



И.Т. Глебов

**РАСЧЕТ РЕЖИМОВ
РЕЗАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ**

Электронный архив УГЛТУ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Уральский государственный лесотехнический университет

И.Т. Глебов

**РАСЧЕТ РЕЖИМОВ
РЕЗАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ**

Монография

Екатеринбург

2005

УДК 674.023

Рецензенты:

Гороховский А.Г. – канд. техн. наук, директор ОАО УралНИИПдрев,

Лашманов В.И. – канд. техн. наук, зав. лабораторией №11 ОАО
УралНИИПдрев.

Глебов И.Т. Расчет режимов резания древесины: Монография. –
Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2005. – 155 с.

ISBN 5-230-25725-3.

Приведены основные положения теории
резания древесины, термины, определения.
Предложены новые формулы для расчета режимов
резания древесины, развивающие расчетный метод А.Л.
Бершадского.

Книга адресована студентам специальностей
150405 "Машины и оборудование лесного комплекса",
250303 "Технология деревообработки", аспирантам,
преподавателям, научным работникам и другим
специалистам лесопромышленного комплекса.

Печатается по решению редакционно-издательского
совета Уральского государственного лесотехнического
университета.

УДК 674.023

ISBN

© Уральский государственный
лесотехнический университет, 2005

© И.Т. Глебов, 2005

Эффект научно-исследовательской работы определяется не ценностью знаний как таковых, а мерой их воздействия на развитие и удовлетворение потребностей общества

Вегер Л.Л.

Предисловие

В последние годы автором предложены новые идеи в теории резания древесины, позволяющие повысить точность расчетов режимов резания. Указанные идеи и методы их применения в решении задач освещены в данной монографии. Книга развивает расчетный метод А.Л. Бершадского. По указанной теме автором написаны такие книги, как "Резание древесины" (2001 г.), "Справочник по резанию древесины" (1999 г., в соавторстве с В.Г. Новоселовым и Л.Г. Шваммом).

В предлагаемой книге приводится вывод новых формул, раскрывается методика их применения при решении задач, главным образом по пилению и фрезерованию. Решение других задач дано в упомянутом справочнике 1999 г.

В книге кратко изложены также основные положения теории резания древесины, термины, определения, приведены примеры решения задач.

Книга предназначена для студентов, аспирантов, преподавателей лесотехнических вузов, а также научных работников и других специалистов лесопромышленного комплекса.

Введение

Для расчета режимов резания древесины используется несколько методов: метод А.Л. Бершадского, расчет по эмпирическим степенным формулам, по табличной силе, по объемной формуле мощности резания и др. Расчет по методу А.Л. Бершадского применяется особенно широко.

Точность полученного конечного результата при использовании указанных методов различна. Если решить одну и ту же задачу указанными методами и найти среднее арифметическое значение полученных результатов, то по сравнению со средним результат, полученный по расчетному методу А.Л. Бершадского, будет самым низким (до – 17%), а результат, полученный по степенной формуле, самый высокий (до + 19%). Остальные расчетные методы дают отклонение от среднего 0,77% ... 1,4%.

Таким образом, повышение точности расчетов является актуальной задачей теории резания древесины. Эта задача может быть решена путем уточнения расчетных формул на основе положений современной теории резания древесины.

Часть I
Общие сведения
о резании древесины

1. Основные понятия и определения

1.1. Резание древесины

Резанием по ГОСТ 3.1109-82 называют технологический процесс разрушения связей между частицами

материала обрабатываемой заготовки по проектной поверхности лезвием режущего инструмента с целью получения детали требуемой формы, размеров и шероховатости.

Заготовка – это предмет, подвергаемый изменению формы, размеров и шероховатости [1].

После завершения механической обработки из заготовки получается изделие (обработанная деталь), т.е. предмет труда.

Лезвие – клиновидный элемент режущего инструмента. Оно предназначено для проникновения в материал заготовки и отделения срезаемого слоя.

Обработка резанием, осуществляемая лезвийным инструментом, называется лезвийной обработкой (ГОСТ 25761-83).

На рис. 1 представлены схемы лезвийной обработки древесины. На схемах показаны обрабатываемая заготовка 1, лезвие 4, которое перемещается по проектной поверхности 6, проникает в материал заготовки и отделяет срезаемый слой 2. Срезаемый слой характеризуется длиной l , шириной b и толщиной a . Древесина срезаемого слоя, удаляемая в процессе резания, во всем объеме упруго-пластически деформируется, закручивается, разрушается. Эту часть материала 5 принято называть **стружкой**.

Обработка резанием заключается в снятии с обрабатываемой заготовки некоторой массы древесины, специально оставленной для удаления на данной операции и называемой **припуском P** .

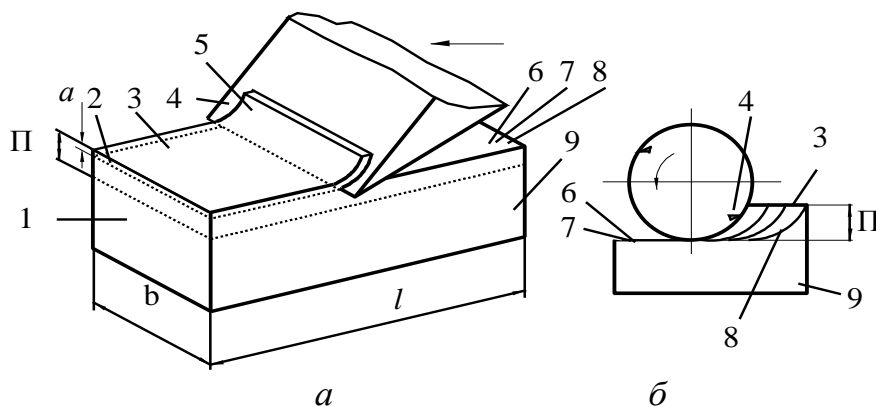


Рис. 1. Схемы лезвийной обработки древесины:

a – строгание, *б* – фрезерование

Припуск может удаляться одновременно с нескольких поверхностей заготовки или последовательно друг за другом с каждой обрабатываемой поверхностью. В ряде случаев припуск Π может быть настолько большим, что его срезают не сразу, а последовательно за несколько проходов. Величину проникновения лезвий инструмента в заготовку во время каждого прохода называют **глубиной резания** и обозначают буквой t ; $t = a$ (см. рис. 1, *a*) или $t = \Pi$ (см. рис. 1, *б*).

Поверхность 3 заготовки, подлежащую изменению в процессе резания, называют **обрабатываемой поверхностью**. Поверхность 7, полученную вновь во время очередного прохода инструмента, называют **обработанной**. Она совпадает с проектной поверхностью 6. Промежуточную поверхность 8, временно существующую в процессе резания между обрабатываемой и обработанной поверхностями, называют **поверхностью резания**. Последняя поверхность всегда находится в контакте с лезвием. После срезания со всех сторон заготовки припусков получается изделие (деталь) 9.

1.2. Движения при резании

При резании лезвие и заготовка одновременно перемещаются относительно друг друга. Эти движения называют рабочими. К ним относят движения главное, подачи, касательное и результирующее.

Главным движением резания D_r называется прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента или заготовки, предназначенное для удаления одного срезаемого слоя (рис. 2 - 4).

Скорость главного движения V – это скорость рассматриваемой точки режущей кромки лезвия или заготовки в главном движении резания.

Движением подачи D_s называется прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента или заготовки, предназначенное для подведения к лезвию нового срезаемого слоя (см. рис. 2 - 4).

Скорость рассматриваемой точки режущей кромки в движении подачи называется скоростью движения подачи V_s .

Для характеристики движения подачи и его скорости дополнительно вводятся следующие понятия: подача, подача на оборот, подача на зуб, подача на ход и двойной ход.

Подача – это отношение расстояния, пройденного рассматриваемой точкой режущей кромки или заготовки вдоль направления движения подачи, к соответствующему числу циклов (или его доли) главного движения. Цикл главного движения есть полный оборот, ход или двойной ход режущего инструмента или заготовки. Долей цикла может быть часть оборота, соответствующая угловому шагу зубьев режущего инструмента. Под ходом понимают движение режущего инструмента или заготовки в одну сторону при возвратно-поступательном движении.

Различают подачи:

– на оборот S_o – подача, соответствующая одному обороту инструмента или заготовки (мм/об.);

– на зуб S_z – подача, соответствующая перемещению инструмента или заготовки на один шаг зубьев режущего инструмента (мм/зуб);

– на ход S_x – подача, соответствующая одному ходу инструмента или заготовки (мм/ход);

– на двойной ход S_{2x} – подача, соответствующая одному двойному ходу инструмента или заготовки (мм/дв. ход).

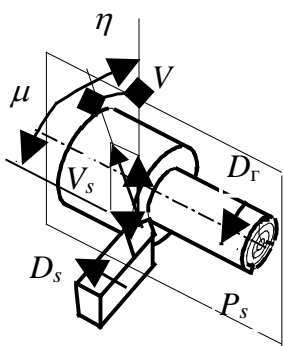


Рис. 2. Рабочие движения при точении древесины

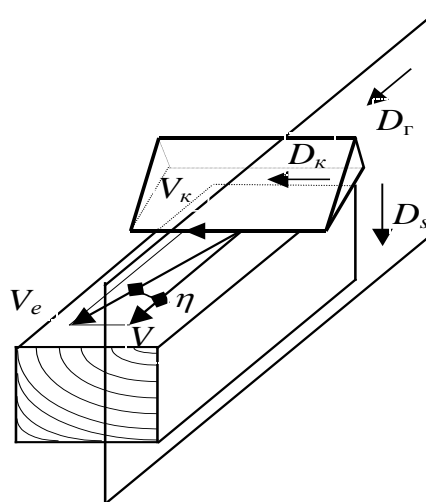
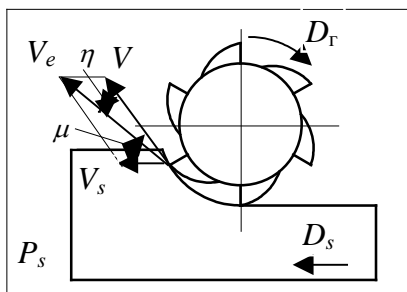
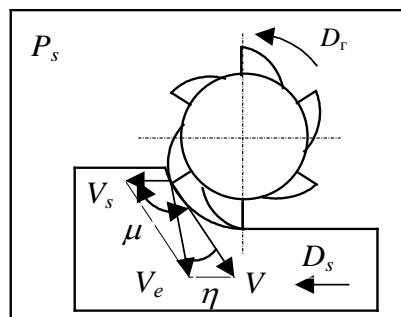


Рис. 3. Рабочие движения при строгании



a



б

Рис. 4. Рабочие движения при фрезеровании:

a – встречном; *б* – попутном

Касательное движение D_k – это прямолинейное или вращательное движение режущего инструмента или заготовки, скорость которого направлена вдоль режущей кромки. Оно предназначено для смены контактирующих с заготовкой участков режущей кромки. Скорость рассматриваемой точки режущей кромки или заготовки в касательном движении называется **скоростью касательного движения V_k** (см. рис. 4).

Из рассмотренных скоростей значение скорости главного движения больше скорости подачи и скорости касательного движения.

Результирующее (суммарное) движение резания D_e является следствием нескольких одновременно осуществляемых движений и включает **главное движение, движение подачи и касательное движение**. Скорость рассматриваемой точки режущей кромки в результирующем движении резания называется **скоростью результирующего движения V_e** (см. рис. 2 - 4). Вектор V_e равен векторной сумме скоростей указанных движений резания:

$$\bar{V}_e = \bar{V} + \bar{V}_s + \bar{V}_k. \quad (1)$$

Эта скорость всегда направлена по линии, касательной к поверхности резания в рассматриваемой точке. **Поверхность резания R** – это поверхность, образуемая режущей кромкой в результирующем движении резания. Поверхность резания образуется всеми точками главной режущей кромки как совокупность траекторий результирующего движения резания.

1.3. Углы скоростей

Углом скорости резания η называется угол в рабочей плоскости между направлениями скоростей результирующего движения резания и главного движения резания (см. рис. 2 - 4).

Углом подачи μ называется угол в рабочей плоскости между направлениями скоростей движения подачи и главного движения резания (см. рис. 2; 4).

Рабочей плоскостью P_r называется плоскость, в которой расположены направления скоростей главного движения и движения подачи (см. рис. 3 - 4). В случаях, когда в отдельные моменты времени направления скоростей главного движения и движения подачи совпадают (периферийное фрезерование), рабочая плоскость проводится так же, как и в предыдущий или последующий моменты, когда эти на-

правления не совпадают. При отсутствии движения подачи рабочая плоскость проводится через направление скорости главного движения резания перпендикулярно установочной базе режущего инструмента.

1.4. Координатные плоскости. Системы координат

Лезвия режущих инструментов при проектировании, изготовлении и эксплуатации рассматривают в прямоугольной системе координат $P_v t P_n$, где P_v – основная плоскость; t – рассматриваемая точка режущей кромки; P_n – плоскость резания.

Основная плоскость P_v – это координатная плоскость, проведенная через рассматриваемую точку режущей кромки перпендикулярно направлению скорости главного (или результирующего) движения резания.

Плоскость резания P_n – это координатная плоскость, проходящая через режущую кромку параллельно направлению скорости главного (результирующего) движения резания. Она перпендикулярна основной плоскости.

В зависимости от ориентации основной плоскости различают три системы координат: инструментальную $P_{vu} t P_{nu}$, статическую $P_{vc} t P_{nc}$ и кинематическую $P_{vk} t P_{nk}$.

Инструментальная система координат ориентирована относительно лезвий режущего инструмента (рис. 5, а). Она применяется при изготовлении и контроле режущих элементов инструмента. При работе с этой системой координат принимают, что направление скорости главного движения резания проходит через режущие кромки касательно к окружности их вращения или вдоль режущих кромок (при расположении их вдоль прямой линии).

Статическая система координат ориентирована относительно направления скорости главного движения резания, которое может быть непараллельно линии вершин лезвий (рис. 5, б). Она применяется для приближенных расчетов углов лезвия в процессе резания и для учета изменения этих углов после установки инструмента на станке.

Кинематическая система координат ориентирована относительно направления скорости результирующего движения резания (рис. 5, в). Она применяется для учета реальных значений угловых параметров режущих элементов инструментов в процессе резания.

1.5. Элементы лезвия

Лезвие в поперечном сечении имеет форму клина. Его элементами являются передняя поверхность, одна или несколько задних поверхностей, режущие кромки и углы. **Передней поверхностью (гранью) лезвия A_γ** называется поверхность лезвия, контактирующая в процессе резания со срезаемым слоем и стружкой (рис. 6).

Задней поверхностью (гранью) лезвия A_α называется поверхность лезвия, контактирующая в процессе резания с поверхностью резания (она обращена к обрабо-

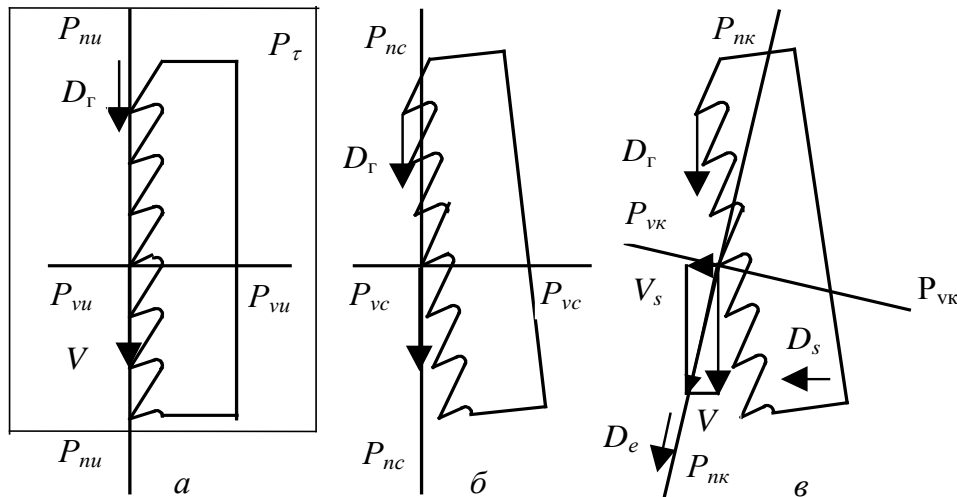
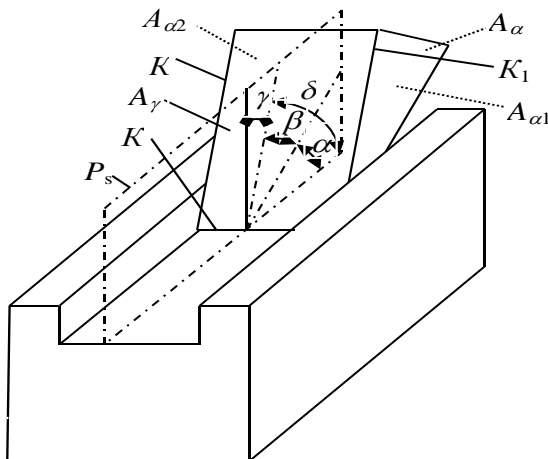


Рис. 5. Системы координат:

a – инструментальная; *б* – статическая; *в* – кинематическая



танной поверхности). Если у лезвия имеется несколько задних поверхностей, то одна из них называется главной задней поверхностью A_α , а остальные – вспомогательными задними поверхностями $A_{\alpha1}, A_{\alpha2}$.

Режущими кромками лезвия инструмента называют линии пересечения передней поверхности с задними. Часть режущей кромки, форми-

Рис. 6. Элементы лезвия

рующая большую сторону сечения срезаемого слоя, называется главной режущей кромкой K , остальные – вспомогательными режущими кромками K_1, K_2 . Главная режущая кромка пересекается со вспомогательными режущими кромками в **вершинах** лезвия.

Относительное положение передней и задних поверхностей лезвия фиксируется главным и вспомогательными углами заострения.

Главный угол заострения β измеряется между передней и главной задней поверхностями. Вспомогательные углы заострения измеряются между передней и вспомогательными задними поверхностями.

Положение лезвия на корпусе инструмента фиксируется либо задним, либо передним углами, либо углом резания.

Задний угол α – угол в секущей плоскости между задней поверхностью и плоскостью резания (см. рис. 6).

Передний угол γ – угол в секущей плоскости между передней поверхностью лезвия и основной плоскостью (нормалью к плоскости резания).

Угол резания δ – угол в секущей плоскости между передней поверхностью и плоскостью резания, равный сумме углов α и β .

Сумма углов резания $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$.

В зависимости от того, в какой системе координат измерены угловые параметры (рис. 7), их называют соответственно инструментальный передний или задний угол (γ_u, α_u), статический передний или задний угол (γ_c, α_c), кинематический передний или задний угол (γ_k, α_k).

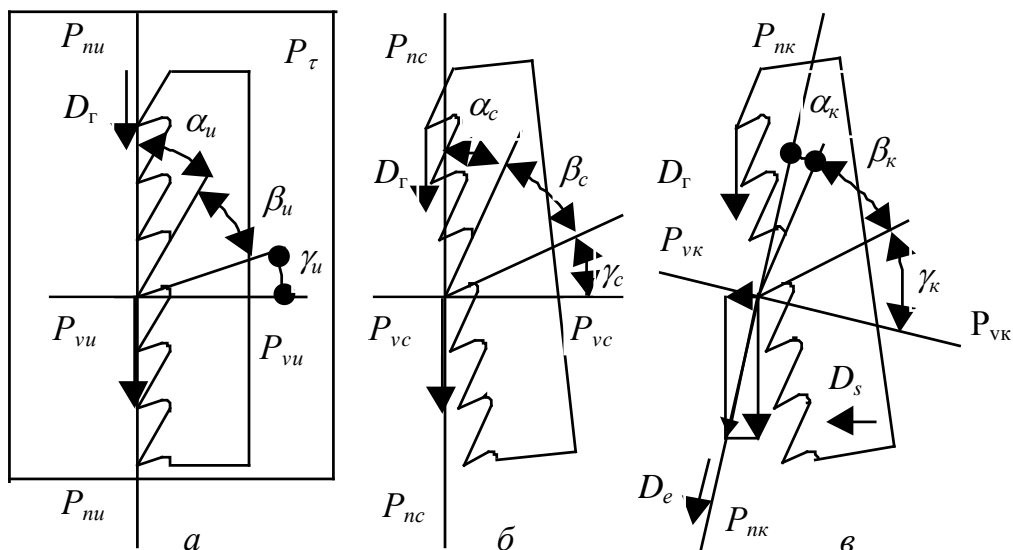


Рис. 7. Угловые параметры зубьев режущих инструментов

в системе координат:

a – инструментальной; *б* – статической; *в* – кинематической

1.6. Секущие плоскости

Линейные углы лезвий режущих инструментов измеряются в секущих плоскостях: главной P_τ , нормальной P_n и плоскости схода стружки P_c .

Главной секущей плоскостью P_τ называется координатная плоскость, перпендикулярная линии пересечения основной плоскости и плоскости резания. На рис. 7, *a* она совпадает с

плоскостью чертежа. В инструментальной системе координат она называется инструментальной главной секущей плоскостью P_{π} , в статической – статической главной секущей плоскостью P_{σ} , в кинематической – кинематической главной секущей плоскостью P_{τ} .

Нормальной секущей плоскостью P_n называется плоскость, перпендикулярная режущей кромке в рассматриваемой точке.

Секущей плоскостью схода стружки P_c называется плоскость, проходящая через направления схода стружки по передней поверхности лезвия и скорости резания в рассматриваемой точке режущей кромки. Направление схода стружки характеризуется углом схода стружки ν . Этот угол приобретает важное значение для некоторых процессов, связанных с рациональным отводом стружки.

Углом схода стружки ν называется угол, измеряемый в плоскости, касательной к передней поверхности лезвия, между направлением схода стружки и нормалью к главной режущей кромке (рис. 8).

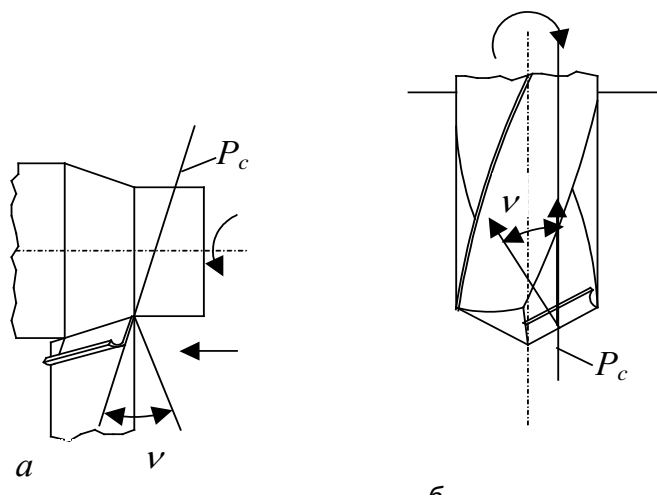


Рис. 8. Углы схода стружки:

a – точение; *б* – сверление

1.7. Положение режущей кромки

Положение режущей кромки в системе координатных плоскостей определяется углом ее наклона и углами в плане.

Углом наклона режущей кромки λ называется угол в плоскости резания между режущей кромкой и основной плоскостью (если $\lambda \neq 0$, имеем косоугольное резание) – рис. 9.

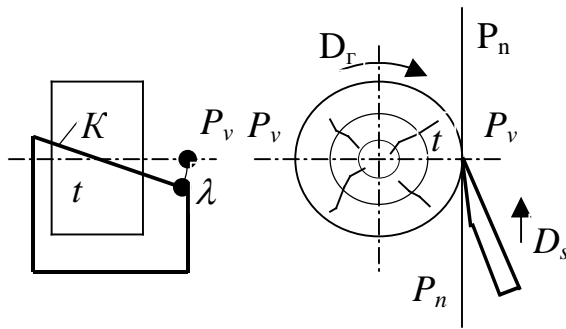


Рис. 9. Наклон режущей кромки к основной координатной плоскости P_v

Углом в плане φ называется угол в основной координатной плоскости P_v между режущей кромкой (плоскостью резания) и рабочей плоскостью P_s (рис. 10).

В зависимости от того, в какой системе координат измеряются углы λ и φ , они называются соответственно углами инструментальными, статическими или кинематическими.

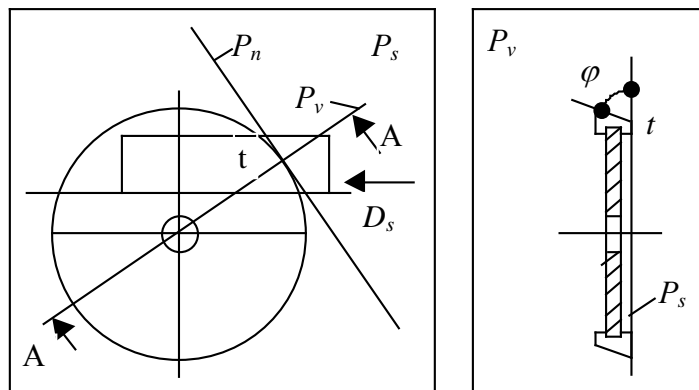


Рис. 10. Угол в плане режущих кромок пилы

1.8. Износ и затупление лезвий

1.8.1. Микрогеометрия режущей кромки

При заточке лезвия шлифовальным кругом на его режущей кромке образуются заусенцы. Их стремятся удалить, обломить при последующей правке оселками, бру-

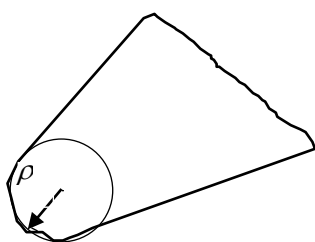


Рис. 11. Схема реального лезвия

сками. Во время работы под действием ударных нагрузок лезвие самопроизвольно обламывается. Острые кромки обломленного лезвия притираются, притупляются. **Режущая кромка реального лезвия представляет некоторую кривую поверхность, соединяющую поверхности передней и задней граней.** На рис. 11 такое лезвие показано в сечении нормальной плоскостью.

Для сравнения лезвий по остроте кривую поверхность режущей кромки условно заменяют цилиндрической. Радиус ρ этой поверхности служит мерой остроты режущей кромки и называется радиусом округления (затупления) режущей кромки. При работе лезвие тупится, радиус его режущей кромки увеличивается. Например, для очень острых фуговальных ножей радиус округления режущей кромки равен 2 мкм, а для тупых – 60 мкм.

Для лезвия любой остроты величину радиуса округления можно описать следующим выражением:

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho, \quad (2)$$

где ρ – радиус округления режущей кромки произвольной остроты, мкм;

ρ_0 – радиус округления режущей кромки после заточки, мкм ;

$\Delta\rho$ – величина прироста затупления за время работы, мкм.

Для лезвий из сталей ХВГ и 85ХФ принимают следующие значения ρ_0 : у фрез $\rho_0 = 4 \dots 6$ мкм; у пил $\rho_0 = 10$ мкм.

Затупление режущей кромки зависит главным образом от длины пути контакта лезвия с древесиной, породы древесины и видов резания. Прирост затупления

$$\Delta\rho = \gamma_{\Delta} L, \quad (3)$$

где γ_{Δ} – величина затупления режущей кромки на 1 м пути, мкм/м;

L – путь резца в заготовке, м.

При фрезеровании сосны инструментом из легированной стали принимают $\gamma_{\Delta} = 0,0008$ мкм/м, при пилении $\gamma_{\Delta} = 0,001$ мкм/м. При обработке твердых пород древесины (береза, бук, дуб) значения γ_{Δ} следует увеличить на 30...35%.

1.8.2. Понятие износа и затупления

Лезвие режущего инструмента при срезании припуска с обрабатываемой заготовки под действием сил трения подвергается износу.

При рассмотрении этого явления различают два понятия: износ лезвия и затупление его режущих кромок. **Износ** – это величина, характеризующая изменение формы и размеров лезвия. При изучении физической природы износа используется показатель **массового износа** – массы изношенной части инструмента в миллиграммах. **Затупление** лезвий характеризуется изменением их микрогеометрии в процессе резания. Линейные показатели износа на процесс резания не влияют. Здесь важна микрогеометрия затупившегося лезвия (рис. 12).

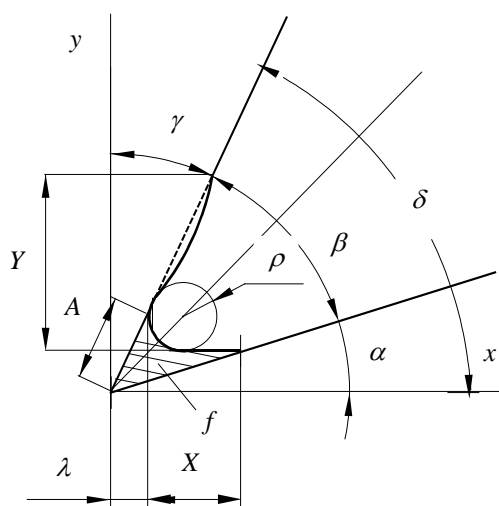


Рис. 12. Параметры износа и затупления лезвия

Износ и затупление – это явления взаимообуславливающие друг друга.

Параметрами износа и затупления являются износ по задней поверхности X , по передней поверхности Y , по высоте лезвия λ , по биссектрисе угла заточки A , площадь износа f , радиус кривизны режущей кромки ρ . Изменение указанных параметров приводит к изменению переднего и заднего углов резания.

ния.

Численные значения указанных параметров затупления находятся в определенной зависимости от общего пути лезвия в обрабатываемой древесине. Доминирующее влияние на динамику и качество обработки оказывает параметр радиуса закругления режущей кромки.

Радиус закругления ρ есть радиус условно вписанной окружности в поверхность режущей кромки лезвия.

1.8.3. Критерий затупления

Радиус закругления лезвия не может в полной мере характеризовать работоспособность режущего инструмента. Одно и то же состояние лезвия для одних условий считается тупым, неработоспособным, а для других условий – достаточно острым и работоспособным.

Понятия работоспособность и затупление всегда следует рассматривать во взаимосвязи с результатами работы лезвия: шероховатостью и точностью обработанной поверхности, энергопотреблением, производительностью и параметрами шума. Указанные параметры определяют критерий затупления.

Критерий затупления характеризуется максимально допустимым значением износа режущего инструмента, после достижения которого наступает его отказ, т.е. неработоспособное состояние.

Продолжение резания таким лезвием приведет к недопустимому нарушению установленных показателей обработки древесины.

1.8.4. Период стойкости инструмента

Отказ режущего инструмента, т.е. его неработоспособное состояние, может быть стойкостным или точностным.

Стойкостный отказ - это постепенный отказ режущего лезвийного инструмента после достижения им критерия затупления. При стойкостном отказе становится невозможно обработать деталь с заданными параметрами шероховатости или недопустимо повышается уровень шума станка и расход электроэнергии.

Точностный отказ - постепенный отказ режущего лезвийного инструмента после достижения размером, формой или расположением обработанной поверхности

предела поля допуска. При точностном отказе становится невозможно обработать деталь с заданными допусками размеров, например, деталь с шипами.

При наступлении отказа режущий инструмент подвергается восстановлению. **Восстановление** - приведение рабочей части режущего лезвийного инструмента в работоспособное состояние.

Продолжительность работы инструмента характеризуется периодом стойкости.

Период стойкости - это время резания новым или восстановленным режущим лезвийным инструментом от начала резания до отказа.

Различают еще **полный период стойкости**, равный сумме периодов стойкости режущего лезвийного инструмента от начала резания новым инструментом до достижения предельного состояния. Полный период стойкости R , ч, можно определить по формуле

$$R = T i = \frac{TH}{h}, \quad (4)$$

где T - период стойкости, ч;

i - число допустимых переточек;

H - допустимая величина стачивания рабочей части инструмента, мм;

h - толщина слоя, удаляемого за одну заточку, мм.

1.8.5. Этапы износа лезвий

Графическое изображение закономерности износа лезвий за время работы инструмента называется **кривой износа**.

Типовая кривая износа лезвия по биссектрисе угла заточки A приведена на рис 13. Кривые износа можно построить по каждому параметру износа и затупления. Форма кривых зависит от многих факторов процесса резания.

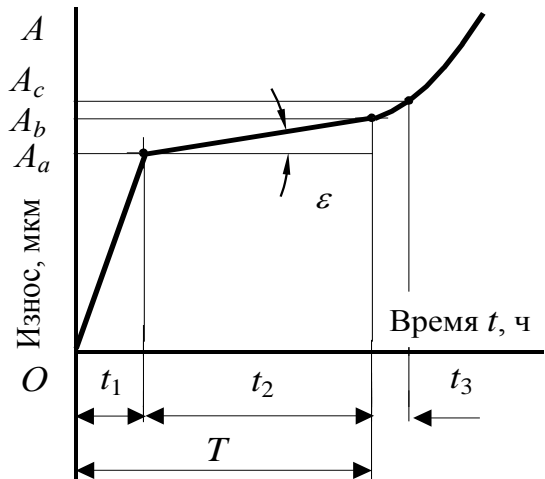


Рис. 13. Кривая износа лезвия

Весь период стойкости режущего инструмента можно разделить на три этапа износа:

- 1) период приработки t_1 , соответствующий приработочному периоду OA_a ,
- 2) период монотонного износа t_2 , соответствующий монотонному износу A_aA_b ,
- 3) аварийный период t_3 с аварийным (катастрофическим) износом.

Износ лезвий на первом этапе происходит главным образом в результате обломов или отгибов.

Это изменение формы режущей кромки происходит на отдельных ее участках. Сначала возникают выкрошины малых размеров и глубин, затем с увеличением сил резания образуются выломы больших размеров.

Облом и выкрашивание лезвий продолжают до тех пор, пока прочность их сечений не будет достаточна для того, чтобы противостоять изгибающему моменту.

Износ на втором этапе протекает в сложных условиях, когда при резании древесины одновременно проявляют себя несколько факторов: высокое давление, температура на поверхности лезвий около $240...840^\circ\text{C}$, окисление, действие статического электричества, электрохимическая коррозия и др. Характеристикой монотонного износа служит угол наклона кривой ε .

Аварийный износ происходит вследствие чрезмерного увеличения сил резания и температуры на лезвии.

Обычно период стойкости равен

$$T_c = t_1 + t_2. \quad (5)$$

1.8.6. Физическая сущность износа

Процесс износа зависит от многих факторов.

Механическое диспергирование. Истирание, отделение мелких частиц металла лезвия является основной причиной монотонного износа. Интенсивность истирания зависит от величины сил трения при резании.

Тепловой износ. При резании древесины в результате трения и деформирования по контактными поверхностям выделяется тепло. При этом интенсивность их нагрева возрастает с увеличением радиуса закругления режущих кромок.

Температура на лезвиях фрезерных ножей достигает 800...840°C, на лезвиях зубьев дисковых пил – 700...850°C, на зубьях концевых фрез – 700...800°C. Высокие температуры, возникающие в поверхностных слоях лезвия, приводят к уменьшению прочности металла. Металл тонкого поверхностного слоя размягчается и размазывается. В результате этого на передней поверхности лезвия иногда образуется лунка, а на задней – наплыв металла.

Окислительный износ. Окислительный износ лезвия при резании протекает при сочетании следующих явлений: адсорбции кислорода на поверхности трения, диффузии кислорода в поверхностные слои, пластического течения слоев металла с образованием химических адсорбированных пленок, пленок твердых растворов и химических соединений металла с кислородом.

Пластические деформации тонких слоев металла, вызванные нагревом лезвий, создают благоприятные условия для диффузии кислорода в металл и образования пленок. Наиболее вязкоподвижная часть продуктов превращения имеет серый цвет, они размазываются по лезвию с образованием наплывов.

Электрохимическая коррозия. При резании, в результате трения, а также пьезоэлектрического эффекта при деформировании древесины на лезвии и в стружке создаются электрические заряды. Если древесина сырая, то органические кислоты и влага образуют электролит, который при совместном действии с электрическими зарядами поражает металл лезвия электрохимической коррозией.

Электрическая эрозия. Исследованиями Е.Г. Ивановского, П.В. Василевской и Э.М. Лаутнера [2] установлено, что при резании на лезвии накапливаются электрические заряды. Величина зарядов зависит от режима резания (породы древесины, толщины срезаемого слоя и т.д.). Значения электрических зарядов, снимаемых с лезвия при срезании единицы объема стружки для некоторых пород древесины при толщине срезаемого слоя 0,05 мм, приведены ниже, К/см³:

Сосна	Береза	Лиственница	Липа	Дуб	Граб, вяз
509,0	86,9	74,6	37,7	8,05	0,0

Статическое электричество на лезвии может привести к искровым разрядам и разрушению поверхности металла. На поверхности лезвия образуются кратеры от искровых разрядов.

Абразивный износ. Под абразивным износом принято понимать процесс интенсивного разрушения поверхности лезвия при трении скольжения, обусловленный абразивной средой и выражающийся в местной пластической деформации. Абразивный износ лезвий инструмента наблюдается при обработке клееных древесных материалов. В них клеевые слои действуют на лезвие подобно абразиву, оставляя на поверхности царапины.

1.9. Условия резания древесины реальным лезвием

На рис. 14 показана схема резания древесины реальным лезвием. При внедрении лезвия в древесину разрушение последней происходит около наиболее выдвинутой точки лезвия l . Эта точка лежит на плоскости резания P_n . Отделяемая часть

древесины, расположенная выше плоскости резания, скользит по передней грани лезвия и образует стружку.

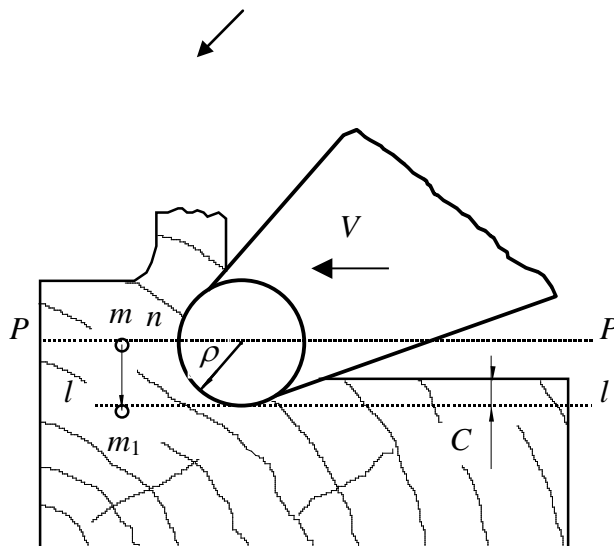


Рис. 14. Схема резания древесины реальным лезвием

Частицы древесины, расположенные ниже плоскости резания, подминаются режущей кромкой и задней гранью под лезвие. Так, точка m , лежащая на уровне плоскости резания, будет подмита резцом до уровня ll . Она опустится на величину mm_1 . Древесина под лезвием упруго-пластически деформирована. После прохода лезвия древесина освобождается и частично упруго поднимается на величину C . При этом обработанная поверхность располагается ниже плоскости резания на величину остаточной деформации.

1.10. Элементы срезаемого слоя

Срезаемый слой (срез) – это часть припуска между смежными поверхностями резания или слой материала заготовки, отделяемый лезвием за один цикл (или его долю) главного движения резания.

Срезаемый слой характеризуется сечением и площадью среза, линейными размерами среза (рис. 15).

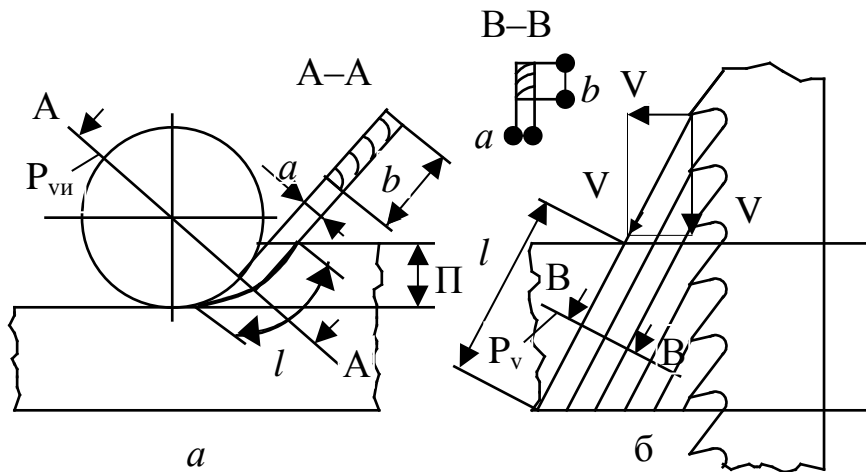


Рис. 15. Размеры срезаемого слоя:

a – фрезерование; *б* – пиление ленточной пилой

Сечение срезаемого слоя – это фигура, образованная при рассечении слоя материала заготовки, отделяемого лезвием за один цикл главного движения резания основной плоскостью P_v . При этом в каждом конкретном случае следует дополнительно указывать систему координатных плоскостей, в которой рассматривается сечение срезаемого слоя. Так, на рис. 15, *a* сечение показано в инструментальной системе координат, а на рис. 15, *б* – в кинематической системе координат.

Площадь срезаемого слоя A_n есть площадь сечения срезаемого слоя.

Толщина срезаемого слоя a – наикратчайшее расстояние между предыдущей и последующей поверхностями резания, ограниченное сечением срезаемого слоя.

Ширина срезаемого слоя b – длина стороны сечения срезаемого слоя, образованной поверхностью резания.

Длина срезаемого слоя l – размер стороны срезаемого слоя, образованной поверхностью резания по траектории рассматриваемой точки режущей кромки.

Объем срезаемого слоя $v = a b l = A_n l$. Секундный объем срезаемого слоя $v_1 = A_n V$.

2. Кинематика процесса резания

2.1. Общие сведения

Кинематика резания рассматривает классификацию принципиальных кинематических схем резания и трансформацию геометрических параметров срезаемых слоев и лезвий во время рабочего цикла [1].

Угловые параметры лезвий могут трансформироваться, если рабочие движения при резании выполняются одновременно.

Движения, сообщаемые инструменту и заготовке, обычно рассматривают в прямоугольной системе координат с осями x, y, z . С ее помощью ориентируют также взаимное положение всех механизмов станка. Кинематика станков обеспечивает различные сочетания движений механизмов:

- а) рабочие и холостые движения;
- б) главное движение при выключенном движении подачи;
- в) движение подачи при бездействующем главном движении;
- г) одновременное действие движений главного и подачи.

Сочетания исходных движений регламентированы системой принципиальных кинематических схем резания. Из большого разнообразия кинематических схем резания наибольшее распространение получили следующие три схемы:

- схема с одним прямолинейным движением (рис. 16, а);
- схема с двумя прямолинейными движениями: главным движением D_2 и движением подачи D_3 (рис. 16, б);
- схема с двумя движениями, из которых главное движение D_2 вращательное, а движение подачи D_3 поступательное (рис. 16, в).

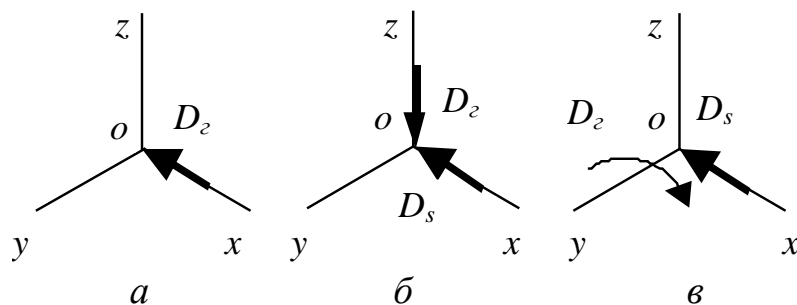


Рис. 16. Принципиальные кинематические схемы

процессов резания:

a – одно прямолинейное движение, *б* – два прямолинейных

2.2. Резание по принципиальной кинематической схеме с одним прямолинейным движением

Примером процесса резания, осуществляемого по принципиальной схеме с одним прямолинейным движением, может служить строгание, например, ручным рубанком, строгание шпона (рис. 17).

При срезании стружки действует только одно главное движение D_2 . Количественно оно выражается скоростью главного движения V , причем $V = V_e$. Движение подачи D_s выполняется только в момент, когда режущий инструмент возвращается в исходное положение и его перемещают для снятия следующего срезаемого слоя. При строгании поверхность резания плоская.

Режущий инструмент можно представить в виде прямоугольного бруска с инструментальными углами $\alpha_{и} = 0$ и $\gamma_{и} = 0$. Передняя поверхность бруска деформирует срезаемый слой толщиной a и срезает его. Задняя поверхность скользит по поверхности резания R , деформируя ее и преодолевая силы трения.

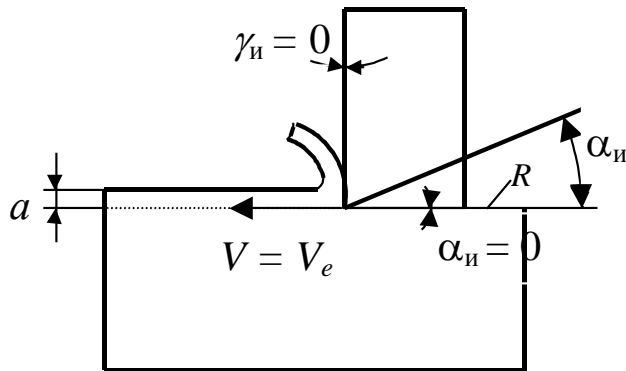


Рис. 17. Резание по принципиальной кинематической схеме с одним прямолинейным движением

Процесс резания инструментом с $\alpha_{и} = 0$ и $\gamma_{и} = 0$ в принципе возможен. Процессы, происходящие по передней поверхности, отражают суть процесса резания. Силы трения по задней поверхности представляют собой вредные сопротивления. Их можно значительно уменьшить, если заднюю поверхность бруска заточить под углом $\alpha_{и} > 0$. Это уже есть лезвие. **Главным признаком лезвия является наличие задней поверхности, заточенной под задним углом $\alpha_{и} > 0$. Заточка передней поверхности под передним углом $\gamma_{и} \neq 0$ такого определяющего значения не имеет.** Значения переднего угла лезвий деревообрабатывающих инструментов варьируются в пределах $\gamma_{и} = -25 \dots +75^\circ$.

2.3. Резание по принципиальной кинематической схеме с двумя прямолинейными движениями

Примером процесса резания, осуществляемого по принципиальной кинематической схеме с двумя прямолинейными движениями, может служить пиление рамными и ленточными пилами.

На рис. 18 приведен общий случай такого резания.

Лезвие надвигается на заготовку со скоростью главного движения V и скоростью подачи V_s . Вектор скорости \bar{V}

перпендикулярен \bar{V}_s . Вектор скорости результирующего движения V_e лежит на прямолинейной траектории, наклоненной к направлению главного движения под углом скорости резания η ; $V_e = \bar{V} + \bar{V}_s$.

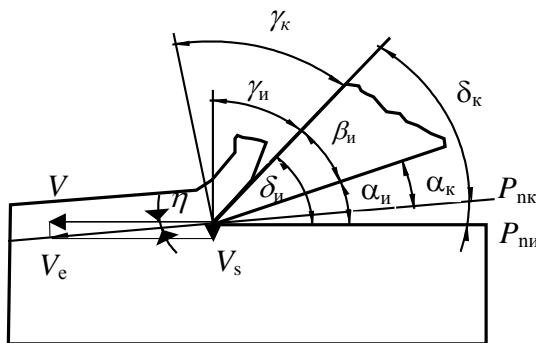


Рис. 18. Резание по принципиальной кинематической схеме с двумя прямолинейными движениями

Чтобы уменьшить трение задней поверхности лезвия по плоскости резания $P_{\text{пи}}$, его необходимо установить с задним инструментальным углом

$$\alpha_{\text{и}} = \eta + \alpha_{\text{к}}, \quad (6)$$

где η – угол скорости резания;

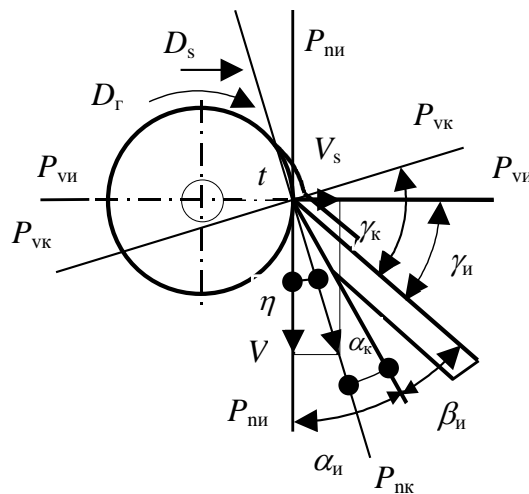
α_k – кинематический задний угол, определяющий относительное положение задней поверхности лезвия в процессе резания.

$$\eta = \arctg (V_s/V). \quad (7)$$

2.4. Резание по принципиальной кинематической схеме с двумя движениями – прямолинейным и вращательным

Резание с прямолинейным и вращательным движениями является самым распространенным. На рис. 19 приведена схема лущения шпона. Заготовка совершает главное вращательное движение D_r и прямолинейное движение подачи D_s , в результате чего срезается стружка.

Следствием двух совместных движений D_r и D_s является результирующее движение по спирали Архимеда с результирующей скоростью V_e . Для того чтобы уменьшить силу трения



задней поверхности лезвия по плоскости резания результирующего движения, заднюю поверхность лезвия следует установить под инструментальным задним углом $\alpha_{и} = \eta + \alpha_k$.

Рис. 19. Трансформация угловых параметров лезвия при лущении

Кинематический задний угол всегда меньше инструментального

заднего угла:

$$\alpha_k = \alpha_{и} - \eta. \quad (8)$$

Кинематический передний угол всегда больше инструментального переднего угла:

$$\gamma_k = \gamma_{и} + \eta. \quad (9)$$

Угол скорости резания

$$\eta = \arctg (V_s / V) = \arctg (S_o / \pi D) . \quad (10)$$

3. Влияние строения и свойств древесины на процесс резания

3.1. Строение древесины

Все живое на земле состоит из клеток. Растущее дерево – живой организм, и потому основным его структурным элементом является клетка. Клетка – это полость, окруженная стенками. Полости клеток позволяют накапливать и передавать водные

растворы питательных веществ различным частям дерева, а стенки обеспечивают механическую прочность дерева.

В стволе дерева клетки не однородны по форме и размерам. Их группы-ткани специализированы. Различают паранхиму, сосуды, сердцевинные лучи, трахеиды, либриформ, смоляные ходы. Сопротивление резанию оказывают главным образом механические ткани – трахеиды (у хвойных пород) и либриформ (у лиственных пород древесины), составляющие основную массу древесины.

Древесина – материал неоднородного строения. Эта неоднородность является результатом роста дерева. Каждый год происходит нарастание новых слоев клеток ранней (весенней) и поздней (летней) древесины, которые образуют годичные слои.

3.2. Физические свойства древесины

Древесинное вещество, образующее стенки клеток, гигроскопично. Оно способно поглощать, сорбировать влагу из воздуха. Гигроскопическая влага удерживается в стенках клеток физико-химическими связями и не может быть выдавлена при резании.

Максимальное количество связанной воды в древесине равно 30% от массы сухого древесинного вещества.

В полостях клеток может находиться свободная влага, которая при резании легко выдавливается. Зимой свободная влага может замерзнуть, и лед, образующийся в полостях клеток, сильно влияет на энергетику и качество резания.

Удаление из древесины свободной влаги не изменяет механических свойств древесинного вещества. Удаление гигроскопической (связанной) влаги повышает плотность клеточных стенок. Так, плотность древесинного вещества при влажности $W=30\%$ равна $1,2 \text{ г/см}^3$, а для абсолютно сухого древесинного вещества всех пород равна $1,54 \text{ г/см}^3$.

3.3. Учет механических свойств древесины

Главные направления ствола дерева. Физико-механические свойства ствола дерева различны в трех взаимно перпендикулярных направлениях: поперечном, радиальном и тангенциальном (рис. 20).

Поперечным называется разрез, проходящий перпендикулярно оси ствола и направлению волокон. Он образует торцовую плоскость.

Радиальный разрез – это продольный разрез, проходящий через сердцевину по радиусу ствола. Сердцевина расположена примерно в центре ствола и на радиальном разрезе видна в виде узкой темной полосы.

Тангенциальный (тангентальный) разрез – это продольный разрез, проходящий на некотором расстоянии от сердцевины касательно к годичному слою.

Древесина в указанных разрезах значительно отличается по своему строению. Поперечный разрез образован перерезанием трахеидов (волокон хвойных пород) и волокон либриформа и сосудов (у лиственных пород) перпендикулярно к их длине. Тангенциальный разрез получен перерезанием смоляных ходов и сердцевинных лучей нормально к их длине и частичным перерезанием волокон и сосудов параллельно их оси. Радиальный разрез образован перерезанием волокон и сосудов параллельно их длине.

Виды резания древесины. Механические свойства древесины по главным направлениям различны. Такую особенность древесины называют ортотропией. Механические свойства дре-

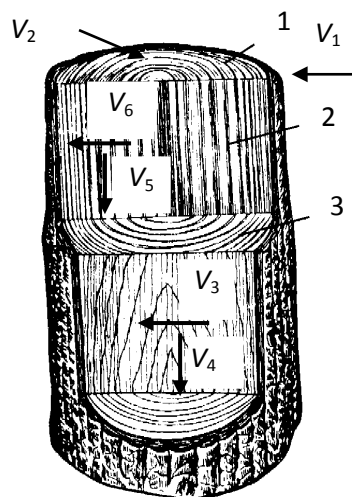


Рис. 20. Разрезы ствола:

- 1 – поперечный (торцовый);
- 2 – радиальный;
- 3 – тангенциальный

веса различны и в промежуточных направлениях. Это называется анизотропией. Таким образом, **древесина – анизотропно-ортотропный материал волокнисто-слоистого,**

разноклеточного строения с пустотами. Такая структура древесины значительно затрудняет ее резание.

Несмотря на анизотропность, можно найти общие свойства резания древесины. Например, поперечный разрез может быть получен при перемещении лезвия по взаимно перпендикулярным направлениям V_1 или V_2 , тангенциальный разрез - по направлениям V_3 или V_4 , а радиальный - по направлениям V_5 или V_6 (см. рис. 20). Резание древесины по указанным направлениям позволяет выделить три главных вида резания: торцовое (\perp), продольное ($//$) и поперечное ($\#$).

При **торцовом резании** (направления V_1 и V_2) вектор скорости главного движения и плоскость резания перпендикулярны направлению волокон.

При **продольном резании** (направления V_3 и V_5) вектор скорости главного движения и плоскость резания параллельны направлению волокон.

При **поперечном резании** (направления V_4 и V_6) вектор скорости главного движения перпендикулярен, а плоскость резания параллельна направлению волокон.

На практике чаще встречаются промежуточные, переходные виды резания (рис. 21, а).

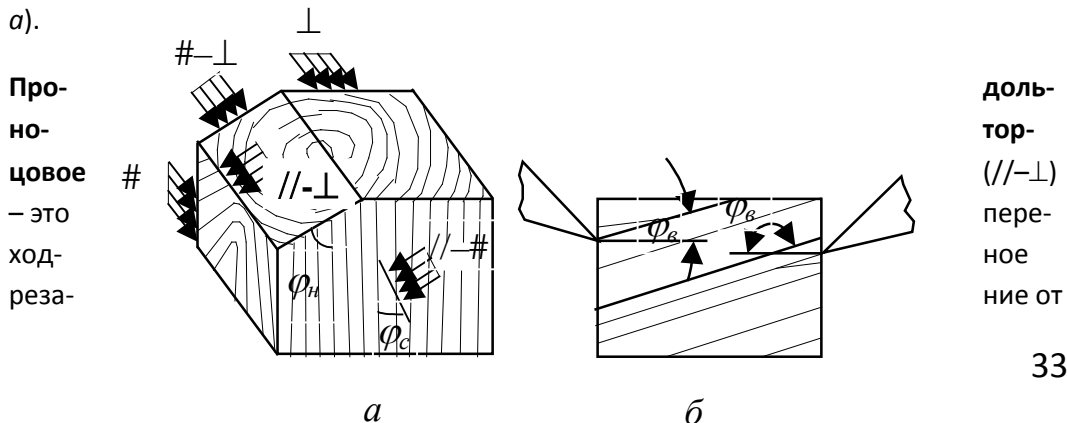


Рис. 21. Виды резания древесины:

а – переходные виды резания;

продольного к торцовому, при котором вектор скорости главного движения и плоскость резания составляют острый угол с направлением волокон. Резание характеризуется углом перерезания волокон φ_e .

Угол перерезания волокон - это угол между вектором скорости главного движения и волокнами древесины, направленными в срезаемый слой.

На рис. 21, б показано изменение угла перерезания волокон при продольно-торцовом резании. При движении резца слева направо угол $\varphi_e < 90^\circ$, а образующая по направлению волокон опережающая трещина распространяется в срезаемый слой. Такое резание называют резанием **по слою**. При движении лезвия справа налево угол $\varphi_e > 90^\circ$, а образовавшаяся опережающая трещина направлена в массив древесины. Это резание **против слоя**. В зависимости от угла перерезания волокон вид резания изменяется от продольного (//) до торцового (\perp).

Поперечно-торцовое резание ($\#-\perp$) – это переходное резание от поперечного к торцовому, при котором плоскость резания составляет острый угол с волокнами, а вектор скорости главного движения перпендикулярен к ним (см. рис. 21, а).

Острый угол между плоскостью резания (или режущей кромкой) и волокнами φ_n называют углом наклона. При $\varphi_n = 0^\circ$ резание получается поперечное, а при $\varphi_n = 90^\circ$ резание переходит в торцовое.

Поперечно-продольное резание ($\#-//$) - это переходное резание от поперечного к продольному, при котором вектор скорости главного движения составляет острый угол с волокнами, а плоскость резания параллельна им (см. рис. 21, а). **Острый угол между режущей кромкой и волокнами φ_c называют углом скоса.** При $\varphi_c = 0^\circ$ получается поперечное резание, а при $\varphi_c = 90^\circ$ резание переходит в продольное.

3.4. Учет ориентации годовых слоев

Ориентацию годовых слоев в заготовке характеризуют углом радиальности $\varphi_{рад}$, который измеряют между режущей

кромкой K и нормалью N к поверхности годового слоя в точке пересечения режущей кромки с годовым слоем (рис. 22, *а*). Если годовое слое лежит в плоскости резания ($\varphi_{\text{рад}} = 90^\circ$), то резание называют **тангенциальным** (рис. 22, *б*). Если годовое слое перпендикулярен плоскости резания ($\varphi_{\text{рад}} = 0^\circ$), то резание называют **радиальным**.

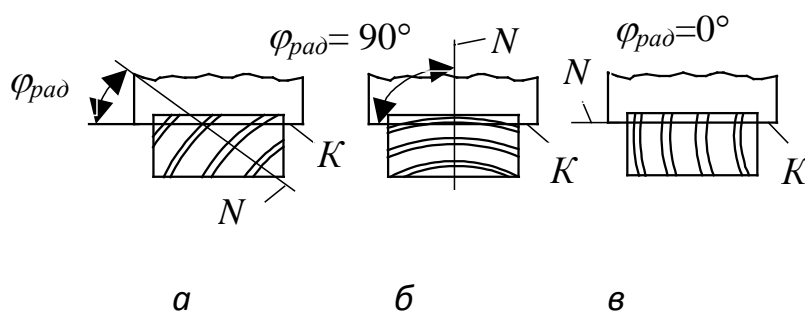


Рис. 22. Ориентация годовых слоев относительно режущей кромки лезвия:

а – общий случай резания; *б* – резание тангенциальное;

в – резание радиальное

3.5. Сжатие древесины в замкнутом пространстве

Сжатие древесины в замкнутом пространстве значительно отличается от сжатия свободной древесины [1].

На рис. 23, а показана зависимость напряжения σ при свободном сжатии древесины от величин

относительной деформации $\varepsilon = (L-l)/L$, где L – первоначальная длина образца и l – длина сжатого образца. В пределах относительной деформации $\varepsilon = 0,03$ изменение напряжений подчиняется закону Гука. При дальнейшем сжатии образец выпучивается, разрушается.

При сжатии древесины в замкнутом пространстве, когда образец 1 помещен в обойму 2 под пуансон 3 (рис. 23, б), относительная деформация изменяется в большом диапазоне. На графике можно выделить три участка. Первый участок OA показывает, что до относительной деформации $\varepsilon = 0,03$ происходит упругое деформирование древесины. Стенки клеток еще не теряют устойчивости, и структура древесины не изменяется.

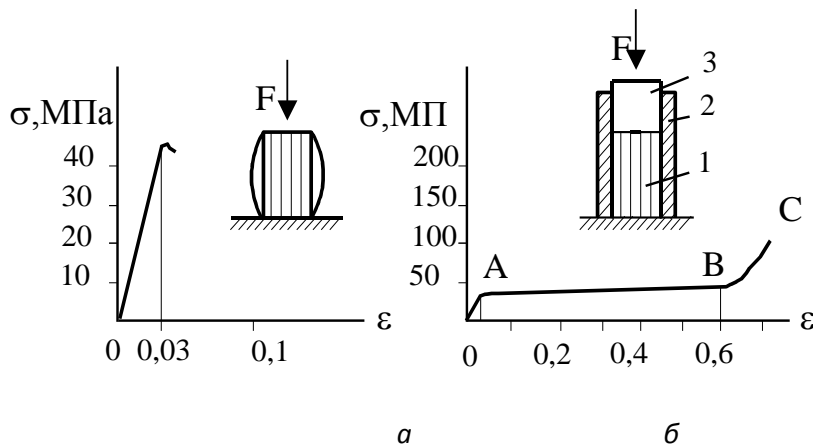


Рис. 23. Сжатие древесины:

a – свободное; *б* – в замкнутом пространстве

На участке деформирования АВ стенки клеток потеряли устойчивость. Наблюдается пластическое сжатие материала. Полости клеток и поры сокращаются, заполняются разрушенными стенками клеток сначала ранней древесины, а затем и толстыми стенками поздней древесины. Объем образца уменьшается до 2,5 раз, а плотность при $\varepsilon = 0,6$ приближается к плотности древесного вещества ($1,56 \text{ г/см}^3$). Напряжение на участке пластического течения АВ почти не изменяется.

На третьем участке деформирования ВС древесина уже почти не уплотняется, она упруго сжимается как однородный материал.

3.6. Виды резания древесных материалов

Для древесных материалов с ярко выраженной слоистой структурой (древесностружечные и древесноволокнистые плиты, фанера, древеснослоистые пластики и др.) различают следующие виды резания.

Резание вдоль слоев ($//_c$). При таком резании вектор скорости главного движения параллелен, а плоскость резания перпендикулярна слоям (рис. 24, *a*).

Резание поперек слоев ($\#_c$). Имеет место в случае, когда вектор скорости главного движения и плоскость резания перпендикулярны слоям.

Резание по плоскости слоев (плоское резание \square_c). наблюдается в случае, когда вектор скорости главного движения и плоскость резания совпадают с плоскостью слоя.

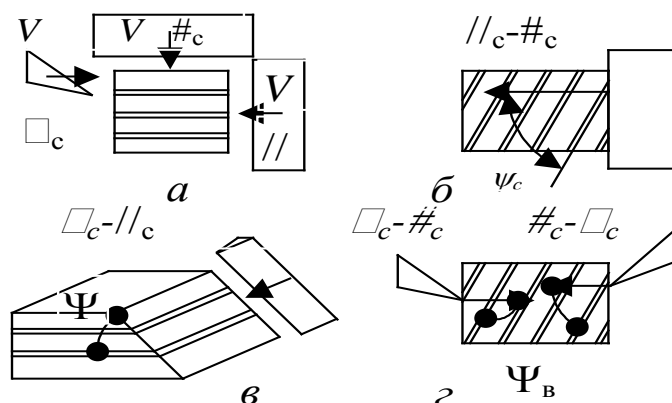


Рис. 24. Виды резания древесных материалов:

a – главные; *б* – продольно-поперечное;

в – плоскопродольное; *г* – плоскопоперечное

Переходное продольно-поперечное резание ($//_c - \#_c$). Это резание характеризуется углом скоса слоев ψ_c . **Угол скоса ψ_c** – это угол между вектором скорости главного движения и слоем в плоскости резания ($0^\circ \leq \psi_c \leq 90^\circ$). Если $\psi_c = 0^\circ$, то имеет место резание вдоль волокон. При $0^\circ < \psi_c \leq 45^\circ$ резание называют продольно-поперечным, а при $45^\circ < \psi_c < 90^\circ$ – поперечно-продольным. При $\psi_c = 90^\circ$ получается поперечное резание (рис. 24, б).

Переходное плоскопродольное резание ($\square_c - //_c$). Резание характеризуется углом наклона слоев ψ_n . **Угол наклона слоев ψ_n** – это угол между плоскостями резания и слоем в бинормальной секущей плоскости ($0^\circ \leq \psi_n \leq 90^\circ$). При $\psi_n = 0^\circ$ имеет место плоское резание, при $0^\circ < \psi_n \leq 45^\circ$ – плоскопродольное резание, при $45^\circ < \psi_n < 90^\circ$ – продольно-плоское резание и при $\psi_n = 90^\circ$ – продольное (рис. 24, в).

Переходное плоскопоперечное резание ($\square_c - \#_c$). Резание характеризуется углом встречи $\psi_в$. **Угол встречи $\psi_в$** – это угол между вектором скорости главного движения и плоскостью слоя

в контуре заготовки ($0^\circ \leq \psi_B \leq 180^\circ$). При $\psi_H = 0^\circ$ получается плоское резание, при $0^\circ < \psi_B < 90^\circ$ резание называют плоскопоперечным "против слоев", $90^\circ < \psi_H < 180^\circ$ – плоскопоперечное по слоям (рис. 24, з).

4. Геометрия обработанной поверхности

В процессе резания на обработанной поверхности образуются неровности, которые подразделяют на три группы.

Макронеровность – единичное отклонение поверхности от правильной воображаемой формы (выпуклость, вогнутость для плоскостей; эллипсность, конусность для цилиндров и т.д.).

Волнистость – неровности в виде периодически повторяющихся возвышений и впадин, близких по форме и размерам.

Микронеровность – неровность в виде мелких гребешков и впадин.

При резании древесины образуются также неровности разрушения в виде вырывов, заколов, отщепов, концевых сколов, ворсистости (отдельных порванных волокон) и мшистости (группы порванных волокон). Практически на обработанной поверхности могут встретиться различные сочетания перечисленных неровностей. При этом макронеровности характеризуют точность обработки, т.е. отклонение обработанной поверхности от заданной формы и размеров. Остальные неровности характеризуют шероховатость (гладкость) поверхности.

По ГОСТ 7016-82 шероховатость деревянной поверхности характеризуется параметрами, их

числовыми значениями и наличием или отсутствием ворсистости и мшистости. Анатомические неровности древесины при этом не учитываются.

ГОСТ устанавливает пять параметров (табл. 1).

Числовые значения параметров в микрометрах (мкм) принимаются из следующих предпочтительных рядов чисел:

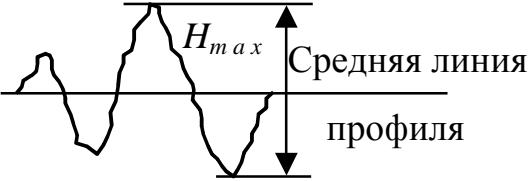
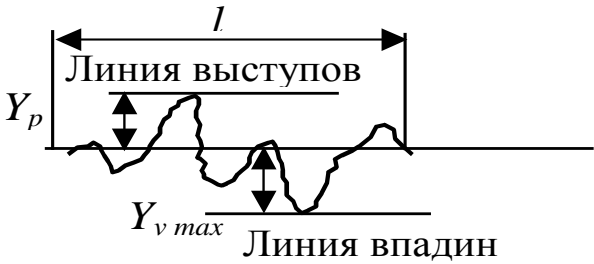
$R_{m \max}$, R_m и R_z - 1600, 800, 400, 200, 100, 50, 25, 12,5, 6,3, 3,2;

R_a - 100; 50; 25; 12,5; 6,3; 3,2; 1,6; 0,8.

Таблица 1

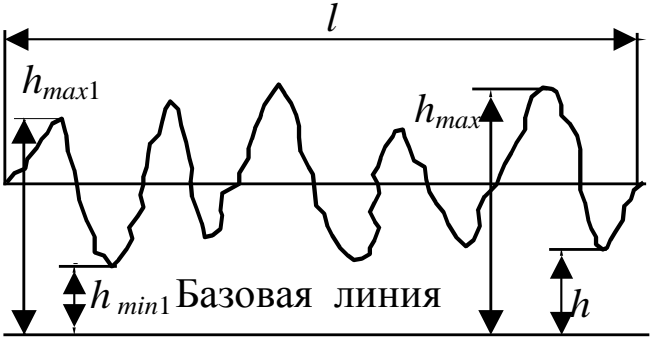
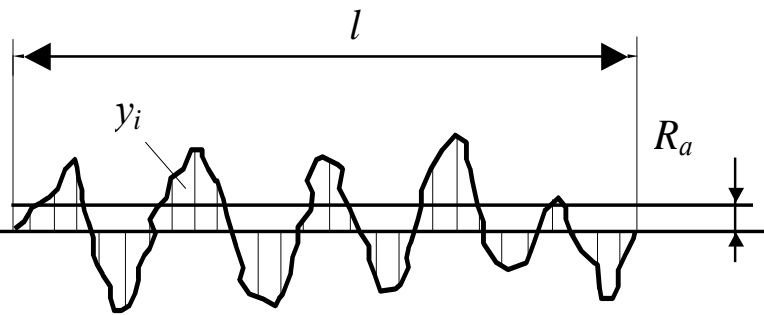
Параметры шероховатости поверхности

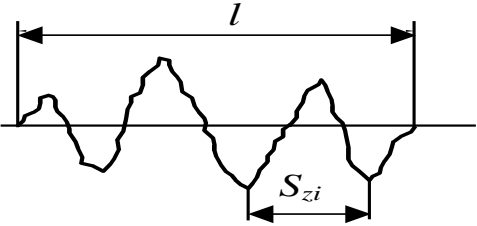
Параметр	Определение и расчетная формула
Среднее из максимальных высот неровностей на поверхности $R_{m \max}$	Среднее арифметическое высот отдельных наибольших неровностей (не менее 5) на поверхности: $R_{m \max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{\max i} ,$ где $H_{\max i}$ – расстояние от высшей до низшей точки i -й наибольшей неровности, n – количество наибольших неровностей, $n \geq 5$

	
<p>Наибольшая высота неровностей профиля R_m</p>	<p>Наибольшая высота неровностей профиля в пределах базовой длины l:</p> $R_m = Y_{p\ max} + Y_{v\ max},$ <p>где $Y_{p\ max}$ – расстояние от средней линии профиля до линии выступов; $Y_{v\ max}$ – расстояние от средней линии профиля до линии впадин</p> 

Продолжение табл. 1

Параметр	Определение и расчетная формула
----------	---------------------------------

<p>Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z</p>	<p>Разность средних значений пяти расстояний от выступов до базовой линии и пяти расстояний от впадин до базовой линии в пределах базовой длины l:</p> $R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 h_{\max i} - \sum_{i=1}^5 h_{\min i} \right)$  <p>The diagram shows a surface profile over a length l. A horizontal line represents the datum, labeled "Базовая линия". Five peaks are identified, with their heights from the datum labeled $h_{\max 1}$ and h_{\max}. Five valleys are identified, with their depths from the datum labeled $h_{\min 1}$ and h.</p>
<p>Среднее арифметическое отклонение профиля R_a</p>	<p>Среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины l:</p> $R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i ,$ <p>где n – число выбранных точек профиля на базовой длине; y_i – отклонение профиля или расстояние между точкой профиля и базовой линией</p>  <p>The diagram shows the same surface profile over length l. Vertical lines are drawn from the datum to the profile at various points, representing the absolute deviations y_i. The average of these deviations is labeled R_a.</p>

Параметр	Определение и расчетная формула
Средний шаг неровностей профиля S_z	<p>Среднее значение шагов неровностей профиля по впадинам на базовой длине l:</p> $S_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{zi}$  <p>The diagram shows a wavy surface profile above a horizontal reference line. A horizontal double-headed arrow at the top indicates a base length l. Below the profile, a horizontal double-headed arrow indicates the width of a specific valley, labeled S_{zi}.</p>

5. Взаимодействие лезвия с древесиной

5.1. Составляющие силы резания

При резании древесина оказывает сопротивление перемещению лезвия. Для того чтобы процесс резания не нарушался, к лезвию необходимо приложить силу для преодоления сопротивления среды. Эту силу, действующую со стороны лезвия на заготовку, называют силой резания F .

В расчетах и исследованиях динамики резания обычно пользуются составляющими силы резания – проекциями на координатные оси (рис. 25). Причем ось x проводят параллельно направлению V_c , а координатную плоскость XOY совмещают с плоскостью резания.

Проекциям силы резания присвоены следующие названия: главная составляющая силы резания (касательная) F_x , радиальная (нормаль-

ная) составляющая силы резания F_z и осевая составляющая силы резания F_y .

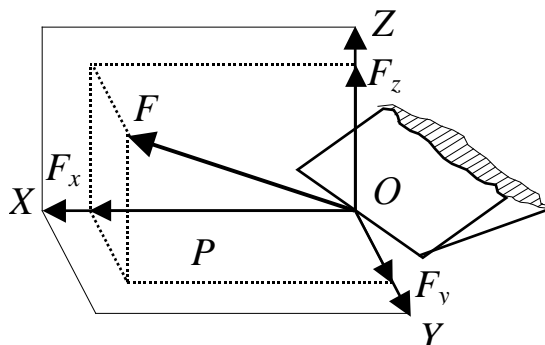


Рис. 25. Составляющие силы резания

Главная составляющая силы резания F_x совпадает по направлению со скоростью результирующего движения резания. При вращательном главном движении резания она называется касательной составляющей силы резания.

Радиальная составляющая силы резания F_z направлена по радиусу главного вращательного движения резания. При поступательном главном движении резания она направлена перпендикулярно вектору скорости результирующего движения и называется радиальной (нормальной) составляющей силы резания.

Осевая составляющая силы резания F_y лежит в плоскости резания и направлена перпендикулярно к направлению скорости результирующего движения.

5.2. Удельная сила, удельная работа, единичная сила резания

Удельная сила резания $F_{уд}$ есть отношение главной составляющей силы резания к площади поперечного сечения срезаемого слоя и имеет размерность МПа (Н/мм²):

$$F_{уд} = \frac{F_x}{ab}, \quad (11)$$

где a , b – соответственно толщина и ширина срезаемого слоя, мм.

Удельная работа резания K есть работа главной составляющей силы резания, необходимая для срезания 1 см³ древесины, Дж/см³. Согласно определению

$$K = \frac{A}{v} = \frac{F_x l}{abl} = \frac{F_x}{ab} = F_{y\partial}, \quad (12)$$

где A – работа резания, Дж; v – объем срезаемого слоя, см³;

l – длина срезаемого слоя, м.

Таким образом количественно $K = F_{y\partial}$, но физический смысл их разный.

Единицей силой резания F_1 (Н/мм) называют силу резания, необходимую для удаления срезаемого слоя шириной 1 мм: $F_1 = F/b$. По аналогии различают единичные координатные силы: $F_{x1} = F_x/b$; $F_{z1} = F_z/b$; $F_{y1} = F_y/b$.

Единичная сила резания указывает на то, что сила резания находится в прямой пропорциональной зависимости от ширины срезаемого слоя.

5.3. Контактные зоны лезвия

При проникновении лезвия в древесину на его контактной поверхности создаются нормальное давление и силы трения. Для анализа указанных сопротивлений контактную поверхность делят на зоны. В сечении нормальной плоскостью контактная поверхность лезвия (рис. 26) изображается в виде контура $abmned$.

Указанный контур можно поделить на две зоны: зону стружки am и зону поверхности резания md , граничащие в точке m , лежащей на линии mt образования в материале новых поверхностей (поверхности резания и поверхности стружки). Стружка скользит от точки m по передней поверхности, а поверхность резания обтекает режущую кромку и заднюю поверхность от точки m к точке d . Иногда в целях упрощения линию mt совмещают с плоскостью резания P_n .

Деление контактного контура на две зоны характерно для школы А.Л. Бершадского. Эти зоны названы зоной передней и задней поверхностей.

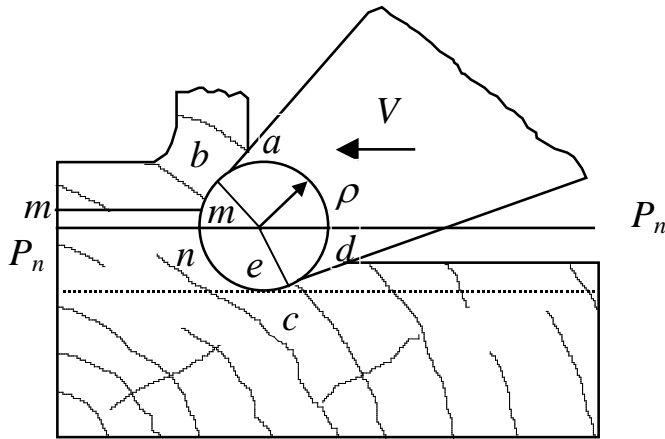


Рис. 26. Зоны контактного контура лезвия

Контактный контур лезвия делят также на три зоны по его геометрическим признакам: зону передней поверхности ab , зону режущей кромки bc и зону задней поверхности cd .

Деление контактного контура на три зоны характерно для школы С.А. Воскресенского.

5.4. Эпюры нормальных давлений по зонам лезвия

Передняя поверхность. Передняя поверхность лезвия выполняет основную работу при резании. Она деформирует срезаемый слой и стружку, создает в них напряжения и удаляет стружку.

Сжатие срезаемого слоя и стружки при резании происходит в полузамкнутом пространстве. Пространство стружки ограничено спереди лезвием, снизу, сзади, а иногда и с обоих боков массивом древесины. Причем относительная деформация стружки не превосходит величины 0,45. В связи с этим можно допустить, что нормальное давление стружки на переднюю поверхность лезвия подчиняется зависимости напряжений от деформации при сжатии древесины в замкнутом пространстве.

Перенесем график этой зависимости на переднюю поверхность (рис. 27) и будем считать, что давление стружки на переднюю поверхность распределено равномерно.

Режущая кромка. Режущая кромка лезвия создает и поддерживает в материале в плоскости резания достаточную концентрацию напряжений, при которой происходит разрушение материала. Концентрация напряжений перед режущей кромкой тем выше, чем меньше ее радиус закругления. Исследованиями доказано, что напряжения перед режущей кромкой в слое толщиной 2ρ (ρ – радиус закругления режущей кромки) достигают 400...5000 МПа. Это в 20...50 раз больше, чем давление на передней поверхности. Таким образом, **режущая кромка надрезает материал в срезаемом слое, а передняя поверхность удаляет его.**

Задняя поверхность. Задняя поверхность лезвия испытывает нормальное давление со стороны обрабатываемого материала вследствие упругого восстановления обработанной поверхности. Так как деформации под задней поверхностью упругие, то эпюру нормальных давлений на ней можно принять треугольной.

Учитывая сказанное, а также особенность деформирования древесины в замкнутом пространстве, принимаем рабочую эпюру нормальных давлений по контактными площадкам, изображенную на рис. 27.

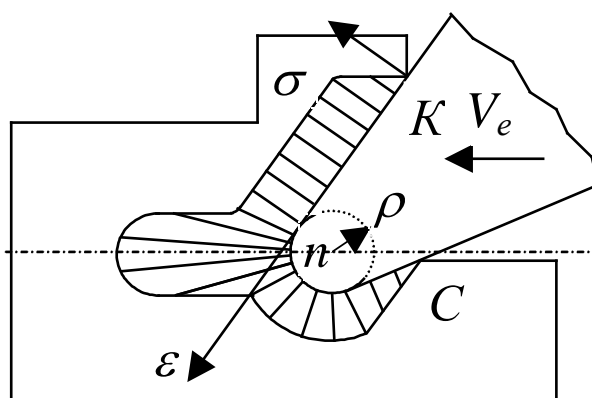


Рис. 27. Эпюра нормальных давлений по контактными площадкам лезвия

5.5. Формулы для расчета составляющих силы резания

Силы резания в зоне стружки. Заменяем эпюру нормальных давлений в зоне стружки (передней поверхности лезвия) сосредоточенной силой N и векторно прибавим к ней силу трения T (рис. 28, а). Полученную силу F спроецируем на направление V_e и на нормаль к нему. Получим следующие силы: F_{xp} – касательную силу резания по передней поверхности; F_{zn} – нормальную силу резания по передней поверхности.

Главная составляющая силы резания может быть найдена из эпюры касательных давлений в зоне стружки. Построим такую эпюру. Для этого каждый вектор нормального давления N_i и созданный им вектор силы трения T_i (рис. 28, б) спроецируем на направление V_e . Полученные точки соединим линией 234. Величина силы F_{xp} будет равна площади эпюры касательных давлений (все расчеты ведутся на ширину срезаемого слоя 1 мм). Эпюру касательных давлений на передней поверхности можно рассматривать состоящей из двух слоев: микрослоя 6345, опирающегося на поверхность лезвия и соизмеримого по толщине с радиусом его округления, и внешней части срезаемого слоя 1236. Максимальную толщину микрослоя в срезаемом макрослое принимают равной 0,1 мм. Касательное давление в микрослое обозначим k_m , а во внешнем слое – k .

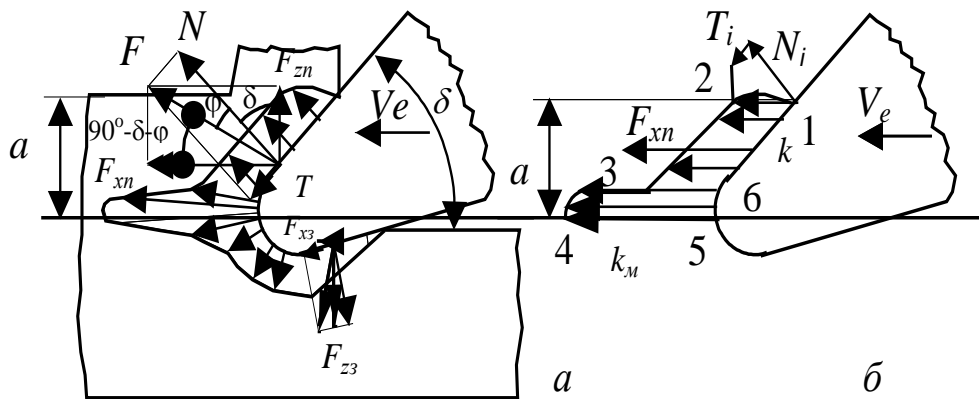


Рис. 28. Силы на лезвии:

a – общая схема сил; *б* – касательная сила на передней грани

Если форму слоев эпюры принять за параллелограммы, то единичную силу F_{xn} для срезаемого макрослоя можно найти как сумму площадей слоев эпюры по следующему выражению:

$$F_{xn} = 0,1k_m + k(a - 0,1), \quad (13)$$

где k_m, k – касательное давление на передней поверхности, равное сумме проекций векторов нормального давления и трения на направление скорости резания соответственно для микрослоя и внешнего слоя, МПа;

a – толщина срезаемого слоя, мм;

0,1 – толщина микрослоя в срезаемом макрослое, мм.

Если толщина срезаемого слоя $a_m < 0,1$ мм (микрослой), то

$$F_{xnm} = k_m a_m. \quad (14)$$

Радиальная составляющая силы резания находится путем следующих рассуждений. Силы N и F (см. рис. 28, *a*) образуют между собой угол трения φ ($\varphi = \text{arctg } \mu$, где μ – коэффициент трения древесины по передней поверхности). При этом силы F_{zn} и F_{xn} связаны между собой следующим уравнением:

$$F_{zn} = F_{xn} \text{tg}(90^\circ - \delta - \varphi), \quad (15)$$

где δ – угол резания.

Принимая во внимание уравнение (15), отметим, что F_{zn} состоит из двух слагаемых, относящихся к микрослою и внешнему слою:

$$F_{zn} = 0,1 k_m \operatorname{tg}(90^\circ - \delta_m - \varphi_m) + k(a - 0,1) \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi). \quad (16)$$

Около лезвия угол резания δ_m непрерывно изменяется: $\delta \leq \delta_m \leq 90^\circ$. В зоне высокого давления коэффициент трения убывает до минимального значения $\mu = 0,18$ (угол трения $\varphi_1 \cong 10^\circ$). При $\delta_m = 90^\circ - \varphi_m$ первое слагаемое уравнения нормальной силы равно нулю, а в диапазоне $\delta_m = (90^\circ - \varphi_m) \pm \varphi_m$ нормальная сила в микрослое тоже равна нулю. Поэтому ввиду малости первым слагаемым нормальной силы можно пренебречь. Тогда при $a \geq 0,1$ мм

$$F_{zn} = k(a - 0,1) \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi), \quad (17)$$

при $a < 0,1$ мм $F_{zn} = 0$.

Силы в зоне поверхности резания. Обращаясь к силам резания на задней поверхности (см. рис. 28, *a*), можно по аналогии получить касательную силу резания по задней поверхности F_{xz} и нормальную силу резания по задней поверхности F_{z3} . Так как упругопластическое деформирование поверхности резания задней поверхностью лезвия не превышает величину радиуса округления режущей кромки (не более 0,06 мм), то касательную силу по задней поверхности можно рассматривать как силу трения:

$$F_{xz} = f F_{z3}, \quad (18)$$

где f - коэффициент трения по задней поверхности лезвия.

Сила F_{z3} есть усилие, необходимое для заглабления лезвия в поверхность резания на величину радиуса закругления режущей кромки. С этим усилием заготовка отталкивает лезвие от себя.

Вывод. Итак, на лезвие (см. рис. 28, *a*) действуют две системы сил: над плоскостью резания и под ней. При этом силы F_{xn} и F_{xz} действуют в одном направлении и составляют вместе касательную единичную силу резания:

$$\begin{aligned} \text{при } a \geq 0,1 \text{ мм} \quad & F_{x1} = F_{xz} + 0,1k_m + k(a - 0,1), \\ \text{при } a_m < 0,1 \text{ мм} \quad & F_{x1m} = F_{xz} + k_m a_m. \end{aligned} \quad (19)$$

Вертикальные силы F_{zn} , F_{z3} проходят нормально к направлению V_e и в сумме составляют нормальную (радиальную) единичную силу резания:

$$F_{z1} = F_{z3} - F_{zn} \quad (20)$$

при $a \geq 0,1$ мм $F_{z1} = F_{x3} / f - k(a - 0,1) \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi)$,

при $a_m < 0,1$ мм $F_{z1m} = F_{x3m} / f$.

Если $F_z > 0$, то F_z называют силой отжима, с этим усилием заготовка отталкивает лезвие от поверхности резания.

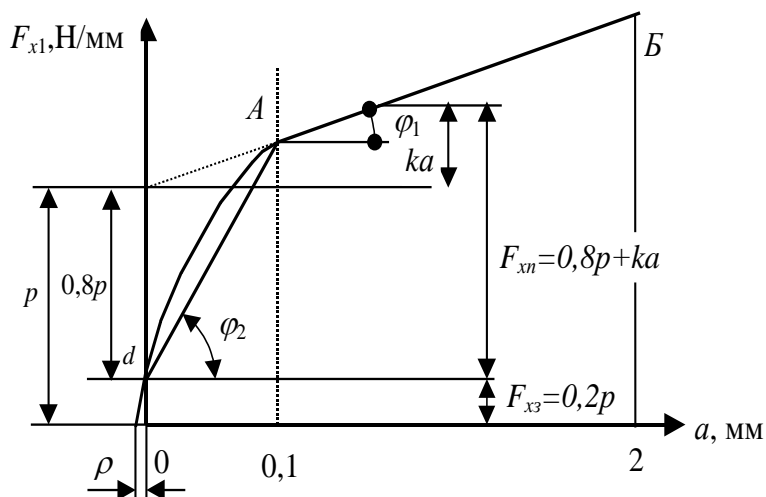
Если $F_z < 0$, то F_z называют силой затягивания, с этой силой лезвие затягивает заготовку на себя.

5.6. Зависимость главной составляющей силы резания от толщины срезаемого слоя

Изучая зависимость главной составляющей силы резания от толщины срезаемого слоя, А.Л. Бершадский отмечал, что при рубке, например, щепы толщиной до 25 мм касательная сила резания в зависимости от толщины срезаемого слоя изменяется по параболе. Однако на участке толщины срезаемого слоя $a = 0,1 \dots 2,0$ мм кривая параболы близка к прямой линии. Многочисленные исследования различных авторов подтвердили такую зависимость.

Обобщенная зависимость главной составляющей силы резания от толщины срезаемого слоя в диапазоне от 0 до 2 мм названа

Бершадским
"обобщенным законом резания щепы"
График



А.Л. Бершадский "обобщенный закон резания щепы" [3].

Рис. 29. Зависимость касательной силы от толщины срезаемого слоя

нения единичной касательной силы резания (ширина срезаемого слоя равна 1 мм) показан на рис. 29.

Область толщины срезаемого слоя поделена на графике на две зоны: области микрослоев при $a_m < 0,1$ мм и макрослоев при $a = 0,1...2$ мм.

В диапазоне макрослоев линия графика представлена в виде прямой AB , наклоненной к оси абсцисс под углом φ_1 . Уравнение прямой AB :

$$F_{x1} = p + a \operatorname{tg}\varphi_1 = p + ka, \quad (21)$$

где p – фиктивная сила резания, Н/мм, т.е. величина ординаты, отсекаемая прямой AB от начала координат.

В диапазоне микрослоев по мере приближения от точки A графика к точке d толщина срезаемого слоя становится все более соизмеримой с радиусом закругления режущей кромки лезвия. Угол резания возрастает и тем больше, чем меньше значение a_m . В этих условиях резания значения касательной силы резания изменяются по параболической кривой линии dA .

Для упрощения расчетов отрезок параболы заменен прямой линией, наклоненной к оси абсцисс под углом φ_2 и отсекающей на оси ординат отрезок Od , равный по величине касательной силе резания по задней грани. Уравнение единичной касательной силы резания для микрослоев

$$F_{x.m1} = F_{x.3} + a_m \operatorname{tg}\varphi_2 = F_{x3} + k_m a_m, \quad (22)$$

где $F_{x.z}$ – единичная касательная сила резания по задней поверхности, Н/мм;

k_m – касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность лезвия, МПа.

Для острого лезвия ($\rho_0 = 4...10$ мкм) значение единичной касательной силы резания по задней поверхности, по данным А.Л. Бершадского равно

$$F_{x.z} = 0,2\rho . \quad (23)$$

Для произвольно взятой точки графика касательная сила резания состоит из суммы двух частей: силы резания по задней поверхности $F_{x.z} = 0,2\rho$ и силы резания по передней поверхности $F_{xп} = 0,8\rho + ka$. Сумма этих частей дает уравнение (21). В диапазоне микрослоев $F_{xпм} = k_m a_m$.

Таково содержание общего закона резания древесины, который является базой расчетного метода А.Л. Бершадского.

5.7. Допущения, принятые Бершадским

А.Л.

При разработке расчетного метода А.Л. Бершадским приняты следующие допущения.

1. Считается, что зависимость касательной силы резания от толщины срезаемого слоя может быть описана уравнением прямой линии. Фактически эта зависимость на графике имеет параболическую форму.

2. Считается, что расстояние от начала координат до точки пересечения линии графика с осью абсцисс соответствует значению радиуса закругления режущей кромки лезвия ρ . Кроме того, предполагается, что парабола и прямая линия графика должны

пересечься с осью абсцисс в одной точке, соответствующей значению ρ .

3. Принято, что сила резания по задней поверхности острого лезвия $F_{xz} = 0,2\rho$. Для доказательства такой зависимости А.Л. Бершадским использованы конкретные экспериментальные результаты, поэтому и вывод должен соответствовать конкретным условиям резания древесины.

4. Считается, что по мере затупления режущей кромки лезвия линии графиков будут располагаться выше друг над другом, но строго параллельно друг другу.

5. Считается, что силы, действующие по обе стороны от плоскости резания, не зависят друг от друга.

6. Принято, что коэффициент затупления α_ρ следует относить только к фиктивной силе ρ , а не ко всей касательной силе резания. Считается, что для тупого лезвия $\rho_t = \alpha_\rho \rho$, где ρ – фиктивная сила резания острого лезвия. При изменении значения фиктивной силы резания ρ_t тупого лезвия составляющая касательной силы резания по передней поверхности всегда остается постоянной и равной $F_{xp} = 0,8\rho + ka = \text{const}$.

5.8. О взаимосвязи сил, действующих по контактными поверхностям лезвия

Изучая процесс резания древесины, в 1934 г. М.А. Дешевой высказал предположение о независимости действия сил по

обе стороны от плоскости резания. В 1945 г. А.М. Розенберг в исследовании процесса фрезерования металлов, а в 1955 г. С.А. Воскресенский в теоретических исследованиях процесса резания древесины делают предположения, что процессы, происходящие по передней поверхности лезвия, не влияют на величину сил по задней поверхности.

Впервые гипотеза о независимости сил по задней поверхности от толщины срезаемого слоя была проверена Н.Н. Зоревым в 1952 г. при резании стали. Было показано, что при увеличении толщины срезаемого слоя от 0,05 мм до 0,55 мм силы резания на задней поверхности **почти не изменяются**. "Природа сил, – отмечает Н.Н. Зорев [4], – действующих по передней и задней поверхностям, различна и поэтому большинство факторов различно влияют на величину этих сил. Например, передний угол и толщина среза сильно влияют на силы, действующие на передней поверхности, но слабо влияют на силы, действующие на задней поверхности. Ширина контакта задней поверхности слабо влияет на силы, действующие на передней поверхности, но сильно влияет на силы, действующие на задней поверхности."

В 1953 г. М.Н. Ларин [5], изучая характер износа резцов при различных задних углах и толщинах срезаемых слоев, пришел к выводу, что оптимальное значение заднего угла связано с толщиной срезаемого слоя и определяется по формуле

$$\sin \alpha_{\text{опт}} \approx \frac{C}{a_{\text{max}}^k},$$

где C – постоянная величина: $C = 0,13$ при обработке стали, чугуна, сплавов; $C = 0,18$ при обработке пластмасс;

a_{max} – толщина срезаемого слоя, мм;

k – коэффициент.

"Таким образом, – пишет М.Н. Ларин, – многочисленными опытами советских исследователей установлено, что главным фактором, влияющим на величину оптимального заднего угла, является толщина среза стружки."

В 1961 г., рассматривая вопрос о коэффициенте затупления, А.Л. Бершадский [6] излагает методику обработки экспериментальных данных Е. Кивимаа, В.П. Бухтиярова и приводит значения коэффициентов затупления по передней $\alpha_{\rho n}$ и задней $\alpha_{\rho z}$ поверхностям в зависимости от времени работы лезвия T :

$T, \text{ч}$	0	1	2	3	4	5	6
$\alpha_{\rho n}$	1,0	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3
$\alpha_{\rho z}$	1,0	1,25	1,45	1,60	1,75	1,85	2,0

Затупление режущей кромки, оказывающее сильное влияние на работу задней поверхности, оказывается, влияет, хотя и незначительно, на работу передней поверхности.

Позднее А.Л. Бершадский отказался от результатов проведенных исследований, но факт существования такой зависимости остается.

В 1967 г., изучив влияние затупления лезвий на касательную силу резания при фрезеровании древесины, В.Г. Морозов [7] приводит следующие значения коэффициентов затупления по передней $\alpha_{\rho n}$ и задней $\alpha_{\rho z}$ поверхностям лезвия:

$\rho, \text{мкм}$	5	10	15	20	25	30	35
--------------------	---	----	----	----	----	----	----

$\alpha_{\rhoп}$	1,0	1,04	1,08	1,13	1,20	1,28	1,40
$\alpha_{\rhoз}$	1,0	1,25	1,70	2,00	2,50	3,30	4,50

В 1967 г., изучая процесс фрезерования лигно-углеводных древесных пластиков, автор предложил следующую формулу для расчета единичной касательной силы резания, Н [8]:

$$F_{x1} = 9,81(0,275\alpha_{vз}\alpha_{Hз}\alpha_{\rhoз}\alpha_{\alphaз}\alpha_{\deltaз} + 1,702\alpha_{vп}\alpha_{Hп}\alpha_{\rhoп}\alpha_{\alphaп}\alpha_{\deltaп}) ,$$

где использованы поправочные коэффициенты по задней и передней поверхностям лезвия:

$\alpha_{vз}$ и $\alpha_{vп}$ – на скорость главного движения;

$\alpha_{Hз}$ и $\alpha_{Hп}$ – на глубину фрезерования;

$\alpha_{\rhoз}$ и $\alpha_{\rhoп}$ – на затупление режущей кромки;

$\alpha_{\alphaз}$ и $\alpha_{\alphaп}$ – на величину заднего угла;

$\alpha_{\deltaз}$ и $\alpha_{\deltaп}$ – на угол резания.

Поправочные коэффициенты на угол резания оказывают основное влияние на силы по передней поверхности лезвия, но они оказывают влияние, хотя и меньшее, на силы по задней поверхности. Значения коэффициентов приведены ниже.

Угол резания δ , град	50	55	60	65	70
$\alpha_{\deltaз}$	1	1,01	1,03	1,08	1,15
$\alpha_{\deltaп}$	1	1,16	1,29	1,38	1,45

Поправочные коэффициенты на задний угол и затупление режущих кромок лезвий оказывают главное влияние на силы, действующие по задней поверхности лезвия, но они влияют и на силы по передней поверхности. Значения коэффициентов приведены ниже.

Задний угол α , град	8	9	10	11	12
$\alpha_{\alpha z}$	1,09	1,03	1,0	0,94	0,91
$\alpha_{\alpha n}$	0,89	0,96	1,0	1,01	1,02
Радиус закругления ρ , мкм	15	25	35	45	55
$\alpha_{\rho z}$	1	1,76	2,27	2,65	2,96
$\alpha_{\rho n}$	1	0,73	0,62	0,54	0,49

Таким образом, результаты опытов, проведенных многими исследователями, подтверждают взаимосвязь сил, действующих по передней и задней поверхностям лезвия.

5.9. Сила резания по задней поверхности

острого лезвия

Ниже приведен вывод формулы для определения касательной

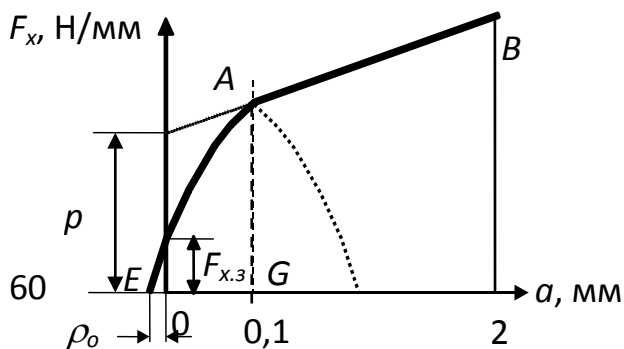


Рис. 30. Расчетная схема к определению касательной силы резания по задней грани

силы резания по задней поверхности лезвия. Расчетная схема дана на рис. 30.

В диапазоне микрослоев ($a \leq 0,1$ мм) линия зависимости единичной касательной силы резания от толщины срезаемого слоя имеет параболическую форму. Общее уравнение параболы в осях координат F_{x1} и a

$$F_{x1} = ca^2 + da + e, \quad (24)$$

где c, d, e – параметры параболы.

Парабола проходит через точку E , и вершина ее расположена в точке A (рис. 30). Вершина A – точка экстремум. Для определения ее координат найдем первую производную и приравняем нулю: $F'_{x1} = 2ca + d = 0$, отсюда $a = -d/2c$. Подставив значение a в (24), получим ординату вершины A .

Координаты точки A :

$$a_A = OG = 0,1 = -\frac{d}{2c};$$

$$F_{x1A} = AG = F_{x0,1} = \frac{4ce - d^2}{4c}, \quad (25)$$

где $F_{x0,1}$ – значение касательной силы резания при толщине срезаемого слоя 0,1 мм: $F_{x0,1} = p + 0,1k$.

Отсюда получим

$$d = -0,2c,$$

$$4ce - d^2 = 4c F_{x0,1}. \quad (26)$$

Точка E , лежащая на параболе, имеет координаты:

$$a_E = -\rho_0; \quad F_{x1E} = 0. \quad (27)$$

Подставляя эти координаты в уравнение параболы, получим

$$\begin{aligned} 0 &= c\rho_o^2 - d\rho_o + e, \\ e &= -c\rho_o^2 + d\rho_o. \end{aligned} \quad (28)$$

Получена система уравнений для определения параметров c , d , e параболы:

$$\begin{cases} d = -0,2c; \\ 4ce - d^2 = 4c F_{x0,1}; \\ e = -c\rho_o^2 + d\rho_o. \end{cases} \quad (29)$$

После решения системы уравнений получено

$$c = -\frac{F_{x0,1}}{\lambda}; \quad d = \frac{0,2F_{x0,1}}{\lambda}; \quad e = F_{x0,1}\left(1 - \frac{0,01}{\lambda}\right), \quad (30)$$

где λ – коэффициент: $\lambda = \rho_o^2 + 0,2\rho_o + 0,01$; для острых лезвий с начальным радиусом закругления режущей кромки $\rho_o = 5 \text{ мкм} = 0,005 \text{ мм}$ $\lambda = 0,011025$; для пил с $\rho_o = 0,01 \text{ мм}$ $\lambda = 0,0121$.

Уравнение параболы

$$F_{x1} = F_{x0,1}\left(-\frac{1}{\lambda}a^2 + \frac{0,2}{\lambda}a + 1 - \frac{0,01}{\lambda}\right). \quad (31)$$

При $a = 0$ парабола пересекает ось ординат в точке, соответствующей значению силы резания по задней поверхности лезвия. Таким образом

$$F_{xz} = F_{x0,1}\left(1 - \frac{0,01}{\lambda}\right). \quad (32)$$

Для острых лезвий с $\rho_o = 5 \text{ мкм} = 0,005 \text{ мм}$

$$F_{xz} = 0,093F_{x0,1} = 0,093(p + 0,1k). \quad (33)$$

Для пил с $\rho_0 = 0,01$ мм

$$F_{xz} = 0,174F_{x0,1} = 0,174(p + 0,1k). \quad (34)$$

По Е. Кивимаа, при резании березы в торец $F_{x1} = 4 + 38a$.

$$F_{xz} = 0,093(p + 0,1k) = 0,093(4 + 3,8) = 0,725 \text{ Н/мм.}$$

Доля силы резания по задней поверхности в фиктивной силе резания

$$F_{xz} = \frac{0,725}{p} p = \frac{0,725}{4} p = 0,18p.$$

В исследованиях В.Г. Морозова при фрезеровании древесины единичная касательная сила резания выражается уравнением $F_{x1} = 1,5 + 13a$.

$$F_{xz} = 0,093(p + 0,1k) = 0,093(1,5 + 0,1 \cdot 13) = 0,26 \text{ Н/мм.}$$

$$F_{xz} = \frac{0,26}{p} p = \frac{0,26}{1,5} p = 0,17p.$$

Расчетные значения по величине близки к принятым А.Л. Бершадским $F_{x.3} = 0,20p$. Отклонения составляют соответственно 10 и 15%.

Описание зависимости касательной силы резания от толщины срезаемого микрослоя уравнением параболы имеет следующие особенности:

– все возможные параболы проходят через точку А (вершину параболы) и точку Е (см. рис. 30), лежащую на оси абсцисс на

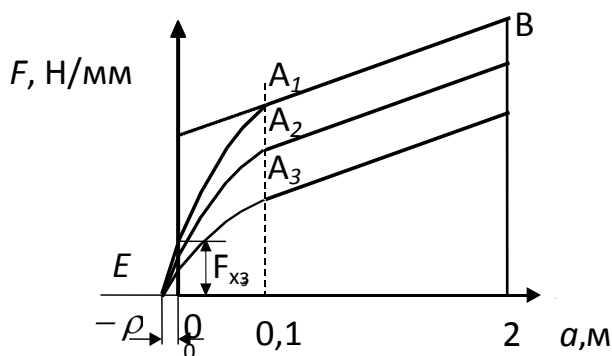


Рис. 31. Семейство парабол, проходящих через точку Е и вершины A_1, A_2, A_3

расстоянии $(-\rho)$ от начала координат;

– все возможные точки A имеют координаты $A_i(0,1; F_{x1i})$;

– форма параболы (крутизна, пологость) и значение силы резания по задней поверхности F_{x3} зависят от положения точки A по высоте и значения ρ (рис. 31). Чем меньше значения ρ и k (параметры линии AB), тем меньше ордината вершины параболы, тем выше парабола и меньше значение F_{x3} .

Таким образом, с использованием параболической зависимости силы резания в диапазоне микрослоев установлена взаимосвязь силы резания по задней поверхности с параметрами режима резания ρ , k и ρ .

Для получения обобщенной формулы для силы резания по задней поверхности подставим в выражение (32) значение λ :

$$F_{x3} = (p + 0,1k) \left(1 - \frac{0,01}{\rho_o^2 + 0,2\rho_o + 0,01} \right).$$

Значение радиуса закругления $\rho_o = 0,005$ мм или $\rho_o = 0,010$ мм. Ввиду малости этих величин значением ρ_o^2 можно пренебречь. После приведения выражения к общему знаменателю и деления числителя и знаменателя на 0,2 получим

$$F_{x3} = (p + 0,1k) \left(\frac{\rho_o}{\rho_o + 0,05} \right).$$

При расчетах удобнее подставлять величину радиуса закругления ρ_o в микрометрах. Для этого помножим числитель и знаменатель дроби на 1000 и получим окончательное выражение для касательной силы резания по задней поверхности острого лезвия

$$F_{x3} = (p + 0,1k) \left(\frac{\rho_o}{\rho_o + 50} \right). \quad (35)$$

5.10. Учет затупления лезвий

По мере затупления режущих кромок лезвий значения силы резания увеличиваются. В расчетах увеличение силы резания учитывают коэффициентом затупления α_p .

На рис. 32 линией E_dAB представлен график зависимости касательной силы резания для острого лезвия. Линией $E_{Td}A_TB_T$ представлен график для тупого лезвия. Фиктивная сила резания для тупого лезвия находится с учетом коэффициента затупления α_p : $p_T = \alpha_p p$. Из точки T проходит прямая линия A_TB_T зависимости касательной силы резания от толщины срезаемых макрослоев.

Можно предположить, что по отношению к линии AB для острого лезвия линия A_TB_T может занимать следующие три положения.

1. Линия A_TB_T может проходить параллельно AB . Возможно, этот случай имеет место при резании древесины небольшой плотности или при резании древесных материалов, например цементно-стружечных плит.

Древесина – пористый материал, который при резании деформируется, уплотняется. Доказано, что в зоне резания относительная деформация обрабатываемого материала не превышает $\varepsilon = 45\%$. Если обрабатываемая древесина, например, сосны, имеет плотность $0,54 \text{ г/см}^3$, то в контактной зоне лезвия при резании плотность древесины может увеличиться максимум до

$$\rho = \frac{\rho_m}{(1 - \varepsilon)} = \frac{0,54}{1 - 0,45} = 0,98 \text{ г/см}^3.$$

Уплотненный материал все равно остается пористым, так как плотность древесинного вещества при влажности $W = 30\%$ равна $1,2 \text{ г/см}^3$, а абсолютно сухого – для всех пород $1,54 \text{ г/см}^3$. Контактные напряжения не изменяются.

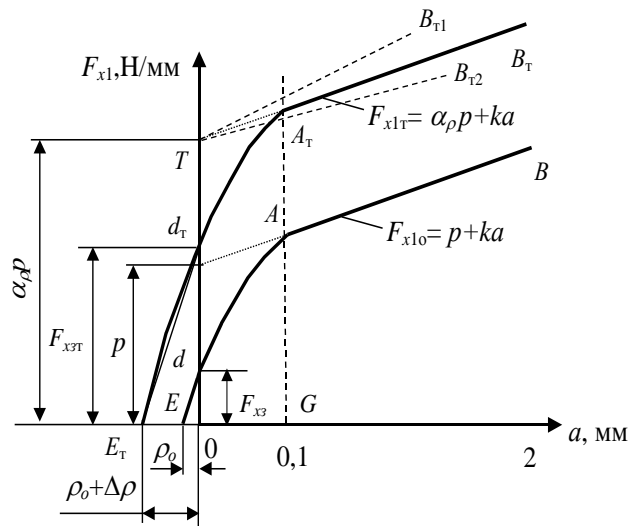


Рис. 32. Графики для расчета коэффициента затупления

Ниже приведены формулы для единичной касательной силы резания в зависимости от пути лезвия в обрабатываемом материале, полученные при обработке результатов исследования В.В. Амалицкого по фрезерованию цементно-стружечных плит [9]. На графике эти формулы выражаются параллельными прямыми линиями.

Путь, км	0	2	4	6
F_{x1} , Н/мм	11,6-12,225a	12,15-12,225a	13,5-12,225a	15,0-12,225a

2. Линия $A_T B_{T1}$ может проходить круче линии AB . Это доказано А.Л. Бершадским при обработке исследований Е. Кивимаа при резании древесины березы ($\rho = 0,63 \text{ г/см}^3$), В.П. Бухтиярова при фрезеровании древесины дуба ($\rho = 0,69 \text{ г/см}^3$). Это доказано В.Г. Морозовым, а также исследованиями В.И. Гиль при фрезеровании древесноволокнистых плит средней плотности ($\rho = 0,7 \text{ г/см}^3$) [10]. Единичная касательная сила резания по В.И. Гиль, при фрезеровании кромок MDF определяется по формулам табл. 2.

Таблица 2

Единичная касательная сила резания при фрезеровании кромок MDF в зависимости от угла резания, затупления лезвий и толщины срезаемого слоя

Радиус закругления ρ , мкм	F_{x1} , Н/мм при углах резания δ , град		
	50	60	70
7	$0,71+7,29a$	$-1,79+26,67a$	$0+13,75a$
20	$-0,54+19,79a$	$-1,79+29,17a$	$-0,458+23,33a$
31	$-0,25+22,5a$	$-0,208+28,33a$	$-1+31,9a$
41	$0,73+21,46a$	$-1,04+36,67a$	$-0,21+33,33a$

В этом случае древесина, контактируемая при резании с лезвием, имеет плотность

$$\rho = \frac{\rho_m}{(1-\lambda)} = \frac{0,63...0,7}{1-0,45} = (1,145...1,273) \text{ г/см}^3.$$

Плотность древесины в зоне резания близка к плотности древесинного вещества. Напряжения, возникающие по поверхности резания тупого лезвия, дополняют (увеличивают значения k) напряжения по передней грани так, что суммарные напряжения достигают предела прочности материала. В результате этого по мере затупления лезвия линии графиков проходят круче.

3. Линия A_1B_{T2} может проходить положе линии AB . Это происходит при резании материала высокой плотности, например лигно-углеводных древесных пластиков ($\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$) [8]. При резании таких материалов тупым лезвием напряжения по поверхности резания становятся столь велики и близки к пределу прочности обрабатываемого материала, что участие передней поверхности в создании напряжений понижается.

Для вывода формулы коэффициента затупления копию параболы AE (см. рис. 32) без изменений переносим вершиной в точку A_T , затем параболу продлим до пересечения с осью абсцисс. Заменяем отрезки парабол Ed и $E_T d_T$ прямыми линиями и получим два подобных треугольника: $Od_T E_T$ и OdE . Составим отношение сторон этих треугольников

$$\frac{Od_T}{Od} = \frac{OE_T}{OE} \quad \text{или} \quad \frac{F_{ХЗТ}}{F_{ХЗО}} = \frac{\rho_o + \Delta\rho}{\rho_o}, \quad (36)$$

где $F_{ХЗТ}$, $F_{ХЗО}$ – сила резания по задней поверхности соответственно тупого и острого лезвий.

Для острого лезвия

$$F_{ХЗО} = (p + 0,1k) \left(\frac{\rho_o}{\rho_o + 50} \right).$$

Для тупого лезвия

$$F_{ХЗТ} = (\alpha_\rho p + 0,1k) \left(\frac{\rho_o + \Delta\rho}{\rho_o + \Delta\rho + 50} \right).$$

Подставляя полученные выражения в (36), получим

$$\frac{(\alpha_\rho p + 0,1k)(\rho_o + \Delta\rho)(\rho_o + 50)}{(\rho_o + \Delta\rho + 50)(p + 0,1k)\rho_o} = \frac{\rho_o + \Delta\rho}{\rho_o},$$

где p – фиктивная сила резания при резании острым лезвием, Н/мм;

k – касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность лезвия, Н/мм²;

ρ_o – радиус закругления острого лезвия (начальный радиус закругления), мкм;

$\Delta\rho$ – прирост радиуса закругления для затупленного лезвия, мкм: $\Delta\rho = \rho - \rho_o$.

После преобразований получим формулу для коэффициента затупления лезвий:

$$\alpha_\rho = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta\rho}{\rho_o + 50}. \quad (37)$$

Из (37) следует: чем больше значение k и меньше p , тем больше значение коэффициента затупления α_ρ .

Пример. Определим значение коэффициента затупления α_ρ при резании с $\rho_o = 5$ мкм и $\Delta_\rho = 20$ мкм и касательной силой резания, описанной уравнениями

$$F_{x1} = 4\alpha_\rho + 38a,$$

$$F_{x1} = 1,5\alpha_\rho + 13a.$$

Для первого уравнения получим следующее выражение для α_ρ :

$$\alpha_\rho = 1 + \frac{(1 + 0,1\frac{38}{4})20}{5 + 50} = 1,71.$$

Для второго уравнения получим

$$\alpha_\rho = 1 + \frac{(1 + 0,1\frac{13}{1,5})20}{5 + 50} = 1,68.$$

Для сравнения приведем результат по формуле А.Л. Бершадского:

$$\alpha_{\rho} = 1 + \frac{0,2\Delta_{\rho}}{\rho_0} = 1 + \frac{0,2 \cdot 20}{5} = 1,8.$$

Таким образом, значения коэффициента затупления, вычисляемые по формуле (37), получаются несколько ниже, чем по методу А.Л. Бершадского. Отклонения составляют соответственно 5 и 6,7%.

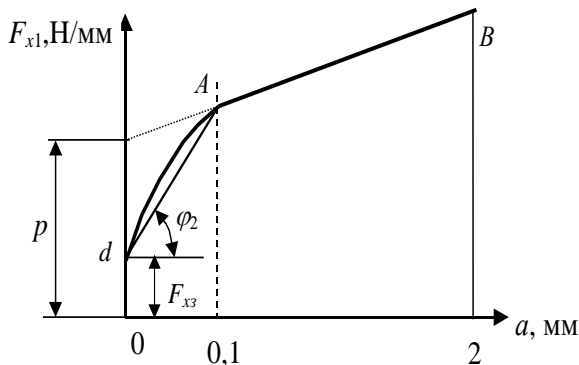
5.11. Расчет силы резания в диапазоне микрослоев

В диапазоне микрослоев представим кривую зависимости касательной силы резания от толщины срезаемого слоя в виде отрезка параболы Ad (рис. 33). По уравнению параболы сила резания для микрослоев находится по уравнению (31):

$$F_{x1,m} = (\alpha_{\rho} p + 0,1k) \left(-\frac{1}{\lambda} a_m^2 + \frac{0,2}{\lambda} a_m + 1 - \frac{0,01}{\lambda} \right),$$

где $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$; $\rho = \rho_0 + \Delta_{\rho}$; ρ – радиус закругления режущей кромки лезвия, мм.

Для упрощения расчетов в методе А.Л. Бершадского кривая параболы заменена отрезком прямой линии Ad . В точке d



парабола пересекает ось ординат. Отрезок Od соответствует значению силы резания по задней поверхности лезвия F_{x3} .

Точка A является общей для участков

Рис. 33. График для расчета сил резания

микро- и макрослоев при толщине 0,1 мм. Напишем уравнение для силы резания при $a = 0,1$ мм:

– для макрослоев $F_{x1} = p + 0,1k$;

– для микрослоев $F_{x1M} = F_{x3} + 0,1k_M$;

$$F_{x1M} = (\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50} + 0,1k_M.$$

Приравняем F_{x1} и F_{x1M} .

$$(p + 0,1k) = (\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50} + 0,1k_M.$$

Отсюда

$$k_\mu = (\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{500}{\rho_o + \Delta_\rho + 50}, \quad (38)$$

где ρ_o, Δ_ρ подставляются в мкм.

Подставляя значения k_M в приведенное выше уравнение для F_{x1M} , получим выражение единичной касательной силы резания, которое можно использовать при приближенных расчетах:

$$F_{x1\mu} = \frac{(\alpha_\rho p + 0,1k)}{\rho_o + \Delta_\rho + 50} (\rho_o + \Delta_\rho + 500a_\mu). \quad (39)$$

Итак, принимая на участке микрослоев график силы резания параболическим, расчет силы резания следует вести по уравнению (31), в случае замены кривой параболы прямой линией расчет надо вести по уравнению (39).

Рассмотрим точность получаемого результата по формулам (31) и (39). Проведем расчет силы резания для случая резания березы в торец: $F_{x1} = 4 + 38a$. Лезвие острое с $\rho_o = 5$ мкм. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Сведения, приведенные в табл. 3, убедительно показывают, что для повышения точности расчетов касательной силы резания в диапазоне микрослоев следует пользоваться формулой (31).

Таблица 3

Результаты расчета касательной силы резания по формулам (31) и (39)

Толщина срезаемого слоя a_m , мм	Значения F_{x1m} , рассчитанные по формуле		Погрешность, %
	параболы, Н/мм	прямой линии, Н/мм	
0,02	3,27	2,13	34,99
0,05	6,03	4,25	29,46
0,07	7,16	5,67	20,81
0,1	7,8	7,8	0

При решении обратных задач из уравнений для единичной касательной силы резания находят значение толщины срезаемого слоя.

Запишем уравнение параболы в виде

$$\frac{F_{x1}}{(\alpha_{\rho}p + 0,1k)} = -\frac{1}{\lambda}a^2 + \frac{0,2}{\lambda}a + 1 - \frac{0,01}{\lambda}. \quad (40)$$

Обозначим $\frac{F_{x1}}{(\alpha_{\rho}p + 0,1k)} = c$.

После преобразования составим приведенное квадратное уравнение

$$a^2 - 0,2a + (c\lambda - \lambda + 0,01) = 0. \quad (41)$$

Отсюда

$$a = 0,1 - \sqrt{\lambda(1-c)}. \quad (42)$$

При $c = 0$ $a = 0,1$ мм; при $c > 1$ решение не имеет смысла.

При решении задачи необходимо определить значение c , а затем выбрать соответствующее уравнение для расчета значения толщины срезаемого слоя, пользуясь условием:

если $c \leq 1$, то

$$a = 0,1 - \sqrt{(\rho^2 + 0,2\rho + 0,01)\left(1 - \frac{F_{x1}}{(\alpha_\rho p + 0,1k)}\right)}, \quad (43)$$

иначе значение a следует находить по уравнению для макрослоев. В этом уравнении значение ρ подставляется в миллиметрах.

5.12. Коэффициент трения по передней поверхности лезвия

От величины коэффициента трения зависят значения сил резания и износ передней поверхности лезвия

При врезании лезвия в древесину передняя поверхность воспринимает нормальное давление N и силу трения F_{mp} (рис. 34). Сумма этих сил равна силе F , которую раскладывают на касательную F_{xn} и нормальную F_{zn} силы резания по передней поверхности. На задней поверхности силу нормального давления и силу тре-

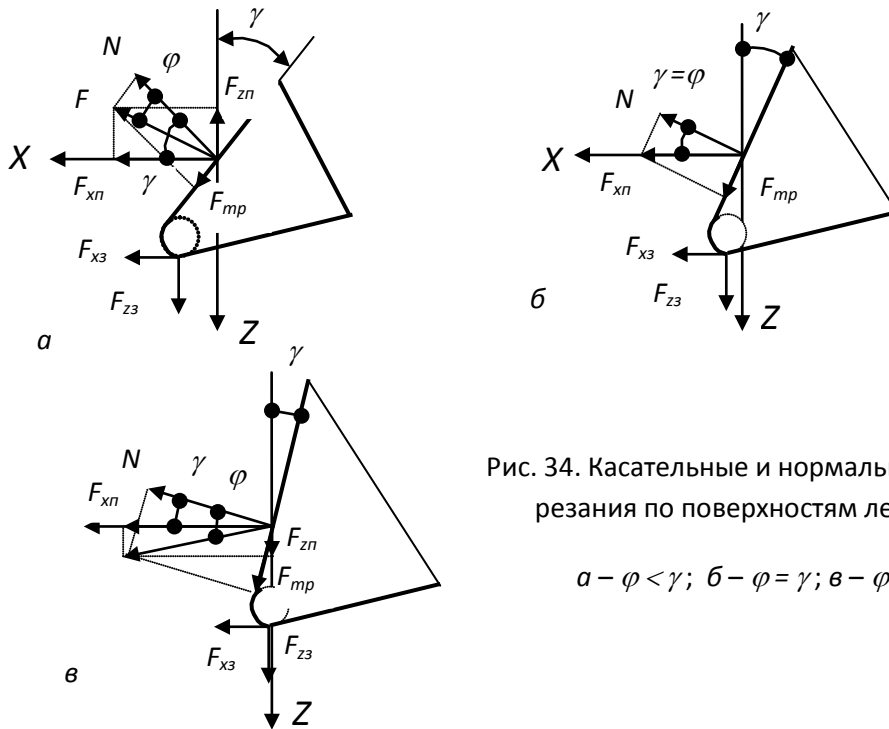


Рис. 34. Касательные и нормальные силы резания по поверхностям лезвия:

$a - \varphi < \gamma$; $б - \varphi = \gamma$; $в - \varphi > \gamma$

ния приводят к силе касательной F_{x3} и силе отжима F_{z3} .

Касательная и нормальная силы резания по передней поверхности лезвия связаны между собой уравнением

$$F_{zn} = F_{xn} \operatorname{tg}(\gamma - \varphi), \quad (44)$$

где γ – передний угол лезвия;

φ – угол трения: $\operatorname{tg} \varphi = \mu$, где μ – коэффициент трения скольжения срезаемого слоя по передней грани.

Нормальная сила резания по задней поверхности лезвия

$$F_{z3} = \frac{F_{x3}}{f},$$

где F_{z3} – касательная сила резания по задней поверхности лезвия;

f – приведенный коэффициент трения по задней поверхности.

Нормальная суммарная сила резания с учетом направления составляющих равна:

$$F_z = F_{z3} - F_{zn}.$$

Часто значение нормальной силы резания находят через переходный множитель:

$$F_z = m_o F_x,$$

где m_o – общий переходный множитель.

Значение m_o зависит от величины радиуса закругления режущей кромки лезвия, толщины срезаемого слоя и угла резания лезвия. Значение

$$m_o = m + m',$$

где m – переходный множитель (табл. 4);

m' – поправка на угол резания:

Угол резания

δ , град	50	55	60	65	70	75	80
Поправка m'	-0,16	-0,08	0	0,08	0,16	0,24	0,32

При резании древесины возможны следующие случаи:

- сила $F_{zn} > 0$ (см. рис. 34, а), когда угол $\gamma > \varphi$ и сила F_{zn} направлена вверх;
- сила $F_{zn} = 0$ (рис. 34, б), когда угол $\gamma = \varphi$;
- сила $F_{zn} < 0$ (рис. 34, в), когда угол $\gamma < \varphi$ и сила F_{zn} направлена вниз.

Таблица 4

Переходный множитель m для цилиндрического фрезерования

ρ , мкм	Значения m при средней толщине срезаемого слоя a , мм							
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
5	-0,04	-0,13	-0,18	-0,22	-0,23	-0,25	-0,26	-0,27
10	0,15	0,05	-0,05	-0,10	-0,13	-0,16	-0,17	-0,17
15	0,33	0,2	0,08	0,0	-0,03	-0,06	-0,07	-0,08
20	0,5	0,34	0,18	0,10	0,04	0,01	0,0	-0,01
25	0,7	0,45	0,26	0,16	0,12	0,08	0,07	0,06
30	0,8	0,55	0,33	0,23	0,18	0,15	0,12	0,11
35	1,0	0,65	0,40	0,30	0,23	0,19	0,18	0,17
40	1,1	0,75	0,48	0,35	0,28	0,25	0,22	0,2
Примечание: (+) – отжим; (–) – затягивание								

Для случая резания, когда $\gamma > \varphi$, возможны следующие варианты значения силы F_{zn} :

– при отрицательном значении m_o (рис. 35, а)

$$F_{zn} = F_z + F_{z3};$$

– при положительном значении m_o (рис. 35, б)

$$F_{zn} = F_z - F_{z3}.$$

В общем случае с учетом знака переходного множителя абсолютная величина

$$F_{zn} = (-1) m_o F_x + F_{z3}.$$

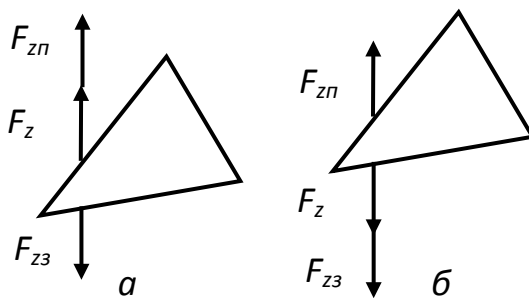


Рис. 35. Схема действия сил при

Разность углов γ и φ
из (44)

$$\gamma - \varphi = \text{arctg} \frac{F_{zn}}{F_{xn}}.$$

Отсюда следует, что
угол трения на передней
поверхности лезвия

$$\varphi = \gamma - \text{arctg} \frac{F_{zn}}{F_{xn}},$$

а коэффициент трения срезаемого слоя по передней поверхности

$$\mu = \text{tg}(\gamma - \text{arctg} \frac{F_{zn}}{F_{xn}}). \quad (45)$$

Единичная касательная сила резания по передней по-
верхности для затупленного лезвия

$$F_{xn1} = F_{x1} - F_{x31} = \alpha_\rho p + ka - (\alpha_\rho p + 0,1k) \left(\frac{\rho}{\rho + 50} \right). \quad (46)$$

Радиальную (нормальную) составляющую силы резания часто выражают через пе-
реходный множитель m : $F_z = mF_x$. Радиальная единичная сила резания по передней
поверхности лезвия

$$F_{zn1} = F_{z1} - F_{z31} = F_{z1} - \frac{F_{x31}}{f},$$

где F_{z3} и F_{x3} – соответственно сила отжима задней поверхности лезвия, и касательная сила резания по задней поверхности;

f – коэффициент трения задней поверхности лезвия по поверхности резания; по данным А.Л. Бершадского,

$$f = \frac{2}{\alpha_\rho^2}.$$

$$F_{zn1} = mF_{x1} - 0,5\alpha_\rho^2 F_{x31}. \quad (47)$$

Подставляя приведенные значения сил на передней поверхности лезвия F_{xp} и F_{zp} в выражение для коэффициента трения срезаемого слоя по передней поверхности лезвия, получим

для $\gamma > \varphi$

$$\mu = \operatorname{tg}\left(\gamma - \operatorname{arctg} \frac{(-1)m(\alpha_\rho p + ka) + 0,5\alpha_\rho^2(\alpha_\rho p + 0,1k)\left(\frac{\rho}{\rho + 50}\right)}{\alpha_\rho p + ka - (\alpha_\rho p + 0,1k)\left(\frac{\rho}{\rho + 50}\right)}\right); \quad (48)$$

для $\gamma < \varphi$

$$\mu = \operatorname{tg}\left(\gamma + \operatorname{arctg} \frac{m(\alpha_\rho p + ka) - 0,5\alpha_\rho^2(\alpha_\rho p + 0,1k)\left(\frac{\rho}{\rho + 50}\right)}{\alpha_\rho p + ka - (\alpha_\rho p + 0,1k)\left(\frac{\rho}{\rho + 50}\right)}\right). \quad (49)$$

Пример. Определить коэффициент трения по передней поверхности лезвия при фрезеровании сосны. Условия фрезерования: толщина срезаемого слоя $a = 0,1 \dots 0,4$ мм, скорость главного движения $V = 19$ м/с, глубина фрезерования $t = 4$ мм, $\delta = 60^\circ$,

$\rho = 10 \dots 40$ мкм, скорость подачи $V_s = 12$ м/мин, диаметр фрезы $D = 120$ мм, число зубьев $Z = 2$, частота вращения $n = 3000$ мин⁻¹.

Для указанных условий единичная касательная сила резания на зубе фрезы, рассчитанная по методу А.Л. Бершадского, равна, Н/мм:

$$F_{x \text{ зуб } 1} = \alpha_\rho \rho + ka = 1,94 \alpha_\rho + 13,27a.$$

Результаты расчета значений коэффициента трения приведены в табл. 5 и на рис. 36. Из расчетов следует, что с увеличением толщины срезаемого слоя коэффициент трения μ , как и переходный множитель m , убывает. По мере затупления лезвия значение μ сначала увеличивается, а затем убывает для всех значений срезаемых слоев. При этом коэффициент трения изменяется в диапазоне 0,21 ... 0,68.

Таблица 5

Расчетные значения коэффициента трения срезаемого слоя по передней поверхности лезвия

ρ , мкм	Коэффициенты трения при толщине срезаемого слоя a , мм			
	0,1	0,2	0,3	0,4

5	0,346/0,32	0,31/0,29	0,28/0,26	0,27/0,26
20	0,68/0,66	0,51/0,50	0,46/0,46	0,42/0,42
30	0,59/0,58	0,42/0,41	0,39/0,39	0,40/0,40
40	0,32/0,32	0,21/0,21	0,22/0,22	0,25/0,25

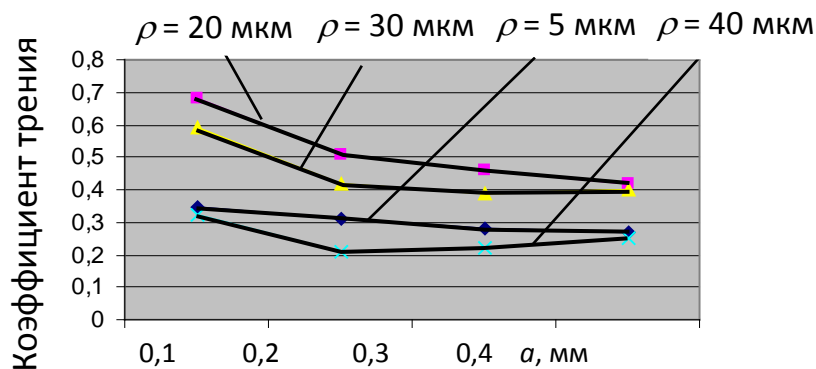


Рис. 36. Зависимость коэффициента трения от толщины срезаемого слоя

Примечание: в знаменателе – расчетные значения по методу А.Л. Бершадского

Зависимость коэффициента трения от толщины срезаемого слоя и переднего угла лезвия. При анализе сил резания на лезвии установлено, что

$$F_{z1} = \frac{F_{xz1}}{f} - F_{xn1} \operatorname{tg}(\gamma - \varphi),$$

$$\text{где } F_{xz1} = (\alpha_{\rho} p + 0,1k) \left(\frac{\rho}{\rho + 50} \right), \quad f = \frac{2}{\alpha_{\rho}^2},$$

$$F_{xn1} = 0,1k_{\mu} + (a - 0,1)k; \quad k_{\mu} = \frac{500(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{\rho + 50}.$$

После подстановки получаем

$$F_{z1} = \frac{(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{\rho + 50} [0,5\rho\alpha_{\rho}^2 - 50\text{tg}(\gamma - \varphi)] - (a - 0,1)k\text{tg}(\gamma - \varphi). \quad (50)$$

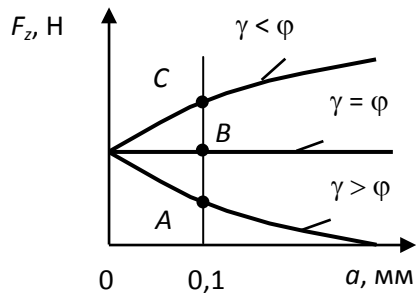


Рис. 37. Зависимость радиальной силы резания от толщины срезаемого слоя

Графически это уравнение изображено на рис. 37.

При толщине срезаемого слоя $a = 0,1$ мм радиальная сила равна:

при $\gamma = \varphi$

$$F_{z1\gamma=\varphi} = \frac{(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{\rho + 50} 0,5\rho\alpha_{\rho}^2;$$

при $\gamma > \varphi$

$$F_{z1\gamma>\varphi} = \frac{(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{\rho + 50} [0,5\rho\alpha_{\rho}^2 - 50\text{tg}(\gamma - \varphi)];$$

при $\gamma < \varphi$

$$F_{z1\gamma<\varphi} = \frac{(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{\rho + 50} [0,5\rho\alpha_{\rho}^2 + 50\text{tg}(\gamma - \varphi)].$$

Если экспериментально определить значение F_{z1} , то угол трения можно определить из следующего выражения:

$$\varphi = \gamma + \text{arctg}\left(\frac{F_{z1\gamma>\varphi} - 0,5\rho\alpha_{\rho}^2(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{50(\rho + 50)}\right).$$

5.13. Формулы для расчета режимов резания

Ниже приведены основные формулы общего закона резания древесины, предлагаемые для расчета режимов резания.

1. Единичная касательная сила резания, Н/мм:

при $a \geq 0,1$ мм $F_{x1} = \alpha_{\rho} p + ka$;

при $a \leq 0,1$ мм $F_{x\mu 1} = (\alpha_{\rho} p + 0,1k) \left(-\frac{1}{\lambda} a^2 + \frac{0,2}{\lambda} a + 1 - \frac{0,01}{\lambda} \right)$,

где λ – коэффициент: $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$; радиус закругления режущей кромки ρ имеет размерность в миллиметрах.

Приближенно $F_{x\mu 1} = F_{xz} + k_{\mu} a_{\mu}$ или

$$F_{x1\mu} = \frac{(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{\rho_o + \Delta_{\rho} + 50} (\rho_o + \Delta_{\rho} + 500a_{\mu}),$$

$$k_{\mu} = \frac{500(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{\rho_o + \Delta_{\rho} + 50}.$$

2. Коэффициент затупления

$$\alpha_{\rho} = 1 + \frac{(1 + 0,1\frac{k}{p})\Delta_{\rho}}{\rho_o + 50},$$

где ρ_o и Δ_{ρ} – в микрометрах.

3. Удельная сила резания, МПа:

при $a \geq 0,1$ мм $F_{уд} = k + \frac{\alpha_{\rho} p}{a}$;

при $a \leq 0,1$ мм $F_{уд\mu} = \frac{(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{\rho_o + \Delta_{\rho} + 50} \left(500 + \frac{\rho_o + \Delta_{\rho}}{a_{\mu}} \right)$,

где при $\Delta\rho = 0$ $\alpha_\rho = 1$.

4. Сила резания по задней поверхности лезвия, Н/мм:

$$F_{\text{хзт}} = (\alpha_\rho p + 0,1k) \left(\frac{\rho_o + \Delta\rho}{\rho_o + \Delta\rho + 50} \right),$$

где ρ_o и $\Delta\rho$ – в микрометрах.

5. Сила резания по передней поверхности лезвия, Н/мм:

$$F_{\text{хп1}} = F_{\text{х1}} - F_{\text{хз1}} = \frac{50(\alpha_\rho p + ka) + k\rho(a - 0,1)}{\rho + 50}.$$

6. Влияние различных факторов на силы резания

6.1. Факторы процесса резания древесины

В процессе резания древесины участвуют три объекта: заготовка, режущий инструмент и станок.

Существенные признаки древесины оцениваются такими факторами, как порода, влажность, физико-механические свойства (плотность, прочность, упругость, пластичность и др.), температура.

Факторы, характеризующие режущий инструмент, – угол заточки, число рабочих зубьев, острота режущих кромок, физико-механические свойства материала зубьев (прочность, твердость, упругость, износостойчивость и др.), шероховатость поверхностей лезвий, длина режущих кромок и др.

Факторы, характеризующие процесс резания на станке, – ширина и толщина срезаемого слоя, угол резания и задний угол лезвий, угол встречи (наклона, скоса) с волокнами древесины, скорости главного движения и движения подачи, трение по передним и задним поверхностям лезвий, силы резания и др.

6.2. Влияние скорости резания

Экспериментально доказано, что для снижения потребляемой мощности на резание скорость главного движения следует принимать 40 ... 50 м/с при цилиндрическом продольном фрезеровании и 50 ... 80 м/с при продольном пилении круглыми пилами. Для других видов механической обработки древесины зна-

чение скорости главного движения V приведено в табл. 6 [11].
Здесь же показано время работы режущего инструмента T между двумя переточками.

Таблица 6

Скорость главного движения и период стойкости
режущих инструментов

Режущие инструменты	V , м/с	T , ч
Пилы:		
рамные (ГОСТ 5524-75)	5 ... 8	4
круглые стальные (ГОСТ 980-80)	40...80	4
дисковые с пластинками твердого сплава (ГОСТ 9769-79)	50	30
ленточные столярные – тип 1 (ГОСТ6532-77)	25...40	4
ленточные делительные – тип 2 (ГОСТ6532-77)	35...40	4
ленточные для распиловки бревен и брусьев (ГОСТ 10670-77)	40	4

Ножи:		
плоские фрезерные типов 1 и 2 (ГОСТ 6567-75)	25...55	8
плоские фрезерные с пластинками твердого сплава (ГОСТ 14956-79)	40...55	40
Фрезы:		
насадные стальные (ГОСТ 11290-80)	20...60	8
насадные с пластинками твердого сплава (ГОСТ 11291-81)	20...60	40
концевые (ГОСТ 8994-80)	7,5	4
Сверла (ГОСТ 22057-76, 22053-76)	7,5	4
Фрезерные цепочки (ГОСТ 22459-77)	1,5	4

6.3. Влияние угла резания

Угол резания определяет положение передней грани лезвия относительно плоскости резания. При внедрении лезвия в древесину передняя грань производит сжатие волокон, сдвиг или изгиб стружки при ее образовании.

Чем больше угол резания, тем сильнее деформируется материал перед лезвием и больше сила резания. Чем больше угол резания, тем сильнее тонкая стружка закручивается в спираль. На это затрачивается дополнительная работа.

Нормальная сила резания F_{z1} с ростом угла резания увеличивается в сторону отжима.

6.4. Влияние заднего угла

При работе лезвие деформирует поверхность резания своей задней гранью. Задняя грань воспринимает нормальные и касательные нагрузки. Нормальные нагрузки возникают в результате упругого деформирования нижележащих слоев древесины, а касательные являются следствием трения между задней гранью лезвия и поверхностью резания. Указанные давления создают касательную силу резания по задней грани и нормальную силу.

С увеличением заднего угла при постоянном угле резания удельная сила резания убывает, так как при этом уменьшаются площадь контакта задней грани с древесиной, нормальное давление на заднюю грань и силы трения. Минимальное значение удельная сила резания имеет при $\alpha = 10^\circ \dots 15^\circ$. При дальнейшем увеличении заднего угла теряется жесткость лезвия, его тело ослабляется, режущая кромка выкрашивается, быстро затупляется, возможен даже аварийный износ лезвия. В этом случае силы резания по задней грани из-за износа лезвия возрастают.

Нормальная сила резания с увеличением заднего угла убывает и стремится к затягиванию.

6.5. Влияние углов перерезания волокон, наклона и ско- са

Для расчета единичной касательной силы резания при обработке древесины сосны по методике А.Л. Бершадского получены следующие выражения:

$$\begin{aligned} \rho_{//-\perp} &= 1,57 + 0,0359 \varphi_b; \\ \rho_{\#-\perp} &= 0,98 + 0,0420 \varphi_n; \end{aligned} \quad (51)$$

$$\rho_{\#-//} = 1,57 - 0,0065 \varphi_c.$$

$$k_{//-\perp} = (0,196 + 0,0039 \varphi_b) \delta + (0,069 + 0,0014 \varphi_b) V' - (5,4 + 0,158 \varphi_b); \quad (52)$$

$$k_{\#-1} = (0,029 + 0,0058\varphi_n)\delta + (0,069^* + 0,0014\varphi_n)V' - (5,9 + 0,152\varphi_n);$$

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

где $\varphi_{в}, \varphi_n, \varphi_c$ – соответственно углы встречи с волокнами древесины, наклона и скоса, град.;

B – коэффициент: значение $B = 0,059$ при $\delta \leq 55^\circ$ и $B = 0,069$ 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.

Примечание. В формулах (52) значение $0,069^*$ принять $0,059$ при $\delta \leq 55^\circ$ и $0,069$ при $\delta > 55^\circ$.

6.6. Влияние породы

Древесина разных пород имеет неодинаковые физико-механические свойства. Различная плотность, прочность на рас-

тяжение, сжатие и скалывание делают процесс резания многообразным. При расчете сил резания порода древесины учитывается коэффициентами на породу a_p , значения которых приводятся в относительных единицах, при этом коэффициент на породу древесины сосны принят равным единице. Поправочные коэффициенты на породу древесины a_p имеют следующие значения:

Порода	Липа	Осина	Ель	Сосна	Ольха
a_p	0,8	0,85	0,95	1,0	1,05
Порода	Лиственница	Береза	Бук	Дуб	Ясень
a_p	1,1	1,25	1,4	1,55	1,75

6.7. Влияние влажности

В механической технологии используют древесину с влажностью 5...100%. С увеличением влажности до предела гигроскопичности ($W = 30\%$) прочность древесины убывает. Сопротивление резанию тоже убывает.

При повышении влажности выше предела гигроскопичности прочность древесины остается неизменной, однако в древесине появляется свободная влага, которая при взаимодействии с лезвием выступает в роли смазки. При этом уменьшаются силы трения на лезвии и общее сопротивление резанию.

Учет влияния влажности на касательную силу резания осуществляют поправочными коэффициентами a_w , значения которых приведены ниже

Влажность	5...8	10...15	20...30	50...60	Более 70
a_w	1,1	1	0,93	0,89	0,87

6.8. Влияние температуры

На рис. 38 показана зависимость единичной силы резания от температуры древесины сосны при угле резания 45° и угле заост-

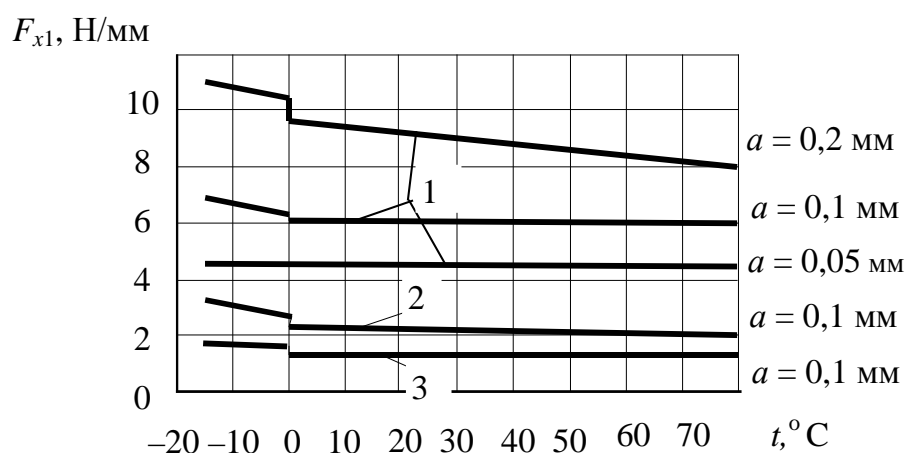


Рис. 38. Влияние температуры на касательную силу

резания влажной ($W = 80\%$) сосны:

1 – резание торцовое; 2 – продольное; 3 – поперечное
резания 35° .

В зимнее время на первичную станочную обработку часто поступает мерзлая древесина. Прочность такой древесины выше, чем незамороженной, так как влага в клетках затвердевает при

замораживании и сообщает древесине дополнительную прочность. Максимальная прочность мерзлой древесины наблюдается при ее влажности примерно 85%.

Из графиков видно, что при температуре древесины 0°C, когда влага в клетках, превращаясь в лед, повышает прочность древесины и увеличивает сопротивление продвижению лезвия, касательная сила резания скачкообразно увеличивается.

Дальнейшее понижение температуры вызывает заметное увеличение касательной силы резания. При нагревании древесины (особенно влажной) прочность ее понижается и силы резания уменьшаются.

Увеличение касательной силы резания при обработке мерзлой древесины учитывают коэффициентом влажности, который имеет максимальное значение при $W > 70\%$: $\alpha_w = 1,5$.

6.9. Влияние размеров среза

Размеры срезаемого слоя относятся к важнейшим параметрам процесса резания. От ширины и толщины среза зависит производительность деревообрабатывающего оборудования, мощность механизмов главного движения и подачи. Толщина срезаемого слоя к тому же определяет форму стружкообразования и влияет на качество обработанной поверхности.

Проведенными исследованиями доказано, что, несмотря на неоднородность строения древесины, можно считать силы резания прямо пропорциональными ширине срезаемого слоя. С учетом ширины среза b формулы для касательных сил резания будут иметь следующий вид:

$$\text{при } a \geq 0,1 \text{ мм} \quad F_x = (\alpha_\rho p + ka)b; \quad (53)$$

$$\text{при } a \leq 0,1 \text{ мм} \quad F_{x\mu} = (\alpha_\rho p + 0,1k) \left(-\frac{1}{\lambda} a^2 + \frac{0,2}{\lambda} a + 1 - \frac{0,01}{\lambda} \right) b,$$

где λ – коэффициент: $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$; $\rho = \rho_o + \Delta_\rho$.

Значение радиуса закругления режущей кромки под-

ставляется в мм; при $\rho_o = 5 \text{ мкм} = 0,005 \text{ мм}$ $\lambda = 0,011025$;
для пил с $\rho_o = 0,01 \text{ мм}$ $\lambda = 0,0121$.

Приближенно

$$F_{x\mu} = \frac{(\alpha_\rho p + 0,1k)}{\rho_o + \Delta_\rho + 50} (\rho_o + \Delta_\rho + 500a_\mu) b.$$

Зависимость нормальной (радиальной) силы резания от размеров сечения срезаемого слоя для макростружек можно описать формулой, Н

$$F_{z1} = \frac{(\alpha_\rho p + 0,1k)}{\rho + 50} [0,5\rho\alpha_\rho^2 - 50\text{tg}(\gamma - \varphi)] - (a - 0,1)k\text{tg}(\gamma - \varphi), \quad (54)$$

где ρ_o и Δ_ρ – в мкм.

Выводы. Расчетные формулы с учетом влияния породы и влажности можно записать в следующем виде.

Главная составляющая силы резания (касательная сила резания)

– для макрослоев

$$F_x = (\alpha_\rho p + ka) b a_\pi a_w, \quad (55)$$

– для микрослоев

$$F_{x\mu} = (\alpha_\rho p + 0,1k) \left(-\frac{1}{\lambda} a^2 + \frac{0,2}{\lambda} a + 1 - \frac{0,01}{\lambda} \right) b a_\pi a_w \quad (56)$$

или приближенно

$$F_{x\mu} = \frac{(\alpha_\rho p + 0,1k)}{\rho_o + \Delta_\rho + 50} (\rho_o + \Delta_\rho + 500a_\mu) b a_\pi a_w.$$

Нормальная (радиальная) составляющая силы резания

– для макрослоев

$$F_z = \left[\frac{(\alpha_\rho p + 0,1k)}{\rho + 50} [0,5\rho\alpha_\rho^2 - 50\text{tg}(\gamma - \varphi)] - (a - 0,1)k\text{tg}(\gamma - \varphi) \right] b a_n a_w, \quad (57)$$

– для микрослоев

$$F_z = 0,5\alpha_\rho^2 (\alpha_\rho p + 0,1k) \left(\frac{\rho}{\rho + 50} \right) b a_n a_w. \quad (58)$$

В этих формулах p, k – соответственно фиктивная сила резания, Н/мм, и касательное давление стружки на переднюю грань лезвия, МПа, для древесины сосны с влажностью 10...15 %; a_n, a_w – поправочные коэффициенты на породу и влажность.

7. Режимы резания

7.1. Понятие о режиме резания

Режимом резания называется совокупность числовых значений параметров процесса резания, относящихся к древесине, режущему инструменту и станку, от которых зависят технико-экономические показатели.

Совокупность параметров процесса резания дает множество режимов. Изменение численного значения хотя бы одного из параметров делает режим резания другим. Таким образом, для обработки деталей с заданной формой, размерами и гладко-

стью можно подобрать много разнообразных режимов резания. Все они обеспечат обработку деталей. Но для производства важно не просто обработать детали, а обработать их с наименьшими затратами материалов, электроэнергии, труда.

Режимы резания называются рациональными, если численные значения их параметров позволяют получить высокие технико-экономические показатели.

Режимные параметры взаимосвязаны, и поэтому нельзя произвольно изменять значения одних без соответствующего корректирования значений других параметров. При выборе режимов резания производят тщательное согласование всех параметров с учетом возможности их реализации на станке.

7.2. Типы задач

При расчете режимов резания различают два типа задач: прямые и обратные.

Задача называется прямой, если при ее решении по заданной скорости подачи и другим параметрам процесса резания находятся силы и мощность резания.

Задача называется обратной, если при ее решении по заданной мощности механизма главного движения и другим параметрам процесса резания находится скорость подачи.

7.3. Оптимальные режимы резания

В каждом режиме резания можно выделить один или несколько главных параметров, которые могут выступать как параметры оптимизации, которым стараются придать экстремальные или предельные значения. Таким параметром может быть, например,

скорость подачи, которой стремятся обеспечить максимальное значение.

Другие главные параметры - шероховатость обработанной поверхности, мощность электродвигателя механизма главного движения и др. – рассматривают как ограничивающие параметры, или ограничения критериев качества.

Критерии качества служат показателями совершенства, прогрессивности режима резания. Они позволяют выбрать наилучший вариант режима резания из альтернативных. **За критерий качества можно принять любой параметр процесса резания, по которому можно судить о достоинствах режима резания. К критериям предъявляется лишь одно требование: монотонная связь с качеством. Это значит, чем меньше (больше) критерий, тем лучше.** Например, чем больше производительность, меньше энергоемкость процесса, меньше шероховатость и себестоимость, тем лучше режим резания.

Если задан всего один критерий, то естественно считать наилучшим такой набор параметров режима резания, при котором критерий будет оптимален (наибольший или наименьший). Такая задача решается просто. Однако один критерий не дает полного представления о режиме резания, о его возможностях. Более полную информацию можно получить при решении многокритериальной задачи. При нескольких критериях обычно не существует такого набора параметров, который одновременно оптимизировал бы все критерии, однако путем компромисса лучший набор выбрать можно. Для этого нужно назначить ограничения критериев, которые записывают в следующем виде:

$$a \leq \Phi_1, \quad P \leq \Phi_2, \quad \Pi \leq \Phi_3, \quad R_m \leq \Phi_4, \quad (59)$$

где a – толщина срезаемого слоя;

P – мощность механизма резания;

Π – производительность;

R_m – шероховатость обработанной поверхности;

$\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ – ограничение критериев.

Каждое критериальное ограничение назначается по условию – это худшее значение критерия, на которое согласен расчетчик. Наилучшим набором параметров процесса резания будем считать тот набор, для которого все критерии одновременно принимали бы наименьшие значения в пределах их ограничений.

Оптимальным является тот вариант режима резания, при котором рассчитанные или выбранные значения режимных параметров удовлетворяют следующим условиям:

- а) практически могут быть реализованы на деревообрабатывающих станках;**
- б) удовлетворяют требованиям всех критериальных ограничений;**
- в) наиболее полно позволяют достичь максимальных или минимальных значений оптимизируемых параметров.**

Часть II

Метод расчета режимов резания

8. Пиление

8.1. Уширение пропила

Ширина пропила всегда должна быть больше толщины полотна пилы. Если это условие не соблюдается, то стенки пропила зажимают пилу.

Уширение пропила достигают путем развода или плющения зубьев, иногда применяют пилы с боковым поднутрением или пилы оснащают пластинками из твердых сплавов, зубья которых выполняют с боковым поднутрением (рис. 39). При разводе кончики зубьев отгибают поочередно в разные стороны. При плющении кончики зубьев расплющивают и формируют, придавая

им форму лопаточек, расположенных симметрично относительно корпуса пилы.

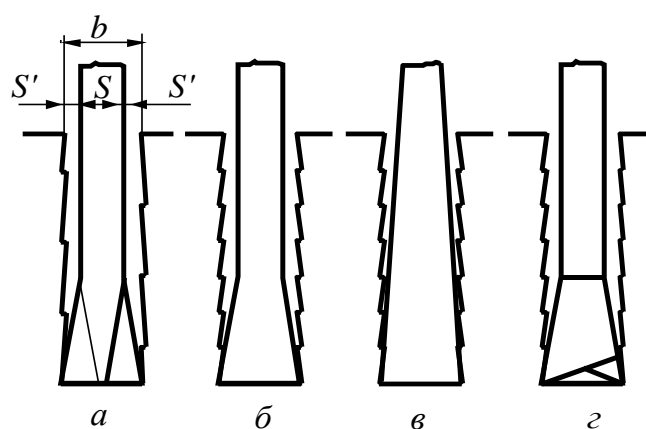


Рис. 39. Способы уширения пропила:

а – развод зубьев; *б* – плющение зубьев; *в* – пила с боковым поднутрением; *г* – напайка пластинки с косой заточкой

Таким образом, во всех случаях уширения толщина зубчатого

венца больше толщины полотна пилы. Ширина пропила в этом случае находится следующим образом:

$$b = S + 2S' , \quad (60)$$

где b – ширина пропила, мм;

S – толщина полотна пилы, мм;

S' – уширение зубьев на каждую сторону, мм.

Значения S' рекомендуется брать по справочным таблицам в диапазоне 0,2...1,1 мм. Его величина зависит от породы древесины, влажности и условий работы.

Для строгальной пилы толщина зубчатого венца задана в технической характеристике.

8.2. Удаление стружки из пропила

Срезаемая зубом пилы стружка скользит по его передней грани и попадает в междузубную впадину. При этом стружка попадает в пропил, ширина которого несколько меньше толщины зубчатой кромки. Стружка сжимается с боков, трется о стенки

пропила и под действием сил трения дополнительно уплотняется в междузубной впадине. Во впадине стружка изгибается, ломается. Вновь поступающая стружка скользит уже не только по передней грани, но и по ранее попавшей уплотненной стружке.

Чем больше путь зуба в древесине, тем больше накапливается стружек во впадине, тем сильнее она спрессовывается и трется о стенки пропила.

Таким образом, по сравнению с открытым резанием при пилении необходимо преодолеть дополнительное сопротивление, возникающее от прессования стружек во впадине зубьев и от трения их в пропилах. На входе зуба в древесину это сопротивление равно нулю, а на выходе достигает максимального значения. Это сопротивление называют удельным сопротивлением трения в пропилах:

$$K_{mp} = \frac{\alpha t}{b}, \quad (61)$$

где α – касательное давление стружки на переднюю грань зуба от трения стружки в пропилах (α_λ – для разведенных зубьев; α_Δ – для плющенных зубьев), МПа;

t – высота пропила, мм;

b – ширина пропила, мм.

Значения α_λ и α_Δ для различных пил приведены в табл. 7.

Таблица 7

Касательное давление на зуб пилы от трения стружки в пропилах

α , МПа	Рамные пилы	Ленточные пилы	Дисковые пилы
α_λ	0,25	0,25	0,70...0,74
α_Δ	0,2	0,2	0,57...0,59

8.3. Производительность пилы по вместимости впадин

При работе пила перемещается в пропилах. Зубья пилы срезают стружку (опилки), которая попадает в междузубные впадины пилы и выносятся из пропила. Чем больше высота пропила, тем больше опилок накапливается в междузубных впадинах и в них упрессовывается. После выхода из пропила опилки под действием центробежных сил выбрасываются из междузубных впадин.

Таким образом, производительность пилы ограничена шагом зубьев и высотой пропила. Подачу на зуб в этом случае определяют по формуле

$$S_z = \theta t_3^2 / (t \sigma), \quad (62)$$

где S_z – подача на зуб пилы, мм;

t_3 – шаг зубьев пилы, мм;

t – высота пропила, мм;

θ – коэффициент площади впадины (формы зуба), равный отношению площади впадины к площади квадрата со сторонами, равными шагу зубьев t_3 : $\theta = 0,12 \dots 0,6$;

σ – коэффициент уплотнения опилок (напряженности впадины): $\sigma = 0,8 \dots 1,5$ для рамных пил, $\sigma = 1,5 \dots 2,5$ для ленточных и $\sigma = 2 \dots 3$ для дисковых пил.

Подставляя в (62) средние значения коэффициентов θ и σ , получим следующие формулы для расчета подачи на зуб по заполнению впадин опилками:

при пилении рамными пилами

$$S_{zo} = t_3^2 / (2t_{\max}); \quad (63)$$

при пилении ленточными пилами

$$S_{zo} = t_3^2 / [(5 \dots 6)t_{\max}]; \quad (64)$$

при пилении дисковыми пилами

$$S_{zo} = t_3^2 / [(4 \dots 5)t_{\max}], \quad (65)$$

где t_{\max} – максимальная высота пропила, мм.

8.4. Толщина срезаемого слоя при работе плющеными и разведенными зубьями

Плющенные и разведенные зубья при пилении срезают слои одинаковой площади, но разной формы. Средняя толщина срезаемого слоя получается следующей, мм:

для разведенных зубьев

$$a_{\lambda} = S_z \frac{b}{b_{л}} \sin \mu ; \quad (66)$$

для плющенных зубьев

$$a_{\Delta} = S_z \sin \mu , \quad (67)$$

где μ – угол подачи.

9. Пиление ленточными пилами

9.1. Общие сведения

Пиление на станках осуществляется бесконечной пильной лентой, надетой на шкивы. Ленточнопильные станки бывают вертикальные столярные с диаметром шкивов 400...1000 мм, делительные с диаметром шкивов 1000...1400 мм, бревнопильные с диаметром шкивов 1100 ... 3000 мм и горизонтальные.

Столярные станки предназначены для криволинейного распиливания заготовок по карандашной линии или по шаблонам, накальваемым на заготовку острыми шипами.

Делительные станки предназначены для ребрового деления горбылей и досок. Станки имеют механизированную подачу вертикальными вальцами или конвейерно-гусеничным механизмом подачи.

Бревнопильные станки предназначены для массового индивидуального раскроя бревен. Распиливаемое бревно базируется и фиксируется на подающей тележке, установленной на рельсовом пути и снабженной приводом.

Горизонтальные ленточнопильные станки применяют для индивидуального раскроя бревен или для деления широких горбылей. Подача механизирована.

Горизонтальный ленточнопильный бревнопильный станок отличается легкой и низкой станиной, на которую кладется неподвижно бревно, а пильный узел перемещается вдоль бревна. Пильный узел сделан легким с диаметром шкивов около 500 мм. Пильная лента узкая (около 35 – 50 мм).

При неподвижном бревне габариты станка сократились вдвое. Общее облегчение конструкции станка позволило снизить цену станка.

Режим резания ленточнопильного станка должен предусматривать скорость главного движения 30...40 м/с, толщину пильной ленты $s \leq 0,001D$, где D – диаметры пильных шкивов, напряжение в натянутой ленте – не менее 110...120 МПа, цикл работы пильной ленты – 2 ч. За 2 ч работы в междузубных пазухах пилы образуются микротрещины, которые надо удалить шлифовальным кругом при последующей заточке.

Отечественная промышленность выпускает станки моделей ЛД125-1 и ЛД150-1Э, ЛД100-1, ЛД100-3, ЛД-5 и др.

Технические параметры ленточнопильных станков приведены в табл. 8.

На рис. 40, а, б приведена схема пиления на вертикальном ленточнопильном станке. Станок включает нижний привод-

ной шкив 1, верхний натяжной шкив 2, бесконечную пильную ленту 3 и стол 4. Распиливаемая заготовка базируется на столе и надвигается на пилу вручную или механизмом подачи.

На рис. 40 в, г показаны принципиальные кинематические схемы пиления соответственно на горизонтальном и вертикальном станках.

Современные ленточнопильные станки обеспечивают получение пилопродукции высокого качества. Кроме того, ширина пропила на них составляет 1,2 ... 2,6 мм, что сокращает объем опилок и повышает полезный выход готовой продукции.

Таблица 8

Технические характеристики ленточнопильных станков

Параметр	ЛГУ1000-М	ЛГУ750	ЛБ125-1	ЛБ150-1	ЛД125-1
Диаметр пильных шкивов, мм	1000	740	1250	1500	1250
Диаметр распиливаемых бревен, см	10...90	10...60	60	90	60
Скорость резания, м/с	40	35	40	45	40
Скорость подачи, м/мин	0...45	0...50	5...90	5...90	5...40
Размеры ленточной пилы, мм: ширина	80...135	32...50	175	230	175
толщина	0,9...1,2				
Мощность привода пильных шкивов, кВт	22,0	15	55	75	30

Установленная мощность, кВт	30,7	20	-	-	-
Габаритные размеры, мм	11000×	10000×	-	-	5000×
	×3000×	×2360×	-	-	×2800×
	×2320	×2360	-	-	×3740

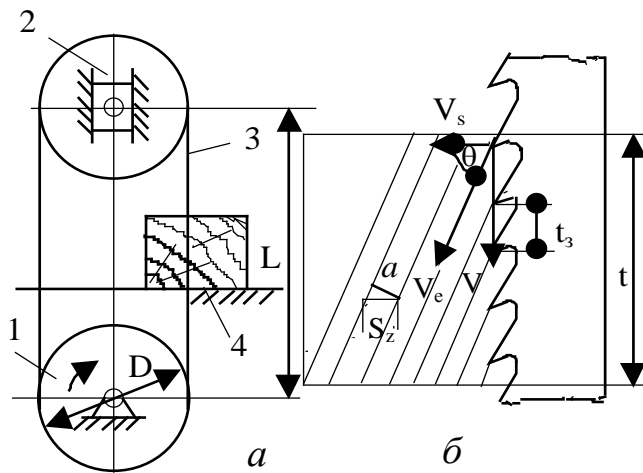


Рис. 40. Пиление ленточной пилой:

a – схема ленточно-пильного станка;

б – геометрия срезаемого слоя;

в, г – принципиальные кинематические схемы пиления соответственно на вертикальном и горизонтальном станках

6.2. Режущий инструмент

Основные параметры ленточных пил столярных и делительных по ГОСТ 6532-77 и пил для распиловки бревен и брусьев по ГОСТ 10670-77 приведены в табл. 9 и 10.

Таблица 9

Размеры ленточных пил, мм (ГОСТ 6532-77)

Обозначение пил	Длина (в рулоне)	B	S	t_3	h	r	γ	β
							град.	
Пилы столярные								
3405-0021	4000	10	0,6	6	2,0...3,0	1,5	5	5
-0022		15					5	
-0023		20	0,7	8	4,2...4,4		5	
-0024	6000	30	0,8	10	4,8...5,0	2,5	55	550
-0025		40						
-0026		50	0,9	12	6,3...6,5			
3405-0027		60						
Пилы делительные								
3405-0028	7000	85	1,0	30	10	3	20	50
-0029		100						
-0031	8500	125	1,2	50	13	4	30	45
-0032			1,0					
-0033			1,2					
-0034			30	10	3	20	50	
-0035								

-0036		150	1,4	50	13	4	30	45
-0037			1,2					
-0038			1,4					
-0039	9000	175	1,2	30	10	3	20	50
-0041			1,4					
-0042			1,2					
3405-0043			1,4					

Материал пил – холоднокатаная лента из стали марки 9ХФ по ГОСТ 5950-73.

Твердость пил толщиной до 1 мм – 70...74 HRA, толщиной более 1 мм – 40...44 HRCэ.

Для предотвращения зажима полотна пилы в пропиле ее зубья разводят или плющат. Уширение зубьев на сторону – величина переменная и зависит от породы, гидротермического состояния древесины, высоты пропила. Рекомендуемая величина уширения вершин зубьев на сторону указана в табл. 11, 12.

Таблица 10

Размеры ленточных пил для распиловки бревен и брусьев, мм (ГОСТ 10670-77)

Обозначение пил	Длина (в рулоне)	B	S	t	h	l	Предельное отклонение ± 0,5	
							r	r ₁
3405-0001	10800	230	1,4	50	16,7	15	20,8	5,8
-0002			1,6					
-0003	11700		1,4	60	20,0	18	25,0	7,0
3405-0004			1,6					

Таблица 11

Величина уширения зубьев ленточных пил на сторону S' , мм,
при распиловке древесины хвойных пород

Пилы ленточные	Высота пропила, мм	Хвойные породы
по ГОСТ 6532-77 (тип 2 и 3)	До 250	(0,45...0,55)/(0,40...0,45)
	250...500	(0,50...0,60)/(0,40...0,50)
	Свыше 500	(0,55...0,70)/(0,45...0,60)
по ГОСТ 10670-77	До 250	(0,55...0,70)/(0,45...0,65)
	250...500	(0,65...0,75)/(0,45...0,65)
	Свыше 500	(0,75...0,95)/(0,65...0,80)

Таблица 12

Величина уширения зубьев ленточных пил на сторону S' , мм,
при распиловке лиственной древесины и лиственницы

Пилы ленточные	Для твердых лиственных пород	Для древесины лиственницы
По ГОСТ 6532-77 (тип 2 и 3)	(0,40...0,45)/(0,30...0,40)	0,45...0,55
	(0,40...0,50)/(0,35...0,45)	0,55...0,75
	(0,45...0,60)/(0,40...0,55)	0,70...0,90
По ГОСТ 10670-77	(0,55...0,65)/(0,50...0,60)	0,50...0,60
	(0,60...0,70)/(0,55...0,65)	0,60...0,80

	(0,65...0,80)/(0,60...0,70)	0,80...1,00
--	-----------------------------	-------------

В числителе табл. 11 и 12 приведены данные для свежесрубленной древесины влажностью свыше 30%, в знаменателе – для сухой и мерзлой. Величина уширения зубьев для распиловки лиственницы дана для случая охлаждения пилы водовоздушной смесью. При отсутствии охлаждения уширение увеличивается на 0,1...0,15 мм.

Допуск уширения зубьев на одну сторону для пилы $\pm 0,05$ мм.

Максимальная длина пилы, установленной на станок, мм:

$$L_m = \pi D + 2L, \quad (68)$$

где D – диаметр шкивов, мм;

L – максимальное расстояние между центрами шкивов, мм.

Толщина полотна пилы S , мм:

$$S = (0,001 \dots 0,0007)D. \quad (69)$$

Ширина делительных пил равна ширине шкива плюс высота зубьев [12]. Ширина столярных пил

$$B = 2,8\sqrt{RS'}, \quad (70)$$

где R – наименьший радиус кривизны пропила, мм;

S' – уширение пропила на сторону.

9.3. Геометрия срезаемого слоя

Пиление ленточной пилой основано на принципиальной кинематической схеме, предусматривающей одновременное действие в процессе резания движений главного D_r и подачи D_s (см. рис. 40, в, г). Поскольку пильная лента замкнута, резание происходит непрерывно без холостых ходов. Векторы скоростей главного движения \bar{V} и движения подачи \bar{V}_s по модулю и направлению постоянны (см. рис. 40, б). Поэтому траектории зубьев в древесине прямолинейны. Так как отношение модулей $V_s/V \approx 0,01...0,03$, то прямые линии траекторий почти вертикальны (отклонение от вертикали $1...2^\circ$). В связи с этим толщину срезаемого слоя a принимают равной:

$$a = S_z b / b_n, \quad (71)$$

где S_z – подача на один зуб, мм;

b – ширина пропила, мм;

b_n – длина режущей кромки лезвия, мм. Для разведенных зубьев длина режущей кромки равна толщине полотна пилы, а для плющенных – ширине пропила.

9.4. Кинематика

Скорость главного движения при пилении равна окружной скорости приводного шкива:

$$V = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000}, \quad (72)$$

где V – скорость главного движения, м/с;

D – диаметр приводного шкива, мм;

n – частота вращения приводного шкива, мин⁻¹.

Скорость подачи V_s , м/мин

$$V_s = \frac{S_z Z n}{1000}, \quad (73)$$

где S_z – подача на один зуб, мм;

Z – количество зубьев, размещаемых по окружности шкива;
при шаге зубьев пилы t_3 количество зубьев

$$Z = \pi D / t_3.$$

При пилении вектор скорости результирующего движения резания V_e наклонен к вектору скорости подачи V_s под углом θ (см. рис. 40, б),

$$\operatorname{tg}(90^\circ - \theta) = \frac{V_s}{V} = \frac{60 S_z}{t_3}. \quad (74)$$

Отсюда скорость подачи, м/мин:

$$V_s = 60 V \frac{S_z}{t_3}. \quad (75)$$

Значением подачи на зуб можно задаться, например, по требованию к шероховатости поверхности пропила (табл. 13).

Таблица 13

Значения шероховатости $R_{m \max}$ (по ГОСТ 7016-82), мкм,

при пилении древесины ленточными пилами

Подача на зуб S_z , мм	$R_{m \max}$ для древесины		Подача на зуб S_z , мм	$R_{m \max}$ для древесины	
	хвойной мерзлой и твердых листвен- ных пород	хвойной мокрой, свеже- срубленной		хвойной мерзлой и твердых лиственных пород	хвойной мокрой, свеже- срубленной
0,10	100/–	–	0,80	630/410	500/380
0,15	150/100	100/–	1,0	800/500	670/440
0,20	200/150	150/100	1,2	1000/620	800/500
0,30	250/200	210/100	1,5	1300/800	1000/600
0,40	320/220	270/200	1,8	1450/1000	1200/700
0,60	520/320	340/320	2,0	1600/1200	1400/800

Примечание. В числителе – для разведенных зубьев, в знаменателе – для плющенных.

9.5. Динамика пиления

Фиктивная сила резания для сосны принимается $p = 7,06$ Н/мм. Касательное давление стружки на переднюю грань зуба k , МПа, для сосны находят следующим образом:

$$k = 0,55\delta + 0,196V_1 - 19,6, \quad (76)$$

где при $V < 50$ м/с $V_1 = 90 - V$, иначе $V_1 = V$.

Коэффициент затупления

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_{\rho}}{\rho_o + 50} , \quad (77)$$

где Δ_{ρ} – величина затупления режущих кромок лезвий, мкм, за период стойкости пилы:

$$\Delta_{\rho} = \gamma_{\Delta} \frac{tnTk_n k_u}{1000(1 + 2L / \pi D)} , \quad (78)$$

где γ_{Δ} – величина затупления режущей кромки зуба на 1 м пути в древесине: $\gamma_{\Delta} = 0,001$ мкм/м (при пилении твердых лиственных пород и мерзлой древесины $\gamma_{\Delta} = (0,00130...0,00135)$ мкм/м);

t – высота пропила, мм;

n – частота вращения пильного шкива, мин⁻¹;

T – календарное время работы пилы; $T = 120$ мин;

k_u – коэффициент использования станка во времени;
 $k_u = 0,9 \dots 0,95$;

k_n – коэффициент производительности станка (использования станочного времени); $k_n = 0,8...0,9$;

L – расстояние между шкивами станка, мм;

D – диаметр пильного шкива, мм.

Касательная сила резания одним зубом для макрослоев:

$$F_{x \text{ зуб}} = [\alpha_{\rho} p + (k + \frac{\alpha t}{b}) S_z \frac{b}{b_{л}}] b_{л} a_{п} a_w, \quad (79)$$

где α – давление на зуб пилы от трения опилок в пропиле; для разведенных зубьев $\alpha_{\lambda} = 0,25$ МПа; для плющенных – $\alpha_{\lambda} = 0,2$ МПа.

Из уравнения (79) можно получить значение подачи на зуб, мм:

$$S_z = \frac{(\frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b_{л}} - \alpha_{\rho} p) b_{л}}{k b + \alpha t}. \quad (80)$$

При срезании микрослоев $a < 0,1$ мм с учетом уравнения (31)

$$F_{x \text{ зуб}} = a_n a_w b_{л} [(\alpha_{\rho} p + 0,1k) (-\frac{1}{\lambda} a_m^2 + \frac{0,2}{\lambda} a_m + 1 - \frac{0,01}{\lambda}) + \frac{\alpha t}{b} a],$$

где $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$; $\rho = \rho_0 + \Delta\rho$; ρ – в миллиметрах.

Обозначим $(\alpha\rho p + 0,1k) = d$.

$$\frac{F_{x \text{ зуб}} \lambda}{a_n a_w b_l d \lambda} = -\frac{1}{\lambda} a_m^2 + \frac{0,2}{\lambda} a_m + \frac{\lambda}{\lambda} - \frac{0,01}{\lambda} + \frac{\alpha t \lambda}{bd \lambda} a.$$

Обозначим $\frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b_l d} = m$ и запишем приведенное

квадратное уравнение

$$a_m^2 - (0,2 + \frac{\alpha t \lambda}{bd}) a_m - \lambda + 0,01 + m \lambda = 0.$$

Отсюда

$$a_m = \frac{1}{2} [(0,2 + \frac{\alpha t \lambda}{bd}) - \sqrt{(0,2 + \frac{\alpha t \lambda}{bd})^2 - 4[0,01 + \lambda(m - 1)]}]. \quad (81)$$

При $m = 1$ сила $F_{x \text{ зуб}}$ равна силе резания при толщине срезаемого слоя $a_m = 0,1$ мм. Отсюда следует, если $m \leq 1$, то толщину срезаемого слоя a_m находят по (81), иначе a_m находят по уравнению для макрослоев. Подача на зуб $S_z = a_m \frac{b_l}{b}$.

Для приближенных расчетов

$$F_{x \text{ зуб}} = [(\alpha\rho p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50} + (k_\mu + \frac{\alpha t}{b}) S_z \frac{b}{b_l}] b_l a_{II} a_w,$$

где k_μ – касательное давление микрослоя на переднюю поверхность зуба, МПа;

$$k_\mu = \frac{500(\alpha\rho p + 0,1k)}{\rho + 50}.$$

Отсюда значение подачи на зуб, мм:

$$S_z = \frac{\left(\frac{F_{xzy\delta}}{a_n a_w b_{л}} - \frac{(\alpha_{\rho} p + 0,1k)\rho}{\rho + 50} \right) b_{л}}{k_{\mu} b + \alpha t}. \quad (82)$$

Средние касательная и нормальная силы резания за оборот шкива:

$$F_x = F_{xzy\delta} t / t_3, \quad (83)$$

$$F_z = [0,5\alpha_{\rho}^2 (\alpha_{\rho} p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50} - (S_z - 0,1)(k + \alpha t/b) \operatorname{tg}(90^{\circ} - \delta - \varphi)] b_{л} \frac{t}{t_3}, \quad (84)$$

где b – ширина пропила, мм;

$b_{л}$ – длина лезвия зуба, мм;

t – высота пропила, мм;

t_3 – шаг зубьев, мм.

При $S_z < 0,1$ мм

$$F_z = [0,5\alpha_{\rho}^2 (\alpha_{\rho} p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50}] b_{л} \frac{t}{t_3}. \quad (85)$$

Величиной радиальной силы резания можно приближенно задаться:

$$F_z = \pm m F_x = \pm (0,2 \dots 0,6) F_x. \quad (86)$$

Для острых зубьев (меньшее значение m) и при больших подачах на зуб радиальная сила получается затягивающей (знак–), при небольших подачах на зуб и затупленных режущих кромках радиальная сила становится отжимающей (знак +).

Мощность механизма резания, P , кВт:

$$P = \frac{F_x V}{1000}. \quad (87)$$

При критической касательной силе резания пила начинает вибрировать и теряет устойчивость. Поэтому расчетная F_x должна быть меньше $F_{кр}$. По данным А.Е. Феоктистова (ЦНИИМОД), $F_{кр}$, Н, равна:

$$F_{кр} = 10^6 s^3 (0,82 + 0,002B_1)(0,95 + 0,001\sigma) / L, \quad (88)$$

где B_1 – ширина пилы до линии впадины, мм;

s – толщина полотна пилы, мм;

σ – напряжение натяжения пилы, МПа; для бревнопильных $\sigma = 60 \dots 140$; для делительных $\sigma = 50 \dots 100$; для столярных пил $\sigma = 30 \dots 50$;

L – расстояние между центрами шкивов, мм.

9.6. Точность пиления

В результате погрешностей подготовки, установки, движения пилы и подачи при пилении на пилу всегда действует боковая сила, перпендикулярная плоскости пилы. Она действует на зубья в плоскости наименьшей жесткости пилы и отклоняет ее в бок.

Повышение точности пиления связано прежде всего с уменьшением боковой силы.

По ГОСТ 8486-66 "Пиломатериалы хвойных пород" допускаются следующие отклонения номинальных размеров пиломатериалов по толщине и ширине, мм: $\pm 1,0$ при размере до 32 мм; $\pm 2,0$ - от 40 до 100 мм; $\pm 3,0$ - от 100 и более мм. Для получения пиломатериалов с заданной точностью размеров надо выполнить следующие требования.

1. Передняя грань зубьев после заточки должна быть перпендикулярна плоскости пилы. Допускается отклонение 40 мкм на длине 50 мм (ГОСТ 18209-72).

2. Уширение зубьев на сторону должно выполняться с точностью $\pm 0,05$ мм.

3. Обеспечить точную установку пильных шкивов станка. Для делительных ленточнопильных станков допускается радиальное биение шкивов 0,05 мм, торцовое биение обода шкива 0,06 мм на радиусе 615 мм (ГОСТ 24771-81 "Станки ленточнопильные делительные для продольной распиловки досок и горбылей. Нормы точности"). Для бревнопильных станков допускается радиальное биение шкивов 0,05 мм для шкивов диаметром 1250 мм и торцовое биение обода 0,08 мм на радиусе 500 мм (ГОСТ 25135-82 "Станки ленточнопильные вертикальные для продольной распиловки бревен. Нормы точности").

4. Рабочая ветвь пилы должна быть перпендикулярна к базовой поверхности стола (каретки, конвейера). Допускаемое отклонение от вертикали равно 0,5 мм на 1000 мм (ГОСТ 25135-82).

5. На точность движения пильной ленты оказывает влияние параллельность перемещения рабочей поверхности верхней направляющей пильной ленты. Отклонение от вертикали верхней направляющей в ее крайних положениях не должно превышать 0,10 мм на длине 300 мм (ГОСТ 24771-81 и ГОСТ 25135-82).

6. Большое влияние на точность распиловки оказывает точность подачи распиливаемого материала. Вектор скорости подачи на станке может не совпадать с плоскостью пилы, между ними образуется угол встречи. Допустимая величина этого несовпадения равна 0,1 мм на длине 100 мм (ГОСТ 24771-81). Это относится к точности установки рельсового пути, направляющих конвейера.

7. Для повышения точности пиления надо стремиться к уменьшению радиальной силы резания. Для этого надо работать острыми пилами, а с увеличением высоты пропила скорость подачи уменьшать.

8. Наибольший эффект в повышении жесткости и устойчивости ленточной пилы достигается сокращением свободной длины пилы в направлении ее движения. Это достигается установкой для пилы верхних и нижних направляющих. Величина зазора между пилой и направляющими должна быть 0,10...0,15 мм. Двусторонние направляющие повышают жесткость пилы только в случае, когда ее отклонение превышает величину зазора. При увеличении зазора эффективность направляющих падает.

9. При критическом значении радиальной силы резания $F_{z\text{ кр}}$ величина прогиба полотна пилы в плоскости наибольшей жесткости достигает значения выпуклости задней кромки m , полученного при вальцевании пилы. Радиальная критическая сила, по данным Трухина Э.В.:

$$F_{z\text{ кр}} = 9,72m(39,5EI + \sigma SB L^2) / L^3, \quad (89)$$

где $F_{z\text{ кр}}$ – радиальная критическая сила, Н;

m – стрела выпуклости задней кромки пилы при вальцевании, $m = 0,20...0,35$ мм;

E – модуль продольной упругости, для стали 9ХФ;
 $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа;

S, B – соответственно толщина и ширина по линии впадин пилы, мм;

I – момент инерции, мм^4 ; $I = SB_1^3 / 12$;

σ – напряжение натяжения полотна пилы, МПа;

L – свободная длина пилы, мм.

Таким образом, критическая нормальная сила есть сила, действующая в плоскости наибольшей жесткости полотна пилы, при которой прогиб полотна в этой же плоскости приобретает первоначальную кривизну на задней кромке, полученную в результате вальцевания. Фактическая радиальная сила резания должна быть меньше критической.

Пример. На ленточнопильный станок ЛД125-1 с диаметром пильных шкивов 1250 мм и межосевым расстоянием 1900 мм надета пильная лента толщиной $S = 1$ мм и шириной по линии впадин $B_1 = 100$ мм. При вальцевании пилы была получена стрела выпуклости тыльной кромки $m = 0,2$ мм. Определить критическую нормальную силу.

Решение.

$$F_{zкр} = 9,72 \cdot 0,2 (39,5 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 100^3 / 12 + 50 \cdot 1 \cdot 100 \cdot 1900^2) / 1900^3 = 196 \text{ Н.}$$

9.7. Расчет рациональных скоростей подач

При расчете режимов резания предпочтительнее решать обратную задачу, когда принимают мощность электродвигателя механизма главного движения и определяют значения скоростей подач. Режимы пиления на ленточнопильном станке отличаются прежде всего изменением высоты и ширины пропила, а также породы распиливаемой древесины.

При расчете скоростей подач используют следующие ограничения:

$$S_{z1} = f(R_m); S_{z2} = f(\theta, \sigma); S_{z3} = f(P_{ycm}); S_{z4} = f(F_{xкр}); S_{z5} = f(F_{zкр});$$

$$S_{z6} = f(\omega); V_{s \min} \leq V_{sp} \leq V_{s \max}$$

где R_m - значение шероховатости распиленной поверхности;

θ - коэффициент формы зуба, характеризующий отношение площади впадин к площади квадрата со сторонами, равными шагу зубьев пилы t_3 ;

σ - коэффициент напряженности впадин;

$P_{уст}$ - установленная мощность электродвигателя механизма резания, кВт;

$F_{хкр}$, $F_{зкр}$ - критические значения касательной и радиальной сил резания соответственно, Н;

ω - допустимое рассеяние толщины (разнотолщинность) пиломатериалов в партии, мм;

V_{sp} - расчетное значение скорости подачи, м/мин;

$V_{s \min}$, $V_{s \max}$ - конструктивные скорости подач станка, соответственно минимальная и максимальная (берутся из технической характеристики станка).

Расчет выполняется в следующем порядке.

1. По табл. 8 уточняют параметры заданного станка.
2. По табл. 9, 10 или по ГОСТ 6532-77 и ГОСТ 10670-77 выбирают параметры ленточной пилы.
3. По табл. 11, 12 принимают значение уширения зубьев на сторону и находят ширину пропила: $b = S + 2S'$.
4. Если при работе на станке изменяются высота пропила $t = t_1, t_2, \dots, t_n$, ширина пропила $b = b_1, b_2, \dots, b_n$ и порода древесины, то расчеты выполняются параллельно для каждого значения t , b и породы.
5. Подача на зуб пилы S_{z1} по шероховатости поверхности распила принимается по табл. 13.

6. Рассчитывается подача на зуб по производительности пиления S_{z2} , мм:

$$S_{z2} = \theta t_3^2 / (t\sigma). \quad (90)$$

Здесь θt_3^2 есть площадь междузубной впадины, θ – коэффициент площади впадины (формы зуба); t_3 – шаг зубьев, мм; σ – коэффициент напряженности впадины (его можно найти как отношение площади междузубной впадины к площади срезаемого слоя).

Коэффициент площади впадины для стандартных профилей зубьев имеет следующие значения: для ленточных пил делительных с плющеными зубьями $\theta_\Delta = 0,12...0,15$; для ленточных пил столярных с разведенными зубьями $\theta_\lambda = 0,2$.

Минимально допустимое значение коэффициента напряженности впадины зуба $\sigma = 1,5...2,5$.

При средних значениях коэффициентов θ и σ

$$S_{z2} = t_3^2 / [(5...6)t_{\max}], \quad (91)$$

где t_{\max} – максимальная высота пропила, мм; 5 – для пил с $\delta = 60^\circ$ и $\alpha = 15^\circ$; 6 – для пил с $\delta = 60^\circ$ и $\alpha = 20^\circ$.

7. Рассчитывается подача на зуб по установленной мощности привода механизма главного движения резания.

Касательная сила резания при пилении одним зубом определяется по формуле

$$F_{x \text{ зуб}} = \frac{1000 P \eta t_3}{V t}, \quad (92)$$

где P – установленная мощность электродвигателя механизма главного движения, кВт;

η – КПД механизма привода пильного шкива; $\eta = 0,8 \dots 0,85$;

t_3 – шаг зубьев пилы, мм;

V – скорость резания (принимается равной скорости главного движения), м/с;

t – высота пропила, мм.

Фиктивная сила резания для сосны $p = 7,06$ Н/мм. Касательное давление стружки на переднюю грань зуба k , МПа, находят следующим образом:

$$k = 0,549\delta + 0,196V_1 - 19,6,$$

где при $V < 50$ м/с $V_1 = 90 - V$, иначе $V_1 = V$.

Величина затупления режущих кромок зубьев, мкм,

$$\Delta_\rho = \gamma_\Delta \frac{tnTk_n k_u}{1000(1 + 2L / \pi D)}. \quad (93)$$

Коэффициент затупления

$$\alpha_\rho = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_\rho}{\rho_o + 50},$$

где ρ_o и Δ_ρ – в мкм.

Подача на зуб по мощности привода S_{z3} , мм,

при $S_z \geq 0,1$ мм

$$S_{z3} = \frac{(\frac{F_{xзуб}}{a_n a_w b_L} - \alpha_\rho p) b_L}{(kb + \alpha t)}.$$

Если $\frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b_l (\alpha_\rho p + 0,1k)} \leq 1$, то толщину срезаемого слоя $a_m = S_z$

находят по приведенной ниже формуле для микрослоев, иначе a_m находят по уравнению для макрослоев.

$$a_m = \frac{1}{2} \left[\left(0,2 + \frac{\alpha t \lambda}{bd} \right) - \sqrt{\left(0,2 + \frac{\alpha t \lambda}{bd} \right)^2 - 4[0,01 + \lambda(m-1)]} \right].$$

Для приближенных расчетов при $S_z \leq 0,1$ мм

$$S_z = \frac{\left(\frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b_l} - \frac{(\alpha_\rho p + 0,1k)\rho}{\rho + 50} \right) b_l}{k_\mu b + \alpha t},$$

где b – ширина пропила, мм;

b_l – длина лезвия зуба, мм (для плющенных зубьев $b_l = b$, для разведенных $b_l = S$, где S – толщина полотна пилы);

k_μ – касательное давление микрослоя на переднюю поверхность лезвия, МПа:

$$k_\mu = \frac{500(\alpha_\rho p + 0,1k)}{\rho + 50}.$$

8. Вычисляется подача на зуб по критической касательной силе резания. Значение критической силы резания находится по формуле (88). Допустимая сила резания одним зубом:

$$F_{x \text{ зуб}} = 0,9 F_{kp} t_3 / t.$$

Допустимая подача на зуб по устойчивости пилы от критической касательной силы резания S_{z4} , мм:

$$S_{z4} = \frac{\left(\frac{F_{x\partial \text{зуб}}}{a_n a_w b_l} - \alpha_p p\right) b_l}{(kb + \alpha t)}. \quad (94)$$

9. Вычисляется подача на зуб по критической нормальной силе резания. Нормальная критическая сила резания находится по формуле (89). Допустимая нормальная сила резания при работе одним зубом

$$F_{z\partial \text{зуб}} = 0,9 F_{z\text{кр}} t_3 / t.$$

Допустимая подача на зуб по критической нормальной силе резания S_{z5}

$$S_{z5} = 0,1 + \frac{0,5\alpha_p^2 (\alpha_p p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50} - \frac{F_{z\partial \text{зуб}}}{b_l a_n a_w}}{(k + \alpha t / b) \text{tg}(\gamma - \varphi)}. \quad (95)$$

10. Вычисляется подача на зуб по точности пиления. Подача на зуб S_{z6} , мм, при пиление твердой древесины может быть рассчитана по эмпирической формуле

$$S_{z6} = \frac{\omega}{6 + 0,018(t - 200)}, \quad (96)$$

где ω – допустимое рассеяние размеров по толщине пиломатериалов, мм.

Пиление древесины производят на станках средней C и низкой H точности. Станки средней точности обеспечивают рассеивание размеров по 15 и 16 квалитетам, а станки низкой точности – по 17 и 18 квалитетам. Допуски квалитетов приведены в табл. 14.

Если пиломатериалы имеют поле допуска размера по толщине δ , то их можно выпилить на станке, обеспечивающем рассеивание размеров $\omega \leq 0,9\delta_{\text{min}}$, где δ_{min} – допуск самого точного квалитета, входящего в группу данного класса точности станка.

11. Выбирается расчетная подача на зуб $S_{зр}$, мм; принимается наименьшее значение из найденных шести значений подач на зуб.

Таблица 14

Значения полей допусков линейных размеров, мм,

по ГОСТ 6449.1-82

Интервал размеров, мм	Квалитеты			
	15	16	17	18
Св. 18 до 30	0,84	1,30	2,10	3,3
Св. 30 до 50	1,00	1,60	2,50	3,9
Св. 50 до 80	1,20	1,90	3,00	4,6
Св. 80 до 120	1,40	2,20	3,50	5,4
Св. 120 до 180	1,60	2,50	4,00	6,3

9.8. Пример расчета оптимальных режимов пиления

Дано. На ленточнопильном станке с механической подачей распиливаются сосновые заготовки влажностью $W > 30\%$ и толщиной 40; 50; 60; 100 мм. Диаметр шкивов $D = 1000$ мм, расстояние между их центрами $L = 1250$ мм, частота вращения шкивов $n = 800$ мин⁻¹. Время работы пилы $T = 120$ мин, касательное давление стружки от трения в пропиле $\alpha_\lambda = 0,25$ МПа. Установленная мощность механизма главного движения $P = 7$ кВт, КПД привода $\eta = 0,8$. Шероховатость поверхности пиломатериалов не более $R_m = 400$ мкм по ГОСТ 7016-82.

Определить скорости подач, построить график скоростей подач.

Решение.

1. Выбираем пилу ленточную столярную 3405-0027 по ГОСТ 6532-77: ширина пилы $B = 60$ мм; толщина полотна $S = 0,9$ мм; шаг зубьев $t_3 = 12$ мм; передний угол лезвия $\gamma = 5^\circ$.

Ширина пропила с разведенными зубьями

$$b = S + 2S' = 0,9 + 2 \cdot 0,5 = 1,9 \text{ мм.}$$

2. Подача на зуб пилы по требованию к шероховатости пропила. По табл. 13 выбираем: при $S_z = 0,60$ мм $R_{m \max} = 340$ мкм и $S_z = 0,80$ мм $R_{m \max} = 630$ мкм. Интерполируя для $R_{m \max} = 400$ мкм, получим

$$S_{z1} = 0,60 + (0,8 - 0,6)(400 - 340) / (630 - 340) = 0,64 \text{ мм.}$$

Результаты расчетов сведены в табл. 15.

3. Подача на зуб по производительности пиления

$$S_{z2} = t_3^2 / (6t) = 12^2 / (6 \cdot 40) = 0,6 \text{ мм.}$$

4. Скорость главного движения

$$V = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 1000 \cdot 800}{60000} = 41,87 \text{ м/с.}$$

5. Касательная сила резания одним зубом

$$F_{x \text{ зуб}} = 1000 P \eta t_3 / (Vt) = 1000 \cdot 7 \cdot 0,8 \cdot 12 / (41,87 \cdot 40) = 40,1 \text{ Н.}$$

Таблица 15

Результаты расчетов режимов пиления

Наименование	Обозначение	Размерность	Высота пропила t , мм			
			40	50	60	100
Ширина пропила	b	мм	1,9	1,9	1,9	1,9
Подача на зуб:						
по шероховатости	S_{z1}	мм	0,64	0,64	0,64	0,64
по производительности	S_{z2}	мм	0,6	0,48	0,40	0,24
Скорость резания	V	м/с	41,87	41,87	41,87	41,87
Сила резания одним зубом	$F_{x \text{ зуб}}$	Н	40,1	32,1	26,7	16,05
Фиктивная сила резания	p	Н/мм	7,06	7,06	7,06	7,06
Касательное давление	k	МПа	36,58	36,58	36,58	36,58

Величина затупления лезвий	$\Delta\rho$	мкм	1,73	2,16	2,60	4,33
Коэффициент затупления	$\alpha\rho$	–	1,001	1,3	1,3	1,34
Подача на зуб по мощности привода	S_{z3}	мм	0,48	0,34	0,26	0,1
Допускаемая касательная сила на одном зубе	$F_{хд\ зуб}$	Н	148	118,4	98,6	59,18
Подача на зуб по устойчивости пилы от $F_{хд\ зуб}$	S_{z4}	мм	2,0	1,53	1,22	0,62
Допускаемая нормальная сила на одном зубе	$F_{zd\ зуб}$	Н	37	29,6	24,7	14,8
Подача на зуб по устойчивости пилы от $F_{zd\ зуб}$	S_{z5}	мм	4,16	3,2	2,59	1,38
Подача на зуб по точности пиления	S_{z6}	мм	0,8	0,91	0,86	0,76
Подача на зуб расчетная (минимальная)	S_{zp}	мм	0,48	0,35	0,27	0,11
Оптимальная скорость подачи	V_s	м/мин	100,5	73,3	56,52	23,0

6. Фиктивная сила резания для древесины сосны
 $\rho = 7,06$ Н/мм.

7. Касательное давление стружки на переднюю грань зуба

$$k = 0,55\delta + 0,196V_1 - 19,6 = 0,549 \cdot 85 + 0,196(90 - 41,87) - 19,6 = 36,58 \text{ МПа.}$$

8. Величина затупления режущих кромок зубьев, мкм,

$$\Delta_\rho = \gamma_\Delta \frac{tnTk_n k_u}{1000(1 + 2L/\pi D)} = \frac{0,001 \cdot 40 \cdot 800 \cdot 120 \cdot 0,9 \cdot 0,9}{1000(1 + 2 \cdot 1250/(3,14 \cdot 1000))} = 1,73.$$

9. Коэффициент затупления

$$\alpha_\rho = 1 + \frac{(1 + 0,1k/p)\Delta_\rho}{\rho_o + 50} = 1 + \frac{(1 + 0,1 \cdot 36,58/7,06)1,73}{10 + 50} = 1,001.$$

10. Подача на зуб по мощности привода

$$S_{z3} = \frac{(\frac{F_{xzy}}{a_\pi a_w b_\pi} - \alpha_\rho p)b_\pi}{(kb + \alpha t)} = \frac{(\frac{40,1}{1 \cdot 0,89 \cdot 0,9} - 1,001 \cdot 7,06)0,9}{(38,8 \cdot 1,8 + 0,25 \cdot 40)} = 0,48 \text{ мм.}$$

11. Критическая касательная сила резания

$$F_{кр} = 10^6 s^3 (0,82 + 0,002 B_1)(0,95 + 0,001 \sigma) / L =$$

$$= 10^6 \cdot 0,9^3 (0,82 + 0,002 \cdot 60)(0,95 + 0,001 \cdot 50) / 1250 = 548 \text{ Н.}$$

12. Допускаемая касательная сила резания одним зубом

$$F_{хд\text{ зуб}} = 0,9F_{кр}t_3 / t = 0,9 \cdot 548 \cdot 12 / 40 = 148 \text{ Н.}$$

13. Подача на зуб по устойчивости пилы от допускаемой касательной силы резания

$$S_{z4} = \frac{(\frac{F_{хд\text{ зуб}}}{a_\pi a_w b_\pi} - \alpha_\rho p)b_\pi}{(kb + \alpha t)} = \frac{(\frac{148}{1 \cdot 0,89 \cdot 0,9} - 1,001 \cdot 7,06)0,9}{(36,58 \cdot 1,9 + 0,25 \cdot 40)} = 2,0 \text{ мм.}$$

14. Нормальная критическая сила резания

$$F_{зкр} = 9,72m(39,5EI + \sigma SB_1L^2) / L^3 =$$

$$= 9,72 \cdot 0,2(39,5 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,9 \cdot 60^3 / 12 + 50 \cdot 0,9 \cdot 60 \cdot 1250^2) / 1250^3 = 137 \text{ Н.}$$

15. Допустимая нормальная сила резания

$$F_{зд \text{ зуб}} = 0,9 F_{зкк} t_3 / t = 0,9 \cdot 137 \cdot 12 / 40 = 37 \text{ Н.}$$

16. Подача на зуб по критической нормальной силе

$$S_{z5} = 0,1 + \frac{0,5\alpha_\rho^2(\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50} - F_{зд \text{ зуб}} / b_L a_n a_w}{(k + \alpha t / b) \text{tg}(\gamma - \varphi)} =$$

$$= 0,1 + \frac{0,5 \cdot 1,001^2 (1,001 \cdot 7,06 + 0,1 \cdot 36,58) \frac{1,73 + 10}{1,73 + 10 + 50} - 37 / (0,9 \cdot 1 \cdot 0,89)}{(36,58 + 0,25 \cdot 40 / 1,9) \text{tg}(5^\circ - 20^\circ)} = 4,16 \text{ мм.}$$

17. Пиломатериалы шириной до 60 мм имеют поле допуска размеров $\delta = 4$ мм (ГОСТ 8486-66). Допустимое рассеяние размеров на станке $\omega_1 \leq 0,9\delta \leq 0,9 \cdot 4 \leq 3,6$ мм. По табл. 12 выбираем допустимое рассеяние размеров на станке низкой точности $\omega = 2,5 \dots 3,0$ мм (17-й квалитет).

Подача на зуб по точности пиления

$$S_{z6} = \frac{\omega}{6 + 0,018(t - 200)} = \frac{2,5}{6 + 0,018(40 - 200)} = 0,8 \text{ мм.}$$

18. За расчетное значение подачи на зуб принимается наименьшее из шести найденных значений подач (табл. 16):

Таблица 16

Расчетные значения подач на зуб

Обо-	Раз-	Высота пропила t , мм
------	------	-------------------------

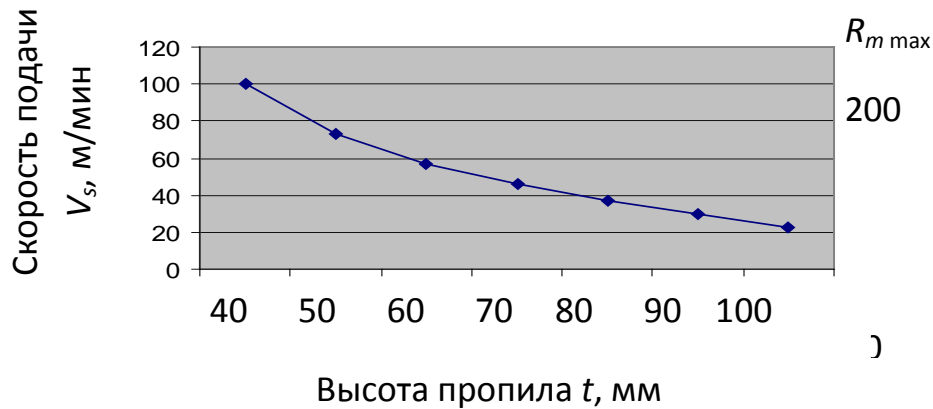
значение	мер-ность	40	50	60	100
S_{z1}	мм	0,64	0,64	0,64	0,64
S_{z2}	мм	0,6	0,48	0,40	0,24
S_{z3}	мм	0,48	0,35	0,27	0,11
S_{z4}	мм	2,0	1,53	1,22	0,62
S_{z5}	мм	4,16	3,2	2,59	1,38
S_{z6}	мм	0,8	0,91	0,86	0,76
S_{zp}	мм	0,48	0,35	0,27	0,11

Скорость подачи

$$V_s = S_{zp} n \pi D / (1000 t_3) = 0,48 \cdot 800 \cdot 3,14 \cdot 1000 / (1000 \cdot 12) = 100,5 \text{ м/мин.}$$

По результатам расчетов построен график скоростей подач (рис. 41), по которому находится оптимальная скорость подачи и получаемая шероховатость распиленной поверхности.

На график удобно нанести несколько кривых, относящихся к разным пилам, отличающимся по шагу зубьев и толщине.



9.9. Пример решения прямой задачи

Дано. На ленточнопильном делительном станке с диаметром шкивов $D = 1400$ мм, частотой их вращения $n = 500$ мин⁻¹ и расстоянием между центрами шкивов $L = 2000$ мм распиливаются продольно сосновые заготовки с высотой пропила $t = 400$ мм. Влажность древесины $W > 30\%$, зубья пилы плющенные, скорость подачи $V_s = 20$ м/мин.

Определить шероховатость пропила силы резания и мощность электродвигателя механизма главного движения при КПД привода $\eta = 0,8$.

Решение. 1. Выбираем пилу 3405-0037 по ГОСТ 6532-77: ширина ленты $B = 150$ мм, толщина $s = 1,2$ мм, шаг зубьев $t_3 = 50$ мм, углы $\gamma = 30$ и $\beta = 45^\circ$.

2. Ширина пропила при уширении зубьев на сторону $s' = 0,4$ мм

$$b = s + 2s' = 1,2 + 2 \cdot 0,4 = 2 \text{ мм.}$$

3. Подача на зуб

$$S_{\text{я}} = \frac{1000V_s}{zn} = \frac{1000V_s t_3}{\pi D n} = \frac{1000 \cdot 20 \cdot 50}{3,14 \cdot 1400 \cdot 500} = 0,45 \text{ мм.}$$

4. По табл. 13 определяем шероховатость обработанной поверхности:

$$R_{m \max} = 320 + \frac{(520 - 320)0,05}{0,2} = 370 \text{ мкм.}$$

5. Величина затупления режущих кромок лезвий за период стойкости пилы (120 мин);

$$\Delta_{\rho} = \gamma_{\Delta} \frac{tnTk_n k_u}{1000(1 + 2L / \pi D)} = 0,001 \frac{400 \cdot 500 \cdot 120 \cdot 0,9 \cdot 0,9}{1000(1 + 2 \cdot 2000 / 3,14 \cdot 1400)} = 10,2 \text{ мкм.}$$

6. Скорость главного движения

$$V = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 1400 \cdot 500}{60 \cdot 1000} = 36,6 \text{ м/с.}$$

7. Фиктивная сила резания для древесины сосны $p = 7,06 \text{ Н/мм.}$

Касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность зуба k :

$$k = 0,549\delta + 0,196V_1 - 19,6 = 0,549 \cdot 60 + 0,196(90 - 36,6) - 19,6 = 23,8 \text{ МПа.}$$

8. Коэффициент затупления

$$\alpha_{\rho} = 1 + \frac{(1 + 0,1k / p)\Delta_{\rho}}{\rho_o + 50} = 1 + \frac{(1 + 0,1 \cdot 23,8 / 7,06)10,2}{10 + 50} = 1,23.$$

9. Касательная сила резания одним зубом при удельном давлении от трения опилок в пропилах $\alpha_{\Delta} = 0,2$ МПа и поправочных коэффициентах на породу древесины $a_n = 1$, на влажность $a_w = 0,89$

$$F_{x \text{ зуб}} = \left[\alpha_{\rho} p + \left(k + \frac{\alpha t}{b} \right) S_z \frac{b}{b_{\text{л}}} \right] b_{\text{л}} a_n a_w =$$

$$= \left[1,23 \cdot 7,06 + \left(23,8 + \frac{0,2 \cdot 400}{2} \right) 0,45 \frac{2}{2} \right] 2 \cdot 1 \cdot 0,89 = 66,6 \text{ Н.}$$

10. Средняя касательная сила резания за оборот шкива

$$F_x = F_{x \text{ зуб}} t / t_z = 66,6 \cdot 400 / 50 = 532,8 \text{ Н.}$$

11. Мощность электродвигателя механизма главного движения

$$P = \frac{F_x V}{1000 \eta} = \frac{532,8 \cdot 36,6}{1000 \cdot 0,8} = 24,4 \text{ кВт.}$$

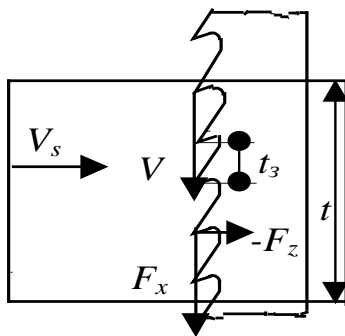
12. Средняя нормальная сила резания за оборот шкива

$$F_z = [0,5 \alpha_\rho^2 (\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50} - (S_z - 0,1)(k + \alpha t/b) \operatorname{tg}(\gamma - \varphi)] b_{\text{л}} \frac{t}{t_3} =$$

$$= [0,5 \cdot 1,23^2 (1,23 \cdot 7,06 + 0,1 \cdot 23,8) \frac{20,2}{20,2 + 50} - (0,45 - 0,1)(23,8 +$$

$$+ 0,2 \cdot 400/2) \operatorname{tg}(30^\circ - 15^\circ)] 2 \frac{400}{50} = -57,15 \text{ Н.}$$

Направление полученных расчетных сил резания при пилении



ленточной пилой показано на рис. 42. Отрицательное значение нормальной силы резания F_z указывает на то, что нормальная сила резания действует в направлении вектора скорости подачи V_s .

Рис. 42. Действие сил

резания на ленточную пилу

10. Продольное пиление дисковыми пилами

10.1. Общие сведения

Продольное пиление дисковыми (круглыми) пилами – самый распространенный процесс обработки древесины. По принципу продольного пиления работают станки, распиливающие бревна или брусья, а также станки обрезные, прирезные, реечные, ребровые и др.

При продольном пилении плоскость дисковой пилы параллельна волокнам древесины. Основную работу при пилении

выполняют главные (короткие) режущие кромки зубьев. Они перерезают волокна, формируют дно пропила. Боковые режущие кромки формируют стенки пропила.

Пиление характеризуется большими значениями скорости главного движения (50...150 м/с) и скорости подачи (до 150 м/мин), непрерывностью вращательного движения режущего инструмента, сравнительно простой конструкцией станков, удобством их эксплуатации и большими возможностями для автоматизации. Однако на станках часто приходится применять толстые круглые пилы, из-за чего снижается полезный выход пилопродукции и увеличивается объем опилок. Количество опилок достигает 12...16% от объема распиливаемого сырья.

10.2. Режущий инструмент

Пила 1, многолезвийный режущий инструмент (рис. 43, а), крепится на пильном валу станка зажимными фланцами 2 и выполняет главное движение. Заготовка 3, сбазированная по плоскости стола 4, обычно надвигается на пилу.

Параметры пил берут по ГОСТ 980–80 (табл. 17).

Минимальный диаметр пилы определяют по формуле

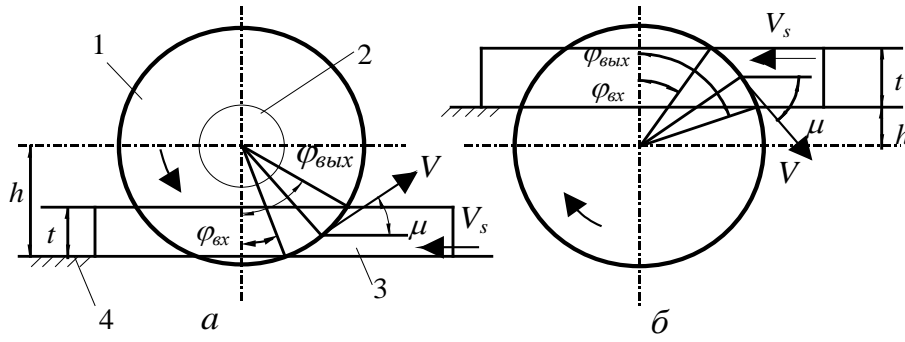


Рис. 43. Продольное пиление дисковой пилой:

a – с верхним расположением пилы; *б* – с нижним

$$D_{\text{мин}} = 2(t + r_{\phi} + a_1 + a_2),$$

где *t* – высота пропила, мм;

r_φ – радиус зажимных фланцев, мм;

a₁ – зазор между зажимным фланцем и заготовкой, мм;

a₂ – выступ пилы из пропила, мм.

Таблица 17

Параметры круглых плоских пил типа 1 исполнения 1 для продольного пиления (ГОСТ 980-80)

Обозначение пил	<i>D</i> , мм	<i>d</i> , мм	<i>S</i> , мм	Число зубьев, <i>z</i>	Обозначение пил	<i>D</i> , мм	<i>d</i> , мм	<i>S</i> , мм	Число зубьев, <i>z</i>
3420-0158	250	32	1,4	48	3420-0246	560	80	2,8	60
-0159			1,6		-0249			2,5	
-0160			1,8		-0250			2,8	
-0164			1,6		-0251			3,0	
-0365			1,8		-0252			2,5	
-0170			2,0		-0253			2,8	
-0171	315	32	2,2	48	-0254	630	80	3,0	60
-0174			2,0		-0264			2,8	

-0175			2,2		-0265	710		3,2	60
-0179			2,0		-0267			2,8	
-0180			2,2	48	-0270			3,2	48
-0181			2,5		-0271	800		3,6	
-0183	360	50	2,0		-0273		50	3,2	60
-0184			2,2	60	-0274			3,6	
-0185			2,5		-0275			3,2	
-0190			2,2	48	-0276			3,6	48
-0191			2,5		-0277			4,0	
-0193	400		2,0		-0278	900		3,2	
-0194			2,2	60	-0279			3,6	72
-0195			2,5		-0280			4,0	
-0209				48	-0281			3,6	
-0210	450		2,8		-0282			4,0	48
-0213			2,5		-0283	1000		4,5	
-0214			2,8		-0284			3,6	
-3167			2,2		-0285			4,0	72
-0226			2,5	48	-0286			4,5	
-0227			2,8		-0287				48
-0228	500		2,2		-0288	1250		5,0	
-0229			2,5	60	-0289			4,5	
-0230			2,8		-0290			5,0	72
-0242			2,5		-0291	1500			

-0243	560	80	2,8	48	3420-0292		5,5
3420-0245			2,5	60			

Рекомендуемое ГОСТ 980–80 соотношение между диаметром пил и диаметром зажимных фланцев приведено ниже.

Диаметр пи-

лы, мм:

160...360 400...500 560...800 900...1000 1250 1500

Диаметр

фланцев, мм

100 125 160 200 240 300

Зазор a_1 принимают для станков с нижним расположением пилы $(5 + C)$ мм, где C – толщина стола; для станков с верхним расположением пилы – 10 мм; для бревнопильных – более 15 мм [13].

Минимальный диаметр пилы увеличивают на 100 мм ($D < 710$ мм) или 200 мм ($D > 710$ мм) для переточек и округляют в большую сторону до стандартного значения. Окружной шаг зубьев пилы t_3 , мм:

$$t_3 = \pi D / z,$$

где z – количество лезвий (зубьев) пилы.

Для исключения зажима диска пилы в пропилах зубья разводят или плюшат. Величина уширения зубьев на сторону приведена в табл. 18. Ширина пропила определяется по формуле

$$b = S + 2S',$$

где S – толщина диска, мм;

S' – уширение зубьев на сторону, мм.

Таблица 18

Уширение зубьев круглых пил на сторону S'

Диаметр пил, мм	S' , мм, при продольном и поперечном (в скобках) пилении древесины		
	хвойных пород влажностью W		твердых лиственных пород
	$W \leq 30\%$ или древесина мерзлая	$W > 30\%$	
125...315	0,40(0,20)	0,45 (0,30)	0,30 (0,20)
360...500	0,60 (0,30)	0,70 (0,40)	0,50 (0,30)
560...630	0,70 (0,40)	0,80 (0,50)	0,60 (0,40)
710...900	0,80 (0,50)	0,90 (0,60)	0,70 (0,50)
1000...1250	1,00 (0,70)	1,10 (0,80)	0,90 (0,60)
1500	1,20 (0,80)	1,30 (0,90)	1,10 (0,70)

При продольной распиловке бревен и брусьев без охлаждения пил допускается увеличить уширение на 0,1...0,15 мм.

Пилы диаметром 1250...1500 мм шпалорезных станков, слешерных установок, раскряжевочных линий допускается подготавливать с уширением зубьев 1,5...2,0 мм.

Период стойкости стальных пил при продольном пилении хвойных пород древесины составляет 4 ч, а при пилении твердых лиственных пород – 2,5 ч.

10.3. Скорости движений

Скорость главного движения V , м/с:

$$V = \pi D n / 60000,$$

где D – диаметр пилы, мм;

n – частота вращения пильного вала, мин⁻¹.

Скорость подачи V_s , м/мин:

$$V_s = S_z z n / 1000. \quad (97)$$

Здесь z – количество зубьев пилы;

S_z – подача на зуб, мм.

Скорость результирующего движения резания V_e вычисляют как геометрическую сумму скоростей V и V_s :

$$V_e = \sqrt{V^2 + V_s^2 + 2V V_s \cos \mu},$$

где μ – угол подачи, град.

10.4. Геометрия срезаемого слоя

Границы контакта пилы с заготовкой можно выразить углом входа $\varphi_{вх}$ зубьев в заготовку и углом выхода $\varphi_{вых}$ (см. рис. 43, а, б). Расчетные формулы для определения этих углов приведены в табл. 19.

Угол контакта зуба пилы с заготовкой

$$\varphi_K = \varphi_{вых} - \varphi_{вх}. \quad (98)$$

Средний угол на дуге контакта $\varphi_{ср}$, равный углу подачи μ :

$$\varphi_{ср} = \mu = (\varphi_{вх} + \varphi_{вых}) / 2. \quad (99)$$

Длина срезаемого слоя l вычисляется как длина дуги контакта. Выражая φ_k в радианах или в градусах, получим соответственно

$$l = R\varphi_k \quad \text{или} \quad l = \pi D\varphi_k / 360^\circ. \quad (100)$$

Таблица 19

Значения углов $\varphi_{вх}$ и $\varphi_{вых}$ при встречной и попутной подачах

Положение пилы	Подача встречная		Подача попутная	
	$\varphi_{вх}$	$\varphi_{вых}$	$\varphi_{вх}$	$\varphi_{вых}$
Верхнее	$\arccos \frac{h}{R}$	$\arccos \frac{h-t}{R}$	$\arccos \frac{h-t}{R}$	$\arccos \frac{h}{R}$
Нижнее	$\arccos \frac{h+t}{R}$	$\arccos \frac{h}{R}$	$\arccos \frac{h}{R}$	$\arccos \frac{h+t}{R}$

Толщина срезаемого слоя. Толщина срезаемого слоя есть наименьшее расстояние

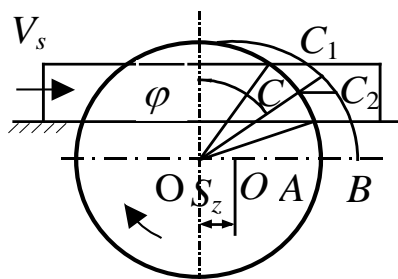


Рис. 44. Размеры срезаемого слоя

стояние между смежными траекториями движения лезвий пилы в древесине (рис. 44). Приняв фигуру CC_1C_2 за прямоугольный треугольник, получим, что толщина среза $a = CC_1 = S_z \sin \varphi$, где φ – угол положения зуба на дуге контакта.

Среднее значение толщины среза a_c , мм, на дуге контакта для плюсовых и разведенных зубьев:

$$a_c = S_z \sin \mu \frac{b}{b_{\mathcal{L}}}. \quad (101)$$

10.5. Динамика пиления

Удельную силу резания при продольном пилении определяют по следующим формулам:

при $a_c \geq 0,1$ мм

$$F_{уд} = a_n a_w a_b \left[\frac{\alpha_\rho P}{a_c} + k + \frac{\alpha t}{b} \right], \quad (102)$$

при $a_c < 0,1$ мм и приближенном расчете

$$F_{уд\mu} = a_n a_w a_b \left[\frac{(\alpha_\rho P + 0,1k)}{\rho + 50} \left(500 + \frac{\rho}{a_{c\mu}} \right) + \frac{\alpha t}{b} \right], \quad (103)$$

где a_n – коэффициент учета породы древесины;

a_w – коэффициент учета влажности;

a_b – коэффициент вида пиления (встречное – $a_b = 1$, попутное – $a_b = 1,1$);

α – давление на зуб от трения стружки в пропиле; для разведенных зубьев $\alpha_\lambda = 0,70 \dots 0,74$; для плющенных – $\alpha_\lambda = 0,57 \dots 0,59$.

Фиктивная сила резания при пилении сосны ρ , Н/мм:

$$\rho = 3,924 + 0,0353 \varphi_b.$$

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

$$k = (0,196 + 0,00392 \varphi_b) \delta + (0,0686 + 0,00147 \varphi_b) V' - (5,39 + 0,147 \varphi_b),$$

где φ_b – угол встречи режущей кромки с волокнами, град, при продольном пилении принимают $\varphi_b = \varphi_{cp} = \mu$;

δ – угол резания зуба, град;

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

Касательная сила резания при пилении одним зубом $F_{x\text{зуб}}$, Н,

$$F_{x\text{зуб}} = F_{уд} a_c b_l. \quad (104)$$

В пропиле находится несколько зубьев, поэтому средняя касательная сила резания за оборот пилы (окружная сила резания) будет

$$F_x = F_{x \text{ зуб}} \frac{I}{t_3}. \quad (105)$$

Мощность пиления P , кВт,

$$P = \frac{F_x V}{1000}. \quad (106)$$

Радиальная составляющая силы резания F_z , Н,

при $a_c \geq 0,1$ мм

$$F_z = [0,5\alpha_\rho^2(\alpha_\rho p + 0,1(k + \frac{\alpha t}{b}))\frac{\rho}{\rho + 50} - (a_c - 0,1)(k + \frac{\alpha t}{b})\text{tg}(90^\circ - \delta - \varphi)]a_{\Pi}a_w a_B b_{\text{Л}} \frac{t}{t_3}, \quad (107)$$

при $a_c < 0,1$ мм

$$F_z = a_{\Pi}a_w a_B b_{\text{Л}} \frac{I}{t_3} 0,5\alpha_\rho^2[\alpha_\rho p + 0,1(k + \frac{\alpha t}{b})]\frac{\rho}{\rho + 50}. \quad (108)$$

10.6. Выбор параметров режима продольного пиления

При выборе параметров режима пиления круглой пилой следует учитывать, что увеличение диаметра и частоты вращения, а также уменьшение толщины диска негативно сказываются на работе пилы. Допустимые их значения берутся по табл. 20 или рассчитываются. Скорость главного движения пилы принимают 40...80 м/с.

С увеличением **скорости главного движения** мощность на пиление возрастает.

С увеличением **скорости подачи** удельная сила резания убывает, а касательная сила и мощность резания возрастают.

С увеличением **шага зубьев** мощность на пиление убывает, так как в пропиле находится меньшее количество зубьев. Для снижения мощности можно использовать пилы с укороченными

зубьями. Для этого у пилы зубья 2 и 3, 5 и 6, 8 и 9 и т.д. по отношению к зубьям 1, 4, 7 и т.д. делают короче на 1,5...2,0 мм. Выступающие зубья срезают толстые слои, что приводит к уменьшению удельной силы и мощности резания. Укороченные зубья подчищают стенки пропила. Уширение пропила для всех зубьев делается одинаково.

Таблица 20

Максимально допустимые частоты вращения
круглых пил с плоским диском

Диаметр пилы, мм	Толщина пилы, мм	Максимально допустимая частота вращения, мин ⁻¹ , при перепаде температуры ΔТ, °С							А, °С/кВт
		0	5	10	15	20	30	50	
160	(2,0)	14000	–	–	–	–	–	12000	-
200	(2,0)	12000	–	–	–	–	–	10000	-
250	1,2	8050	7850	7650	7400	7200	6700	5600	9,5
	1,4	9400	9250	9050	8850	8650	8250	7400	8,8
	1,6	10750	10600	10450	10250	10100	9750	9050	8,2
	(1,8)	10000	–	–	–	–	–	8000	–
	(2,4)	12000	–	–	–	–	–	10000	–
315	1,6	5950	5700	5500	5300	5050	4550	3350	6,7
	1,8	6650	6500	6300	6100	5900	5500	4550	6,3
	2,0	7400	7250	7100	6900	6750	6350	5550	6,0

Электронный архив УГЛТУ

320	2,2	8150	8000	7850	7700	7550	7200	6500	5,7
	(2,0)	6300	–	–	–	–	–	4200	–
	(2,2)	7000	–	–	–	–	–	5100	–
	(2,4)	7600	–	–	–	–	–	5950	–
	(2,8)	8850	–	–	–	–	–	7550	–
360	1,8	4900	4720	4500	4300	4100	3600	2300	5,6
	2,0	5450	5300	5100	4900	4700	4300	3300	5,3
	2,2	6000	5850	5700	5500	5350	5000	4150	5,1
	2,5	6800	6700	6600	6400	6250	5950	5250	4,7
	(2,2)	5400	–	–	–	–	–	3450	–
400	(2,4)	5850	–	–	–	–	–	4150	–
	(2,6)	6400	–	–	–	–	–	4850	–
	(3,2)	7850	–	–	–	–	–	6700	–
	1,8	4100	3950	3750	3550	3300	2850	1400	5,1
	2,0	4550	4400	4250	4050	3850	3450	2400	4,8
	2,2	5050	4900	4750	4550	4400	4050	3200	4,6
	2,5	5700	5600	5450	5300	5150	4850	4200	4,3
	(2,4)	4750	–	–	–	–	–	2900	–
	(2,6)	5150	–	–	–	–	–	3550	–
450	(2,8)	5500	–	–	–	–	–	4100	–
	(3,2)	6400	–	–	–	–	–	5100	–
	2,0	3500	3300	3150	2950	2700	2250	1450	4,3
	2,2	3850	3700	3500	3350	3150	2750	1650	4,1

Электронный архив УГЛТУ

	2,5	4350	4250	4100	3950	3800	3450	2650	3,9
	2,8	4900	4750	4650	4500	4350	4100	3450	3,7
	(3,0)	4600	–	–	–	–	–	3250	–

Окончание табл. 20

Диаметр пилы, мм	Толщина пилы, мм	Максимально допустимая частота вращения, мин ⁻¹ , при перепаде температуры ΔТ, °С							А, °С/кВт
		0	5	10	15	20	30	50	
500	2,2	3050	2900	2700	2250	2350	1900	–	3,8
	2,5	3450	3300	3200	3000	2850	2500	1600	3,5
	2,8	3850	3750	3600	3500	3350	3050	2400	3,3
560	2,2	2500	2350	2200	2000	1850	1400	–	3,4
	2,5	2850	2700	2550	2400	2250	1950	950	3,2
	2,8	3,150	3050	2950	2800	2700	2400	1700	3,0
630	2,2	1950	1750	1600	1400	1150	–	–	3,1
	2,5	2200	2050	1900	1700	1550	1100	–	2,9
	2,8	2450	2350	2200	2050	1900	1550	1300	2,7
	3,0	2650	2500	2400	2250	2150	1850	1000	2,6
710	2,2	1450	1250	1050	800	–	–	–	2,7
	2,5	1650	1500	1300	1100	850	–	–	2,6
	2,8	1800	1700	1550	1400	1200	700	–	2,4
	3,0	1950	1850	1700	1550	1400	1000	–	2,3
	3,2	2100	1950	1850	1700	1550	1200	–	2,3

800	2,8	1250	1100	900	700	300	–	–	2,2
	3,0	1350	1200	1050	850	550	–	–	2,1
	3,2	1450	1300	1150	1000	750	–	–	2,0
	3,6	1650	1500	1400	1250	1050	600	–	1,9
900	3,2	1200	1100	950	750	550	–	–	1,8
	3,6	1350	1250	1150	1000	800	300	–	1,7
	4,0	1500	1400	1300	1200	1050	700	–	1,6
1000	3,6	1050	900	800	600	350	–	–	1,6
	4,0	1150	1050	950	700	400	–	–	1,5
	4,5	1300	1200	1100	1000	850	500	–	1,4
1250	4,0	750	600	450	250	–	–	–	1,2
	4,5	800	700	600	450	200	–	–	1,2
	5,0	900	800	700	600	450	–	–	1,1
1500	4,5	600	500	350	–	–	–	–	1,0
	5,0	650	550	450	300	–	–	–	0,9
	5,5	700	650	550	400	250	–	–	0,9

Примечание. В скобках указана толщина пил с пластинками твердого сплава

Применение пил с укороченными зубьями позволяет, по данным А.Л. Бершадского, сократить потребление энергии на 25...35 %.

Дисковая пила надежно работает при частоте вращения, не превышающей допустимую. Допустимая частота вращения пилы зависит от температурного перепада ΔT между температурами горячей периферийной зоны и менее нагретой центральной части диска (см. табл. 20). Прочерки в таблице означают, что пила данных размеров при указанном перепаде температуры неработоспособна. Перепад температуры ориентировочно можно рассчитать по формуле

$$\Delta T = AP\eta / i,$$

где A – коэффициент, зависящий от размеров пилы и скорости главного движения резания (численное значение этого коэффициента для стальных плоских пил при скорости резания 50 м/с приведено в табл. 20);

P – мощность электродвигателя привода пильного вала, кВт;

η – КПД привода (в расчетах значений A принято $\eta = 0,9$);

i – количество пил на валу.

10.7. Решение прямой задачи

В прямой задаче по исходным данным определяют шероховатость распиленных поверхностей, силы и мощность резания. Ниже приведен порядок решения задачи.

1. Определяют углы контакта. По табл. 19 и формулам (98), (99) находят углы входа, выхода, угол контакта и средний угол на дуге контакта.

2. Находят размеры срезаемого слоя. Длину срезаемого слоя находят по формуле (100). Ширина пропила, мм,

$$b = S + 2S'.$$

Рассчитывают значение подачи на зуб, мм,

$$S_z = 1000V_s / (zn).$$

Среднюю толщину срезаемого слоя находят по формуле

$$a_c = S_z \sin \mu \frac{b}{b_{\text{л}}},$$

где длина режущей кромки для разведенного зуба $b_n = S$, а для плющеного $b_n = b$.

3. Находят окружной шаг зубьев пилы, мм: $t_3 = \pi D / z$.

4. По значению подачи на зуб и угла выхода зуба из заготовки находят шероховатость поверхности пропила (табл. 21).

Таблица 21

Шероховатость поверхности пропила при различной подаче на зуб при продольном пилении древесины круглыми пилами

Высота неровно- стей, мкм	Максимальная подача на зуб, мм, при углах выхода зубьев из пропила, град					
	20	30	40	50	60	70
1200	1,8/1,2	1,8/1,2	1,8/1,2	1,8/1,2	1,5/1,2	1,5/1,2
800	1,5/1,0	1,5/1,0	1,5/1,0	1,5/1,0	1,2/0,8	1,2/0,8
500	1,2/0,8	1,2/0,8	1,2/0,8	1,2/0,8	0,75/0,5	0,75/0,5

320	0,45/0,3 0	0,45/0,3 0	0,45/0,3 0	0,45/0,3 0	0,15/0,1 0	0,15/0,10
200	0,15/0,1 0	0,15/0,1 0	0,15/0,1 0	0,15/0,1 0	0,15/0,1 0	0,15/0,10
100	0,15/0,1 0	0,15/0,1 0	0,15/0,1 0	0,15/0,1 0	–	–
Примечание. В числителе – для зубьев плющенных, в знаменателе – для разведенных.						

5. Скорость главного движения резания, м/с,

$$V = \pi Dn/60000.$$

6. Касательное давление стружки на переднюю грань зуба для продольно-торцового резания древесины сосны, МПа,

$$k = (0,196 + 0,00392 \varphi_{\text{в}}) \delta + (0,0686 + 0,00147 \varphi_{\text{в}}) V_1 - (5,39 + 0,147 \varphi_{\text{в}}),$$

где $\varphi_{\text{в}}$ – угол встречи режущей кромки с волокнами, град, при продольном пилении принимают $\varphi_{\text{в}} = \varphi_{\text{сп}}$; δ – угол резания зуба, град; V_1 – скорость резания, м/с, принимается из следующего условия: при $V \leq 50$ м/с $V_1 = 90 - V$, иначе $V_1 = V$.

7. Фиктивная сила резания для древесины сосны (истинная порода древесины будет учтена ниже коэффициентом на породу), Н/мм,

$$p = 3,924 + 0,0353 \varphi_{\text{в}}.$$

8. Величина затупления режущей кромки зуба, прошедшего в древесине в течение периода стойкости путь L , мкм,

$$\Delta\rho = \gamma_{\Delta}L = \gamma_{\Delta}\ln TK_{п}K_{u} / 1000,$$

где T – период стойкости пилы, мин;

$K_{п}, K_{u}$ – коэффициенты производительности и использования станка; $K_{п} = 0,9, K_{u} = 0,9$;

$\gamma_{\Delta} = 0,001$ мкм/м для мягких пород древесины, при пилении твердых лиственных пород $\gamma_{\Delta} = 0,00135$ мкм/м.

9. Коэффициент затупления при $\rho_o = 10$ мкм

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1\frac{k}{p})\frac{\Delta\rho}{\rho_o + 50}.$$

10. Удельная сила резания, МПа,

при $a_c \geq 0,1$ мм

$$F_{y\partial} = a_{п}a_w a_{б}\left[\frac{\alpha_{\rho}p}{a_c} + k + \frac{\alpha t}{b}\right],$$

при $a_c < 0,1$ мм (приближенный расчет)

$$F_{уд\mu} = a_n a_w a_{б}\left[\frac{(\alpha_{\rho}p + 0,1k)}{\rho + 50}\left(500 + \frac{\rho}{a_{с\mu}}\right) + \frac{\alpha t}{b}\right].$$

Значения поправочного коэффициента на влажность a_w для пиления дисковыми пилами приведены ниже.

Влажность, %	8...12	18...22	25...30	50...70	>70
a_w	1,0	1,07	1,08	1,13	1,17

Для мерзлой древесины с влажностью более 70% $a_w = 1,5$.

11. Касательная сила резания при пилении одним зубом $F_{xзуб}$, Н,

$$F_{x \text{ зуб}} = F_{y\delta} a_c b_l;$$

или при $a_c < 0,1$ мм с учетом уравнения (31)

$$F_{x \text{ зуб}} = a_n a_w a_b b_l [(\alpha_\rho p + 0,1k) \left(-\frac{1}{\lambda} a_m^2 + \frac{0,2}{\lambda} a_m + 1 - \frac{0,01}{\lambda}\right) + \frac{\alpha t}{b} a],$$

где $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$; $\rho = \rho_o + \Delta_\rho$; ρ – в миллиметрах.

12. В пропиле находится несколько зубьев, поэтому средняя касательная сила резания за оборот пилы (окружная сила резания) будет

$$F_x = F_{x \text{ зуб}} \frac{I}{t_3}.$$

13. Мощность пиления P , кВт,

$$P = \frac{F_x V}{1000}.$$

14. Нормальная сила резания F_z , Н,

при $a_c \geq 0,1$ мм

$$F_z = [0,5\alpha_\rho^2 (\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50} - (a_c - 0,1) \left(k + \frac{\alpha t}{b}\right) \text{tg}(90^\circ - \delta - \varphi)] a_n a_w a_b b_l \frac{t}{t_3},$$

при $a_c < 0,1$ мм

$$F_z = a_{\text{п}} a_w a_B b_{\text{л}} \frac{l}{t_3} 0,5 \alpha_{\rho}^2 (\alpha_{\rho} p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50}.$$

15. Определяется сила сопротивления подаче и нормальная к ней. На расчетных схемах (рис. 45) на середине дуги контакта приложены окружные силы резания F_x и F_z .

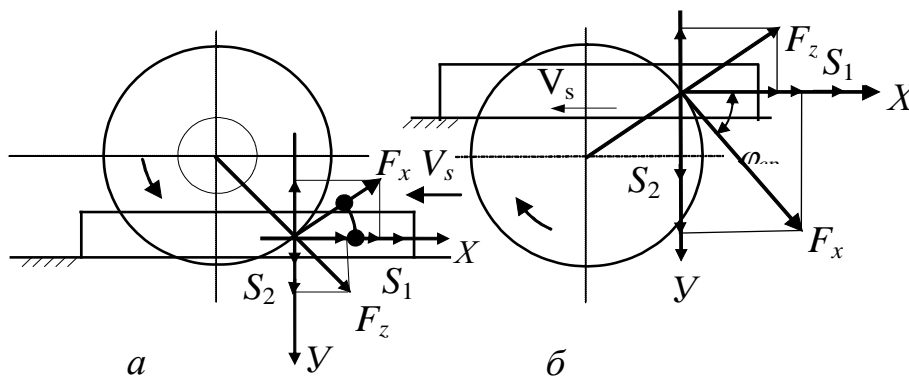


Рис. 45. Схемы к расчету сил S_1 и S_2 при встречном пилении с расположением пилы:
 а – верхним; б – нижним

Сила сопротивления подаче направлена по оси X и равна:

– для станка с верхним расположением пильного вала

$$S_1 = \sum F_x = F_x \sin \varphi_{cp} + F_z \cos \varphi_{cp};$$

– для станка с нижним расположением пильного вала

$$S_1 = \sum F_x = F_x \cos \varphi_{cp} + F_z \sin \varphi_{cp}.$$

Сила, нормальная к направлению подачи, направлена по оси Y и равна:

– для станка с верхним расположением пильного вала

$$S_2 = \sum F_y = F_z \sin \varphi_{cp} - F_x \cos \varphi_{cp};$$

– для станка с нижним расположением пильного вала

$$S_2 = \sum F_y = F_x \sin \varphi_{cp} - F_z \cos \varphi_{cp}.$$

Аналогично выводятся формулы для попутного пиления древесины.

10.8. Пример решения прямой задачи

Дано. На круглопильном станке с нижним расположением пильного вала и механической подачей продольно распиливаются сосновые доски толщиной $t = 40$ мм. Влажность досок $W = 20\%$. Скорость подачи $V_s = 42$ м/мин. Пила: 3420-0195 по ГОСТ 980-80, диаметр $D = 450$ мм, толщина диска $S = 2,5$ мм, число зубьев $z = 60$, угол резания $\delta = 55^\circ$, частота вращения пильного вала $n = 2500$ мин⁻¹. Высота стола над центром пилы $h = 90$ мм, период стойкости пилы $T = 240$ мин.

Требуется определить шероховатость распиленных поверхностей, силы и мощность механизма главного движения.

Решение. 1. Углы контакта:

$$\varphi_{\text{вых}} = \arccos \frac{h}{R} = \arccos \frac{90}{225} = 67,5^\circ;$$

$$\varphi_{\text{вх}} = \arccos \frac{h+t}{R} = \arccos \frac{90+40}{225} = 54,5^\circ;$$

$$\varphi_k = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}} = 67,5^\circ - 54,5^\circ = 13^\circ;$$

$$\varphi_{cp} = \mu = (\varphi_{\text{вх}} + \varphi_{\text{вых}}) / 2 = (54,5 + 67,5) / 2 = 61^\circ.$$

2. Размеры срезаемого слоя:

– длина срезаемого слоя

$$l = \pi D \varphi_k / 360^\circ = 3,14 \cdot 450 \cdot 13 / 360 = 51 \text{ мм};$$

– ширина пропила

$$b = S + 2S' = 2,5 + 2 \cdot 0,6 = 3,7 \text{ мм};$$

– подача на зуб

$$S_z = 1000V_s / (zn) = 1000 \cdot 42 / (60 \cdot 2500) = 0,28 \text{ мм};$$

– средняя толщина срезаемого слоя

$$a_c = \frac{b}{b_L} S_z \sin \mu = \frac{3,7}{2,5} 0,28 \sin 61 = 0,36 \text{ мм}.$$

3. Окружной шаг зубьев пилы

$$t_3 = \pi D / z = 3,14 \cdot 450 / 60 = 23,55 \text{ мм}.$$

4. Шероховатость распиленной поверхности при $S_z = 0,28 \text{ мм}$ и $\varphi_{\text{вых}} = 67,5^\circ$

$$R_m = \frac{500 - 320}{0,75 - 0,15} (0,28 - 0,15) + 320 = 359 \text{ мкм}.$$

5. Скорость главного движения резания

$$V = \pi D n / 60000 = 3,14 \cdot 450 \cdot 2500 / 60000 = 59 \text{ м/с}.$$

6. Касательное давление стружки на переднюю грань зуба для продольно-торцового резания древесины сосны

$$k = (0,196 + 0,00392 \varphi_8) \delta + (0,0686 + 0,00147 \varphi_8) V_1 - (5,39 + 0,147 \varphi_8) = (0,196 + 0,00392 \cdot 61) 55 + (0,0686 + 0,00147 \cdot 61) 59 - (5,39 + 0,147 \cdot 61) = 18,89 \text{ МПа}.$$

7. Фиктивная сила резания для древесины сосны

$$p = 3,924 + 0,0353 \varphi_8 = 3,924 + 0,0353 \cdot 61 = 6,1 \text{ Н/мм}.$$

8. Величина затупления режущей кромки зуба

$$\Delta \rho = \gamma_{\Delta} \ln TK_n K_u / 1000 = 0,001 \cdot 51 \cdot 2500 \cdot 240 \cdot 0,9 \cdot 0,9 / 1000 = 24,8 \text{ мкм}.$$

9. Коэффициент затупления при $\rho_o = 10 \text{ мкм}$

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta \rho}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{18,89}{6,1}) \frac{24,8}{10 + 50} = 1,54.$$

10. Удельная сила резания

$$F_{y\partial} = a_{\pi} a_w a_B \left[\frac{\alpha_{\rho} P}{a_c} + k + \frac{\alpha t}{b} \right] =$$

$$= 1 \cdot 1,07 \cdot 1 \left[\frac{1,54 \cdot 6,1}{0,36} + 18,89 + \frac{0,72 \cdot 40}{3,7} \right] = 56,46 \text{ МПа.}$$

11. Касательная сила резания при пилении одним зубом

$$F_{x \text{ зуб}} = F_{y\partial} a_c b_l = 56,46 \cdot 0,36 \cdot 2,5 = 50,8 \text{ Н.}$$

12. Средняя касательная сила резания за оборот пилы (окружная сила резания)

$$F_x = F_{x \text{ зуб}} \frac{l}{t_3} = 50,8 \frac{51}{23,55} = 110 \text{ Н.}$$

13. Мощность пиления

$$P = \frac{F_x V}{1000} = \frac{110 \cdot 59}{1000} = 6,49 \text{ кВт.}$$

14. Нормальная сила резания F_z , Н

$$F_z = [0,5\alpha_{\rho}^2 (\alpha_{\rho} p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50} - (a_c - 0,1)(k + \frac{\alpha t}{b}) \text{tg}(90^{\circ} - \delta - \varphi)] a_{\pi} a_w a_B b_l \frac{t}{t_3} =$$

$$= [0,5 \cdot 1,54^2 (1,54 \cdot 6,1 + 0,1 \cdot 18,89) \frac{34,8}{34,8 + 50} - (0,36 - 0,1)(18,89 + \frac{0,72 \cdot 40}{3,7}) \cdot$$

$$\cdot \text{tg}(90^{\circ} - 55 - 20)] \cdot 1 \cdot 1,07 \cdot 1 \cdot 2,5 \frac{51}{23,55} = 21,0 \text{ Н.}$$

15. Сила сопротивления подаче и нормальная к ней

$$S_1 = \sum F_x = F_x \cos \varphi_{cp} + F_z \sin \varphi_{cp} = 110 \cos 61 + 21 \sin 61 = 71,7 \text{ Н.}$$

$$S_2 = \sum F_y = F_x \sin \varphi_{cp} - F_z \cos \varphi_{cp} = 110 \sin 61 - 21 \cos 61 = 86,0 \text{ Н.}$$

10.9. Алгоритм решение обратной задачи

В обратной задаче по заданной мощности электродвигателя ме-

ханизма главного движения, количеству пил в поставе, значениям высот пропила и другим параметрам режимов резания определяют скорости подач. При расчете скоростей подач используют ограничения подачи на зуб по заполнению впадин зубьев опилками, по требуемой шероховатости распиленных поверхностей, по мощности привода и динамической устойчивости пилы. За рабочее значение подачи на зуб принимают наименьшее из указанных четырех значений, по этому значению рассчитывают скорость подачи. Результаты расчетов сводят в таблицу.

Порядок решения. 1. Определяют минимальный диаметр пилы. Полученный диаметр пилы увеличивают на 100 мм ($D \leq 710$ мм) или 200 мм ($D > 710$ мм) для переточек и округляют в большую сторону до стандартного значения. По табл. 17 выбирают диаметр посадочного отверстия d , толщину диска S и число зубьев z . Окружной шаг зубьев, мм: $t_3 = \pi D/z$.

2. По табл. 19 и формулам (98), (99) находят углы входа, выхода, средний угол на середине дуги контакта и длину срезаемого слоя.

3. Находят ширину пропила, мм: $b = S + 2S'$. Длина режущей кромки для разведенных зубьев $b_n = S$; для плющенных зубьев $b_n = b$.

4. Максимально допустимая подача на зуб S_{z1} , мм, ограниченная требованием к шероховатости распиленных поверхностей, находится по табл. 21.

5. Вычисляется максимально допустимая подача на зуб S_{z2} , мм, ограниченная вместимостью впадин зубьев:

$$S_{z2} = \theta_3^2 / (\sigma t),$$

где θ – коэффициент формы зуба (табл. 22); σ – коэффициент напряженности впадины зуба; $\sigma = 1$ для разведенных и $\sigma = 0,8$ для

площеных зубьев; t – высота пропила, мм.

Таблица 22

Коэффициент формы зуба круглых стальных пил

Передний угол γ , град	Коэффициент θ при z , равном						
	24	36	48	60	72	96	120
35	0,23	0,24	0,25	0,25	0,25	–	–
20	–	0,25	0,26	0,27	–	–	–
0	–	–	–	–	0,48	0,50	0,51
-25	–	–	–	–	0,46	0,47	0,47

б. Определяется максимально допустимая подача на зуб S_{z3} , мм, ограниченная мощностью привода. Предварительное значение частоты вращения пильного вала, мин^{-1} , при скорости главного движения $V_1 = 50 \text{ м/с}$:

$$n_1 = 60000V_1 / (\pi D).$$

По табл. 20 находят максимально допустимую частоту вращения пильного диска n_{max} . Рабочее значение частоты вращения пильного диска $n_1 \leq n < n_{\text{max}}$. Если это условие не

выполняется, то следует выбрать пильный диск большей толщины.

Скорость главного движения при рабочей частоте пильного диска, м/с, $V = \pi D n / 60000$.

Фиктивная сила резания древесины сосны, Н/мм,

$$p = 3,924 + 0,0353 \varphi_{\theta}.$$

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

$$k = (0,196 + 0,00392 \varphi_{\theta}) \delta + (0,0686 + 0,00147 \varphi_{\theta}) V_1 - (5,39 + 0,147 \varphi_{\theta}),$$

где $\varphi_в$ – угол встречи режущей кромки с волокнами, град., при продольном пилении принимают $\varphi_в = \varphi_{ср}$;

δ – угол резания зуба, град;

V_1 – скорость резания, м/с, принимается из следующего условия: при $V \leq 50$ м/с $V_1 = 90 - V$, иначе $V_1 = V$.

Величина затупления режущей кромки зуба, прошедшего в древесине за время между переточками путь L , мкм,

$$\Delta\rho = \gamma_{\Delta}L = \gamma_{\Delta} \ln TK_{п}K_u / 1000.$$

Коэффициент затупления при $\rho_0 = 10$ мкм

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_{\rho}}{\rho_0 + 50}.$$

Касательная сила резания одним зубом, Н,

$$F_{x \text{ зуб}} = \frac{1000 P \eta t_3}{V i},$$

где P – мощность электродвигателя привода пильного вала, кВт;

η – КПД привода: для встроенного электропривода $\eta = 0,9$; для привода с ременной передачей $\eta = 0,8$;

i – количество пил, приводимых электродвигателем;

t_3 – окружной шаг зубьев, мм;

l – длина дуги контакта зуба с заготовкой, мм.

Средняя толщина срезаемого слоя, мм. Сначала находят значение выражения

$$m = \frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w a_b d}.$$

Если $m \leq 1$, то толщину срезаемого слоя a_m находят по приведенной ниже формуле для микрослоев

$$a_m = \frac{1}{2} \left[\left(0,2 + \frac{\alpha t \lambda}{bd} \right) - \sqrt{\left(0,2 + \frac{\alpha t \lambda}{bd} \right)^2 - 4[0,01 + \lambda(m-1)]} \right],$$

где $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$; $\rho = \rho_o + \Delta_\rho$; ρ – радиус закругления режущей кромки в миллиметрах, иначе a_c находят по уравнению для макрослоев:

$$a_c = \frac{\left(\frac{F_{xзуб}}{a_{II} a_w a_B b_L} - \alpha_\rho p \right) b}{(kb + \alpha t)}.$$

Для приближенных расчетов при $a_m < 0,1$ мм

$$a_c = \frac{\left(\frac{F_{xзуб}}{a_{II} a_w a_B b_L} - (\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50} \right) b}{(k_\mu b + \alpha t)},$$

где k_μ – касательное давление микрослоя на переднюю поверхность лезвия, МПа:

$$k_\mu = \frac{500(\alpha_\rho p + 0,1k)}{\rho + 50}.$$

Если a_c получается с отрицательным знаком, то это означает, что для пиления с данным режимом не хватает мощности.

Подача на зуб S_z , мм,

$$S_{z3} = \frac{a_c l b_L}{tb} \quad \text{или} \quad S_{z3} = \frac{a_c b_L}{b \sin \varphi_{cp}}.$$

7. Вычисляется максимальная подача на зуб по динамической устойчивости пилы [14]. При продольном пилении периферийная зона пилы нагревается сильнее центральной. При дости-

жении разности температур на линии окружности впадин и в зоне зажимных фланцев некоторого критического значения $\Delta T_{\text{ду}}$ пила начинает терять динамическую устойчивость. Значения $\Delta T_{\text{ду}}$ приведены в табл. 23.

Способ охлаждения пил на станках учитывают коэффициентом m_o , который принимают равным:

– при пилении без охлаждения

$$m_o = 0,85/A, \quad (109)$$

– при охлаждении водовоздушной смесью

$$m_o = 0,85 Q_{\text{жс}}^{0,17} / B, \quad (110)$$

– при охлаждении пилы водой

$$m_o = 0,85 Q_{\text{жс}}^{0,24} / B. \quad (111)$$

Значения коэффициентов А, Б, В рассчитывают по следующим формулам:

$$A = 12,3 \cdot 10^6 \frac{K_T}{D^{1,3} n^{0,4} S^{0,5}}, \quad (112)$$

$$B = 5,85 \cdot 10^4 K_T D^{-0,8} n^{-0,15} S^{-0,5} Q_{\text{жс}}^{-0,17}, \quad (113)$$

$$B = 1,85 \cdot 10^4 K_T D^{-0,65} n^{-0,075} S^{-0,5} Q_{\text{жс}}^{-0,24}, \quad (114)$$

где $Q_{\text{жс}}$ – расход жидкости на один диск, кг/ч (табл. 24);

K_T – коэффициент, учитывающий долю мощности резания, расходуемую на нагрев диска пилы. Для пил $D \leq 500$ мм без охлаждения $K_T = 0,03$, при охлаждении водовоздушной смесью или водой $K_T = 0,01$. Для пил большего диаметра данных по K_T нет.

Таблица 23

Разница температур по радиусу диска пилы, соответствующая
началу потери динамической устойчивости диска

Диаметр		Значения $\Delta T_{\text{ду}}^{\text{min}}$, °С, при $V = 50$ м/с и S , мм							
пи- лы, мм	флан- цев, мм	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8
250	100	81,6	116,8	157,3	–	–	–	–	–
315	100	–	–	59,5	79,0	100,8	124,9	–	–
360	100	–	–	–	50,7	65,8	82,4	110,3	–
400	125	–	–	–	43,0	56,3	71,0	95,7	–
450	125	–	–	–	–	37,2	47,9	65,8	86,0
500	125	–	–	–	–	–	35,2	49,6	65,7
560	160	–	–	–	–	–	28,7	41,4	55,6

Окончание табл. 23

Диаметр		Значения $\Delta T_{\text{дв}}^{\text{min}}$, °С, при $V = 50$ м/с и S , мм									
пи- лы, мм	флан- цев, мм	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,6	4,0	4,5	5,0	5,5
630	160	17,4	26,5	36,9	44,4	–	–	–	–	–	–
710	160	7,9	14,2	21,3	26,5	32,0	–	–	–	–	–
800	160	–	–	7,7	10,8	14,1	21,5	–	–	–	–
900	200	–	–	–	–	11,1	17,7	25,0	–	–	–
1000	200	–	–	–	–	–	9,0	14,2	21,5	–	–
1250	240	–	–	–	–	–	–	3,6	8,0	13,0	–
1500	300	–	–	–	–	–	–	–	7,7	11,3	15,3

Таблица 24

Расход жидкости на охлаждение пыльных дисков

Параметр	Значение параметра при $Q_{\text{ж}}$, кг/ч						
	3	5	10	20	30	60	90
$Q_c^{0,17}$	1,21	1,31	1,48	1,66	1,78	2,01	2,15
$Q_c^{0,24}$	2,26	2,67	2,94	3,16	3,33	3,48	3,61

Подача на зуб по динамической устойчивости, мм:

– при $a \geq 0,1$ мм

$$S_{z4} = \frac{6 \cdot 10^7 m_o \Delta T_{\text{дУ}}}{a_{\text{п}} a_{\text{в}} a_{\text{б}} t z n} \frac{\alpha_{\rho} p b_{\text{л}}}{\sin \varphi_{\text{ср}}}, \quad (115)$$

– при $a < 0,1$ мм

$$S_{z4} = \frac{6 \cdot 10^7 m_o \Delta T_{\text{дУ}}}{a_{\text{п}} a_{\text{в}} a_{\text{б}} t z n} \frac{(\alpha_{\rho} p + 0,1k) \rho b_{\text{л}}}{(\rho + 50) \sin \varphi_{\text{ср}}}. \quad (116)$$

8. Определяются скорости подач. Для каждого значения изменяемого параметра (например, высоты пропила или числа пил в поставе) найдены S_{z1} , S_{z2} , S_{z3} , S_{z4} . За рабочее значение подачи на зуб S_{zp} принимается минимальное из указанных четырех. Скорость подачи, м/мин, $V_s = S_{zp} z n / 1000$.

10.10. Пример решения обратной задачи

Дано. На круглопильном станке с верхним расположением пильного вала и механической подачей продольно распиливаются березовые доски толщиной $t = 25; 32; 40; 50$ мм. Влажность досок $W = 20\%$.

Мощность электродвигателя механизма главного движения $P = 7$ кВт, КПД привода $\eta = 0,94$, частота вращения пильного

вала $n = 2900 \text{ мин}^{-1}$. Шероховатость распиленных поверхностей $R_m = 320 \text{ мкм}$.

Требуется определить скорости подачи и построить график скоростей подачи.

Решение. Для наглядности решаемой задачи строится расчетная схема (см. рис. 43,а). Расчет выполняется в следующем порядке.

1. Минимальный диаметр пилы, необходимый для пиления самой толстой доски

$$D_{\text{мин}} = 2(t + r_{\phi} + a_1 + a_2) = 2(50 + 62,5 + 10 + 5) = 255 \text{ мм.}$$

Для работы выбираем пилу 3420-0362 по ГОСТ 9769-79. Диаметр пилы $D = 400 \text{ мм}$, ширина пропила $b = 4,1 \text{ мм}$, толщина диска $S = 2,8 \text{ мм}$, число зубьев $z = 36 \text{ шт.}$, передний угол лезвия $\gamma = 20^\circ$, зубья оснащены твердосплавными пластинами марки ВК15 и имеют форму плющенных зубьев. Принимаем период стойкости $T = 10 \text{ ч}$, или $T = 600 \text{ мин}$.

Окружной шаг зубьев

$$t_3 = \pi D / z = 3,14 \cdot 400 / 36 = 34,9 \text{ мм.}$$

Высота центра пилы над столом

$$h = D/2 - 5 = 400/2 - 5 = 195 \text{ мм.}$$

2. Углы контакта (результаты расчетов сведены в табл. 25):

$$\varphi_{\text{вых}} = \arccos \frac{h - t}{R} = \arccos \frac{195 - 25}{200} = 31,5^\circ;$$

$$\varphi_{\text{вх}} = \arccos \frac{h}{R} = \arccos \frac{195}{200} = 12,5^\circ;$$

$$\varphi_{\text{к}} = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}} = 31,5^\circ - 12,5^\circ = 19^\circ;$$

$$\varphi_{cp} = \mu = (\varphi_{вх} + \varphi_{вых})/2 = (12,5+31,5)/2 = 22^\circ.$$

Таблица 25

Результаты расчетов режимов пиления круглой пилой

Наименование	Обозначение	Размерность	Высота пропила t , мм			
			25	32	40	50
Углы контакта:	$\varphi_{вых}$	град.	31,5	35,5	39	43,5
	$\varphi_{вх}$	град.	12,5	12,5	12,5	12,5
	φ_k	град.	19	23	26,5	31
	φ_{cp}	град.	22	24	25,75	28
Длина дуги контакта	l	мм	66,29	80,24	92,45	108,15
Подача на зуб:						
– по шероховатости	S_{z1}	мм	0,45	0,45	0,45	0,45
– по производительности пилы	S_{z2}	мм	0,436	0,34	0,27	0,218
Скорость резания	V	м/с	60,7	60,7	60,7	60,7
Фиктивная сила резания	p	Н/мм	4,7	4,77	4,83	4,91
Касательное давление	k	МПа	17,1	17,68	18,28	18,48
Затупления режущей кромки	$\Delta\rho$	мкм	12,14	14,7	16,9	19,8
Коэффициент затупления	α_p	-	1,27	1,33	1,39	1,45
Сила резания одним зубом	$F_{хзуб}$	Н	57	47,15	40,9	34,98
Толщина срезаемого слоя:						
для микрослоев	$a_{см}$	мм	–	–	0,049	0,028
для микрослоев (приближен-	$a_{см}$	мм	0,14	0,1	0,073	0,047

но)						
для макрослоев	a_c	мм	0,215	0,101	0,03	-0,029
принято	a_c	мм	0,215	0,1	0,049	0,028
Подача на зуб:						
– по мощности	S_{z3}	мм	0,57	0,25	0,11	0,06
– по динамической устойчивости	S_{z4}	мм	3,61	2,48	1,71	1,17
Подача на зуб рабочая	S_p	мм	0,436	0,25	0,11	0,06
Скорость подачи	V_s	м/мин	45,5	26,1	11,5	6,3

Длина дуги контакта пилы с доской

$$l = \pi D \varphi_k / 360^\circ = 3,14 \cdot 400 \cdot 19 / 360 = 66,29 \text{ мм.}$$

3. Ширина пропила. Для выбранной пилы с твердосплавными пластинами $b = 4,1$ мм, длина режущей кромки $b_n = 4,1$ мм.

4. Максимально допустимая подача на зуб S_{z1} , мм, ограниченная требованием к шероховатости распиленных поверхностей, находится по табл. 21:

$$S_{z1} = 0,45 \text{ мм.}$$

5. Максимально допустимая подача на зуб S_{z2} , мм, ограниченная вместимостью впадин зубьев,

$$S_{z2} = \theta t_3^2 / (\sigma t) = 0,25 \cdot 34,9 / (0,8 \cdot 25) = 0,436 \text{ мм.}$$

6. Максимально допустимая подача на зуб S_{z3} , ограниченная мощностью привода.

6.1. Скорость главного движения

$$V = \pi D n / 60000 = 3,14 \cdot 400 \cdot 2900 / 60000 = 60,7 \text{ м/с.}$$

6.2. Фиктивная сила резания древесины сосны

$$p = 3,924 + 0,0353 \varphi_8 = 3,924 + 0,0353 \cdot 22 = 4,7 \text{ Н/мм.}$$

6.3. Касательное давление стружки на переднюю поверхность зуба

$$k = (0,196 + 0,00392 \varphi_8) \delta + (0,0686 + 0,00147 \varphi_8) V_1 - (5,39 + \quad + 0,147 \varphi_8) = (0,196 + 0,00392 \cdot 22) 70 + (0,0686 + 0,00147 \cdot 22) 60,7 - (5,39 + 0,147 \cdot 22) = 17,1 \text{ МПа.}$$

6.4. Величина затупления режущей кромки зуба

$$\Delta \rho = \gamma_{\Delta} \ln TK_n K_u / 1000 = 0,00013 \cdot 66,29 \cdot 2900 \cdot 600 \cdot 0,9 \cdot 0,9 / 1000 = \quad = 12,14 \text{ мкм.}$$

6.5. Коэффициент затупления при $\rho_o = 10 \text{ мкм}$

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta \rho}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{17,1}{4,7}) \frac{12,14}{10 + 50} = 1,27.$$

6.6. Касательная сила резания одним зубом

$$F_{x \text{ зуб}} = \frac{1000 P \eta t_3}{V l i} = \frac{1000 \cdot 7 \cdot 0,94 \cdot 34,9}{60,7 \cdot 66,29 \cdot 1} = 57 \text{ Н.}$$

Средняя толщина срезаемого слоя

$$a_c = \frac{\left(\frac{F_{xзуб}}{a_{II} a_w a_B b_{II}} - \alpha_{\rho} p\right) b}{(kb + \alpha t)} = \frac{\left(\frac{57}{1,25 \cdot 1,07 \cdot 1 \cdot 4,1} - 1,27 \cdot 4,7\right) 4,1}{(17,1 \cdot 4,1 + 0,57 \cdot 25)} = 0,215 \text{ мм.}$$

Для $t = 40$ и 50 мм $a_c < 0,1$ мм. Выполним расчет по формулам

$$k_{\mu} = \frac{500(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{\rho + 50} = \frac{500(1,39 \cdot 4,83 + 0,1 \cdot 18,28)}{26,9 + 50} = 55,75 \text{ МПа;}$$

$$a_c = \frac{\left(\frac{F_{xзуб}}{a_{II} a_w a_B b_{II}} - (\alpha_{\rho} p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50}\right) b}{(k_{\mu} b + \alpha t)} = \frac{\left(\frac{40,9}{1,25 \cdot 1,07 \cdot 1 \cdot 4,1} - (1,39 \cdot 4,83 + 0,1 \cdot 18,28) \frac{26,9}{26,9 + 50}\right) 4,1}{(55,75 \cdot 4,1 + 0,57 \cdot 40)} = 0,073 \text{ мм}$$

6.7. Подача на зуб S_{z3} , мм:

$$S_{z3} = \frac{a_c b_{II}}{tb} = \frac{0,21 \cdot 66,29 \cdot 4,1}{25 \cdot 41} = 0,55 \text{ мм.}$$

7. Максимальная подача на зуб по динамической устойчивости пилы.

7.1. Пила работает без охлаждения. Значение коэффициента А:

$$A = 12,3 \cdot 10^6 \frac{K_T}{D^{1,3} n^{0,4} S^{0,5}} = 12,3 \cdot 10^6 \frac{0,03}{400^{1,3} 2900^{0,4} 2,8^{0,5}} = 3,765.$$

7.2. Значение коэффициента m :

$$m = 0,85/A = 0,85/3,765 = 0,225.$$

7.3. Подача на зуб по динамической устойчивости

$$S_{z4} = \frac{\frac{6 \cdot 10^7 m \Delta T_{\text{ду}}}{a_{\text{п}} a_{\text{w}} a_{\text{B}} t z n} \frac{\alpha_{\rho} p b_{\text{л}}}{\sin \varphi_{\text{ср}}}}{kb + \alpha t} = \frac{6 \cdot 10^7 \cdot 0,225 \cdot 95,7}{1,25 \cdot 1,07 \cdot 1} \frac{1,27 \cdot 4,7 \cdot 4,1}{\sin 22} = 3,61 \text{ мм}$$

8. Скорости подач

$$V_s = S_{zp} z n / 1000 = 0,436 \cdot 36 \cdot 2900 / 1000 = 45,5 \text{ м/мин.}$$

9. График скоростей подач приведен на рис. 46.

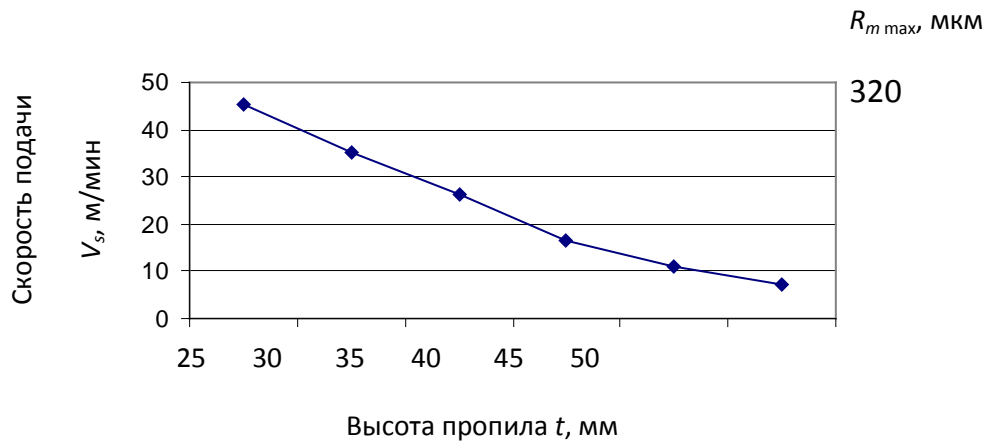


Рис. 46. График скоростей подач

11. Цилиндрическое фрезерование древесины

11.1. Общие сведения

Фрезерование – процесс обработки материала вращающимися лезвиями, в результате которого припуск снимается путем последовательного срезания отдельных серповидных стружек.

Фрезерование применяется для придания заготовкам заданной формы, размеров и шероховатости.

По принципу фрезерования работают станки фрезерные, фуговальные, рейсмусовые, четырехсторонние продольно-фрезерные и др.

Фрезерование бывает встречное и попутное. Встречное фрезерование наиболее распространено. При нем проекция вектора скорости резания на направление подачи направлена навстречу вектору скорости подачи. При попутном фрезеровании

направление вращения лезвий в зоне резания совпадает с направлением подачи заготовки.

11.2. Режущий инструмент

В качестве режущего инструмента при цилиндрическом фрезеровании используют фрезы насадные цельные и сборные, ножевые валы. Широкое применение получили насадные цилиндрические сборные фрезы со вставными ножами по ГОСТ 14956-79. По способу посадки на шпинделе эти фрезы выпускаются пяти типов:

- тип 1 – с непосредственной посадкой на шпиндель;
- тип 2 – с креплением на двух цангах гайками;
- тип 3 – с креплением на двух цангах через промежуточные упорные кольца;
- тип 4 – с креплением на цанге;
- тип 5 – с креплением на патроне.

Фрезы типов 1, 4 и 5 изготавливают с ножами по ГОСТ 6567-75 из стали, например, 8Х6НФТ или по ГОСТ 14956-79 с твердосплавными пластинами. Фрезы типов 2 и 3 оснащаются ножами по ГОСТ 6567-75 из инструментальной стали.

Величина номинальных диаметров новых фрез соответствует нормализованному ряду 80, 100, 125, 140, 160, 180 мм. Диаметр посадочных отверстий принимается из ряда 22, 27, 32 и 40 мм. Угловые параметры приведены в табл. 26.

Предельно допустимая частота вращения фрез n , мин⁻¹, зависит от их диаметра:

Диаметры фрез, мм	до 100	125	140	160	180
Предельно допустимая частота вращения фрез n , мин ⁻¹ :					
цельных	12000	10000	9000	8000	6200
сборных	12000	9000	8000	6200	5000

Таблица 26

Угловые параметры фрез

Вид резания и обрабатываемый материал	Нормальные углы, град.		
	Передний угол γ для фрез		Задний α
	стальных	твердосплавных	
Фрезерование древесины:			
продольное	(20...25)/(10...15)	(20...30)/(10...25)	15/10
поперечное	(35...40)/(30...35)	30/30	10/10
торцовое	(30...35)/(25...30)	30/25	20/15
Фрезерование кромок ДСтП и ДВП	20...25	15...20	15...20

Примечание. В числителе - для хвойных пород, в знаменателе – для твердолиственных.

Период стойкости, ч, дереворежущих фрез зависит от материала лезвий и породы древесины (табл. 27) [15]:

Таблица 27

Период стойкости дереворежущих фрез, ч

Материал лезвий:	Хвойная древесина	Твердолиственная древесина
Х6ВФ, 8Х6НФТ	2,0...2,7	1,0...1,5
8Х6ВМФ	3,0...4,0	1,8...2,7
Р6М5	3,4...4,6	2,0...3,0
ВК15	до 40	до 30

11.3. Кинематика цилиндрического фрезерования

Главное движение D_2 при фрезеровании – вращательное, оно осуществляется режущим инструментом (рис. 47). Движение подачи D_5 – прямолинейное поступательное движение заготовки. Результирующая скорость резания находится как векторная

сумма скорости главного движения и скорости подачи. Скорость главного движения равна 40...50 м/с, а скорость подачи – 8...150 м/мин. Последняя в 20...150 раз меньше скорости главного движения. Поэтому результирующую скорость резания

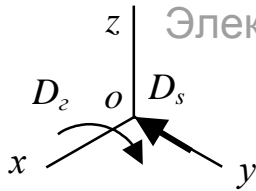


Рис. 47. Принципиальная кинематическая схема цилиндрического фрезерования

принимают равной скорости главного движения и находят по формуле, м/с,

$$V = \frac{\pi D n}{60000},$$

где D – диаметр окружности резания фрезы, мм;

n – частота вращения фрезы, мин⁻¹.

Скорость подачи при фрезеровании, м/мин,

$$V_s = \frac{S_o n}{1000} = \frac{S_z z n}{1000},$$

где S_o – величина подачи на один оборот фрезы, мм;

S_z – подача на один зуб фрезы, мм;

z – число зубьев фрезы.

11.4. Геометрия срезаемого слоя

Из схемы цилиндрического фрезерования (рис. 48) можно получить следующие геометрические параметры срезаемого слоя:

$$\cos \varphi_K = 1 - \frac{2t}{D} \qquad \sin \varphi_K = 2\sqrt{\frac{t}{D} - \frac{t^2}{D^2}}$$

$$\varphi_{K(\text{рад})} \approx 2\sqrt{\frac{t}{D}} \qquad \varphi_{K(\text{град})} \approx 115\sqrt{\frac{t}{D}}$$

$$\cos \frac{\varphi_K}{2} = \sqrt{1 - \frac{t}{D}} \qquad \sin \frac{\varphi_K}{2} = \sqrt{\frac{t}{D}}$$

$$a_{\max} = S_z \sin \varphi_K \approx 2S_z \sqrt{\frac{t}{D}} \qquad a_{\text{ср}} = S_z \sin \frac{\varphi_K}{2} = S_z \sqrt{\frac{t}{D}}$$

$$l_K = \frac{\pi D \varphi_K}{360} \qquad l_K = \sqrt{tD}$$

В приведенных формулах φ_K – угол контакта лезвия с древесиной, t – глубина фрезерования, a – толщина срезаемого слоя и l – длина дуги контакта, мм. При $\varphi_K \leq 30^\circ$ эти формулы дают достаточно точный практический результат.

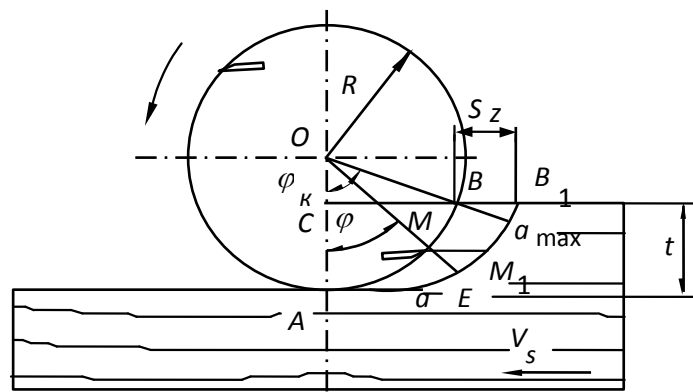


Рис. 48. Геометрия срезаемого слоя

для
тики
зуль-

11.5. Шероховатость обработанной поверхности

При цилиндрическом фрезеровании основным видом неровностей, образующихся на обработанной поверхности, является кинематическая волнистость. Гребешки волн образуются при пересечении двух окружностей резания, отстоящих друг от друга на расстоянии подачи на зуб S_z . Высота гребешков находится по формуле, мкм,

$$R_{m\max} = y = 1000l_g^2 / (4D), \qquad (117)$$

где l – длина волны (расстояние между гребешками), мм.

D – диаметр окружности, описываемой режущей кромкой лезвия, мм.

Учитывая, что при резании неизбежны вибрации и режущие кромки лезвий фрезы имеют разные радиусы вращения, принимают, что волну образует одно лезвие:

$$l_B = S_o = 1000V_s / n, \quad (118)$$

где S_o – подача за один оборот фрезы, мм;

V_s – скорость подачи, м/мин;

n – частота вращения фрезы, мин⁻¹.

Предельно допустимые значения длины волн при продольном цилиндрическом фрезеровании приведены в табл. 28.

Таблица 28

Предельно допустимая длина волн на обработанной поверхности при продольном цилиндрическом фрезеровании

Высота неровно-	Длины волн l_{θ} , мм, при диаметре окружности резания D , мм
--------------------	--

стей	60	80	100	120	140	160	180	200
$R_{m\ max}$, МКМ								
12,5	2,0	2,4	2,7	2,9	3,2	3,4	3,6	3,8
25	2,8	3,3	3,7	4,0	4,3	4,7	4,9	5,2
50	4,0	4,7	5,2	5,6	6,2	6,6	7,0	7,4
100	5,2	6,0	6,7	7,3	7,9	8,5	9,0	9,5
200	7,2	8,5	9,5	10,3	11,0	12,0	12,6	13,6

11.6. Силы резания и мощность

Фрезерование – сложный процесс резания. При движении лезвия по траектории резания изменяются многие его параметры: угол взаимодействия лезвия с заготовкой и угол перерезания волокон φ_{θ} увеличиваются от нуля до φ_{κ} , толщина срезаемого слоя растёт от нуля до максимального значения на выходе лезвия из заготовки.

Значение фиктивной силы резания для древесины сосны p , Н/мм, может быть найдено из следующих выражений:

- при продольно-торцовом резании $p_{//\perp} = 1,57 + 0,0353\varphi_{\theta}$;
- при поперечном резании $p_{\#} = 0,98$.

Касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность зуба при фрезеровании древесины сосны k , МПа:

- при продольно-торцовом резании

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

- при поперечном резании

$$k = 0,029\delta + CV' - 5,9,$$

где $\varphi_в$ – угол перерезания волокон древесины, град., непрерывно меняющийся на дуге контакта;

δ – угол резания, град.;

C – коэффициент; $C = 0,059$ при $\delta \leq 55^\circ$ и $C = 0,069$ при $\delta > 55^\circ$;

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

Удельная сила резания при толщине срезаемого слоя $a_{ср} \geq 0,1$ мм

$$F_{уд} = \left(k + \frac{\alpha \rho p}{a_{ср}}\right) a_n a_w,$$

при $a_{ср} < 0,1$ мм

$$F_{уд\mu} = a_n a_w \left[\frac{(\alpha \rho p + 0,1k)}{\rho + 50} \left(500 + \frac{\rho}{a_{ср\mu}}\right) \right].$$

Окружная сила резания. Для расчета мощности необходимо знать окружную силу резания F_{xo} , постоянно действующую в течение оборота фрезы. Она находится по следующей формуле:

$$F_{xo} = \frac{F_{y\delta} b t V_s}{60V}. \quad (119)$$

Мощность фрезерования, кВт,

$$P = \frac{F_{xo} V}{1000} = \frac{F_{y\delta} b t V_s}{60000}.$$

Для определения средней силы резания на дуге контакта при фрезеровании древесины разных пород и влажности можно воспользоваться следующими формулами:

– при $a_{cp} \geq 0,1$ мм

$$F_{x \text{ зуб}} = (\alpha_{\rho} p + ka_{cp}) b a_{\Pi} a_w;$$

– при $a_{cp} \leq 0,1$ мм

$$F_{x \text{ зуб}} = \frac{(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{\rho + 50} (\rho + 500a_{cp}) b a_{\Pi} a_w.$$

Окружная сила резания

– при $a \geq 0,1$ мм

$$F_{xo} = \frac{(\alpha_{\rho} p + ka_{cp}) b l_{\kappa} a_{\Pi} a_w}{t_3};$$

– при $a < 0,1$ мм

$$F_{xo} = \frac{(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{(\rho + 50)t_3} (\rho + 500a_{cp}) b l_{\kappa} a_{\Pi} a_w.$$

Окружная радиальная сила резания

– при $a \geq 0,1$ мм

$$F_{zo} = \left[\frac{(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{\rho + 50} [0,5\rho\alpha_{\rho}^2 - 50\text{tg}(\gamma - \varphi)] - (a - 0,1)k\text{tg}(\gamma - \varphi) \right] \frac{b l_{\kappa}}{t_3} a_n a_w;$$

– при $a < 0,1$ мм

$$F_{z0} = \left[\frac{(\alpha_{\rho} p + 0,1k)}{\rho + 50} [0,5\rho\alpha_{\rho}^2 - 50\text{tg}(\gamma - \varphi)] \right] \frac{bl_{\kappa}}{t_3} a_n a_w.$$

При решении обратных задач из выражения касательной силы резания на зубе находят среднюю толщину срезаемого слоя a_c , мм:

$$a_c = \frac{\frac{F_{xзуб}}{a_{\Pi} a_w b} - \alpha_{\rho} p}{k}, \quad (120)$$

при $a_c \leq 0,1$ мм $c = \frac{F_{xзуб}}{ba_{\Pi} a_w (\alpha_{\rho} p + 0,1k)}$; $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$;

если $c \leq 1$, то

$$a_c = 0,1 - \sqrt{\lambda(1 - c)}, \quad (121)$$

иначе значение a_c следует находить по уравнению (120) для макрослоев. В этом уравнении значение ρ подставляется в миллиметрах.

Для приближенных расчетов и $a_c \leq 0,1$ мм

$$a_c = \left(\frac{F_{xзуб}(\rho + 50)}{a_{\Pi} a_w b(\alpha_{\rho} p + 0,1k)} - \rho \right) \frac{1}{500}.$$

Сила сопротивления подаче и нормальная к ней. Силу сопротивления подаче S_1 и нормальную к ней S_2 необходимо знать при расчете тягового усилия и мощности привода механизма

подачи станка. При расчете сил S_1 и S_2 окружные силы F_{x0} и F_{z0} прикладывают на середине дуги контакта (рис. 49). При этом считают, что сила F_{z0} со знаком "плюс" направлена по радиусу фрезы от центра, а со знаком "минус" – по радиусу к центру вращения

фрезы. Силы S_1 и S_2 представляют собой суммы проекций окружных сил резания на оси X и Y. Ось X проходит параллельно вектору скорости движения подачи.

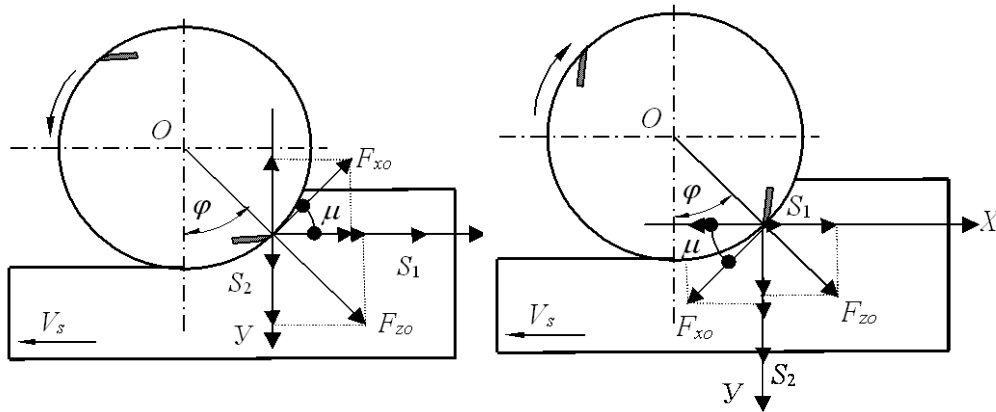


Рис. 49. Схема к расчету сил S_1 и S_2

при встречном и попутном фрезеровании

Силы S_1 и S_2 могут быть определены по следующим формулам:

– для встречного фрезерования

$$\begin{aligned} S_1 &= F_{xo} \cos \mu + F_{zo} \sin \mu, \\ S_2 &= F_{zo} \cos \mu - F_{xo} \sin \mu; \end{aligned} \quad (122)$$

– для попутного фрезерования

$$\begin{aligned} S_1 &= -F_{xo} \cos \mu + F_{zo} \sin \mu, \\ S_2 &= F_{zo} \cos \mu + F_{xo} \sin \mu, \end{aligned} \quad (123)$$

где μ – угол подачи.

11.7. Примеры решения задач

Пример 1. Дано: $V_s = 12$ м/мин, $D = 120$ мм, $n = 3000$ мин⁻¹, $z = 2$, $\delta = 60^\circ$, $t = 4$ мм, $b = 200$ мм, $\rho_0 = 5$ мкм, время резания $T_1 = 160$ мин, $t_s = \pi D / z = 3,14 \cdot 120 / 2 = 190$ мм, порода сосна.

Определить силы и мощность резания.

Решение. 1. Скорость главного движения

$$V = \pi D n / 60 = 3,14 \cdot 120 \cdot 3000 / 60000 = 19 \text{ м/с.}$$

2. Подача на один зуб

$$S_z = 1000 V_s / (z n) = 1000 \cdot 12 / (2 \cdot 3000) = 2 \text{ мм.}$$

3. Средняя толщина среза

$$a_{cp} = S_z \sqrt{t/D} = 2 \sqrt{4/120} = 0,365 \text{ мм.}$$

4. Длина дуги контакта

$$l_k = \sqrt{tD} = \sqrt{4 \cdot 120} = 21,9 \text{ мм.}$$

5. Угол контакта

$$\varphi_k = 115 \sqrt{t/D} = 115 \sqrt{4/120} = 21^\circ.$$

6. Величина прироста затупления режущих кромок лезвий за время работы

$$\Delta \rho = \gamma_{\Delta} l_k n T_1 / 1000 = 0,0008 \cdot 21,9 \cdot 3000 \cdot 160 / 1000 = 8,4 \text{ мкм.}$$

7. Фиктивная сила резания при $\varphi_b = \varphi_k / 2$

$$p = 1,565 + 0,0353 \varphi_b = 1,565 + 0,0353 \cdot 21 / 2 = 1,94 \text{ Н/мм.}$$

8. Касательное давление на переднюю грань

$$k = (0,196 + 0,00392 \varphi_b) \delta + (0,0686 + 0,00147 \varphi_b)(90 - V) - (5,39 + 0,147 \cdot \varphi_b) = (0,196 + 0,00392 \cdot 10,5) \cdot 60 + (0,0686 + 0,00147 \cdot 10,5)(90 - 19) - (5,39 + 0,147 \cdot 10,5) = 13,27 \text{ МПа.}$$

9. Коэффициент затупления

$$\alpha_\rho = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta \rho}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{13,27}{1,94}) \frac{8,4}{5 + 50} = 1,26.$$

10. Окружная сила резания

$$F_{x.o} = a_n a_w (\alpha_\rho p + k a_{cp}) bl_k / t_3 = 1 \cdot 1 (1,26 \cdot 1,94 + 13,27 \cdot 0,365) \times \\ \times 200 \cdot 21,9 / 190 = 171,6 \text{ Н.}$$

11. Мощность резания

$$P = F_{x.o} V / 1000 = 171,6 \cdot 19 / 1000 = 3,26 \text{ кВт.}$$

12. Окружная радиальная сила резания

$$F_{z.o} = \left[\frac{(\alpha_\rho p + 0,1k)}{\rho + 50} [0,5 \rho \alpha_\rho^2 - 50 \text{tg}(\gamma - \varphi)] - (a - 0,1) k \text{tg}(\gamma - \varphi) \right] \frac{bl_k}{t_3} a_n a_w = \\ = \left[\frac{(1,26 \cdot 1,94 + 0,1 \cdot 13,27)}{13,4 + 50} [0,5 \cdot 13,4 \cdot 1,26^2 - 50 \text{tg}(30^\circ - 15^\circ)] - \right. \\ \left. - (0,365 - 0,1) 13,27 \text{tg}(30^\circ - 15^\circ) \right] \frac{200 \cdot 21,9}{190} \cdot 1 \cdot 1 = -25,5 \text{ Н.}$$

Пример 2. Проектируется новый продольно-фрезерный станок для обработки древесины сосны влажностью $W = 10\%$. Диаметр фрезы $D = 128$ мм, частота вращения шпинделя $n = 5000$ мин⁻¹, число зубьев $z = 2$, угол резания $\delta = 55^\circ$, календарное время работы фрезы до переточки $T = 240$ мин, шероховатость обработанной поверхности $R_m = 100$ мкм, глубина фрезерования $t = (2; 4; 6)$ мм, ширина фрезерования $b = 50, 100$ и 150 мм.

Конструктивная скорость подачи $V_{sk} \leq 40$ м/мин.

С учетом аналогов принята мощность электродвигателя механизма главного движения $P = 3$ кВт, КПД передачи $\eta = 0,9$.

Определить скорости подач и построить график скоростей.

Решение. 1. Скорость главного движения

$$V = \pi D n / 60000 = 3,14 \cdot 128 \cdot 5000 / 60000 = 33,49 \text{ м/с.}$$

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

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

Результаты расчетов сведены в табл. 29.

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

4. Подача на зуб с ограничением по шероховатости. Длина волны по заданной шероховатости $l_s = S_z z = 7,3$ мм выбирается по табл. 28. Подача на зуб

$$S_z = l_s / z = 7,3 / 2 = 3,65 \text{ мм.}$$

5. Прирост затупления лезвий за время работы

$$\Delta \rho = \gamma_{\Delta} l_k n T K_p K_u / 1000 = 0,0008 \cdot 16,0 \cdot 5000 \cdot 240 \cdot 0,9 \cdot 0,9 / 1000 = 12,44 \text{ мкм.}$$

6. Фиктивная сила резания

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

7. Касательное давление стружки на переднюю грань

$$k = (0,196 + 0,00392 \varphi_k/2) \delta + (0,0686 + 0,00147 \varphi_k/2)(90 - V) - (5,39 + 0,147 \varphi_k/2) = (0,196 + 0,00392 \cdot 14,38/2) 55 + (0,0686 + 0,00147 \cdot 14,38/2)(90 - 33,49) - (5,39 + 0,147 \cdot 14,38/2) = 23,22 \text{ МПа.}$$

8. Коэффициент затупления

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta \rho}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{23,22}{1,82}) \frac{12,44}{5 + 50} = 1,51.$$

Таблица 29

Результаты расчетов

Параметры	Обозначение	Размер	Глубина фрезерования
			t, мм

	чение	ность	2	4	6
Скорость резания	V	м/с	33,49	33,49	33,49
Угол контакта	φ_k	град	14,38	20,33	24,90
Длина дуги контакта	l_k	мм	16,0	22,6	27,7
Подача на зуб по шероховатости	S_{z1}	мм	3,65	3,65	3,65
Прирост затупления	$\Delta\rho$	мкм	12,44	17,57	21,54
Фиктивная сила резания	ρ	Н/мм	1,82	1,92	2,0
Касательное давление	k	МПа	23,22	24,57	25,59
Коэффициент затупления	α_ρ	–	1,51	1,73	1,89
Окружная сила резания	F_{xo}	Н	80,62	80,62	80,62
Средняя сила резания на дуге контакта	$F_{xзуб}$	Н	1126,7	796,9	650,7
Средняя толщина среза при					
$b = 50$ мм	a_c	мм	0,85	0,77	0,735
$b = 100$ мм	a_c	мм	0,36	0,345	0,245
$b = 150$ мм	a_c	мм	0,204	0,081	0,021
$b = 150$ мм (перерасчет)	a_{cm}	мм	-	0,088	0,051
Подача на зуб по мощности при					
$b = 50$ мм	S_{z2}	мм	6,8	4,36	3,39
$b = 100$ мм	S_{z2}	мм	2,88	1,95	1,13
$b = 150$ мм	S_{z2}	мм	1,638	0,5	0,238

Расчетная подача на зуб при						
$b = 50$ мм	S_{zp}	мм	3,65	3,65	3,39	
$b = 100$ мм	S_{zp}	мм	2,88	1,95	1,13	
$b = 150$ мм	S_{zp}	мм	1,638	0,5	0,238	
Скорость подачи при						
$b = 50$ мм	V_s	м/мин	36,5	36,5	33,9	
$b = 100$ мм	V_s	м/мин	28,8	19,5	11,3	
$b = 100$ мм	V_s	м/мин	16,4	5,0	2,4	

9. Окружная касательная сила резания

$$F_{x,o} = 1000P\eta/V = 1000 \cdot 3 \cdot 0,9 / 33,49 = 80,62 \text{ Н.}$$

10. Средняя сила резания на дуге контакта

$$F_{x,зуб} = F_{x,o} \pi D / (I_{RZ}) = 80,62 \cdot 3,14 \cdot 128 / (14,38 \cdot 2) = 1126,7 \text{ Н.}$$

11. Средняя толщина срезаемого слоя при $b = 50$ мм:

$$a_c = \frac{F_{x,зуб}}{a_{\Pi} a_w b} - \alpha_{\rho} p = \frac{1126,7}{1 \cdot 1 \cdot 50} - 1,5 \cdot 1,82 = 0,85 \text{ мм.}$$

Для $b = 150$ мм при глубине фрезерования 2; 4 и 6 мм значения a_c получились равными соответственно 0,204; 0,081 и 0,021 мм. Последние два значения меньше величины 0,1 мм, поэтому их следует пересчитать по формуле

$$a_{cm} = \left(\frac{F_{xзуб}(\rho + 50)}{a_{\Pi} a_w b(\sigma_c p + 0,1k)} - \rho \right) \frac{1}{500} =$$

$$= \left(\frac{796,9(5 + 17,57 + 50)}{1 \cdot 1 \cdot 150(1,73 \cdot 1,92 + 0,1 \cdot 24,57)} - 5 - 17,57 \right) \frac{1}{500} = 0,088 \text{ мм.}$$

По формуле (121) для последних двух значений получилось $c = 0,92$ и $0,68$; $\lambda = 0,015$ и $0,016$; $a_{cm} = 0,065$ и $0,028$ мм.

12. Подача на зуб, ограниченная мощностью привода,

$$S_{z2} = a_c / \sqrt{t/D} = 0,85 / \sqrt{2/128} = 6,8 \text{ мм.}$$

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

13. Скорость подачи

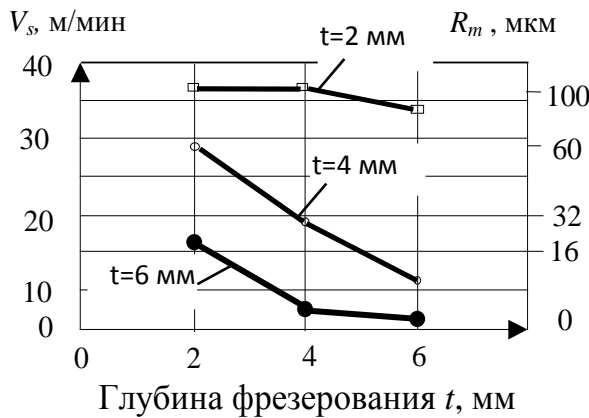


Рис. 50. График скоростей подач при фрезеровании

$$\begin{aligned} V_s &= S_{zp} z n / 1000 = \\ &= 3,65 \cdot 2 \cdot 5000 / 1000 = \\ &= 36,5 \text{ м/мин.} \end{aligned}$$

График скоростей подач приведен на рис. 50.

Из графика следует, что с увеличением глубины фрезерования при полной нагрузке электродвигателя механизма главного движения по мощности скорость подачи станка убывает.

Заключение

Монография развивает расчетный метод А.Л. Бершадского. В ней дается вывод новых формул для расчета величины силы резания по задней поверхности лезвия, коэффициента затупления, сил резания в диапазоне срезаемых микрослоев. Разница указанных значений, получаемых по методу А.Л. Бершадского и по предложенным автором формулам, невелика, но в новых формулах рассчитываемый параметр взаимосвязан с параметрами основного уравнения режима резания.

Основное уравнение режима резания имеет вид:

- для срезаемых макрослоев ($a \geq 0,1$ мм) $F_{x1} = \alpha_{\rho} p + ka$;
- для срезаемых микрослоев ($a \leq 0,1$ мм) $F_{x1\mu} = F_{z1\mu} + k_{\mu} a_{\mu}$.

Расчетные формулы:

– по А.Л. Бершадскому	– предложенные автором
$F_{x31} = (\alpha_{\rho} - 0,8)p$;	$F_{x31} = (\alpha_{\rho} p + 0,1k) \left(\frac{\rho}{\rho + 50} \right)$;
$\alpha_{\rho} = 1 + \frac{0,2\Delta\rho}{\rho_0}$;	$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta\rho}{\rho_0 + 50}$;
$F_{x1\mu} = (\alpha_{\rho} - 0,8)p + k_{\mu} a_{\mu}$;	$F_{x\mu1} = (\alpha_{\rho} p + 0,1k) \left(-\frac{1}{\lambda} a^2 + \frac{0,2}{\lambda} a + 1 - \frac{0,01}{\lambda} \right)$,
	где $\lambda = 0,01 + \rho_0^2 + 0,2\rho_0$.

$k_{\mu} = (8p + k);$ $F_{y\partial\mu} = 8p + k + \frac{(\alpha_{\rho} - 0,8)p}{a_{\mu}};$	<p>Приближенно $F_{x1\mu} = F_{xz1} + k_{\mu}a_{\mu}$,</p> $k_{\mu} = \frac{500(\alpha_{\rho}p + 0,1k)}{\rho + 50}.$ $F_{уд\mu} = \frac{(\alpha_{\rho}p + 0,1k)}{\rho + 50} \left(500 + \frac{\rho}{a_{\mu}}\right).$
---	--

Предложенные формулы связывают несколько параметров режима резания и все параметры основного уравнения режима резания. Например, коэффициент затупления α_{ρ} по А.Л. Бершадскому зависит только от величины радиуса закругления режущей кромки лезвия. В предлагаемой формуле α_{ρ} зависит от величины фиктивной силы резания p , касательного давления k и радиуса закругления ρ .

Предложенные формулы позволяют по-новому оценить процесс резания. Если ранее считалось, что сила резания по задней поверхности лезвия $F_{x.z}$ зависит только от величины радиуса закругления режущей кромки ρ , то новая формула связывает в единое целое значения ρ , p , k . Параметр касательного давления срезаемого слоя на переднюю поверхность лезвия k , характеризующий работу сил по передней поверхности, оказывает влияние на величину силы резания по задней поверхности. Таким образом, новое уравнение для силы резания по задней поверхности указывает на диалектическую взаимосвязь и взаимозависимость сил резания по передней и задней поверхностям лезвия.

Библиографический список

1. **Глебов И.Т.** Резание древесины. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2001. –150 с.
2. **Ивановский Е.Г., Василевская П.В., Лаутнер Э.М.** Новые исследования резания древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1972. – 128 с.
3. **Бершадский А.Л.** Расчет режимов резания древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1967. – 175 с.
4. **Зорев Н.Н.** Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956.
5. **Ларин М.Н.** Оптимальные геометрические параметры режущей части инструментов. – М.: Оборонгиз, 1953.
6. **Бершадский А.Л.** Справочник по расчету режимов резания древесины. – М.: Гослесбумиздат, 1962. – 124 с.
7. **Морозов В.Г.** Исследование влияния некоторых факторов режимов резания на затупление инструмента: Автореф. канд. диссертации. – М.: МЛТИ, 1967.
8. **Глебов И.Т.** Исследование процесса фрезерования лигно-углеводных древесных пластиков из листовенничной станочной стружки: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Свердловск: УЛТИ, 1968. – 265 с.
9. **Амалицкий В.В.** Оптимизация обработки цементно-стружечных плит резанием: Автореф. диссертации на соискание ученой степени докт. техн. наук. – Воронеж, 1998. – 40 с.
10. **Гиль В.И.** Разработка режимов фрезерования кромок древесноволокнистой плиты средней плотности (MDF): Автореф. диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Минск, 2004. – 20 с.

11. **Глебов И.Т., Новоселов В.Г., Швамм Л.Г.** Справочник по резанию древесины. – Екатеринбург: УГЛТА, 1999. – 190 с.

12. **Глебов И.Т., Неустроев Д.В.** Справочник по дереворежущему инструменту. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2000. – 253 с.

13. **Глебов И.Т.** Дереворежущий инструмент: Учеб. пособие. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2002. – 197 с.

14. **Стахийев Ю.М. и др.** Руководящие технические материалы по определению режимов пиления древесины круглыми пилами. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1988. – 74 с.

15. **Глебов И.Т.** Фрезерование древесины: Монография. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. – 169 с.

Предметный указатель

Анизотропность древесины 32	Лезвие 5
Взаимосвязь сил резания 51-53	– реальное 23
Виды резания древесины 31	Макронеровность 37
Влияние влажности 74	Механическое диспергирование 21
– заднего угла 73	
– породы древесины 74	Микронеровность 37
– размеров среза 76	Общий закон резания древесины 48
– скорости резания 71	
– температуры 75	Объем срезаемого слоя 24
– угла резания 72	Отказ стойкостный 19
Волнистость 37	– точностный 19

Восстановление 19	Период стойкости 19
Глубина резания 6	Пиление дисковыми пилами 108
Движение главное 7	
– касательное 9	– ленточными пилами 84
– подачи 7	Плоскость основная 10
– результирующее 9	– рабочая 10
Деформация относительная 34	– резания 10
Длина срезаемого слоя 24	Площадь срезаемого слоя 24
Допущения А.Л. Бершадского 50	Поверхность лезвия задняя 12
Единичная сила резания 42	– – передняя 11
Заготовка 5	– обработанная 6
Задний угол 28, 29	– обрабатываемая 6
Замкнутое пространство 34	– резания 6
Затупление 17	Подача 7
Зоны лезвия 42	Припуск 6
Износ 17	Производительность пилы 83
– абразивный 22	Радиус закругления 16
– окислительный 21	Разрез ствола поперечный 31
– тепловой 21	Разрез ствола радиальный 31
Кинематика резания 25	– – тангентальный 31
Коэффициент затупления 60	Расчет силы резания 60
Критерий затупления 18	Режим резания 78, 79

Режущие кромки 12, 16	Угол в плане 15
Резание древесины 5	– задний 12
– – поперечное 32	– заострения 12
– – поперечно-продольное 33	– наклона 15
– – поперечно-торцовое 33	– передний 12
– – продольное 32	– подачи 9
– – продольно-торцовое 32	– резания 13
– – торцовое 32	– скорости резания – 9
Свойства древесины 30	Удельная работа резания 42
Сечение срезаемого слоя 24	Удельная сила резания 41
Сила резания по задней поверхности лезвия 55-57	Учет затупления лезвий 57
Система инструментальная 10	Уширение пропила 80
– кинематическая 11	Факторы процесса резания 71
– статическая 11	Формулы для расчета режимов резания 70
Слой срезаемый 23	Фрезерование древесины 134
Составляющие силы резания 40, 45, 46, 47	Шероховатость поверхности 37
Строение древесины 29	Ширина срезаемого слоя 24
	Электрическая эрозия 22

Стружка 5	Электрохимическая
Типы задач 78	коррозия 22
Толщина срезаемого слоя 24	Эпюры давлений по зонам
Точность 4	лезвия 44
Трение 64-69	Этапы износа лезвия 20

Оглавление

Предисловие	3
Введение	4
Часть I. Общие сведения о резании древесины.....	5
1. Основные понятия и определения.....	5
1.1. Резание древесины.....	5
1.2. Движения при резании.....	7
1.3. Углы скоростей.....	9
1.4. Координатные плоскости. Системы координат.....	10
1.5. Элементы лезвия.....	11
1.6. Секущие плоскости.....	13
1.7. Положение режущей кромки.....	15
1.8. Износ и затупление лезвий.....	16
1.8.1. Микрогеометрия режущей кромки.....	16
1.8.2. Понятие износа и затупления.....	17
1.8.3. Критерий затупления.....	18
1.8.4. Период стойкости инструмента.....	19
1.8.5. Этапы износа лезвий.....	20
1.8.6. Физическая сущность износа.....	21
1.9. Условия резания древесины реальным лезвием...	22
1.10. Элементы срезаемого слоя.....	23

2. Кинематика процесса резания.....	25
2.1. Общие сведения.....	25
2.2. Резание по принципиальной кинематической схеме с одним прямолинейным движением.....	26
2.3. Резание по принципиальной кинематической схеме с двумя прямолинейными движениями.....	27
2.4. Резание по принципиальной кинематической схеме с двумя движениями – прямолинейным и вращательным.....	28
3. Влияние строения и свойств древесины на процесс резания.....	29
3.1. Строение древесины.....	29
3.2. Физические свойства древесины.....	30
3.3. Учет механических свойств древесины.....	31
3.4. Учет ориентации годовых слоев.....	33
3.5. Сжатие древесины в замкнутом пространстве....	34
3.6. Виды резания древесных материалов.....	35
4. Геометрия обработанной поверхности.....	37

5. Взаимодействие лезвия с древесиной.....	40
5.1. Составляющие силы резания.....	40
5.2. Удельная сила, удельная работа, единичная сила резания.....	41
5.3. Контактные зоны лезвия.....	42
5.4. Эпюры нормальных давлений по зонам лезвия....	43
5.5. Формулы для расчета составляющих силы резания	45
5.6. Зависимость главной составляющей силы резания от толщины срезаемого слоя.....	48
5.7. Допущения, принятые А.Л. Бершадским.....	50
5.8. О взаимосвязи сил, действующих по контактным поверхностям лезвия.....	51
5.9. Сила резания по задней поверхности острого лезвия.....	54
5.10. Учет затупления лезвий.....	57
5.11. Расчет силы резания в диапазоне микрослоев....	61
5.12. Коэффициент трения по передней поверхности лезвия.....	64
5.13. Формулы для расчета режимов резания.....	70
6. Влияние различных факторов на силы резания.....	71
6.1. Факторы процесса резания древесины.....	71

6.2. Влияние скорости резания.....	71
6.3. Влияние угла резания.....	72
6.4. Влияние заднего угла.....	73
6.5. Влияние углов перерезания волокон, наклона и скоса.....	73
6.6. Влияние породы.....	74
6.7. Влияние влажности.....	74
6.8. Влияние температуры.....	75
6.9. Влияние размеров среза.....	76
7. Режимы резания.....	78
7.1. Понятие о режиме резания	78
7.2. Типы задач.....	78
7.3. Оптимальные режимы резания.....	79
Часть II. Метод расчета режимов резания.....	80
8. Пиление	80
8.1. Уширение пропила.....	80
8.2. Удаление стружки из пропила.....	81
8.3. Производительность пилы по вместимости впадин	83
8.4. Толщина срезаемого слоя при работе плющеными	

и разведенными зубьями.....	84
9. Пиление ленточными пилами.....	84
9.1. Общие сведения.....	84
9.2. Режущий инструмент.....	87
9.3. Геометрия срезаемого слоя.....	89
9.4. Кинематика.....	90
9.5. Динамика пиления.....	91
9.6. Точность пиления.....	94
9.7. Расчет рациональных скоростей подач.....	97
9.8. Пример расчета оптимальных режимов пиления.....	102
9.9. Пример решения прямой задачи.....	106
10. Продольное пиление дисковыми пилами.....	108
10.1. Общие сведения.....	108
10.2. Режущий инструмент.....	109
10.3. Скорости движений.....	112
10.4. Геометрия срезаемого слоя.....	112
10.5. Динамика пиления.....	113
10.6. Выбор параметров режима продольного пиления	115
10.7. Решение прямой задачи.....	118

10.8. Пример решения прямой задачи.....	122
10.9. Алгоритм решение обратной задачи.....	124
10.10. Пример решения обратной задачи.....	130
11. Цилиндрическое фрезерование древесины.....	134
11.1. Общие сведения.....	134
11.2. Режущий инструмент.....	135
11.3. Кинематика цилиндрического фрезерования.....	136
11.4. Геометрия срезаемого слоя.....	137
11.5. Шероховатость обработанной поверхности.....	138
11.6. Силы резания и мощность.....	139
11.7. Примеры решения задач.....	142
Заключение	147
Библиографический список	149
Предметный указатель	150
Оглавление	152

Научное издание

Иван Тихонович Глебов

Расчет режимов резания древесины

Монография

Редактор А.Л. Ленская

Подписано в печать 31.10.05	Формат 60x84 1/16	
Бумага тип № 1	Печать офсетная	Уч.-изд. л. 6,2
Усл. печ. л. 9,07	Тираж 300 экз.	Заказ №

Уральский государственный лесотехнический университет
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

ГУП СО «Талицкая типография»
623640, Свердловская обл., г. Талица, ул. Исламова, 2