

УДК 621.91.04

ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ СХЕМ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ НЕКРУГЛЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЗАНИЕМ

*д-р техн. наук, доц. В.А. ДАНИЛОВ, М.В. БАЖИН,
Л.А. ДАНИЛОВА, А.И. КОСТЮЧЕНКО
(Полоцкий государственный университет)*

Приведены результаты аналитического исследования схем кинематического профилирования многогранных поверхностей резцовыми головками по попутной и встречной схемам резания. Показано использование полученных данных при создании специальных режущих инструментов и оценке их технологических возможностей для обработки некруглых изделий по рассмотренным схемам профилирования.

Постановка задачи. Кинематическое профилирование некруглых поверхностей двумя согласованными вращательными движениями возможно резцовыми головками внешнего или внутреннего касания по встречной или попутной схемам обработки. Для проектирования инструмента и обрабатываемой системы станка, его настройки необходимо знать влияние основных параметров схем обработки на геометрию формируемого профиля и рабочие (кинематические) углы режущих лезвий. В первом случае можно судить о технологических возможностях данных схем по форме образуемых профилей, точности профилирования, а во втором – оценить условия резания, что имеет важное практическое значение. Рассмотрим эту задачу.

Анализ схем профилирования. Кинематически любая линия формируется как траектория результирующего (исполнительного) движения производящей точки, образованного множеством сообщаемых ей элементарных движений. При синтезе кинематической схемы обработки должны быть обеспечены рациональная структура исполнительного движения и обосновано распределение элементарных движений между инструментом и заготовкой [1]. В частности, для образования профиля некруглой цилиндрической поверхности в виде множества конгруэнтных участков существенными преимуществами по сравнению с другими возможными обладает схема профилирования, основанная на сочетании двух согласованных вращательных движений, одно из которых сообщается инструменту, а другое – заготовке [2]. При этом инструментом могут быть резцовые головки внешнего касания или охватывающего типа.

Инструментом внешнего касания (рис. 1, а) некруглый профиль образуется при сообщении заготовке 1 и режущему инструменту 2 согласованных вращательных движений B_1 и B_2 с угловыми скоростями соответственно ω_1 и ω_2 вокруг параллельных осей L_1 и L_2 , расстояние между которыми $l = R + r$, где R – расстояние от вершины C резца до оси L_2 вращения инструмента, r – радиус вписанной в профиль окружности. Точка C в относительном движении перемещается по траектории ab (рис. 1, б), уравнение которой

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

где β – угол поворота точки C вокруг оси L_2 , соответствующий углу α поворота заготовки.

Отношение β/α , равное отношению угловых скоростей или частот вращательных движений инструмента и заготовки, должно обеспечивать процесс непрерывного деления и получение профиля заданной формы. В зависимости от параметров схемы обработки данная траектория может быть выпуклой, вогнутой и приближаться к прямой [3].

Например, при $\beta = \alpha$ грани профилируются по окружности

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

при $\beta = 2\alpha$ – по эллипсу

$$\frac{x^2}{r^2} + \frac{y^2}{(r+2R)^2} = 1 \quad (3)$$

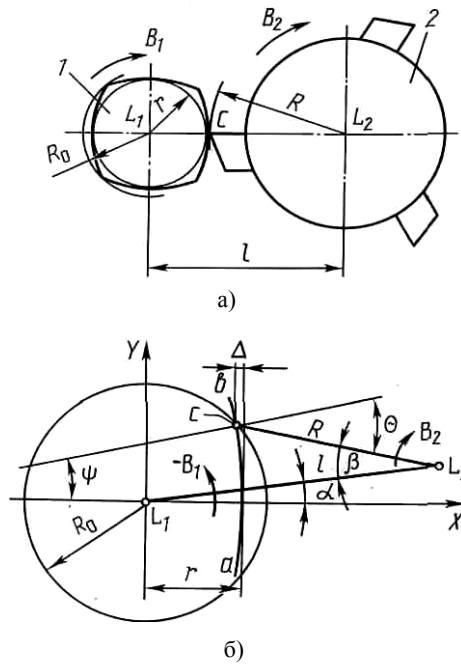


Рис. 1. Профилирование некруглой поверхности инструментом внешнего касания:
а – схема обработки; б – схема профилирования

Плоские грани (как следует из рисунка 1, б) формируются, если

$$(R+r)\cos\alpha - R\cos(\beta-\alpha) - r = 0 \quad (4)$$

Отношение β/α в этом случае с достаточной точностью выражается приближенной зависимостью [4]

$$\beta/\alpha = 1 + \sqrt{1+r/R} \quad (5)$$

При меньших значениях отношения β/α образуются выпуклые, а при больших – вогнутые грани.

Для формирования резцовой головкой профиля в виде ломаной линии, образованной m конгруэнтными участками, должно выполняться условие:

$$i = m/Pz, \quad (6)$$

где m – количество граней; z – число резцов в головке; P – целое число, задающее последовательность обработки граней [5].

Например, при $m = 5$ и $P = 1$ грани поверхности обрабатываются в последовательности a, b, c, d, e ; при $P = 2 - a, c, e, b, d$; при $P = 3 - a, d, b, e, c$; при $P = 4 - a, e, c, b, d$. Образуемый профиль зависит от значения P , изменением которого обеспечивается управление процессом формообразования. Так, если в рассматриваемом примере $z = 1$, то при $P = 1$ и $P = 2$ грани имеют вогнутую, а при $P = 3$ и $P = 4$ – выпуклую форму. Следовательно, изменяя последовательность обработки граней, одним инструментом можно обрабатывать изделия различного профиля, что имеет важное практическое значение, поскольку позволяет сократить номенклатуру режущих инструментов.

Для получения плоских граней параметры инструмента, схемы обработки и формируемой поверхности выражаются зависимостями:

$$z = m / \left(P \left(1 + \sqrt{1 + r/R} \right) \right); \quad (7)$$

$$r/R = m \left(mP^{-1} z^{-1} - 2 \right) / (zP) \quad (8)$$

При настройке станка для заданного значения m параметры P и z принимаются из условия $m/(Pz) > 2$, из которого следует, что величина $m/(Pz)$ может быть получена различными комбинациями значений P и z . Например, равенство $m/(Pz) = 5/4$ обеспечивается, если $P = 4$ и $z = 1$, $P = 2$ и $z = 2$ или $P = 1$ и $z = 4$. Во всех этих случаях формируется одинаковый профиль. При выборе комбинации значений P и z из множества возможных необходимо учитывать, что при заданных скорости резания и подаче производительность формообразования возрастает с увеличением числа зубьев z и уменьшением величины P .

Для деталей с четным числом плоских граней рассматриваемая схема осуществима только при $n_2/n_1 = 2$ и $P = 1$. В этом случае должны выполняться условия: $m/(Pz) = 2$ и $r/R = 0$, что практически невыполнимо, так как $r \neq 0$ и $R \neq \infty$. Поэтому возможно лишь приближенное профилирование плоских граней по эллипсу, отклонение Δ которого от прямой выражается зависимостью

$$\Delta = r(1 - \cos \alpha) \quad (9)$$

Максимальное значение Δ соответствует моменту окончания обработки грани, для которого

$$\alpha \approx \arcsin\left(\sqrt{R_0^2 - r^2}/(2R + r)\right), \quad (10)$$

где R_0 – радиус окружности, описанной вокруг профиля (см. рис. 1).

Решение уравнения (10) относительно R определяет зависимость радиуса инструмента от неплоскостности Δ грани. Если допускаемое ее отклонение составляет $[\Delta]$, то

$$R \geq \frac{r}{2\sqrt{2}} \left(\sqrt{\frac{r(R_0^2/r^2 - 1)}{[\Delta]} - 1} \right) \quad (11)$$

Настройка величины R по условию (11) обеспечивает формообразование граней с отклонением от плоскости, не превышающим допускаемую величину $[\Delta]$.

В процессе обработки непрерывно изменяются передний и задний рабочие углы ржущих лезвий. Текущее их изменение θ , согласно рис. 1, б, составляет

$$\theta = \alpha(m/(zP) - 1) + \arctg \left| \frac{rtg \alpha}{(r + 2R)} \right| \quad (12)$$

Максимальное значение θ имеет место в моменты входа резца в заготовку и выхода из нее, для которых угол α определяется по (10) при значении R_0 , равном радиусу заготовки.

Так как угол θ зависит от R , то выражение (12) позволяет определить минимальный радиус инструмента, при котором фактическое изменение его рабочих углов не превысит допускаемое значение $[\theta]$. Для обеспечения заданной точности формообразования плоских граней при допускаемом изменении рабочих углов радиус R инструмента принимается равным большему из значений, определенных из (11) и (12).

При обработке некруглой поверхности по попутной схеме резания инструментом внутреннего касания (охватывающим инструментом) (рис. 2, а) расстояние l между осями L_1 и L_2 составляет $l = R - r$, а траектория вершины C резца 2 в относительном движении (рис. 2, б) описывается уравнениями

$$\begin{cases} x = -l \cos \alpha + R \cos(\beta - \alpha) \\ y = l \sin \alpha + R \sin(\beta - \alpha) \end{cases} \quad (13)$$

В частном случае, когда $n_2/n_1 = 2$ и $z = 0,5m$, грани профилируются по эллипсу, уравнение которого

$$\frac{x^2}{r^2} + \frac{y^2}{(2R - r)^2} = 1 \quad (14)$$

Неплоскостность грани в данном случае выражается зависимостью (9), где

$$\alpha = \arcsin\left(\sqrt{R_0^2 - r^2}/(2R - r)\right) \quad (15)$$

Следовательно,

$$[\Delta] - r \left(1 - \cos \arcsin \left(\sqrt{R_0^2 - r^2} / (2R - r) \right) \right) = 0 \quad (16)$$

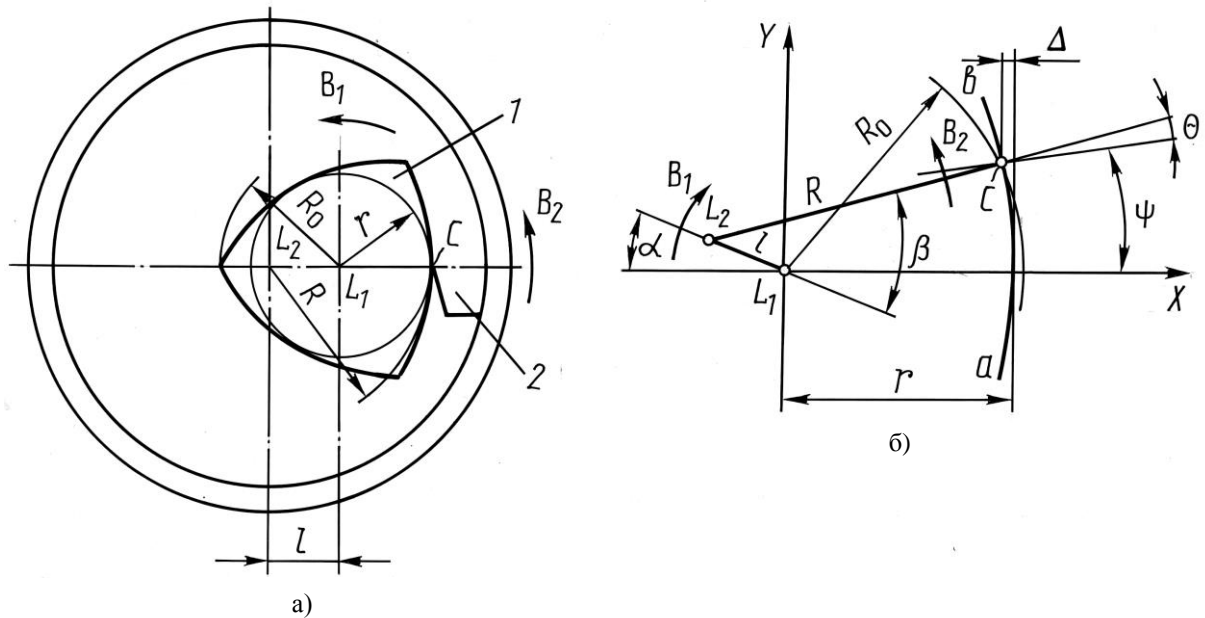


Рис. 2. Профилирование некруглой поверхности охватывающим инструментом:
а – схема обработки; б – схема профилирования

Решение уравнения (16) относительно R позволяет определить радиус режущей головки, при котором неплоскостность профиля грани не превысит допустимое значение $[\Delta]$.

Изменение θ переднего и заднего рабочих углов резов охватывающим инструментом, согласно рис. 2, б, описывается зависимостью

$$\theta = \alpha(m/zP - 1) - \arctg \left| \frac{rtg\alpha}{(2R - r)} \right| \quad (17)$$

Для максимального значения θ угол α определяется по формуле (15) при R_0 , равном радиусу заготовки, что позволяет установить радиус R режущей головки, при котором изменение рабочих углов резов не превышает допустимую величину $[\theta]$.

Плоские грани по рассматриваемой схеме формируются, если

$$R \cos(\beta - \alpha) - l \cos \alpha - r = 0 \quad (18)$$

Анализ уравнения (18) показывает, что в данном случае зависимости для определения параметров n_2/n_1 , z , r/R отличаются от аналогичных зависимостей для схемы обработки инструментом внешнего касания знаком перед отношением r/R :

$$n_2/n_1 = 1 + \sqrt{1 - r/R} \quad (19)$$

$$z = m / \left(P(1 + \sqrt{1 - r/R}) \right) \quad (20)$$

$$-r/R = m(2 - m/(zP)) / (zP) \quad (21)$$

При больших, чем расчетные, значениях отношения n_2/n_1 и меньших значениях z формируются выпуклые, а при меньших n_2/n_1 и больших z – вогнутые грани.

Управление формой профиля формируемой поверхности кроме указанных параметров обеспечивается также путем изменения относительного положения осей вращательных движений инструмента и заготовки [6].

Преимуществом попутной схемы обработки охватывающим инструментом является возможность формирования профиля изделия в виде замкнутой кривой, что невозможно инструментом внешнего касания. Установлено, что непрерывное профилирование обеспечивается, если отношение i частот вращательных движений инструмента и заготовки составляет

$$i = m/(m-1). \quad (22)$$

В данном случае вершина резца всегда контактирует с формируемым профилем, что позволяет на одном станке обрабатывать как наружные, так и внутренние сопряженные некруглые поверхности. Отсутствие холостых ходов при профилировании позволяет интенсифицировать процесс обработки. Профиль обработанной поверхности описывается уравнениями (13) при $\beta = \alpha m/(m-1)$.

В частном случае, когда $n_2/n_1=1$,

$$\begin{cases} x = R - l \cos \alpha \\ y = l \sin \alpha \end{cases} \quad (23)$$

или

$$(x - R)^2 + y^2 = l^2, \quad (24)$$

т.е. образуемый профиль представляет собой окружность радиусом l , расположенную с эксцентриситетом R относительно оси вращения заготовки.

Практический интерес представляет сравнение рассмотренных схем обработки по технологической производительности. При одинаково направленных движениях B_1 и B_2 скорость резания в средней точке грани

$$v = 2\pi n_1 (Ri \pm r), \quad (25)$$

где знак «плюс» соответствует обработке инструментом внешнего касания, «минус» – внутреннего касания.

Поэтому частота его вращения

$$n_1 = v 2\pi / (2\pi (Ri \pm r)). \quad (26)$$

Из зависимости (26) следует, что для равной скорости резания частота вращения заготовки и соответственно технологическая производительность в

$$(i + r/R)/(i - r/R) \quad (27)$$

раз больше при обработке инструментом внутреннего касания. Кроме того, благодаря тому, что в данном случае резание осуществляется по попутной схеме, уменьшается динамическая нагрузка на инструмент и улучшаются условия резания.

Реализация схем обработки. Реализация любой схемы обработки возможна лишь при наличии соответствующего станка и его инструментального оснащения.

Перспективным направлением решения проблемы станочного обеспечения производства профильных деталей является расширение технологических возможностей универсальных станков для выполнения на них необходимых схем формообразования [7]. Такой подход осуществлен в широкоуниверсальном зубошлифозерерном станке модели ВС-50 [8], который создан совместно Витебским специальным конструкторским бюро зубообрабатывающих, шлифовальных и заточных станков (разработка рабочего проекта станка), Полоцким государственным университетом (обоснование кинематической структуры станка, разработка и исследование схем формообразования некруглых и прерывистых поверхностей, разработка методики настройки станка, проектирование его инструментального оснащения) и Витебским станкостроительным заводом им. Коминтерна – станкостроительный завод «Вистан» – (изготовление станка и специальных режущих инструментов) в результате выполнения ими двух заданий Государственной научно-технической программы «Создать и освоить в производстве новые базовые модели конкурентоспособного металлообрабатывающего оборудования и инструмента» (ГНТП «Станки и инструмент»).

Благодаря особенностям кинематики и сменным обрабатывающим модулям этот станок позволяет:

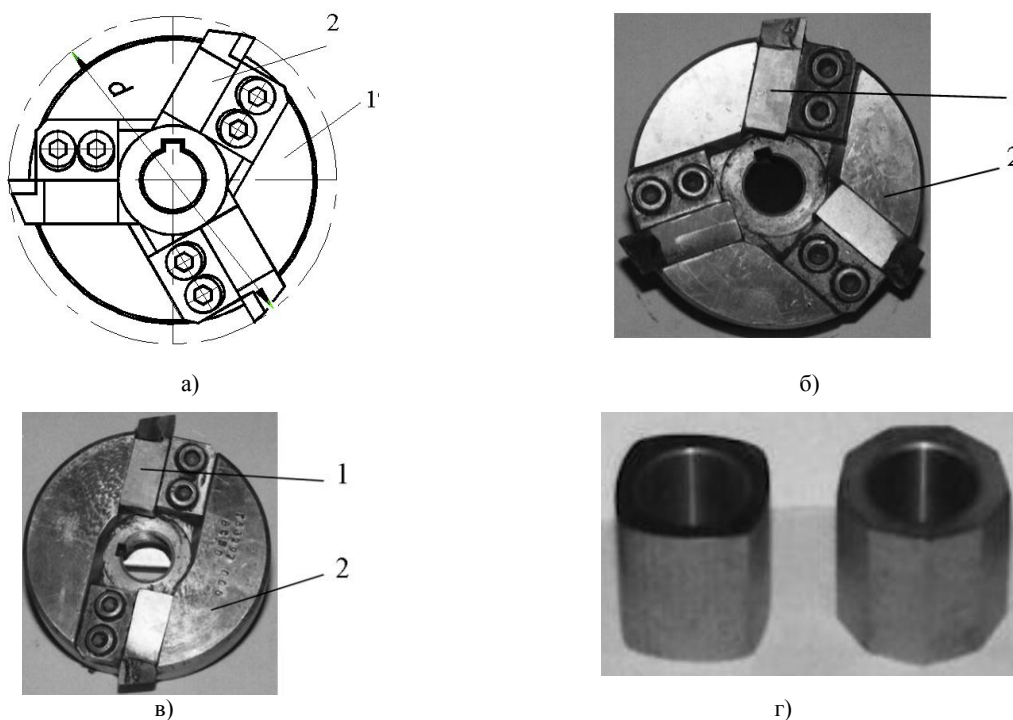
- нарезать цилиндрические зубчатые колеса и шлицевые валы червячными, модульными дисковыми и концевыми фрезами;
- обрабатывать наружные и внутренние резьбы дисковыми и гребенчатыми фрезами;

- шпоночные пазы, винтовые канавки и многогранники – концевыми фрезами;
- червяки – дисковыми фрезами и долбьяками;
- некруглые поверхности с периодически повторяющимся профилем по методу кинематического профилирования различными инструментами, в том числе и резцовыми головками.

Рассмотренные выше схемы обработки некруглых поверхностей реализуются с помощью резцовых головок внешнего касания (рис. 3) и охватывающего типа (рис. 4), которые разработаны кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Полоцкого государственного университета по заданию Государственной научно-технической программы «Станки и инструмент» [8, 9].

Инструменты в виде резцовых головок внешнего касания (см. рис. 3) предназначены для обработки по способам [5, 10] многогранных поверхностей циклоидального профиля с выпуклыми (кривизна $K > 0$), вогнутыми ($K < 0$) и близкими и плоскими гранями ($K \approx 0$), количество которых $m \geq 1$.

Типовая конструкция резцовой головки содержит корпус 1 с закрепленными в нем резцами 2, количество которых зависит от параметров формируемого профиля и отношения частот вращательных движений инструмента и заготовки. В общем случае конструкция инструмента определяется профилем обрабатываемого изделия и параметрами схемы обработки.



Типовая конструкция инструмента	Образуемый профиль			
	1.1 $K > 0$	2.1 $K \approx 0$	3.1 $K < 0$	4.1 $K < 0$
1 $Z=1$	1.1 $K > 0$ $m=1$	2.1 $K \approx 0$ $m=2$	3.1 $K < 0$ $m=3$	4.1 $K < 0$ $m=4$
2 $Z=2$	2.2 $K > 0$ $m=2$	3.2 $K > 0$ $m=3$	4.2 $K \approx 0$ $m=4$	5.2 $K < 0$ $m=5$
3 $Z=3$	3.3 $K > 0$ $m=3$	4.3 $K > 0$ $m=4$	5.3 $K > 0$ $m=5$	6.3 $K \approx 0$ $m=6$

д)

Рис. 3. Обработка многогранных поверхностей инструментами внешнего касания:
 а, б, в – конструкция инструмента; г – образцы обработанных деталей;
 д – технологические возможности инструмента

Рисунок 3, д иллюстрирует технологические возможности созданных инструментов с равномерным расположением режущих элементов, количество которых $1 \leq z \leq 3$, по форме обработанных поверхностей при различных значениях отношения i частот вращательных движений инструмента и заготовки.

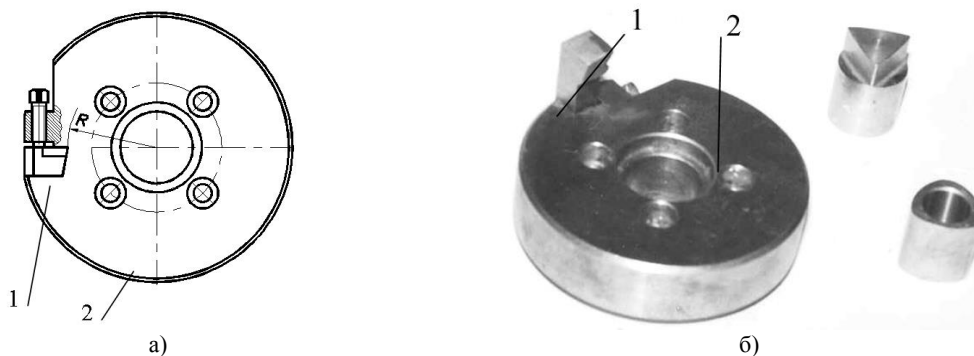
Приведенное кодовое обозначение образуемых профилей состоит из двух цифр, первая из которых соответствует числу m граней, а вторая – числу z режущих зубьев. Отношение m/z этих чисел равно отношению i частот вращательных движений инструмента и заготовки при последовательном формировании граней профиля, т.е. при $P = 1$ в уравнении (6). Изменением значения P обеспечивается управление формой профиля и, следовательно, повышение универсальности инструмента. Например, при $z = 1$ и $P = 2$ формируется трехгранная поверхность с выпуклыми гранями.

Значение i определяет форму граней, а произведение iz – их количество. Так, если $i = 1$, то формируются профили 1.1, 2.2, 3.3 с числом граней $m = z$, очерченных по окружности, радиус r которой определяется уравнением (2). При $i = 2$ независимо от z на заготовке обрабатывается четное число граней (профили 2.1, 4.2, 6.3), очерченных по эллипсу по уравнению (3). За счет выбора диаметра d инструмента они с требуемой точностью могут приближаться к плоским в соответствии с зависимостью (9).

Независимо от конструкции головки при $1 \leq i < 2$ обработанные поверхности имеют выпуклые, а при $i > 2$ вогнутые грани. В каждом конкретном случае диаметр d инструмента и геометрия его режущих зубьев определяется в зависимости от допускаемого изменения их рабочих углов и отклонения обработанных граней от заданной формы.

Для реализации попутной схемы обработки создан инструмент охватывающего типа, который с образцами обработанных им на станке модели ВС50 деталей показан на рисунке 4.

Инструмент охватывающего типа оснащен одним резцом 2, закрепленным в корпусе 1, поэтому им возможна обработка деталей с профилями типов 1'.1, 1'.2, 1'.3 и др. (рис. 4, в).



Типовая конструкция инструмента	Образуемый профиль			
1'	1'.1 K<0 m=1	1'.2 K≈0 m=2	1'.3 K>0 m=3	1'.4 K>0 m=4
2'	2'.2 K<0 m=2	2'.3 K<0 m=3	2'.4 K≈0 m=4	2'.5 K>0 m=5
3'	3'.3 K<0 m=3	3'.4 K<0 m=4	3'.5 K<0 m=5	3'.6 K≈0 m=6

в)

Рис. 4. Обработка многогранных поверхностей инструментом охватывающего типа:
а – конструкция инструмента; б – однолезвийный инструмент с обработанными деталями;
в – технологические возможности инструмента

Управление формой поперечного сечения обработанной поверхности достигается за счет параметров i , z , и R , например:

- при $i = 1$ (профили 1.1, 2.2, 3.3) обработанные грани спрофилированы по окружности;
- при $i = 2$ (профили 1'.2, 2'.4, 3'.6) – по эллипсу (14), который при определенном значении R в соответствии с (16) приближается с допусаемым отклонением к прямой;
- при $i < 2$ обрабатываются поверхности с вогнутыми гранями;
- при $i \geq 2$ – с выпуклыми гранями.
- при $z = 1$ и значении i , определяемом зависимостью (22), обеспечивается формирование замкнутого выпуклого контура, что позволяет данным инструментом обрабатывать сопряженные наружные и внутренние некруглые поверхности.

Применение описанных инструментов на станке модели ВС-50 подтверждает достоверность результатов исследований схем профилирования некруглых поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов В.А. Общие принципы синтеза рациональных технологий формообразования сложных поверхностей резанием // Мир технологий. – 2003. – № 1.– С. 61 – 71.
2. Данилов В.А. Станки для обработки профильных поверхностей, передающих момент // Техника машиностроения. – 1998. – № 4. – С. 102 – 105.
3. Данилов В.А., Данилова Л.А. Кинематическое формирование производящих линий поверхности при обработке резанием на базе циклоидальных кривых // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2004. – № 12. – С. 44 – 53.
4. Данилов В.А. Анализ схем обработки многогранных поверхностей по методу кинематического профилирования // Изв. вузов. Машиностроение. – 1982. – № 2. – С. 102 – 107.
5. А.с. 944790 СССР, МКИ³ В23В 1/00. Способ обработки многогранных поверхностей / В.А. Данилов // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 27.
6. Данилов В.А., Данилова Л.А. Модификация многогранных поверхностей при обработке резанием // Изв. вузов. Машиностроение. – 1988. – № 10. – С. 131 – 136.

7. Данилов В.А., Бажин М.В., Костюченко А.И. Расширение технологических возможностей шлицефрезерных станков // СТИН. – 1996. – № 6. – С. 24 – 29.
8. Данилов В.А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием // Инженер-механик. – 2003. – № 3 (20). – С. 26 – 31.
9. Данилов В.А., Бажин М.В., Костюченко А.И. Инструменты для обработки некруглых изделий // Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении: Балтехмаш-98: Тез. междунар. науч.-техн. конф., Калининград, 13 – 15 мая 1998 г. – Калининград, 1998. – С. 15 – 16.
10. А.с. 946804 СССР, МКИ³ В23В 1/00. Способ обработки многогранных поверхностей / В.А. Данилов // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 28.