

УДК 621.9.02

## РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ОГРАНКИ ПРИ ВИХРЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

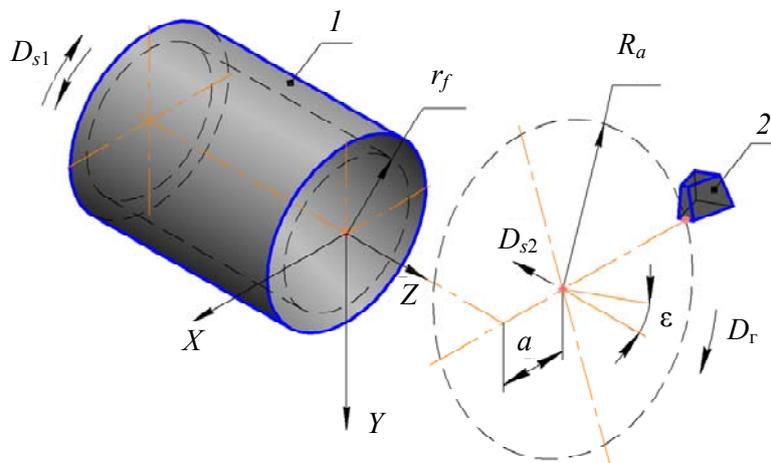
**М. И. МИХАЙЛОВ, Д. В. НИКИТЕНКО, В. И. КУЗЬМИЧ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** вихревая обработка, огранка, цилиндрические поверхности.

### Введение

Одним из высокопроизводительных методов обработки цилиндрических и винтовых поверхностей деталей машин является метод вихревого фрезерования [1], [2], схема которого представлена на рис. 1. Он позволяет обрабатывать цилиндрические поверхности валов, резьбы ходовых винтов станков, тяговых винтов прессов, червяки червячных передач и другие детали, имеющие винтовые поверхности. Несмотря на то что метод вихревого фрезерования известен с 50-х гг. XX. в [3], в последнее время к нему проявляется повышенный интерес [4]–[6].



*Рис. 1. Схема вихревого фрезерования: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – резец;  
 $r_f$  – радиус обработанной поверхности;  $R_a$  – радиус вершин инструментальной головки;  
 $\varepsilon$  – угол наклона инструментальной головки;  $a = R_a - r_f$  – кратчайшее расстояние  
между осями заготовки и инструментальной головки;  $D_r$  – главное движение резания;  
 $D_{s1}, D_{s2}$  – движения подачи*

Одной из особенностей вихревого фрезерования поверхностей является так называемая «огранка» [1]. От величины огранки зависит работоспособность деталей машин. Так, продольные неровности винтовых канавок шарико-винтовых передач вызывают высокочастотное радиальное биение шариков, что может приводить к вибрациям, повышенному износу, потере кинематической точности и выходу передачи винт-гайка из строя [7].

Анализ работ, посвященных расчету огранки поверхности, обработанной охватывающим фрезерованием [1], [2], [6], [8]–[11], позволил выявить четыре формулы

(табл. 1). При выводе формул (1)–(4) в качестве траектории движения точки режущей кромки инструмента упрощенно принималась окружность, анализ погрешностей вносимых этим упрощением не производился. Кроме того, все эти формулы не учитывают влияние угла наклона инструментальной головки на шероховатость, т. е. при выводе формул принято, что оси вращения обрабатываемой детали и инструмента параллельны. Формула (4), в отличие от формул (1)–(3), позволяет выполнять расчет как для встречного (знак «плюс») так и для попутного фрезерования (знак «минус»). Формулы (2) и (3) для расчета совпадают, в чем можно убедиться, подставив в них параметры вихревого фрезерования согласно табл. 1.

Интерес представляет статья [12], в которой процесс охватывающего фрезерования при параллельных осях вращения инструмента и обрабатываемой детали анализировался на основе проекции на плоскость реальной траектории движения точки режущей кромки инструмента – удлиненной эпициклоиде при встречном фрезеровании и удлиненной гипоциклоиде при попутном фрезеровании. Однако расчет грани обработанной поверхности в этой статье не производился.

Таблица 1

## Формулы для определения величины огранки

Формулы	Параметры вихревого фрезерования (рис. 1)				Источ-ник
	$n_n$	$n_d$	$r_f$	$R_a$	
$y_o = 5b \left( \frac{N}{nz} \right)^2$ (1)	$n$	$N$	–	–	[2]
$h_{ор} = \sqrt{r_p^2 - e^2 \left( \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2} - \left( e \cdot \cos \frac{\varphi}{2} + r_1 \right)$ где $\varphi = \frac{360 \cdot n_n}{n_p z}$ , $e = r_p - r_1$	$n_p$	$n_n$	$r_1$	$r_p$	[1]
$\Delta = \sqrt{r_2^2 - L_{мц}^2 \left( \sin \frac{\xi}{2} \right)^2} - L_{мц} \cdot \cos \frac{\xi}{2} - (R - t)$ где $\xi = \frac{2\pi \cdot n_a}{n_b z}$ , $L_{мц} = r - R + t$	$n_b$	$n_a$	$R - t$	$r$	[8], [9]
$h = \frac{\frac{d_3}{2} \left( 1 - \cos \frac{180 \cdot V_3 d_{пр}}{z d_3 (V_{пр} \pm V_3)} \right) - \frac{d_{пр}}{2} \left( 1 - \cos \frac{1,8}{z} \right)}{\cos \frac{180 \cdot V_3 d_{пр}}{z d_3 (V_{пр} \pm V_3)}}}$ (4)	$\frac{1000 \cdot V_{пр}}{\pi d_{пр}}$	$\frac{1000 \cdot V_3}{\pi d_3}$	$\frac{d_3}{2}$	$\frac{d_{пр}}{2}$	[6], [10], [11]

Примечание.  $b, e, L_{мц}$  – кратчайшее расстояние между осями заготовки и инструментальной головки  $a$ .

Цель исследования – установление влияния параметров вихревого фрезерования цилиндрических поверхностей на их топографию.

**Основная часть**

Для определения величины огранки обработанной поверхности воспользуемся уравнением, описывающим траекторию точки режущей кромки инструмента при внутреннем касании инструмента и заготовки [13], полученной методом преобразования координат. Проекция траектории точки, находящейся на расстоянии  $R$  от оси вращения инструментальной головки на плоскость, перпендикулярную оси обрабатываемой детали, определяется системой параметрических уравнений:

$$X(\varphi) = -R[A \cdot \cos(\varphi(m \pm 1)) + B \cdot \cos(\varphi(m \mp 1))] - a \cos \varphi; \quad (5)$$

$$Y(\varphi) = -R[A \cdot \sin(\varphi(m \pm 1)) - B \cdot \sin(\varphi(m \mp 1))] \pm a \sin \varphi, \quad (6)$$

где  $A = \cos^2 \frac{\varepsilon}{2}$ ,  $B = \sin^2 \frac{\varepsilon}{2}$ , относительная частота вращения инструмента и обрабатываемой детали  $m = \frac{n_n}{n_d}$ . Верхний знак соответствует встречному фрезерованию, нижний – попутному.

При  $\varepsilon = 0$  получаем:

$$X(\varphi) = -R \cos(\varphi(m \pm 1)) - a \cos \varphi; \quad (7)$$

$$Y(\varphi) = R \sin(\varphi(m \pm 1)) \pm a \sin \varphi.$$

Система уравнений (7) описывает при встречном фрезеровании (верхние знаки) удлиненную эпициклоиду (рис. 2, а), при попутном фрезеровании (нижние знаки) удлиненную гипоциклоиду (рис. 2, б) [14]. Такие же результаты получил автор работы [12], исследуя кинематику охватывающего фрезерования при параллельном расположении осей вращения обрабатываемой детали и инструмента.

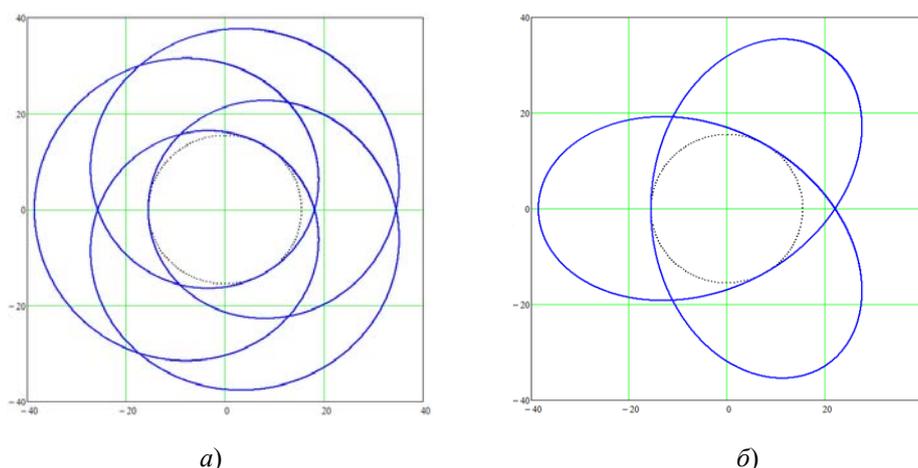


Рис. 2. Траектории точки режущей кромки инструмента при вихревом фрезеровании: а – встречное фрезерование; б – попутное фрезерование

Величину огранки  $\Delta_{\max}$  можно определить по уравнению

$$\Delta_{\max} = X(\varphi_{\Delta \max}) - r_f, \quad (8)$$

где угол  $\varphi_{\Delta \max}$  соответствует точке А (рис. 3), в которой траектория пересекает ось X. Определить угол  $\varphi_{\Delta \max}$  можно, приравняв уравнение (6) к нулю, однако данное уравнение является трансцендентным. Для вывода приближенной аналитической зависимости огранки применим метод касательных (Ньютона) [15]. Если  $\varphi_0$  – начальное приближение корня уравнения  $Y(\varphi) = 0$ , то последовательные приближения находятся по формуле

$$\varphi_{n+1} = \varphi_n - \frac{Y(\varphi_n)}{Y'(\varphi_n)}, \quad n = 0, 1, 2, \dots; \quad (9)$$

$$Y'(\varphi) = R[A(m \pm 1) \cos(\varphi(m \pm 1)) - B(m \pm 1) \cos(\varphi(m \pm 1))] \pm a \cos \varphi. \quad (10)$$

Выбрав нулевое приближение в виде

$$\varphi_0 = \frac{\pi(2m \mp 1)}{2m^2}, \quad (11)$$

и ограничившись первым приближением получаем:

$$\varphi_{\Delta_{\max}} = \varphi_0 - \frac{R[A \sin(\varphi_0(m \pm 1)) - B \sin(\varphi_0(m \mp 1))] \pm a \sin \varphi_0}{R[A(m \pm 1) \cos(\varphi_0(m \pm 1)) - B(m \mp 1) \cos(\varphi_0(m \mp 1))] \pm a \cos \varphi_0}. \quad (12)$$

Подставляя значение  $\varphi_{\Delta_{\max}}$  в уравнение (8), можно определить величину огранки обработанной поверхности.

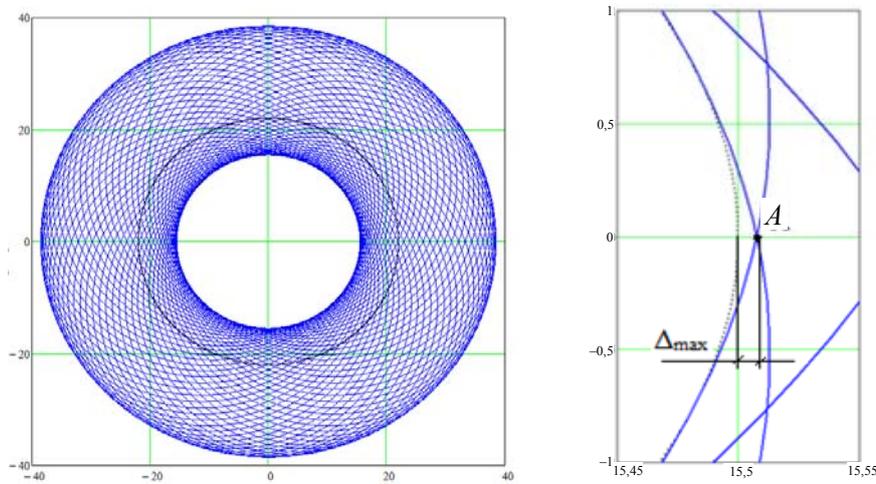


Рис. 3. Огранка цилиндрической поверхности после вихревого фрезерования

Для сравнения формул (1)–(4) и (8) на рис. 4 приведены графики влияния относительной частоты на величину огранки.

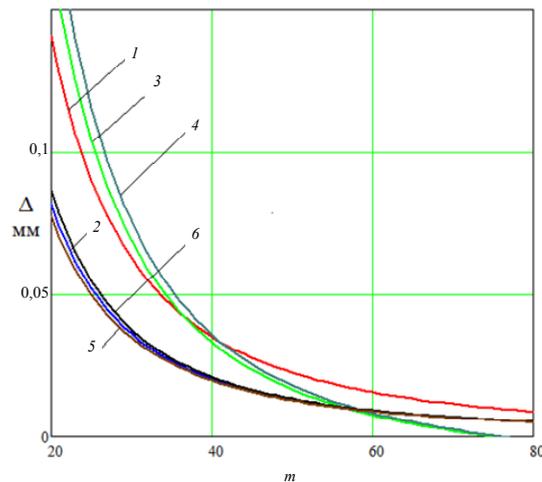


Рис. 4. Влияние относительной частоты на величину огранки обработанной поверхности, рассчитанную по формулам (1)–(4), (8): 1 – формула (1); 2 – формулы (2) и (3); 3 – формула (4) (встречное фрезерование); 4 – формула (4) (попутное фрезерование); 5 – формула (8) (встречное фрезерование); 6 – формула (8) (попутное фрезерование) при  $a = 11,5$  мм,  $R_a = 27$  мм,  $\varepsilon = 0^\circ$

Погрешности расчетов огранки по формулам (1)–(4) и (8) для однозубого инструмента при  $a = 11,5$  мм,  $R_a = 27$  мм,  $\varepsilon = 0^\circ$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение точности расчета огранки по формулам (1)–(4) и 8

$\frac{n_w}{n_d}$	Огранка $\Delta_{\max}$ , мм	Погрешность расчета огранки обработанной поверхности, % встречное фрезерование/попутное фрезерование			
		Формула (1)	Формулы (2), (3)	Формула (4)	Формула (8)
20	$77,1 \cdot 10^{-3}/86,5 \cdot 10^{-3}$	86,5/66,2	5,8/5,7	119,3/121,3	$7,5 \cdot 10^{-3}/0$
60	$8,9 \cdot 10^{-3}/9,2 \cdot 10^{-3}$	79,9/73,1	1,9/1,9	15,2/9,6	$1,1 \cdot 10^{-3}/1,4 \cdot 10^{-3}$
120	$2,2 \cdot 10^{-3}/2,3 \cdot 10^{-3}$	78,2/74,8	1,0/1,0	–	$0,3 \cdot 10^{-3}/0,3 \cdot 10^{-3}$
240	$0,6 \cdot 10^{-3}/0,6 \cdot 10^{-3}$	77,3/75,6	0,5/0,5	–	$0,8 \cdot 10^{-4}/0,8 \cdot 10^{-4}$
360	$0,3 \cdot 10^{-3}/0,3 \cdot 10^{-3}$	77,1/75,9	0,3/0,3	–	$0,3 \cdot 10^{-4}/0,4 \cdot 10^{-4}$

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что точность расчета по формуле (8) значительно выше, чем по формулам (1)–(4). Расчет по формуле (4) при отношении  $n_w/n_d$  больше 80 приводит к отрицательным значениям величины огранки, что не имеет физического смысла. Графики зависимости величины огранки от относительной частоты при вихревом фрезеровании цилиндрической поверхности диаметром 31 мм, выполненные расчетом по формуле (8), представлены на рис. 5.

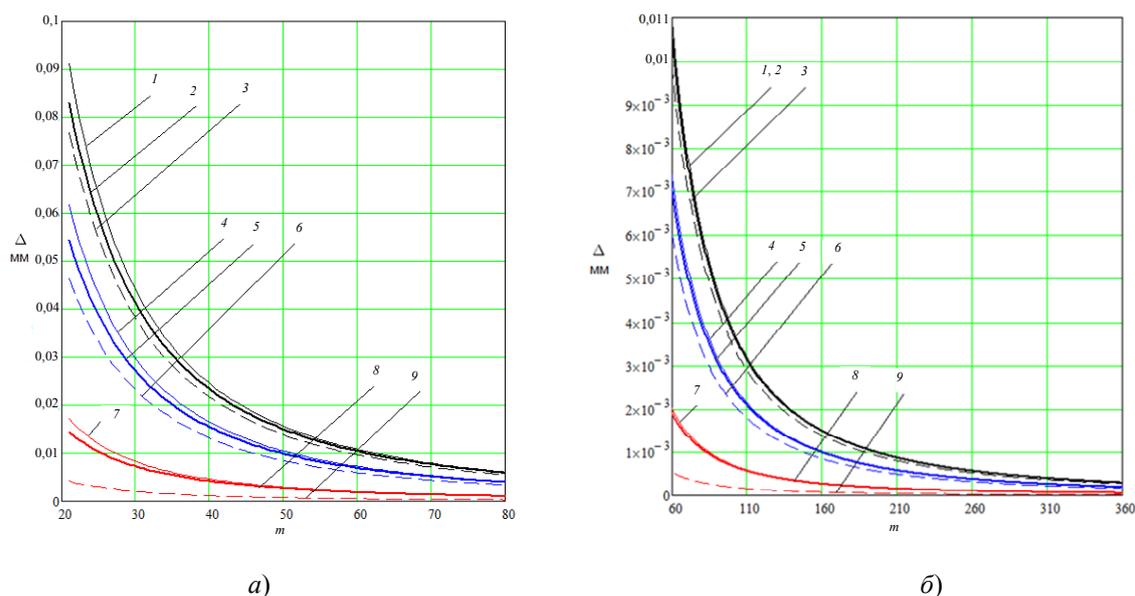


Рис. 5. Графики зависимости величины огранки от относительной частоты вращения:  
 1, 4, 7 – попутное фрезерование ( $\varepsilon = 0^\circ$ ); 2, 5, 8 – встречное фрезерование ( $\varepsilon = 0^\circ$ );  
 3, 6, 9 – встречное фрезерование ( $\varepsilon = 15^\circ$ ); 1, 2, 3 –  $R_a/r = 2$ ; 4, 5, 6 –  $R_a/r = 1,5$ ;  
 7, 8, 9 –  $R_a/r = 1,1$

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что наибольшее влияние относительных частот на огранку возникает при отношении  $n_w/n_d = 20$ . С увеличением относительной частоты огранка уменьшается.

**Заключение**

Таким образом, в результате обобщения вышеизложенного отметим следующее:

1. Получена формула для расчета величины огранки, которая учитывает: отношение частот вращения инструмента и обрабатываемой детали и их направление

(встречное и попутное фрезерование), угол наклона инструментальной головки, диаметры инструмента и обрабатываемой детали.

2. Установлено влияние на величину огранки относительной частоты вращения инструментальной головки и обрабатываемой детали  $m$ . При увеличении  $m$  в три раза в интервале от 20 до 60 огранка уменьшается до 9 раз, а в интервале от 120 до 360 – до 7,5 раза при  $r_f = 15,5$  мм,  $R_a = 27$  мм,  $\varepsilon = 0^\circ$ . При увеличении радиуса  $R_a$  от 20 до 27 мм огранка увеличивается в среднем в 1,9 раза.

3. Установлено, что при попутном фрезеровании величина огранки выше, чем при встречном. При  $m = 20$  в 1,12 раза, при  $m = 60$  в 1,03 раза ( $r_f = 15,5$  мм,  $R_a = 27$  мм,  $\varepsilon = 0^\circ$ ). При дальнейшем увеличении параметра  $m$  различие становится незначительно. При увеличении угла  $\varepsilon$  от 0 до  $15^\circ$  огранка уменьшается в среднем в 1,1 раза.

### Литература

1. Виксман, Е. С. Скоростное нарезание резьб и червяков: (вихревое нарезание вращающимися резцами) / Е. С. Виксман. – М. : Машиностроение, 1966. – 91 с.
2. Розенберг, С. А. Охватывающее фрезерование / С. А. Розенберг. – М. : Тип. им. Воровского, 1950. – 36 с.
3. Левин, Б. Г. Скоростной метод нарезания резьбы / Б. Г. Левин, А. М. Фраткин. – М. : 1-я тип. Машгиза, Ленингр. отд-ние, 1948. – 41 с.
4. Wehmann, R. The Whirling Process for Improved Worm Gears 2003 / R. Wehmann // Gear Solutions Magazine. – 2003. – Oktober. – Mode of access: [http://www.gearsolutions.com/media/uploads/assets/Digital\\_Editions/2003Digfiles/1003/GearSolutions1003.pdf](http://www.gearsolutions.com/media/uploads/assets/Digital_Editions/2003Digfiles/1003/GearSolutions1003.pdf). – Date of access: 10.10.2017.
5. Foitzik, B. Viel Wirbel um Qualität WB / B. Foitzik // Werkstatt + Betrieb. – 2015. – № 9. – Mode of access: <https://www.werkstatt-betrieb.de/wb-zeitschrift/archiv/artikel/wirbelmaschinen-industrie-4-0-inbetriebnahme-zuverlaessigkeit-1155128.html>. – Date of access: 10.10.2017.
6. Плотников, Ф. А. Повышение эффективности технологии обработки наружных винтовых канавок трения качения : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Ф. А. Плотников. – М., 2015. – 127 с.
7. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Суслов [и др.] ; под ред. А. Г. Сулова. – М. : Машиностроение, 2008. – 318 с.
8. Мархасин, Э. Л. Фрезерование тел вращения / Э. Л. Мархасин, А. А. Петросянц. – М. : Машгиз, 1960. – 111 с.
9. Этин, А. О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом / А. О. Этин, М. Е. Юхвид ; под ред. М. А. Эстерзона. – М. : ЭНИМС, 1994. – 185 с.
10. Суслов, А. Г. Формирование продольных неровностей винтовых канавок при вихревом нарезании / А. Г. Суслов, Ф. А. Плотников // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 6. – С. 20–23.
11. Суслов, А. Г. Справочный материал по вихревому нарезанию винтовых канавок / А. Г. Суслов, Ф. А. Плотников // Справочник. Инженер. журн. – 2014. – № 11. – С. 50–58.
12. Емелик, М. И. Кинематика охватывающего фрезерования / М. И. Емелик // Вестн. машиностроения. – 1958. – № 8. – С. 47–50.
13. Никитенко, Д. В. Моделирование образующей винтовой поверхности при формообразовании исходной инструментальной поверхностью с внутренним касанием /

Д. В. Никитенко, М. И. Михайлов // Современные проблемы машиноведения : тез. докл. XI Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 20–21 окт. 2016 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. С. И. Тимошина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – С. 77–78.

14. Савелов, А. А. Плоские кривые : систематика, свойства, применения : справ. рук. / А. А. Савелов. – М. : Физматгиз, 1960. – 293 с.
15. Воднев, В. Т. Основные математические формулы : справочник / В. Т. Воднев, А. Ф. Наумович, Н. Ф. Наумович ; под ред. Ю. С. Богданова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : Выш. шк., 1988. – 268 с.

*Получено 01.11.2017 г.*