

УДК 621.91.04

АНАЛИЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НЕКРУГЛЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОФИЛЬНЫХ МОМЕНТОПЕРЕДАЮЩИХ СОЕДИНЕНИЙ

*д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ, А.А. ДАНИЛОВ
(Полоцкий государственный университет)*

Дана характеристика методов формообразования производящих линий некруглых поверхностей по существенным признакам, определяющим форму инструментальных поверхностей и производящих элементов инструмента, их взаимодействие с номинальной поверхностью изделия при полном и частичном формообразовании. Предложен метод структурного описания схем профилирования в виде определителей их существенных признаков. Рассмотрены особенности схем профилирования некруглых поверхностей базовыми и комбинированными методами и примеры их реализации при механической обработке профильных деталей. Приведены рекомендации по выбору схем профилирования некруглых поверхностей при проектировании кинематики металлорежущих станков и построению их кинематической структуры с электромеханическими и мехатронными связями.

Введение. Цилиндрические и конические некруглые поверхности (НП) применяются в конструкциях деталей профильных моментопередающих соединений (ПМС). Деталь ПМС может быть ограничена одной или множеством конгруэнтных поверхностей, образующих некруглую (многогранную) моментопередающую поверхность с периодически повторяющимся профилем. Форма поперечного сечения НП зависит от количества граней (выступов), ограниченных дугами окружностей, синусоидальными и циклоидальными кривыми, линиями равной ширины и другими линиями. В ПМС обычно применяются поверхности с выпуклыми гранями [1].

Благодаря эксплуатационным и технологическим преимуществам ПМС эффективно заменяют традиционные шлицевые и шпоночные соединения для передачи крутящего момента. К эксплуатационным преимуществам ПМС относятся:

1) более высокая усталостная прочность профильных валов вследствие отсутствия концентраторов напряжений, присущих шлицевым валам, что позволяет при тех же габаритных размерах повысить прочность и долговечность ПМС. Это преимущество можно эффективно использовать при модернизации машин и механизмов, включающей замену шлицевого или шпоночного соединения профильным;

2) более высокая точность соединения вследствие того, что некоторые профили обладают свойством самоцентрирования под нагрузкой, обеспечивающим соосность сопряженных деталей при работе механизма. Благодаря этому при той же точности соединения точность его деталей может быть уменьшена на 1–2 квалитета, что снижает стоимость изделия;

3) меньше износ и уровень шума в механизме, так как под нагрузкой ПМС с зазором переходит в соединение с натягом.

Технологические преимущества ПМС обусловлены возможностью обрабатывать некруглые валы теми же высокопроизводительными методами, что и круглые (точением, шлифованием, поверхностно-пластическим деформированием и др.) Поэтому стоимость изготовления некруглых валов существенно меньше, чем шлицевых.

В зарубежном машиностроении ПМС применяются в металлорежущих станках, кузнечно-прессовом оборудовании, инструментальных системах металлорежущих станков, строительных, дорожных и сельскохозяйственных машинах, промышленных роботах, приборах и т.д. Примером эффективного применения профильных соединений в технологической оснастке служит система модульного инструмента «Coromant-Capto» фирмы Sandvik Coromant.

Тенденция к расширению использования ПМС в машиностроении обусловлена отмеченными выше их преимуществами. Однако в отечественном машиностроении ПМС применяются относительно редко, что связано с отсутствием соответствующего технологического оборудования и отработанных технологий изготовления деталей ПМС. В этой связи актуально решение теоретических и конструкторско-технологических задач, связанных с созданием станков и необходимого инструментального оснащения, методов и средств контроля профильных деталей. Одной из таких задач является выбор или синтез рациональных схем формообразования НП при функциональном проектировании и модернизации станочного оборудования.

Характеристика методов формообразования производящих линий. Согласно общим положениям теории формообразования поверхностей формирование НП включает ее профилирование и образование по длине, т.е. генерацию в процессе обработки производящих линий – образующей и направляющей. Каждая из производящих линий может быть образована базовыми методами копирования *Kл*, следа *Сл*, каса-

ния Kc , обката $Об$ [2] и комбинированными методами, например $(Kn+Cl)$, $(Об+Cl)$ и др. [3], различающимися материальными носителями ее формы, универсальностью и сложностью реализации. Комбинированные методы характеризуются соответствующей совокупностью существенных признаков базовых методов и служат основой для синтеза комбинированных (совмещенных) методов обработки.

Каждый из методов формообразования характеризуются определенной совокупностью существенных признаков, представленных в таблице:

- форма производящих элементов инструмента (ПЭ) – линия L , точка T или множество точек $\{T_i\}$ и инструментальной поверхности (ИП), которой может быть плоскость Pl , цилиндрическая круглая Ck или некруглая Cn , коническая K поверхности, винтовая поверхность Vm , фасонная поверхность вращения ΦVr и др.;
- форма вспомогательных производящих линии (ВПЛ), которыми образуется линия методами касания и обката – окружность Ok , прямая Pr и кривая Kp линии;
- форма мгновенного контакта ПЭ с номинальной поверхностью – линия L или точка T ;
- характер взаимодействия ПЭ с номинальной поверхностью во времени (единовременное E , непрерывное H , прерывистое $П$) и результат взаимодействия в виде образованных линий и точек;
- вид формообразования ПЛ (полное, частичное).

Характеристика методов профилирования поверхностей

Существенные признаки	Методы профилирования производящих линий ПЛ			
	копирование Kn	следа Cl	касания Kc	обката $Об$
Форма производящих элементов ПЭ инструмента	Линия L	Точка T Множество точек $\{T_i\}$	Множество точек $\{T_i\}$	Линия L
Инструментальная поверхность ИП	- Линейчатая незамкнутая поверхность L_{nn} - Поверхность вращения: - цилиндрическая C_{cp} - коническая K_{cp} - фасонная ΦVr			Плоскость Pl Цилиндрическая C Коническая K Винтовая Vm Фасонная вращения Φ_{cp}
Вспомогательные производящие линии ВПЛ			Окружность Ok Прямая Pr Кривая Kp	Прямая Pr Кривая Kp
Форма мгновенного контакта ПЭ с ПЛ номинальной ИП	Линия L	Точка T	Точка T	Точка T
Характер взаимодействия ПЭ с номинальной ИП во времени	Единовременное E	Непрерывное H	Прерывистое $П$	$H - (Обн)$ $П - (Обн)$
Результат взаимодействия ПЭ с ПЛ номинальной ИП	Линия L	Линия L	Множество точек $\{T_i\}$	Линия $L - Обн$ Множество точек $\{T_i\} - Обн$
Вид формообразования ПЛ	Полное	Полное	Частичное	Полное – $Обн$ Частичное – $Обн$

Полное формообразование при определенных условиях обеспечивается всеми указанными методами за исключением метода касания, а также комбинированными (совмещенными) методами.

Во всех схемах формообразования имеет место контакт ПЭ с ИП, который характеризуется пространственными и временными параметрами. Контакт ПЭ, задаваемых множеством $M_{П}$, при формировании линии может быть линейным ($M_H \cap M_{П} = L$) или точечным ($M_H \cap M_{П} = T$), а во времени осуществляться единовременно (мгновенно) E , периодически (дискретно) $П$ и непрерывно H [4]. При методе обката взаимодействие ПЭ с номинальной ИП может осуществляться как непрерывно H ($Обн$), так и прерывисто $П$ ($Обн$).

Пространственная характеристика контакта (форма) определяется геометрическими параметрами производящих элементов и ИП и их взаимным расположением, а временная – относительным движением. В частности, непрерывный контакт при поступательном движении осуществляется со скольжением (Hc), а при относительном движении качения – путем обката контактирующих элементов (Ho). Качение может

осуществляться одновременно со скольжением (*Нсо*), что имеет место, например, при ротационном точении и ротационном выглаживании. Аналогично возможен прерывистый контакт со скольжением (*Пе*), обкатом (*Поб*) и их сочетанием (*Псоб*) или прерывистый мгновенный контакт (*МК*).

Результатом взаимодействия производящего элемента с формируемой линией может быть множество принадлежащих ей точек $\{Ti\}$ или линий $\{Li\}$ (при частичном формообразовании) или линия, конгруэнтная заданной ПЛ (при полном формообразовании). Вид формообразования (полное или частичное) зависит от вида отображения ПЭ на номинальную поверхность изделия, формы контакта между ними и характера их взаимодействия во времени. Полное формообразование линии возможно при отображении ПЭ на все точки формируемой линии.

Рассмотрим базовые методы формирования производящих линий по присущим им существенным признакам.

Профилирование НП методом копирования. Метод копирования относится к геометрическим методам формообразования производящих линий, так как материальным носителем формы образуемой линии является инструмент, обеспечивающий выполнение функции формообразования без формообразующего движения.

Характеристический образ инструмента может быть конгруэнтен либо всему профилю поверхности, либо одному из его участков. Поэтому ПЭ при методе копирования является линия, определяющая форму или режущей кромки (при обработке лезвийным инструментом), или образующей инструментальной поверхности (при обработке вращающимся инструментом). Производящий элемент в виде режущей кромки может принадлежать линейчатой незамкнутой инструментальной поверхности *Ллт*, например, при обработке НП призматическим фасонным резцом, или поверхности вращения (цилиндрической *ЦВр*, конической *КВр*, фасонной *ФВр*) при фрезеровании НП.

Благодаря единовременному взаимодействию ПЭ с номинальной поверхностью метод копирования обеспечивает полное формообразование ПЛ и поэтому характеризуется максимальной производительностью и упорядоченностью процесса формообразования. Однако одновременное образование всего профиля НП связано с применением специального инструмента, что обуславливает неуниверсальность данного метода и практически целесообразно в основном при обработке некруглых отверстий протяжками и прошивками.

Некруглые валы ПМС ограничены несколькими равномерно расположенными по окружности конгруэнтными участками, обработка которых при профилировании методом копирования осуществляется обычно последовательно специальными фасонными инструментами [5] при периодическом движении деления, что отрицательно влияет на производительность и точность формообразования и ограничивает область рационального применения этого метода.

Универсальность инструмента и высокая точность формирования производящих линий обеспечиваются методами кинематического профилирования.

Профилирование НП методом следа. На рисунке 1 представлены установленные по литературным и патентным источникам схемы профилирования НП методом следа. Формирование всех конгруэнтных участков профиля НП возможно одним или несколькими ПЭ. Производящий элемент в виде точки *T* (вершины резца) имеет однолезвийный инструмент (рис. 1, схемы 1–4), а в виде множества точек $\{Ti\}$ – многолезвийный инструмент, например, резцовая головка внешнего касания (рис. 1, схемы 5, 9), охватывающая резцовая головка (рис. 1, схема 6) или инструментальная цепь (рис. 1, схема 7) с равномерно расположенными по ее периметру режущими зубьями.

Функцию формообразования во всех схемах выполняет кинематика станка, что обеспечивает универсальность метода следа по форме образуемых линий, определяемой траекторией движения формообразования. Последняя зависит от вида и соотношения скоростей элементарных движений (вращательных *B*, поступательных *П*, качательных (возвратно-вращательных) *К*, осциллирующих (возвратно-поступательных) *О*, образующих движение формообразования. Как показано в таблице, контакт ПЭ с номинальной поверхностью в данном случае осуществляется в точке *T*, формирующей ПЛ поверхности. Единовременный характер взаимодействия ПЭ с НП обеспечивает при непрерывном перемещении ПЭ полное формообразование линии.

В формализованном виде схема профилирования описывается структурной формулой, состоящей из определителей метода профилирования (*Сл*), формы производящего элемента (точка *T* или множество точек $\{Ti\}$) и движения профилирования Φ , задающего его структуру, т.е. количество и вид взаимосвязанных элементарных движений. На рисунке 1 представлены применяемые и возможные схемы профилирования, которые описываются соответствующими структурными формулами:

$$1 - [Сл-T-\Phi(O_1O_2)]; 2 - [Сл-T-\Phi(O_1K_2)]; 3 - [Сл-T-\Phi(K_1K_2)]; 4 - [Сл-T-\Phi(B_1O_2)]; 5 - [Сл-\{Ti\}-\Phi(B_1B_2)];$$

$$6 - [Сл-\{Ti\}-\Phi(B_1B_2)]; 7 - [Сл-\{Ti\}-\Phi(B_1П_2)]; 8 - [Сл-\{Ti\}-\Phi(B_1B_2)]; 9 - [Сл-\{Ti\}-\Phi(B_1B_2O_3)].$$

Определитель схемы профилирования НП входит в качестве компонента в структурную формулу соответствующей кинематической схемы ее обработки [3].

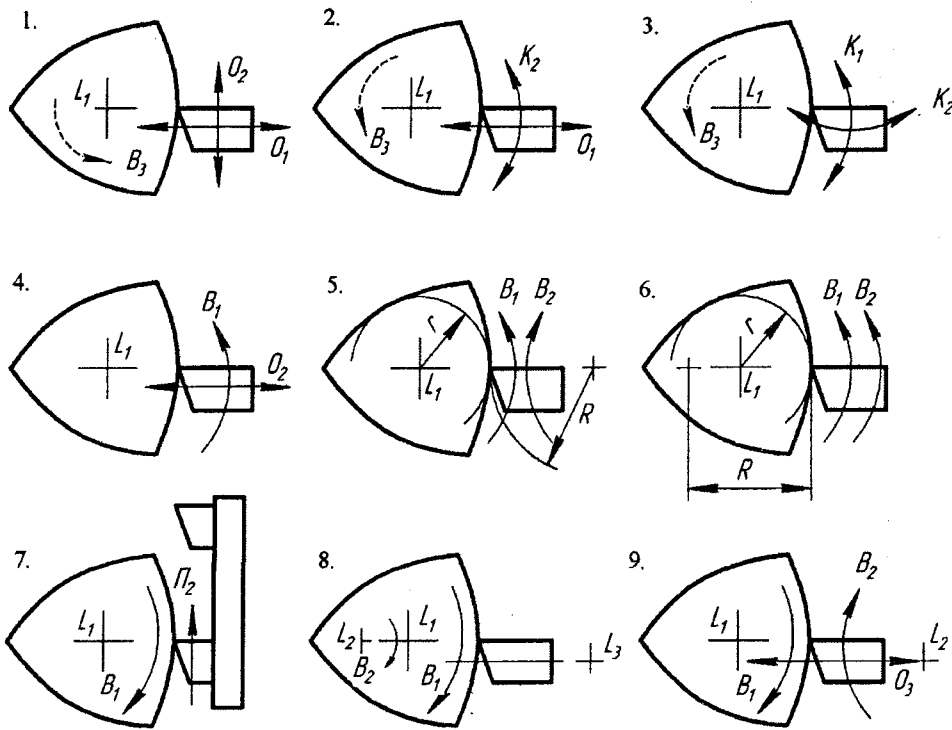


Рис. 1. Схемы профилирования некруглых поверхностей методом следа

Недостатком схем профилирования, основанных на переменных по направлению движениях (рис. 1, схемы 1–4), являются знакопеременные инерционные нагрузки в осуществляющих их механизмах, что обуславливает низкую производительность обработки и отрицательно влияет на долговечность станка. Кроме того, для последовательного формирования конгруэнтных участков профиля требуется движение деления – периодический поворот заготовки B_3 на угол между соседними участками профиля или сообщение инструменту движения ориентации, что усложняет конструкцию станка и отрицательно влияет на точность обработки. Схема 1 применяется для профилирования НП при электроэрозионной обработке некруглых отверстий проволочным электродом. Она может найти применение также при их обработке энергетическим лучом (лазерная и гидроабразивная резка).

В схеме 4 процесс деления осуществляется непрерывно движением B_1 , входящим в движение профилирования $\Phi_v(B_1O_2)$, что позволяет упростить кинематику формообразования. Несмотря на относительно низкую производительность, ввиду простоты реализации и универсальности по форме обрабатываемых поверхностей, схема 4 достаточно широко применяется в специальных и модернизированных станках для обработки как наружных, так и внутренних НП.

Преимуществом схем 5–8 является отсутствие реверсивных движений, что важно для обеспечения производительной обработки. Схемы 5 и 6 получили наибольшее применение при обработке некруглых валов соответственно по встречной и попутной схемам резания резцовыми головками внешнего и внутреннего касания. Кроме конструкции инструмента они различаются установкой расстояния между осями L_1 и L_2 заготовки и инструмента. Если при обработке по схеме 5 оно равно сумме радиуса R резцовой головки и радиуса r вписанной в профиль НП окружности, то при схеме 6 – разности их значений. Эти схемы реализуются на станке модели BC50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан» [6], а схема 5 – на станке-профилиторе фирмы WERA (ФРГ).

На схеме 8 основано планетарное точение некруглых валов на специальных станках, при котором заготовка совершает согласованные вращательные движения B_1 и B_2 вокруг параллельных осей L_1 и L_2 , т.е. планетарное движение [3]. Обработка НП по схеме 9 осуществляется вращающейся головкой внешнего касания, резцам которой сообщается в радиальном направлении дополнительное движение O_3 , позволяющее управлять формой профиля НП.

Недостатком большинства схем профилирования НП методом следа является изменение в широком диапазоне рабочих углов режущей части инструмента, что ограничивает область применения этого метода по форме обрабатываемых НП.

Профилирование НП методом касания. При профилировании методом касания линия формируется как касательная к множеству ВПЛ – траекторий точечных ПЭ, обычно в виде окружностей O_k (при обработке вращающимися инструментами), прямых Pr (при обработке поступательно перемещающимися инструментами) и кривых Kp линий переменной кривизны, например, циклоидальных. Некоторые из схем профилирования методом касания представлены на рисунке 2.

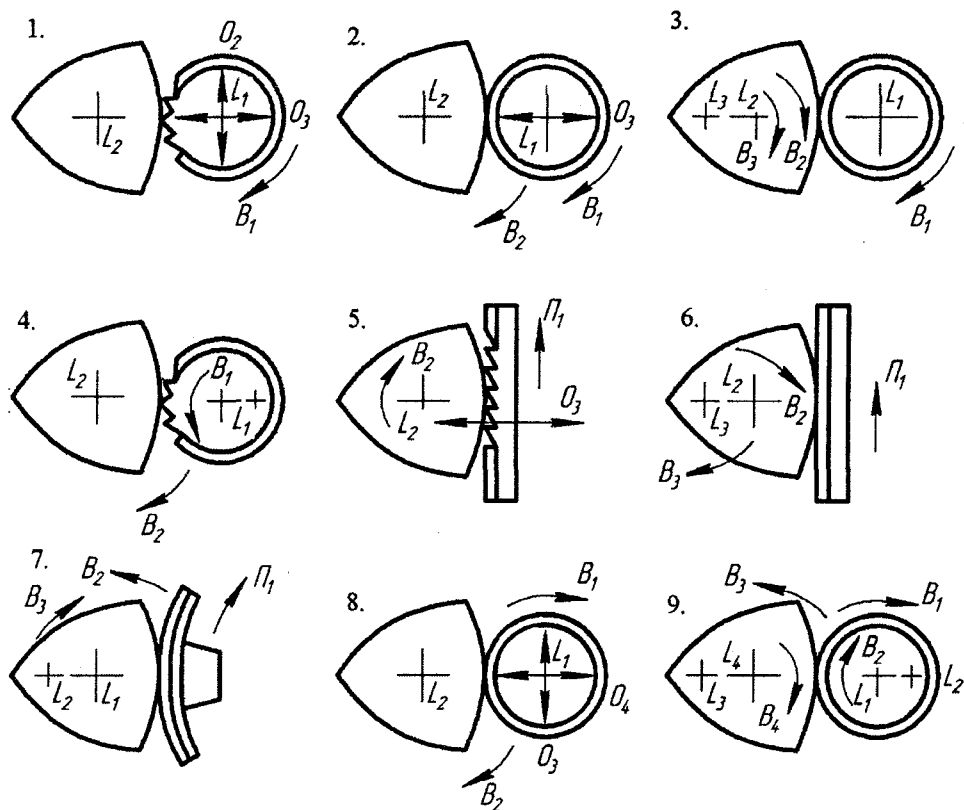


Рис. 2. Схемы профилирования некруглых поверхностей методом касания

Вспомогательные производящие линии расположены с определенным шагом вдоль принадлежащей номинальной поверхности формируемой линии, поэтому метод касания обеспечивает частичное ее формообразование в виде множества отдельных точек. Точность формообразования повышается при увеличении числа ВПЛ, что характерно при обработке абразивным инструментом, режущие зерна которого образуют множество хаотично расположенных ВПЛ.

Вспомогательная производящая линия представляет траекторию движения формообразования, осуществляемого со скоростью резания (движения Φ_v) точечным производящим элементом, а ее перемещение вдоль формируемой линии обеспечивается сложным исполнительным движением со скоростью подачи, т.е. движением Φ_s . Таким образом, схемы профилирования методом касания различаются формой ВПЛ и структурой исполнительных движений Φ_v и Φ_s .

В соответствии с таблицей структурная формула схемы профилирования методом касания в общем случае должна включать определители метода профилирования (Kc), формы ВПЛ (O_k , Pr , Kp) и формообразующих движений Φ_v и Φ_s . Исходя из этого изображенные на рисунке 2 схемы профилирования описываются следующими структурными формулами, характеризующими форму ВПЛ, метод и кинематику формообразования:

$$1 - [Kc-O_k-\Phi_v(B_1), \Phi_s(O_2O_3)]; 2 - [Kc-O_k-\Phi_v(B_1), \Phi_s(B_2O_3)]; 3 - [Kc-O_k-\Phi_v(B_1), \Phi_s(B_2B_3)];$$

$$4 - [Kc-O_k-\Phi_{vs}(B_1B_2)]; 5 - [Kc-Pr-\Phi_v(\Pi_1), \Phi_s(B_2O_3)]; 6 - [Kc-Pr-\Phi_v(\Pi_1), \Phi_s(B_2B_3)];$$

$$7 - [Kc-Kp-\Phi_v(\Pi_1), \Phi_s(B_2B_3)]; 8 - [Kc-O_k-\Phi_v(B_1), \Phi_s(B_2O_3O_4)]; 9 - [Kc-O_k-\Phi_v(B_1), \Phi_s(B_2B_3B_4)].$$

Схема 1 рекомендуется для обработки коротких наружных и внутренних НП на фрезерных станках с ЧПУ. Схема 2 получила широкое применение для обработки НП на шлифовальных станках с копировальной или числовой системой управления.

Совмещение движений Φ_v и Φ_s позволяет существенно упростить кинематику формообразования и, соответственно, станка, что важно при создании станков для обработки НП на базе станков другого технологического назначения. Этот принцип реализован в схеме 4, при которой профилирование НП осуществляется эксцентрично установленной круглой или некруглой дисковой фрезой [3] сложным совмещенным движением $\Phi_{vs}(B_1B_2)$. Схема 4 следует из схемы 2 при перенесении функции осциллирующего движения O_3 на инструмент за счет, например, вращения B_1 дисковой фрезы вокруг оси L_1 , не совпадающей с ее геометрической осью, или применения некруглой фрезы. В обоих случаях перемещение ПЭ в радиальном направлении обеспечивается не кинематически, а геометрически, т.е. профилирование осуществляется за счет «конструктивной подачи» режущих и формообразующих элементов инструмента. Данная схема профилирования некруглых валов реализована в станке модели BC50 [6].

В схемах 5 и 6 профиль формируется как касательная к множеству прямых ВПЛ в их относительном движении, образованных точечными ПЭ инструментальной цепи (схема 5) или абразивной ленты (схема 6). Достоинство этих схем – независимость геометрии формируемого профиля от параметров инструмента, что не характерно для других, представленных на рисунке 2 схем профилирования НП.

Схема 8 применяется на специальном шлифовальном станке AFD 330-1500 фирмы FORTUNA (ФРГ) [7] для обработки некруглых валов, у которого в процессе обработки шлифовальная бабка совершает одновременно согласованные с вращением B_2 заготовки возвратно-поступательные движения O_3 и O_4 в горизонтальной и вертикальной поверхностях.

Недостатком всех схем профилирования методом касания является возможность только частичного формообразования с отклонениями образованной линии от номинальной в виде гребней. Уменьшение их высоты для обеспечения требуемой точности обработки достигается совмещением схем частичного формообразования путем многократного ее профилирования за время одного хода множеством семейств ВПЛ, смещенных относительно друг друга, что обеспечивается кинематическим или геометрическим методами. В результате число ВПЛ, формирующих ПЛ поверхности, возрастает в P раз, благодаря чему огранка профиля уменьшается в P^2 раз по сравнению с однократным профилированием. Технически просто это обеспечивается при применении дисковых фрез с винтовой формой режущих лезвий.

Профилирование НП методом обката. Производящая линия формируется методом обката как огибающая множества ВПЛ – режущих лезвий или образующих исходной ИП (рис. 3).

Как показано в таблице, к существенным признакам этого метода относятся:

- форма ВПЛ (характеристический образ инструмента) – прямая Pr или кривая Kp , которая может быть выпуклой или вогнутой;
- вид ИП, которой принадлежат ВПЛ – плоскость Pl , цилиндрическая C или коническая K круглая или некруглая, замкнутая или не замкнутая; винтовая Vm , фасонная поверхность вращения ΦVr , комбинированная, как сочетание указанных типов поверхностей;
- структура движения обкатки в зависимости от количества и вида составляющих его элементарных движений.

Указанные существенные признаки в виде соответствующих определителей отражаются в структурных формулах схем профилирования.

Некоторые из схем профилирования НП, различающиеся указанными существенными признаками, приведены на рисунке 3. Соответствующие им структурные формулы имеют вид:

$$1 - [Об-Pr(Pl)-\Phi(B_1B_2)]; 2 - [Об-Pr(Pl)-\Phi(B_1O_2)]; 3 - [Об-Kp(C)-\Phi(B_1P_2)]; 4 - [Об-Kp(Cn)-\Phi(B_1P_2)];$$

$$5 - [Об-Kp(Cn)-\Phi(B_1B_2)]; 6 - [Об-Vm(Ck)-\Phi(B_1B_2)]; 7 - [Об-Pr(Ck)-\Phi(B_2O_3)]; 8 - [Об-Pr(Ck)-\Phi(B_2B_3)];$$

$$9 - [Об-Pr(Cn)-\Phi(B_1B_2)]; 10 - [Об-Kp(\Phi Vr)-\Phi(B_2P_3)];$$

$$11 - [Об-Kp(Vm)-\Phi(B_1B_2)]; 12 - [Об-(Kp(Cn) + Pr(Cn)) - (B_1B_2)].$$

Профилирование методом обката в зависимости от характера выполнения движения обката во времени (непрерывно $H - (Обн)$ или прерывисто $П - (Обп)$) обеспечивает соответственно полное или частичное формообразование производящей линии, так как в первом случае результатом взаимодействия ПЭ с ПЛ номинальной поверхности является линия, а во втором – множество точек (см. таблицу). При частичном формообразовании сформированная линия отличается от номинальной, что выражается в образовании гребней, для уменьшения высоты которых вспомогательные линии должны быть прямыми или вогнутыми.

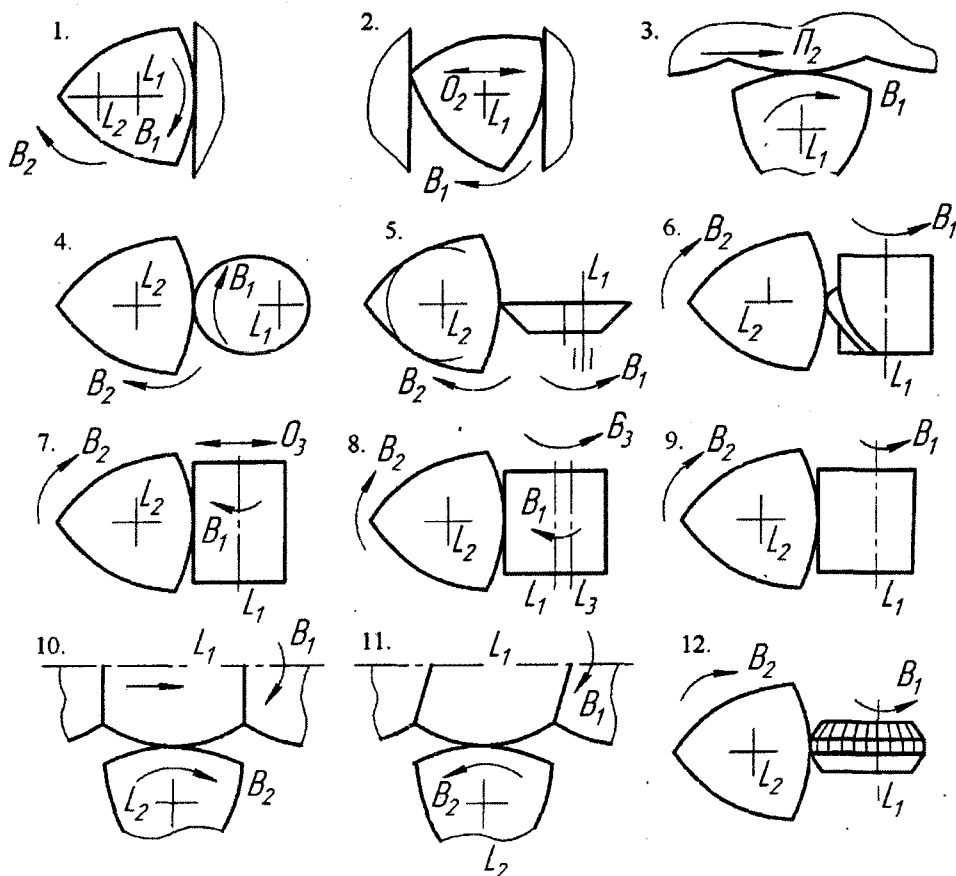


Рис. 3. Схемы профилирования некруглых поверхностей методом обката

Профилирование НП по схемам 1 и 2 осуществляется производящими элементами, расположенными на плоской ИП. Профилирование по схеме 2 одновременно двумя параллельно расположенными ИП эффективно для изделий с РК-профилем, благодаря особенностям его геометрии – постоянству расстояния между двумя любыми параллельными к нему касательными.

Некруглый профиль по схеме 3 формируется расположенным на незамкнутой цилиндрической ИП криволинейным ПЭ при воспроизведении движением $\Phi(B_1\Pi_2)$ между инструментом и заготовкой реечного зацепления. Данная схема реализуется сложными по конструкции станком и инструментом.

Заслуживают внимания схемы 4–6, характерным для которых является профилирование с использованием конструктивной подачи инструмента, что упрощает их реализацию. В схемах 4 и 5 это достигается за счет эксцентричной установки круглого резца или применения некруглого резца, а в схеме 6 благодаря винтовой форме режущей кромки, обеспечивающей перемещение точки контакта в тангенциальном направлении и изменение расстояния от нее до оси L_2 вращения заготовки.

Профилирование НП по схемам 7 и 8 осуществляется цилиндрическим или коническим инструментом за счет сложного движения соответственно $\Phi(B_2O_3)$ и $\Phi(B_2B_3)$.

Схема 9 образуется из схемы 7 при перенесении функции кинематики формообразования на инструмент, что практически реализуется при эксцентричной установке цилиндрической фрезы относительно оси L_1 ее вращения. В этом случае исключается осциллирующее движение O_3 , функция которого (перемещение режущей кромки в радиальном направлении в соответствии с формируемым профилем) обеспечивается вследствие переменного радиуса исходной инструментальной поверхности относительно оси вращения инструмента, т.е. за счет «конструктивной подачи». Схема 9 реализуется на станках с двумя кинематически связанными шпинделями, несущими инструмент и заготовку, например, на зубошлицефрезерных станках при возможности настройки требуемого отношения их угловых скоростей. Благодаря прямолинейной форме ПЭ в схемах 7–9 исключается влияние диаметра инструмента на точность профилирования, что является их существенным преимуществом.

В отличие от рассмотренных схем, профилирование заданной НП кривой линией, принадлежащей цилиндрической незамкнутой ИП (схема 3), фасонной поверхности вращения (схема 10) или винтовой

поверхности (схема 11), возможно специальным инструментом (соответственно рейкой, фасонной и червячной фрезами), предназначенным для обработки конкретной НП. Это обуславливает неуниверсальность этих схем, усложняет их реализацию и ограничивает область рационального применения.

Схема 12 основана на совмещении процессов частичного и полного формообразования ПЛ, осуществляемых соответственно многолезвийным инструментом и ротационным резцом с непрерывной режущей кромкой. В процессе обработки по совмещенной схеме съём большей части металла осуществляется многолезвийным инструментом, а окончательная обработка – ротационным резцом. Совмещение методов формообразования ПЛ позволяет повысить эффективность процессов обработки благодаря объединению преимуществ базовых методов, в данном случае обеспечение надёжного стружкодробления независимо от вязкости обрабатываемого материала и высокой точности профилирования.

Рассмотренные выше методы профилирования НП обеспечивают формирование образующей поверхности. Аналогично базовыми или комбинированными методам формируется ее направляющая. Сочетанием методов формирования обеих производящих линий при условии, что темп генерации образующей выше, чем направляющей [2; 4], определяется метод формообразования НП.

Реализация схем обработки НП при функциональном проектировании станка. Реализация схем обработки на этапе функционального проектирования станка связана с синтезом рациональной кинематики формообразования, кинематической схемы обработки и его структурной схемы. Решение этих задач основано на универсальных принципах [8], из которых применительно к НП важны следующие:

- перенесение функции кинематики формообразования на инструмент за счет его конструктивной подачи, что позволяет упростить кинематическую схему обработки и соответственно кинематику станка;
- синтез структуры исполнительных движений, обеспечивающей благоприятные условия резания и работы механизмов станка за счет исключения реверсивных движений исполнительных органов, замены возвратно-поступательных движений вращательными;
- совмещение исполнительных движений формообразования и деления дня упрощения кинематической схемы обработки и повышения производительности;
- задание рационального сочетания скоростей и направлений элементарных движений;
- рациональное распределение элементарных движений между инструментом и заготовкой для повышения универсальности схемы обработки.

Рациональными по возможности реализации являются схемы профилирования, которые осуществляются минимальным количеством нереверсивных движений. Из рассмотренных схем профилирования НП методом следа к ним относятся схемы, основанные на двух согласованных вращательных движениях, оба из которых могут сообщаться заготовке (планетарное точение НП) или инструменту, совершающему планетарное движение вокруг неподвижной заготовки, а также при сообщении одного вращательного движения заготовке, а другого инструменту в виде резцовой головки (рис. 1, схемы 5, 6). Благодаря исключению планетарного движения инструмента или заготовки последняя схема отличается универсальностью и более простой реализацией.

Из методов касания из тех же соображений предпочтительна схема обработки некруглых валов эксцентрично установленной круглой или некруглой дисковой фрезой, вращательное движение которой согласовано с вращением заготовки (рис. 2, схема 4). Для окончательной обработки рекомендуется обработка на профилировальных станках (рис. 2, схема 2).

Из методов обката предпочтительными являются имеющие одинаковую кинематику схемы профилирования НП эксцентрично установленным ротационным резцом (рис. 3, схема 5), резцом с винтовой режущей кромкой (рис. 3, схема 6) и комбинированным инструментом в виде эксцентрично установленных круглого резца и угловой фрезы (рис. 3, схема 12).

Таким образом, на основе анализа схем профилирования некруглых цилиндрических поверхностей для их реализации рекомендуются схемы обработки резцовыми головками, эксцентрично установленными дисковой и цилиндрической фрезами, ротационными инструментами и инструментом с винтовой режущей кромкой. Общим для них является то, что профилирование НП осуществляется двумя согласованными вращательными движениями инструмента и заготовки, составляющими движение профилирования. Общность кинематики формообразования позволяет реализовать эти схемы обработки на одном станке.

Структурные схемы станков для реализации этих схем обработки приведены на рисунке 4.

На рисунке 4, а изображена структурная схема станка с электромеханической кинематической связью между инструментальным шпинделем, совершающим вращение B_2 , и шпинделем изделия, совершающим движение B_1 . Вращение шпинделей осуществляется от синхронных электродвигателей соответственно M_1 и M_2 переменного тока с частотным регулированием, подключенных к общему преобра-

зователю частоты ПЧ. Между двигателем M_2 и шпинделем изделия расположена гитара сменных зубчатых колес i_x для настройки этой цепи на число граней НП. При таком построении внутренняя связь кинематической группы движения $\Phi_v(B_1B_2)$ включает следующие элементы: 2-1- M_1 -ПЧ- M_2 -3- i_m -4.

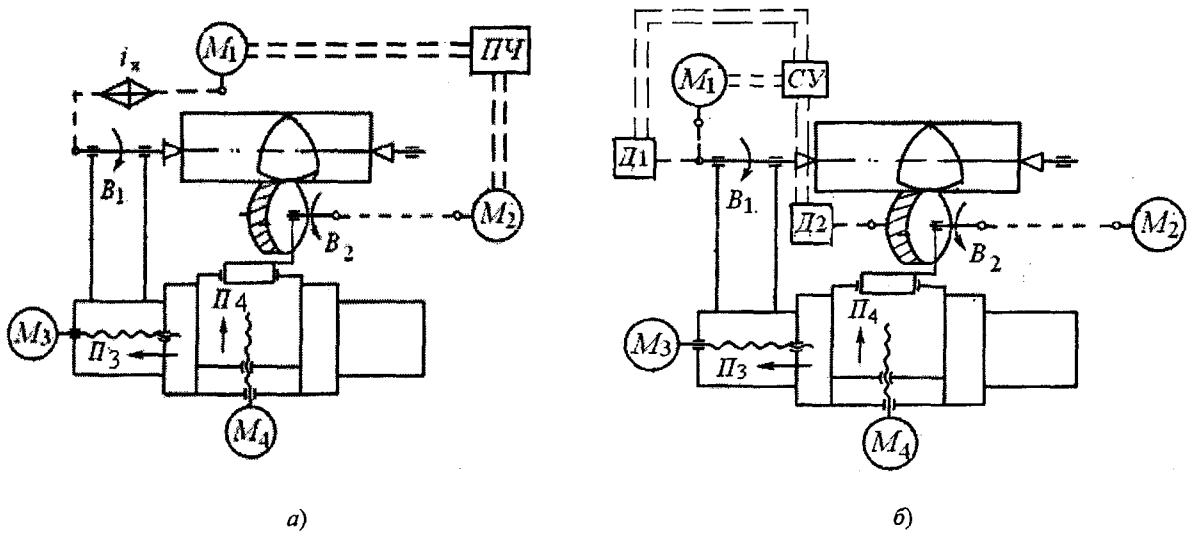


Рис. 4. Структурные схемы станков для обработки некруглых валов с электромеханической (а) и мехатронной (б) связями между исполнительными органами

Настройка движения $\Phi_v(B_1B_2)$ на траекторию осуществляется гитарой сменных зубчатых колес i_x , а настройка на скорость – преобразователем частоты ПЧ.

Достоинством такой структуры по сравнению с механической является повышение кинематической точности и уменьшение металлоемкости станка за счет сокращения числа передач в цепи деления.

Кинематическая структура станка, изображенная на рисунке 4, б, снабжена цепью деления мехатронного типа. Инструментальный шпиндель и шпиндель изделия связаны между собой мехатронной кинематической цепью, содержащей датчик D_1 поворота шпинделя изделия, который связан с системой управления СУ двигателем M_2 . Согласование движений B_1 и B_2 (настройка на траекторию движения $\Phi_v(B_1B_2)$) осуществляется системой управления СУ, связанной с датчиками D_1 и D_2 углов поворота шпинделей. Скорость этого движения настраивается регулированием частоты вращения двигателя M_2 . При такой структуре исключаются все механические органы настройки, что упрощает кинематику станка и его настройку. Для упрощения конструкции целесообразно использовать двигатели со встроенными датчиками обратной связи.

Оба станка позволяют обрабатывать цилиндрические и конические НП. Движение подачи $\Phi_s(P_3)$ и установочное движение $Уст$ (P_4) при обработке цилиндрических НП настраивается по скорости, направлению, начальной точке и длине пути системой управления. По траектории эти движения не настраиваются – этот параметр обеспечивается направляющими поступательных пар, представляющих внутренние связи группы движения подачи и группы установочного движения.

При обработке конических НП движения P_3 и P_4 образуют сложное движение подачи $\Phi_s(P_3P_4)$, параметры которого задаются системой управления.

Заключение. Метод формообразования некруглой поверхности характеризуется существенными признаками, отражающими в общем случае форму производящих элементов и инструментальной поверхности, характер и результат их взаимодействия с номинальной поверхностью изделия в виде полного или частичного ее формообразования и кинематическую схему обработки. В формализованном виде метод описывается структурной формулой, включающей определители его существенных признаков, что обеспечивает сравнение возможных методов формообразования.

Некруглые поверхности моментопередающих соединений допускают их профилирование множеством базовых и комбинированных методов, что позволяет выбирать из них рациональные при проектировании станочного оборудования и инструментов для обработки профильных изделий исходя из формы поверхностей и условий производства.

По результатам проведенного анализа определены рациональные методы профилирования некруглых поверхностей различными инструментами, основанные на двух согласованных вращательных движениях инструмента и заготовки, что позволяет реализовывать их на одном станке и упрощает освоение производства профильных моментопередающих соединений.

Разработаны кинематические структуры станков для обработки цилиндрических и конических некруглых деталей с электромеханическими и мехатронными связями между исполнительными органами как основа проектирования их кинематики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чарнко, Д.В. Профильные соединения валов и втулок в машиностроении / Д.В. Чарнко, А.И. Тимченко // Вестн. машиностроения. – 1981. – № 1. – С. 33–35.
2. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
3. Данилов, В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 264 с.
4. Коновалов, Е.Г. Основы новых способов металлообработки / Е.Г. Коновалов. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 257 с.
5. Шитников, А.С. Проектирование сборных фасонных фрез для обработки наружного РК-профиля: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / А.Н. Шитников; Курск. гос. техн. ун-т. – Тула, 2007. – 20 с.
6. Данилов, В.А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием / В.А. Данилов // Инженер-механик. – 2003. – № 3(20). – С. 26–31.
7. Тимченко, А.И. Технология изготовления деталей профильных бесшпоночных соединений (Обзор) А.И. Тимченко. – М.: Изд. «Станкин», 1988. – 160 с.
8. Данилов, В.А. Методологические основы синтеза кинематики формообразования и кинематических схем обработки при функциональном проектировании станочного оборудования / В.А. Данилов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2012. – № 3. – С. 2–10.

Поступила 15.07.2014

**ANALYSIS AND REALIZATION OF METHODS
OF SHAPING NON-CIRCULAR SURFACES
OF PROFILED TORQUE TRANSMITTING CONNECTION**

V. DANILOV, A. DANILOV

The article presents the characteristics of the methods of non-circular surfaces forming. Patterns of tool interaction with a nominal surface of the product with the full and partial shaping are considered. Method of structural description of surface profiling schemes is proposed. Recommendations regarding the selection of profiling schemes of non-circular surfaces in the design of machine tools are given.