

Библиографический список

1. Адиков, С. Г. Определение времени контактного взаимодействия при резании с наложением на инструмент тангенциальных ультразвуковых колебаний / С. Г. Адиков // XI нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки: Материалы докладов. – Н. Новгород: Изд. Гладкова О. В., 2006. – 197 с.: ил. – С. 117.
2. Кумабэ, Д. Вибрационное резание / Перевод с яп. С.Л. Масленникова; Под ред. И.И. Портнова и В.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.: ил.
3. Любченко, В. И. Резание древесины и древесных материалов: Учебник для вузов / В. И. Любченко. – 2-е изд. испр. и доп. – М.: МГУЛ, 2004. – 310 с.: ил.
4. Нерубай, М. С. Физико-технологические методы обработки и сборки / М. С. Нерубай, В. В. Калашников, Б. Л. Штриков, С. И. Ярьско. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 396 с.: ил.
5. Kim, J. D. Characteristics of Chip Generation by Ultrasonic Vibration Cutting with Extremely Low Cutting Velocity / J. D. Kim, I. H. Choi // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 1998. – Vol. 14, № 1. – P. 2-6.
6. Liu, K. Study of ductile mode cutting in grooving of tungsten carbide with and without ultrasonic vibration assistance / K. Liu, X. P. Li, M. Rahman, X. D. Liu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2004. – Vol. 24, № 5-6. – P. 389-394.

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

ПРОДОЛЬНОЕ ПИЛЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ПИЛОЙ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ЗУБЬЯМИ

LONGITUDINAL WOOD CUTTING BY THE SAW WITH COMBINED TEETH

Для продольного пиления древесины используют пилы с различными зубьями: плющеными, разведенными, оснащенными пластинками твердого сплава, с косой заточкой и т.д. Одной из задач процесса пиления является снижение энергопотребления. Для решения такой задачи зубья пилы выполняют с косой заточкой: поочередно с правой и левой заточкой. При пилении на таких зубьях возникают поперечные составляющие силы резания, которые раскачивают пилу в поперечном направлении, вызывают вибрацию пилы. Для гашения поперечных колебаний пилы за зубьями с косой заточкой один зуб делают прямой, укороченный по высоте. Таким образом, зубья пилы могут быть выполнены по схеме: зуб с косой правой заточкой, зуб укороченный прямой, зуб с косой левой заточкой, зуб укороченный прямой и т.д.

На рис. 1, *a* показаны профили зубьев пилы в пропиле, на рис. 1, *б* – сечения срезаемых слоев зубьями при одинаковой подаче на зуб. Срезаемые слои разрезаны плоскостью параллельной вектору скорости подачи и перпендикулярной стенкам пропила. Ширина пропила равна *b*.

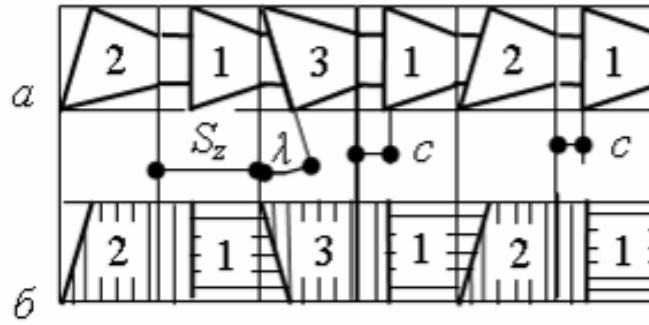


Рисунок 1 – Поперечные сечения срезаемых слоев:
а – зубчатая кромка пилы; б – сечения срезаемых слоев

Найдем площадь S поперечных сечений срезаемых слоев для зубьев:

– зуб 1 укороченный с прямой заточкой:

$$S = S_z b - cb + 0,5b^2 \operatorname{tg} \lambda; \quad (1)$$

– зуб 2 с косой левой заточкой:

$$S = S_z b + cb - 0,5b^2 \operatorname{tg} \lambda; \quad (2)$$

– зуб 3 с правой косой заточкой: $S = S_z b + cb - 0,5b^2 \operatorname{tg} \lambda$.

Анализируя формулы (1) и (2), отметим следующее.

При величине укорочения прямого зуба $c = 0$ $S_1 > S_2$ на $b^2 \operatorname{tg} \lambda$.

При $cb = 0,5b^2 \operatorname{tg} \lambda$ или $c = 0,5b \operatorname{tg} \lambda$ $S_1 = S_2 = S_3 = S_z b$. Это оптимальный случай, когда площади срезаемых слоев прямым укороченным и косыми зубьями равны. Для этого случая

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{2c}{b}, \quad (3)$$

где λ – угол наклона режущей кромки зуба с косой заточкой.

Можно принимать значение c из ряда (рис. 2):

$$c = 0,5S_z; \quad c = S_z; \quad c = 1,5S_z; \quad c = 2S_z. \quad (4)$$

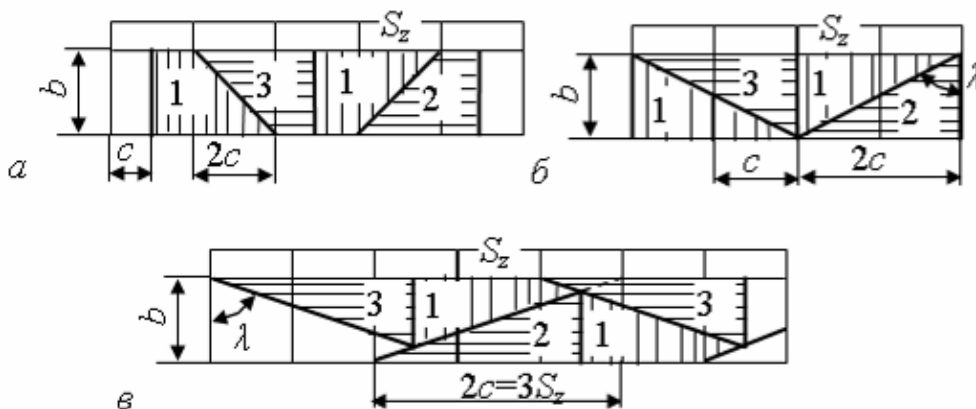


Рисунок 2 – Поперечные сечения срезаемых слоев при укорочении прямого зуба: $a - c = 0,5S_z$; $б - c = S_z$; $в - c = 1,5S_z$

При укорочении прямых зубьев $c = 0,5S_z$ и $c = S_z$ рабочая часть режущих кромок всех зубьев проходит от левой до правой стенок пропила. Площади срезаемых слоев всеми зубьями одинаковы и равны $S_z b$. Проекция рабочей части режущих кромок всех зубьев на направление ширины пропила равна b .

При укорочении прямых зубьев $c > S_z$ рабочие части режущих кромок зубьев не формируют одновременно обе стенки пропила. Площади срезаемых слоев прямыми зубьями стали меньше соответствующих площадей, срезаемых зубьями с косой заточкой (табл. 1). Проекция рабочей части режущих кромок зубьев на направление ширины пропила меньше b .

Среднее значение подачи на зуб определим как отношение площади к ширине пропила. При выполнении условия (3), т.е. при $c = 0,5S_z$ и $c = S_z$ для всех зубьев

$$S_{zcp} = S_z b / b = S_z .$$

Для других условий значения S_{zcp} находятся по данным табл. 1.

Таблица 1 – Параметры срезаемых слоев

Параметры	$c = 1,5S_z$		$c = 2,0S_z$	
	Зуб прямой	Зуб косой	Зуб прямой	Зуб косой
Площадь	$2,875S_z^2 ctg\lambda$	$3,125S_z^2 ctg\lambda$	$3,5S_z^2 ctg\lambda$	$4,5S_z^2 ctg\lambda$
Проекция рабочей части режущей кромки на направление b	$2,5S_z ctg\lambda$	$2,5S_z ctg\lambda$	$3S_z ctg\lambda$	$3S_z ctg\lambda$
Среднее S_{zcp} слоя	$1,15 S_z$	$1,25 S_z$	$1,17 S_z$	$1,5 S_z$

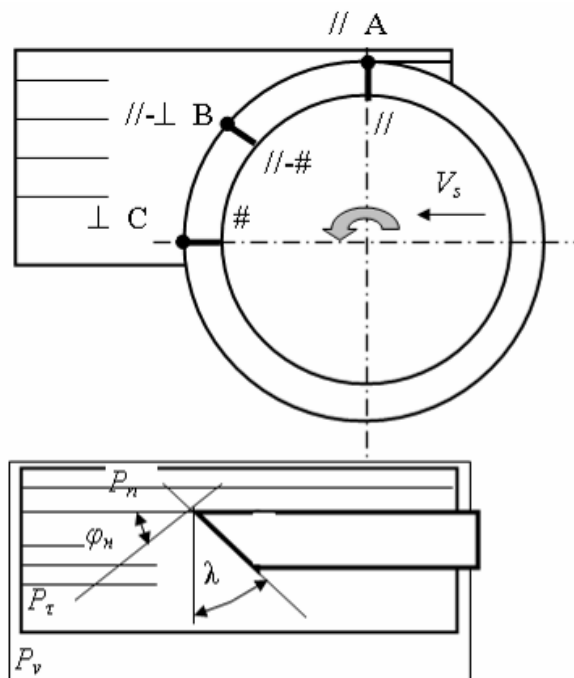


Рисунок 3 – Схема продольного пиления круглой пилой

Пример 1. Ширина пропила $b = 3,6$ мм, угол наклона режущей кромки $\lambda = 15^\circ$. Определить величину укорочения c зуба 1 и значение S_z .

Решение.

$$c = 0,5btg\lambda = 0,5 \cdot 3,6 \cdot tg15^\circ = 0,48 \text{ мм.}$$

Согласно (4) принимаем $c = S_z = 0,48$ мм.

Пример 2. Ширина пропила $b = 3,6$ мм, подача на зуб $S_z = 0,5$ мм, $c = 0,5S_z$. Определить угол наклона зубьев с косой заточкой.

Решение. Из (3) получим

$$\lambda = \arctg\left(\frac{2c}{b}\right) = \arctg\left(\frac{2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{3,6}\right) = 7,9^\circ.$$

На рис. 3 приведена схема пиления круглой пилой со скошенными зубьями.

Если угол наклона режущей кромки $\lambda=0^\circ$, то режущая кромка расположена перпендикулярно стенкам пропила (показана точкой). Угол встречи φ_δ при пилении изменяется от нуля в точке A до 90° в точке C ($90^\circ \geq \varphi_\delta \geq 0$). Процесс резания изменяется от продольного // до торцового \perp . В произвольной точке B дуги контакта имеет место продольно-торцовое резание.

Если угол наклона режущей кромки $\lambda=90^\circ$, то режущая кромка расположена параллельно стенкам пропила (показана прямой линией). Угол скоса φ_c при пилении изменяется от нуля в точке A до 90° в точке C ($90^\circ \geq \varphi_c \geq 0$). Процесс резания изменяется от продольного // до поперечного $\#$. В произвольной точке B дуги контакта имеет место продольно-поперечное резание, а угол скоса равен углу встречи, $\varphi_c = \varphi_\delta$.

Если угол наклона режущей кромки $90^\circ > \lambda > 0$, то в произвольной точке B дуги контакта резание переходит от продольно-торцового к продольно-поперечному и получается продольно-торцово-поперечное резание, которое характеризуется углом наклона φ_n . Угол наклона измеряется в основной плоскости P_v между направлением волокон, направленных в массив, и главной секущей плоскостью P_τ . Из рис. 3 следует, $\varphi_n = \lambda$.

Для определения сил и мощности резания необходимо знать значения фиктивной силы резания и касательного давления срезаемого слоя на переднюю поверхность зуба пилы. Для продольно-торцово-поперечного резания можно записать:

– фиктивная сила резания

$$p_{//-\perp-\#} = p_{//-\perp} - (p_{//-\perp} - p_{//-\#}) \frac{\varphi_n}{90}; \quad (5)$$

– касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность зуба

$$k_{//-\perp-\#} = k_{//-\perp} - (k_{//-\perp} - k_{//-\#}) \frac{\varphi_n}{90}, \quad (6)$$

где $p_{//-\perp} = 1,57 + 0,0359 \varphi_\delta [1]$;

$p_{//-\#} = 1,57 - 0,0065 \varphi_c$;

$k_{//-\perp} = (0,196 + 0,0039 \varphi_\delta) \delta + (0,069 + 0,0014 \varphi_\delta) V' - (5,4 + 0,158 \varphi_\delta)$;

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

$B_\# = 0,059 \dots 0,069$, меньшее значение $B_\#$ при $\delta < 55^\circ$, большее – при $\delta > 55^\circ$;

δ – угол резания, 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.

Если $\varphi_n = 90^\circ$, то из (5) и (6) получаем данные для продольно-поперечного резания. Если $\varphi_n = 0^\circ$, то из (5) и (6) получаем данные для продольно-торцового резания. Все это соответствует рис. 3.

На пиле половина зубьев выполнены с косой заточкой и половина – укороченными с прямой заточкой. Для выполнения энергетических расчетов надо найти среднее значение p и k и эти средние значения можно отнести к каждому зубу пилы в отдельности.

Порядок расчета поясним на примере.

Пример. На однопильном круглопильном станке с высотой стола над центром пилы $h = 105$ мм распиливаются сосновые брусья толщиной $t = 100$ мм на доски. Диаметр пилы $D = 650$ мм, число зубьев $z = 36$, толщина диска пилы $S = 4,4$ мм, уширение зубьев на сторону $S^* = 1,2$ мм, ширина пропила $b = 6,8$ мм, зубья оснащены пластинами твердого сплава ВК15, угол резания $\delta = 70^\circ$, скорость подачи $V_s = 30$ м/мин, частота вращения пильного вала $n = 1500$ мин⁻¹. Зубья пилы расположены по схеме: зуб с косо́й правой заточкой, зуб укороченный прямой, зуб с косо́й левой заточкой, зуб укороченный прямой и т.д.

Определить мощность механизма главного движения в сравнении с пилением пилой с зубьями прямой заточки.

Решение. 1. Определим значение подачи на зуб

$$S_z = 1000V_s / zn = 1000 \cdot 30 / (36 \cdot 1500) = 0,56 \text{ мм.}$$

По (4) принимаем укорочение прямого зуба

$$c = 1,5 S_z = 1,5 \cdot 0,56 = 0,83 \text{ мм.}$$

2. Находим угол наклона режущей кромки зуба с косо́й заточкой

$$\lambda = \arctg\left(\frac{2c}{b}\right) = \arctg\left(\frac{2 \cdot 0,83}{6,8}\right) = 13,8^\circ.$$

3. Окружной шаг зубьев

$$t_z = \pi D / z = 3,14 \cdot 650 / 36 = 56,7 \text{ мм.}$$

4. Углы (результаты расчетов сведены в табл. 1):

$$\text{– входа } \varphi_{\text{вх}} = \arccos \frac{h+t}{R} = \arccos \frac{2(105+100)}{650} = 0,888 \text{ рад;}$$

$$\text{– выхода } \varphi_{\text{вых}} = \arccos \frac{h}{R} = \arccos \frac{2 \cdot 105}{650} = 1,24 \text{ рад;}$$

$$\text{– контакта } \varphi_k = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}} = 1,24 - 0,888 = 0,354 \text{ рад;}$$

$$\text{– среднее значение } \varphi_{\text{ср}} = \varphi_e = (\varphi_{\text{вх}} + \varphi_{\text{вых}}) / 2 = (0,888 + 1,24) / 2 = 1,065 \text{ рад} = 61^\circ.$$

5. Длина дуги контакта пилы с брусом

$$l = \varphi_k D / 2 = 0,354 \cdot 650 / 2 = 114,9 \text{ мм.}$$

6. Скорость главного движения

$$V = \pi D n / 60000 = 3,14 \cdot 650 \cdot 1500 / 60000 = 51,1 \text{ м/с.}$$

7. Фиктивная сила резания древесины сосны:

$$\text{– } p_{//\perp} = 1,57 + 0,0359 \varphi_e = 1,57 + 0,0359 \cdot 61 = 3,76 \text{ Н/мм;}$$

$$\text{– } p_{//\#} = 1,57 - 0,0065 \varphi_c = 1,57 - 0,0065 \cdot 61 = 1,17 \text{ Н/мм;}$$

$$\text{– } p_{//\perp\#} = p_{//\perp} - (p_{//\perp} - p_{//\#}) \frac{\varphi_H}{90} = 3,76 - (3,76 - 1,17) \cdot 13,8 / 90 = 3,36 \text{ Н/мм;}$$

– среднее в блоке, включающем один прямой и один косо́й зуб,

$$p_{\text{ср}} = (p_{//\perp\#} + p_{//\perp}) / 2 = (3,36 + 3,76) / 2 = 3,56 \text{ Н/мм.}$$

8. Касательное давление стружки на переднюю поверхность зуба:

$$\text{– } k_{//\perp} = (0,196 + 0,0039 \cdot 61) 70 + (0,069 + 0,0014 \cdot 61) \cdot 51,1 - (5,4 + 0,158 \cdot 61) = 23,2 \text{ МПа;}$$

$$\text{– } k_{//\#} = 7,2 \text{ МПа;}$$

- $k_{//\perp\#} = k_{//\perp} - (k_{//\perp} - k_{//\#})\varphi_n/90 = 23,2 - (23,2 - 7,2) \cdot 13,8/90 = 20,8$ МПа;
- среднее в блоке $k_{cp} = (20,8 + 23,2)/2 = 22,0$ МПа.

Таблица 1 – Результаты расчетов

Параметры	Обозначение	Размерность	Пила комбинированная	Пила с прямой заточкой
Окружной шаг зубьев	t_z	мм	≈56,7	56,7
Углы:				
входа	$\varphi_{вх}$	рад	0,888	0,888
выхода	$\varphi_{вых}$	рад	1,242	1,242
контакта	φ_k	рад	0,354	0,354
среднее	$\varphi_{ср}$	град	61	61
Длина дуги контакта пилы с брусом	l	мм	114,9	114,9
Скорость главного движения	V	м/с	51,1	51,1
Фиктивная сила резания древесины сосны:				
$p_{//\perp}$	$p_{//\perp}$	Н/мм	3,76	3,76
$p_{//\#}$	$p_{//\#}$	Н/мм	1,17	-
$p_{//\perp\#}$	$p_{//\perp\#}$	Н/мм	3,36	-
$p_{ср}$	$p_{ср}$	Н/мм	3,56	-
Касательное давление стружки на переднюю поверхность зуба				
$k_{//\perp}$	$k_{//\perp}$	МПа	23,22	23,22
$k_{//\#}$	$k_{//\#}$	МПа	7,22	-
$k_{//\perp\#}$	$k_{//\perp\#}$	МПа	20,77	-
$k_{ср}$	$k_{ср}$	МПа	22,0	-
Величина затупления	$\Delta\rho$	мкм	6,7	6,7
Коэффициент затупления	α_ρ		1,18	1,18
Значение подачи на зуб среднее	S_{zcp}	мм	0,67	0,56
Толщина срезаемого слоя	a	мм	0,58	0,49
Удельная сила резания	$F_{уд}$	МПа	33,46	36,26
Мощность механизма главного движения	P	кВт	11,38	12,33

9. Величина затупления режущей кромки зуба

$$\Delta\rho = \gamma_{\Delta} \ln TK_n K_u / 1000 = 0,0001 \cdot 114,9 \cdot 1500 \cdot 480 \cdot 0,9 \cdot 0,9 / 1000 = 6,7 \text{ мкм.}$$

10. Коэффициент затупления при $\rho_o = 10$ мкм [2]

$$\alpha_\rho = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta\rho}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{22,04}{3,57}) \frac{6,7}{10 + 50} = 1,18.$$

11. Средняя подача на зуб:

$$\text{– зуб прямой } S_z = 1,15 S_{zcp} = 1,15 \cdot 0,56 = 0,64 \text{ мм;}$$

$$\text{– зуб косой } S_z = 1,25 S_{zcp} = 1,25 \cdot 0,56 = 0,69 \text{ мм;}$$

– среднее для пилы

$$S_{zcp} = (S_{zкос} + S_{zпрям}) / 2 = (0,69 + 0,64) / 2 = 0,67 \text{ мм};$$

12. Толщина срезаемого слоя зубом пилы:

– комбинированной $a = S_{zcc} \sin \varphi_6 = 0,67 \sin 61^\circ = 0,58 \text{ мм};$

– прямозубой $a = S_{zcc} \sin \varphi_6 = 0,56 \sin 61^\circ = 0,49 \text{ мм}.$

13. Удельная сила резания

$$F_{y\delta} = a_n a_w a_b \left(k + \frac{\alpha_{\rho P}}{a} + \frac{\alpha_{\Delta t}}{b} \right) = 1 \cdot 0,89 \cdot 1 \left(220 + \frac{1,18 \cdot 3,57}{0,58} + \frac{0,57 \cdot 100}{6,8} \right) = 33,46 \text{ МПа}.$$

14. Мощность механизма главного движения при работе пилой с комбинированными зубьями

$$P_k = \frac{F_{y\delta} b t V_s}{60 \cdot 1000} = \frac{33,46 \cdot 6,8 \cdot 100 \cdot 30}{60 \cdot 1000} = 11,38 \text{ кВт}.$$

При использовании пилы с прямыми зубьями мощность равна $P_n = 12,33 \text{ кВт}$. При формировании зубьев только с косой заточкой $P_{кос} = 10,9 \text{ кВт}$. Укорочение прямых зубьев комбинированной пилы до величины $c = S_z$ приводит к увеличению мощности $P_k = 11,54 \text{ кВт}$, а при $c = 0,5 S_z$ $P_k = 11,7 \text{ кВт}$. С уменьшением укорочения прямых зубьев комбинированная пила приближается по форме к прямозубой пиле. Таким образом рекомендуется работать комбинированной пилой с укорочением прямых зубьев равным $C = (1,5 \dots 2,0) S_z$.

Библиографический список

1. Глебов И.Т. Резание древесины: Учебное пособие. – Екатеринбург: УГЛТА, 2001.– 151 с.
2. Глебов И.Т. Резание древесины: Избранные лекции. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2005.– 99 с.

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

ТОРЦОВОЕ ПИЛЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ПИЛАМИ С НАКЛОННЫМИ РЕЖУЩИМИ КРОМКАМИ

FACE SAWING WOOD SAWS WITH INCLINED CUTTING EDGES

Для поперечного пиления древесины используются пилы, у которых режущие кромки зубьев поочередно наклонены влево и вправо под углом $10 \dots 15^\circ$. Так выполнены круглые пилы для поперечного пиления строгальные, твердосплавные отечественного производства, пилы импортные. Ниже изложена методика расчета режимов пиления такими пилами.