

## СИЛЫ И МОЩНОСТЬ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ НА ФРЕЗЕРНО-ОБРЕЗНЫХ СТАНКАХ МАЛОНОЖЕВЫМИ КОНИЧЕСКИМИ ФРЕЗАМИ

Пашков В. К.

*ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет» Министерства образования и науки РФ. Екатеринбург, Россия (620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37), e-mail: art-sit@yandex.ru*

Приведены по материалам экспериментальных исследований динамики фрезерно-обрезных станков аналитические зависимости сил и мощности резания от скорости подачи и размеров срезаемой рейки. Учитывались толщина и ширина срезаемой рейки. Установлена пропорциональная зависимость мощности резания от толщины и ширины фрезерования. Введено понятие – удельная сила резания, установлены значения удельных сил резания: касательной, осевой. Касательная и осевая силы резания пропорциональны площади сечения обработки. Приведенные экспериментальные зависимости сил и мощности на резание рекомендуются для назначения режимов резания. Для практических расчетов скорости подачи, мощности резания, сил резания при назначении режима резания фрезерно-обрезных станков определены значения постоянных констант в аналитических зависимостях. Удельная касательная сила резания при фрезеровании равна  $0,72 \text{ Н/мм}^2$ , удельная осевая сила резания –  $0,3 \text{ Н/мм}^2$ , нормальная сила резания равна 0 на всех режимах станка. Для определения действующих сил и скорости подачи при резании необходимо знать установленную мощность электродвигателя механизма резания и размеры толщины и ширины срезаемой рейки.

Ключевые слова: силы, мощность резания, режимы пиления.

## FORCES AND CAPACITY WHEN MILLING ON THE MILLING AND EDGING MACHINES LOW-KNIFE CONIC MILLS

Pashkov V. K.

*The Ural State Forest Engineering University, Russia, Yekaterinburg, e-mail: art-sit@yandex.ru*

Analytical dependences of forces and capacity on cutting from speed of giving and the sizes of a cut-off lath are given on materials of pilot studies of dynamics of milling and edging machines. The thickness and width of a cut-off lath were considered. Proportional dependence of capacity of cutting on thickness and width of milling is established. The concept of specific force of cutting is entered, values of specific forces of cutting are established: tangent, axial. A tangent and axial forces of cutting are proportional to the area of section of processing. The given experimental dependences of forces and capacity are recommended for cutting for purpose of cutting modes. For practical calculations of giving speed, capacities on cutting, cutting forces at purpose of a cutting milling mode and edging machines are defined values of constant constants in analytical dependences. The specific tangent force of cutting when milling is equal  $0,72 \text{ N/mm}^2$ , specific axial force of cutting of  $0,3 \text{ N/mm}^2$ , normal force of cutting is equal zero on all modes of the machine. For definition of operating forces and speed of giving when cutting it is necessary to know the established capacity of the electric motor of the mechanism of cutting and the sizes of thickness and width of a cut-off lath.

Key words: forces, cutting capacity, cutting modes.

### Введение

В отечественных станках Ц2Д-5АФ, Ц2Д-1Ф применяются торцово-конические малоножевые фрезы с подрезной пилой. В научно-технической литературе для оценки сил резания при фрезеровании, используют зависимости, структура которых различна, получена на физических моделях, которые часто не учитывают реальные отличия условий разных процессов рубки щепы. Нами проведены экспериментальные исследования напряженно деформированного состояния узлов и деталей фрезерно-пильного станка Ц2Д-1Ф, разработанного

Вологодским ГКБД, и к выпуску которого с 1987 года приступило Вологодское СПО. Результаты исследований были опубликованы в работах [4, 5, 6]. Обработка результатов экспериментальных исследований в части сил, крутящих моментов на ножах фрезерных головок и мощности электропривода в зависимости от высоты  $h$  и ширины фрезерования  $b$ , позволили установить реальные зависимости сил и мощности на резание от перечисленных технологических факторов.

### Кинематика попутного фрезерования

Схема попутного поперечно-продольно-торцового фрезерования приведена на рисунке 1.

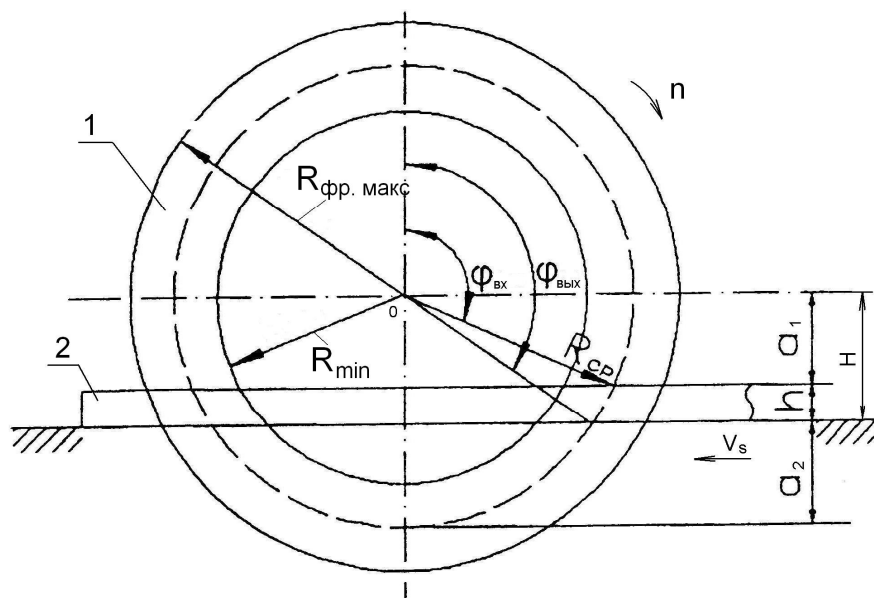


Рисунок 1. Схема фрезерования: 1 – фреза, 2 – заготовка

На схеме обозначено:  $R_{\min} \leq \frac{H}{\sin \gamma}$ ;  $H \geq R_{\text{фр. макс}} \cos \varphi + h$ ;  $R_{\text{фр. макс}}$  – максимальный

радиус резания торцово-конической фрезой;  $h$  – максимальная толщина обрабатываемой доски;  $\varphi$  – центральный угол резания, построенный на дуге контакта ножа с заготовкой  $\varphi = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}}$ .

Зависимости между параметрами  $R_{\min}$  и  $H$ ;  $H$  и  $R_{\text{фр. макс}}$  справедливы для значений переднего угла резания  $\gamma = 35 \dots 40^\circ$ ,  $\varphi = 40 \dots 60^\circ$  и угла конусности фрезы  $35 \dots 40^\circ$ .

Скорость вращения фрезы  $V$ , м/с, находится по формуле:

$$V = \frac{\pi D_{\text{фр}} n}{60 \cdot 1000}, \quad (1)$$

где  $D_{\text{фр}}$  – средний диаметр фрезы, мм;

$n$  – частота вращения фрезерно-пильного вала,  $\text{мин}^{-1}$ .

Скорость подачи  $V_s$ , м/мин, определяется так:

$$V_s = \frac{S_z Z n}{1000}, \quad (2)$$

где  $S_z$  – подача на резец, мм;

$Z$  – число зубьев, шт.

Кинематические углы встречи для срединного диаметра  $\varphi_{вх}$  и  $\varphi_{вых}$  определяются соответственно из выражений:

$$-\cos \varphi_{вх} = \frac{a_1}{R_{cp}} = 1 - \frac{(a_2 + h)}{R_{cp}}, \quad -\cos \varphi_{вых} = \frac{(a_1 + h)}{R_{cp}} = 1 - \frac{a_2}{R_{cp}}, \quad (3, 4)$$

где  $R_{cp}$  – радиус срединного сечения конической части фрезы, мм:

$$R_{cp} = \frac{R_{\min} + R_{\max}}{2}; \quad (5)$$

$a_1$  – расстояние от оси вращения фрезы до ближайшей поверхности распиливаемого материала, мм;

$a_2$  – выступ фрезы из материала по срединному диаметру, мм.

Чтобы обеспечить прочность резца и создать оптимальные условия резания, нужно, чтобы угол между передней гранью резца и плоскостью стола по направлению подачи был  $95 - 140^\circ$ .

Углы торцевого среза щепы определяются соответственно по формулам:

$$\psi_{щ} = \arccos \sqrt{1 - \sin \psi_n \cdot \sin^2 \psi_{\perp}}, \quad \psi_{щ} = \arctg \left\{ \frac{\text{tg} \psi_n \cdot \text{tg} \psi_k}{\sqrt{\text{tg}^2 \psi_n + \text{tg}^2 \psi_k}} \right\}, \quad (6, 7)$$

где  $\psi_{щ}$  – угол торцевого среза щепы в плоскости, проходящей вдоль волокон, град.;

$\psi_n$  – острый угол между плоскостью, параллельной направлению волокон по кромке щепы, и плоскостью среза, град.;

$\psi_k$  – острый угол между плоскостью, параллельной направлению волокон по пласту щепы, и плоскостью среза, град.;

$\psi_{\perp}$  – острый угол между плоскостью щепы и плоскостью среза в плоскости, перпендикулярной плоскости среза, град.

### **Динамика механизма резания**

В исследовании динамики механизма резания станка Ц2Д-1Ф изменение сил резания и крутящих моментов валов электродвигателей и шпинделей фрезернопильных головок вы-

полнялось без их разделения на силы и крутящие моменты от резания пилами и фрезерными головками.

Силы и мощность при резании подрезной пилой находятся по известной методике [7]. Силы и мощность резания фрезерными головками определяются по результатам экспериментальных исследований, выполненных в работах [4, 5, 6], и по руководящим техническим материалам [7].

Установлено пропорциональное влияние толщины доски  $h$ , мм и ширины фрезерования  $b_{фр}$ , мм на увеличение мощности резания. Например, изменение толщины доски в 1,34 раза (с 26 до 36 мм) приводит к увеличению мощности электродвигателя во столько же раз (табл. 1).

Таблица 1. Мощность резания  $P$ , кВт для принятых значений  $h$ , мм и  $b_{фр}$ , мм, для левой и правой фрезерных головок [4]

Номера опытов	$b$	$h$	$b_{фр}^{лз}$	$b_{фр}^{mn}$	$P$
7–8	250	36	90	90	49
13–14	250	26	90	90	36

При увеличении ширины фрезерования в 1,7 раз (с 90 до 150 мм) мощность электродвигателя возрастает в 1,78 раз (табл. 2).

Таблица 2. Мощность резания  $P$ , кВт для принятых значений  $h$ , мм и  $b_{фр}$ , мм [4]

Номер серии опытов	$b$	$h$	$b_{фр}^{лз}$	$b_{фр}^{mn}$	$P$
17–19	400	36	150	150	90
20–22	250	37	90	90	52

Можно сделать вывод о том, что мощность и касательная сила резания пропорциональны площади сечения обработки  $h \times b_{фр}$ , мм<sup>2</sup>.

Чтобы рассчитать силу резания для случаев, когда режимы и параметры обработки отличаются от примера, введем понятие касательной удельной силы резания на дуге контакта

та  $\tilde{F}_{уд.фр}$ , Н/мм<sup>2</sup>:

$$\tilde{F}_{уд.фр} = \frac{\tilde{F}_{xz\ фр}}{b_{фр} h}, \quad (8)$$

где  $\check{F}_{xz \text{ фр}}$  – касательная сила резания на дуге фрезерования.

Касательная удельная сила резания на дуге контакта при фрезеровании  $\check{F}_{y\partial.\text{фр}}$ , по данным работы [4], будет равна:

$$\check{F}_{y\partial.\text{фр}} = \frac{3799}{150 \cdot 35} = 0,72 \text{ Н/мм}^2. \quad (9)$$

Значение  $\check{F}_{y\partial.\text{фр}} = 0,72 \text{ Н/мм}^2$  – это постоянная величина при обработке необрезных досок на станке Ц2Д-1Ф [6]. Тогда касательная сила резания на дуге фрезерования  $\check{F}_{xz \text{ фр}}$ , с учетом выражения (8) определится по формуле:

$$\check{F}_{xz \text{ фр}} = \check{F}_{y\partial.\text{фр}} b_{\text{фр}} h. \quad (10)$$

Для других режимов резания и параметров обработки необходимо ввести поправочные коэффициенты [2, 3]:

$p_i$  – коэффициент, учитывающий влияние длины щепы и породы древесины;

$p_i = 0,465 \dots 1,13$ ;

$p_\phi$  – коэффициент, учитывающий влияние угла встречи, для углов 110–130° он равен 1;

$p_w$  – коэффициент, учитывающий влияние влажности, принимается по табл. 4;

$p_\pi$  – коэффициент, учитывающий влияние породы древесины; для сосны и ели принимается равным 1, для березы – 1,1.

Тогда выражение (10) в общем случае примет вид:

$$\check{F}_{xz \text{ фр}} = \check{F}_{y\partial.\text{фр}} b_{\text{фр}} h a_{\text{поп}}, \quad (11)$$

где  $a_{\text{поп}}$  – поправочный коэффициент,  $a_{\text{поп}} = p_i p_\phi p_w p_\pi$ .

Касательная окружная (средняя) сила фрезерования  $\check{F}_{x \text{ фр}}$  определяется по формуле:

$$\check{F}_{x \text{ фр}} = \check{F}_{xz \text{ фр}} \frac{z \varphi_k}{360}. \quad (12)$$

Угол контакта ножа с заготовкой  $\varphi_k$  равен:

$$\varphi_k = \frac{l_k}{\pi D_{\text{ср}}} 360, \quad (13)$$

где  $l_k$  – длина дуги контакта ножа с древесиной, мм;

$D_{\text{ср}}$  – средний диаметр торцово-конической фрезы, мм.

Длина дуги контакта  $l_k$  определяется из выражения:

$$l_{\kappa} = \sqrt{h^2 + b_{\text{фр}}^2 + b_{\text{фр}} \operatorname{tg} \alpha}, \quad (14)$$

где  $h$  – толщина доски, мм;

$b_{\text{фр}}$  – ширина фрезерования (средняя ширина рейки, отрезаемой подрезной пилой), мм;

$\alpha$  – угол поворота режущей кромки ножа относительно диаметральной плоскости фрезы ( $\alpha = 15^\circ$ ), град.

Мощность фрезерования  $N_{\text{фр}}$ , кВт определяется из выражения:

$$N_{\text{фр}} = \frac{\check{F}_{x\text{фр}} \cdot V}{1000}. \quad (15)$$

### Нормальные и осевые силы при фрезеровании торцово-коническими фрезами

Установлено, что проекции касательной силы резания на оси координат  $X, Z$  равны, следовательно, и нормальная сила резания –  $F_z = 0$ . Подтверждены выводы работ [2, 3] о незначительности нормальных сил резания при принятых условиях торцово-конического фрезерования щепы. Таким образом, в расчетах сил резания во фрезерно-обрезных станках с малоножевыми коническими головками можно нормальную силу  $F_z$  не учитывать.

Осевая сила резания колеблется в широких пределах [4]. Силы зависят от размеров обработки. С уменьшением  $h$  и  $b_{\text{фр}}$  уменьшаются и осевые силы.

Зависимость средней осевой силы резания  $\check{F}_{oc}$  от параметров  $h$  и  $b_{\text{фр}}$  устанавливается по методике определения касательной силы резания. Для этого для каждой группы толщин досок 26–27 мм, 29–30 мм и 39 мм определим удельную осевую силу резания на дуге контакта  $\check{F}_{уд.ос}$ , Н/мм<sup>2</sup>, по формуле:

$$\check{F}_{уд.ос} = \frac{\sum_1^n \check{F}_{icp} / n}{\left( \sum_1^k h_i / k \right) \left( \sum_1^m b_{i\text{фр}} / m \right)}, \quad (16)$$

где  $n, k, m$  – количество значений  $\check{F}_{icp}, h_i, b_{i\text{фр}}$ , принятое для определения их средних значений  $\check{F}_{ос\text{ср}}, h_{\text{ср}}, b_{\text{фр.ср}}$ .

Расчеты  $\check{F}_{уд.ос}$  выполняются отдельно для левой и правой фрезерных головок, и для обеих головок по каждой группе толщин досок. Затем определяется среднее значение удельной осевой силы резания  $\check{F}_{уд.ос}$  для всех групп толщин досок по формуле:

$$\bar{F}_{yд.ос} = \frac{\sum F_{iyд.ос}}{n}, \quad (17)$$

где  $n$  – количество групп толщин досок,  $n = 3$ .

Расчеты показывают, что средняя удельная осевая сила резания на дуге контакта ножа с древесиной  $\bar{F}_{yд.ос} = 0,30 \text{ Н/мм}^2$ , ее отклонения от среднего значения в зависимости от параметров обработки не превышают 5 %. Это свидетельствует о том, что осевая сила резания  $\bar{F}_{ос}$  изменяется пропорционально изменению  $h$  и  $b_{фр}$ . Таким образом, структура формулы для расчетов  $\bar{F}_{ос.ср}$  будет аналогичной формуле (12), по которой определяется касательная сила резания.

Средняя осевая сила резания  $\bar{F}_{ос.ср}$  на дуге контакта ножа с древесиной находится по формуле:

$$\bar{F}_{ос.ср} = \bar{F}_{yд.ос} h b_{фр} a_{нож}, \quad (18)$$

Осевая сила на обороте фрезы  $\bar{F}_{ос}$ , Н, будет равна:

$$\bar{F}_{ос} = \bar{F}_{ос.ср} \frac{z\varphi_k}{360}. \quad (19)$$

#### Заключение

1. Проведенные экспериментальные исследования позволили уточнить влияние условий процесса фрезерования на продольно-фрезерных станках с малоножевыми фрезами на силы и мощность резания.

2. Значения касательных и осевых сил резания и мощности резания пропорциональны площади поперечного сечения  $h \times b_{фр}$  срезаемой рейки.

3. Значения удельной касательной и удельной осевой силы резания соответственно равны 0,72 и 0,30 Н/мм<sup>2</sup>.

4. Значение нормальной силы резания в условиях фрезерования в продольно-фрезерных станках равно нулю.

5. Приведенные экспериментальные зависимости сил и мощности на резание в продольно-фрезерных станках с малоножевыми фрезами могут быть рекомендованы при назначении режимов их работы.

#### Список литературы

1. А.С. 1243943 СССР, МКИ<sup>3</sup> В27 L11/02. Фрезерно-обрезной станок / Г. В. Кудрявин, Н. А. Шадрин (СССР). – № 3721905/29-15., заявлено 04.04.84; опубл. 15.07.86, бюл. № 26.

2. Боровиков Е. М. и др. Лесопиление на агрегатном оборудовании / Е. М. Боровиков, Л. А. Фефилов, В. В. Шестаков. – М.: Лесная промышленность, 1985. 216 с.
3. Дружинин В. С. и др. Руководящие технические материалы. Режимы резания фрезерно-обрезных станков / В. С. Дружинин, Г. В. Кудрявин. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1986. 99 с.
4. Пашков В. К. Исследование и совершенствование фрезерно-обрезных станков. Отчет о НИР (промежуточный). 36/87. НТР 1870081239. – Свердловск: УЛТИ, 1989. 153 с.
5. Пашков В. К., Виноградов В. Ф. Экспериментальные исследования сил резания во фрезерно-обрезном станке модели Ц2Д-1Ф // Станки и инструменты деревообрабатывающих производств: межвуз. сб. науч. тр. – СПб.: ЛТА, 1991. С. 35–39.
6. Пашков В. К., Виноградов В. Ф. Тензометрирование сил резания во фрезерно-обрезных станках // Станки и инструменты деревообрабатывающих производств: межвуз. сб. науч. тр. – СПб.: ЛТА, 1992. С. 41–44.
7. Стахийев Ю. М. и др. Руководящие технические материалы по определению режимов пиления древесины круглыми пилами / Стахийев Ю. М., Пашков В. К. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1988. – 74 с.

**Рецензенты:**

Гороховский Александр Григорьевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой древесиноведения и специальной обработки древесины Уральского государственного лесотехнического университета, г. Екатеринбург.

Уласовец Вадим Григорьевич, доктор технических наук, профессор кафедры механической обработки древесины Уральского государственного лесотехнического университета, г. Екатеринбург.