

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глебов И.Т., Рысев В.Е. Аспирационные и транспортные системы деревообрабатывающих предприятий. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2004. – 180 с.
2. Глебов И.Т., Глебов В.В. Цех с аспирационной системой// Патент на полезную модель, заявка № 2006112972/22(014111) от 17.04.2006.

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Глебов И.Т. (УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ), GIT5@yandex.ru

CALCULATION OF MODES OF CYLINDRICAL MILLING

В теории резания древесины известно несколько расчетных методов, отличающихся по точности от среднего значения на -17% ... +19%. Проблема повышения точности расчетов остается острой. Повышение точности расчетов зависит от точности понимания и описания физических процессов резания древесины.

Важнейшим критерием оценки режима резания является энергоемкость процесса, зависящая от диаметра фрезы.

В предлагаемой статье описан метод расчета режимов резания и выбора диаметра фрезы.

Силы резания. Мощность на фрезерование

Известно, что единичную касательную силу резания для макрослоев (толщина срезаемого слоя больше 0,1 мм) можно определить по формуле

$$F_{x1} = p + ka, \quad (1)$$

где p – фиктивная сила резания, Н/мм;

k – касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность лезвия, МПа;

a – толщина срезаемого слоя, мм.

С учетом породы древесины, ее влажности и степени затупления лезвий режущего инструмента формулы для касательной силы резания можно записать так:

для макрослоев ($a \geq 0,1$ мм)

$$F_{x \text{ зуб}} = a_n a_w [\alpha_\rho p + ka_c] b, \quad (2)$$

для микрослоев ($a \leq 0,1$ мм) [1]

$$F_{x \text{ зуб.м}} = a_n a_w [\alpha_\rho p + 0,1k] \left(-\frac{1}{\lambda} a_c^2 + \frac{0,2}{\lambda} a_c + 1 - \frac{0,01}{\lambda} \right) b, \quad (3)$$

где a_n – коэффициент на породу древесины;

a_w – коэффициент на влажность древесины;

α_ρ – коэффициент затупления режущей кромки лезвия;

b – ширина срезаемого слоя, мм;

λ – коэффициент: $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$; здесь радиус закругления режущих кромок лезвий подставляется в мм; $\rho = \rho_0 + \Delta\rho$.

Коэффициент затупления находится из выражения [2]

$$\alpha_p = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_p}{\rho_o + 50}, \quad (4)$$

где k – касательное давление стружки на переднюю поверхность лезвия при фрезеровании древесины сосны, МПа;

p – фиктивная сила резания при фрезеровании сосны, Н/мм;

Δ_p – величина затупления режущей кромки, мкм;

ρ_o – радиус закругления режущей кромки острого лезвия; $\rho_o = 4 \dots 6$ мкм.

Фиктивная сила резания при фрезеровании сосны p , Н/мм:

$$p = 1,565 + 0,0353(\varphi_k/2). \quad (5)$$

Касательное давление стружки на переднюю поверхность зуба для продольно-торцового резания древесины сосны, МПа:

$$k = (0,196 + 0,00392 \varphi_k/2)\delta + (0,0686 + 0,00147 \varphi_k/2)V' - (5,39 + 0,147 \varphi_k/2), \quad (6)$$

где φ_k – угол контакта режущей кромки с заготовкой, град;

δ – угол резания зуба, град;

V' – условная скорость резания, м/с, причем если $V < 50$ м/с, то $V' = (90 - V)$, иначе $V' = V$, где V – скорость главного движения.

На дуге контакта фрезы с заготовкой может находиться количество зубьев не равное единице, поэтому средняя касательная сила резания за оборот фрезы (окружная сила резания) будет

$$F_x = F_{x \text{ зуб}} \frac{l}{t_3}, \quad (7)$$

где l – длина дуги контакта, мм;

t_3 – шаг зубьев фрезы, мм; $t_3 = \frac{\pi D}{z}$, где D – диаметр окружности резания фрезы,

мм; z – количество зубьев фрезы.

Мощность фрезерования P , кВт:

$$P = \frac{F_x V}{1000}, \quad (8)$$

где V – скорость главного движения, м/с.

Решение обратной задачи

При решении обратных задач из формул (2), (3) находят значение средней толщины срезаемого слоя. В уравнении (3) обозначим:

$$F_{x0,1} = \alpha_p p + 0,1k; \\ m_1 = \left(-\frac{1}{\lambda} a_c^2 + \frac{0,2}{\lambda} a_c + 1 - \frac{0,01}{\lambda}\right). \quad (9)$$

$$\text{Тогда } m_1 = \frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b F_{x0,1}}.$$

Таким образом, коэффициент m_1 представляет собой отношение текущего значения силы резания к силе резания при $a_c = 0,1$ мм. Если $m_1 = 1$, то $a_c = 0,1$ мм. Если $m_1 > 1$, то толщина срезаемого слоя a_c находится в диапазоне макрослоя и определяется по формуле для макрослоев; при $m_1 < 1$, толщина срезаемого слоя a_{cm} находится по формуле для микрослоев.

При $a_c \geq 0,1$ мм

$$a_c = \frac{F_{хзуб} - \alpha_\rho p}{a_n a_w b k}. \quad (10)$$

Используя выше принятые обозначения, выражение (9) для микрослоев запишем в форме приведенного полного квадратного уравнения

$$a_c^2 - 0,2a_c + [0,01 + \lambda(m-1)] = 0.$$

После решения этого уравнения получим выражение для толщины срезаемого слоя a_{cm} для микрослоев ($a_c \leq 0,1$ мм):

$$a_{cm} = 0,1 - \sqrt{\lambda(1 - m_1)}. \quad (11)$$

Радиальная составляющая силы резания F_z , Н:

при $a_c \geq 0,1$ мм

$$F_z = [0,5\alpha_\rho^2(\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50} - k(a_c - 0,1) \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi)] a_n a_w b \frac{l}{t_3}, \quad (12)$$

при $a_c < 0,1$ мм

$$F_z = a_n a_w b \frac{l}{t_3} 0,5\alpha_\rho^2 [\alpha_\rho p + 0,1k] \frac{\rho}{\rho + 50}, \quad (13)$$

где ρ – в мкм.

Пример решения обратной задачи

Дано. Проектируется новый рейсмусовый станок для обработки заготовок из древесины сосны шириною $b = 100$ мм и влажностью $W = 10\%$. Диаметр окружности резания ножевого вала $D = 128$ мм, частота вращения вала $n = 5000$ мин⁻¹, число ножей $z = 4$, угол резания ножей $\delta = 65^\circ$. Период стойкости ножей $T = 240$ мин, шероховатость обработанной поверхности $R_m = 100$ мкм, глубина фрезерования $t = (2; 4; 5; 6)$ мм. Ширина стола $b_c = 630$ мм.

Конструктивная скорость подачи $V_{sk} \leq 36$ м/мин.

С учетом аналогов принята мощность электродвигателя механизма главного движения $P = 7$ кВт, КПД передачи $\eta = 0,94$.

Определить скорости подач и построить график скоростей подач.

Решение. 1. Скорость главного движения

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

2. Угол контакта режущей кромки с заготовкой для $t = (2; 4; 5; 6)$ мм:

$$\varphi_k = 115\sqrt{t/D} = 115\sqrt{2/128} = 14,375^\circ.$$

Результаты расчетов представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

3. Длина дуги контакта $l_k = \sqrt{tD} = \sqrt{2 \cdot 128} = 16,0$ мм.

Таблица 1 – Результаты расчетов

Параметры	Обозначение	Размерность	Глубина фрезерования t , мм			
			2	4	5	6
Скорость резания	V	м/с	33,51	33,51	33,51	33,51
Угол контакта	φ_k	град	14,38	20,33	22,73	24,90
Длина дуги контакта	l_k	мм	16,0	22,6	25,3	27,7
Подача на зуб по шероховатости	S_{z1}	мм	1,8	1,8	1,8	1,8
Прирост затупления	$\Delta\rho$	мкм	12,03	17,01	19,02	20,83
Фиктивная сила резания	p	Н/мм	1,82	1,92	1,97	2,0
Касательное давление	k	МПа	12,6	13,2	13,4	13,6
Коэффициент затупления	$\alpha\rho$	–	1,37	1,52	1,58	1,64
Окружная сила резания	F_{xo}	Н	196,4	196,4	196,4	196,4
Средняя сила резания на дуге контакта	$F_{xзуб}$	Н	1233,8	872,4	780,3	712,3
Средняя толщина среза при						
$b = 100$ мм	a_c	мм	0,78	0,44	0,35	0,28
$b = 200$ мм	a_c	мм	0,29	0,11	0,06	0,04
$b = 300$ мм	a_c	мм	0,13	0,03	0,02	0,01
Подача на зуб по мощности при						
$b = 100$ мм	S_{z2}	мм	6,25	2,49	1,77	1,31
$b = 200$ мм	S_{z2}	мм	2,34	0,62	0,29	0,18
$b = 300$ мм	S_{z2}	мм	1,03	0,18	0,10	0,06
Расчетная подача на зуб при						
$b = 100$ мм	S_{zp}	мм	1,80	1,80	1,77	1,31
$b = 200$ мм	S_{zp}	мм	1,80	0,62	0,29	0,18
$b = 300$ мм	S_{zp}	мм	1,03	0,18	0,10	0,06
Скорость подачи при						
$b = 100$ мм	V_s	м/мин	36,0	36,0	35,4	26,2
$b = 200$ мм	V_s	м/мин	36,0	12,4	5,8	3,6
$b = 300$ мм	V_s	м/мин	20,6	3,6	2,0	1,1

4. Подача на зуб с ограничением по шероховатости. Длина волны по заданной шероховатости $l_g = S_z z = 7,3$ мм выбирается по таблице 28 [2]. Подача на зуб $S_z = l_g / z = 7,3 / 4 = 1,825$ мм.

5. Прирост затупления лезвий за время работы

$$\Delta\rho = \gamma_{\Delta} l_{\kappa} n T K_n K_u / 1000 = 0,0008 \cdot 16,0 \cdot 5000 \cdot 240 \cdot 0,9 \cdot 0,9 / 1000 = 12,02 \text{ мкм.}$$

6. Фиктивная сила резания

$$p = 1,565 + 0,0353(\varphi_{\kappa}/2) = 1,565 + 0,0353 \cdot 14,375 / 2 = 1,82 \text{ Н/мм.}$$

7. Касательное давление стружки на переднюю грань

$$k = (0,196 + 0,00392 \varphi_{\kappa}/2)\delta + (0,0686 + 0,00147 \varphi_{\kappa}/2)(90 - V) - (5,39 + 0,147 \varphi_{\kappa}/2) = (0,196 + 0,00392 \cdot 14,38/2)65 + (0,0686 + 0,00147 \cdot 14,38/2)(90 - 33,49) - (5,39 + 0,147 \cdot 14,38/2) = 12,6 \text{ МПа.}$$

8. Коэффициент затупления

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta\rho}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{12,6}{1,82}) \frac{12,03}{5 + 50} = 1,37.$$

9. Окружная касательная сила резания

$$F_{xo} = 1000 P \eta / V = 1000 \cdot 7 \cdot 0,94 / 33,51 = 196,4 \text{ Н.}$$

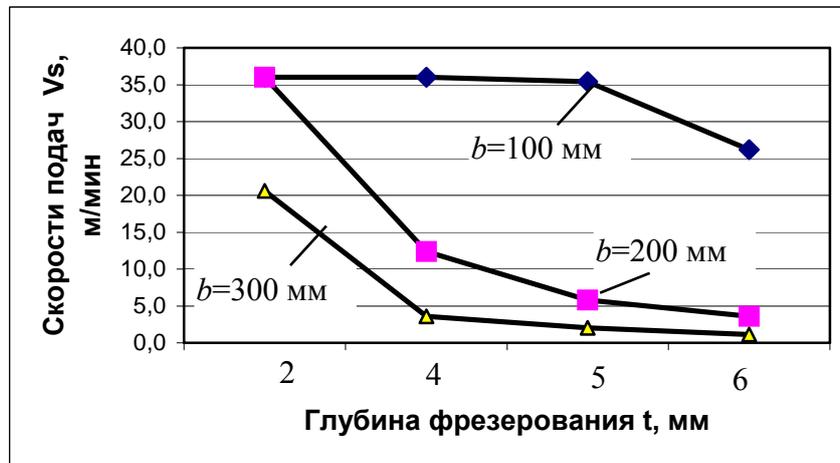


Рисунок 1– График скоростей подачи продольно-фрезерного станка

10. Средняя сила резания на дуге контакта

$$F_{xзуб} = F_{xo} \pi D / (l_{\kappa} z) = 196,4 \cdot 3,14 \cdot 128 / (16 \cdot 4) = 1233,8 \text{ Н.}$$

11. Средняя толщина срезаемого слоя при подаче по одной заготовке ($b = 100 \text{ мм}$).

Коэффициенты

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

$$\lambda = (0,005 + 0,0123)^2 + 0,2(0,005 + 0,0123) + 0,01 = 0,01369;$$

$$F_{x0,1} = \alpha_{\rho} p + 0,1k = 1,37 \cdot 1,82 + 0,1 \cdot 12,6 = 3,75 \text{ Н/мм;}$$

$$m_1 = \frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b d} = \frac{1233,8}{1 \cdot 1 \cdot 100 \cdot 3,75} = 3,3.$$

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

$$a_c = \frac{F_{xзуб} - \alpha_{\rho} p}{a_{\Pi} a_w b} = \frac{1233,8 - 1,37 \cdot 1,82}{1 \cdot 1 \cdot 100} = 0,78 \text{ мм.}$$

При срезании микрослоев толщина срезаемого слоя находится по формуле (для $b = 200$ мм и $t = 6$ мм)

$$a_{cm} = 0,1 - \sqrt{\lambda(1 - m_1)} = 0,1 - \sqrt{0,0158(1 - 0,77)} = 0,04 \text{ мм.}$$

12. Подача на зуб, ограниченная мощностью привода:

$$S_{z2} = a_c / \sqrt{t/D} = 0,78 / \sqrt{2/128} = 6,25 \text{ мм.}$$

За расчетную подачу на зуб принимается наименьшее значение из подач с ограничениями по шероховатости и мощности привода.

13. Скорость подачи

$$V_s = S_{zpz} n / 1000 = 6,25 \cdot 4 \cdot 5000 / 1000 = 36,5 \text{ м/мин.}$$

О выборе величины диаметра фрезы

В современной теории резания древесины нет четких рекомендаций по выбору величины диаметра фрезы. В известных исследовательских работах получены противоречивые результаты по этому вопросу. Так, по данным П. Коха затраты мощности на фрезерование древесины при работе фрезой диаметром 228 мм на 3,37-10,8 % больше, чем при работе фрезой диаметром 194 мм.

В расчетной формуле мощности на фрезерование древесины Грубе А.Э., Санева В.И. значение диаметра фрезы входит в значение скорости главного движения $v^{-0,37}$. Из формулы следует, чем больше диаметр фрезы, тем меньше мощность на фрезерование [3].

Цилиндрическое фрезерование имеет совпадающие признаки с пилением древесины круглыми пилами. По мнению автора для пиления древесины предпочтительнее брать пилу большего диаметра и работать ее центральной зоной. В этом случае заметно уменьшаются длины дуг контакта зубьев с заготовкой, а увеличение фиктивной силы и касательного давления на переднюю поверхность лезвий незначительно.

Надо выбирать режим резания так, чтобы длина дуги контакта режущего инструмента с заготовкой была минимальной. Для цилиндрического фрезерования это возможно при работе фрезами небольшого диаметра. С уменьшением диаметра фрезы длина дуги контакта уменьшается, в результате чего износ и затупление лезвий, а также образование фаски по задним поверхностям лезвий, замедляется. Лезвия дольше остаются острыми, период стойкости их увеличивается.

С другой стороны, с уменьшением диаметра фрезы увеличивается угол перерезания волокон (равен углу подачи), и это затрудняет условия срезания стружки. Резание приближается к торцовому. В результате этого фиктивная сила резания и касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность лезвий увеличиваются.

Кроме того, с уменьшением диаметра фрезы скорость главного движения резания убывает и вызывает увеличение удельной работы резания.

Таким образом, с уменьшением диаметра фрезы на процесс фрезерования древесины одновременно действуют, по крайней мере, три фактора по разному влияющие

на динамику фрезерования. Совместное их действие может вызвать как увеличение, так и уменьшение энергозатрат на резание.

Исследование проведено на математической модели, используемой при решении прямых и обратных задач по фрезерованию древесины.

Исходные данные. Фрезерование выполняется на станке с шириной фрезерования 100 мм и глубиной фрезерования $t = 2; 4; 5; 6; 10; 15; 20; 25$ мм. Диаметр фрезы $D = 50; 80; 100; 128; 140; 200$ мм, число зубьев 4, угол резания 65° , частота вращения шпинделя 5000 мин^{-1} , период стойкости фрез 240 мин, коэффициент производительности станка 0,9, коэффициент использования станка 0,87, мощность электродвигателя механизма главного движения 7 кВт, КПД привода 0,94. Обрабатывается древесина сосны с влажностью 10%. Величина затупления лезвий на 1 м пути – 0,0008 мкм/м.

При решении задачи находилась максимально возможная скорость подачи при максимальной загрузке электродвигателя механизма главного движения по мощности. Результаты расчета сведены в таблице 2.

Из таблицы видно, что с увеличением диаметра фрезы при прочих одинаковых условиях возможная скорость подачи при глубине фрезерования до 4 мм увеличивается. Это означает, что с увеличением диаметра фрезы в указанном диапазоне энергозатраты на фрезерование убывают.

Таблица 2 – Максимальная скорость подачи фрезерного станка, м/мин

Диаметр фрезы, мм	Глубина фрезерования, мм							
	2	4	5	6	10	15	20	25
50	114,0	48,4	35,8	27,8	12,4	5,2	1,8	0,8
80	119,0	49,4	36,2	27,8	11,0	3,0	1,2	0,4
100	121,6	49,6	36,0	27,0	10,0	2,4	0,8	0,2
128	125,0	49,8	35,4	26,2	8,2	1,8	0,4	0
140	126,6	49,8	35,2	25,6	7,2	1,6	0,2	0
200	134,8	50,0	33,8	23,2	4,2	0,6	0	0

При глубине фрезерования более 4 мм увеличение диаметра фрезы приводит к уменьшению скорости подачи, к увеличению энергозатрат на фрезерование. Такая закономерность наблюдается для всех режимов резания при глубине фрезерования более 4 мм.

Для понимания такого процесса в таблице 3 основные параметры фрезерования и их изменение.

Основным фактором процесса фрезерования, увеличивающим энергопотребление, является затупление лезвий. Коэффициент затупления изменяется от 1,24 до 1,83 (в 1,48 раза) для фрезы диаметром 50 мм и от 1,38 до 2,33 (в 1,69 раза) для фрезы диаметром 140 мм. Фиктивная сила резания изменяется соответственно от 1,97 до 3,0 Н/мм (1,52 раза) и от 1,81 до 2,42 Н/мм (1,34 раза). Касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность лезвия k изменяется соответственно от 15,2 до 21,6 Мпа (1,42 раза) и от 12,3 до 15,5 МПа (1,26 раза).

Проведенные исследования позволяют сделать следующие **выводы**.

1. С увеличением диаметра фрезы интенсивно нарастают процессы износа и затупления лезвий. Для фрезы диаметром 140 мм по сравнению с фрезой диаметром 50 мм коэффициент затупления увеличивается на 21%.

2. С увеличением диаметра фрезы уменьшается угол перерезания волокон древесины и это приводит к уменьшению:

- фиктивной силы резания на 18 %;
- касательного давления на 16 %.

3. Совместное действие указанных факторов вызывает увеличение энергозатрат при увеличении диаметра фрезы.

При цилиндрическом продольном фрезеровании древесины предпочтительно работать фрезой небольшого диаметра.

Таблица 3 – Зависимость параметров фрезерования от диаметра фрезы

Диаметр фрезы, мм	Глубина фрезерования, мм							
	2	4	5	6	10	15	20	25
50	Длина дуги контакта, мм							
	10,0	14,1	15,8	17,3	22,36	27,4	31,6	35,4
	Коэффициент затупления α_p							
	1,24	1,34	1,38	1,41	1,53	1,65	1,75	1,83
	Фиктивная сила резания p , Н/мм							
	1,97	2,14	2,21	2,27	2,47	2,68	2,85	3,0
	Продолжение табл. 3							
	Касательное давление на лезвие k , МПа							
15,2	16,2	16,6	17,0	18,3	19,6	20,7	21,6	
140	Длина дуги контакта, мм							
	16,7	23,7	25,5	29,0	37,4	45,8	52,9	59,2
	Коэффициент затупления α_p							
	1,38	1,54	1,60	1,66	1,85	2,03	2,19	2,33
	Фиктивная сила резания p , Н/мм							
	1,81	1,91	1,95	1,99	2,11	2,23	2,33	2,42
	Касательное давление на лезвие k , МПа							
	12,3	12,8	13,0	13,2	13,9	14,5	15,1	15,5

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глебов И.Т. Резание древесины: Избранные лекции [Текст]/ И.Т. Глебов. Екатеринбург, УГЛТУ, 2005. – 98 с.
2. Глебов И.Т. Расчет режимов резания древесины: Монография [Текст]/ И.Т. Глебов. Екатеринбург, УГЛТУ, 2005. – 156 с.
3. Грубе А.Э., Санев В.И. Основы теории и расчета деревообрабатывающих станков, машин и автоматических линий [Текст] / А.Э. Грубе, В.И. Санев. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 384 с.