

ВВЕДЕНИЕ

Начало изучению резания древесины положил русский ученый И. А. Тиме, изложивший результаты и аналитические обобщения своих опытов в труде «Сопrotивление металлов и дерева резанию» (1870 г.). Выдвинутые проф. И. А. Тиме гипотезы, предложенные схемы стружкообразования, расчетные формулы и числовые величины к ним утверждали механическо-математический подход к изучению резания, т. е. рассмотрение явлений процесса на основе законов механики материалов.

В 1934 г. в капитальном труде проф. Ленинградской лесотехнической академии М. А. Дешевого «Механическая технология дерева» изложена оригинальная, глубоко разработанная и методично построенная научная теория резания древесины. Вслед за И. А. Тиме М. А. Дешевой, применяя законы механики материалов к анализу процесса стружкообразования при резании, устанавливал связи между сопротивлением древесины резанию и показателями ее механических свойств.

Послевоенные годы в развитии учения о резании древесины характеризуются тремя научно-методическими направлениями: механико-математическим, физическим и физико-технологическим.

Механико-математическое направление (проф. С. А. Воскресенский, МЛТИ), развивая взгляды и гипотезы И. А. Тиме и М. А. Дешевого, добилось значительных успехов в изучении элементарного и сложного (станочного) резания, углубления аналитической теории резания древесины.

Физическое направление (проф. Е. Г. Ивановский, ЛЛТА), связывая научный поиск с углубленным изучением на клеточном и молекулярном уровне процессов, протекающих на поверхностях скольжения древесины по резцу, добилось существенных результатов в описании механических и физических явлений процесса резания, в разработке методов и средств

измерения механических и физических величин, характеризующих энергетику и качество резания.

Физико-технологическое направление (проф. А. П. Бершадский, БТИ) добилось значительных результатов для практических расчетов на основе теоретических и экспериментальных исследований, а также систематизации ранее проведенных исследований другими учеными. Получены формулы для расчета показателей процесса сложного резания в обобщенном виде.

Несмотря на различие в точках зрения на отдельные вопросы, результаты исследований всех трех направлений в развитии теории резания взаимно обогащают и дополняют друг друга, имея общие задачи и цели.

Исследования резания древесины и древесных материалов в нашей стране ведут все высшие учебные заведения, готовящие инженеров по лесным специальностям, а также отраслевые научно-исследовательские институты. Необходимость широкого круга исследований обусловлена объективными потребностями практики, цель которых направлена на формирование общей аналитической теории как одной из главных задач, стоящих перед современным учением о резании древесины и древесных материалов.

Исходя из этого, важнейшим элементом при подготовке специалистов по лесным специальностям является систематизация теоретических исследований, направленная на умение оптимизировать режимы резания на основе полученных знаний при решении конкретных задач по обработке древесины резанием.

Цель данного учебного пособия состоит в оказании помощи студенту для овладения системой знаний, необходимых для самостоятельного решения задач в области резания древесины, выполнения инженерных расчетов для получения исходных данных при конструировании и модернизации машин.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ

1.1. Понятие о резании

Резанием называется физический процесс обработки древесины, при котором в результате принудительного внедрения резца в заготовку нарушаются связи между ее частицами по заданной траектории движения резца с целью получения новой поверхности требуемой формы, размеров и качества (рис. 1).

Относительное движение резца в заготовке называется движением резания, а скорость этого движения – скоростью резания V (м/мин).

Чтобы резание было непрерывным или периодически повторяющимся, т. е. чтобы перейти на новую траекторию резания, необходимо движение подачи, а его скорость называется скоростью подачи U (м/мин).

Номинальной стружкой называется объем древесины, подлежащей отделению за один проход резца.

Фактической или просто стружкой называется деформированный в процессе резания объем номинальной стружки.

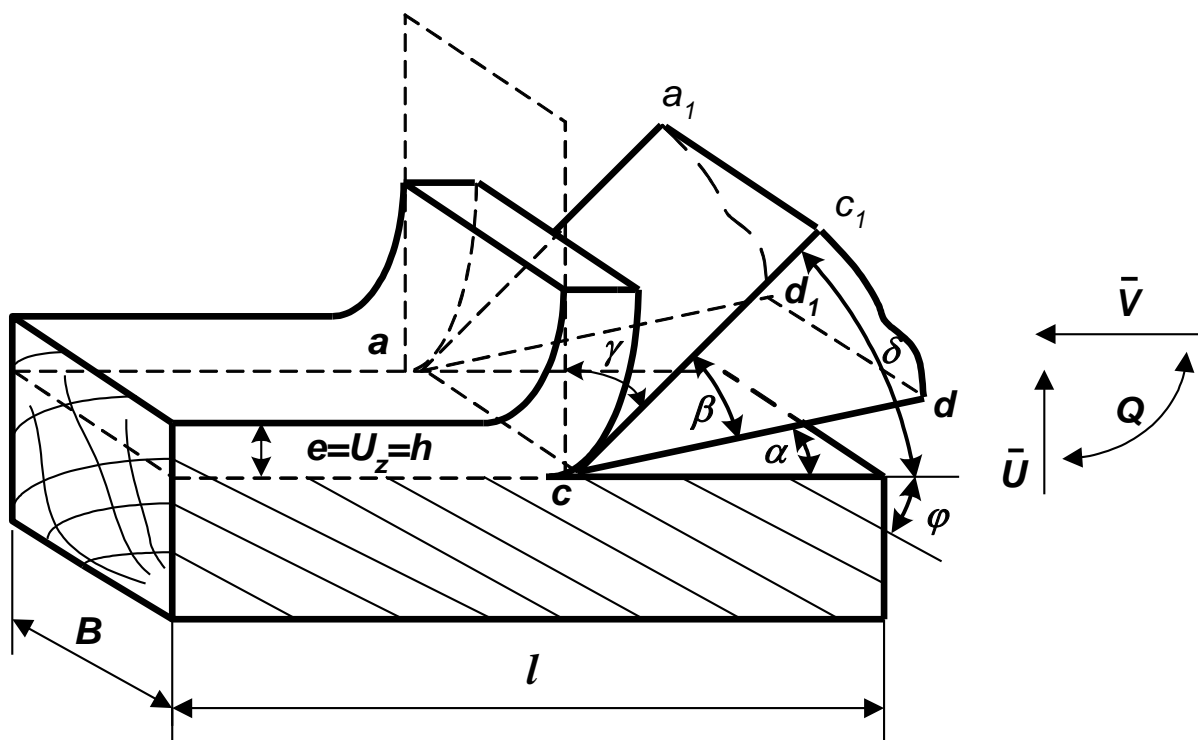


Рис. 1. Общая схема процесса резания

Ширина стружки есть ширина срезаемого слоя b (мм) – расстояние между боковыми поверхностями срезаемого слоя в пределах формируемой поверхности резания.

Длина стружки есть длина срезаемого слоя l (мм) – расстояние от точки входа резца в заготовку до точки его выхода, измеряемое по траектории резания.

Толщина стружки есть толщина срезаемого слоя e (мм) – расстояние между предыдущей и последующими траекториями резания, измеряемое по нормали к последующей траектории резания.

Для характеристики условий работы резца, зависящих от соотношения скорости резания и скорости подачи, служат показатели подачи на резец U_z (мм), высота снимаемого слоя h (мм), кинематический угол встречи θ (град), угол перерезания волокон φ (град).

Подача на резец – это расстояние между смежными траекториями резания, измеренное в направлении подачи. Подача на оборот – это путь лезвия резца, проходимый в направлении подачи за время одного цикла.

$$U_n = U_z Z, \quad (1)$$

где Z – количество резцов, участвующих в резании за один цикл.

Высота снимаемого слоя – это толщина слоя древесины, снимаемого резцом за один проход.

Кинематический угол встречи – это угол между векторами скорости резания и подачи.

Угол перерезания волокон – это угол между вектором скорости резания и направлением волокон в древесине, измеренной в контуре заготовки.

1.2. Элементы и геометрия резца

Резец – это клиновидное тело, ограниченное четырьмя поверхностями (гранями).

Передняя грань – это поверхность резца, активно воздействующая на стружку (aa_1cc_1), рис.1.

Задняя грань – это поверхность резца, обращенная к поверхности резания ($acdd_1$).

Боковые грани – это участки поверхности резца, получаемые пересечением плоскостью передней и задней граней ($cdc_1; add_1$).

Линии пересечения граней резца образуют режущие кромки. Линия пересечения передней и задней граней дает главную режущую кромку или лезвие (ac). Линия пересечения передней грани с боковыми дают боковые режущие кромки ($aa_1; cc_1$). Линии пересечения задней с боковыми дают задние кромки ($cd; ad_1$).

Если в резании участвует одна режущая кромка (лезвие), такое резание называется открытым ($ac > b$). Если в резании участвуют две режущие кромки – лезвие и одна боковая, то резание называется полузакрытым. Закрытое резание, когда в резании участвуют три режущие кромки – лезвие и две боковые кромки.

Углы резания, т. е. положения резца относительно заготовки, существенно влияют на процесс резания и, как правило, измеряются в плоскости движения резца, рис. 1.

Угол между передней и задней гранями называется углом заточки резца или заострения β (град).

Угол между задней гранью резца и плоскостью резания называется задним углом резания α (град).

Угол между передней гранью резца и плоскостью нормальной к плоскости резания называется передним углом резания γ (град).

Угол между передней гранью резца и плоскостью резания называется углом резания δ (град).

Из сказанного следует:

$$\alpha + \beta = \delta ; \quad \alpha + \beta + \gamma = 90^\circ . \quad (2)$$

2. РАБОТА, МОЩНОСТЬ И СИЛЫ РЕЗАНИЯ

2.1. Понятие удельной работы и давления резания

Работа и мощность, затраченная на резание, зависят прежде всего от номинальных размеров отделяемой стружки.

Номинальный объем древесины отделяемой стружки O (см³)

$$O = b e l . \quad (3)$$

Номинальный секундный объем срезаемой древесины O_c (см³/с)

$$O_c = \frac{b h U}{60 \cdot 1000} . \quad (4)$$

Тогда работа A (кг·м; (Дж·м)) и мощность N (кВт) , затрачиваемые на срезание номинального объема:

$$A = P l = K_o O = K_o b e l . \quad (5)$$

$$N = \frac{K_o O_c}{102} = \frac{K b h U}{102 \cdot 60 \cdot 1000} . \quad (6)$$

где K_o – условная удельная работа резания, т. е. работа, затраченная на срезание единицы объема номинальной стружки (1 см³), Дж/см³ (или кг·м/см³); P – средняя касательная сила резания, кг (Н).

Из уравнения (5) определим

$$K_o = \frac{A}{b e l} = \frac{P l}{b e l} ,$$

откуда

$$K = \frac{P}{b e} , \quad (7)$$

где K – среднее условное давление резания, приходящееся на 1 мм² поперечного сечения стружки, кг·м/мм² (Н/мм²).

Величины K и K_o названы условными, потому что работа резания затрачивается не только на деформирование стружки, но и на деформирование древесины под плоскостью резания.

Сила резания названа средней, потому что в процессе резания она не остается постоянной, а изменяется от нуля до максимума.

При принятых единицах измерения условная удельная работа резания K_0 численно равна среднему условному давлению резания K , хотя физический смысл этих двух понятий разный: условное давление резания – это среднее давление на поперечное сечение стружки, условная удельная работа характеризует динамику процесса резания – работу, затраченную на срезание и деформацию 1 см^3 древесины.

$$K = \left| \frac{Pl}{be l} \right| (\text{Дж/см}^3 \text{ (или кг}\cdot\text{м/см}^3)) = \left| \frac{P}{be} \right| (\text{Н/мм}^2 \text{ (или кг}\cdot\text{м/мм}^2)). \quad (8)$$

2.2. Силовое взаимодействие резца с древесиной

Рассматривая силовое взаимодействие резца с древесиной (рис. 2), необходимо отметить, что контакт резца с древесиной наблюдается как по лезвию, так и по передней и задней граням. Не учитывая роль лезвия отдельно, при резании реальным резцом с радиусом затупления лезвия $\rho_{\text{мкм}}$ криволинейная поверхность его ab активно воздействует на стружку силой N_1 над линией раздела 00 , а задняя поверхность bcd , углубленная в древесину ниже линии раздела 00 , подминает ее под лезвие силой N_2 и упругопластически деформирует поверхностный слой при перемещении резца в направлении V . Силы N_1 и N_2 по отношению к передней и задней граням являются нормальными, следовательно, их наличие обуславливает силы трения F_1 и F_2 .

Складывая силы N_1 , F_1 и N_2 , F_2 получаем N_1^0 и N_2^0 , которые раскладываем на направление движения резца и перпендикулярное ему, и получаем касательные силы по передней грани – P_n и задней – $P_з$, а также нормальные по передней грани – $P_{\text{зам}}$ и задней грани – $P_{\text{отж}}$.

Таким образом, при резании реальным резцом возникают две системы сил независимо друг от друга:

1) над линией 00 , действующие на сечение стружки $b \cdot e$:

$$P_n \parallel V \text{ и } P_{\text{зам}} \perp V,$$

2) под линией 00 , действующие на слой, прилегающий к поверхности резания:

$$P_з \parallel V \text{ и } P_{\text{отж}} \perp V$$

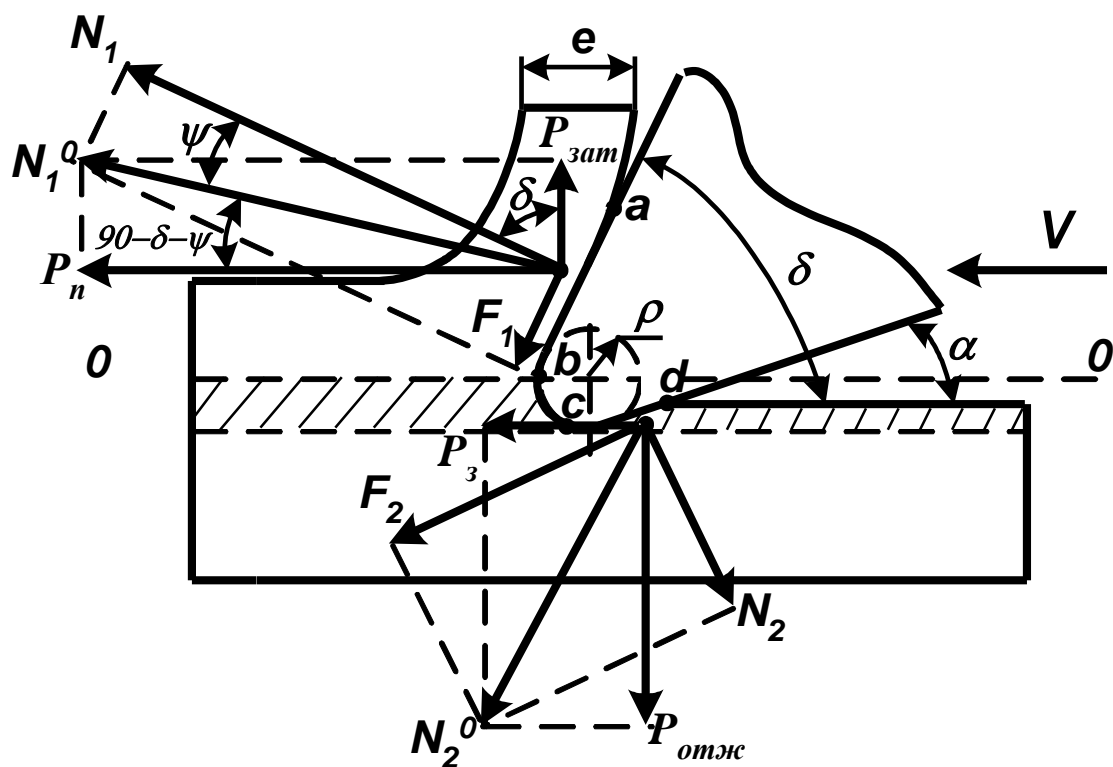


Рис. 2. Схема силового взаимодействия реза с древесиной

Складывая полученные силы по направлениям их действия получаем

полную касательную силу $P = P_n + P_3$,

полную нормальную силу $P_n = P \pm P_{зам}$. (9)

2.3. Общий закон резания

Из уравнения (7) полная касательная силы резания

$$P = K b e. \tag{10}$$

Разделив полученное уравнение на ширину стружки, получим удельную касательную силу резания.

$$P_1 = K e. \tag{11}$$

где P_1 – удельная касательная сила резания, приходящаяся на 1 мм ширины стружки, кг/мм (Н/мм).

Исследованиями различных процессов резания установлено, что связь между удельной силой резания P_1 и толщиной стружки $e > 0,1$ мм (макростружка) выражается уравнением прямой AB (рис. 3).

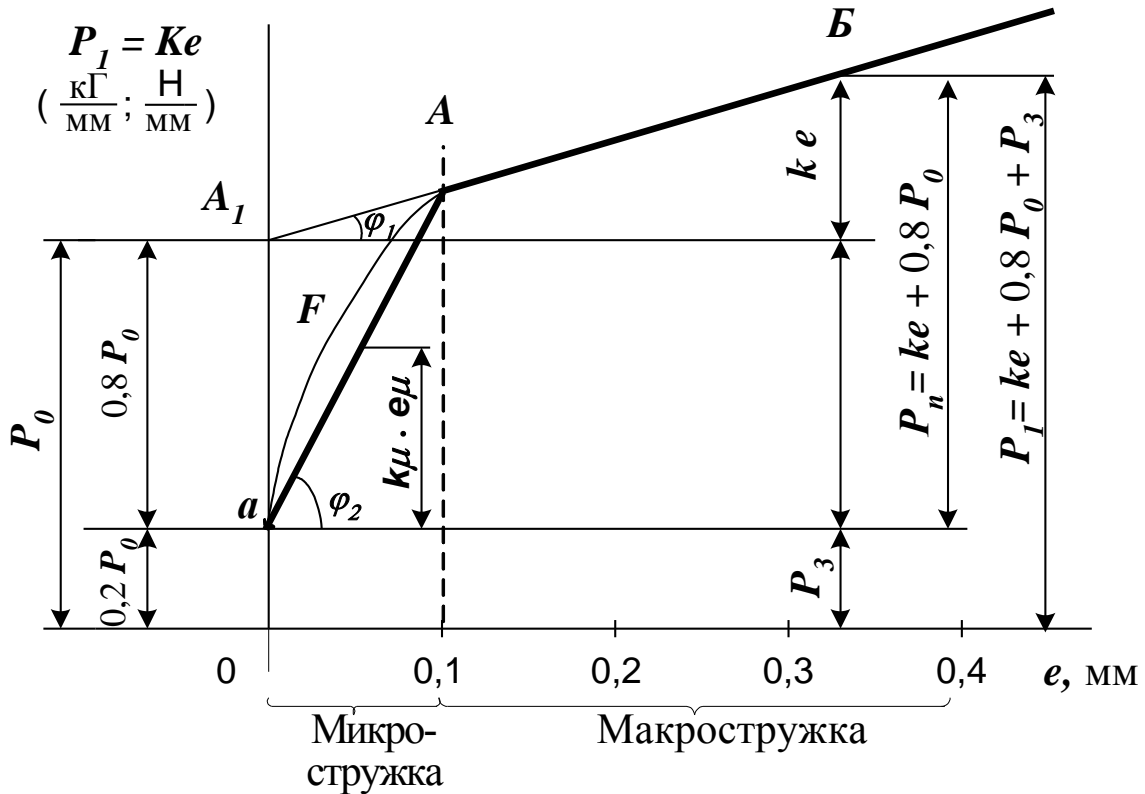


Рис. 3. График зависимости удельной силы резания от толщины стружки $P_1=f(e)$

Продолжая прямую AB до оси ординат при $e = 0$, проходим зону, где толщина стружки $e_\mu < 0,1$ мм (микростружка), при этом толщина микростружки становится все более соизмеримой с радиусом затупления резца ρ , в силу чего угол резания δ начинает расти и тем больше, чем меньше e_μ . Изменение угла δ нарушает закон прямой AB . Спад силы P_1 происходит по некоторой кривой aFA , которую в первом приближении принимаем за прямую aA . Таким образом удельную силу резания рассматриваем для двух зон: зона макростружек ($e > 0,1$ мм) и зона микростружек ($e < 0,1$ мм). Из графика определим P_1 :

для макростружек

$$P_1 = k e + P_0,$$

для микростружек

$$P_{1\mu} = k_\mu e_\mu + 0,2P_0, \quad (12)$$

где $k = t_q \varphi_1$; $k_\mu = t_q \varphi_2$, P_0 – фиктивная удельная сила резания по задней поверхности резца, полученная в результате экстраполяции прямой AB на

ось ординат при допущении, что зависимость $P_1 = f(e)$ и $P_{1\mu} = f(e_\mu)$ сохраняется. Для главных – видов резания значения P_0 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты А, Б, В, Р₀

Порода	A _⊥	A _∥	A _#	Б _⊥	Б _∥	Б _# *
Сосна	0,056	0,02	0,003	0,02	0,007	0,006–0,007
Береза	0,070	0,025	0,0045	0,024	0,008	0,007–0,01
Дуб	0,082	0,028	0,006	0,027	0,009	0,0085–0,012

Окончание табл. 1

Порода	В _⊥	В _∥	В _#	Р _{0⊥}	Р _{0∥}	Р _{0#}
Сосна	2,0	0,55	0,06	0,49	0,16	0,1
Береза	2,3	0,7	0,086	0,55	0,19	0,14
Дуб	2,56	0,76	0,1	0,64	0,21	0,17

Примечание. * – меньшие значения $B_{\#}$ при $\delta < 55^\circ$.

Установлено, что для острых резцов ($\rho = 4\text{--}6$ мкм) существует зависимость между фиктивной и реальной силами резания по задней поверхности резца.

$$P_3 = 0,2P_0 = (1 - 0,8)P_0, \quad (13)$$

где P_3 – реальная сила резания по задней поверхности резца.

Тогда из графика (рис. 3) можно записать

$$\begin{aligned} \text{для } e > 0,1 \text{ мм} \quad & P_1 = 0,8 P_0 + k e + 0,2 P_0 = k e + P_0, \\ \text{для } e < 0,1 \text{ мм} \quad & P_{1\mu} = k_\mu e_\mu + 0,2 P_0. \end{aligned} \quad (14)$$

Определим k_μ из условия, что граничная точка А при $e = e_\mu = 0,1$ мм лежит как на прямой АБ, так и на прямой аА, где k_μ – среднее давление стружки на передней грани для микростружек, e_μ – толщина микростружки, мм.

Подставим в уравнения (14) значения $e = e_\mu = 0,1$ мм и $P_3 = 0,2 P_0$ и, приравняв их, получим

$$k \cdot 0,1 + P_0 = k_\mu \cdot 0,1 + 0,2 P_0,$$

определим
$$k_\mu = \frac{k \cdot 0,1 + 0,8 P_0}{0,1} = k + 8 P_0,$$

тогда
$$P_{1\mu} = (k + 8 P_0) e_\mu + 0,2 P_0. \quad (15)$$

Разделив обе части уравнений (14) и (15) на e , получаем

для $e > 0,1$ мм
$$K = k + \frac{P_0}{e},$$

для $e < 0,1$ мм
$$K_\mu = k + 8 P_0 + \frac{0,2 P_0}{e_\mu} \quad (16)$$

Уравнения (16) позволяют определить реальное среднее давление резца на поперечное сечение стружки при открытом резании острыми резцами, где k – среднее давление стружки на переднюю поверхность резца.

После обработки опытных данных установлено, что $P_n = f(e, \delta, v, \varphi)$, а $P_3 = f(\rho, \varphi, \alpha)$ и методами математической статистики получены уравнения для расчета среднего давления резания для трех главных видов простого резания при различных режимах.

$$\begin{aligned} K_\perp &= (A_\perp \delta + B_\perp V - B_\perp) + \frac{P_{0\perp}}{e} = k_\perp + \frac{P_{0\perp}}{e}, \\ K_\parallel &= (A_\parallel \delta + B_\parallel V - B_\parallel) + \frac{P_{0\parallel}}{e} = k_\parallel + \frac{P_{0\parallel}}{e}, \\ K_\# &= (A_\# \delta + B_\# V - B_\#) + \frac{P_{0\perp}}{e} = k_\# + \frac{P_{0\#}}{e}, \end{aligned} \quad (17)$$

где A, B, B – коэффициенты для разных пород древесины, табл. 1; δ – угол резания, град; V – скорость резания (м/с), причем если $V < 50$ м/с, надо вместо V брать $(90 - V)$; P_0 – фиктивная сила резания по задней поверхности резца, табл. 1.

В случае переходных видов резания формулы для расчета k приобретают следующий вид:

$$k_{\parallel-\perp} = k_\parallel + \left(k_\perp - k_\parallel \right) \frac{\varphi}{90}, \quad P_{0\parallel-\perp} = P_{0\parallel} + \left(P_{0\perp} - P_{0\parallel} \right) \frac{\varphi}{90},$$

$$k_{\#-\perp} = k_{\#} + (k_{\perp} - k_{\#}) \frac{\varphi}{90}, \quad P_{0\#-\perp} = P_{0\#} + (P_{0\perp} - P_{0\#}) \frac{\varphi}{90}, \quad (18)$$

$$k_{\#-\parallel} = k_{\#} + (k_{\parallel} - k_{\#}) \frac{90 - \varphi}{90}, \quad P_{0\#-\parallel} = P_{0\#} + (P_{0\parallel} - P_{0\#}) \frac{90 - \varphi}{90},$$

где φ – угол перерезания волокон, град.

Примечание. * – меньшие значения $B_{\#}$ при $\delta < 55^{\circ}$.

Таким образом, для открытого резания острыми резцами, используя формулы (16), (17), (18) и табл. 1, можно определить среднее давление резания.

В практике обработки древесины чаще всего дело имеем с затупленными резцами, а резание может быть закрытым или полузакрытым.

Состояние режущей кромки существенно влияет на качество обработки и силы резания. Решающее значение на рост общей силы резания оказывает изменение силы по задней поверхности резца по мере его затупления. Если рост силы по задней грани учитывать коэффициентом затупления α_p , то она возрастает в α_p раз, и тогда

$$P_z = \alpha_p P_0 - 0,8 P_0 = (\alpha_p - 0,8) P_0. \quad (19)$$

Сравнивая формулы (13) и (19), принимаем, что $\alpha_p \geq 1$, т. е. острый резец имеет радиус затупления ρ_0 и ему соответствует $\alpha_p = 1$. Для всех типов пил принимается $\rho_0 = 10$ мкм, для фрез и ножей $\rho_0 = 4-5$ мкм.

Коэффициент α_p рассчитывается по формуле

$$\alpha_p = 1 + \frac{0,2 \Delta\rho}{\rho_0}, \quad (20)$$

где $\Delta\rho$ – приращение затупления резца на пути контакта его с древесиной.

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0 = \varepsilon L = \varepsilon \frac{h n T}{1000}, \quad (21)$$

где ε – коэффициент, учитывающий удельное затупление резца на пути резания 1 м, табл. 2; L – общий путь контакта резца с древесиной за время T , мин; h – высота снимаемого слоя за один проход резцом, мм; n – частота врезания резца, 1/мин; T – время работы инструмента, мин.

Коэффициент ϵ для сталей 9ХФ и ХВГ, мкм/м

Порода	Строгание и фрезерование	Пиление ленточными и круглыми пилами	Пиление рамными пилами
Хвойная	0,000 8	0,001	0,002
Твердолиственная	0,001 4	0,001 3	0,002 6

Примечание. Для углеводородистых сталей брать 2ϵ , для 9ХС – $0,75\epsilon$, для Х12Ф – $0,6\epsilon$, для Р18 – $0,5\epsilon$.

С учетом затупления резца формулы (16) для открытого резания принимают следующий вид:

$$\text{для } e > 0,1 \text{ мм} \quad K = k + \frac{\alpha_p P_0}{e}, \quad (22)$$

$$\text{для } e < 0,1 \text{ мм} \quad K_\mu = k + 8 P_0 + \frac{(\alpha_p - 0,8) P_0}{e_\mu}.$$

При закрытом резании на деформацию и прессование стружки во впадине зуба, а также трение при скольжении по боковым поверхностям пропила затрачивается дополнительная сила P_m , которая учитывается в уравнениях резания и относится к сопротивлению по передней поверхности резца. Сила трения P_m (кг (Н)), возрастает от нуля в начале врезания зуба до максимума на выходе резца из пропила. Средняя сила трения и прессования по обеим стенкам пропила

$$P_m = \frac{2(0 + \alpha e h)}{2} = \alpha e h. \quad (23)$$

Удельное сопротивление трению, т. е. сила, отнесенная к поперечному сечению стружки $b e$ (кг/мм² (Н/мм²)):

$$K_{mp} = \frac{\alpha e h}{b e} = \frac{\alpha h}{b}, \quad (24)$$

где α – коэффициент интенсивности трения, имеющий размерность условного удельного давления (кг/мм² (Н/мм²)), табл. 3.

Коэффициент интенсивности трения при закрытом резании

Коэффициент α	Рамная пила	Ленточная пила	Круглая пила
Плющенные зубья α_Δ	0,020	0,020	0,058÷0,06*
Разведенные зубья α_λ	0,025	0,025	0,072÷0,075

Примечание. * – меньшие значения для сухой древесины.

С учетом трения и прессования стружки в пропиле формулы (16) для закрытого резания принимают следующий вид:

$$\text{для } e > 0,1 \text{ мм} \quad K = k + \frac{\alpha h}{b} + \frac{\alpha_p P_0}{e}, \quad (25)$$

$$\text{для } e < 0,1 \text{ мм} \quad K_\mu = k + \delta P_0 + \frac{\alpha h}{b} + \frac{(\alpha_p - 0,8) P_0}{e_\mu}.$$

2.4. Расчет сил реального резания

Для расчета режимов обработки надо знать силу и мощность резания. Средняя за оборот касательная сила резания (кг (Н)), для всех видов обработки:

$$P = \frac{102 N}{V} = P_{зуб} \frac{l}{t}, \quad (26)$$

где N – мощность резания, определяется по формуле (6), кВт; $P_{зуб}$ – средняя за оборот касательная сила резания, приходящаяся на один резец, кг (Н); l – длина контакта резца с древесиной за один проход, мм; t – шаг между резцами, мм; V – скорость резания, м/с.

Средняя сила резания по задней поверхности резца (кг; (Н)), т.е. реальная сила воздействия резца на слой древесины под плоскостью раздела:

$$P_3 = \frac{(\alpha_p - 0,8) P_0 P}{K e}, \quad (27)$$

где K – среднее давление резания, кг/мм²; (Н/мм²);

$\frac{P}{K e} = b$ – ширина пропила всех зубьев, участвующих в резании за один оборот (мм).

Из уравнений (9) определим реальную силу резания со стороны передней поверхности резца P_n (кг (Н))

$$P_n = P - P_3. \quad (28)$$

Тогда нормальная сила резания со стороны передней поверхности резца, $P_{зам}$ (кг (Н)), определяется как

$$P_{зам} = P_n \operatorname{tg}(90 - \delta - \psi), \quad (29)$$

где ψ – угол трения, т. е. угол между N_I и N_I^0 (град) (см. рис. 2). Коэффициент трения стружки о переднюю грань $\mu = \operatorname{tg}\psi$, который зависит от материала трущихся тел, породы древесины, геометрии резца и режимов резания. Средние его значения приведены в табл. 4.

Выражение $(90 - \delta - \psi)$ может иметь отрицательное значение, тогда знак минус выносится за функцию и физически это означает, что сила $P_{зам}$ в зависимости от условий резания может менять знак (направление).

Таблица 4

Зависимость μ от ψ

μ	ψ	μ	ψ	μ	ψ
0,176	10°	0,249	14°	0,324	18°
0,212	12°	0,286	16°	0,364	20°

Другая нормальная сила $P_{отж}$ (кг (Н)) действует со стороны задней поверхности резца и определяется как

$$P_{отж} = \frac{P_3}{f_{np}}, \quad (30)$$

где f_{np} – суммарный (приведенный) коэффициент трения, учитывающий трение древесины по задней поверхности резца и упругопластические деформации древесины под линией раздела 00 (см. рис. 2).

Опытами установлено, что с увеличением радиуса затупления резца уменьшается f_{np} . Это объясняется тем, что вдавливать лезвие в древесину

на величину ρ труднее, чем смять ее вдоль направления резания. Значения f_{np} в зависимости от α_ρ приведены в табл. 5.

Таблица 5

Зависимость f_{np} от α_ρ

α_ρ	f_{np}	α_ρ	f_{np}	α_ρ	f_{np}	α_ρ	f_{np}	α_ρ	f_{np}	α_ρ	f_{np}
1,0	2,0	1,2	1,25	1,4	1,0	1,6	0,8	1,8	0,7	2,0	0,6
1,1	1,5	1,3	1,1	1,5	0,9	1,7	0,75	1,9	0,65		

Считая, что силы $P_{зат}$ и $P_{отж}$ действуют по одной линии в силу малости ρ , определим общую нормальную силу резания P_n (кг (Н)):

$$P_n = P_{отж} \pm P_{зат} . \quad (31)$$

По найденным касательным и нормальным силам резания можно определить усилие сопротивления подачи и усилие, необходимое для прижима заготовки во время ее обработки.

Усилие сопротивления подачи Q (кг (Н)):

$$Q = P \cos \theta \pm P_n \sin \theta . \quad (32)$$

Усилие прижима S , (кг (Н)):

$$S = P \sin \theta \pm P_n \cos \theta .$$

где θ – кинематический угол встречи, т. е. угол между векторами скорости резания и подачи.

2.5. Толщина стружки и подача на резец

В общем виде толщина стружки e (мм):

$$e = U_z \sin \theta . \quad (33)$$

Таким образом, при постоянной подаче с изменением кинематического угла встречи θ при круговом резании толщина стружки меняется.

Толщина стружки также зависит от способа уширения зубьев:

для плющенных зубьев $e_\Delta = U_z \sin \theta$, (34)

для разведенных зубьев $e_\lambda = \frac{b}{S} U_z \sin \theta$,

$$b = S + 2S_0. \quad (35)$$

где b – ширина пропила, мм; S – толщина пилы, мм; S_0 – уширение зубьев на сторону, мм; U_z – подача на зуб, мм.

Подача на резец (зуб) U_z – очень важный показатель процесса резания, т. к. он влияет, прежде всего, на шероховатость обрабатываемой поверхности, производительность и мощность резания. В этой связи необходимо различать:

1) подачу на резец, исходя из требуемой шероховатости поверхности обработки – U_{zk} ;

2) подачу на резец, исходя из производительности или работоспособности впадины зуба – U_{z0} (мм);

3) подачу на резец, исходя из установленной мощности на резание – U_{zN} (мм).

Во всех случаях $U_{zk} \leq U_{z0} \leq U_{zN}$.

При практических расчетах режимов резания U_{zk} выбирается по таблицам, в которых рекомендуются значения подачи на зуб для разных видов обработки древесины и ее состояния для получения заданного класса шероховатости поверхности; U_{z0} рассчитывается по емкости впадины зуба, т. к. для нормальных условий работы пилы необходимо выполнить условие – объем уплотненной стружки не должен быть больше заполняемого объема впадины зуба:

$$\alpha_{ynl} b h U_{z0} \leq \beta_{зан} \theta_{en} t^2,$$

отсюда

$$U_{z0} = \frac{\beta_{зан} \theta_{en} t^2}{\alpha_{ynl} h}, \quad (36)$$

где t – шаг зуба, мм; h – высота снимаемого слоя, мм; $\beta_{зан}$ – коэффициент заполнения впадины, который характеризуется отношением объема срезаемой древесины к объему впадины зуба. Практически $\beta \leq 0,8$; α_{ynl} – коэффициент уплотнения стружки, который характеризуется отношением объема срезаемой древесины к объему полученной стружки. Практически $\alpha_{ynl} \geq 0,4$.

Отношение $\frac{\alpha_{ynl}}{\beta_{зан}} = \sigma_{en}$ и характеризует напряженность работы впадины зуба. Чем меньше σ_{en} , тем напряженнее работает зуб.

θ_{en} – коэффициент площади впадины, (отношение высоты зуба к шагу):

$$\theta_{en} = \frac{h_3}{t}.$$

Практически θ_{en} колеблется от 0,12 до 0,6:
 для рамных пил $\theta_{en} = 0,4 \div 0,5$;
 для круглых пил для продольной распиловки $\theta_{en} = 0,25 \div 0,35$;
 для круглых пил для поперечной распиловки $\theta_{en} = 0,35 \div 0,6$;
 для ленточных пил $\theta_{en} = 0,12 \div 0,3$.

Если в формулу (36) подставить средние значения θ_{en} и σ_{en} , то для расчета можно пользоваться более простыми формулами:

для пиления рамными пилами
$$U_{z0} = \frac{t^2}{2h_{max}}; \quad (37)$$

для пиления ленточными пилами
$$U_{z0} = \frac{t^2}{(5-6)h_{max}}, \quad (38)$$

коэффициент 5 принимается при $\delta = 65^\circ$, $\alpha = 20^\circ$;

коэффициент 6 принимается при $\delta = 60^\circ$, $\alpha = 15^\circ$;

для пиления круглыми пилами
$$U_{z0} = \frac{t^2}{(4-5)h_{max}}; \quad (39)$$

коэффициент 4 принимается при $\delta = 60^\circ$, $\alpha = 15 - 20^\circ$;

коэффициент 5 принимается при $\delta = 65^\circ$, $\alpha = 15 - 20^\circ$.

Из уравнений (36), (37), (38), (39) можно определить минимально необходимый шаг зубьев для заданной U_z . При этом фактический шаг зубьев $t_{факт} \geq t_{теор}$.

U_{zN} – подача на резец при полном использовании мощности на резание рамными пилами определяется:

для плющенных зубьев
$$U_{zN\lambda} = \frac{2t^* P - \alpha_p P_0 b}{k b + \alpha_\Delta h};$$

для разведенных зубьев
$$U_{zN\lambda} = \frac{2t^* P - \alpha_p P_0 S}{k b + \alpha_\lambda h}.$$

Примечание: $2t^*/h$ – для рамных пил, для всех других брать t/h .

3. РАСЧЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

3.1. Пиление рамными пилами

Процесс резания рамными пилами применяется для раскряга бревен, брусьев на доски, бруски, горбыли одновременно несколькими пилами. Лесопильные рамы, где режущим инструментом являются рамные пилы, относятся к типам станков, где главное движение осуществляется кривошипно-шатунным механизмом, поэтому движение пилы возвратно-поступательное, а резание осуществляется за $\frac{1}{2}$ оборота коленчатого вала, за следующие $\frac{1}{2}$ оборота идет холостой ход, т. е. резания нет (рис. 4).

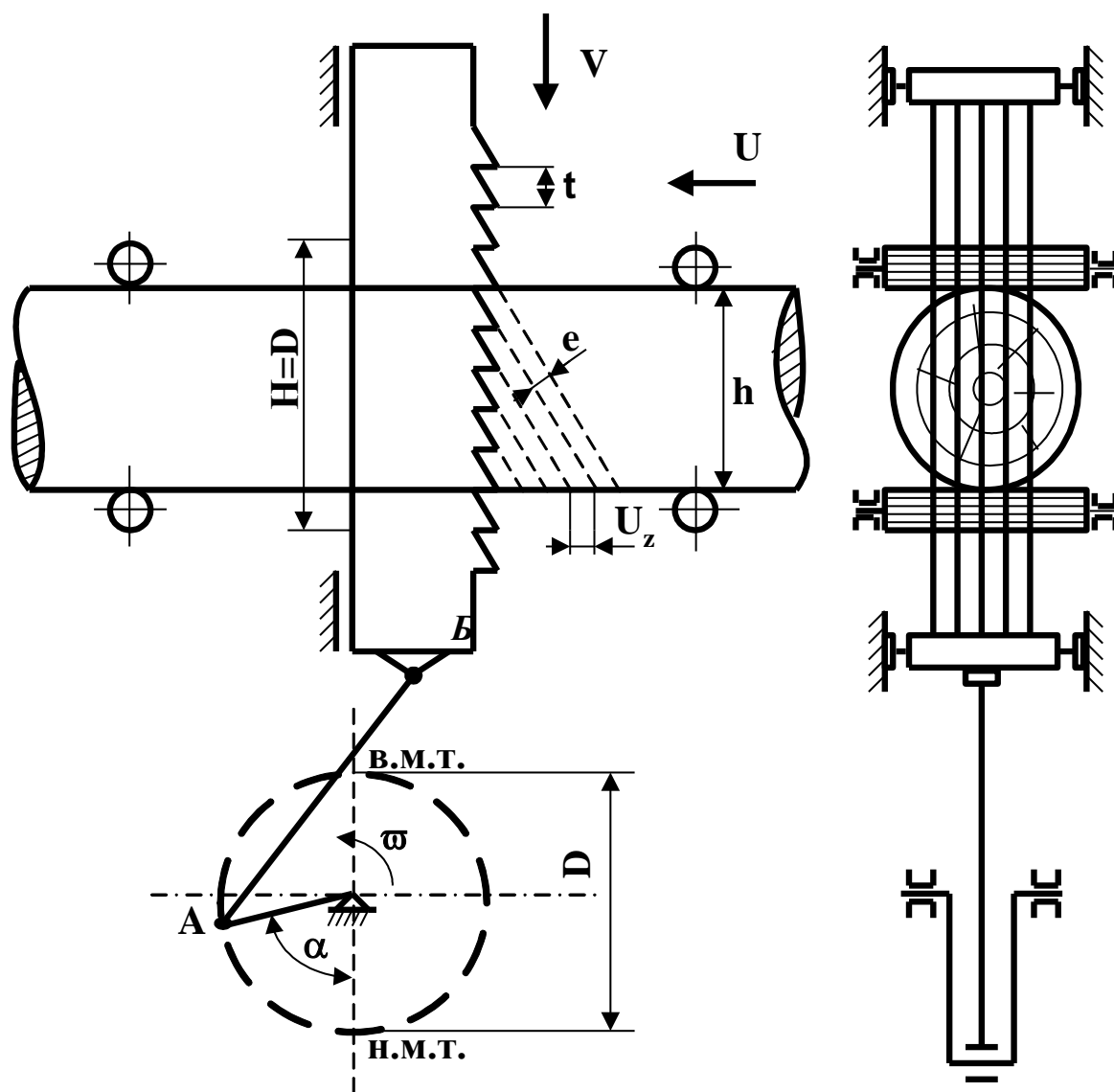


Рис. 4. Принципиальная схема резания и подачи на лесопильной раме

Точка A имеет постоянную скорость V_a (м/с):

$$V_a = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000},$$

где D – диаметр кривошипа, мм; n – число оборотов коленчатого вала, 1/мин.

Точка B имеет переменную скорость

$$V_b = V_a \sin \alpha,$$

где α – угол поворота кривошипа.

За один оборот пильная рамка проходит расстояние $2H$ (H – ход пильной рамки, мм), тогда среднюю скорость резания (м/с), можно определить

$$V = \frac{2H \cdot n}{60 \cdot 1000}. \quad (40)$$

Движение подачи осуществляется двумя парами рифленых вальцов.

Скорость подачи U , м/мин

$$U = \frac{U_z Z n}{1000}, \quad (41)$$

где U_z – подача на зуб, установленная при анализе U_{zk} , U_{z0} , U_{zN} , табл. 11 и формула (37); Z – число зубьев, участвующих в резании за один проход

$$Z = \frac{H}{t}. \quad (42)$$

Тогда подача за один оборот мм

$$U_n = U_z Z = \frac{H}{t} U_z. \quad (43)$$

Если считать, что кинематический угол встречи $\theta \approx 90^\circ$, то

$$e_\Delta = U_z; \quad e_\lambda = \frac{b}{S} U_z. \quad (44)$$

Пилы для лесопильных рам применяются как с плющенными, так и с разведенными зубьями, рис. 5. Размеры, характеризующие профиль зубьев, и данные об уширении зубьев приведены в табл. 6 и 7.

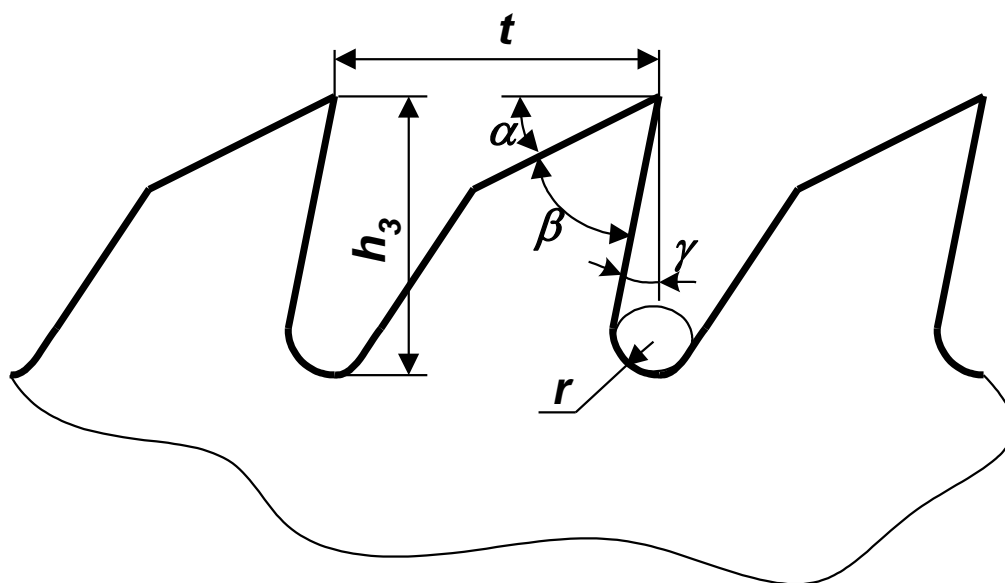


Рис. 5. Унифицированный профиль зуба рамной пилы

Таблица 6

Угловые и линейные параметры зубьев пил

t , мм	h_3 , мм	β°	γ°	r , мм	θ_{en}	Примечание
18	16	47	15	3	0,43	Ширина новых пил $B = 160, 180$ мм Минимальная ширина после переточек $B_0 = 80$ мм
22	18	47	15	4	0,42	
26	20	47	15	5	0,42	
32	22	47	15	6	0,42	
40	26	47	15	8	0,38	

Таблица 7

Уширение пропила S_0 , мм

Вид пилы	Распиловка хвойных пород			Распиловка твердолиственных пород	
	Влажность до 25 %	Влажность свыше 25 % зимой	Влажность свыше 25 % летом	Влажность до 25 %	Влажность свыше 25 %
Рамные	0,6–0,7	0,6–0,7	0,7–0,8	0,4–0,5	0,55–0,6

Примечание. Меньшие значения для более твердой древесины в группе пород.

Средняя h_{cp} и максимальная h_{max} высота пропила в зависимости от вида распиловки и вершинного диаметра $d_в$ даны в табл. 8, сбег бревна $C_б$ на половине его длины – в табл. 9.

Таблица 8

Значения h_{cp} и h_{max}

Вид распиловки	h_{cp} , мм	h_{max} , мм
Развал бревна	$0,8 (d_в + C_б)$	$d_в + C_б$
Развал бруса	h	h
Брусовка на один брус		
при $h < 0,5 d_в$	$0,8 (d_в + C_б)$	
при $h > 0,5 d_в$	$0,65 (d_в + C_б)$	$\sqrt{d_в + C_б - h_{cp}^2}$
при $h = 0,7 d_в$	$0,55 (d_в + C_б)$	

Таблица 9

Сбег бревна $C_б$

$d_в$, см	$C_б$ на половине длины бревна, мм	$d_в$, см	$C_б$ на половине длины бревна, мм	$d_в$, см	$C_б$ на половине длины бревна, мм	$d_в$, см	$C_б$ на половине длины бревна, мм
До 28	30	30–40	40	45–52	50	> 54	80

Рекомендации для выбора шага зуба и толщины рамных пил в зависимости от вида распиловки и высоты пропила приведены в табл. 10.

Таблица 10

Зависимость t и S от $d_в$, h и вида распиловки

$t_л$, мм	$t_д$, мм	S , мм	Развал бревна и выпилка двух брусьев $d_в$, см	Распиловка одного бруса $d_в$, см	Развал бруса толщиной h , см
18	22	1,8; 2,0	≤ 14	≤ 16	≤ 14
18	26	2,0; 2,2	≤ 20	≤ 30	≤ 22
22	32	2,0; 2,2; 2,5	≤ 32	≤ 42	≤ 36
26	40	2,0; 2,2; 2,5	≤ 34	≤ 44	≤ 38

**Классы шероховатости обработанной поверхности
при пилении рамными пилами**

Группа качества	Класс шероховатости	Подача на зуб по качеству		Примечание
		$U_{z\lambda}$, мм	$U_{z\Delta}$, мм	
I – тарные дощечки	$\nabla \partial 4$	0,3–0,6	0,4–0,9	Большие значения для твердолиственных пород
	$\nabla \partial 3$	0,6–0,8	0,9–1,2	
II – пиломатериалы	$\nabla \partial 2$	0,8–1,2	1,2–1,8	
	$\nabla \partial 1$	1,2–1,4	1,8–2,2	

Расчет мощности N (кВт), затраченной на пиление рамными пилами, производится по формуле (6):

$$N = \frac{K O}{102} = \frac{K b h_{cp} U}{60 \cdot 102} = \frac{K b h_{cp} U_z Z n}{60 \cdot 102 \cdot 1000} i, \quad (45)$$

где i – количество пил, установленных в постав.

Формулы для расчета среднего давления резания и сил резания (рис. 6) приведены в разд. 2.3 и 2.4. При расчете среднего давления резания нужно помнить, что на лесопильных рамах распиловка производится всегда вдоль волокон, а вид резания по отношению к ним \perp .

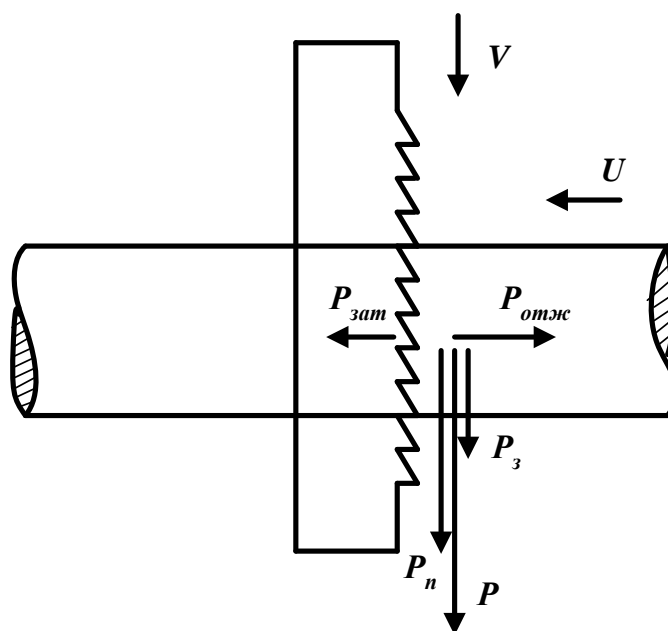


Рис. 6. Схема сил резания при пилении рамными пилами

3.1.1. Пример решения прямой задачи

ЗАДАЧА. На лесопильной раме производится распиловка в развал i -м количеством пил с плющенными зубьями бревна заданной породы диаметром в вершине $d_в$, заданной влажности по $\nabla \partial$ классу шероховатости в течение T часов.

Определить мощность и силы резания, если известно, что ход пильной рамки – H , число оборотов коленчатого вала – n .

РЕШЕНИЕ

1. Используя данные табл. 6, 7, 10, выбираем параметры пилы ($t, S, S_0, h_з, \delta$).

2. Используя данные табл. 8, 9 определяем $h_{ср}$ и h_{max} .

3. Используя данные табл. 11 и формулу (37), проводим анализ по выбору U_z .

4. Определяем кинематические параметры процесса пиления (V, U, Z, e), для чего используем формулы (40), (41), (42), (44).

5. Используя формулы (17), (18), (20), (21), (24), (25), (35) и табл. 1, 2, 3, с учетом вида резания по отношению к волокнам находим среднее давление резания K .

6. По формуле (45) рассчитываем мощность (N, N_i), затраченную на резание одной пилой и общую от всех пил, установленных в постав.

7. По формулам (26)–(32) и табл. 4, 5 определяем силы резания и сопротивления подачи ($P, P_n, P_з, P_{отж}, P_{зат}, P_n, Q$).

Примечание. При подстановке числовых значений в формулы следует обращать внимание на единицы измерения.

3.2. Пиление ленточными пилами

Пиление ленточными пилами происходит при непрерывном равномерном движении ленты и подачи заготовки, рис. 7.

Ленточное пиление используется в столярном производстве для прямолинейной и криволинейной распиловки, а также в лесопилении для распиловки горбылей, брусьев и бревен различных диаметров.

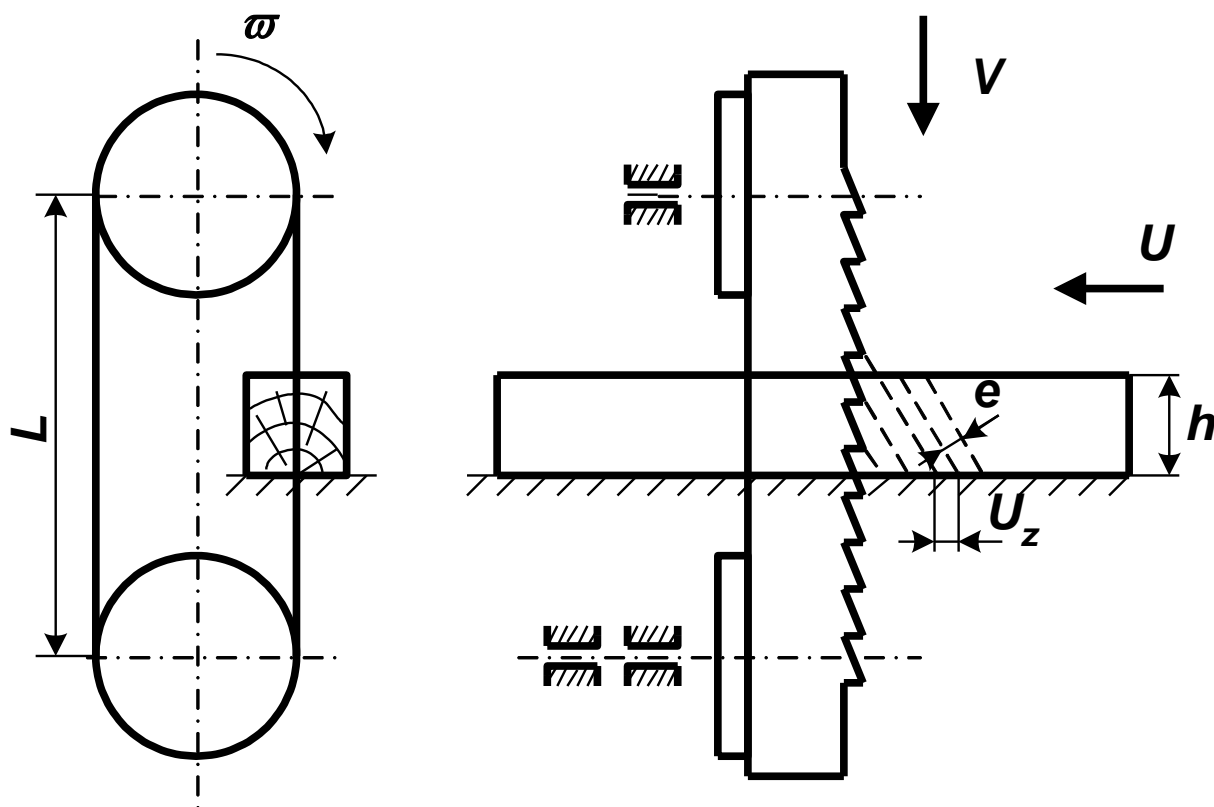


Рис. 7. Принципиальная схема резания при пилении ленточными пилами

Ленточная пила (рис. 8) представляет собой замкнутую ленту с зубчатым венцом на одной из кромок, которая натягивается на два пильных шкива, приводной и натяжной. Основные параметры ленточных пил приведены в табл. 12, 13 и 14. Уширение зубьев ленточных пил производится способом развода или плющения. Развод зубьев применяется для узких пил, т. е. для столярных. Уширение зубьев на сторону в зависимости от условий распиловки приведено в табл. 15.

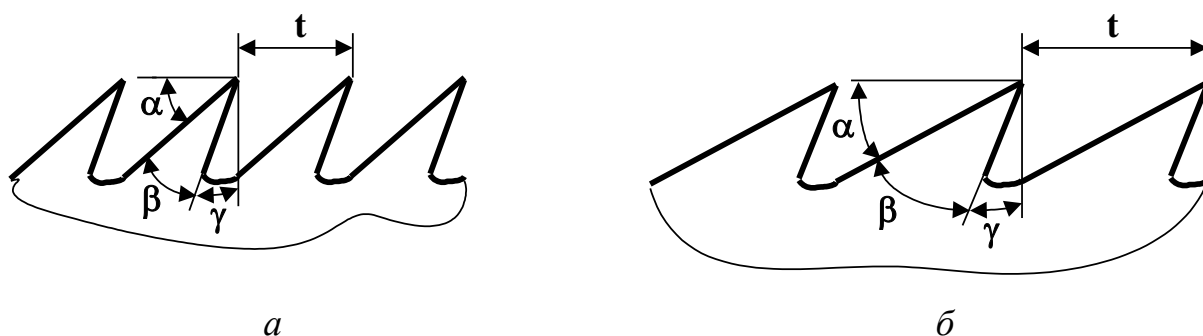


Рис. 8. Профиль зубьев ленточных пил:
a – узкие (столярные); *б* – делительные

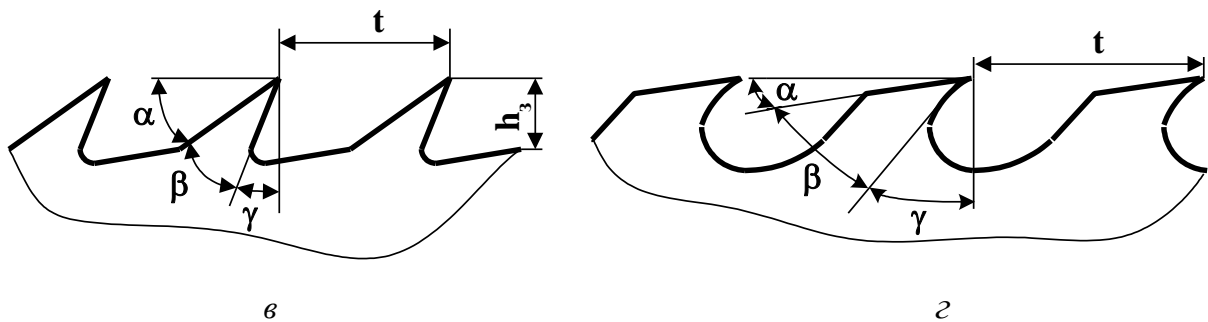


Рис. 8. Профиль зубьев ленточных пил:
 в – делительные; з – бревнопильные

Таблица 12

Ширина, толщина и шаг ленточных пил

Вид пил	<i>B</i> , мм	<i>S</i> , мм	<i>t</i> , мм	Примечание
Столярные	10–100	0,6–0,9	6–12	
Делительные	50–175	1,0–1,2	30–50	$S \leq 0,001\sqrt{D}$
Бревнопильные	230–350	1,4–2,2	50–80	$h_3 = (0,5 \div 0,7)t$

Скорость резания ленточной пилой для равномерно вращающегося шкива *V* (м/с) определяется по формуле

$$V = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000} \quad (46)$$

Таблица 13

Угловые значения ленточных пил

Профиль зуба	Угол резания, град				Примечание
	γ	β	α	δ	
Пилы для бревен	25	53	12	65	–
Пилы делительные тип <i>в</i>	15–25	45–55	20	65–75	Для твердых пород и твердой древесины
Пилы делительные тип <i>б</i>	30	45	15	60	Для хвойных пород древесины
Пилы столярные	5	50	35	85	–

Таблица 14

**Примерные данные о диаметрах шкивов, максимальной высоте пропила
и расстоянии между центрами шкивов**

Вид ленточно-пильных станков	Диаметр шкива D , мм	Высота пропила h , мм	Расстояние между шкивами L , мм
Столярные	400–1 000	100–400	1 400
Делительные	1 250–1 900	400–900	1 800–2 000
Бревнопильные	1 500–2 400	300–1 500	2 700–3 400

Таблица 15

Величина уширения S_0 для ленточных пил, мм

Вид пил	Распиловка хвойных пород			Распиловка твердолиственных пород	
	Влажность до 25 %	Влажность свыше 25 % зимой	Влажность свыше 25 % летом	Влажность до 25%	Влажность свыше 25%
Уширение зубьев на сторону, мм					
Столярные	0,25÷0,3	–	–	0,2÷0,25	–
Делительные и бревнопильные	0,4÷0,5	0,4÷0,5	0,5÷0,6	0,4÷0,45	0,45÷0,55

Скорость подачи заготовки U (м/мин) определяется по формуле

$$U = \frac{U_z Z n}{1000} \quad (47)$$

где U_z – подача на зуб, установленная при анализе U_{zk} , U_{z0} , U_{zN} (формула (38) и табл. 12, 16), при этом $t_{факт} > t_{теор}$; n – число оборотов шкива, 1/мин; Z – число зубьев, участвующих в резании за один оборот шкива.

$$Z = \frac{\pi D}{t}.$$

Тогда

$$U = \frac{U_z \frac{\pi D}{t} n}{1000} = 60V \frac{U_z}{t}. \quad (48)$$

**Классы шероховатости обрабатываемой поверхности
при пилении ленточными пилами**

Класс шероховатости	Подача на зуб U_z , мм		Примечание
	Разведенные	Плющенные	
$\nabla\partial 1-2$	1,4–1,8	2,0–2,5	Большие значения для твердолиственных пород
$\nabla\partial 3$	1,0–1,2	1,5–2,0	
$\nabla\partial 4$	0,65–0,68	1,0–1,2	
$\nabla\partial 5$	0,4–0,55	0,6–0,8	
$\nabla\partial 6$	0,2–0,25	0,3–0,4	
$\nabla\partial 7$	0,15–0,2	0,1–0,15	

При расчете $\Delta\rho$ (мкм) в формулу (21) вносятся изменения, таким образом при пилении ленточными пилами

$$\Delta\rho = \varepsilon \frac{h n T}{\left(1 + \frac{2L}{\pi D}\right) 1000}. \quad (49)$$

где $\left(1 + \frac{2L}{\pi D}\right)$ – период врезания зуба пилы за один оборот шкива.

После расчета средней касательной силы резания P (кг (Н)), ее проверяют на критическую силу $P_{кр}$ (кг (Н)), т. е. силу, при которой пила может потерять поперечную устойчивость.

$$P \leq P_{кр} = \frac{10^5 S^3 (0,82 + 0,002B_1)(0,95 + 0,01\sigma)}{L}, \quad (50)$$

где B_1 – ширина пилы до линии впадин зуба, $B = B_1 - h_3$; h_3 – высота зуба, $h_3 = (0,5 \div 0,7) t$; σ – среднее напряжение нормально натянутой пилы, кг/мм²:

для столярных пил $\sigma = 3-4$;

для делительных пил $\sigma = 5-6$;

для бревнопильных пил $\sigma = 7-10$.

При расчете среднего давления резания необходимо правильно выбрать вид резания по отношению к волокнам, т. е. учесть угол

перерезания волокон φ на ленточнопильных станках, вид резания по отношению к волокнам может быть \perp , $\#$, $\#-\perp$, при специальной пилености – \parallel . Во всех случаях, с учетом того, что $V \gg U$ принимается $\theta \approx 90^\circ$.

3.2.1. Пример решения прямой задачи

ЗАДАЧА. На ленточнопильном станке производится продольная распиловка плющенными (разведенными) зубьями бруса высотой h заданной породы и влажности по $\nabla\partial$ классу шероховатости в течение T часов.

Определить мощность и силы резания, если известно, что диаметр пильного шкива – D , число оборотов – n , расстояние между шкивами – L .

РЕШЕНИЕ

1. Используя данные табл. 12, 13, 14, 15 и рис. 8, выбираем параметры пилы ($S, S_0, t, B, h_z, \delta, \alpha$) с учетом условий распиловки.

2. Используя данные табл. 12, 16 и формулу (38), проводим анализ по выбору U_z, U_{z0} и корректируем шаг зуба t .

3. Определяем кинематические параметры процесса пиления (V, U, e), для чего используем формулы (44), (46), (47), (48).

4. Используя формулы (17), (18), (20), (24), (25), (35), (49) и табл. 1, 2, 3, с учетом вида резания по отношению к волокнам находим среднее давление резания K .

5. По формуле (45) рассчитываем мощность N , затраченную на резание ленточной пилой.

6. По формулам (26), (27), (28), (29), (30), (31), (32) и табл. 4, 5 определяем силы резания (см. рис. 6) и сопротивления подачи $P, P_n, P_z, P_{отж}, P_{заг}, P_n, Q$, при этом делаем проверку соблюдения условия по формуле (50).

Примечание. При подстановке числовых значений в формулы следует обращать внимание на единицы измерения.

3.3. Пиление круглыми пилами

Процесс резания круглыми пилами применяется при распиловке древесины (бревен, брусьев, досок) и древесных материалов.

В зависимости от направления волокон в древесине по отношению к вектору подачи различают пиление – продольное, поперечное и под углом волокон, а вид резания $\parallel-\perp$ при продольной распиловке и $\perp-\#$ при поперечной. При продольной распиловке производится раскрой по толщине или ширине, а при поперечной – по длине.

Главное движение – равномерное вращательное движение пильного диска. Скорость резания V (м/с) определяется как

$$V = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000}, \quad (51)$$

где D – диаметр пилы, мм; n – число оборотов пил, 1/мин.

Диаметр пилы D (мм) необходимо выбирать по возможности минимальным, обеспечивающим полный пропил заданной высоты заготовки h , рис. 9.

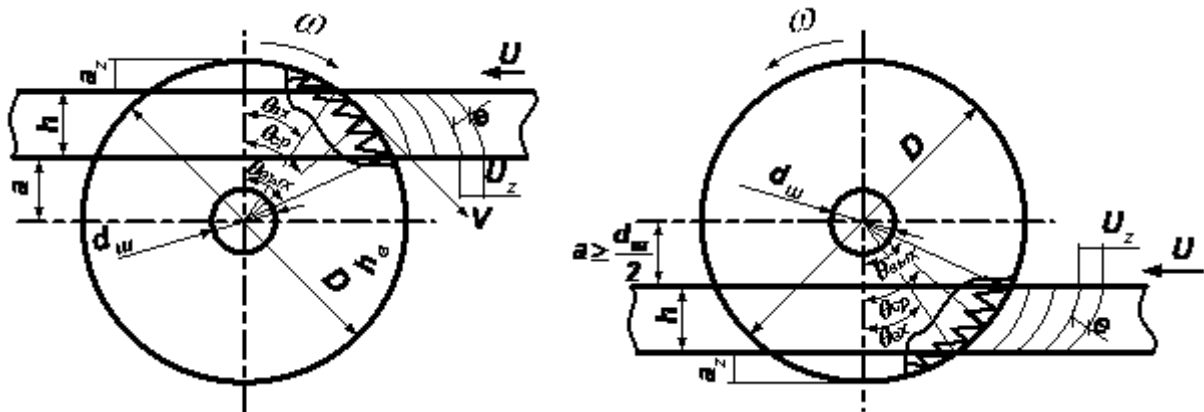


Рис. 9. Кинематическая схема процесса пиления

Для пилы, расположенной под столом,

$$D_{min} = 2(a_z + h + a). \quad (52)$$

Для пилы, расположенной над столом,

$$D_{min} = 2\left(a_z + \frac{d_{uw}}{2} + h\right),$$

где a_z – величина пилы, выступающая за заготовку, мм.

D до 400 мм	$a_z = (5-15)$ мм,
D до 600 мм	$a_z = (18-22)$ мм,
$D > 600$ мм	$a_z = (22-25)$ мм;

a – расстояние от центра пилы до низа заготовки, мм; d_{uw} – диаметр зажимной шайбы, мм.

$$d_{\text{ш}} = 5\sqrt{D} = (0,30 \div 0,45)D_{\text{мин}}, \quad (53)$$

Примечание. Меньшие значения коэффициента для пил большого диаметра.

Во всех случаях с учетом толщины стола $a \geq \frac{d_{\text{ш}}}{2}$, тогда, подставляя формулу (53) в формулу (52), получаем

$$D_{\text{мин}} = \frac{2a_z + 2h}{1 - (0,3 \div 0,45)}. \quad (54)$$

Полученную величину $D_{\text{мин}}$ согласуют с заданными размерами круглых пил (табл. 17) таким образом, чтобы с учетом припуска на последующие переточки $D > D_{\text{мин}}$. По выбранному D уточняют расстояние от центра пилы до заготовки a .

Таблица 17

Размеры круглых пил с плоским диском

Диаметр пилы, мм	Толщина пилы, мм	Профиль зубьев			
		I	II	III	IV
		Число зубьев пил			
		Продольная распиловка		Поперечная распиловка	
125	1,0; 1,2	–	48; 60	72	–
160	1,2; 1,4; 1,6	–	48; 60	72	–
200	1,4; 1,6; 1,8	–	48; 60	96; 72	–
250	1,4; 1,6; 1,8	36; 48; 60	–	96; 72	–
320	1,8; 2,0; 2,2	36; 48; 60	–	96; 72	–
400	2,0; 2,2; 2,5	36; 48; 60	–	120; 96; 72	120; 96; 72
500	2,2; 2,5; 2,8	36; 48; 60	–	120; 96; 72	120; 72
630	2,5; 2,8; 3,0	36; 48; 60	–	120; 72	120; 72
800	3,0; 3,2; 3,6	36; 48; 60	–	120; 72	120; 72
900	3,2; 3,6; 4,0	48; 72	–	120; 72	–
1 000	3,6; 4,0; 4,5	48; 72	–	120; 72	–
1 250	4,0; 4,5; 5,0	48; 72	–	120; 72	–
1 500	4,5; 5,0; 5,5	48; 72	–	120; 72	–

Использование пил малого диаметра позволяет уменьшить толщину диска, а, следовательно, и ширину пропила, также уменьшается кинематический угол встречи θ , что ведет к уменьшению толщины стружки и улучшению шероховатости поверхности пропила.

Анализируя табл. 17, 18, 19 и рис. 10, выбирают остальные параметры пилы $S, S_0, \alpha, \delta, Z$.

Таблица 18

Углы резания зубьев пил с плоским диском

Номер профиля	Передний угол γ	Угол заточки β	Задний угол α	Угол резания δ
Пилы для продольной распиловки				
I	35	40	15	55
II	20	40	30	70
Пилы для поперечной распиловки				
III	0	40	50	90
IV	-25	50	60	115

Таблица 19

Величина уширения пропила для круглых пил S_0 , мм

Вид пилы	Распиловка хвойных пород		Распиловка твердых пород	
	Влажность до 25 %	Влажность более 25 %	Влажность до 25 %	Влажность более 25 %
Обрезные станки	0,55–0,65	0,65–0,75	0,4–0,45	0,55–0,6
Ребровые станки	0,6–0,7	0,7–0,8	0,4–0,5	0,55–0,6
Реечные станки	0,5–0,6	0,6–0,7	0,4–0,45	0,5–0,55
Универсальные станки	0,5–0,6	0,6–0,7	0,4–0,45	0,5–0,55
Шпалорезные станки	0,8–0,9	1,0–1,1	–	–
Торцовочные станки	0,4–0,5	0,45–0,55	0,3–0,35	0,4–0,55

Примечание. Для конических пил величина уширения должна быть на 0,1 мм больше, чем для плоской.

Движение подачи – поступательное движение материала или пилы.
 Скорость подачи U (м/мин) определяется как

$$U = \frac{U_z Z n}{1000}, \quad (55)$$

где Z – количество зубьев на пиле; U_z – подача на зуб, установленная при анализе U_{zk} , U_{z0} , U_{zN} формула (39), табл. 20.

$$U_z = U_{zk} \leq U_{z0} = \frac{t^2}{(4-5)h}, \quad (56)$$

$$t_{\text{теор}} = \sqrt{U_{zk}(4-5)h}, \quad t_{\text{факт}} = \frac{\pi D}{Z}; \quad t_{\text{факт}} \geq t_{\text{теор}}.$$

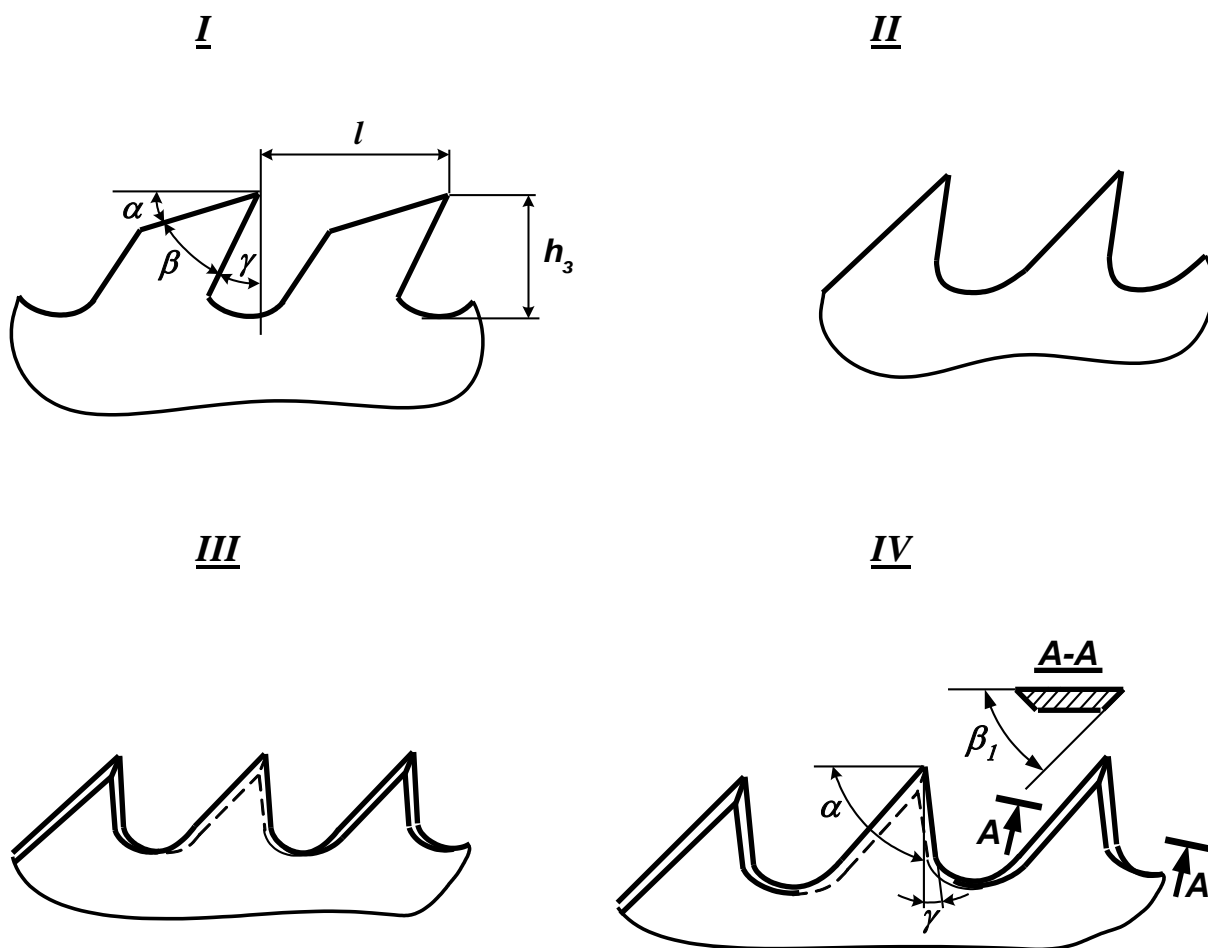


Рис. 10. Профили зубьев дисковых пил:

I, II – для продольной распиловки;
 III, IV – для поперечной распиловки

При пилении на круглопильных станках изменяется кинематический угол встречи, поэтому необходимо уметь находить кинематические углы входа $\theta_{вх}$, выхода $\theta_{вых}$ и средний $\theta_{ср}$ (град).

$$\begin{aligned}\theta_{вх} &= \arccos \frac{a+h}{R}, \\ \theta_{вых} &= \arccos \frac{a}{R}, \\ \theta_{ср} &= \arccos \frac{a+\frac{h}{2}}{R},\end{aligned}\tag{57}$$

тогда угол контакта резца с древесиной θ_k (град):

$$\theta_k = \theta_{вых} - \theta_{вх},\tag{58}$$

а длина дуги резания l_k (мм):

$$l_k = \frac{\pi D}{360} \theta_k.\tag{59}$$

Толщина стружки e (мм) при пилении круглыми пилами при одной и той же подаче на зуб – величина переменная:

для разведенных зубьев $e_\lambda = \frac{b}{S} U_z \sin \theta,$ (60)

для плющенных зубьев $e_\Delta = U_z \sin \theta$

Для расчетов принимается средняя толщина по $\theta_{ср}$.

Таблица 20

Классы шероховатости обработанной поверхности в зависимости от U_z и $\theta_{вых}$ при продольной распиловке круглыми пилами

Подача на зуб, мм		Угол выхода $\theta_{вых}$, град					
разведенный	плющенный	20	30	40	50	60	70
$\geq 1,2$	$\geq 1,8$	$\nabla\partial 2$	$\nabla\partial 2$	$\nabla\partial 2$	$\nabla\partial 2$	$\nabla\partial 2$	$\nabla\partial 2$
$\geq 1,0$	$\geq 1,5$	$\nabla\partial 3$	$\nabla\partial 3$	$\nabla\partial 3$	$\nabla\partial 3$	$\nabla\partial 2$	$\nabla\partial 2$
$\geq 0,8$	$\geq 1,2$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 3$	$\nabla\partial 3$
$\geq 0,5$	$\geq 0,75$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$
$\geq 0,3$	$\geq 0,45$	$\nabla\partial 5$	$\nabla\partial 5$	$\nabla\partial 5$	$\nabla\partial 5$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$
$\geq 0,2$	$\geq 0,3$	$\nabla\partial 5$	$\nabla\partial 5$	$\nabla\partial 5$	$\nabla\partial 5$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$
$\geq 0,1$	$\geq 0,15$	$\nabla\partial 6$	$\nabla\partial 6$	$\nabla\partial 6$	$\nabla\partial 6$	$\nabla\partial 6$	$\nabla\partial 5$

При расчете среднего давления резания необходимо правильно выбрать вид резания по отношению к волокнам, т. е. учесть угол перерезания волокон φ . Например, при продольной распиловке круглыми пилами вид резания всегда $\parallel\perp$, поэтому величины $K_{\parallel\perp}$, $k_{\parallel\perp}$ и $P_{o\parallel\perp}$ определяются по формулам (18) и (25), а при расчете $\Delta\rho$ (мкм), формула (21) с учетом θ приобретает вид

$$\Delta\rho = \varepsilon \frac{h n T}{1000 \sin \theta_{cp}}. \quad (61)$$

По вычисленному значению $K_{\parallel\perp}$ определяют мощность и силы резания, рис. 11, для чего используются формулы (6), (26)–(32).

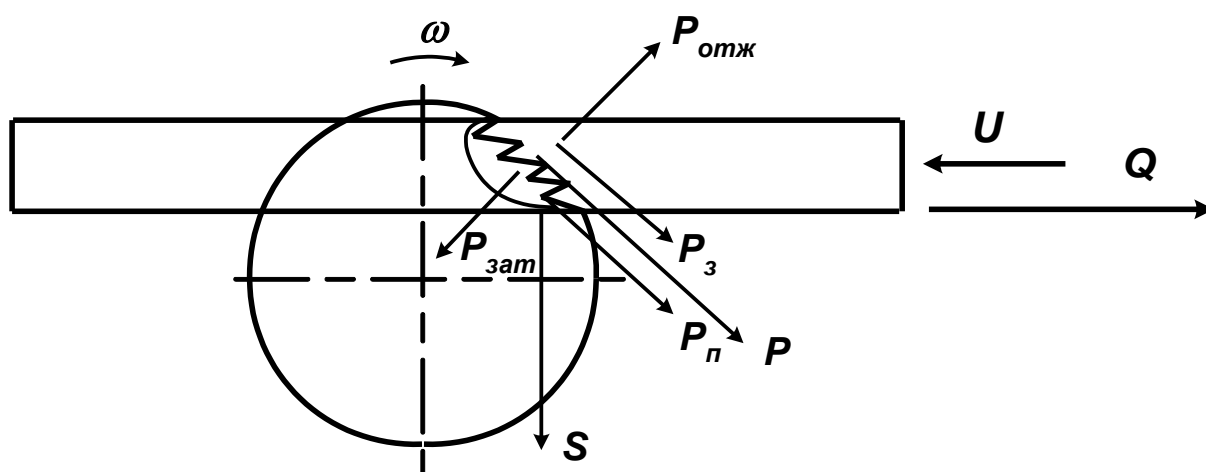


Рис. 11. Схема сил при пилении круглыми пилами

Известно, что с увеличением толщины стружки (подачи на зуб) уменьшаются силы резания и мощность резания, поэтому в ряде случаев, особенно если уширение зубьев на сторону сделано методом плющения, рекомендуется выбирать пилы с меньшим количеством зубьев. Однако не следует забывать, что с увеличением подачи снижение энергопотребления незначительное, а шероховатость поверхности увеличивается и снижается точность распила.

3.3.1. Пример решения прямой задачи

ЗАДАЧА. На круглопильном станке производится продольная распиловка досок толщиной h заданной породы и влажности W разведенными зубьями по $\nabla\partial$ классу шероховатости в течение T часов.

Определить мощность и силы резания, если известно, что станок с нижним расположением пилы, число оборотов которой n .

РЕШЕНИЕ

1. Используя рис. 9, формулу (54) и задавшись величиной a_z , определяем минимальный диаметр D_{min} , необходимый для распиливания заданной высоты заготовки.

2. Используя табл. 17, 18, 19 и рис. 10, подбираем параметры пилы D , Z , S , S_0 , δ , α и по формулам (35), (52), (53), определяем b , $t_{факт}$, a , $d_{ш}$.

3. Находим кинематические характеристики пиления круглой пилой, используя формулы (51), (57), (58), (59), вычисляем V , $\theta_{вх}$, $\theta_{вых}$, $\theta_{ср}$, θ_k , l_k .

4. Используя данные табл. 20 и формулы (39), (59), (60), проводим анализ по выбору подачи на зуб U_z и определяем скорость подачи U и среднюю толщину стружки $e_{ср}$.

5. Используя формулы (17), (18), (20), (25), (61) и табл. 1, 2, 3 с учетом вида резания по отношению к волокнам Находим среднее давление резания K .

6. По формуле (45) рассчитываем мощность, затраченную на пиление N .

7. По формулам (26), (27), (28), (29), (30), (31), (32), табл. 4, 5 и рис. 11 определяем силы резания и сопротивления подачи P , P_n , P_z , $P_{отж}$, $P_{зат}$, S , Q , P_n .

Примечание. При подстановке числовых значений в формулы обращать внимание на единицы измерения.

3.4. Особенности поперечной распиловки

Процесс резания круглыми пилами для поперечной распиловки используется со встречной или попутной подачей. Зубья пил имеют профиль III или IV (рис. 10, табл. 17) с косой заточкой по передней и задней поверхностям. Угол косой заточки β_l составляет для мягкой древесины 55–70°, для твердой – 70–80°. Наличие углов косой заточки делают боковые кромки зубьев пил острозаточенными, и они перерезают волокна в торец, формируя стенки пропила. Стружка образуется

скалыванием поперек волокон и дна пропила, ширина ее меньше ширины пропила, поэтому при расчете давления резания не учитывается работа сил трения, хотя резание закрытое. Среднее условное давление резания $K_{\perp-\#}$ (Н/мм² (кг/мм²)) при поперечной распиловке не зависит от скорости резания, высоты пропила и кинематического угла встречи.

$$K_{\perp-\#} = k_{\perp-\#} + \frac{\alpha_p \cdot P_{0\perp-\#}}{e}, \quad (62)$$

$$\begin{array}{l} \text{где } K_{\text{сосна}} = 6,2 - 1,4b + (0,042 - 0,0006\gamma)\beta_1 \\ K_{\text{береза}} = 8 - 1,8b + (0,058 - 0,0008\gamma)\beta_1 \\ K_{\text{дуб}} = 10 - 2,2b + (0,07 - 0,001\gamma)\beta_1 \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} P_0 = 0,1 \\ P_0 = 0,12 \\ P_0 = 0,15 \end{array} \right.$$

По найденному значению $K_{\perp-\#}$ с учетом вышеприведенных формул определяем мощность и силы резания.

Шероховатость поверхности зависит от подачи на резец, углов косой заточки и переднего угла резания и определяется по табл. 21.

Таблица 21

Классы шероховатости при поперечной распиловке

Класс шероховатости	Подача на резец U_z , мм при углах			
	$\beta_1 = 60^\circ$		$\beta_2 = 70^\circ$	
	$\gamma = -35^\circ$	$\gamma = -5^\circ$	$\gamma = -35^\circ$	$\gamma = -5^\circ$
$\nabla\partial 5$	0,05	–	0,05	–
$\nabla\partial 4$	0,2	0,05	0,15	0,05
$\nabla\partial 3$	0,02	0,02	0,2	0,2

3.5. Особенности пиления цепными пилами

Цепные пилы применяются для поперечной распиловки лесоматериалов. К основным параметрам цепной пилы относятся: тип цепи и пильной шины, скорость резания и продвижения, диаметр звездочки.

Тип и размеры цепной пилы являются основными факторами, определяющими размеры и конструкцию остальных частей пильного механизма. Большое значение имеет шаг цепи t . Для переносных цепных пил $t = 10-15$ мм, для станков – $t = 20-30$ мм.

Цепная пила состоит из шарнирно связанных между собой звеньев (рис. 12), из которых наружные осуществляют процесс пиления, а внутренние формируют дно пропила. У переносных пил толщина среднего звена цепи $a_1 = 1,8-3,2$ мм и крайних $a_2 = 1,2-1,6$ мм. Диаметр звеньев в уширенной части $D = 9-10$ мм, а диаметр отверстия у среднего звена $d_1 = 5-6$ мм, у крайнего $d_2 = 3,54$ мм.

При расчете цепной пилы за основной параметр звена цепи следует принимать диаметр шарнира у среднего звена d_1 . Тогда остальные расчетные размеры будут в пределах следующих значений:

$$D = \beta d_1; \quad a_1 = \beta_1 d_1; \quad a_2 = \beta_2 d_1; \quad d_2 = 0,65 d_1. \quad (63)$$

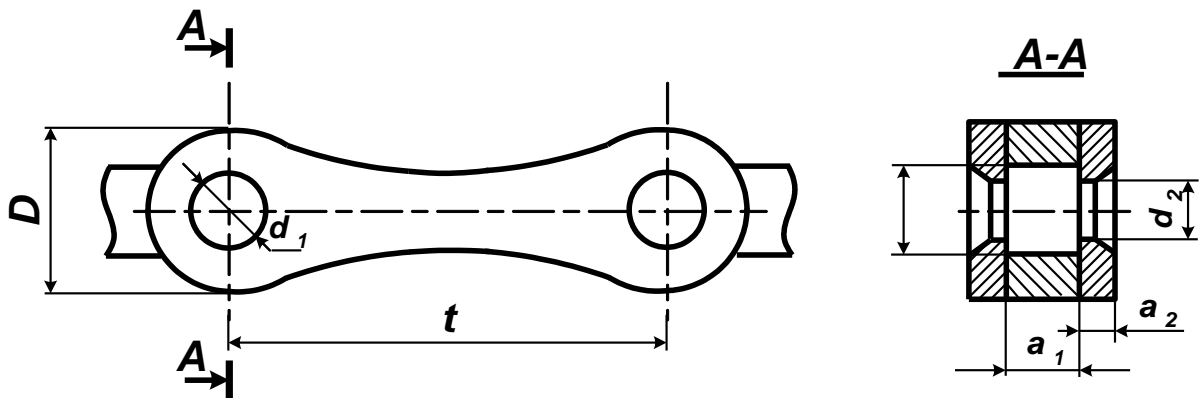


Рис. 12. Конструкция звена пильной цепи

Для существующих пильных цепей $\beta = 1,85$; $\beta_1 = 0,35$; $\beta_2 = 0,25$. В этом случае при допустимом напряжении на разрыв 50 Н/мм^2

$$d_1 = 0,38\sqrt{T} \quad (64)$$

или
$$d_1 = 12\sqrt{\frac{N}{V}}, \quad (65)$$

где T – тяговое усилие; $T = P(1 + \mu)$; P – усилие резания на цепи; μ – коэффициент трения цепи о шину, $\mu = 0,2 \div 0,25$; Z – число зубьев на звездочке; V – скорость резания, м/с.

$$V = \omega \frac{Z t}{2\pi}, \quad (66)$$

где ω – угловая скорость.

По значению d_1 находят остальные размеры звеньев. Ширину пропила b (мм) определяют по уравнению

$$b = a_1 + a_2 + 2S_0, \quad (67)$$

где S_0 – величина уширения на сторону, $S_0 = 1,5 \div 2$ мм.

Полное натяжение пильной цепи при набегании на звездочку S (Н)

$$S = S_1 + P_y + T, \quad (68)$$

где S_1 – первоначальное натяжение пильной цепи, $S_1 = 150–200$ Н;
 P_y – натяжение от действия центробежных сил, Н.

$$P_y = m_y V^2, \quad (69)$$

m_y – масса 1-го метра цепи.

Усилие резания на зубьях цепной пилы P (Н), определяется по формуле

$$P = K b h \frac{V}{U} 60, \quad (70)$$

где K – удельное сопротивление резанию, Н/мм².

$$K = K' a_n a_3, \quad (71)$$

где K' – коэффициент, зависящий от условий резания. Для поперечного пиления свежесрубленной сосны имеет значения, приведенные в табл. 22; a_n – коэффициент, который выражает зависимость сопротивления пиленю от породы древесины, табл. 23; a_3 – коэффициент, учитывающий степень затупления резцов. При заточке 1 раз в смену $a_3 = 1,4$; при заточке через смену $a_3 = 1,7$; b – ширина пропила, мм; h – высота пропила или диаметр ствола, сучков, мм.

Таблица 22

Значения K' в зависимости от ширины пропила

Ширина пропила, мм	Значение K' , Н/мм ² , при подаче на зуб, мм						
	0,02	0,04	0,05	0,08	0,1	0,15	0,2
3,5	100	86	77	72	67	61	55
5,0	83	68	61	54	50	42	39
8,0	–	43	38	33	30	26	24

Мощность, затраченная на резание цепной пилой N (кВт), определяется по формуле

$$N = \frac{P(1 + \mu)V}{1000}, \quad (72)$$

Таблица 23

Значения коэффициента a_n в зависимости от породы древесины

Порода	Сосна	Ель	Лиственница	Осина	Береза	Ясень	Дуб
a_n	1,0	1,0	1,1	0,85	1,25	1,5	1,7

3.6. Фрезерование

Фрезерование – процесс резания со снятием циклоидальной стружки вращающимся инструментом с резцами на цилиндрической или торцевой поверхности. Разновидностей фрезерования достаточно много и по принципу фрезерования работают станки:

- 1) продольно-фрезерной группы: фуговальные, рейсмусовые;
- 2) фрезерные;
- 3) копировально-фрезерные;
- 4) шипорезные;
- 5) цепнодолбежные и другие специализированные станки с вращающимися фрезами и ножевыми головками.

Назначение фрезерования – чистовая обработка деталей с целью получения поверхности заданной формы путем снятия припуска.

При фрезеровании чаще всего в резании участвует одна режущая кромка, в этом случае резание будет открытым. В ряде случаев при фрезеровании в резании участвуют одна или две боковые кромки, тогда соответственно резание будет полузакрытым или закрытым.

По отношению к волокнам резание или фрезерование может быть \parallel –#, #, \parallel – \perp . При фрезеровании наиболее распространенный вид резания \parallel – \perp , рис. 13. Резцы закрепляются на вращающихся валах или головках, которые имеют от 3 000 до 12 000 1/мин. Тогда скорость резания V , м/с, определяется по формуле

$$V = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000}. \quad (73)$$

Надвигание заготовки происходит одновременно с вращением ножевого вала, поэтому совместная траектория движения резца и заготовки представляет циклоиду, а полученная поверхность после обработки в результате такого движения получается волнистой и характеризуется длиной волны l_ϵ и высотой волны h_ϵ . На ножевом валу, как правило, устанавливается несколько ножей, при этом трудно добиться, чтобы все ножи имели одинаковый радиус резания. В результате этого поверхность формирует резец (нож), имеющий наибольший радиус резания, поэтому в практике кинематическую шероховатость поверхности принято определять длиной волны l_ϵ (мм).

$$l_\epsilon = U_z Z, \quad (74)$$

где Z – число ножей, установленных на валу; U_z – подача на нож, мм.

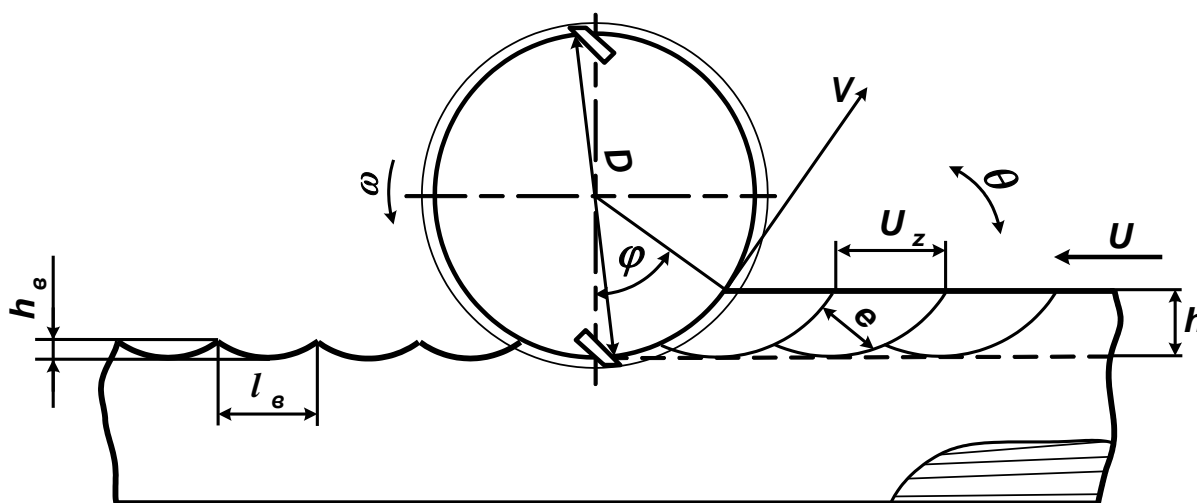


Рис. 13. Схема продольно-торцевого цилиндрического фрезерования

Нормативная длина волны, определяющая класс шероховатости в зависимости от D , дается в табл. 24. По многим исследованиям скорость резания от 15 до 50 м/с практически не оказывает влияния на шероховатость поверхности. Существенное влияние на шероховатость обработки оказывает радиус кривизны режущей кромки ρ . При остром резце принимают $\rho_0 = 4-5$ мкм. Нельзя допускать, чтобы $\rho_{max} > 40$ мкм, т. к. получаются большие «вырывы» и «мшистость» на обработанной

поверхности. Численная зависимость между ρ и $\nabla\partial$ приведена в табл. 25.

Расчет ρ_{max} (мкм) можно произвести с учетом формулы (21).

$$\Delta\rho = \varepsilon \frac{h n T}{1000 \sin \varphi}, \quad (75)$$

$$\rho_{max} = \rho_0 + \Delta\rho. \quad (76)$$

Глубину волны можно определить приближенно по выражению

$$h_s = \frac{l_s^2}{8R}, \quad (77)$$

где R – радиус резания; φ – угол контакта, град.

Таблица 24

Класс шероховатости в зависимости от D

Диаметр фрезы D , мм	Класс шероховатости по длине волны l_b , мм				
	$\nabla\partial9$	$\nabla\partial8$	$\nabla\partial7$	$\nabla\partial6$	$\nabla\partial5$
100	3,5	5,0	6,5	9,0	11,0
120	4,0	5,5	7,0	10,0	12,0
140	4,2	6,0	7,5	10,5	13,0
160	4,5	6,5	8,0	11,0	14,0
180	4,8	7,0	8,5	12,0	15,0

Таблица 25

Класс шероховатости в зависимости от затупления реза

Радиус затупления ρ , мкм	Продольное фрезерование	
	Хвойные породы	Лиственные породы
< 10	$\nabla\partial9$	$\nabla\partial10$
< 20	$\nabla\partial8$	$\nabla\partial9$
< 30	$\nabla\partial7$	$\nabla\partial8$
< 35	$\nabla\partial6$	$\nabla\partial7$
< 40	$\nabla\partial5$	$\nabla\partial6$

Учитывая, что кинематический угол встречи θ меняется на пути контакта резца с древесиной от θ до $\theta_{\text{блх}}$, изменяется и толщина стружки e (мм).

$$e_{\text{max}} = U_z \sin \theta_{\text{блх}}, \quad (78)$$

$$\sin \theta_{\text{блх}} = \sqrt{\frac{h}{D}}; \theta_{\text{блх}} = \varphi. \quad (79)$$

Длина контакта l_k (мм) $l_k = \sqrt{h D}$,

где h – высота снимаемого слоя, мм.

Для расчетов принимается e_{cp} при $\theta_{\text{cp}} = \frac{\theta_{\text{блх}}}{2}$.

$$e_{\text{cp}} = U_z \sin \theta_{\text{cp}}. \quad (80)$$

Вычислив по формуле (74) величину подачи на резец, определяем скорость подачи U (м/мин)

$$U = \frac{U_z Z n}{1000}, \quad (81)$$

Углы резания при фрезеровании обычно принимают: $\delta = 50\text{--}75^\circ$, $\alpha = 10\text{--}15^\circ$, более точные данные в зависимости от состояния древесины и породы приведены в табл. 26.

Таблица 26

Углы резания при продольно-торцевом фрезеровании

Порода	Угол резания δ для древесины, град			
	сухой	воздушно-сухой	влажной	свежесрубленной
Сосна	70–75	65–70	55–67	55–62
Ель	72–81	67–72	63–72	62–66
Дуб	81–86	77–81	72–77	72–77

При расчетах среднего давления резания необходимо определить количество кромок, участвующих в резании, и вид резания по отношению к волокнам, после чего расчет ведут по формуле (22). Установлено, что при полузакрытом резании среднее давление резания увеличивается на 1–3 %, а при закрытом соответственно на 2–6 %, что и учитывается при использовании данной формулы.

При фрезеровании, как и при других видах резания, возникают силы резания, рис. 14.

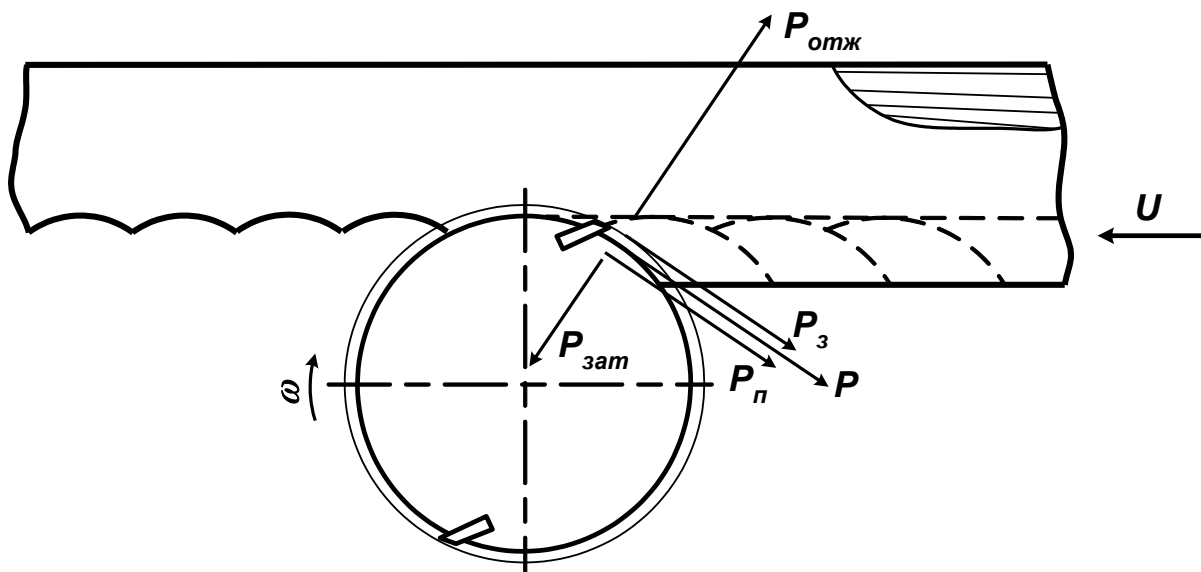


Рис. 14. Схема сил резания при фрезеровании

Для расчета средних значений сил при фрезеровании используются формулы (26)–(32). Но, учитывая, что толщина стружки на длине контакта резца с древесиной меняется, изменяется и значение мгновенных сил резания (рис. 15).

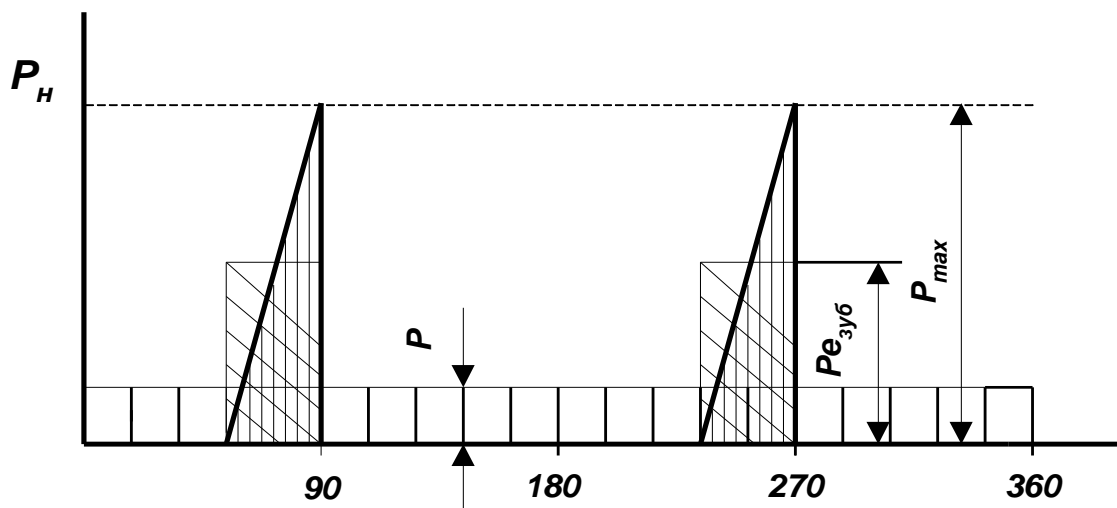


Рис. 15. График изменения сил для 2-ножевого вала на угле контакта φ за один оборот

P_{max} – максимальная сила резания, фактически действующая при выходе резца из древесины (Н) по ней рассчитывают инструмент и детали станка на прочность.

$$P_{max} = 2P_{e_{зуб}}, \quad P_{e_{зуб}} = \frac{\pi}{Z} \sqrt{\frac{D}{h}} \cdot P, \quad (82)$$

где $P_{e_{зуб}}$ – условно постоянная по величине средняя сила резания, действующая на дуге контакта l_k при срезании одной стружки и условно приложенная к середине дуги контакта при повороте резца на угол $\varphi/2$; P – условно постоянная по величине средняя окруженная сила резания, действующая на всем пути цикла πD (за полный оборот ножевого вала).

3.6.1. Пример решения прямой задачи

ЗАДАЧА. На станке методом фрезерования ведется обработка заготовки заданной породы и влажности по требуемому классу шероховатости в течение времени T .

Определить мощность резания и силы резания, если известно, что высота снимаемого слоя h , ширина обрабатываемой детали b , количество ножей Z , число оборотов ножевого вала n , а диаметр резания D .

РЕШЕНИЕ

1. Используя рис. 13 и формулу (79), находим кинематические углы встречи $\theta_{вых}$ и $\theta_{ср}$ и угол контакта φ .

2. Используя табл. 24 и формулы (74) и (80) по заданному классу шероховатости, определяем подачу на резец U_z и среднюю толщину стружки $e_{ср}$.

3. По формулам (73) и (91) вычисляем скорость резания V и скорость подачи U .

4. Используя табл. 25, подбираем угол резания δ .

5. Используя формулы (17), (18), (22), (75) и табл. 1, 2, 3, рассчитываем среднее давление резания K с учетом вида резания по отношению к волокнам.

6. По формуле (6) вычисляем мощность N , затраченную на резание.

7. По формулам (26)–(32), табл. 4 и 5 и рис. 14 определяем силы резания и сопротивления подачи $P, P_n, P_z, P_{отж}, P_{зат}, S, Q, P_n$.

Примечание. При подстановке числовых значений в формулы обращать внимание на единицы измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в условиях современного деревообрабатывающего производства его эффективность определяется решением проблем энергопотребления и качества выпускаемой продукции. Эти проблемы, прежде всего, зависят от подготовки и параметров инструмента, а также от выбора режимов резания, вызванных условиями этого процесса. Оптимальному решению этих проблем служит наука о резании древесины и дереворежущем инструменте, основы которой должен знать инженерно-технический персонал, занятый переработкой древесины.

Мы рассмотрели основные положения процесса резания древесины и особенности их применения при проведении расчета промышленного режима резания. Целесообразность изучения этих вопросов обусловлена широким внедрением в расчетную и проектную практику задач снижения энергопотребления при резании и повышения качества обработки.

Дали основные определения, принятые в теории резания. Рассмотрели физическую сущность общего закона резания.

Привели рекомендации по подбору оптимальных параметров дереворежущего инструмента и режимов резания для расчета узлов резания наиболее распространенных групп станков, используемых в деревообработке. Кроме того, по каждой группе деревообрабатывающих станков дана последовательность решения прямой задачи с указанием использования необходимых таблиц и формул, поэтому при проведении расчетов использование формул, таблиц и рекомендаций должно соответствовать разделу, в котором представлена данная группа станков.

Автор надеется, что учебное пособие в значительной степени облегчит изучение дисциплины «Теория резания и дереворежущий инструмент», поможет развитию у студентов способностей и навыков

самостоятельного решения задач в области резания древесины и древесных материалов и будет способствовать повышению качества подготовки специалистов лесного комплекса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бершадский А. А., Цветкова Н. И.* Резание древесины. – Минск: Вышэйш. шк., 1975. – 304 с.
2. *Грубе А. Э.* Дереворежущие инструменты. М.: Лесн. пром-сть, 1971. – 344 с.
3. *Гороховский К. Ф., Лившиц Н.В.* Основы технологических расчетов оборудования лесосечных и лесоскладских работ. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 255 с.
4. *Любченко В. И.* Резание древесины и древесных материалов. – М.: Лесн. пром-сть, 1986. – 293 с.
5. *Дешевой М. А.* Механическая технология дерева. Ч. 1 – Л.: Изд-во «Кубуч», 1934. – 512 с.
6. *Воскресенский С. А.* Резание древесины. – М.; Л.: Гослесбумиздат, 1955. – 200 с.
7. *Ивановский Е. Г.* Резание древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1975. – 200 с.
8. *Маккензи В. М.* Основные закономерности процесса резания древесины: Пер. с англ. – М., 1960. – 87 с.
9. *Бершадский А. Л.* Резание древесины. – М.; Л.: Гослесбумиздат, 1958. – 338 с.
10. *Соловьев А. А.* Решение задач по резанию древесины. – М.: МЛТИ, 1981. – 60 с.
11. *Якунин Н. К.* Подготовка к работе и эксплуатация круглых пил: Учеб. пособие. – М.: МГУЛ, 2000. – 496 с.
12. *Якунин Н. К.* Подготовка к работе и эксплуатация рамных пил: Учеб. пособие. – М.: МГУЛ, 2002. – 450 с.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ	5
1.1. Понятие о резании	5
1.2. Элементы и геометрия резца	6
2. РАБОТА, МОЩНОСТЬ И СИЛЫ РЕЗАНИЯ	8
2.1 Понятие удельной работы и давления резания	8
2.2. Силовое взаимодействие резца с древесиной	9
2.3. Общий закон резания	10
2.4. Расчет сил реального резания	16
2.5. Толщина стружки и подача на резец	18
3. РАСЧЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ	21
3.1. Пиление рамными пилами	21
3.1.1. Пример решения прямой задачи	26
3.2. Пиление ленточными пилами	26
3.2.1. Пример решения прямой задачи	31
3.3. Пиление круглыми пилами	31
3.3.1. Пример решения прямой задачи	37
3.4. Особенности поперечной распиловки	38
3.5. Особенности пиления цепными пилами	39
3.6. Фрезерование	42
3.6.1. Пример решения прямой задачи	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	49

Учебное издание

Шкутко Виталий Владимирович
РЕЗАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ

Учебное пособие

Главный редактор *Л. А. Суевалова*

Редактор *Е. Н. Ярулина*

Компьютерная верстка *Е. М. Емец*

Дизайн обложки *М. В. Привальцевой*

Подписано в печать 31.01.04. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Бумага писчая. Гарнитура «Таймс».

Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,96. Тираж 200 экз. Заказ

Издательство Хабаровского государственного технического университета.
680035, ул. Тихоокеанская, 136.

Отдел оперативной полиграфии издательства
Хабаровского государственного технического университета.
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136

ДЛЯ ЗАМЕТОК