

УДК 621.914.1

О. Н. КЛЯУС

А. А. ЖОЛОБОВ, канд. техн. наук, проф.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

Аннотация

Рассмотрена методика теоретического определения наиболее эффективного метода высокоскоростной обработки отверстий фрезерованием на основе комплексного критерия – основное время T_o + работа A .

Ключевые слова:

высокоскоростная обработка фрезерованием, отверстие, фреза, круговая интерполяция, винтовая интерполяция.

Введение. Высокоскоростная обработка (ВСО) отверстий фрезерованием достигла значительного прогресса. Этот метод обеспечивает более эффективное получение точной и качественной поверхности детали по сравнению с растачиванием. В ВСО существует два метода: круговая и винтовая интерполяции [1]. Рекомендации для каждого из них имеют ориентировочный характер, но примеры предпочтительного применения одного или другого метода очень редки.

В связи с этим предлагается методика выбора наиболее эффективного метода высокоскоростной обработки отверстий фрезерованием с точки зрения основного времени T_o и работы A , затрачиваемых на процесс на основании зависимостей [1].

Материалы и методы исследования. При фрезеровании отверстия методом винтовой интерполяции длина рабочего хода центра инструмента L_p для каждого i -го рабочего хода в направлении осевой подачи рассчитывается следующим образом:

$$L_{pi} = N \cdot \sqrt{(\pi \cdot D_{vfi})^2 + h^2}, \quad (1)$$

где N – количество витков; h – шаг интерполяции, мм; D_{vfi} – диаметр траектории центра инструмента на текущем переходе, мм [1]; $i = 1 \dots n$.

$$D_{vfi} = D_{mi} - DC, \quad (2)$$

где D_{mi} – диаметр отверстия, полученного на текущем переходе (на начальном этапе $D_m = D_1$), мм; D_1 – начальный диаметр отверстия, мм; DC – диаметр инструмента, мм.

Соответственно, основное время для каждого i -го рабочего хода имеет свое

значение. Следовательно, основное время, затрачиваемое на обработку отверстия, будет равно

$$T_o = \sum T_{oi}, \quad (3)$$

где T_{oi} – основное время i -го рабочего хода, с.

Основное время i -го рабочего хода

$$T_{oi} = \frac{L_{pi}}{S_m}, \quad (4)$$

где S_m – минутная подача, мм/мин.

Количество витков N определяется следующим образом:

$$N = \frac{L}{h}, \quad (5)$$

где L – длина отверстия, мм.

Согласно режимам резания при ВСО фрезерованием отверстия методом винтовой интерполяции шаг интерполяции h должен быть меньше или равен максимально допустимой глубине резания в осевом направлении для выбранного инструмента [1].

Основное время при фрезеровании отверстия методом круговой интерполяции определяется по формуле (3), однако для каждого i -го рабочего хода является суммой времени, затраченного на прохождение фрезой траектории по окружности, и времени, затраченного на осевое перемещение фрезы:

$$T_{o2i} = \left(\frac{L_{p.k.i} + L_{p.p.i} + L_{p.o.}}{S_m} \right) \cdot g, \quad (6)$$

где $L_{p.k.i}$ – длина рабочего хода центра инструмента по i -й окружности, мм; $L_{p.o.}$ – длина рабочего хода инструмента в направлении осевой подачи, мм; $L_{p.p.i}$ – длина рабочего хода инструмента в направлении i -й радиальной подачи, мм; g – количество холостых ходов в осевом направлении,

$$g = \frac{L}{L_{p.o.}}. \quad (7)$$

Длина рабочего хода центра инструмента $L_{p.k.i}$ по i -й окружности рассчитывается следующим образом:

$$L_{p.k.i} = \pi \cdot D_{vf_i}. \quad (8)$$

Длина рабочего хода инструмента $L_{p.o.}$ в направлении осевой подачи должна быть меньше или равна максимально допустимой глубине фрезерования в осевом направлении для выбранного инструмента.

Длину рабочего хода инструмента $L_{p.p.i}$ в направлении i -й радиальной подачи определяют по формуле

$$L_{p.p.i} = \frac{D_{mi} - DC}{2} . \quad (9)$$

При фрезеровании дна отверстия необходимо рассчитать длину рабочего хода фрезы. Для этого следует рассмотреть траекторию перемещения фрезы. Согласно рис. 1 при снятии припуска фреза перемещается по спиральной траектории с равномерным шагом. Такая траектория называется спиралью Архимеда. Однако спираль Архимеда (рис. 2) отличается от представленной на рис. 1.

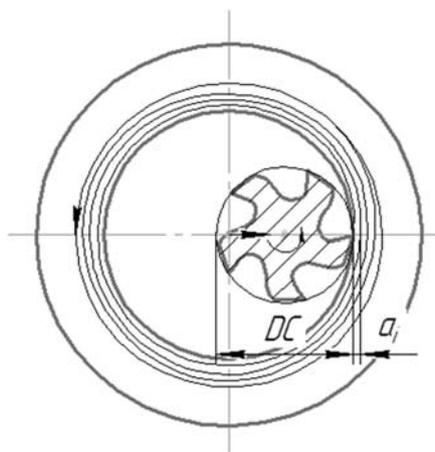


Рис. 1. Траектория движения фрезы при обработке дна ступенчатого отверстия

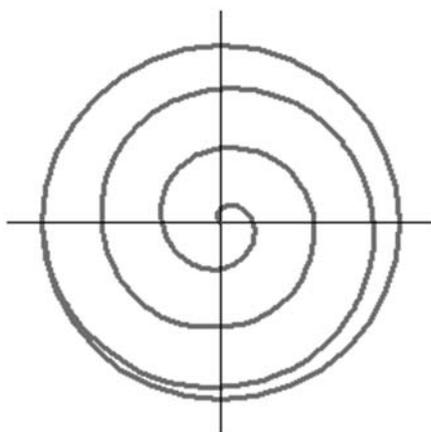


Рис. 2. Спираль Архимеда

Уравнение спирали Архимеда (см. рис. 2) имеет вид

$$r = k \cdot \varphi, \quad (10)$$

где φ – угол поворота спирали; k – коэффициент пропорциональности,

$$k = \frac{a}{2 \cdot \pi} ; \quad (11)$$

a – шаг спирали.

В рассматриваемом случае (см. рис. 1) обработка начинается на некотором расстоянии от центра координат, равном

$$r_1 = \frac{D_1}{2}, \quad (12)$$

где D_1 – начальный диаметр отверстия, подлежащего обработке.

Тогда для рис. 1 формула траектории имеет вид

$$r = r_1 + k \cdot \varphi. \quad (13)$$

Длина одного витка архимедовой спирали

$$L_{p.в} = \frac{1}{2} \cdot \left[(r_1 + 2 \cdot \pi \cdot k) + \sqrt{k^2 + (r_1 + 2 \cdot \pi \cdot k)^2} + k \cdot \ln \left[(r_1 + 2 \cdot \pi \cdot k) + \sqrt{k^2 + (r_1 + 2 \cdot \pi \cdot k)^2} \right] \right]. \quad (14)$$

Для траектории, представленной на рис. 1, $a = a_i = a_{ei}$ (где a_{ei} – припуск в радиальном направлении, снимаемый за один виток). Один виток спирали равен 2φ . Количество витков спирали находится по формуле

$$N_{д.о.} = \frac{D - D_1}{2 \cdot a_{ei}}, \quad (15)$$

где D – диаметр получаемого отверстия на i -м рабочем ходе, мм; D_1 – начальный диаметр отверстия.

Тогда длина рабочего хода фрезы при обработке дна отверстия (см. рис. 1) будет равна

$$L_p = N_{д.о.} \cdot L_{p.в}. \quad (16)$$

Формулы (1)–(16) были применены для отверстия диаметром 70 мм с длиной поверхности, равной 30 мм, изготавливаемого по 8-му качеству точности и имеющего шероховатость 2,5 мкм по критерию r_a .

Условие для выбора инструмента [2]

$$D_\phi = \frac{D_o}{2} = \frac{38}{2} = 19 \text{ мм.}$$

Для рассматриваемого примера в соответствии с каталогом [1] выбрана концевая фреза 2F342-2000-200-PC 1730 со следующими параметрами: $D_\phi = 20$ мм, $z = 5$, $a_p = 42$ мм, $n_{\max} = 11700$ мин⁻¹.

Частота вращения шпинделя для черновой обработки $n_{\text{черн}} = 9500$ мин⁻¹, для чистовой – $n_{\text{чист}} = 11700$ мин⁻¹. Глубина резания в радиальном направлении на

сторону за один рабочий ход $t_e = 10 \% \cdot D_\phi = 2$ мм, а на диаметр – $2 \cdot t_e = 4$ мм. Глубина фрезерования в осевом направлении для круговой интерполяции $l_{p.o.} = 30$ мм [1], для винтовой – шаг $h = 30$ мм [1]. Количество рабочих ходов в осевом направлении для круговой g и винтовой N интерполяций – 1.

Наиболее оптимальные режимы резания отверстия $D = 70$ мм, $L = 30$ мм (табл. 1) были определены в соответствии с [2, 3].

Табл. 1. Оптимальные режимы резания

Параметр	Черновой рабочий ход	Чистовой рабочий ход
Скорость резания V , м/мин	596,6	734,76
Подача на зуб F_z , мм	0,2	0,1
Частота вращения шпинделя n , мин ⁻¹	9500	11700
Минутная подача на обрабатываемом диаметре S_M , мм/мин	9500	5850
Минутная подача у центра инструмента $S_{ЦМ}$, мм/мин	6706	4179
Глубина фрезерования в радиальном направлении на сторону a_e , мм	2	1
Количество рабочих ходов в радиальном направлении	8	1
Старт обработанного диаметра D_n , мм	38	68
Конец обработанного диаметра D_k , мм	68	70
Мощность резания P , кВт	1,25	0,94

Заключение. В результате проведенных экспериментов было установлено, что при высокоскоростной обработке отверстия диаметром $D = 70$ мм и длиной $L = 30$ мм использование метода винтовой интерполяции оказывается более эффективным, чем круговой, в связи с тем, что общее время, затраченное на винтовую интерполяцию, составило $T_{o\epsilon} = 10,630$ с, в то время как для круговой интерполяции время $T_{o\kappa} = 14,506$ с (табл. 2 и 3). Также была измерена общая работа, затраченная на обработку, которая составила $A_\epsilon = 12,576$ кДж (для винтовой интерполяции) и $A_\kappa = 17,189$ кДж (для круговой).

Табл. 2. Основное время T_o и работа A , затрачиваемые при винтовой интерполяции

N	D_i , мм	$D_{\phi i}$, мм	L_{pi} , мм	T_o , с	$T_{o\epsilon} = \Sigma T_o$, с	A_i , кДж	$A_\epsilon = \Sigma A$, кДж
1	42	22	75,31	0,674	10,630	0,842	12,576
	46	26	86,98	0,778		0,973	
	50	30	98,86	0,885		1,106	
	54	34	110,89	0,992		1,240	
	58	38	123,03	1,101		1,376	
	62	42	135,25	1,210		1,513	
	66	46	147,52	1,320		1,650	
	68	48	153,68	1,375		1,719	
	70	50	159,84	2,295		2,157	

Табл. 3. Основное время T_o и работа A , затрачиваемые при круговой интерполяции

g	$L_{p.p.i.}, \text{ мм}$	$D_i, \text{ мм}$	$D_{ци}, \text{ мм}$	$L_{p.к.и}, \text{ мм}$	$T_{oi}, \text{ с}$	$T_{ок} = \sum T_o, \text{ с}$	$A_i, \text{ кДж}$	$A_k = \sum A, \text{ кДж}$
1	11	42	22	69,08	0,985	14,506	1,231	17,189
	13	46	26	81,64	1,115		1,394	
	15	50	30	94,2	1,245		1,557	
	17	54	34	106,76	1,376		1,720	
	19	58	38	119,32	1,506		1,883	
	21	62	42	131,88	1,636		2,045	
	23	66	46	144,44	1,767		2,208	
	24	68	48	150,72	1,832		2,290	
	25	70	50	157	3,044		2,861	

Представленные выше исследования будут использованы для разработки условий выбора оптимального варианта обработки гладких и ступенчатых отверстий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог SANDVIK COROMANT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sandvik.coromant.com.ru>. – Дата доступа: 19.01.2023.

2. Оленин, Л. Д. О некоторых особенностях фрезерования в режиме высокоскоростной обработки (ВСО) / Л. Д. Оленин, Д. И. Очечкин // Изв. МГУ «МАМИ». – 2014. – № 3 (21). – С. 25–31.

3. Богодухов, С. И. Технологические процессы в машиностроении / С. И. Богодухов, Р. М. Сулейманов, А. Д. Проскурин. – Москва: Инновационное машиностроение, 2021. – 640 с.: ил.

Контакты:

klyaus.olya@yandex.by (Кляус Ольга Николаевна);

brn_aa@mail.ru (Жолобов Александр Алексеевич).

O. N. KLYAUS, A. A. ZHOLOBOV

ON THE ISSUE OF CHOOSING THE OPTIMAL METHOD OF HIGH-SPEED HOLE MILLING

Abstract

The article considers the method of theoretical determination of the most effective method of high-speed processing of VSO holes by milling on the basis of a complex criterion – the main time T_o + work A .

Keywords:

high-speed milling, hole, milling cutter, circular interpolation, screw interpolation.