

УДК 621.914.1

О. В. Мальков, А. В. Литвиненко,
Л. Д. Малькова, И. В. Синцова

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЛАНЕТАРНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ НАРУЖНЫХ И ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Рассмотрен процесс планетарного фрезерования с точки зрения точности получаемой поверхности, предложен алгоритм расчета огрانки. Выявлены параметры режима резания, инструмента и обрабатываемой поверхности, оказывающие влияние на величину огранки, установлен характер зависимости огранки от указанных величин.

В условиях современного серийного производства повышение эффективности механической обработки корпусных деталей является актуальной задачей. Механическая обработка корпусных деталей имеет ряд особенностей: большие габаритные размеры заготовки; сложная конфигурация детали с большим количеством конструктивных элементов, в том числе отверстий; значительное число операций обработки; широкая номенклатура режущего, вспомогательного и контрольно-измерительного инструментов; большое количество технологической оснастки. Поэтому при обработке корпусных деталей целесообразно применение принципа концентрации переходов в пределах одной единицы оборудования, позволяющего значительно повысить производительность. Этому также способствует внедрение в производство оборудования с числовым программным управлением, в том числе многооперационных станков типа обрабатывающий центр.

Преимущества принципа концентрации операций на одном оборудовании следующие: обработка ведется за один установ, что сокращает вспомогательное время и повышает точность обработки; уменьшается количество применяемой технологической оснастки.

Для реализации принципа концентрации операций можно использовать комбинированный инструмент на обрабатывающем центре с ЧПУ. Комбинированный инструмент при работе на обрабатывающем центре позволит уменьшить количество заполненных гнезд в магазине, основное и вспомогательное время обработки, количество вспомогательного инструмента.

В настоящее время в связи с внедрением станков с ЧПУ, имеющих три и более одновременно управляемых координат, стало целесообразным обрабатывать отверстия и наружные цилиндрические поверхности методом фрезерования с планетарным движением за один проход. Планетарное фрезерование существенно расширяет возможности обработки элементов корпусных деталей как комбинированными, так и универсальными инструментами и соответствует принципу концентрации переходов в пределах одной единицы оборудования.

Ранее в работе [1] приведен алгоритм расчета огранки при планетарном фрезеровании отверстия на всю длину обрабатываемой поверхности. В настоящей работе производится расчет огранки при фрезеровании наружной цилиндрической поверхности в сравнении с фрезерованием отверстия.

Рассмотрим подробно обработку цилиндрического отверстия и наружной цилиндрической поверхности методом фрезерования.

На рис. 1 показаны схемы обработки отверстия и наружной цилиндрической поверхности методом планетарного фрезерования. Движение инструмента проиллюстрировано движением вершины зуба в точке B , которое описывается координатами (X_B, Y_B) в системе координат X_0Y_0 с центром в точке O_0 . Ось инструмента (точка O_n) совершает планетарное движение относительно точки O_0 с эксцентриситетом e .

Схемы обработки наружной и внутренней цилиндрических поверхностей планетарным фрезерованием описываются одинаковыми параметрами [2, 3]: $d = 2r$ — диаметр инструмента, мм; $D = 2R$ — диаметр обрабатываемой цилиндрической поверхности (наружной

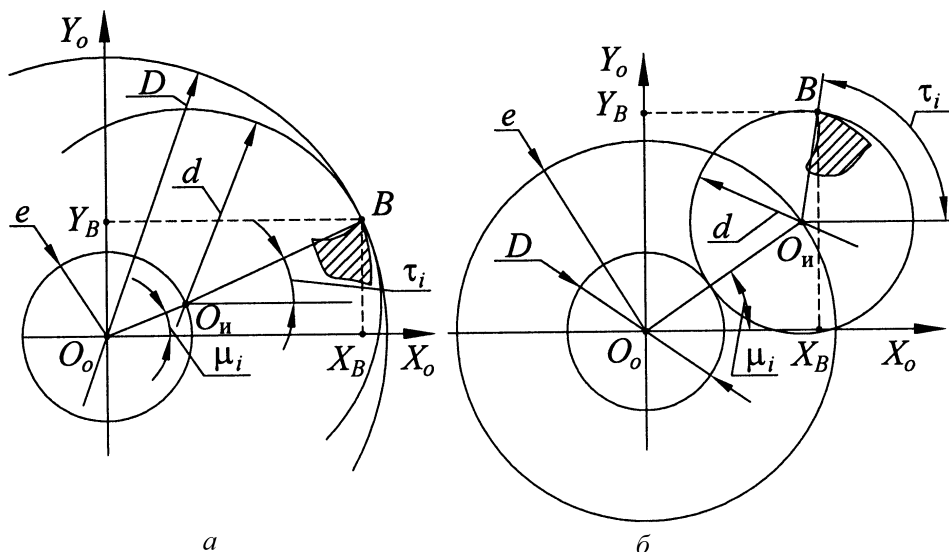


Рис. 1. Схема обработки отверстия (а) и наружной цилиндрической поверхности (б) методом планетарного фрезерования

или внутренней), мм; S_z — подача на зуб, мм/зуб; z — число зубьев инструмента; μ_i — текущий угол поворота центра инструмента вокруг оси обрабатываемой поверхности, рад; $\tau_i = \frac{\pi D \mu_i}{S_z z}$ — угол поворота вершины зуба вокруг оси инструмента, рад; $e = \frac{D \pm d}{2}$ — эксцентриситет, мм (знак “плюс” ставится в случае обработки наружной цилиндрической поверхности, “минус” — при обработке отверстия).

Нужно отметить, что поверхности обрабатываются за один проход инструмента, на всю длину обрабатываемой поверхности отверстия (аналогично для наружной цилиндрической поверхности). Схема для расчета координат точки B в вершине зуба инструмента соответствует схеме обработки, приведенной на рис. 1.

Траектория движения вершины (точка B , см. рис. 1) инструмента при планетарном фрезеровании отверстия описывается системой уравнений [1, 2, 4]:

$$\begin{cases} X_B = e \cos \mu_i + r \cos \tau_i; \\ Y_B = e \sin \mu_i + r \sin \tau_i. \end{cases} \quad (1)$$

В процессе планетарного движения инструмента на обработанной поверхности проявляется погрешность формы — огранка. За величину огранки примем наибольшее радиальное расстояние Δ от точек реального профиля до прилегающей окружности.

На рис. 2 приведены схемы обработки и траектории движения зубьев инструмента при фрезеровании наружной и внутренней цилиндрической поверхности для некоторых заданных параметров обработки.

Для математической оценки величины огранки Δ составлен алгоритм (рис. 3), расчет по которому основан на параметрическом описании траектории движения вершины инструмента. В алгоритме $\delta = 0,001$ рад — шаг итерации параметра μ , $\mu_{нач} = 0$ — начальное значение параметра μ , ε — бесконечно малая величина, связанная с условиями расчета в MS Excel. Установлено, что на величину огранки Δ оказывают влияние следующие факторы: диаметр обрабатываемой цилиндрической поверхности D , соотношение диаметров обрабатываемой поверхности и инструмента D/d , число зубьев инструмента z и подача на зуб фрезы S_z .

Анализ траекторий движения зубьев показал, что максимальная величина огранки в случае $z > 1$ наблюдается между соседними зубьями. Поэтому при расчете огранки по алгоритму (см. рис. 3) для определения траектории движения $(i + 1)$ -го зуба в системе $X_0 Y_0$ учи-

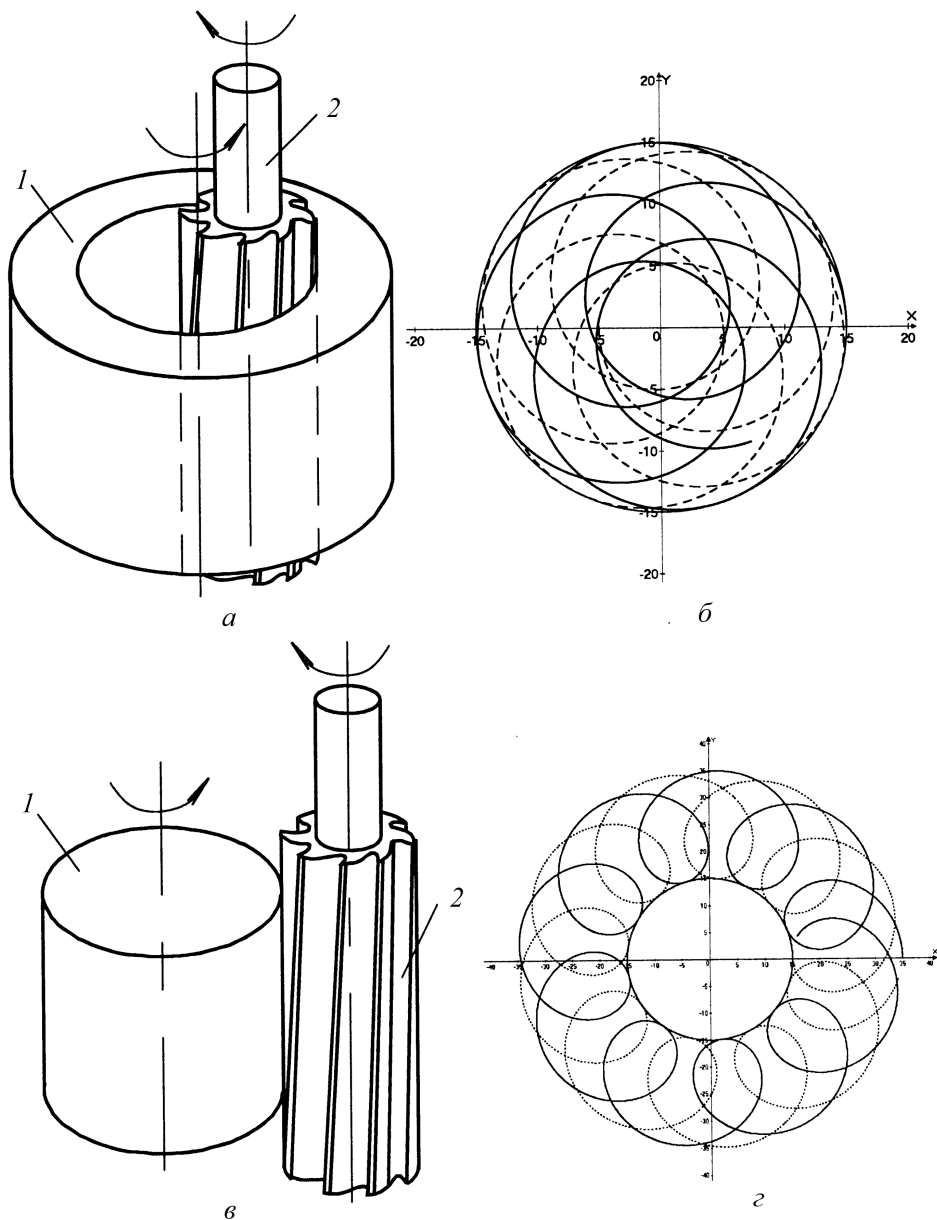


Рис. 2. Схема обработки (а, в) и траектории движения зубьев инструмента (б, г) при планетарной обработке внутренней (а, б) и наружной (в, г) цилиндрических поверхностей:

1 – заготовка; 2 – инструмент; $D = 30$ мм, $d = 20$ мм, $S_z = 10$ мм/зуб, $e = 25$ мм, $z = 2$; сплошная и штриховая кривые – траектория движения 1 и 2-го зуба

тывался сдвиг зубьев по параметру τ на угол $\frac{2\pi}{z}$:

$$\begin{cases} X_B = e \cos \mu_i + r \cos \left(\tau_i - \frac{2\pi}{z} \right); \\ Y_B = e \sin \mu_i + r \sin \left(\tau_i - \frac{2\pi}{z} \right). \end{cases} \quad (2)$$

Согласно алгоритму расчета величины огранки Δ (см. рис. 3) была составлена программа в MS Excel. Величины огранки при фрезеровании наружных и внутренних цилиндрических поверхностей рассчитывали в соответствии с траекториями движения двух соседних зубьев инструмента.

В целях выявления характера влияния параметров D, d, S_z, z были построены графики зависимости (рис. 4) $\Delta = f(S_z), \Delta = f(D/d), \Delta = f(z), \Delta = f(d)$ для наружной и внутренней обработки. Из графиков видно, что при обработке отверстия величина огранки возрастает с увеличением параметра режима резания S_z и уменьшается с ростом числа зубьев z и диаметра инструмента d , что позволяет выбрать необходимые при обработке параметры. При обработке наружной цилиндрической поверхности величина огранки увеличивается с ростом числа зубьев z и подачи на зуб инструмента S_z и уменьшается с ростом диаметра инструмента d . Величина огранки при обработке наружной цилиндрической поверхности во всех случаях выше, чем при обработке отверстий, что, по-видимому, связано с направлением кривизны обрабатываемой и обрабатывающей поверхностей. В случае обработки отверстия направления кривизны одинаковые, а при обработке вала — противоположные.

Проведено сравнение величины огранки Δ , рассчитанной по алгоритму (см. рис. 3) и по приближенному методу “двух окружностей” (рис. 5). Применяя метод “двух окружностей”, рассматривают перемещение инструмента как дискретное с угловым шагом, равным шагу неровностей, определенному по представленному алгоритму с описанием траектории движения вершины режущего клина в параметрическом виде. Схемы расчета по приближенному методу для обработки внутренней и наружной резьб представлены на рис. 5.

Формализуем полученные схемы.

Из треугольника O_0MO_1 для обоих случаев обработки по теореме косинусов находим радиус кривизны траектории движения зуба фрезы. Из решения квадратного уравнения получим

$$\rho = e \cos \psi + \sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 \psi}$$

— для планетарного фрезерования отверстия;

$$\rho = e \cos \psi - \sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 \psi}$$

— для планетарного фрезерования наружной цилиндрической поверхности.

В итоге величина огранки при фрезеровании отверстия (см. рис. 5, а)

$$\Delta = R - \rho = R - e \cos \psi - \sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 \psi};$$

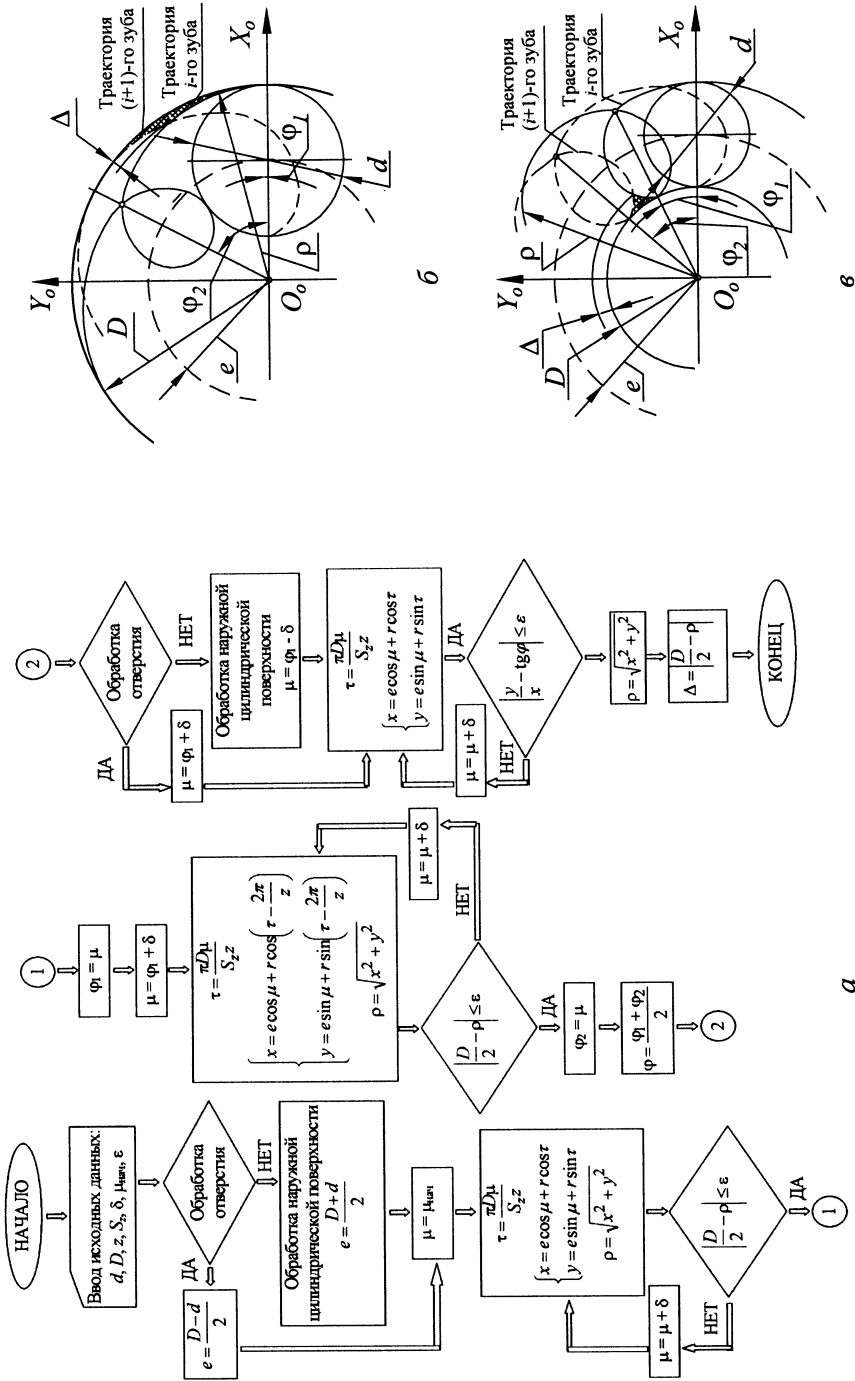


Рис. 3. Алгоритм расчета величины огранки при планетарном фрезеровании цилиндрических поверхностей (а) и схемы фрезерования внутренней (б) и наружной (в) поверхностей

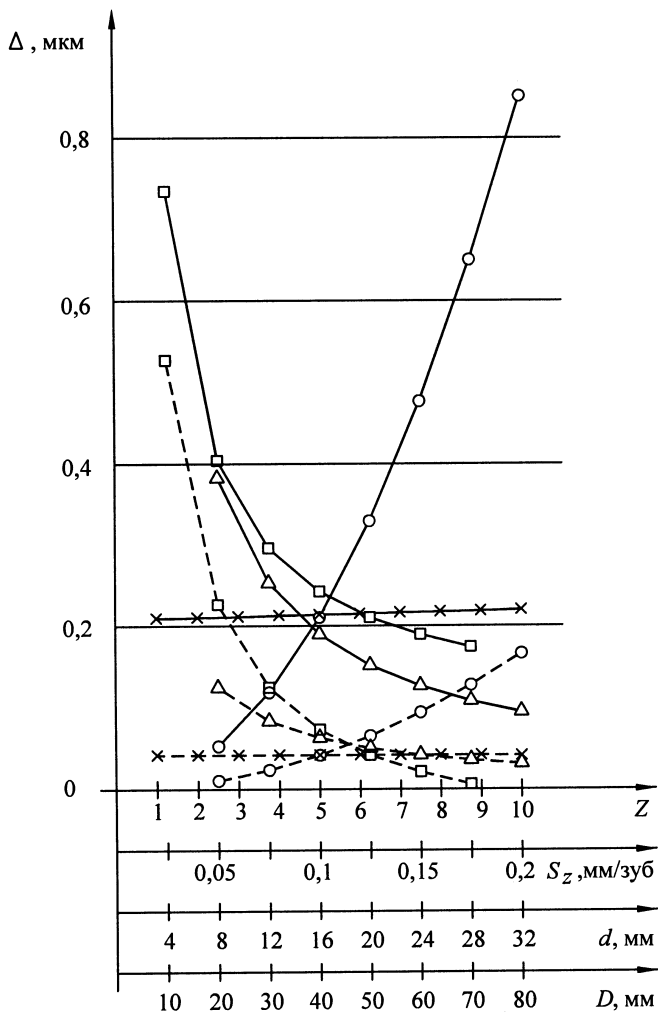


Рис. 4. Зависимости величины огранки от параметров обрабатываемой поверхности и инструмента:

× — от числа зубьев Z ; o — от подачи на зуб S_z ; □ — от диаметра инструмента d ; Δ — от диаметра D обрабатываемой поверхности при $D/d = 2$; $D = 30$ мм, $d = 20$ мм, $S_z = 0,1$ мм/зуб, $z = 2$; — и - - - - - — обработка наружной и внутренней цилиндрических поверхностей соответственно

при фрезеровании наружной цилиндрической поверхности (см. рис. 5, б)

$$\Delta = \rho - R = e \cos \psi - \sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 \psi} - R.$$

Величину угла ψ при сравнении методов определяли по разработанной программе как $\psi = (\varphi_2 - \varphi_1)/2$.

Сравнивая данные расчета огранки по алгоритму (см. рис. 3) и по методу “двух окружностей”, выявили, что относительное изменение огранки по этим методам не превышает 4% при принятых исходных данных для планетарного фрезерования как внутренних, так и наружных цилиндрических поверхностей. Это позволяет рекомендо-

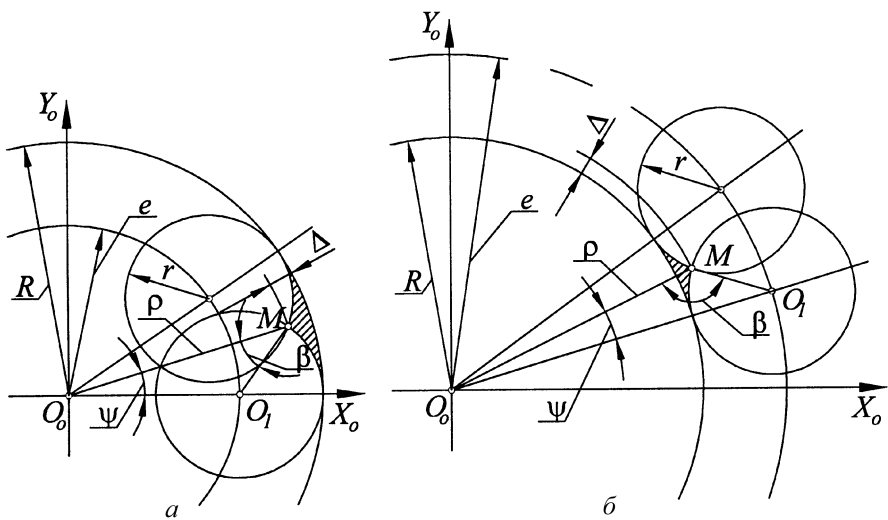


Рис. 5. Схема расчета огранки по методу “двух окружностей” при планетарном фрезеровании внутренней (а) и наружной (б) цилиндрических поверхностей

вать для расчета огранки приближенный метод “двух окружностей”.

Величина угла ψ , используемая в расчетах и определяющая положение вершины огранки, т.е. ее максимальное значение (см. рис. 5), может быть получена аналитически. Для этого рассмотрим положение вершин двух соседних зубьев фрезы диаметра d относительно обрабатываемого диаметра D заготовки (рис. 6).

При обработке внутренней поверхности за начальное положение инструмента, т.е. углы $\mu = \mu_0 = \tau = \tau_0 = 0$, принимаем положение,

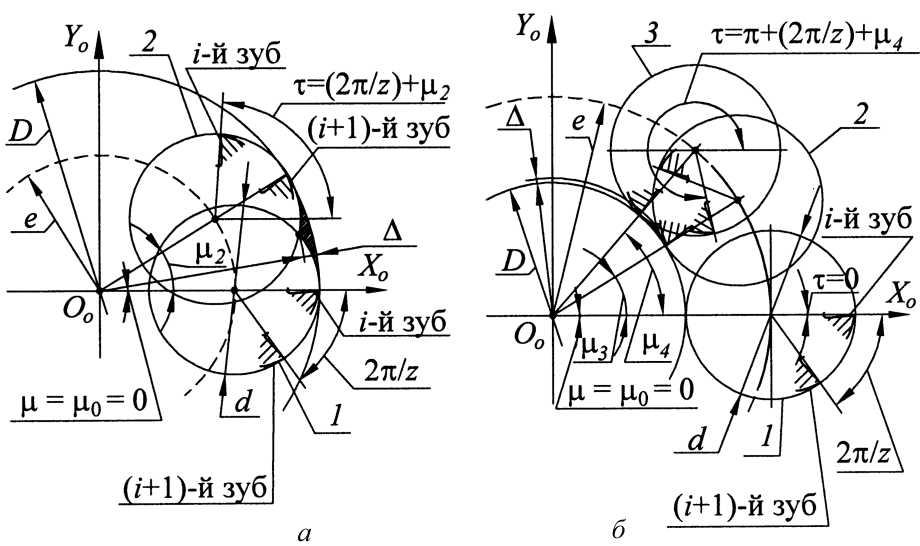


Рис. 6. Графическая схема аналитического расчета огранки по методу “двух окружностей” при планетарном фрезеровании внутренней (а) и наружной (б) цилиндрических поверхностей

при котором вершина i -го зуба совпадает с осью X_0 (рис. 6, *a*, положение 1). Поскольку вершина инструмента касается номинального обрабатываемого диаметра, то $\mu = 0$ можно считать начальным значением формирования элементарной огранки. При условии, что фреза имеет z зубьев, при повороте инструмента на угол $\tau = \pi/z$ вокруг своей оси $(i + 1)$ -й зуб достигает плоскости, параллельной оси X_0 , а ось инструмента поворачивается вокруг оси детали на некоторый угол μ_1 (на рис. 6 не показан), а затем достигает номинального обрабатываемого диаметра доворотом на угол μ_2 (положение 2). При этом угол поворота фрезы вокруг своей оси составит величину $\tau = 2\pi/z + \mu_2$, а сам угол μ_2 можно рассматривать как конечное значение формирования элементарной огранки. Максимальное значение полученной огранки Δ из условия симметричности будет определено углом $\psi = (\mu_2 - \mu_0)/2$, равным половине угла элементарной огранки.

Определим значение угла μ_2 из зависимости

$$\mu_2 = \frac{S_z z \tau}{\pi D},$$

где $\tau = 2\pi/z + \mu_2$. После подстановки имеем

$$\mu_2 = \frac{S_z z \left(\frac{2\pi}{z} + \mu_2 \right)}{\pi D}.$$

Соответственно, после преобразований получим

$$\mu_2 = \frac{2S_z \pi}{\pi D - S_z z}.$$

$$\text{Угол } \psi = \frac{\mu_2}{2} = \frac{S_z \pi}{\pi D - S_z z}.$$

Аналогичные рассуждения представим для условий обработки наружной поверхности. За начальное положение инструмента, т.е. углы $\mu = \mu_0 = \tau = \tau_0 = 0$, принимаем положение, при котором вершина i -го зуба совпадает с осью X_0 (рис. 6, *b*, положение 1). Поворот на угол $\tau = \pi$ и доворот на угол μ_3 при $\tau = \pi + \mu_3$ определяют точку касания номинального обрабатываемого диаметра i -м зубом (положение 2). Эту точку будем рассматривать как начальную точку формирования элементарной огранки. В положении 3 $(i + 1)$ -й зуб достигает номинального обрабатываемого диаметра. Эта точка является конечным значением формирования элементарной огранки. При этом $\mu = \mu_4$, $\tau = \pi + 2\pi/z + \mu_4$. Угол ψ , соответствующий максимальной величине огранки Δ , определяется как $\psi = (\mu_4 - \mu_3)/2$.

Формализуем описанную последовательность обработки.

Углы μ определяют по формулам

$$\mu_3 = \frac{S_z z (\pi + \mu_3)}{\pi D} \quad \text{и} \quad \mu_4 = \frac{S_z z \left(\pi + \frac{2\pi}{z} + \mu_4 \right)}{\pi D},$$

после преобразований получим

$$\mu_3 = \frac{S_z z \pi}{\pi D - S_z z} \quad \text{и} \quad \mu_4 = \frac{S_z z \left(\pi + \frac{2\pi}{z} \right)}{\pi D - S_z z}.$$

Угол $\psi = \frac{\mu_4 - \mu_3}{2} = \frac{1}{2} \frac{S_z z \left(\pi + \frac{2\pi}{z} \right)}{\pi D - S_z z} - \frac{S_z z \pi}{\pi D - S_z z}$, после преобразований угол

$$\psi = \frac{S_z \pi}{\pi D - S_z z}. \quad (3)$$

Очевидно, что шаг неровностей (угол элементарной огранки) и, соответственно, его половина — угол ψ — не зависят от вида поверхности. Формула (3) является универсальной.

Анализ величины огранки показывает, что, например, при фрезеровании отверстия $\varnothing 30H7$ поле допуска ($Td = 21$ мкм) значительно превышает величину огранки, что позволяет сделать вывод о том, что огранка при фрезеровании не является ограничением по точности обработки.

Для определения типа погрешности, к которому можно отнести огранку, возникающую при планетарном фрезеровании наружной и внутренней цилиндрической поверхностей, были проведены расчеты, результаты которых приведены на рис. 7. Условно границу между различными порядками отклонений поверхности [5] можно установить по значению отношения шага S_w к высоте неровностей W_z , где $S_w = R(2\psi)$, $W_z = \Delta$. Отклонения, у которых $\frac{S_w}{W_z} < 40$, относят к шероховатости поверхности, при $1000 \geq \frac{S_w}{W_z} \geq 40$ — к волнистости, при $\frac{S_w}{W_z} > 1000$ — к отклонениям формы.

Под волнистостью поверхности понимают совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными возвышенностями или впадинами превышают базовую длину.

Анализ расчетов показал, что для рассматриваемых исходных данных огранка, возникающая при планетарном фрезеровании наружной и внутренней цилиндрической поверхности, относится к отклонениям формы поверхности и волнистости.

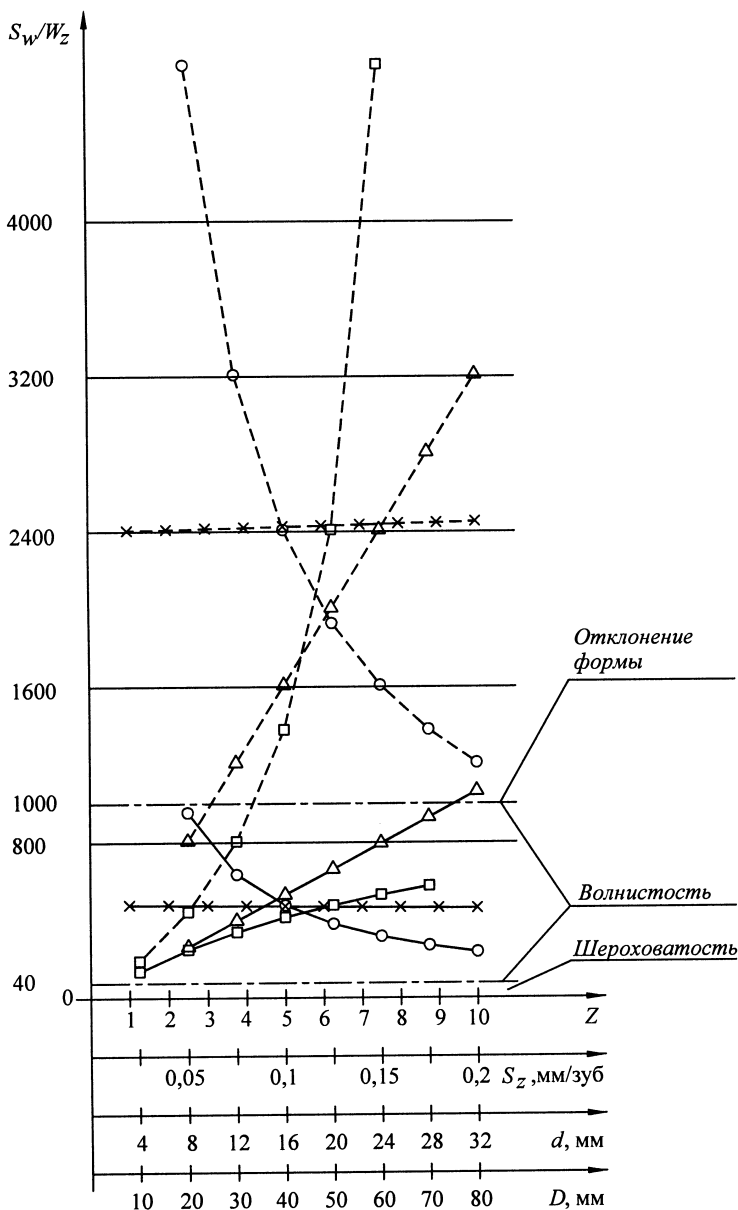


Рис. 7. Зависимости типов погрешности формы от режима резания, параметров обрабатываемой поверхности и инструмента (обозначения см. рис. 4)

Таким образом, на основе результатов исследования технологических возможностей планетарного фрезерования наружных и внутренних цилиндрических поверхностей можно сделать следующие выводы:

— в процессе планетарной обработки появляется погрешность, называемая огранкой, которая является результатом действия совокупного влияния главного вращательного движения инструмента и вспомогательного вращательного движения заготовки (или оси инструмен-

та относительно оси обрабатываемой поверхности), установленных с принятым эксцентриситетом;

– разработан алгоритм расчета геометрической погрешности – огранки, возникающей при планетарном фрезеровании наружных и внутренних цилиндрических поверхностей;

– огранку в зависимости от режимов резания и параметров инструмента можно отнести к погрешности формы или волнистости поверхности, ее максимальное значение для обработки наружной цилиндрической поверхности не превышает 0,851 мкм, а для обработки отверстия – 0,527 мкм при принятых режимах обработки;

– огранка при исследованных режимах не является ограничением по точности обработки. Например, при планетарном фрезеровании отверстия $\varnothing 30H7$ поле допуска на отверстие ($Td = 21$ мкм) значительно превышает величину огранки 0,065 мкм для следующих условий обработки: $D = 30$ мм, $d = 20$ мм, $S_z = 0,125$ мм/зуб, $z = 2$;

– сравнительный анализ величин огранки, рассчитанных по предложенному алгоритму, основанному на параметрическом виде описания траектории движения вершины инструмента, и методу “двух окружностей”, показал, что относительное изменение огранки не превышает 4 % при принятых исходных данных. Это позволит в дальнейшем рассчитывать величину огранки по приближенному методу “двух окружностей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

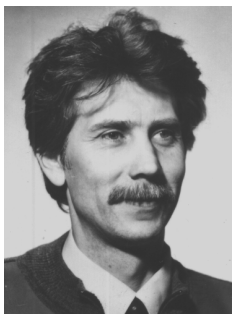
1. Мальков О. В., Литвиненко А. В., Жучкова И. В. Исследование технологических возможностей фрезерования отверстий инструментом с планетарным движением // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2005. – № 4(61). – С. 34–48.
2. Мальков О. В. Разработка и исследование комбинированного режущего инструмента для обработки отверстий сложного профиля. Дис. . . канд. техн. наук. – М, 1999. – 231 с.
3. Литвиненко А. В., Мальков О. В. Выбор наружного диаметра резцовой части сверлорезьбофрезы // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”, 1997. – № 3. – С. 78–84.
4. Литвиненко А. В., Мальков О. В. Общий случай профилирования зубьев резцовой части сверлорезьбофрезы // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 1997. – № 2. – С. 78–84.
5. Якушев А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М.: Машиностроение, 1979. – 344 с.

Статья поступила в редакцию 22.02.2006



Олег Вячеславович Мальков родился в 1970 г., окончил в 1994 г. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Инструментальная техника и технологии” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Специализируется в области создания комбинированных режущих инструментов.

O.V. Malkov (b. 1970) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1994. Ph. D. (Eng.), ass. professor of “Tooling engineering and technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of development of combined cutting tools.



Анатолий Васильевич Литвиненко родился в 1946 г., окончил в 1975 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Инструментальная техника и технологии” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 40 научных работ в области обработки металлов резанием.

A.V. Litvinenko (b. 1946) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1975. Ph.D.(Eng.), ass. professor of “Tooling engineering and technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 publications in the field of processing metals by cutting.



Людмила Дмитриевна Малькова родилась в 1969 г., окончила в 1993 г. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Старший преподаватель кафедры “Инструментальная техника и технологии”. Имеет 10 научных работ в области энергосбережения при обработке резанием, САПР режущего инструмента, применения вычислительной техники в учебном процессе.

L.N. Malkova (b. 1969) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1993. Senior teacher of “Tool Engineering and Technologies” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 10 publications in the field of power saving in treatment by cutting, systems of automated design of cutting tools, application of computing technology in educational process.



Ирина Вячеславовна Синцова родилась в 1980 г., окончила МГТУ им. Н.Э.Баумана в 2003 г. Аспирант кафедры “Инструментальная техника и технологии” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Специализируется в области повышения эффективности обработки корпусных деталей на основе концентрации технологических операций при обработке комбинированным инструментом.

I.V. Sintsova (b. 1980) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2003. Post-graduate of “Tooling engineering and technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of increasing the efficiency of processing of frame parts on the basis of concentration of technological operations by using combined tools.