

Расчет режимов фрезерования торцевой фрезой

И.Т. Глебов, УГЛТУ

(Calculation of the modes of milling by a face mill)

Методом фрезерования торцевой фрезой обрабатывается большое количество профилей деталей дверей, дверных коробок, филенок, мебельных рамок, деталей окон, раскладок, штапиков, наличников, плинтусов и др. На рис. 1 приведены примеры профилей некоторых деталей.

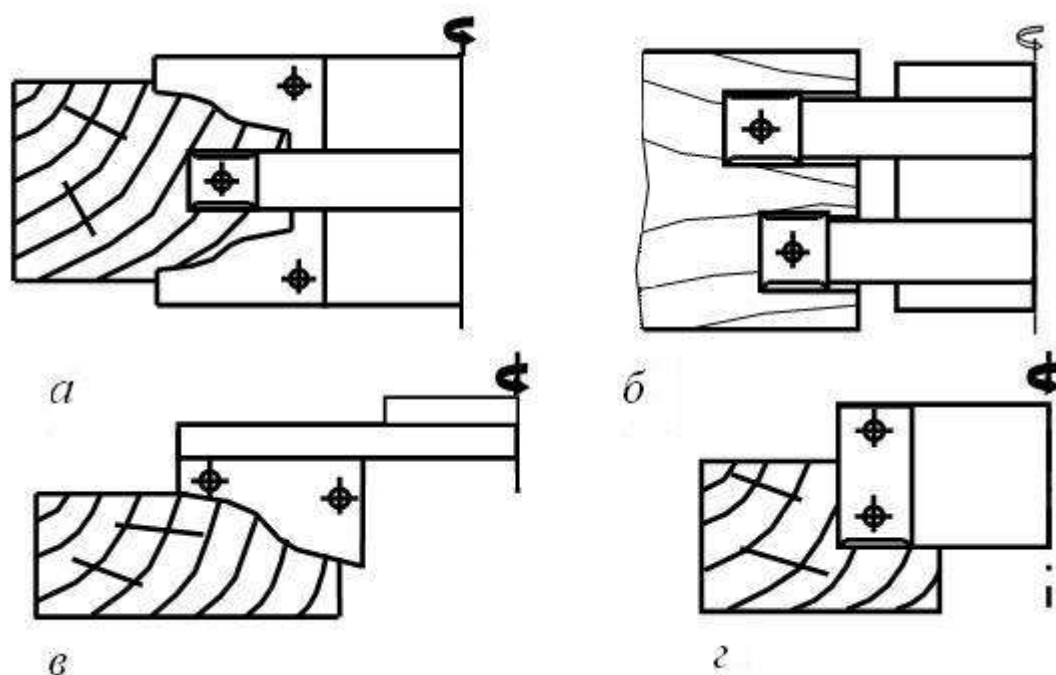


Рис. 1. Обработка профилей деталей:

а – бруска двери; *б* – бруска дверной коробки;

в – мебельной филенки; *г* – выборка четверти

Боковая режущая кромка лезвия торцевой фрезы может быть прямой или криволинейной, наклонной или вертикальной. Торцовая кромка прямая. В современных торцевых фрезах используются неперетачиваемые твердосплавные ножи одноразового использования.

⁹ Глебов И.Т. Расчет режимов фрезерования торцевой фрезой = Calculation of the modes of milling by a face mill/ И.Т. Глебов//Вестник Московского государственного университета – Лесной вестник. – 2007. – №1. – С. 71-73.

Фиктивная сила и касательное давление срезаемого слоя

При продольном фрезеровании древесины торцевой фрезой боковая наклонная режущая кромка выполняет резание продольно-поперечно-торцовое (рис. 2).

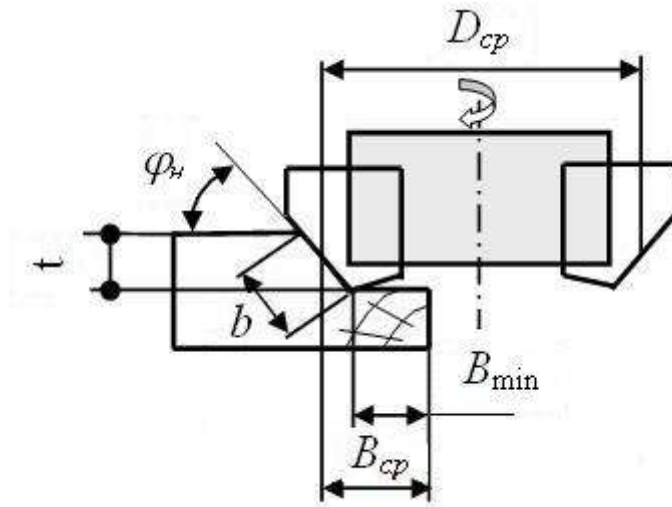


Рис. 2. Параметры торцово-конического фрезерования

При угле наклона боковой режущей кромки $\varphi_n = 0$ резание на дуге контакта изменяется от продольного, когда происходит врезание лезвия в древесину, до поперечного в момент выхода зуба из заготовки. Если угол $\varphi_n = 90^\circ$, то резание изменяется от продольного в момент врезания до торцового в момент выхода зуба из древесины.

Для продольно-поперечного резания древесины сосны значение фиктивной силы резания p , Н/мм, найденное по методике А.Л. Бершадского, равно:

$$p_{//-\#} = 1,57 - 0,0065\varphi_c. \quad (1)$$

Касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность лезвия k , МПа, равно

$$k_{//-\#} = (0,196 - 0,00184\varphi_c)\delta + [0,069 - 0,011(0,069 - B)\varphi_c] V' - (5,4 - 0,053\varphi_c), \quad (2)$$

где φ_c – угол скоса на середине дуги контакта, измеряемый между режущей кромкой и волокнами древесины при $\varphi_n = 0$ (значение φ_c подставляется в градусах);

V' – скорость резания, м/с; если скорость главного движения $V < 50$ м/с, то $V' = 90 - V$, иначе $V' = V$;

B – коэффициент, при угле резания $\delta \leq 55^\circ$ $B = 0,059$, при $\delta > 55^\circ$ $B = 0,069$.

При переходе резания от продольно-поперечного к продольно-поперечно-торцовому, когда $0 < \varphi_n < 90^\circ$, сопротивление резанию будет увеличиваться. Полагая, что увеличение значений p и k произойдет пропорционально углу наклона φ_n , получим

$$p_{//-\#-\perp} = p_{//-\#} + (p_{\perp} - p_{//-\#})\varphi_n/90, \quad (3)$$

$$k_{//-\#-\perp} = k_{//-\#} + (k_{\perp} - k_{//-\#})\varphi_n/90. \quad (4)$$

По данным А.Л. Бершадского для древесины сосны $p_{\perp} = 4,8$ Н/мм;

$$k_{\perp} = 0,55\delta + 0,196V' - 19.62. \quad (5)$$

При ширине фрезерования B_{cp} среднее значение угла скоса φ_c имеет место на середине дуги контакта и равно

$$\varphi_c = \frac{\varphi_k}{2} = \arcsin \sqrt{\frac{B_{cp}}{D_{cp}}}. \quad (6)$$

где D_{cp} – средний диаметр окружности резания фрезы, мм.

$$D_{cp} = D_{\min} + t/\operatorname{tg}\varphi_n, \quad (7)$$

где t – глубина фрезерования, мм.

Средняя скорость главного движения при фрезеровании, м/с

$$V = \frac{\pi D_{cp} n}{60000},$$

где n – частота вращения фрезы, мин^{-1} .

По формулам (3) и (4) получим

$$p_{//-\#-\perp} = 1,57 - 0,0065\varphi_c(1 - 0,0111\varphi_n) + 0,0359\varphi_n; \quad (8)$$

$$k_{//-\#-\perp} = \delta[0,196 + 0,0039\varphi_n - 0,00184\varphi_c(1 - 0,011\varphi_n)] + \\ + V'[0,069 - 0,011\varphi_c(0,069 - B)(1 - 0,011\varphi_n) + 0,00143\varphi_n] - \\ - 5,4 + 0,053\varphi_c(1 - 0,011\varphi_n) - 0,158\varphi_n. \quad (9)$$

Здесь φ_c , φ_n , δ подставляются в град. Кроме того, значение $B = 0,059$ при $\delta \leq 55^\circ$ и $B = 0,069$ при $\delta > 55^\circ$.

Геометрия срезанного слоя

Глубина фрезерования (глубина резания при фрезеровании) t , мм – толщина слоя материала, снимаемого с поверхности заготовки фрезой за один проход. Она равна расстоянию между обрабатываемой и обработанной поверхностями (см. рис. 2).

Ширина фрезерования B , мм – ширина поверхности обрабатываемой фрезой за один проход (рис. 2).

Среднее значение ширины фрезерования B_{cp} , мм – расстояние от боковой кромки заготовки до точки, расположенной на середине ширины срезанного слоя наклонного профиля:

$$B_{cp} = B + 0,5t / \operatorname{tg} \varphi_n .$$

Ширина срезаемого слоя b , мм – ширина сечения срезаемого слоя, удаляемого с заготовки за один проход

$$b = \frac{t}{\sin \varphi_n} , \quad (10)$$

где φ_n – угол наклона боковой режущей кромки к обработанной поверхности.

Средний угол контакта для среднего диаметра фрезы определяется на середине глубины фрезерования и равен из (6)

$$\varphi_k = 2\varphi_c .$$

Средняя длина дуги контакта

$$l_k = \frac{\pi D_{cp} \varphi_k}{360} , \quad (11)$$

где φ_k – средний угол контакта лезвия с заготовкой, рад.

Толщина срезаемого слоя a , мм, измеряется как наикратчайшее расстояние между предыдущей и последующей поверхностями резания на середине дуги контакта. При встречном фрезеровании толщина срезаемого слоя изменяется от нуля, когда режущая кромка врежется в древесину, до максимального значения в момент выхода лезвия из заготовки. Среднее значение толщины срезаемого слоя можно найти по следующей формуле:

$$a_{cp} = S_z \sin \varphi_n \sin \varphi_{cp} , \quad (12)$$

где S_z – подача на зуб, мм;

φ_{cp} – средний угол на дуге контакта, равный $\varphi_k/2$;

Для продольно-торцового резания можно принять угол перерезания волокон $\varphi_v = \varphi_{cp}$.

Силы резания при фрезеровании

Силы резания на зубе фрезы определяют для двух диапазонов толщины срезаемого слоя: $a \geq 0,1$ мм и $a \leq 0,1$ мм. Для диапазона $a \geq 0,1$ мм силу резания находят по формуле, Н

$$F_{x \text{ зуб}} = a_n a_w (\alpha_p p + ka) b . \quad (13)$$

Для диапазона $a \leq 0,1$ мм силу резания следует определять по формуле, Н [2]:

$$F_{x \text{ зуб}} = a_n a_w [(\alpha_p p + 0,1k) \left(-\frac{1}{\lambda} a^2 + \frac{0,2}{\lambda} a + 1 - \frac{0,01}{\lambda} \right)] b , \quad (14)$$

где p, k – фиктивная сила резания и касательное давление для древесины сосны с влажностью 12%;

a_n, a_w – поправочные коэффициенты на породу древесины и влажность;

λ – коэффициент; $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$, где ρ – радиус закругления режущей кромки зуба фрезы, мм.

Обозначим

$$F_{x\ 0,1} = \alpha_\rho p + 0,1k,$$

$$m_1 = \frac{F_{x\ зуб}}{a_n a_w b F_{x\ 0,1}},$$

тогда при $a = 0,1$ мм $m_1 = 1$.

Запишем уравнение (14) в форме приведенного квадратного уравнения

$$a^2 - 0,2a - 1 + \lambda(m_1 - 1) = 0,$$

при решении которого получим

$$a = 0,1 - \sqrt{\lambda(1 - m_1)}. \quad (15)$$

При решении обратных задач, когда по силе резания на лезвии определяют толщину срезаемого слоя a , следует поступать так:

– если $m_1 \geq 1$, то надо пользоваться уравнением

$$a = \frac{\frac{F_{xзуб}}{a_n a_w b} - \alpha_\rho p}{k};$$

– если $m_1 \leq 1$, то надо пользоваться уравнением (15).

Пример расчета

Дано. На фрезерном станке из древесины сосны с влажностью 12% обрабатывается деталь сложного профиля (см. рис. 2). Ширина фрезерования $B_{\min} = 22$ мм, глубина фрезерования $t = 8; 12; 15; 20$ мм, минимальный диаметр окружности резания наклонной режущей кромки $D_{\min} = 120$ мм, угол наклона боковой режущей кромки $\varphi_n = 45^\circ$, частота вращения вала $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$, число ножей $z = 4$, угол резания ножей $\delta = 70^\circ$. Ножи выполнены из твердого сплава марки ВК15. Период стойкости ножей $T = 1200$ мин

Мощность электродвигателя механизма главного движения станка $P = 3$ кВт, КПД передачи $\eta = 0,94$.

Определить скорости подачи.

Решение. 1. Средний диаметр окружности резания фрезы (результаты расчета сведены в табл. 1)

$$D_{cp} = D_{\min} + t / \operatorname{tg} \varphi_H = 120 + 8 / \operatorname{tg} 45 = 128 \text{ мм.}$$

2. Скорость главного движения

$$V = \pi D_{cp} n / 60000 = 3,14 \cdot 128 \cdot 5000 / 60000 = 33,51 \text{ м/с.}$$

3. Среднее значение ширины фрезерования

$$B_{cp} = B_{\min} + 0,5t / \operatorname{tg} \varphi_H = 22 + 0,5 \cdot 8 / \operatorname{tg} 45 = 26 \text{ мм.}$$

4. Значение угла скоса

$$\varphi_c = \arcsin \sqrt{\frac{B_{cp}}{D_{cp}}} = \arcsin \sqrt{\frac{26}{128}} = 26,8^\circ.$$

5. Угол контакта боковой режущей кромки с заготовкой

$$\varphi_k = 2\varphi_c = 2 \cdot 26,8 = 53,6^\circ.$$

6. Длина дуги контакта

$$l_k = \frac{\pi D_{cp} \varphi_k}{360} = \frac{3,14 \cdot 128 \cdot 53,6}{360} = 59,8 \text{ мм.}$$

7. Прирост затупления лезвий за время работы при коэффициентах использования станка и производительности $K_u = 0,92$; $K_n = 0,94$

$$\Delta_\rho = \gamma_\Delta l_k n T K_n K_u / 1000 = 0,00006 \cdot 69,3 \cdot 5000 \cdot 1200 \cdot 0,92 \cdot 0,94 / 1000 = 18,6 \text{ мкм.}$$

8. Фиктивная сила резания

$$p_{//\# \perp} = 1,57 - 0,0065 \varphi_c (1 - 0,0111 \varphi_H) + 0,0359 \varphi_H = 1,57 - 0,0065 \cdot 26,8 (1 - 0,0111 \cdot 45) + 0,0359 \cdot 45 = 3,1 \text{ Н/мм.}$$

9. Касательное давление стружки на переднюю грань

$$\begin{aligned} k &= \delta [0,196 + 0,0039 \varphi_H - 0,00184 \varphi_c (1 - 0,011 \varphi_H)] + \\ &+ V' [0,069 - 0,011 \varphi_c (0,069 - B) (1 - 0,011 \varphi_H) + 0,00143 \varphi_H] - \\ &- 5,4 + 0,053 \varphi_c (1 - 0,011 \varphi_H) - 0,158 \varphi_H = \\ &= 70 [0,196 + 0,0039 \cdot 45 - 0,00184 \cdot 26,8 (1 - 0,011 \cdot 45)] + \\ &+ (90 - 33,51) [0,069 - 0,011 \cdot 26,8 (0,069 - 0,069) (1 - 0,011 \cdot 45) + 0,00143 \cdot 45] - \\ &- 5,4 + 0,053 \cdot 26,8 (1 - 0,011 \cdot 45) - 0,158 \cdot 45 = 20 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

10 Коэффициент затупления

$$\alpha_\rho = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_\rho}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{20}{3,1}) \frac{18,6}{5 + 50} = 1,56.$$

11. Окружная касательная сила резания

$$F_{xo} = 1000 P \eta / V = 1000 \cdot 3 \cdot 0,94 / 33,51 = 84,2 \text{ Н.}$$

12. Средняя сила резания на дуге контакта

$$F_{хзуб} = F_{xo} \pi D_{cp} / (l_k z) = 84,2 \cdot 3,14 \cdot 128 / (59,8 \cdot 4) = 141,4 \text{ Н.}$$

13. Ширина срезаемого слоя

$$b = \frac{t}{\sin \varphi_H} = \frac{8}{\sin 45} = 9,4 \text{ мм.}$$

14. Средняя толщина срезаемого слоя

Коэффициенты

$$\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01; \rho = \rho_o + \Delta\rho; \rho - \text{в мм.}$$

$$\lambda = (0,005 + 0,0186)^2 + 0,2(0,005 + 0,0186) + 0,01 = 0,015285.$$

$$F_{x0,1} = \alpha_\rho p + 0,1k = 1,56 \cdot 3,1 + 0,1 \cdot 20 = 6,83 \text{ Н/мм.}$$

Таблица 1 – Результаты расчетов

Параметры	Обозначение	Размерность	Глубина фрезерования t , мм			
			8	12	15	20
Средний диаметр фрезы	D_{cp}	мм	128	132	135	140
Скорость резания	V	м/с	33,51	34,56	35,34	36,65
Средняя ширина фрезерования	B_{cp}	мм	26	28	29,5	32
Угол скоса	φ_c	град	26,8	27,4	27,9	28,6
Угол контакта	φ_k	град	53,6	54,8	55,7	57,1
Длина дуги контакта	l_k	мм	59,8	63,2	65,7	69,8
Прирост затупления	$\Delta\rho$	мкм	18,6	19,7	20,4	21,7
Фиктивная сила резания	p	Н/мм	3,1	3,1	3,09	3,09
Касательное давление	k	МПа	20	19,84	19,72	19,52
Коэффициент затупления	α_ρ	-	1,56	1,59	1,61	1,64
Окружная сила резания	F_{xo}	Н	84,2	81,6	79,8	76,9
Средняя сила резания на дуге контакта	$F_{xzyб}$	Н	141,4	133,9	128,8	121,2
Средняя ширина среза	b	мм	9,4	14,1	17,6	23,5
Коэффициент m_1	m_1	-	2,2	1,38	1,05	0,73
Толщина срезаемого слоя	a	мм	0,51	0,23	0,12	-
	a	мм	-	-	-	0,035
Подача на зуб при	S_z	мм	1,6	0,71	0,36	-
						0,102
Скорость подачи при	V_s	м/мин	32	14,2	7,2	2,04

$$m_1 = \frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b F_{x0,1}} = \frac{141,4}{1 \cdot 1 \cdot 9,4 \cdot 6,83} = 2,2.$$

Так как $m_1 > 1$, то толщина срезаемого слоя a_c определяется по формуле для макрослоев

$$a_c = \frac{\frac{F_{\text{хзуб}}}{a_{\text{п}} a_{\text{w}} b} - \alpha_{\rho} p}{k} = \frac{\frac{141,4}{1 \cdot 1 \cdot 9,4} - 1,56 \cdot 3,1}{20} = 0,51 \text{ мм.}$$

В случае, когда глубина фрезерования $t = 20$ мм, коэффициент $m_1 = 0,73 < 1$ и толщина срезаемого слоя находится по формуле

$$a_{\text{см}} = 0,1 - \sqrt{\lambda(1 - m_1)} = 0,1 - \sqrt{0,015285(1 - 0,73)} = 0,035 \text{ мм.}$$

15. Максимально допустимая подача на зуб

$$S_z = \frac{a_c}{\sin \varphi_n \sin \varphi_c} S_z = \frac{0,51}{\sin 45 \sin 26,8} = 1,6 \text{ мм.}$$

16. Скорость подачи

$$V_s = S_z z n / 1000 = 1,6 \cdot 4 \cdot 5000 / 1000 = 32 \text{ м/мин.}$$

Вывод. С увеличением глубины фрезерования скорость подачи убывает.