

УДК 621.914.1

О. В. Мальков, А. В. Литвиненко,  
И. В. Жукова

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ИНСТРУМЕНТОМ С ПЛАНЕТАРНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

*Рассмотрены кинематические схемы фрезерования отверстий при планетарном движении инструмента, а также траектории движения зубьев инструмента. Приведен алгоритм расчета погрешности, возникающей при фрезеровании отверстия планетарно движущимся инструментом.*

В настоящее время повышение эффективности механической обработки корпусных деталей, особенно в условиях серийного производства, является актуальной задачей. Механическая обработка корпусных деталей имеет ряд особенностей: большие габаритные размеры заготовки; сложную конфигурацию детали с большим количеством конструктивных элементов, в том числе отверстий; значительное число операций обработки; широкую номенклатуру режущего, вспомогательного и контрольно-измерительного инструментов; большое количество технологической оснастки. Поэтому при обработке корпусных деталей необходимо применять принцип концентрации операций в пределах одной единицы оборудования, позволяющий значительно повысить производительность. Этому также способствует внедрение в производство оборудования с числовым программным управлением, в том числе многооперационных станков — обрабатывающих центров.

Преимущества концентрации операций на одной единице оборудования следующие: обработка ведется за один установ, что сокращает вспомогательное время и повышает точность обработки; уменьшается количество применяемого технологического оборудования, оснастки, а следовательно, уменьшаются и размеры участка и число обслуживающего персонала.

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

Чаще всего комбинированный инструмент [1] используется для обработки отверстий, содержащих несколько видов поверхностей, например, фаску, цековку, резьбовую поверхность, т. е. отверстий сложного профиля (ОСП). Обычно элементы отверстий в корпусных деталях обрабатываются стандартным набором инструментов (сверлом, зенкером, зенковкой, разверткой, метчиками) [2]. В настоящее время в связи с внедрением станков с ЧПУ появилась тенденция обработки отверстий методом фрезерования или комбинированным инструментом с планетарным движением за один проход.

Из существующих классификаций кинематических схем проф. Г.И. Грановского [3, 4] и А.О. Этин [5, 6] можно выделить несколько способов обработки конструктивных элементов отверстий различным инструментом методом фрезерования. Принципиальные кинематические схемы резания (табл. 1) выражают абсолютные движения, в процессе резания сообщаемые инструменту и обрабатываемому изделию механизмом станка. Существующие способы обработки отверстий, такие как сверление, зенкерование, развертывание и растачивание, основаны на кинематических схемах, реализующих два движения при резании, а протягивание — одно движение.

В классификации Г.И. Грановского [4] на основе анализа наиболее часто применяемых кинематических схем было выявлено три схемы, соответствующие фрезерованию отверстия.

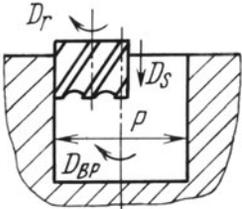
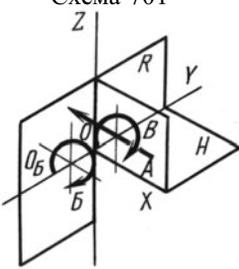
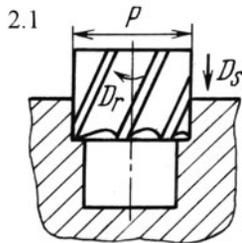
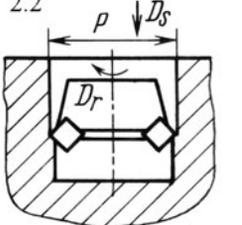
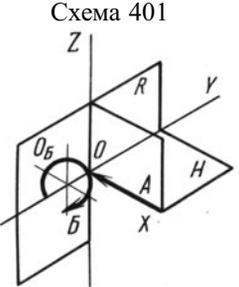
Схема 401 (см. табл. 1, п.п. 2.1, 2.2) выражает два одновременно действующих равномерных движения: прямолинейное движение А и вращательное движение Б. В настоящее время на ней основаны наиболее широко распространенные методы обработки металлов: точение проходными фасонными и расточными резцами, нарезание резьбы резцами, метчиками, плашками и гребенками; сверление, зенкерование и развертывание и т.д.

Схема 501 (см. табл. 1, п.п. 3.1, 3.2) пятой группы содержит два одновременно действующих вращательных движения А и Б. Основное применение кинематическая схема получила при фрезеровании тел вращения, а также используется для наружного протягивания тел вращения спиральными протяжками.

Схема 701 (см. табл. 1, п. 1) седьмой группы основана на сочетании трех одновременно действующих движений: двух равномерных вращательных движений А и Б и одного равномерного прямолинейного движения В. Основное применение кинематическая схема получила в резьбофрезеровании групповыми резьбовыми фрезами и зубодолблении спиральных зубчатых колес долбяками.

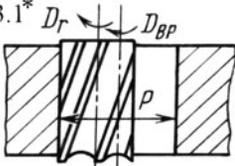
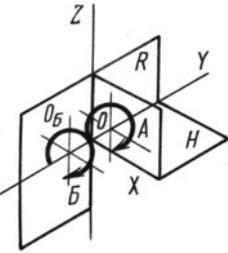
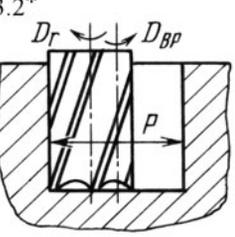
По классификации А.О. Этин и М.Е. Юхвид [6] (см. табл. 1) внутренние поверхности тел вращения могут обрабатываться цилиндри-

## Технологические возможности обработки отверстий фрезерованием

Способ обработки отверстия	Принципиальная кинематическая схема обработки [4]	Точность размера $P$ , квалитет [2]	Количество движений	Шероховатость $Ra$ [2]	Основное технологическое время $t_0$ , мин
1. Расточка глухого отверстия по методу фрезерования 	Схема 701 	9–10	3	1,6	0,415
2. Фрезерование глухого (сквозного) отверстия 2.1  2.2 	Схема 401 	9–10	2	1,6	0,692
		9–10	2	1,6	0,692

ческими, коническими и фасонными фрезами с круговой подачей на всю глубину резания или с круговой и радиальной подачами, а также цилиндрическими или коническими фрезами с круговой и продольной подачами.

Реализация выбранных кинематических схем стала возможной с появлением нового оборудования — станков с ЧПУ, обеспечивающих управление одновременно не менее, чем тремя координатами в про-

Способ обработки отверстия	Принципиальная кинематическая схема обработки [4]	Точность размера $P$ , квалитет [2]	Количество движений	Шероховатость $Ra$ [2]	Основное технологическое время $t_0$ , мин
3. Расточка сквозного (глухого) отверстия по методу фрезерования 3.1* 	Схема 501 	9–10	2	1,6	0,224
3.2* 		9–10	2	1,6	0,224

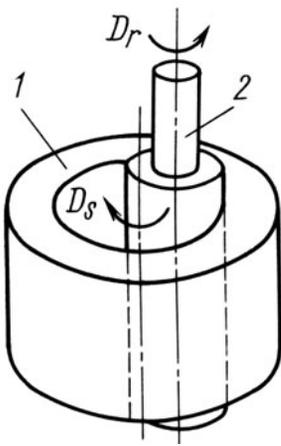
\* Аналогичные кинематические схемы приведены в классификации А.О.Этин и М.Е. Юхвид [5, 6]

цессе обработки, что позволяет осуществить планетарное движение инструмента.

В табл. 1 приведены варианты обработки отверстий концевой и торцевой фрезами (при условии предварительной обработки отверстия (см. табл. 1, п.п. 2.1, 2.2, 3.1, 3.2) или без нее (п. 1)). Варианты сравнивали по числу совершаемых инструментом и заготовкой движений, по основному технологическому времени обработки, а также по точности и шероховатости получаемой поверхности. Результаты анализа приведены в табл. 1.

Рассмотрим подробно обработку цилиндрического отверстия методом фрезерования (рис. 1 и 2). Расчет основного технологического времени обработки отверстия фрезерованием производился по следующей формуле:

$$T_0 = \frac{\pi D m}{S_z z n},$$



**Рис. 1. Схема планетарной обработки внутренней цилиндрической поверхности:**  
1 – заготовка; 2 – инструмент

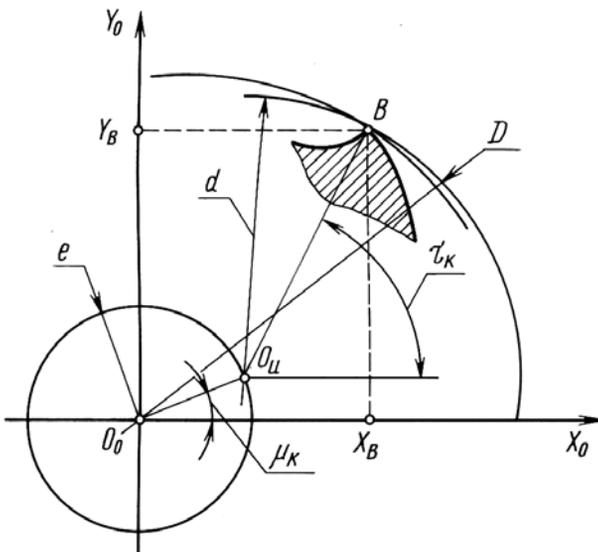
где  $d = 2r$  – диаметр инструмента, мм;  $D = 2R$  – диаметр обрабатываемого отверстия, мм;  $S_z$  – подача на зуб, мм/зуб;  $z$  – число зубьев;  $m$  – коэффициент превышения одного оборота планетарного вращения инструмента;  $n$  – частота вращения инструмента,  $\text{мин}^{-1}$ .

Расчетные режимы для табл. 1:  $D = 40$  мм, глубина отверстия  $l = 40$  мм,  $S_z = 0,07$  мм/зуб,  $z = 6$ ,  $v = 120$  м/мин; 1)  $d = 25$  мм, глубина резания за один оборот 18 мм; 2)  $d = 40$  мм; 3)  $d = 25$  мм.

Параметры обработки отверстия фрезерованием (см. рис. 2) [7, 8]:  $\mu_k$  – элементарный угол поворота центра инструмента вокруг оси отверстия, рад.;  $\xi = \frac{2S_z z}{D}$  – угол поворота центра инструмента относительно центра изделия за один оборот инструмента вокруг своей оси, рад.;  $\tau_k = \frac{2\pi\mu_k}{\xi} = \frac{\pi D\mu_k}{S_z z}$  – угол поворота вершины зуба вокруг

оси инструмента, рад.;  $e = \frac{D-d}{2}$  – эксцентриситет, мм.

Нужно отметить, что отверстие обрабатывается за один проход инструмента на всю длину обрабатываемого отверстия. Схема для расчета координат точки В в вершине зуба инструмента соответствует схеме обработки на рис. 2, где  $X_0 Y_0 Z_0$  – система координат отверстия.



**Рис. 2. Схема обработки отверстия фрезерованием**

Траектория движения вершины (точка В, см. рис. 2) инструмента при планетарном фрезеровании отверстия описывается системой уравнений [7, 9]:

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

В процессе планетарного движения инструмента в обработанном отверстии проявляется погрешность формы — огранка. В общем случае огранка (рис. 3) — это отклонение от правильной геометрической формы, которое выражается в том, что контур сечения в плоскости, перпендикулярной к оси цилиндра, представляет собой ряд сопряженных дуг с разными центрами. За величину огранки принимают разность между диаметром окружности, в которую полностью вписывается контур сечения, и расстоянием между параллельными плоскостями, касательными к поверхности изделия.

Известно, что в случае обработки отверстия по схемам 501, 701 (см. табл. 1, п.п 1, 3.1, 3.2) вершина зуба инструмента описывает удлиненную эпициклоиду [10] (рис. 4). На рис. 5 приведена удлиненная эпициклоида движения вершины зуба фрезы при принятых исходных данных, рассчитанная согласно системе уравнений (1) (сплошной линией показана траектория зуба фрезы при  $z = 1$ , штриховой — движение второго зуба при  $z = 2$ ).

Для математической оценки величины огранки  $\Delta$  составлен алгоритм, приведенный на рис. 6, где  $\delta = 0,001$  рад — шаг итерации параметра  $\mu$ ;  $\mu_{нач} = 0$  — начальное значение параметра  $\mu$ ;  $\varepsilon$  — бесконечно малая величина, связана с условиями расчета в MS Excel.

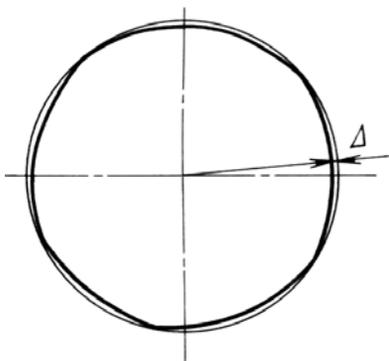


Рис. 3. Отклонение формы цилиндрической детали — огранка

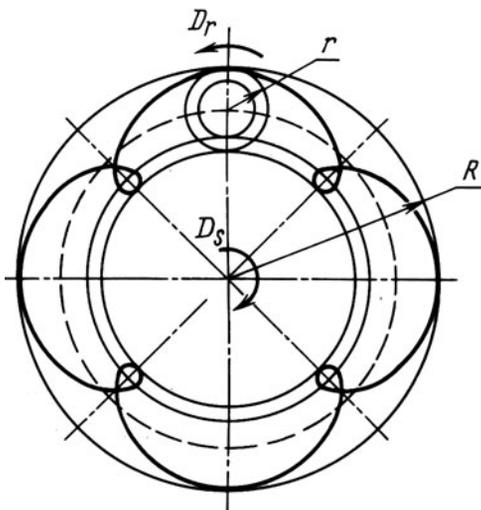
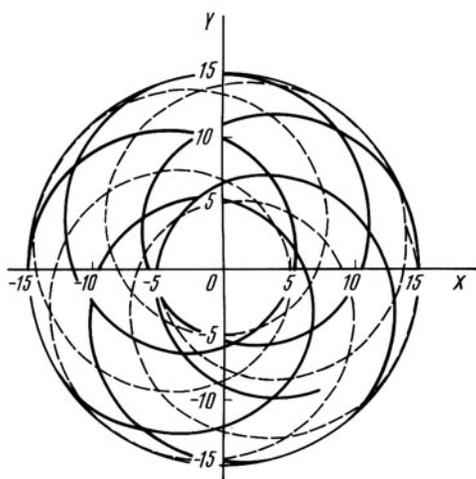


Рис. 4. Удлиненная эпициклоида



**Рис. 5. Траектория движения зубьев инструмента при планетарном движении:**  
 $D = 30$  мм;  $d = 20$  мм;  $S_z = 10$  мм/зуб;  
 $e = 5$  мм

Установлено, что на величину огранки  $\Delta$  оказывают влияние следующие факторы: диаметр отверстия  $d$ , соотношение диаметров отверстия и инструмента  $D/d$ , число зубьев инструмента  $z$  и подача на зуб фрезы  $S_z$ .

Анализ траекторий движения зубьев показал, что максимальное значение огранки в случае  $z > 1$  наблюдается между соседними зубьями. Поэтому при расчете огранки по алгоритму (см. рис. 6) для  $z > 1$  в системе  $X_0Y_0$  учитывался сдвиг зубьев по параметру  $\tau$  на угол  $\frac{2\pi}{z}$ :

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

Согласно алгоритму расчета величины огранки  $\Delta$  при фрезеровании отверстия (см. рис. 6) была составлена программа в MS Excel. Расчет величины огранки при  $z > 1$  производится по аналогичному алгоритму в соответствии с траекториями движения двух соседних зубьев инструмента (рис. 7, б и в) с учетом сдвига (2).

С целью выявить характер влияния параметров  $D$ ,  $d$ ,  $S_z$ ,  $z$  были построены графики зависимостей (рис. 8)  $\Delta = f(S_z)$ ,  $f(D/d)$ ,  $f(z)$ ,  $f(d)$ . Анализ графиков показывает, что величина огранки возрастает с увеличением параметра режима резания  $S_z$  и уменьшается с ростом числа зубьев и диаметра инструмента, что позволяет выбрать необходимые при обработке параметры.

Проведено сравнение величины огранки  $\Delta$ , рассчитанной по алгоритму (см. рис. 6) и по приближенному методу “двух окружностей” (рис. 9). При сравнении параметр  $\varphi$  брали на основе расчета угла  $\varphi$  по алгоритму (см. рис. 6).

Из треугольника  $AO_0B$  по теореме косинусов находим радиус кривизны траектории движения зуба фрезы

$$r = \sqrt{e^2 + \rho^2 - 2e\rho \cos \varphi},$$

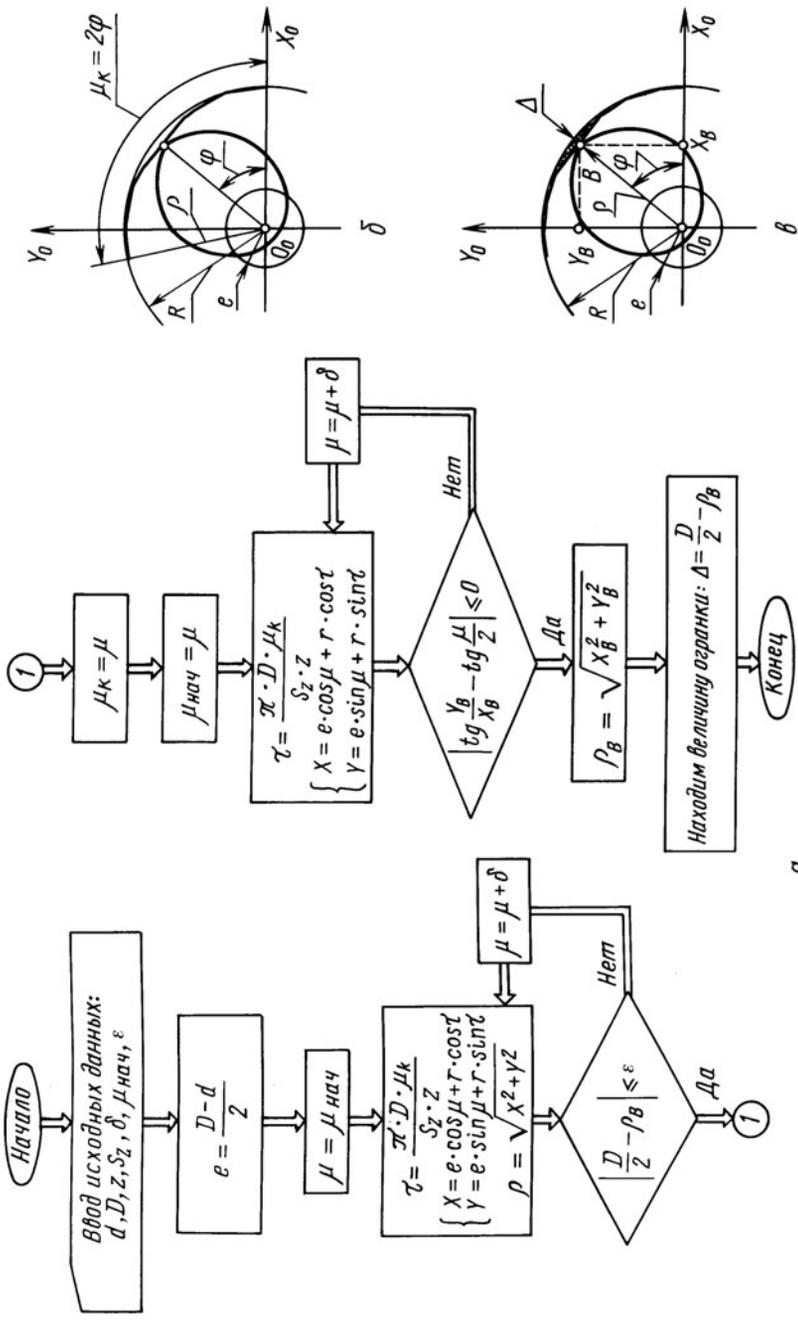
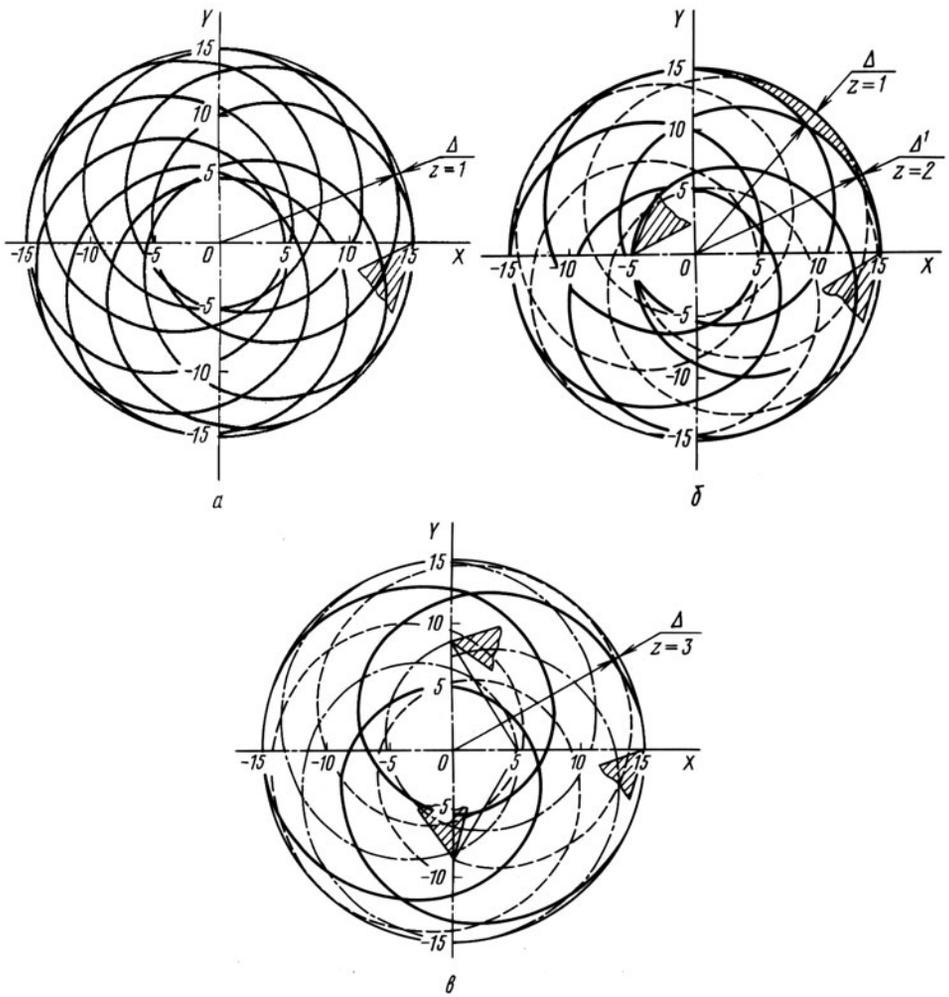


Рис. 6. Алгоритм расчета величины огранки при фрезеровании отверстия планетарно движущимся инструментом



**Рис. 7. Траектория движения зубьев при планетарной обработке:**

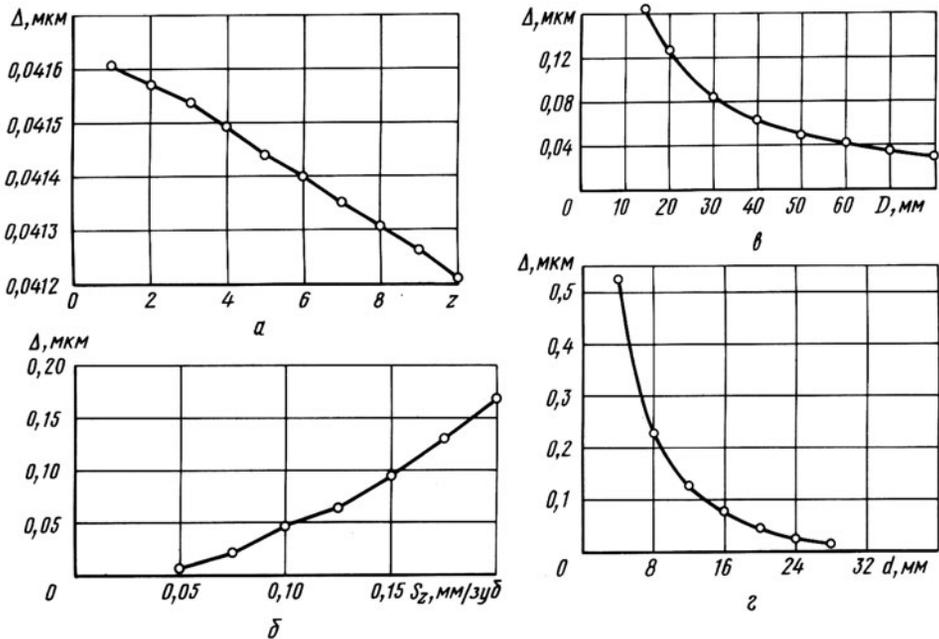
$D = 30$  мм;  $d = 20$  мм;  $S_z = 10$  мм/зуб;  $e = 5$  мм; а; б; в –  $z = 1; 2; 3$  соответственно откуда

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

Величина огранки при фрезеровании отверстия (см. рис. 9)

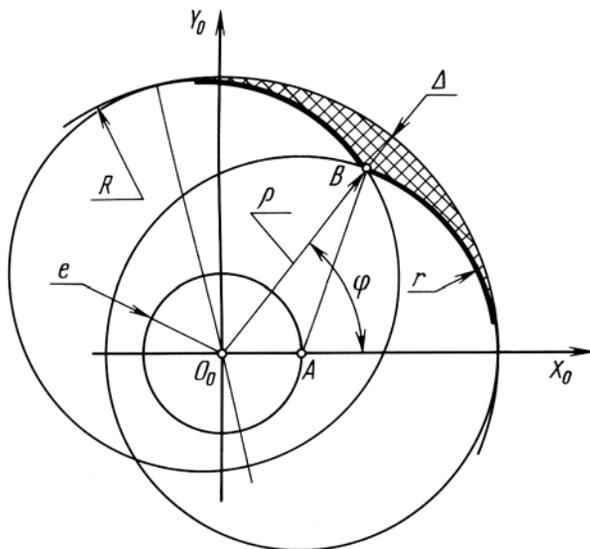
$$\Delta = R - \rho = R - e \cos \varphi - \sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 \varphi}.$$

Расчетные величины огранки по методу, приведенному на рис. 6, и по “методу двух окружностей” для различных исходных данных представлены в табл. 2. Анализ величины огранки (см. табл. 2) показывает, что, например, при фрезеровании отверстия  $\varnothing 30H7$  поле допуска ( $T_d = 21$  мкм) значительно превышает величину огранки, что позволяет сделать вывод о том, что огранка при фрезеровании не является ограничением по точности обработки.



**Рис. 8. Графики зависимостей величины огранки от параметров отверстия и инструмента:**

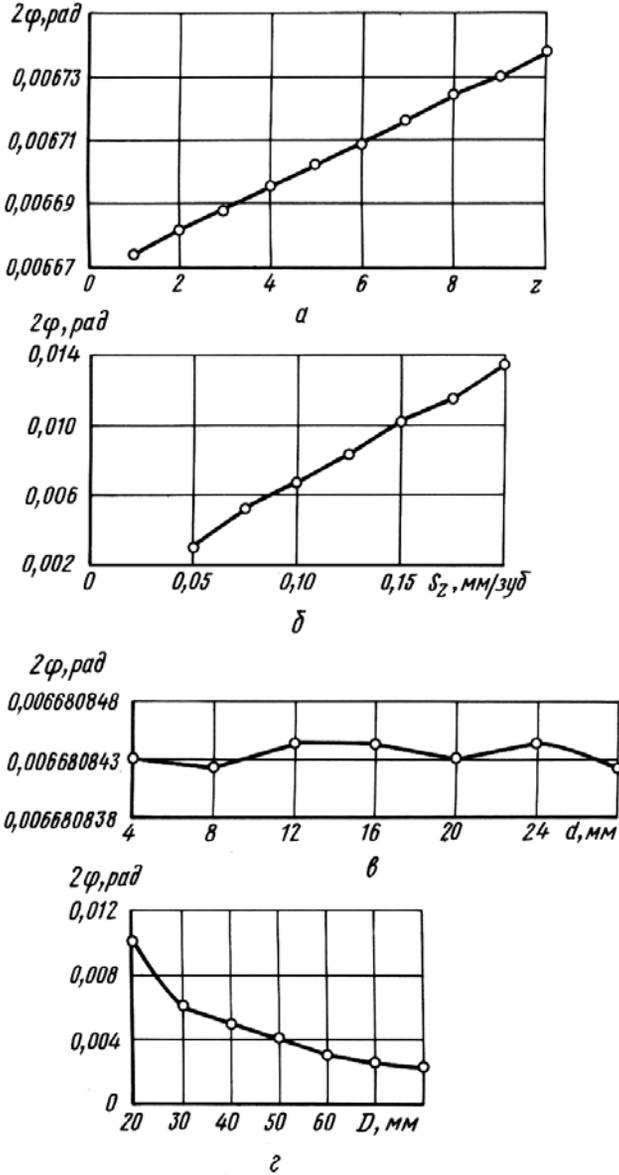
$a$  – от числа зубьев  $z$  инструмента;  $b$  – от подачи на зуб  $S_z$ ;  $v$  – от соотношения диаметров отверстия и инструмента;  $z$  – от диаметра  $d$  инструмента;  $D = 30$  мм;  $d = 20$  мм;  $S_z = 0,1$  мм/зуб;  $z = 2$



**Рис. 9. Схема для расчета огранки по методу “двух окружностей”**

Примеры траекторий движений зубьев фрезы при  $z = 1, 2, 3$  приведены на рис. 7, где также указана величина огранки.

При проведении анализа влияния конструктивных параметров инструмента на элементарный угол поворота центра инструмента вокруг оси отверстия ( $2\varphi$ ) (см. рис. 6 и 10) было установлено, что с увеличе-



**Рис. 10. Графики зависимости величины угла  $2\varphi$  от параметров отверстия и инструмента:**

$a$  — от числа зубьев  $z$  инструмента;  $b$  — от подачи на зуб  $S_z$ ;  $b$  — от диаметра  $d$  инструмента;  $z$  — от диаметра  $D$  отверстия ( $D/d = 2$ );  $d = 20$  мм;  $D = 30$  мм;  $z = 2$ ;  $S_z = 0,1$  мм/зуб

нием числа зубьев инструмента и подачи на зуб угол  $2\varphi$  возрастает. При варьировании диаметра инструмента элементарный угол поворота центра инструмента вокруг оси отверстия остается постоянным, а с возрастанием диаметра обрабатываемого отверстия при соотношении  $D/d = 2$ , угол  $2\varphi$  уменьшается.

Для определения типа погрешности, к которому можно отнести огранку, возникающую при планетарном фрезеровании отверстия, были проведены расчеты, результаты которых приведены в табл. 2. Границу между различными порядками отклонений поверхности [11] условно можно установить по величине отношения шага  $S_w$  к высоте неровностей  $W_z$ , где  $S_w = R2\varphi$ ,  $w_z = \Delta$ . Отклонения, у которых отношение  $\frac{S_w}{W_z} < 40$ , определяют шероховатость поверхности, при  $1000 \geq \frac{S_w}{W_z} \geq 40$  – волнистость, при  $\frac{S_w}{W_z} > 1000$  – отклонения формы.

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

В табл. 2 приведены результаты расчетов отношения шага  $S_w$  к высоте неровностей  $W_z$ . Анализ расчетов показал, что для рассматриваемых исходных данных наиболее часто огранка, возникающая при планетарном фрезеровании отверстия, относится к отклонениям формы поверхности.

Таким образом, по результатам проведенного анализа технологических возможностей фрезерования отверстий инструментом с планетарным движением можно сделать следующие выводы:

1. Современные обрабатывающие центры и станки с ЧПУ позволяют реализовать принцип концентрации технологических операций при применении инструмента с планетарным движением для фрезерования отверстий;

2. Планетарное фрезерование отверстий можно осуществлять как стандартным инструментом (фрезами), так и комбинированным инструментом;

3. В процессе планетарной обработки появляется погрешность, называемая огранкой, которая при исследованных режимах не является ограничением по точности обработки;

4. Огранку в зависимости от режимов резания и параметров инструмента можно отнести к погрешности формы или волнистости поверхности.

### Определение вида погрешности обрабатываемой поверхности

Исходные данные		z	d, мм	S <sub>z</sub> , мм/зуб	Огранка Δ <sub>1</sub> = W <sub>z</sub> , мкм	Огранка по "методу двух окружностей", Δ <sub>2</sub> , мкм	$\frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\Delta_1} \times 100\%$	S <sub>w</sub> , мкм	$\frac{S_w}{W_z}$	Примечание	
											Огранка Δ <sub>1</sub> = W <sub>z</sub> , мкм
30		1			0,041622698	0,041755096	0,31809	100,1061406	2405		
		2			0,041578329	0,04184399	0,63894	100,2126438	2410		
		3			0,041533643	0,041933128	0,96183	100,3193263	2415		
		4			0,041490358	0,04202254	1,28266	100,4262216	2420		
		5	0,1		0,041446444	0,042112237	1,60639	100,5333452	2426	Отклонение формы	
		6			0,041402445	0,042202223	1,93171	100,6406987	2431		
		7			0,041352716	0,042292496	2,27259	100,7482793	2436		
		8			0,041315164	0,042383061	2,58475	100,8560932	2441		
		9			0,041271547	0,0473916	2,91331	100,9641353	2446		
		10			0,041227999	0,042565064	3,24310	101,0724112	2452		
30				0,05	0,010405666	0,010438803	0,31844	50,053108	4810		
				0,075	0,02340025	0,023512043	0,47774	75,11920836	3210		
				0,1	0,041578329	0,04184399	0,63894	100,2126432	2410		
			20		0,064931671	0,065450765	0,79944	125,3324526	1930		Отклонение формы
				0,15	0,093449241	0,094349346	0,96320	150,478989	1610		
				0,175	0,127130987	0,128556574	1,12135	175,6523046	1382		
		0,2	0,165961008	0,168089335	1,28242	200,8524438	1210				

Исходные данные				Огранка по методу "двух окружностей" $\Delta_2$ , мкм	$\frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\Delta_1} \times 100\%$	$S_w$ , мкм	$\frac{S_w}{W_z}$	Примечание
$D$ , мм	$d$ , мм	$z$	$S_z$ , мм/зуб					
30	4			0,544024686	3,21581	100,2124755	190	
	8			0,230145142	1,59381	100,2126321	442	Волнистость
	12			0,125532353	1,06856	100,2126569	807	
	16	2	0,1	0,072646526	0,79907	100,2126557	1379	
30	20			0,04184399	0,63898	100,2126438	2410	Отклонение формы
	24			0,020922004	0,53237	100,2126574	4815	
	28			0,005950569	0,005977715	100,2126362	16841	
	10			0,124207753	1,28138	100,3193262	808	Волнистость
30	15			0,083688062	0,84613	100,2126579	1208	
	20			0,062301324	0,63892	100,1594074	1608	
	25			0,049872902	0,51059	100,1274863	2008	Отклонение формы
	30	2	0,1	0,041578383	0,42530	100,106216	2408	
70	35			0,03564913	0,36522	100,0910285	2808	
	40			0,031199701	0,31688	100,0776834	3208	

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ж а р л и к о в Н. В. Комбинированные режущие инструменты. – М.: Свердловск: Машгиз. Урало-Сибирское отд-ние, 1961. – 78 с.
2. С п р а в о ч н и к технолога-машиностроителя: В 2 т/ Под. ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.
3. Г р а н о в с к и й Г. И., Г р а н о в с к и й В. Г. Резание металлов: Учебник для машиностроительных и приборостроительных специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
4. Г р а н о в с к и й Г. И. Кинематика резания. – М.: Машгиз, 1948. – 200 с.
5. Д и н а м и к а процесса резания металлов / Под ред. Каширина И.А. // Этин А.О. Сравнительный анализ методов обработки поверхностей тел вращения. – М.: Машгиз, 1953. – 188 с.
6. Э н т и н А. О., Ю х в и д М. Е. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом. – М.: ЭНИМС, 1994. – 185 с.
7. М а л ь к о в О. В. Разработка и исследование комбинированного режущего инструмента для обработки отверстий сложного профиля. Дисс. ... на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М., 1999. – 231 с.
8. Л и т в и н е н к о А. В., М а л ь к о в О. В. Выбор наружного диаметра резьбовой части сверлорезьбофрезы // Вестник МГТУ. Серия “Машиностроение”. – 1997. – № 3. – С. 78–84.
9. Л и т в и н е н к о А. В., М а л ь к о в О. В. Общий случай профилирования зубьев резьбовой части сверлорезьбофрезы // Вестник МГТУ. Серия “Машиностроение”. – 1997. – № 2. – С. 78–84.
10. В ы г о д с к и й М. Я. Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1977. – 872 с.
11. Я к у ш е в А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М.: Машиностроение, 1979. – 34 с.

Статья поступила в редакцию 25.10.2004



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.