате кривизна профиля граней уменьшается, что позволяет, например, при $i=2$ обрабатывать грани более близкие к плоским, чем при обработке с параллельными осями инструмента и заготовки, и благодаря этому с меньшей погрешностью обрабатывать четырех и шестигранные поверхности.

При сообщении же заготовке и инструменту вращательных движений вокруг пересекающихся осей (рис. 2, б) производящие элементы резцов 3 перемещаются по траектории 4, проекция которой на плоскость вращения заготовки представляет собой эллипс, короткая ось которого перпендикулярна оси вращения заготовки. В результате кривизна профиля граней увеличивается.

Таким образом, не усложняя кинематику формообразования поверхности, соответствующей настройкой углов пересечения или скрещивания осей вращения заготовки и резцовой головки возможно управление кривизной профиля граней, что должно быть обеспечено при конструировании станка.

Недостатками метода полигонального точения многогранных поверхностей является значительная прерывистость процесса резания из-за периодического взаимодействия резцов с заготовкой, а также невозможность обработки поверхностей с плавным переходом между гранями. Указанные недостатки не присущи схеме ротационного точения сложных многогранных поверхностей некруглым или круглым эксцентрично установленным резцом [7] (рис. 3, а), при которой грани профилируются методом обката. Второй вариант схемы ротационного точения проще в реализации.

В обоих случаях изменение расстояния между режущей кромкой резца 2 и осью $L1$ вращения заготовки 1, необходимое для формирования некруглого профиля, осуществляется не дополнительным движением, а геометрически за счет конструкции или установки резца, что упрощает схему обработки и кинематику станка.

Профиль поверхности, формируемый круглым резцом, установленным с эксцентриситетом e , является синусоидальным [7] и описывается уравнением (5), в котором параметр l принимается равным эксцентриситету установки резца. Из этого уравнения следует, что профиль поверхности не зависит от радиуса резца, поэтому его изменение при замене или переточке резца не влияет на точность формообразования профиля. Отмеченная особенность является преимуществом рассматриваемого метода профилирования по сравнению с полигональным точением многогранных поверхностей.

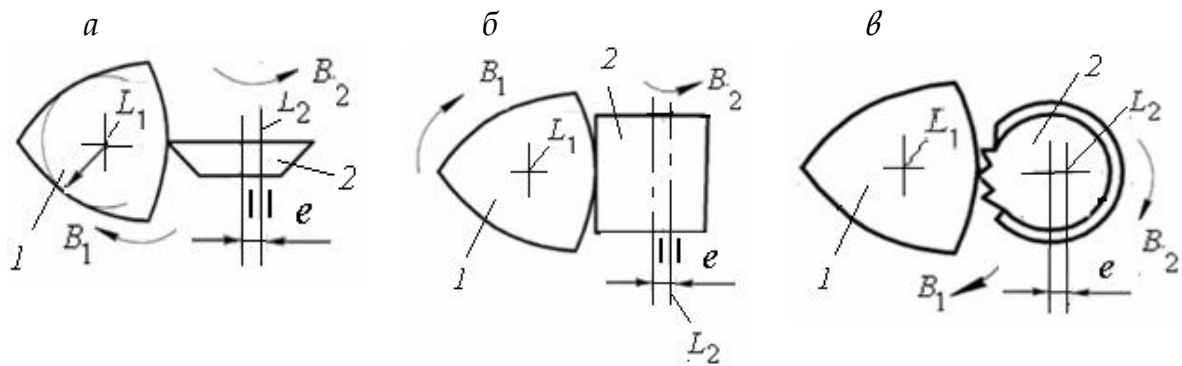


Рисунок 3. – Схемы профилирования многогранных поверхностей инструментами с конструктивным перемещением производящих элементов: эксцентрично установленными круглым резцом (а), цилиндрической фрезой (б), дисковой фрезой (в)

Параметром, определяющим геометрию профиля, является отношение эксцентриситета установки резца и среднего радиуса профиля, который в зависимости от настройки этого параметра может быть выпуклым или выпукло-вогнутым, что позволяет управлять формой граней.

Количество граней поверхности, формируемой при ротационном точении, равно отношению частот вращения резца и заготовки, обеспечивается соответствующей функциональной связью формообразующей системы, согласующей вращательные движения резца и заготовки, и настройкой станка. Точность взаимного расположения граней определяется кинематической точностью цепи станка, связывающей вращение резца и заготовки, что обуславливает необходимость выбора (проектирования) станка соответствующего класса точности.

Методом обката грани профилируются также при обработке многогранных поверхностей эксцентрично установленной цилиндрической фрезой 2 (рис. 3, б) при сообщении ей вращательного движения B_2 , согласованного с вращением B_1 заготовки 1. Профиль грани в этом случае формируется как линия, огибающая множество положений прямолинейной образующей цилиндрической инструментальной поверхности, и зависит от эксцентриситета e установки фрезы. Так как производящим элементом является прямая линия, то профиль грани не зависит от диаметра инструмента, что позволяет последовательно обрабатывать многогранную поверхность различными инструментами с цилиндрической инструментальной поверхностью для формирования на ней требуемой топологии [8].

Методом касания осуществляется профилирование граней при обработке многогранной поверхности эксцентрично установленной дисковой фрезой 2 (рис. 3, в), В этом случае каждая грань поверхности формируется как касательная к множеству вспомогательных линий – траекторий вершин режущих зубьев фрезы в движении относительно заготовки 1. По сравнению с обработкой цилиндрической фрезой (см. рис. 3, б) рассматриваемая схема позволяет обрабатывать не только открытые, но также полуоткрытые и закрытые многогранные поверхности.

Требуемое число граней поверхности задается настройкой отношения частот вращения фрезы и заготовки, а их профиль – настройкой эксцентриситета e установки фрезы, что позволяет одним инструментом обрабатывать поверхности с различным количеством граней и их профилем. Это обеспечивает универсальность схемы обработки по сравнению с аналогичной схемой обработки дисковой фрезой, инструментальная поверхность которой образована несколькими одинаковыми участками по количеству граней поверхности [9], что усложняет конструкцию инструмента и затрудняет получение конгруэнтных граней у обработанной поверхности из-за неидентичности отдельных участков инструментальной поверхности фрезы.

Характерным признаком схем обработки, представленных на рис. 3, является совмещение движений профилирования и резания в одно двухэлементарное исполнительное движение

Фvs(B1B, благодаря чему одновременно обеспечивается управление несколькими параметрами формируемого профиля и достигается возможность реализации этих схем обработки на одном с простой кинематикой станке, например, на станке модели BC50 или на современных токарно-фрезерных многооперационных станках с ЧПУ.

Заключение

При профилировании сложнопрофильных многогранных поверхностей методами копирования, следа, обката и касания их основные параметры – форма, количество, относительное расположение и конгруэнтность граней могут быть обеспечены геометрическим, кинематическим и комбинированным способами при соответствующем исполнении формообразующей системы станка и режущего инструмента. Возможность их реализации с требуемой точностью должна обеспечиваться при проектировании кинематики и компоновки станков и конструировании режущих инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимченко, А.И. Профильные бесшпоночные соединения с равноосным контуром, их достоинства, недостатки, области применения и этапы внедрения / А.И. Тимченко // Вестник машиностроения. — 1990. — № 11. С. 43-50.
2. Данилов, В.А. Научно-техническое обеспечение применения профильных моментопередающих соединений в горных машинах и оборудовании / В.А. Данилов, Прушак В.Я. // Горная механика: международный научно-технический журнал. – 2009. – № 2. – С. – 5-13.
3. Данилов, В.А. Анализ и реализация методов формообразования некруглых поверхностей профильных моментопередающих соединений / В.А. Данилов, А.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – Промышленность. Прикладные науки. – 2014. – № 11. – С. 8-17.
4. Радзевич, С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории / С.П. Радзевич. – Киев: Растан, 2001. – 592 с.
5. Шитников, А.С. Проектирование сборных фасонных фрез для обработки наружного РК-профиля: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.03.01 / А. Н. Шитиков; [Курский государственный технический университет]. – Тула, 2007. – 20 с.
6. Карелин Н.М. Бескопирная обработка цилиндрических деталей / Н.М. Карелин. – М.: Машиностроение, 1966. – 187 с.
7. Данилов В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием. – Мн.: Наука и техника, 1995. – 264 с.
8. Данилов, В.А. Управление топологией некруглых поверхностей, обработанных по схемам неполного формообразования / В.А. Данилов, А.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 4. – С. 2-9.
9. Максименко, Ю.А. Создание метода проектирования дисковых фрез с конструктивным исполнением радиальной подачи для обработки валов с РК и К- профилем / Ю.А. Максименко. Автореферат дис. ...к.т.н., Курск: Юго-западный государственный университет, 2014. – 20 с.