

Рецензенты:

кафедра «Станки и инструменты» Уральского лесотехнического института;
кандидат технических наук, доцент кафедры «Станки и инструменты» Сибирского технологического института М. А. Кузнецов.

Бершадский А. Л., Цветкова Н. И.

Б 52 Резание древесины. Минск, «Вышэйш. школа», 1975.

304 с. с ил.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов по специальности «Машины и механизмы лесной и деревообрабатывающей промышленности». В пособии излагаются основные положения теории резания древесины, разработанной на основании обобщения экспериментальных и производственных наблюдений. Рассматриваются процессы пиления, фрезерования, сверления, точения, лущения, шлифования и другие, а также обработка древесных материалов, даются формулы для определения сил резания и методика расчета оптимальных режимов резания.

Б $\frac{31503-186}{М 304(05)-75}$ 81-75

6П6.6

© Издательство «Вышэйшая школа», 1975.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из основных задач учения о резании древесины является определение наивыгоднейших режимов резания, обеспечивающих наилучшие технико-экономические показатели. Решается эта задача комплексно с учетом физико-механических свойств обрабатываемого материала, инструмента и условий обработки.

В настоящее время в развитии теории резания древесины намечались три главных направления. Одно из них — механико-математическое — стремится к созданию теории резания на основании законов механики материалов, не занимаясь подробными исследованиями физики явлений. Крупнейшим представителем этой школы был проф. М. А. Дешевой [5]. Дальнейшее развитие это направление получило в трудах проф. С. А. Воскресенского (МЛТИ) [3].

Разработкой физических основ механики резания с тщательным изучением всех процессов, происходящих при образовании новой поверхности, занимается школа проф. Е. Г. Ивановского (ЛТА), создавшего физическое направление в теории резания древесины [6; 7; 8].

Теоретические предпосылки физико-технологического направления в теории резания древесины разработаны проф. А. Л. Бершадским (БТИ) [1; 2]. Учитывая статистический характер процесса резания, они базируются на единой теории и методике обработки и обобщения результатов экспериментальных и производственных исследований и устанавливают количественные и качественные зависимости между важнейшими факторами процесса резания. Особое внимание при этом уделяется вопросам познания физической сущности технологического процесса резания.

Предлагаемое учебное пособие объединяет и развивает ранее изданные труды проф. А. Л. Бершадского [1; 2], созданные на основе обобщения многочисленных исследований послевоенных десятилетий.

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

Главной проблемой является создание расчетного метода, устанавливающего взаимосвязь между важнейшими факторами процесса при различных их сочетаниях.

Знание основных закономерностей позволяет наиболее эффективно управлять процессом с целью его оптимизации.

Авторы надеются, что книга поможет инженерам и конструкторам найти ответы на вопросы, касающиеся расчета мощности и сил резания, сопротивления подаче, расчета прижимов и другие, а также улучшить качество процессов обработки древесины и древесных материалов резанием.

В книге дается не только теоретический материал, но и решение примеров практического характера.

Авторы выражают искреннюю благодарность кандидатам технических наук, доцентам М. А. Кузнецову (СТИ), И. Т. Глебову (УЛТИ), В. К. Пашкову (УЛТИ) за проведенное рецензирование рукописи, заведующему кафедрой станков и инструментов деревообрабатывающей промышленности Белорусского технологического института кандидату технических наук, доценту А. Г. Лахтанову и кандидату технических наук, доценту В. И. Микулинскому за добрые советы и весьма ценные замечания и пожелания, сотрудникам кафедры института кандидату технических наук, доценту А. П. Клубкову, ассистенту А. П. Фридриху, кандидатам технических наук, доцентам Н. С. Кузьмичу, Г. И. Завойских, А. И. Санковичу, А. В. Моисееву и М. Д. Устинову, ассистенту А. Н. Астафиеву, старшему преподавателю А. Г. Молочко и другим за оказанную помощь при подборе материалов и уточнении отдельных вопросов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все планы технического развития направлены на решение важнейшей задачи, которая состоит в том, чтобы обеспечить значительный подъем материального и культурного уровня жизни народа на основе всемерного использования достижений науки и техники, высоких темпов развития производства, повышения его эффективности, научно-технического прогресса и ускорения роста производительности труда.

В соответствии с этим перед наукой о резании древесины ставятся задачи:

1) изучить и познать объективные закономерности факторов, влияющих на процесс обработки резанием и физическую сущность процесса;

2) создать метод расчета оптимальных режимов резания, который является базой рационального проектирования, изготовления и эксплуатации новых конструкций станков и инструментов, проектирования цехов, совершенствования технологических процессов;

3) улучшить качество обработки, обеспечить максимальный выход продукции, а также снизить себестоимость за счет экономии материалов, электроэнергии, увеличить производительность и облегчить труд рабочих разработкой и внедрением рациональных методов обработки;

4) исследовать обрабатываемость различных видов новых древесных материалов — плит и пластмасс, обеспечить рациональные режимы их обработки;

5) повысить долговечность и надежность работы инструментов.

Несмотря на значительную роль процесса резания в развитии человеческого общества с древнейших времен, наука о резании возникла только в 70-х годах XIX в.

Ее основоположником был профессор Петербургского горного института И. А. Тиме, который разработал основы учения о резании металлов и древесины. Положения и взгляды проф. И. А. Тиме явились базой для дальнейшего развития учения о резании.

После Великой Октябрьской социалистической революции разрозненные мелкие предприятия были объединены в специальные управления (тресты), началась организация деревообрабатывающей промышленности. В период 1922—1928 гг. создан ряд лесотехниче-

ских высших и средних учебных заведений, а в 1928 г. — Научно-исследовательский институт по изучению древесины (ЦНИИМОД).

Бурное развитие деревообработки и подготовка инженерно-технических кадров явились мощным толчком для создания технической литературы и науки. В 1930—1934 гг. впервые появляются новые теоретические работы по резанию древесины М. А. Дешевого, А. Л. Бершадского, развиваемые в дальнейшем в работах С. А. Воскресенского, А. Э. Грубе, Е. И. Ивановского, Ф. М. Манжоса и их учеников, которые плодотворно работают на разных кафедрах лесотехнических и других вузов Союза, в многочисленных научно-исследовательских учреждениях и предприятиях.

Известны значительные теоретические и экспериментальные исследования зарубежных ученых — М. А. Маккензи (США), Е. Кивимаа (Финляндия), Б. Тунеля (Швеция), Ф. Кольмана и Г. Палича (ФРГ) и др.

Большие сдвиги, происшедшие в развитии деревообработки, ставят сегодня новые задачи перед всеми работниками промышленности. Одна из главнейших — повышение объема технических знаний производственников (техников и инженеров) для дальнейшего развития производства и управления процессами.

В промышленности значительное место занимают процессы механической обработки древесины резанием.

Резание — процесс обработки деталей с отделением части материала и образованием новых поверхностей по заданной траектории. Цель процесса резания — получение деталей заданной формы и размеров. Качество резания характеризуется точностью полученной формы и размера, необходимой шероховатостью поверхности.

Обработка должна вестись производительно, с наименьшими затратами материала, труда и энергии. Для этого требуется знать процессы взаимодействия резца с древесиной, факторы, влияющие на этот процесс, и характер этого влияния; уметь рассчитывать рациональные режимы обработки с целью получения наилучших показателей процесса.

Ответы на эти и другие вопросы, при умелом пользовании, можно найти в данном учебном пособии.

Глава I

РЕЗАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. Классификация технологии древесины

Определение понятия «технология». Два класса технологии древесины. Слово «технология» состоит из двух корней греческих слов «techné» и «logos». Первое означает искусство, ремесло, обработка, второе — учение, изложение. Таким образом, в целом «технология» — либо «учение об обработке» материала, либо совокупность процессов, применяемых при изготовлении продукции, включая рассмотрение оборудования, инструмента, приспособлений, приемов и способов изготовления продукции.

Древесина может быть обработана без изменения и с изменением качества вещества. В зависимости от этого технология древесины подразделяется на два класса (рис. 1.1): а) химическую (ХТД) и б) механическую (МТД).

ХТД — наука, изучающая обработку древесины, влекущую за собой изменение качества вещества. Например, получение из древесины скипидара, сахара, спирта, искусственного волокна и т. д.

МТД — наука, изучающая обработку древесины изменением ее формы и объема без изменения качества вещества. Например, получение пиловочных бревен из очищенного от ветвей ствола сваленного дерева; досок из пиловочных бревен; из досок — деталей для изготовления разнообразнейших изделий (окон, дверей, мебели, спортивного инвентаря и т. п.).

Деление МТД на два вида. Механическая технология древесины основывается на двух ее свойствах: пластичности и делимости [5].

Делимостью называется свойство древесины разделяться под действием внешних сил.

Пластичностью называется способность древесины сохранять остаточную деформацию (заданную форму) после прекращения действия внешних сил.

В зависимости от этих свойств МТД классифицируется на два вида (рис. 1.1): обработку древесины без нарушения связи между волокнами и обработку древесины с нарушением связи между волокнами.

Обработка без нарушения связи между волокнами. *Гнутые* — обработка (при которой изменяется форма) изгибом увлажненной

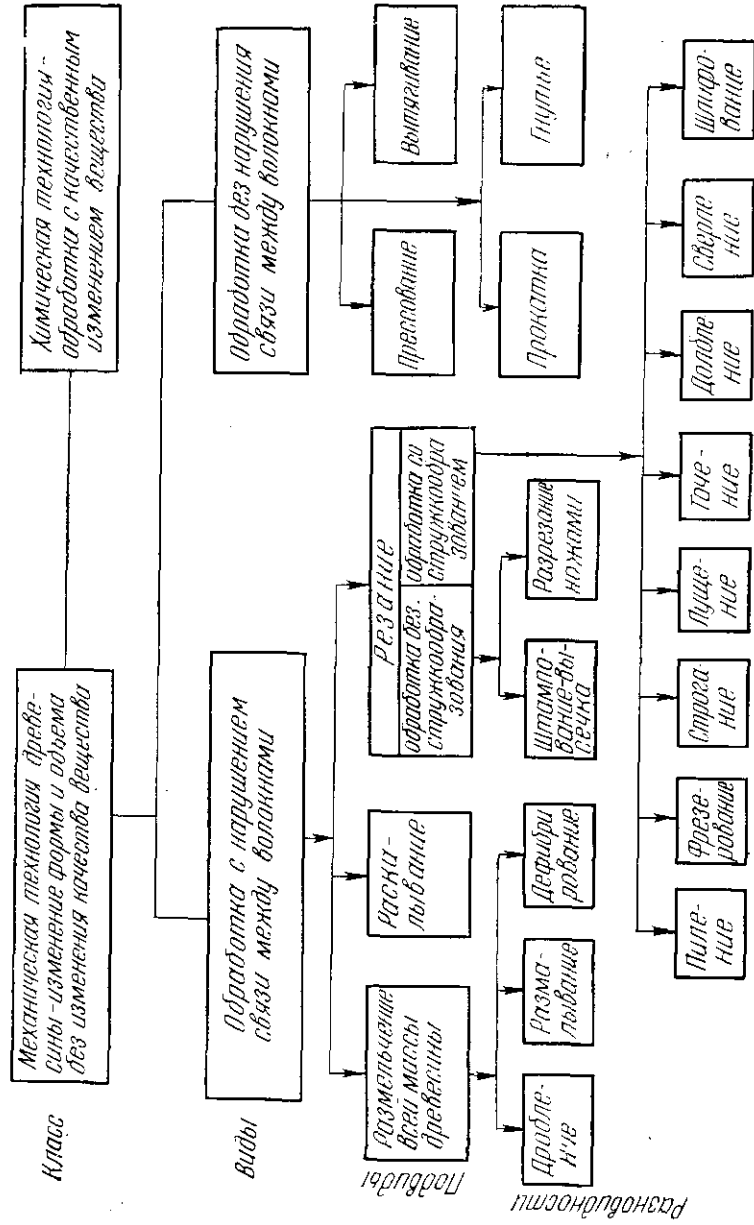


Рис. 1.1. Классификация механической технологии древесины

и пропаренной заготовки в шаблоне (рис. 1.2) и последующая сушка для закрепления приданной формы, например гнутье ободьев для колес, деталей мебели, теннисных ракеток, лыж и др. Древесина плохо деформируется при растяжении, поэтому получаются отрывы на выпуклой стороне заготовки. Проф. А. Х. Певцов объясняет это тем, что временное сопротивление на растяжение раза в три больше, чем на сжатие, но способность деформироваться значительно мень-

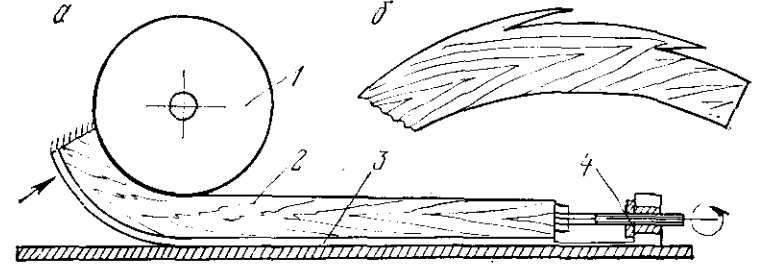


Рис. 1.2. Схема гнутья

ше: например, относительная деформация при растяжении 2—3%, а при сжатии 40%. Поэтому при изгибе на выпуклой стороне заготовки 2 около шаблона 1 закрепляется стальная полоса 3, сжимающая ее с торцов через упоры 4 (рис. 1.2, а). Как применение стальной полосы, так и дополнительное сжатие вдоль длины бруска переносят нейтральный слой ближе к выпуклой стороне заготовки. Таким приемом работа на растяжение при изгибе переносится на стальную полосу, а древесину заставляют работать на сжатие, что предотвращает брак в виде отщепов и надрывов на выпуклой стороне заготовки (рис. 1.2, б).

Прессование — обработка, заключающаяся в сближении под давлением и нагревании волокон клеток древесины для придания ей определенной формы и большей плотности, твердости, сопротивляемости внешним силам. При этом методе обработке древесине с низкими техническими показателями можно придать более высокие физико-механические свойства, заменяя ею дорогостоящие и мало-распространенные сорта ценной древесины и даже металл (например, подшипники скольжения и др.).

Способы прессования в последнее время широко применяются при использовании древесных отходов (стружки, опилок, реек и др.) для производства новых материалов столярных древесностружечных и волокнистых плит, пластиков и других, заменяющих пиломатериалы в строительстве и в столярно-механическом производстве.

Штампование-вытяжка — обработка, заключающаяся в нанесении рельефных оттисков на поверхности древесины, например на сиденьях и спинках стульев, гравировании и др. Штампование производится горячими штампами, которые одновременно с тиснением подогревают древесину, делая ее более пластичной.

Сравнительно малое применение подвидов обработки древесины, основанных на принципе пластичности, объясняется тем, что древесина менее восприимчива к пластическим деформациям, чем металл, у которого разность между пределами временного сопротивления и пропорциональности больше, чем у древесины, и равнозначна в любых направлениях обработки. У древесины эта разность меняется в зависимости от направления действующей силы в отношении волокон, что влияет на допускаемые усилия при обработке, ограничивая возможности ее применения.

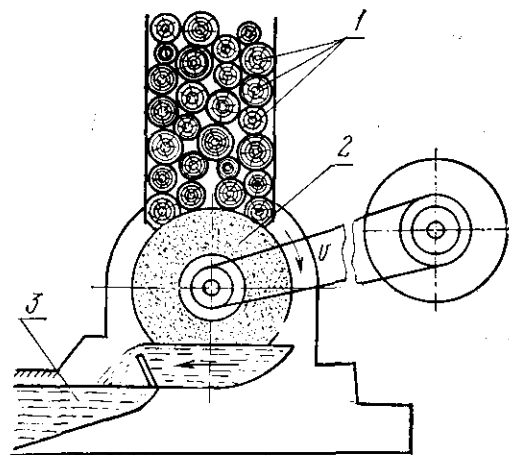


Рис. 1.3. Схема дефибрирования

Размельчение всей массы древесины применяется при дроблении, рубке, размоле и дефибрировании древесины.

Дробление (рубка) щепы и реек в дробилках — это процесс размельчения древесины в любом направлении в отношении волокон.

Дробленая древесина идет на производство древесной муки, древесного волокна, на топливо и т. д.

Размол — это процесс получения древесной муки из дробленой древесины разделением ее на жерновах или рифленых вальцах на более мелкие частицы в любом направлении относительно волокон. Древесная мука применяется при изготовлении взрывчатых веществ, пластмасс, линолеума и других материалов.

Дефибрирование — это процесс истирания окоренных чураков 1 («балансов») поперек волокон с целью получения древесного волокна (рис. 1.3). Зерна врашающегося камня 2 подобно резцам отдирают волокна, которые смываются проточной водой 3 с камня и уносятся в специальные устройства, где древесная масса, идущая на изготовление бумаги и волокнистых плит, отжимается. В отличие от дробления и размола здесь размельчение идет в определенном (поперечном) направлении в отношении волокон.

Все перечисленные выше разновидности обработки изучаются в специальных курсах, здесь же подробно не рассматриваются.

Раскалывание — разделение (разрыв) древесины на объемно-

недеформированные части по направлению волокон при внедрении колуна (клина) параллельно волокнам (рис. 1.4).

Внедрение колуна может происходить как вдоль волокон (рис. 1.4, а, б), так и поперек волокон (рис. 1.4, з).

Форма клина может быть симметричная (рис. 1.4, д), несимметричная (рис. 1.4, е) и односторонняя (рис. 1.4, ж). Угол β между боковыми поверхностями называется *углом заострения резца*.

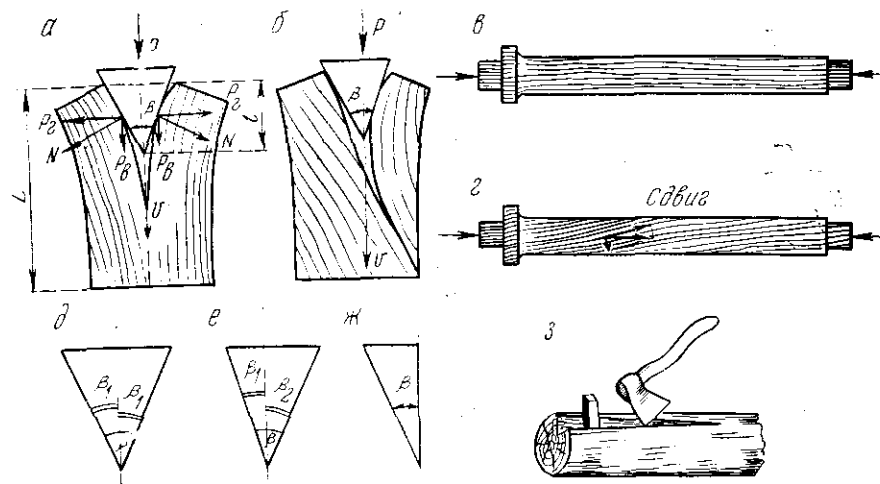


Рис. 1.4. Схема раскалывания:

а — раскалывание прямо-слоистой древесины; б — раскалывание косослойной древесины; в — колотая спица; г — пиленная спица; д — симметричный клин; е — несимметричный клин; ж — односторонний клин; з — раскалывание при внедрении клина поперек волокон

Раскалывание происходит в результате воздействия горизонтальных составляющих силы нормального давления N на боковые поверхности клина при его внедрении в древесину с силой P . При образовании опережающей трещины колуна (клин) внедряется не на всю длину раздела L (рис. 1.4, а, б), а на длину l . После получения опережающей трещины лезвие клина никакого участия в процессе раскалывания не принимает. Направление поверхности раздела при раскалывании определяется направлением волокон, а не направлением действующего по вектору v на клин усилия P . При значительной длине раскалываемого чурака в расщеп забиваются клинья.

Из прямо-слоистой древесины раскалыванием можно получить щелной товар (колотую клепку, спицы, кровельную дрань и др.), в котором точность размеров не имеет определяющего значения. Ценность колотых заготовок значительна там, где в деталях не допускается перерезание волокон, например в колесных спицах (рис. 1.4, в, г).

При одностороннем клине-резце с уменьшением толщины отделиваемой части древесины при длинной заготовке изменяется характер

ее отделения и процесс обработки переходит в резание вдоль волокон.

Резанием называется процесс обработки древесины с нарушением связи между частицами по заданной траектории реза.

Относительное движение реза в обрабатываемом материале называется *движением резания*, а его скорость — *скоростью резания*.

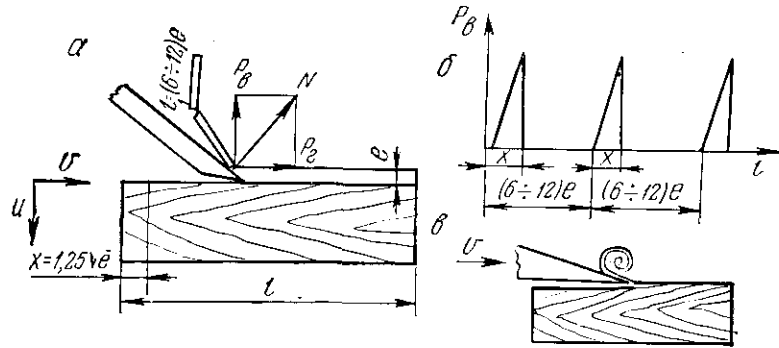


Рис. 1.5. Схема резания вдоль волокон:
 а — образование элементной стружки; б — график изменения сил резания;
 в — образование сливной стружки

При резании используется либо механическая энергия твердого реза, либо кинетическая энергия струи воды, либо лучевая энергия лазера.

Физически *резание* — процесс превращения носителя энергии в другие ее виды: тепловую, химическую, электрическую, механическую в связи с образованием новой поверхности [8].

При внедрении твердого реза по стрелке v нормальное давление N на поверхности реза постепенно растет (рис. 1.5, а). При этом горизонтальная составляющая P_r , действующая по направлению вектора v , отделяет древесину, а вертикальная составляющая P_v стремится оторвать отделяемый объем от остальной массы древесины.

Проф. И. А. Тиме установил, что при внедрении реза вдоль волокон на $x \approx 1,25\sqrt{e}$ силы P_r и P_v достигают наибольшего значения, при котором перед лезвием с характерным треском образуется опережающая трещина.

Под влиянием нарастающего момента происходит надлом элемента стружки длиной $(6-12)e$, которая затем отгибается. При этом давление падает до нуля и резец проходит некоторый путь, не производя почти никакой работы (рис. 1.5, б). Затем процесс периодически повторяется; это значит, что процесс образования стружки — периодический.

При срезании тонкой стружки элементы ее не наблюдаются, она сливная (рис. 1.5, в).

Разновидности резания. Различают две разновидности резания: а) резание без стружкообразования и б) резание со стружкообразованием.

Резание без стружкообразования характеризуется тем, что длина резания (хода реза) очень мала по сравнению с толщиной. Сюда относятся такие виды обработки, как разрезание тонкого листа шпона на ножницах и штамповка-высечка лис-

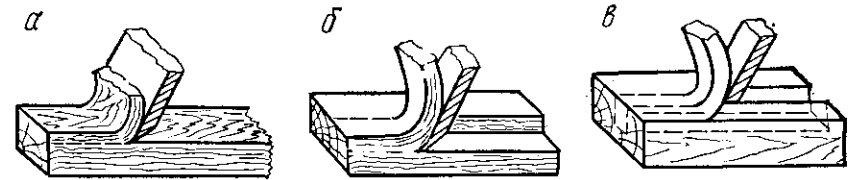


Рис. 1.6. Схемы резания

тового материала пуансоном и матрицей (см. рис. 17.7). Полученные таким способом заготовки и срезки* почти не деформированы. Не учитывая незначительное уплотнение у поверхности раздела, резание без стружкообразования происходит без деформации объема отделяемой древесины.

Резание со стружкообразованием характерно тем, что резец при проходе объемно деформирует отделяемый объем древесины в различных направлениях. Эти деформации вызывают значительные изменения объема стружки и почти всегда приводят к ее разрушению.

Некоторые процессы резания (лущение, строгание) основаны на том, что стружка, несмотря на значительные внутренние деформации, является конечным продуктом, пригодным к использованию.

Все основные процессы механической технологии древесины — пиление, фрезерование, строгание и другие — относятся к разновидностям резания со стружкообразованием (рис. 1.1).

Резание со стружкообразованием бывает открытое (свободное), когда лезвие реза полностью перекрывает ширину обрабатываемой детали (рис. 1.6, а), т.е. когда отсутствуют боковые поверхности обработки, и закрытое, при наличии двух (рис. 1.6, в) или одной (рис. 1.6, б) боковой поверхности обработки.

1.2. Общие понятия и определения

Недеформированный объем древесины $1-2-3-4-5-6-7-8$, подлежащий отделению от заготовки в виде одной или ряда стружек, называется *номинальным объемом среза* ($см^3$) (рис. 1.7).

Номинальной стружкой называется объем древесины $1-2-3-4-1'-2'-3'-4'$, подлежащий отделению за один проход реза.

* Срезок — отделенная за один проход недеформированная часть материала, имеющая лишь слабые поверхностные деформации.

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

Ширина номинальной стружки — размер в направлении режущего лезвия (см. рис. 2.3, а). При резании резцом, повернутым в плане (см. рис. 2.3, в), ширина среза b' будет равна проекции ширины фактической стружки на направление, перпендикулярное к скорости резания v .

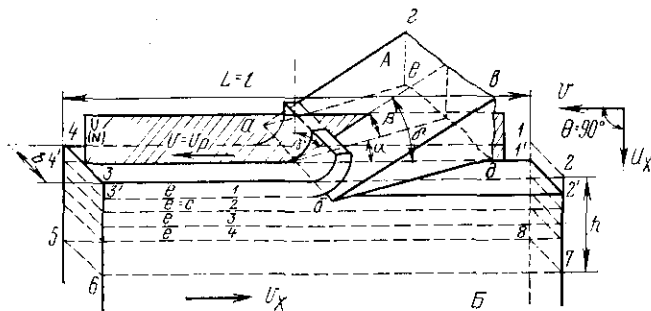


Рис. 1.7. Резание со стружкообразованием (строгание):
А — резец; Б — заготовка

Толщина номинальной стружки e есть кратчайшее расстояние между двумя смежными траекториями резания ($e \perp v'$). При прямолинейной траектории резания толщина стружки — величина постоянная (см. рис. 4.1—4.4). При криволинейной траектории резания толщина стружки — переменная (см. рис. 4.5, 4.6). Здесь толщина стружки возрастает по мере внедрения резца в древесину. Поперечное сечение стружки — be .

Длина номинальной стружки l — размер по направлению траектории резания. Длину траектории резца в древесине при срезании одной стружки называют также длиной контакта. Длина стружки значительно больше ее толщины.

В процессе резания древесина испытывает в разных направлениях различные по величине деформации. Поэтому действительные размеры деформированной стружки (толщина e_1 , ширина b_1 и длина l_1) непостоянны, отличаются от номинальных, не поддаются точному замеру и зависят от многих факторов и условий резания.

В процессе резания стружка получает усадку по длине и некоторое поперечное расширение по толщине. Отношение

$$\varepsilon_1 = \frac{l - l_1}{l}$$

называется относительной продольной усадкой стружки. Отношение

$$\varepsilon_2 = \frac{e - e_1}{e}$$

— относительным поперечным расширением.

Равенство

$$e_0 = \varepsilon_1 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 - \varepsilon_2$$

— объемной деформацией стружки (если ширину ее считать постоянной).

Число элементов m на длине ее l_1 зависит от вида стружки.

Длина элемента стружки $l_2 = \frac{l_1}{m}$ влияет на силовые параметры процесса резания и формирование шероховатости поверхности. С уменьшением l_2 процесс резания происходит более организованно (шероховатость поверхности уменьшается).

При расчетах всегда имеют в виду номинальные размеры. Номинальный объем древесины отделяемой стружкой

$$O = bel \text{ см}^3. \quad (1.1)$$

Номинальный секундный объем срезаемой древесины

$$O_c = bhu \text{ см}^3/\text{сек},$$

где h — толщина стружки при строгании, высота срезаемого слоя при фрезеровании или высота пропила при пилении, мм; u — скорость подачи, м/сек.

Работа и мощность, затрачиваемые на срезание номинального объема:

$$A = Pl = KO = Kbel \text{ кг} \cdot \text{м}; \quad (1.2)$$

$$N = \frac{KO_c}{102} = \frac{Kbhu}{102} \text{ квт}, \quad (1.3)$$

где K — условная удельная работа резания, т. е. работа, затраченная на срезание единицы объема номинальной стружки (1 см^3), $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{см}^3$;

P — средняя сила резания, кг.

Равнодействующая сил сопротивления продвижению резца в древесине по направлению скорости резания называется касательной силой резания P .

В процессе резания сила резания P не остается постоянной, а изменяется от нуля до максимума (рис. 1.5, б). В каждый рассматриваемый момент она имеет особое мгновенное значение в зависимости от действующих в данный момент сопротивлений.

Максимальную силу резания необходимо знать для расчетов инструмента и деталей станка на прочность.

По средней силе резания определяется мощность резания, которую надо знать при расчете и подборе электродвигателя.

Из уравнения (1.2) определим

$$K = \frac{A}{bel} = \frac{Pl}{bel} \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{см}^3,$$

откуда

$$K_c = \frac{P}{be} \text{ кг}/\text{мм}^2, \quad (1.4)$$

где P — средняя сила резания, кгГ;

K — среднее условное давление резания, приходящееся на 1 мм^2 поперечного сечения стружки, кгГ/мм².

Эти величины названы условными потому, что работа резания затрачивается не только на деформирование стружки, но и деформирование древесины под плоскостью резания.

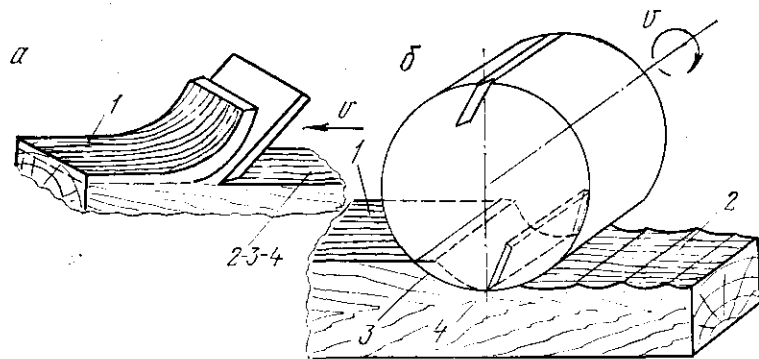


Рис. 1.8. Поверхности при резании

При принятых единицах измерения (P в кгГ, b в мм, e в мм, l в м) условная удельная работа резания K численно равна среднему условному давлению резания K , хотя физический смысл этих двух понятий разный: условное давление резания — это среднее давление на поперечное сечение стружки, а условная удельная работа характеризует динамику процесса резания — работу, затраченную на срезание и деформацию 1 см^3 древесины:

$$K = \frac{Pl}{bel} \text{ кгГ} \cdot \text{м/см}^3 \left(\frac{\text{кгГ} \cdot 1000 \text{ мм}}{(10 \text{ мм})^3} \right) = \frac{P}{be} \text{ кгГ/мм}^2.$$

Величина $Ke = \frac{P}{b}$ называется *удельной силой резания*, т. е. силой, приходящейся на 1 мм ширины реза.

Три составляющие процесса резания. Всякий процесс обработки резанием в основном определяет три составляющие:

- 1) материал — то, что обрабатывается;
- 2) резец — то, чем обрабатывают;
- 3) рабочие движения, которые создают необходимые относительные перемещения режущего инструмента в древесине, обеспечивая процесс обработки, т. е. изменение формы и объема заготовки.

Каждая из трех составляющих процессов резания включает значительное количество переменных факторов, влияющих на результаты обработки.

Основные поверхности и плоскости при резании. При рассмотрении процесса резания на обрабатываемой заготовке различают (рис. 1.8): обрабатываемую поверхность 1, с которой срезается

стружка или ряд стружек, составляющих отделяемый слой материала; обработанную поверхность 2, полученную после срезания стружки или ряда стружек; поверхность резания 3, образуемую на обрабатываемой заготовке режущей кромкой резца.

При прямолинейном движении резца относительно заготовки (рис. 1.8, а) обработанная поверхность совпадает с поверхностью резания.

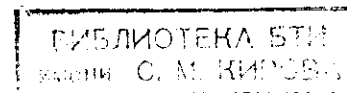
При круговом движении резца (рис. 1.8, б) этого совпадения поверхностей нет. В этом случае поверхность резания будет криволинейной, переходной между обрабатываемой и обработанной поверхностями.

Плоскость резания 4 — касательная к поверхности резания — проходит через режущую кромку резца.

При прямолинейно движущемся резце плоскость резания, поверхность резания и обработанная поверхность совпадают, что характеризует процесс строгания. При круговом движении (рис. 1.8, б) резца каждому положению режущей кромки на поверхности резания соответствует своя плоскость резания, касательная к поверхности резания.

Это определение плоскости резания справедливо только для резцов с прямолинейной режущей кромкой. Для резца с криволинейной режущей кромкой каждому ее положению относительно поверхности резания будет соответствовать не плоскость, а криволинейная поверхность, касательная к поверхности резания.

575362



2.1. Элементы и геометрия резца

Элементы резца. При обработке материалов твердым инструментом резание осуществляется резцом. Резец — это клиновидное тело на инструменте, предназначенное для обработки резанием (рис. 2.1).

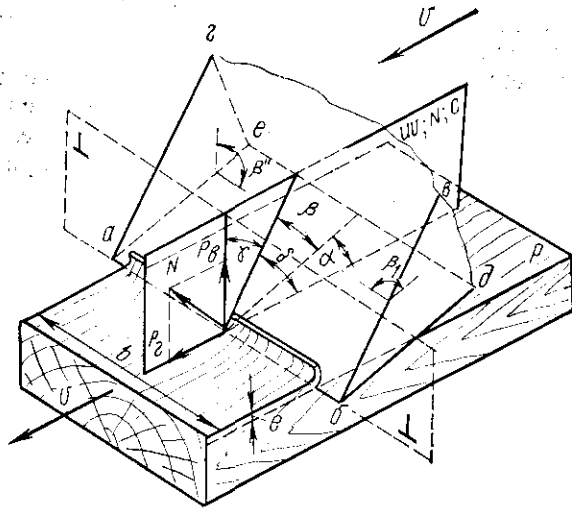


Рис. 2.1. Элементарный резец

Тело резца в зависимости от его формы может быть ограничено несколькими (тремя-четырьмя и более) плоскими или криволинейными поверхностями (гранями).

На рис. 2.1 резец ограничен четырьмя поверхностями (гранями): передней ($ab\gamma g$), задней ($абде$) и двумя боковыми ($аег$ и $бдв$). *Передней* называется поверхность резца, активно воздействующая на стружку. По передней поверхности сходит стружка. Противоположная передней поверхности резца, обращенная к плоскости резания, называется *задней*. Поверхности, примыкающие к передней и задней, называются *боковыми*. Эти поверхности при взаимном пересечении образуют пять кромок: $аг$, $бв$ — передние боковые, $ае$,

$бд$ — задние боковые. Кромка $аб$, расположенная в плоскости резания и имеющая сопряжение (в точках $а$ и $б$ попарно) с боковыми кромками, называется *главной режущей кромкой* или *лезвием*.

Лезвие реального резца — переходная кривая поверхность между передней и задней поверхностями резца. Только у идеального резца лезвие — прямая линия. При расчетах истинную кривую контура лезвия принимают за дугу окружности радиусом ρ , вписанную в эту кривую. Этот радиус называется *радиусом кривизны лезвия*.

По длине лезвие может быть прямолинейным или криволинейным в зависимости от расположения и формы пересекающихся поверхностей резца.

Лезвие — наиболее активная часть резца и выполняет главную работу при образовании стружки. Кромки резца подразделяются на стружкообразующие и подрезающие.

Стружкообразующей называется кромка, прилегающая к передней поверхности резца и отделяющая стружку по всей ширине. При открытом резании образуется одна поверхность и имеет место свободное стружкообразование (рис. 1.6, а). При полузакрытом резании образуются две поверхности, причем главная кромка — стружкообразующая, а боковая — подрезающая, подчищающая. При закрытом (рис. 1.6, в) резании образуются три поверхности, причем главная кромка — стружкообразующая, а боковые подрезающие — подчищающие.

Боковые кромки у передней поверхности (передние) — подрезающие, а у задней поверхности (задние) в процессе отделения стружки не участвуют.

Углы резания. Углы резания существенно влияют на процесс стружкообразования и выбираются в зависимости от условий резания.

Контур режущих элементов резца в поперечном сечении определяется в плоскости движения uv (основной секущей плоскости) (рис. 2.2 и 2.11). Плоскость движения uv параллельна скорости резания v и скорости подачи u . Для резцов с вращательным движением инструмента она перпендикулярна к оси вращения инструмента.

Углы, замеренные в плоскости движения, называются *контурными* и указываются на рабочих чертежах.

В процессе резания давление стружки на переднюю поверхность резца и обработанной поверхности древесины на заднюю поверхность резца направлено нормально к контактным площадкам резца и лежит в плоскости N , нормальной к лезвию.

Нормальная плоскость N перпендикулярна к плоскости резания P и к главной режущей кромке. В ней измеряются линейные углы соответствующих двугранных углов.

Плоскости uv и N совпадают при открытом резании, когда лезвие перпендикулярно к вектору скорости v .

Перемещение стружки и действие сил трения по передней поверхности резца происходит в плоскости схода стружки C . Плос-

кость схода стружки C параллельна скорости относительного движения реза v' и перпендикулярна к плоскости резания P , образуемой главной режущей кромкой. В ней измеряются истинные углы резания при главной кромке реза, которые влияют на силу резания и качество обработки.

Независимо от того, какая из кромок стружкообразующая (главная или боковая), стружка отводится только передней поверх-

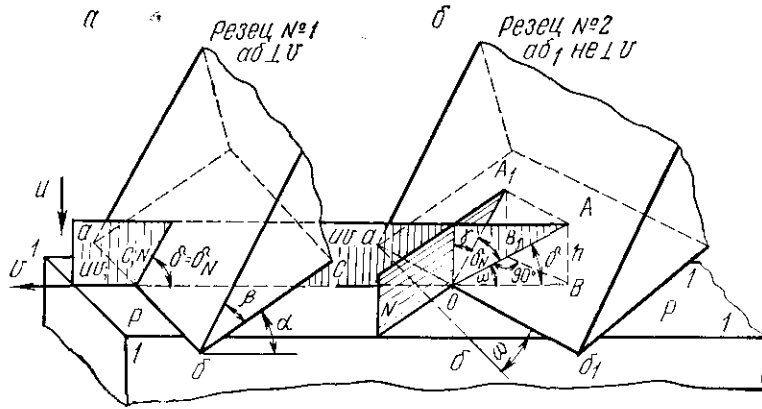


Рис. 2.2. Углы резания:

a — режущая кромка ab , перпендикулярная к скорости резания; b — режущая кромка ab повернута под углом ω в плане; uv — плоскость движения; N — нормальная плоскость; C — плоскость схода стружки; P — плоскость резания

ностью реза, поэтому плоскость схода стружки одна как для главной, так и для боковой кромок.

Если плоскости uv , N и C совпадают (параллельны друг другу) (рис. 2.2, a), то нет различия между контурными углами резания и линейными углами соответствующих им двугранных.

Угол заострения (угол заточки) β — угол между передней и задней поверхностями реза у главной кромки ab . При пересечении боковых поверхностей реза с его передней и задней поверхностями образуются углы боковой заточки β' и β'' (рис. 2.1).

Угол заточки β предопределяет режущие свойства реза и является его паспортной характеристикой. Угол заострения резцов, применяемых при резании древесины, колеблется от 12 до 85°.

Угол между задней поверхностью реза и плоскостью резания называется задним углом α .

Угол резания — угол между передней поверхностью реза и плоскостью резания δ : $\delta = \beta + \alpha$.

Угол между передней поверхностью реза и плоскостью, нормальной к плоскости резания у лезвия, называется передним γ :

$$\gamma = 90^\circ - \delta = 90^\circ - (\beta + \alpha). \quad (2.1)$$

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

На рис. 2.2, b изображен резец с лезвием под углом $(90^\circ - \omega)$ к направлению v , т. е. при угле поворота лезвия в плане ω . Здесь плоскости uv и C совпадают, а плоскость N повернута к ним под углом ω , поэтому углы резания в плоскости C будут одни, а в плоскости N совсем другие.

Угол поворота лезвия в плане имеет большое значение при обработке, особенно при поперечном резании, когда главная режущая

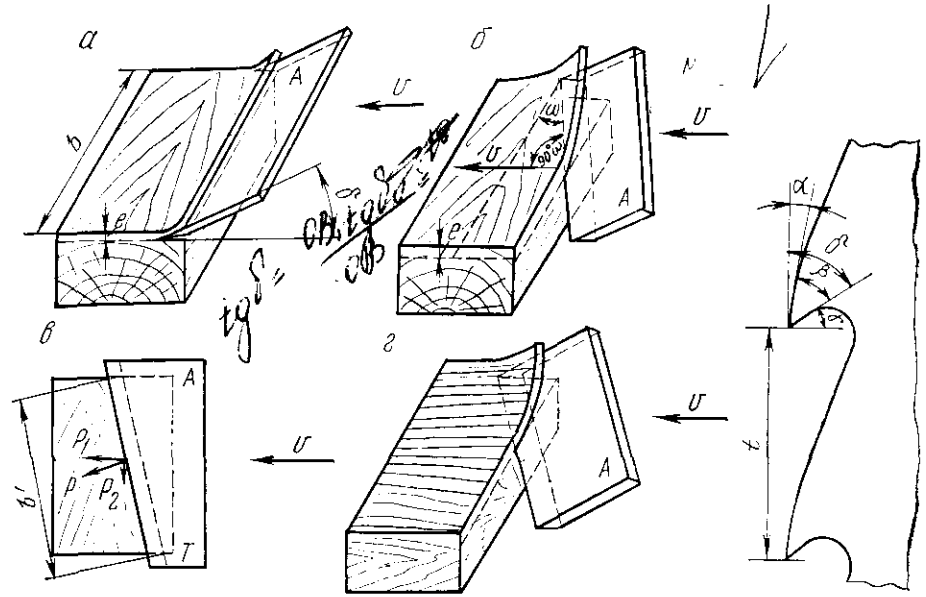


Рис. 2.3. Схема резания прямым лезвием и повернутым в плане: Рис. 2.4. Углы реза при его криволинейных поверхностях
 a — резание поперек волокон; b — резание поперек волокон лезвием, повернутым в плане; z — резание вдоль волокон лезвием, повернутым в плане

кромка внедряется одновременно по всей длине перпендикулярно к v и параллельно волокнам.

Из-за относительно слабой связи между волокнами образуются значительные вырывы ниже плоскости раздела (рис. 2.3), так как на волокна по всей длине давит лезвие и передняя поверхность реза. При расположении лезвия под углом к волокнам давление его распределяется на ряд волокон, что и приводит к устранению вырывов и более гладкой поверхности обработки.

На рис. 2.2, b легко видеть, что при повороте лезвия под углом ω $OB_1 = OB \cos \omega$ и при $h = OB_1 \operatorname{tg} \delta_N = OB \operatorname{tg} \delta$ получаем

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_N \cos \omega, \quad (2.2)$$

где δ — угол резания, равный A_1OB ;

δ_N — линейный угол двугранного угла A_1OB_1 ;

ω — угол поворота реза в плане.

Так как $\cos \omega < 1$, то угол резания $\delta < \delta_N$, т. е. поворот лезвия в плане приводит к уменьшению реального угла резания δ . Аналогично

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_N \cos \omega, \quad (2.3)$$

т. е. $\alpha < \alpha_N$.

Углы резания при криволинейной траектории реза определяются так же, но плоскость (скорость v) резания будет касательной

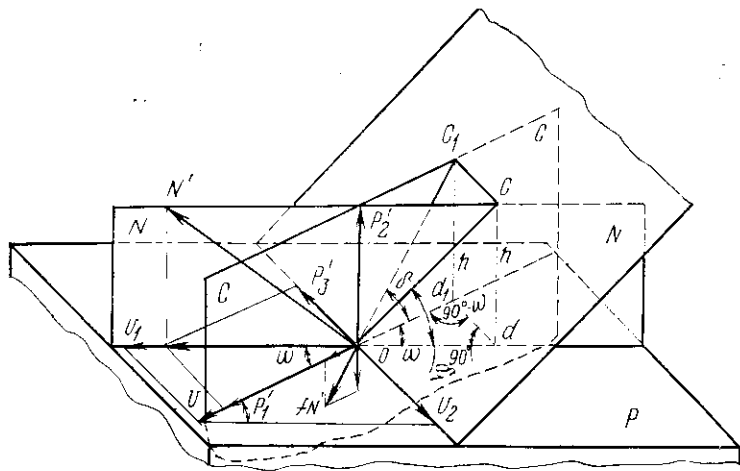


Рис. 2.5. Схема резания при двух движениях реза в плоскости резания: нормально к лезвию и вдоль лезвия

к криволинейной поверхности резания в данной точке контакта лезвия с древесиной.

При криволинейном очертании поверхностей реза за направление задней и передней поверхностей режущего инструмента принимают касательные к ним у лезвия (рис. 2.4), относительно которых определяют углы резания.

Углы резания при двух движениях реза в плоскости обработки. На рис. 2.5 приведен пример определения углов резания реза, совершающего одновременно два движения в плоскости обработки. Одно движение со скоростью v_1 — нормально к лезвию, другое со скоростью v_2 параллельно лезвию. Сход стружки будет в плоскости C , проходящей через равнодействующую скоростей v . Нормальной плоскостью N в данном случае будет плоскость, перпендикулярная к поверхности обработки и проходящая через вектор v_1 , перпендикулярный к лезвию. Подобно предыдущему получим:

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_1 \cos \omega;$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_1 \cos \omega,$$

т. е. во всех случаях, когда вектор v составляет угол ω с нормалью к лезвию в плоскости обработки, сохраняются формулы (2.2) и (2.3), полученные для лезвия, повернутого в плане.

При угле $\omega = 0$, когда плоскость C совпадает с плоскостью N , $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_N$ и $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_N$.

Угол движения, угол зазора. На практике, в справочниках, в ГОСТах, на рисунках, изображающих инструмент, указывается геометрия реза в покое. Так как резание производится при наличии не менее двух движений и углы резания в процессе обработки определяются относительно плоскости резания, то в действительности угловые параметры резов отличаются от приводимых в справочных таблицах. Например, в случае резания древесины при двух рабочих движениях реза со скоростью v в горизонтальной плоскости и скоростью u в плоскости, перпендикулярной к ней (рис. 2.6), необходимо учитывать относительное перемещение реза со скоростью резания

$$\vec{v}' = \vec{v} + \vec{u}.$$

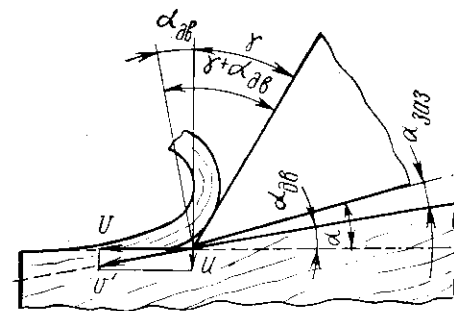


Рис. 2.6. Изменение углов реза при подаче, нормальной к скорости главного движения

Угловые параметры реза определяются относительно траектории, соответствующей скорости перемещения лезвия v' (рис. 2.6), которая пройдет под углом наклона $\alpha_{дв} = \operatorname{arctg} \frac{u}{v}$. Назовем $\alpha_{дв}$ задним углом движения. При наличии двух движений \vec{v} и \vec{u} задний угол α уменьшается на величину $\alpha_{дв}$. Фактический задний угол называется **углом зазора** $\alpha_{зая}$:

$$\alpha_{зая} = \alpha - \alpha_{дв}.$$

Соответственно изменяются и остальные углы резания, что видно из рис. 2.6. При определении задних углов резания следует иметь в виду упругое восстановление древесины, деформированной задней поверхностью реза (см. рис. 3.9, e), создающей значительное трение по ней. Опытными ЛТА установлено, примерно, упругое восстановление для торцевого резания 0,05—0,12 мм, для поперечного резания 0,03—0,005, для продольного резания 0,01—0,06 мм. Поэтому во избежание трения восстановившейся древесины о заднюю поверхность реза надо устанавливать меньший задний угол α при $\psi < 90^\circ$ и больший при торцевом резании*.

Угловые параметры при закрытом резании. Углы реза с косой заточкой. При закрытом резании, например пиления, когда в работе резания участвуют не только главная, но и передние боковые кромки, надо различать углы резания $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \delta_1$ в плоскости $u_1 v_1$,

* Угол перерезания волокон ψ — это угол между вектором скорости (силы) резания и волокном древесины. Подробно см. в § 3.1.

перпендикулярной к плоскости, описываемой боковой кромкой (перпендикулярной к боковой стенке пропила 1—2—3—4 и параллельной u , рис. 2.7).

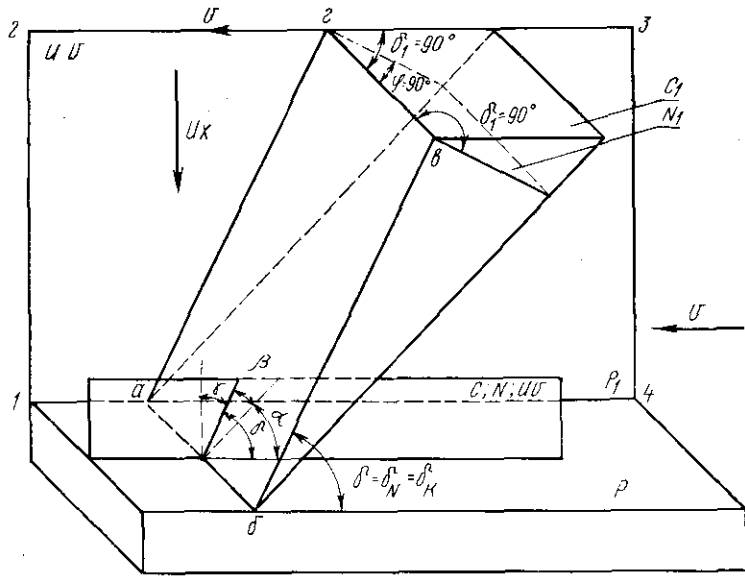


Рис. 2.7. Резание резцом с прямой заточкой

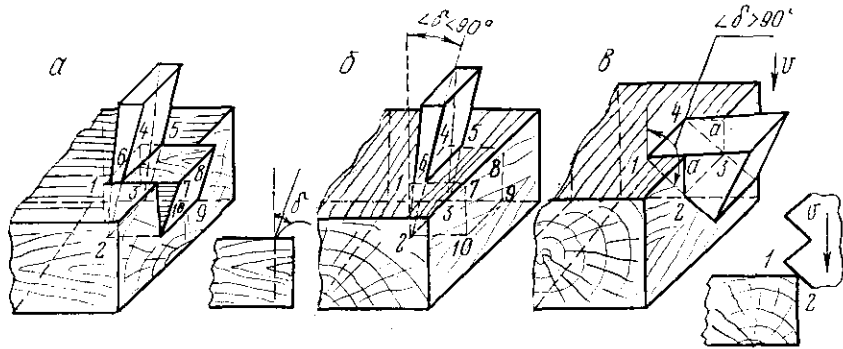


Рис. 2.8. Принципиальные схемы профилировки резцов:
 а — для продольной распиловки при $\delta < 90^\circ$; б — для поперечной распиловки при $\delta < 90^\circ$; в — для поперечной распиловки при $\delta > 90^\circ$

Углы α_1 , β_1 , γ_1 и δ_1 находятся в плоскости N_1 , перпендикулярной к плоскости, описываемой боковой кромкой 1234 и к боковой кромке ag .

Угол $\delta_1 = \varphi$ — угол боковой заточки. Если угол $\varphi = 90^\circ$, то и $\delta_1 = 90^\circ$. Такие резцы называются *резцами с прямой заточкой*.

При продольном пиленнии (рис. 2.8, а) главная режущая кромка перерезает волокна в торце, и под давлением передней поверхности

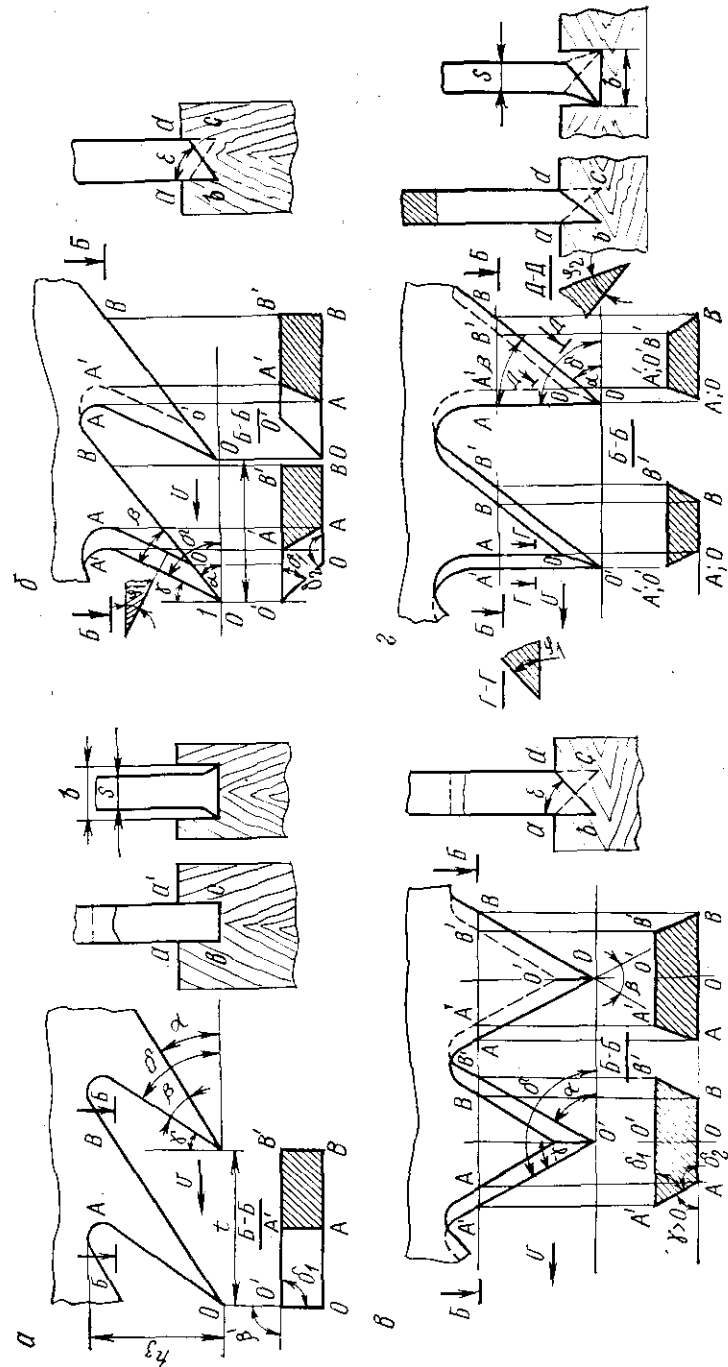


Рис. 2.9. Схема зубьев пил:

а — с прямой заточкой ($\delta < 90^\circ$); б — с кривой заточкой ($\delta < 90^\circ$); в — симметричный зуб с кривой заточкой ($\delta > 90^\circ$); г — несимметричный зуб с кривой заточкой ($\delta = 90^\circ$)

резец сравнительно легко может сдвинуть элемент стружки вдоль волокон, поэтому $\varphi=90^\circ$ вполне допустим.

Иное имеем при поперечной распиловке (рис. 2.8, в). Здесь боковые кромки должны перерезать волокна у стенок пропила в торец и угол φ должен быть меньше 90° , причем, как увидим дальше, и профиль зуба требуется иной (рис. 2.9, в, г) — с косой заточкой. Косая заточка зубьев пил необходима потому, что при резании в торец

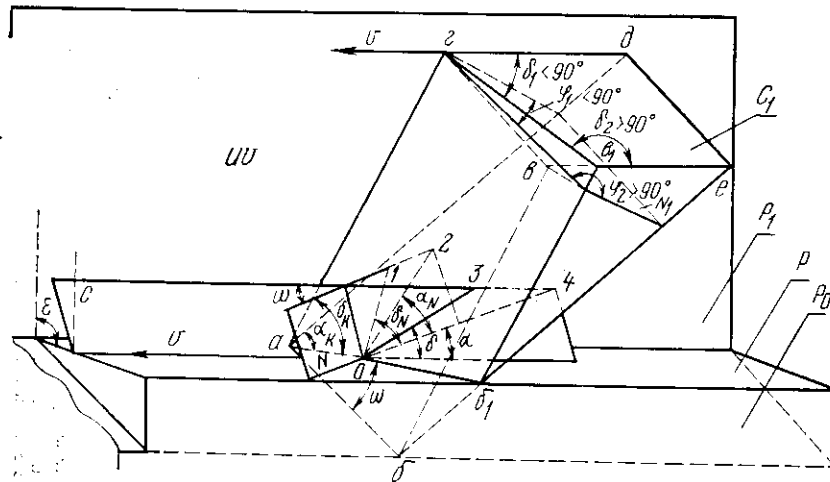


Рис. 2.10. Резание резцом с косой заточкой

боковыми кромками с углом $\delta_1=90^\circ$ (без косой заточки) получается большой отгиб и деформация волокон у стенок пропила, очень шероховатая поверхность распила и значительная затрата работы на резание.

При $\delta < 90^\circ$ надрезание волокон у стенок пропила опережает резание главной кромкой поперек волокон, что создает более гладкие стенки пропила. На данном этапе устанавливаем, что, кроме прямой заточки с $\varphi=90^\circ$, требуется в некоторых случаях и косая заточка, что позволяет улучшить результаты распиловки.

На рис. 2.10 показан (пунктиром) резец с прямой заточкой ($agdevb$). Для главной кромки этого резца плоскость P_0 — плоскость резания.

Плоскость uv (стенка пропила), параллельная u и v , является плоскостью движения. Для резца с прямой заточкой плоскости uv , C , N параллельны друг другу (они совпадают), поэтому нет различия между углами резания δ_k , δ_N и δ (рис. 2.7).

У резца с косой заточкой (изображенного сплошными линиями) главная кромка ab_1 не перпендикулярна к вектору v , а повернута в плане на угол ω . В этом положении главная кромка ab_1 образует плоскость резания P , наклонную к стенке пропила под углом ϵ . Плоскость N , нормальная к ab_1 , не совпадает с плоскостью C : при

пересечении они образуют угол ω . Поэтому углы резания δ_k , δ_N и δ будут разными, так как они измеряются в разных плоскостях:

контурные углы δ_k , α_k — в плоскости uv ;

линейные значения δ_N , α_N соответствующих двугранных углов — в плоскости N ;

углы резания δ , α — в плоскости C ;

Угол косой заточки при боковой кромке ag $\varphi < 90^\circ$ измеряется в плоскости N_1 (рис. 2.10), нормальной к боковой кромке ag и стенке пропила.

Угол $\delta_1 < 90^\circ$ — угол резания при передней боковой кромке ag — в плоскости uv . Угол $\delta_2 > 90^\circ$ — угол резания при боковой кромке b_1v_1 . Углы δ_1 , δ_2 , δ_φ , α_φ , ϵ определяются по следующим уравнениям, которые приводятся без выводов в готовом виде*:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_1 &= \cos \omega \operatorname{tg} \varphi_1 = \cos (90 - \delta_k) \operatorname{tg} \varphi_1 = \sin \delta_k \operatorname{tg} \varphi_1; \\ \operatorname{tg} \delta_2 &= \cos \omega \operatorname{tg} \varphi_2 = \cos (90 - \delta_k) \operatorname{tg} \varphi_2 = \sin \delta_k \operatorname{tg} \varphi_2. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Если $\varphi_1 < 90^\circ$, то улучшается процесс надрезания волокон у стенки пропила, но противоположный угол у другой передней кромки b_1v_1 $\varphi_2 < 90^\circ$ создает худшие условия работы, чем при $\varphi=90^\circ$ у резца с прямой заточкой.

Однако уменьшая подачу на резец, можно добиться того (см. рис. 8.11, б), чтобы кромка b_1v_1 при $\varphi_2 > 90^\circ$ не участвовала в процессе пиления.

Углы ϵ и ω у главной кромки ab_1 определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \epsilon &= \frac{\sin \beta_k}{\sin \delta_k \operatorname{ctg} \varphi_2 + \sin \alpha_k \operatorname{ctg} \varphi_1}; \\ \operatorname{tg} \delta_1 &= \frac{\sin \beta_k}{\cos \delta_k \sin \epsilon - \cos \epsilon \operatorname{ctg} \varphi}; \\ \operatorname{tg} \alpha &= \frac{\sin \alpha_k}{\cos \epsilon \operatorname{ctg} \varphi_2 + \sin \epsilon \cos \alpha_k}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Кроме этого, углы резания можно определить графическим методом (рис. 2.11).

Графическое определение углов резца с косой заточкой. По контурным углам α_k и δ_k вычерчиваем на миллиметровке контур зуба $e'a'd'$ (рис. 2.11). По заданным углам косой заточки φ_1 и φ_2 и формуле (2.4) определяем углы резания при боковых кромках $a'e'$ — δ_1 и $a'd'$ — δ_2 . Углы δ_1 и δ_2 откладываем на чертеже (вид А). Точки g_1 и v_1 проектируем на $e'd'$ и проводим линии $g'b'$ параллельно передней и $b'v'$ задней поверхности резца. Получим точку пересечения b' .

Соединив точку пересечения b' с вершиной зуба a' , получим проекцию главной режущей кромки на основную секущую плоскость uv . Эта плоскость, называемая *плоскостью движения*, является стенкой пропила и совпадает с фронтальной плоскостью

* Формулы (2.4) — (2.5) получены канд. техн. наук, доц. В. И. Микулинским.

проекций. Строим третью проекцию (вид зуба слева). Здесь угол ϵ — угол наклона главной режущей кромки к плоскости uv .

Через точку b'' перпендикулярно к $a''b''$ проводим сечение D — D — след плоскости схода стружки C . Эта плоскость перпендикулярна к плоскости резания P . След плоскости резания P проходит через режущую кромку резца $a''b''$. В плоскости схода стружки C лежат

найти, если треугольник $2'3'b'$ повернуть вокруг стороны $2'3'$ до совмещения точки b' с основной секущей плоскостью uv .

Методом вращения и совмещения плоскостей определим истинную длину главной режущей кромки $a'b'$. Из точки a'' радиусом $a''b''$ проводим дугу до вертикали b_0-7_0 и горизонталь 7_0-8_0 . Получим плоскость $7_0-8_0-a'-b_0$ — это плоскость резания P . Спроектируем точку b' на 7_0-8_0 и полученную точку b_0 соединим с точкой a' . Отрезок $a'b_0$ — истинная длина главной режущей кромки.

Продолжим $a''b''$ и из точки b'' радиусом $b''1''$ проводим дугу $1''-1'_1$. Теперь из точки a'' радиусом $a''1''_1$ проводим дугу до вертикали 7_0-10_0 и горизонталь 10_0-9_0 . Плоскость $7_0-8_0-9_0-10_0$ есть плоскость движения. Спроектируем точки $2'$ и $3'$ на горизонталь 9_0-10_0 в виде точек 2_0 и 3_0 . Треугольник $2_0b_03_0$ лежит в плоскости схода стружки. Углы α , β , γ — истинные углы резания при главной режущей кромке $a'b'$.

2.2. Затупление и элементы износа резца

Нельзя рассматривать режущие кромки резца как линии пересечения поверхностей резца. Реальный резец всегда имеет лезвие с некоторой кривизной r больше нуля. При резании может случиться аварийный или постепенный (монотонный) износ материала резца. При аварийном износе резца возможно выкрашивание или излом лезвия. Выкрашивание — хрупкое разрушение, не распространяющееся за пределы контакта со стружкой, излом — разрушение, распространяющееся за пределы контакта. Излом лезвия острого резца не является неизбежным, если угол β достаточно велик. Аварийному износу больше подвержены резцы с малым углом заточки.

По исследованиям А. Н. Астафьева (БТИ), резцы с углом заточки $\beta=40-50^\circ$ при интенсивных режимах резания редко выкрашиваются. С уменьшением угла заточки $\beta=20-30^\circ$ при тех же условиях наблюдалось выкрашивание лезвий глубиной до 30—100 мкм. Напряжение на передней поверхности в зоне лезвия резца достигает 250—500 кг/мм², что превышает предел прочности на изгиб такой стали, как Р18. При дальнейшем уменьшении угла заточки $\beta=15^\circ$ наблюдаются изломы, выходящие за пределы контактной зоны, напряжения в зоне лезвия резца очень велики — более 500 кг/мм².

Установлено также, что для того чтобы резец можно было расплющить без трещин, чтобы он был достаточно прочным, жестким и не пружинил (так как это влечет за собой увеличение угла δ), угол β должен быть не меньше 40—45°. Углы α и β определяют угол резания $\delta=\alpha+\beta$. На рис. 2.12, а показан под микроскопом резец с выкрошенной кромкой и следами (рисками) от зерен абразива после заточки.

При резании продолжается микровыкрашивание — резец обрабатывается, лезвие как бы шлифуется и через короткий промежуток времени у его главной кромки получается профиль согласно рис. 2.12, б. У передней поверхности резца кривизна лезвия увеличивает или уменьшает угол резания, например $\delta_1 < \delta$. Радиус кривизны лезвия r имеет микроразмеры, например для острого резца

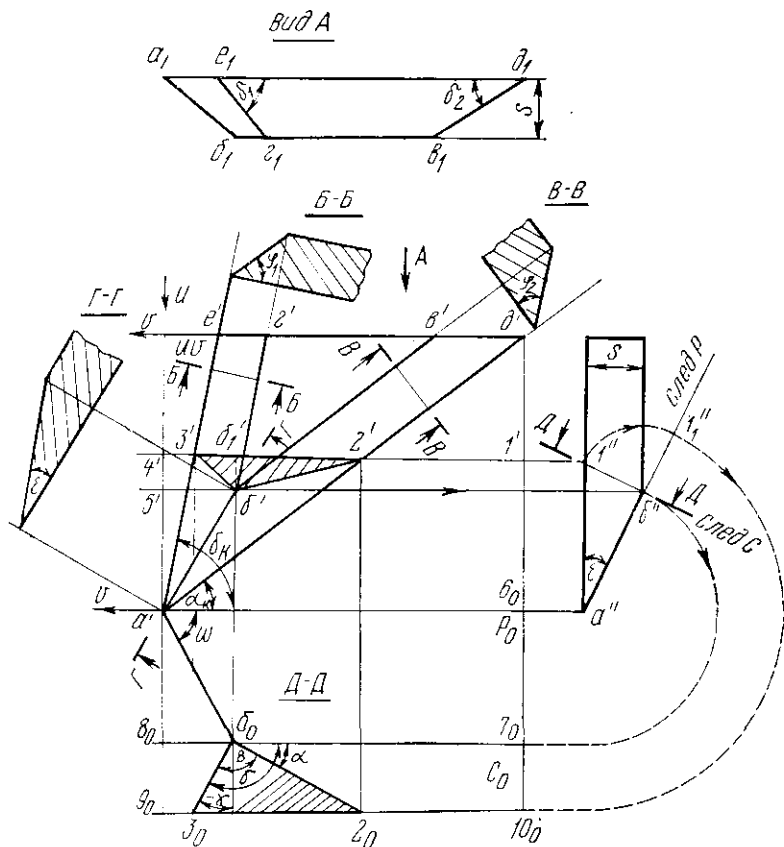


Рис. 2.11. Графическое определение углов резца с косой заточкой

истинные углы резания при главной кромке $a'b'$. Графическое определение этих углов — наша задача.

Из точки $1''$ параллельно $b'b''$ проводим линию $1'-2'-3'-4'$, которая пересекает боковые кромки зуба в точках $2'$ и $3'$. Заштрихованный треугольник $2'3'b'$ лежит в плоскости схода стружки. Но сечение $2'3'b'$ здесь искажено, так как плоскость C в этой проекции (главный вид) наклонна. В треугольнике $2'3'b'$ искажена высота $b'b_1$ и стороны $b'3'$, $b'2'$, а размеры $3'b_1$, b_12' — истинные. Истинное сечение зуба пилы в плоскости схода стружки можно

$\rho_0 = 0,004 - 0,01$ мм (4—10 мкм), а для затупленного резца 0,04—0,05 мм (40—50 мкм). Меньшие значения ρ — для ножей, больше — для пил.

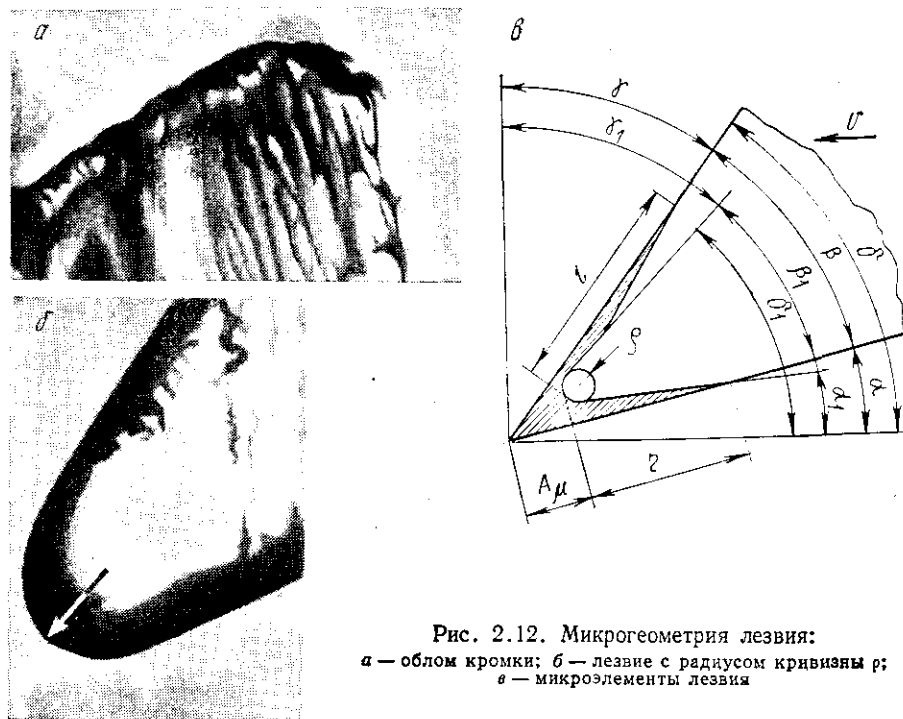


Рис. 2.12. Микрогеометрия лезвия:
а — облом кромки; б — лезвие с радиусом кривизны ρ ;
в — микроэлементы лезвия

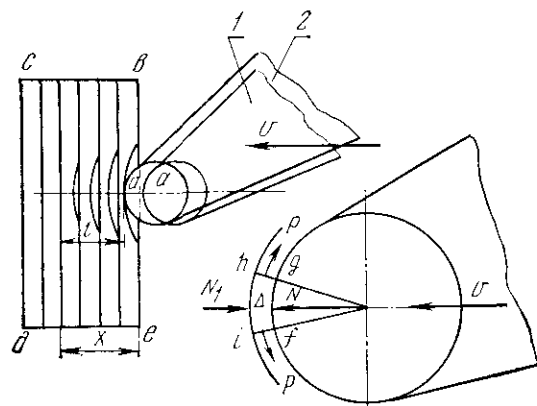


Рис. 2.13. Схема сил, действующих на лезвие при внедрении в древесину

Элементы резца, учитываемые при износе, показаны на рис. 2.12, в (где A_m — линейное укорочение лезвия, измеренное по задней поверхности резца; l — длина лунки (впадины) по передней поверхности резца. Заштрихованная площадь f_p — площадь износа резца; η — фаска по задней поверхности резца).

Стружка, сходящая по передней поверхности резца, может выработать лунку на передней поверхности резца. Фаска, образующаяся (рис. 2.12, в) на задней поверхности резца, уменьшает задний угол α , что при упругом восстановлении волокон увеличивает силу трения по задней поверхности резца.

Несмотря на микроразмер ρ , пренебрегать им нельзя, так как с увеличением ρ мощность и силы резания значительно возрастают, а шероховатость поверхности обработки увеличивается, и при 30—40 мкм появляется ворс и мшистость поверхности, что сказывается отрицательно при последующей обработке деталей.

Практикой и опытами установлено, что при разных углах перерезания ψ восстановление слоев древесины разное. С учетом этого выбирают задний угол резания при фрезеровании $\alpha \approx 10^\circ$, при продольном пилении дисковыми пилами $\alpha \approx 15^\circ$, при рамном пилении 30° .

2.3. Роль лезвия в процессе резания

Образование новой поверхности сопряжено с переходом молекул из внутренних слоев тела на прилегающие к ним новые поверхности. При этом требуются значительные напряжения в точках раздела древесины.

Физика твердого тела (академики В. Д. Кузнецов, П. А. Ребиндер и др.) устанавливает, что работа, затрачиваемая на образование новой поверхности, несоизмеримо мала по сравнению с работой, затрачиваемой при резании на упругие и пластические деформации и на трение по передней и задней поверхности резца. В силу этого ею можно пренебречь в общем балансе работы, затрачиваемой на резание.

Рассмотрим в порядке упрощенной схемы реальный резец, имеющий кривизну лезвия ρ (рис. 2.13, а), и определим напряжение σ , возникающее в точке a лезвия, т. е. в точке перехода от передней к задней поверхности резца.

При перемещении реального резца по направлению v точка a первая соприкасается с древесиной (позиция 1). При последующем перемещении происходит вмятие округленного лезвия в древесину (позиция 2), причем на некотором расстоянии по направлению v деформация затухает. Понятно, что, помимо сжатия, в направлении v слои материала подвергаются также растяжению в направлении, перпендикулярном к v .

На рис. 2.13, б показаны лезвие с радиусом кривизны ρ и элемент условно выделенного слоя Δ , соответствующий центральному углу $d\varphi$.

На элемент Δ действует сила $N_1 = \sigma_1(\rho \pm \Delta_\mu) d\varphi$, а также силы со стороны резца $N = \sigma r d\varphi$ и растягивающие P .

Условия равновесия элемента:

$$\sigma r d\varphi - \sigma_1(\rho \pm \Delta_\mu) d\varphi - 2P \sin \frac{d\varphi}{2} = 0 \quad (2.6)$$

или

$$\sigma\rho - \sigma_1(\rho + \Delta_{\rho}) - P = 0.$$

Пренебрегая силой P , получаем:

$$\sigma\rho - \sigma_1(\rho + \Delta_{\rho}) > 0 \quad (2.7)$$

или после простейших преобразований

$$\sigma > \sigma_1 \left(1 + \frac{\Delta_{\rho}}{\rho} \right). \quad (2.8)$$

Если ρ стремится к нулю, то σ стремится к бесконечности, т. е. в точке a возникают значительные напряжения, обеспечивающие переход молекул на новые поверхности.

Экспериментально в работе канд. техн. наук А. В. Вагина (АН БССР), применившего методику акад. В. А. Желиговского при экспериментальном изучении лезвийного резания соломы, доказано, что среднее напряжение по сечению лезвия 2ρ при перерезании тончайших пластинок древесины достигает 40—50 кг/мм², а при интенсивных режимах резания (по данным инж. А. Н. Астафьева, БТИ) до 500 кг/мм². Это подтверждает наличие значительных напряжений σ на лезвии, необходимых для образования новой поверхности.

Таким образом, процесс резания реальным резцом — единый процесс образования новой поверхности под влиянием значительных напряжений σ , создаваемых лезвием, а также деформаций древесины по обе стороны от плоскости резания, сопровождаемых трением стружки и обрабатываемой поверхности по поверхностям резца.

Чем меньше ρ , тем меньше будет усилие внедрения резца в древесину для создания напряжения σ , необходимого для образования новой поверхности, чем ρ больше, тем большее требуется усилие надрезания для создания одного и того же необходимого напряжения σ у точки a для образования новой поверхности.

Так как древесина — материал, не обладающий сплошностью и однородностью структуры, то несмотря на спад напряжения у лезвия от σ_{\max} у точки a по обе стороны от плоскости резания переход молекул на новую поверхность будет иметь место в слабых местах в зоне действия лезвия на древесину. Поэтому линия раздела будет не прямая, а волнистая, т. е. поверхность резания будет иметь микронеровности и тем большие, чем больше будет зона воздействия лезвия на древесину, т. е. чем больше будет ρ .

Так, по опытам канд. техн. наук В. С. Рыбалко, увеличение $\rho = 0,015$ мм до 0,03 мм при обработке дубовых брусков изменило мощность от 1,2 до 1,8 квт, также заметно ухудшилось качество обработки. Таким образом, ничтожные изменения радиуса кривизны лезвия приводят к ощутимому росту силы и мощности резания и ухудшению шероховатости поверхности, а при ручной подаче — к заметному снижению производительности. Неучет ρ приводит к абстрактным резцам с лезвием в виде прямой линии. При жестком

резце получаем схемы с односторонним действием сил (см. рис. 7.1, а), что не соответствует реальному процессу резания реальным резцом, где $\rho > 0$. Согласно изложенному, схемы резания получаются с двусторонним действием сил в отношении линии (плоскости) раздела $O—O$ (рис. 7.1, б), что позволяет достаточно обосновать вопрос о взаимодействии резца с древесиной.

Данные об увеличении радиуса кривизны лезвия ρ на 1 пог. м пути их в древесине, учитываемые при расчете режимов резания, приведены в приложении 9. Зависимость шероховатости поверхности от ρ при фрезеровании дается в приложении 7.

3.1. Основные свойства древесины, учитываемые при резании

Значение свойств обрабатываемого материала. Современное понимание процесса резания различных материалов, при котором происходит ряд сложных механических, электрических, физических и физико-химических явлений в неотделимой связи друг от друга, выработано в течение столетия. Наложение этих процессов друг на друга, сложное взаимодействие между ними значительно затрудняет создание общей аналитической теории резания материалов, в том числе и древесины. В процессе резания в материале возникают разнообразные виды деформирования и напряжения, переходящие за предел упругих деформаций.

Изучением напряжений и деформаций в материалах, приведенных в состояние пластичности, занимается теория пластичности, мало изученная для древесины. Поэтому на данном этапе развития применить к теории резания древесины математические исследования, основанные на теории пластичности, невозможно. Автор физики твердого тела * акад. В. Д. Кузнецов считает, что «...при создании физической теории особо важное значение имеют структура и свойства обрабатываемого материала. Физическая теория — это теория, в которой свойства обрабатываемого материала учитываются и изучаются во всей полноте и многогранности, так как ... они играют первостепенную, не пассивную, а активную роль».

В связи с этим рассмотрим основные свойства древесины как материала, подлежащего обработке резанием.

Неоднородность строения древесины. Анизотропия. Древесина как материал изучается в курсе «Древесиноведение». Здесь же остановимся лишь на некоторых особенностях, которые необходимо ясно понимать при изучении процессов резания.

Древесина — материал неоднородного строения в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 3.1, а): торцевой TT , перпендикулярной к оси ствола; радиальной RR , проходящей через ось и радиус ствола; тангенциальной TT , перпендикулярной к первым двум плоскостям. Эта неоднородность строения является результатом роста дерева как сложного органического вещества клеточного строения (рис. 3.1, б) с ежегодным нарастанием нового кольца кле-

ток в виде годичных слоев поздней и ранней древесины, сердцевинных лучей $a-a$, отражающих влияние бесконечно большого разнообразия факторов.

Трем взаимно перпендикулярным плоскостям соответствуют три главных направления (рис. 3.1, а): осевое I , нормальное к торцевой плоскости; радиальное II , нормальное к тангенциальной плоскости; тангенциальное III , нормальное к радиальной плоскости.

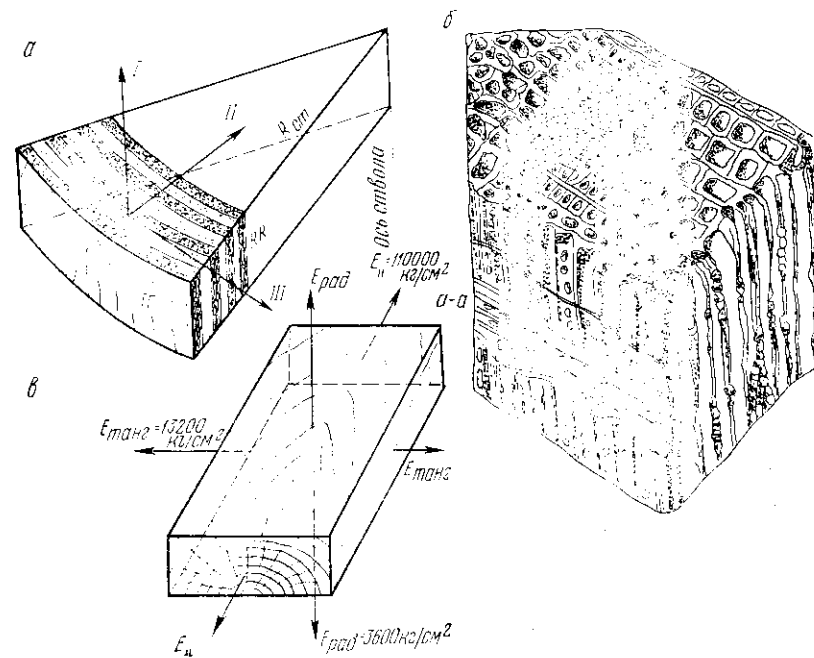


Рис. 3.1. Схема строения древесины

Древесина — материал ортотропный, т. е. имеющий три главных взаимно перпендикулярных направления (I, II, III) , в которых физико-механические свойства резко различны (рис. 3.1, в).

Древесина — анизотропный материал, т. е. обладающий различными свойствами и разной сопротивляемостью в разных направлениях. Например, модуль упругости E при растяжении воздушно-сухой сосны составит: вдоль волокон $110\,000\text{ кг/см}^2$, в тангенциальном направлении $13\,200$; в радиальном направлении 3600 кг/см^2 .

На рис. 3.2 дана диаграмма (по П. Н. Хухрянскому) на сжатие поперек волокон, из которой видно различие в характере кривых при сжатии свободных образцов древесины в радиальном и тангенциальном направлениях.

При скалывании древесины также получены различные результаты в зависимости от того, будет ли скалывание по радиальной или тангенциальной плоскости. Например, временное сопротивление ска-

* В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела. Т. 3. Томск, 1944.

лыванию для бука в радиальной плоскости 35—38 кг/см², в тангенциальной — 62—120 кг/см² и т. д.

Таким образом, древесина — анизотропно-ортотропный материал волокнисто-слоистого разноклеточного строения. Эти свойства вносят значительные затруднения при решении вопросов, связанных с резанием древесины. Положение еще более усложняется большим разнообразием свойств древесины разных пород, изменением механических свойств породы в зависимости от условий произрастания, структурных особенностей ее (крупнослойная, мелкослойная, сучковатая, свилеватая и т. п.), положением в стволе (комель или вершина, заболонь или ядро), влажности, температурных условий (мерзлая, пропаренная, сухая, влажная).

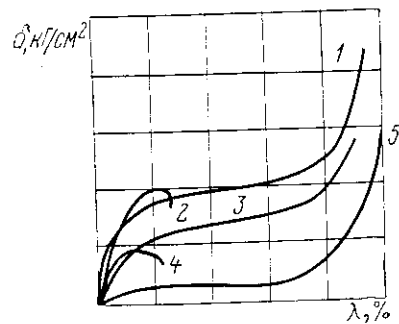


Рис. 3.2. Диаграмма сжатия древесины поперек волокон (по П. Н. Хухрянскому):

1 — в радиальном направлении сухой древесины; 2 — в тангенциальном направлении; 3 — в радиальном направлении сырой древесины; 4 — в тангенциальном направлении пропаренной древесины; 5 — в радиальном направлении пропаренной древесины

Опытами ЛТА установлено, что плотность древесины по годовому слою неравномерна и изменяется по закону синусоиды. Максимальная плотность — в поздней зоне годичного слоя, а минимальная — в ранней. Характер изменения твердости древесины по годовому слою подобен изменению плотности по нему: чем плотнее древесина, тем больше ее прочность.

Эти особенности строения древесины указывают на то, что физико-механические свойства даже для одной и той же породы колеблются в широких пределах. Например, временное сопротивление сжатию вдоль волокон может изменяться: для сосны от 250 до 650; для дуба от 425 до 625 кг/см² и т. д.

Значительная изменчивость физико-механических свойств древесины приводит к колебаниям в затрате работы резания на ±(25—30) % для одних и тех же условий (режимов) обработки.

Влияние влажности и температуры. Прочность древесины уменьшается с увеличением влажности от абсолютно сухого состояния до точки насыщения волокон (рис. 3.3). Прочность более влажной древесины изменяется незначительно.

Уменьшение временного сопротивления σ вовсе еще не означает соответствующего снижения работы, затрачиваемой на разрушение. Помимо изменения напряжения деформации, надо учитывать еще изменение деформации, так как затрачиваемая на нее внешняя работа $A = PL$ (где P — действующая сила, а L — путь ее действия до разрушения материала). Эта работа равна суммарному действию элементарных сил деформации:

$$PL = \sum \sigma l, \quad (3.1)$$

где σ — соответствующее напряжение, кг/см²;
 l — перемещение элементарной частицы тела, см.

На рис. 3.4, а приведены кривые, отражающие изменение нагрузки и деформации при статическом изгибе для воздушно-сухой (кривая 1) и свежесрубленной древесины (кривая 2).

На рис. 3.4, б даны диаграммы сжатия при сухой (кривые I, II) и пропаренной (кривые I' и II') древесине березы и бука. Работа

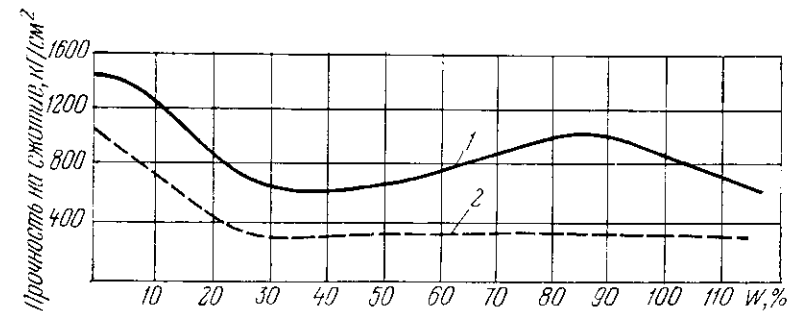


Рис. 3.3. Предел прочности вдоль волокон: 1 — мерзлой; 2 — влажной древесины (по Ф. Кольману)

деформации до разрушения выражается соответствующими площадями диаграммы между кривой, осью абсцисс и ординатой в точке разрушения. Очевидно, что, несмотря на снижение напряжения при влажной древесине (рис. 3.4, б), работа разрушения возросла.

От соотношения между напряжением и деформацией зависит увеличение работы внутренних сил.

Изменение температуры древесины всегда зависит от других факторов, например от влажности.

С увеличением температуры прочность древесины уменьшается. Зависимость предела прочности на сжатие замороженной древесины видна на рис. 3.3. При замораживании древесины влажностью выше точки насыщения волокон свободная влага в полостях клеток затвердевает и придает древесине дополнительную прочность при сжатии, максимальное значение которой будет при влажности $W = 85\%$.

Влияние влажности и температуры на свойства древесины изучено недостаточно. Опыты проводились в прессах при малых скоростях нагружения 0,02—0,25 м/сек.

Влияние скорости разрушения. Древесина обрабатывается резанием при скоростях, достигающих 100 м/сек, что еще более усложняет определение соотношения между напряжением и деформацией, а эти зависимости крайне необходимы для суждения о затраченной работе при обработке.

С увеличением скорости нагружения образцов их временное сопротивление деформации растет.

На рис. 3.4, в приведена зависимость временного сопротивления (ординаты) от скорости нагружения образца (абсциссы) при сжатии вдоль волокон, а на рис. 3.4, г — при статическом изгибе.

Однако и в данном случае о работе разрушения можно судить лишь по соотношению между напряжением и деформацией, так как только эта зависимость характеризует уменьшение или увеличение

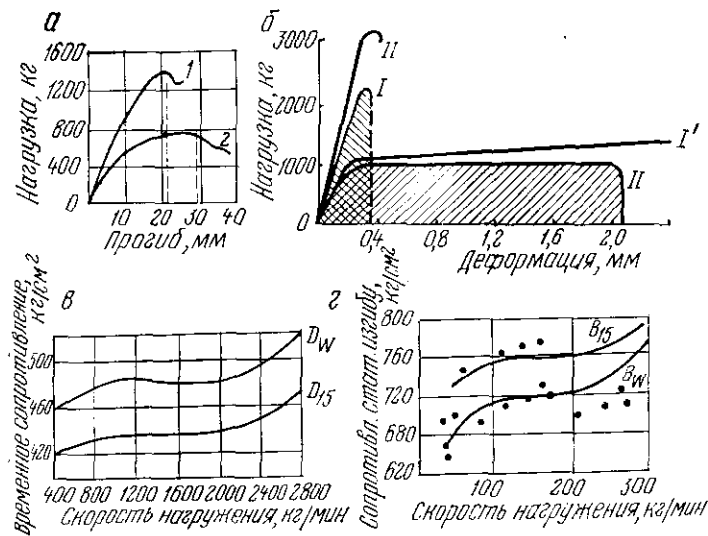


Рис. 3.4. Графики сопротивления древесины (по А. Х. Певцову)

работы. Для древесины этот вопрос изучен недостаточно, особенно при скоростях нагружения, близких к скоростям резания.

Влияние угла перерезания волокон и слоистости древесины. Влияние волокнисто-слоистого строения древесины сказывается на разрушающих нагрузках в зависимости от направления действующей силы к направлению ее волокон (рис. 3.5).

Испытания на сжатие образцов под разными углами к направлению волокон (по опытам ЦАГИ) показали значительное снижение временного сопротивления сжатию с увеличением угла ψ (рис. 3.5, б). Аналогичные результаты получены и для других видов напряжений.

При резании древесины необходимо учитывать один из самых значительных факторов процесса — угол перерезания волокон ψ , образуемый направлением вектора действующей силы и направлением волокон древесины. Направление волокон древесины при этом условно принимается за прямую линию в виде вектора (рис. 3.8) [11].

Даже если известны основные характеристики данных образцов, например сосны (объемный вес, влажность, количество ранней и поздней древесины, твердость и др.), то и тогда волокнисто-слоистое строение древесины в зависимости от угла перерезания ψ приво-

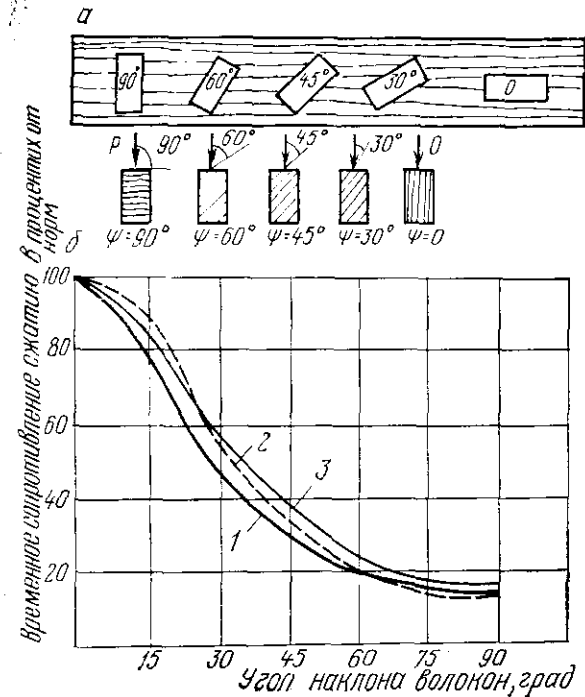


Рис. 3.5. Угол перерезания волокон ψ : а — вырезание образцов для испытания на сжатие под разными углами ψ ; б — график изменения временного сопротивления сжатию в зависимости от угла ψ : 1 — край 1; 2 — край 2; 3 — край 3

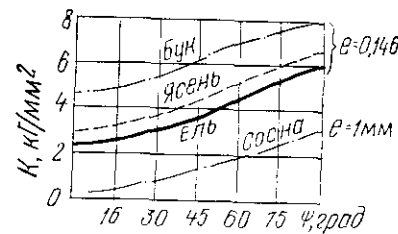


Рис. 3.6. График изменения среднего условного давления резания при разных углах

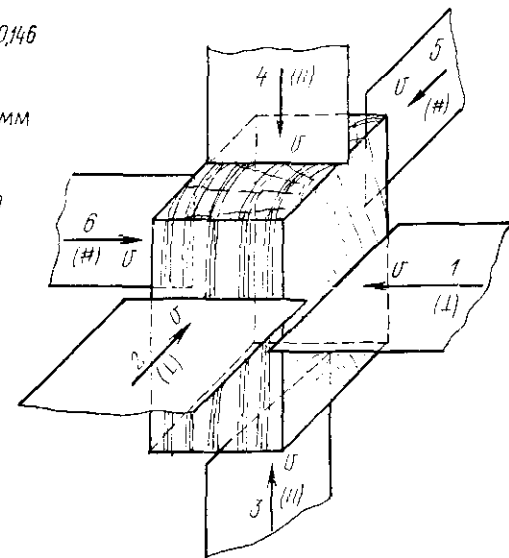


Рис. 3.7. Неоднородность строения древесины в трех взаимно перпендикулярных плоскостях

дит к тому, что одна и та же сосна представляется как многообразный материал с бесконечно большим количеством вариантов свойств. Поэтому необходимо знать влияние угла ψ на силу и среднее условное давление резания (рис. 3.6).

При резании следует учитывать еще важнейший фактор — слоистость. С учетом слоистости (рис. 3.7) надо различать по два

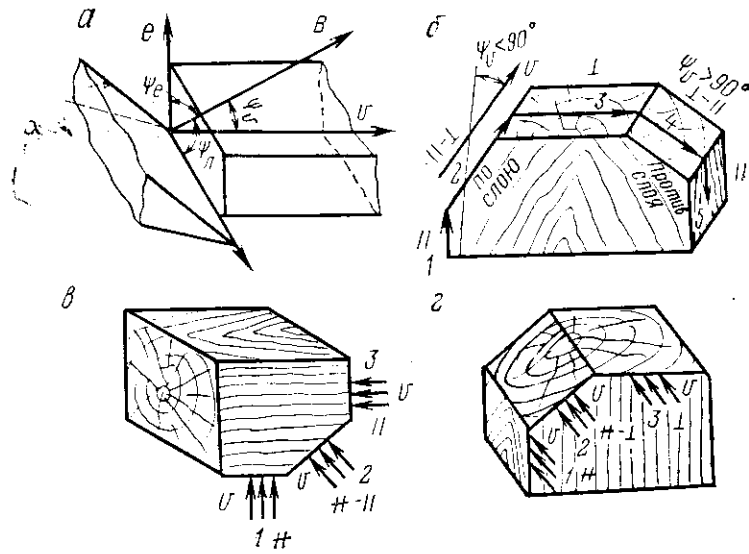


Рис. 3.8. Резание при разных углах ψ :
 а — общий случай; б — продольно-торцевое; в — продольно-поперечное;
 г — торцово-поперечное

случая торцевого (1 и 2), продольного (3 и 4) и поперечного резания (5 и 6) в радиальной и тангенциальной плоскостях. Так как на производстве слоистость практически учесть нельзя, то в расчетах принимают среднее значение между этими направлениями. Резание древесины редко происходит по основным направлениям. Реально будем иметь переходные случаи. Наиболее общим случаем является продольно-торцово-поперечное резание, показанное на рис. 3.8, а.

На рис. 3.8, б показан переходный случай от продольного резания к торцевому, на рис. 3.8, в — случай переходного продольно-поперечного резания, на рис. 3.8, г — переходный случай поперечно-торцевого резания.

3.2 Главные виды элементарного резания

Элементарное резание. Элементарное (простое) [11] резание характеризуется следующими признаками: резание — открытое; режущая кромка — прямолинейная; движение — прямолинейно-ступенчатое; вектор скорости резания нормален к режущей кромке;

скорость v , сила резания P , углы резания δ , α , номинальная толщина e и ширина b стружки постоянны; направление волокон такое, что сила, нормальная к передней поверхности резца, разлагается только в плоскости схода стружки.

Элементарному (простому) виду резания соответствуют главные виды резания:

торцевое (\perp) в плоскости, нормальной к волокнам, перпендикулярно к их длине (рис. 3.8, б);

продольное (\parallel) в плоскости волокон параллельно их длине (рис. 3.8, б);

поперечное (\perp) в плоскости волокон перпендикулярно к их длине (рис. 3.8, в), а также переходный случай — резание продольно-торцевое ($\parallel-\perp$) (рис. 3.8, б). В этом случае волокна параллельны плоскости схода стружки.

Если нарушается хоть одно условие элементарного резания, то процесс резания будет сложным. Например, поперечно-продольное ($\perp-\parallel$) (рис. 3.8, в) и поперечно-торцевое ($\perp-\perp$) (рис. 3.8, г) резания относятся к сложному, так как волокна древесины пересекают плоскость схода стружки под углом, отличающимся от 0 и 90°, что вызывает объемную деформацию и усложняет процесс резания. Резание полузакрытое (см. рис. 1.6, б), закрытое (см. рис. 1.6, в), когда в работе участвуют две или несколько режущих кромок, или резание, при котором с изменением угла ψ меняется толщина стружки и другие параметры, также относятся к сложному резанию.

Опыты проф. И. А. Тиме по строганию древесины в трех главных направлениях резания (\perp , \parallel , \perp) позволили описать влияние строения древесины на характер образования стружки и силу резания.

На рис. 3.9—3.11 приведены классические схемы стружкообразования по И. А. Тиме (1868) и рентгено снимки, сделанные А. Л. Бершадским (1935), развивающие и дополняющие положения И. А. Тиме.

Опыты проф. И. А. Тиме проводил в основном при углах $\delta=45^\circ$ и $\alpha=0$, толщине стружки $e=1$ мм. Он предполагал, что резцы абсолютно острые, и не учитывал силы трения и деформации ниже плоскости резания.

Резание в торец. При проникновении резца в древесину на величину Δ по направлению v проф. И. А. Тиме предполагал постепенный рост сил по закону прямой, действующих на резец (рис. 3.9): нормального давления со стороны передней поверхности резца N ; силы резания P по направлению скорости резания v ; силы P_c , нормальной к скорости резания, воздействующей на стружку.

С увеличением силы N растут ее составляющие P и P_c . Под влиянием этих сил при резании в торец древесину легче сколоть вдоль волокон силой P_c , чем разрушить ее сжатием силой P .

Периодически, когда сила P_c достигает разрушающей величины, элемент стружки скалывается, силы резания уменьшаются до нуля, а затем при формировании нового элемента снова растут до максимума. Так, из отдельных периодически образующихся и слабо свя-

занных между собой элементов получается элементная стружка скалывания (рис. 3.9, в).

Действие силы P , прижимающей элемент стружки к поверхности сдвига и создающей трение в плоскости сдвига, проф. И. А. Тиме не

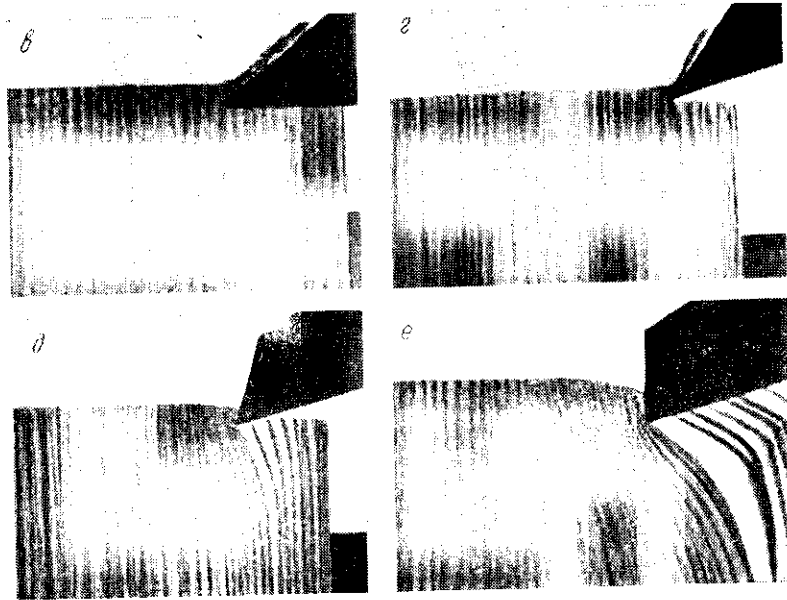
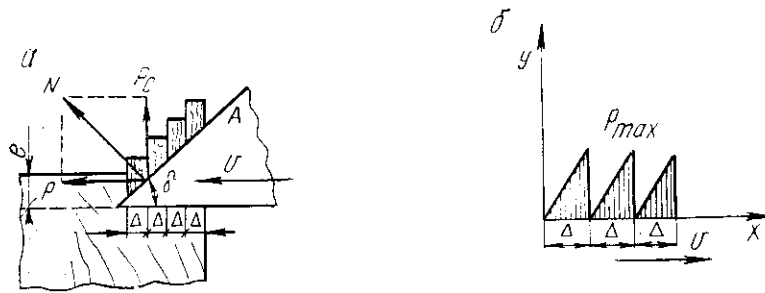


Рис. 3.9. Торцевое резание:

а — стружкообразование по И. А. Тиме; б — диаграмма изменения сил (по И. А. Тиме); рентгено снимки резания: в — при $\delta = 45^\circ$; з — при $\delta = 60^\circ$; д — при $\delta = 75^\circ$; е — при $\delta = 90^\circ$

учитывал. На рентгено снимках при $\delta = 45^\circ$ и $\alpha = 0$ видны элементы скола, кроме того, видна деформация ниже линии раздела, создающая отжим резца и трение по его задней поверхности. Ниже плоскости резания появляются трещины в направлении волокон, образуя дефектный слой значительной толщины при резании толстой стружки (рис. 3.9, е). Если резанию подвергается влажная древесина, то при малых углах δ можно получить сливную ленточную

стружку, которая, не завиваясь, сходит с резца в виде непрерывной плоской ленты (рис. 3.9, з).

При изменении угла δ от 45° до 90° и толщины стружки от 0,1 до 2 мм уплотняется древесина над, перед и под резцом, причем

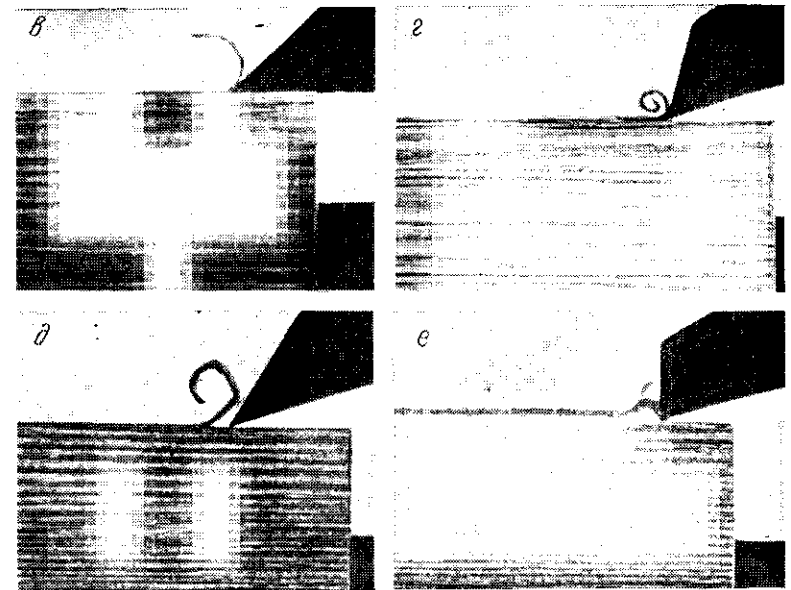
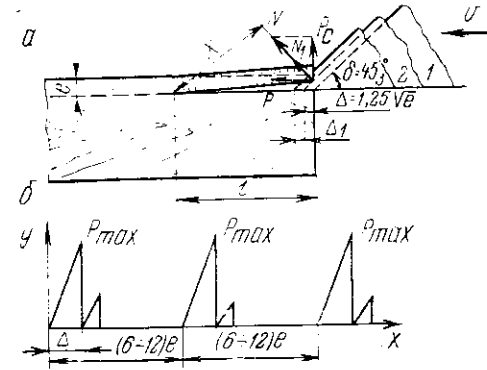


Рис. 3.10. Резание вдоль волокон:

а — стружкообразование по И. А. Тиме; б — диаграмма изменения сил (по И. А. Тиме); рентгено снимки: в — при $\delta = 45^\circ$; з — при $\delta = 60^\circ$; д — при $\delta = 75^\circ$; е — при $\delta = 90^\circ$

деформация стружки передней поверхностью резца и древесины под плоскостью резания будет разной, а значит, и работа резания и силы различные.

Шероховатость поверхности возрастает с увеличением угла резания и толщины стружки е.

Слоистость приводит к спрессовке ранней древесины между слоями поздней, усложняя процесс резания.

Резание вдоль волокон. При резании вдоль волокон (рис. 3.10) по мере проникновения резца на величину Δ под влиянием силы P_c легче отслоить древесину на некоторой длине, чем разрушить сжатием вдоль волокон, а затем, при дальнейшем продвижении резца, надломить ее. После образования опережающей трещины силы падают до нуля, резец проходит путь, почти не затрачивая работы. Потом процесс повторяется.

Проф. И. А. Тиме заметил, что при $\delta=45^\circ$ и $e=1$ мм элементы стружки могут получиться относительно большой величины $l_c=(6-12)e$. Они образуют собой грани стружки, имеющие вид многоугольника, причем при отделении элементов происходит разрыв в плоскости среза, совпадающий с направлением волокон, и перелом элементов в плоскости, почти перпендикулярной к волокнам. Так образуется стружка отщепа. С уменьшением толщины стружки радиус закругления завитка уменьшается, видимые удлиненные элементы стружки прочнее связаны друг с другом в местах перегиба, образуя многоугольную стружку надлома. Такой характер стружкообразования виден на рентгено снимке при $\delta=75^\circ$ (рис. 3.10, *д*). Шероховатость поверхности значительная. Возможны трещины ниже плоскости резания.

При тонких стружках ($e=0,1-0,2$ мм) и точном совпадении направления волокон с направлением резания образуется стружка в виде непрерывной сильно деформированной ленты, которая сворачивается в цилиндрическую (винтовую, если лезвие не перпендикулярно к v) спираль с очень малым радиусом закругления, причем отдельные ее элементы трудно различимы — она сливная. Такая стружка называется *спиральной* (рис. 3.10, *г*). Сливные стружки (при $\delta=60^\circ$) характеризуются значительной продольной усадкой, т. е. уменьшением длины по отношению к пути перемещения. С увеличением толщины стружки радиус завитка ее возрастает.

При $\delta=90^\circ$ и толстых стружках получается значительное уплотнение перед резцом, после чего начинает отделяться стружка вылучивания (рис. 3.10, *е*).

Шероховатость поверхности, весьма незначительная при тонкой сливной стружке, возрастает при образовании многоугольной стружки надлома, а при стружке отщепа наблюдаются глубокие вырывы волокон.

Резание поперек волокон. Здесь периодичность действия сил сохраняется (рис. 3.11, *а, б*), хотя при резании пропаренной древесины резцом с очень малым углом резания можно получить сливную ленточную стружку без внутренних трещин. При более толстой стружке она, оставаясь ленточной, может иметь несквозные трещины.

С увеличением угла резания и толщины стружки вследствие слабой связи поперек волокон образуется стружка скалывания в виде отдельных элементов (рис. 3.11, *в*).

При поперечном резании возможно образование стружки отры-

ва (рис. 3.11, *д*) в виде не связанных между собой элементов. Для этого вида стружкообразования характерны вырывы ниже плоскости резания — следствие того, что стенки клеток волокон древесины имеют значительную прочность и при нажиме на них лезвия клетки

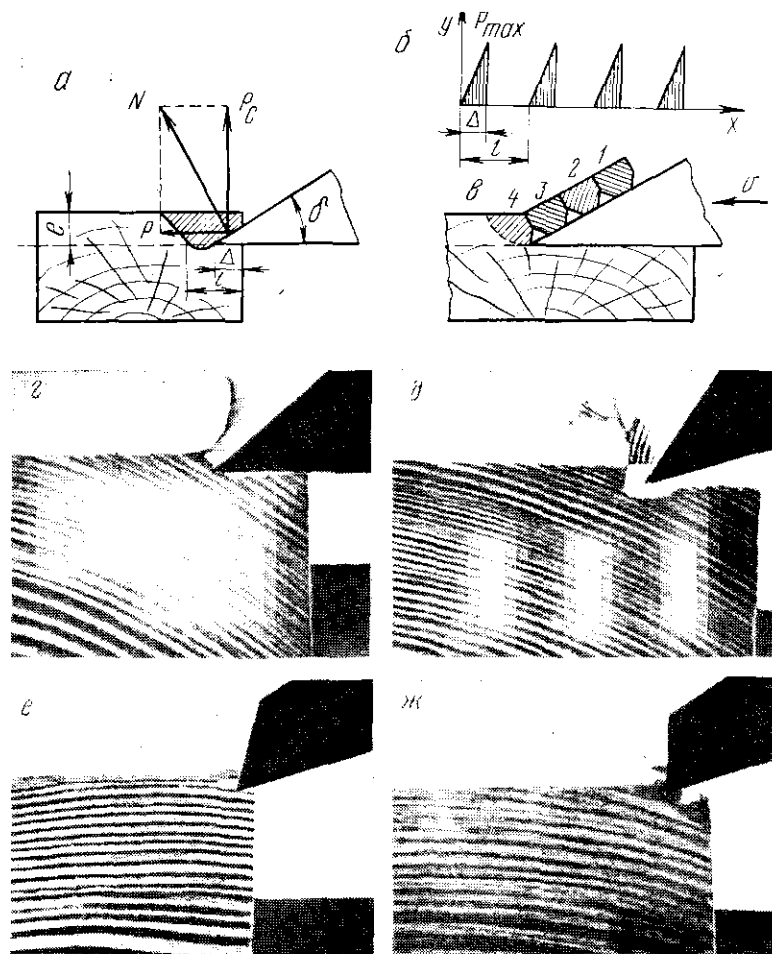


Рис. 3.11. Резание поперек волокон:

а, в — стружкообразование по И. А. Тиме; *б* — диаграмма изменения сил (по И. А. Тиме); рентгено снимки: *г* — при $\delta = 45^\circ$; *д* — при $\delta = 60^\circ$; *е* — при $\delta = 75^\circ$; *ж* — при $\delta = 90^\circ$

не перерезаются, а происходит вырыв ниже лежащих более слабых элементов.

Рентгено снимки при $\delta=45-90^\circ$ показывают, что слоистость древесины, толщина стружки e , угол резания δ существенно влияют на характер деформаций и их величину. Это отражается на стружкообразовании, влияет на силу и работу, затрачиваемую на резание.

Шероховатость поверхности, незначительная при образовании сливной ленточной стружки, возрастает при ленточной стружке с трещинами. На обработанной поверхности образуются вырывы при стружке скалывания, которые еще более ухудшают качество обработки при образовании стружки отрыва.

Установившийся и неустановившийся процесс образования стружки. Установившийся процесс стружкообразования характеризуется тем, что образуется сливная стружка при постоянной длине контакта стружки с передней поверхностью резца, режущая кромка работает непрерывно с постоянной силой резания.

Качество обработки при этом высокое, разрушения под поверхностью резания не образуются, поэтому исследование режимов резания, при которых возможен установившийся процесс резания, является важнейшей задачей науки о резании.

При образовании элементарных стружек отрыва и отщипа при наличии опережающей трещины или стружки скалывания длина контакта стружки с передней поверхностью резца и сила резания периодически меняются, поэтому такой процесс образования стружки называется неустановившимся.

Шероховатость поверхности при неустановившемся стружкообразовании возрастает и зависит от глубины разрушения и распространения деформации ниже плоскости резания.

3.3. Особенности деформирования древесины в замкнутом пространстве

Резание древесины относится к процессам, происходящим в ползамкнутом пространстве. Характер напряжений и деформаций, возникающих при этом, будет совершенно иной, чем при сжатии автономного образца в прессе при древесиноведческих опытах.

По опытам проф. Е. Г. Ивановского и доц. В. И. Микулинского сжатие древесины в замкнутом пространстве происходит почти при постоянном давлении σ и уменьшающемся объеме.

В то время как при свободном сжатии образца в прессах (рис. 3.12, а) напряжения σ растут пропорционально относительной деформации λ (закон Гука) до момента разрушения образца, то характер связи между напряжением σ и относительной деформацией λ при сжатии образца в замкнутом пространстве резко отличается (рис. 3.12, б).

Эпюр изменения относительной деформации λ и соответствующего напряжения σ показан на рис. 3.13, согласно опытам Е. Г. Ивановского (ЛТА) и В. И. Микулинского (БТИ), сжимавших древесину в стальной обойме. Для сосны при влажности 20%, объемном весе $\gamma = 0,54 \text{ кг/см}^3$ и сжатии до $\lambda = 0,6$, т. е. при уменьшении объема в два с половиной раза, $\sigma = \text{const}$.

При $\lambda = 0,6$ объемный вес ($\gamma_1 = 0,54 \cdot 2,5 = 1,35$) мало отличается от объемного веса древесинного вещества $\gamma_d = 1,56 \text{ Г/см}^3$. Образец древесины приближается к относительной сплошности структуры, и малейшее дальнейшее уменьшение объема влечет за собой значи-

тельное увеличение σ (рис. 3.12). При снятии пуансона 1 из обоймы 2 удалается твердый, как металл, цилиндр.

При сжатии открытого с четырех сторон изолированного образца 3 в прессе, где нет препятствий для его бокового расширения, разрушение его происходит, не достигая той степени деформации, которую может получить образец в замкнутом пространстве,

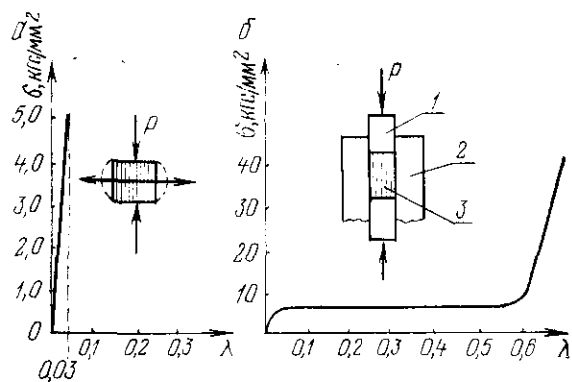


Рис. 3.12. Свободное и несвободное сжатие древесины:

1 — пуансон; 2 — обойма; 3 — образец

не разрушаясь. Поэтому законы деформирования в незамкнутом и замкнутом пространстве будут резко отличны друг от друга.

Проф. П. Н. Хухрянский, разделяя процесс сжатия в замкнутом пространстве (рис. 3.13) на три фазы, определяет их следующим образом.

В первой фазе как упругая, так и пластическая деформация с незначительными отклонениями подчиняется закону Гука. Первая фаза заканчивается при относительном сжатии на 3—6%. Тангенс угла наклона первого участка близок к модулю упругости.

Деформация в первой фазе протекает в основном за счет упругого деформирования стенок всех клеток древесины до тех пор, пока они не потеряют устойчивость, с этого момента начинается вторая фаза.

Во второй фазе происходит упругое и пластическое деформирование, сокращение межклеточных пространств, смятие сосудов и клеток ранней древесины. Объем уменьшается в 1,5—2,5 раза, а давление остается почти постоянным. В этой фазе все кривые имеют очень пологий участок со слабым подъемом.

Третья фаза наступает по мере уплотнения всех воздушных промежутков, в это время деформируются клетки поздней древесины. Так как клетки поздней древесины — толстостенные, то смятие их требует больших давлений. Давление начинает сильно расти при значительном изменении объема.

На характер деформации и напряжения влияют влажность W ,

порода древесины, угол перерезания волокон ϕ , трение древесины о стенки обоймы, скорость нагружения.

Хотя и нельзя непосредственно переносить результаты этих опытов на процесс резания древесины, они все же помогают познанию процесса резания, где сжатие в полужамкнутом пространстве играет большую роль.

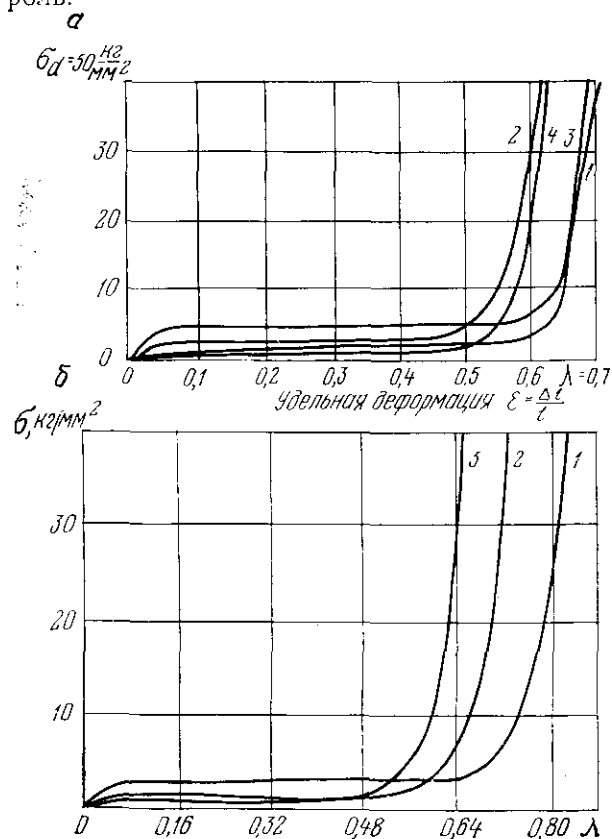


Рис. 3.13. Диаграмма прессования древесины в замкнутом пространстве:

a — сжатие сосны и стружек (по Е. Г. Ивановскому): 1 — влажность древесины $W = 20\%$, объемный вес 0,54; 2 — влажность древесины $W = 55\%$, объемный вес 0,7; 3 — влажность стружек $W = 20\%$, объемный вес 0,54; 4 — влажность стружек $W = 55\%$, объемный вес 0,7; b — сжатие сосны (по В. И. Микулинскому): 1 — вдоль волокон; 2 — в тангенциальном направлении; 3 — в радиальном направлении

Процесс резания древесины больше подобен рассмотренному случаю сжатия образца в стальной обойме, чем сжатие свободного образца в прессах.

При резании древесины можно полагать, что стружкообразование происходит при постоянном давлении передней поверхности резца. Чтобы утвердить эту важную физическую закономерность, надо гипотезу подтвердить опытом, что и делается в гл. 7.

Глава 4

РАБОЧИЕ ДВИЖЕНИЯ И ГЕОМЕТРИЯ СТРУЖКИ

4.1. Рабочие движения

Для осуществления процесса резания необходимо создать контакт между резцом и древесиной и поддерживать его при отделении стружки.

Соответствующие перемещения резца и материала относительно неподвижных осей координат называются *рабочими движениями*. Для отделения ряда стружек за несколько проходов необходимо не менее двух рабочих движений (рис. 4.1), которые выполняются с разной скоростью одновременно или разновременно.

Рабочее движение, обладающее большей средней скоростью v , называется *главным*, а обладающее меньшей средней скоростью u — движением *подачи*.

Главное движение обеспечивает каждому резцу отделение номинальной стружки с древесины, подаваемой за оборот, на длине контакта l . Движение подачи со скоростью u — подведение к резцам новых номинальных объемов.

Главное движение и движение подачи, происходящие одновременно, геометрически суммируются в движение резания по траектории относительно перемещения лезвия резца в древесине. Скорость этого движения называется *скоростью резания*.

Скорость резания v' в каждый рассматриваемый момент по величине и направлению равна геометрической сумме скорости главного движения v и движения подачи u :

$$\vec{v}' = \vec{v} + \vec{u}. \quad (4.1)$$

Главное движение может принадлежать инструменту или заготовке. Есть случаи, когда оба рабочих движения осуществляются инструментом.

На рис. 4.1 рассматривается случай резания однорезцовым инструментом. После рабочего главного движения по вектору \vec{v} необходимо вернуть резец в исходное положение и опустить (подать) его на величину подачи на резец $s=e$ для снятия последующей стружки. Параметрические уравнения:

$$\begin{aligned} \text{движения инструмента } x &= vt; \quad y = 0; \\ \text{движения заготовки } y &= ut; \quad x = 0. \end{aligned}$$

Эти рабочие движения происходят одновременно. Во время резания резец врезается в неподвижную древесину. Направление и величина скорости резания v' совпадают с направлением и величиной главного рабочего движения v .

При резании древесины всегда скорость главного движения v значительно больше скорости подачи u :

$$v \gg u, \text{ т. е. } \frac{u}{v} \ll 1.$$

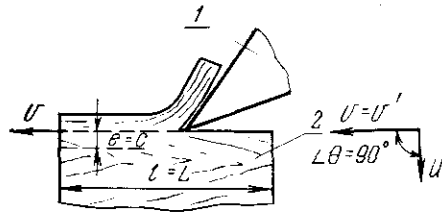


Рис. 4.1. Схема строгания:
1 — резец; 2 — заготовка

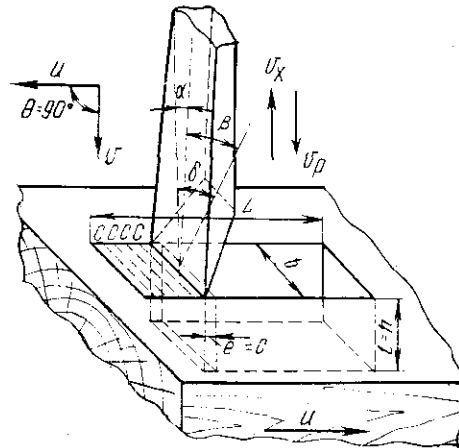


Рис. 4.2. Схема долбления

Практически это позволяет вместо $\vec{v}' = \vec{v} + \vec{u}$ принимать $v' = v$, т. е. принять скорость главного движения v по величине и направлению равной скорости резания v' , а траекторию главного движения — за траекторию резания.

Главное движение v является доминирующим в образовании среза стружки, а движением подачи u к резцу подводятся новые участки обрабатываемой детали.

Подачей на резец c называется отрезок между смежными траекториями резца в древесине по направлению вектора скорости подачи $c \parallel u$. Подача на один оборот или ход (посылка)

$$\Delta = cz. \quad (4.2)$$

На рис. 4.2 показаны долото, получающее возвратно-поступательное перемещение v_p и v_x , и древесина, в которой долотом выбивается отверстие (гнездо). При каждом двойном ходе долота срезается стружка номинальной толщины $e = c$. Схема резания аналогична схеме на рис. 4.1, но здесь резание торцевое, закрытое.

Последовательное срезание ряда стружек при долблении происходит при периодическом движении подачи u .

Острый угол (или 90°) между векторами v' и u называется кинематическим углом встречи Θ .

Если с заготовки длиной L придется последовательно срезать несколько стружек толщиной $e = c$, то для ускорения процесса ряд резцов соединяют в одном инструменте, например в пиле (рис. 4.3).

При этом стружки 1, 2, 3, ... могут быть срезаны за один проход резцами I—VI. Зубья пилы находятся на одинаковом расстоянии t друг от друга. Расстояние между двумя смежными вершинами зубьев t называется шагом.

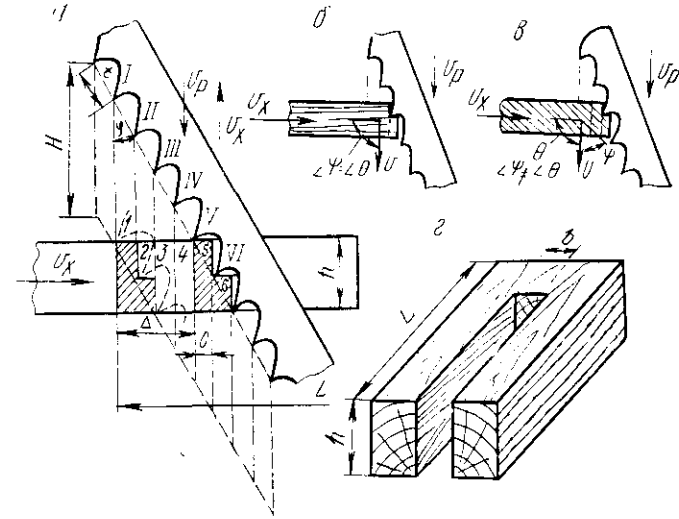


Рис. 4.3. Пиление рамной пилой с подачей при холостом ходе:
а — общая схема; б — направление волокон совпадает с направлением подачи; в — направление волокон не совпадает с направлением подачи; з — пропилен

Вершины зубьев располагаются на одной линии (рис. 4.3). Пила получает возвратно-поступательное перемещение v_p и v_x . Она установлена с жестким углом наклона ϕ к направлению рабочего движения v_p . Резание осуществляется при неподвижной древесине во время рабочего хода пилы вниз по вектору v_p . Подача древесины по вектору v_x происходит при обратном (холостом) ходе пилы вверх. При этом зубья пилы отходят от дна пропила благодаря наклону линии вершин зубьев под углом ϕ к вектору v_p . Вершины зубьев при резании перемещаются в неподвижной древесине по прямолинейным траекториям, совпадающим с направлением вектора v_p .

Расстояния между двумя смежными траекториями соседних зубьев определяют номинальную толщину стружки 1, 2, 3, ... Так как $t = \text{const}$, то $e = \text{const}$ и $c = \text{const}$; причем $e = c$, где $c \parallel u$; $e \perp v$ и угол $\Theta = 90^\circ$. Подача на все работающие зубья за один ход пилы (посылка)

$$\Delta = H \operatorname{tg} \phi \text{ мм.}$$

Если направление волокон параллельно u , то угол встречи вектора v' с волокнами ψ равен кинематическому углу встречи Θ , т. е. $\psi = \Theta$ (рис. 4.3, б). Когда направление волокон не совпадает с направлением подачи, это разные углы (см. рис. 4.5).

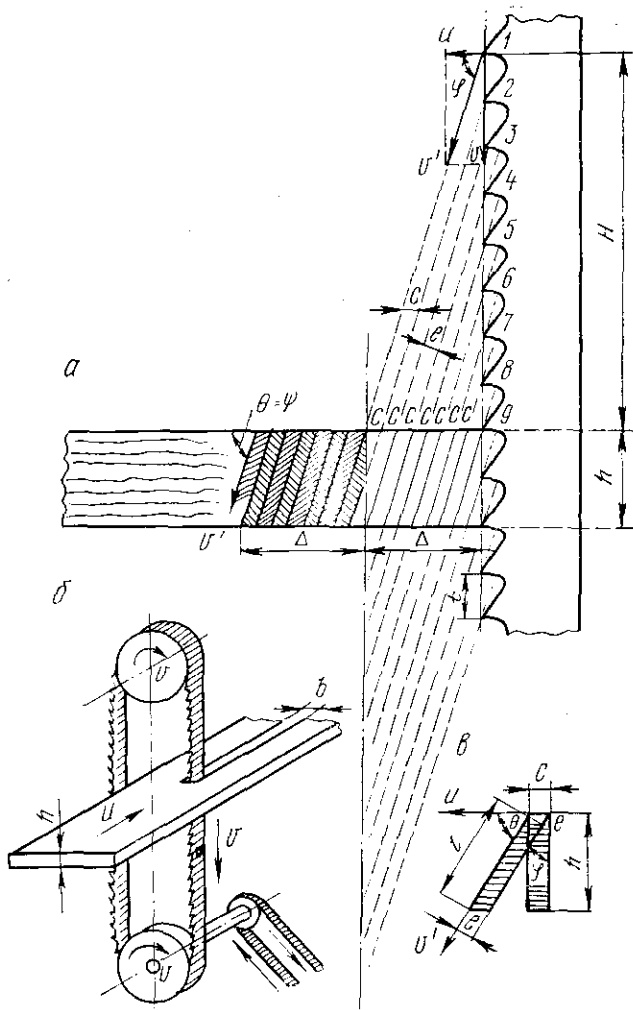


Рис. 4.4. Пиление ленточными пилами:
а — общая схема; б — схема стружкообразования; в — основные размеры номинальной стружки

На рис. 4.4 показано пиление на ленточнопильных станках. Стальная лента с зубчатой кромкой огибает наподобие ремня два шкива — ведущий и ведомый. Окружная скорость ленты v постоянная. Древесина непрерывно надвигается на пилу с равномерной скоростью подачи u . Параметрические уравнения:

$$\begin{aligned} \text{движения инструмента } x_1 &= 0; & y_1 &= vt; \\ \text{движения заготовки } x_2 &= ut; & y_2 &= 0. \end{aligned}$$

Относительное движение главной режущей кромки зуба пилы

$$x = ut \text{ и } y = vt.$$

Уравнение траектории режущей кромки в древесине

$$y = \frac{v}{u} x.$$

Так как $\text{tg } \varphi = \frac{u}{v} = \text{const}$, то траектория зубьев пилы будет проходить по прямым линиям, параллельным \bar{v}' , т. е. траектории всех зубьев будут отклонены от направления главного движения v на угол $\varphi = \text{const}$.

Угол φ в данном случае — это кинематический угол отклонения траектории резания от направления главного движения $\varphi = \angle(\bar{v}'; \bar{v})$ и изменяется в зависимости от изменения угла $\Theta = (\bar{v}'; \bar{u})$. Такие же закономерности будут в цепнодолбежных станках на прямолинейных участках фрезерной цепи.

Так как вектор \bar{v} параллелен волокнам, то угол $\Theta = \varphi$.

На рис. 4.5 показана схема пиления дисковой пилой, вращающейся вокруг оси O с постоянной скоростью $v = \text{const}$. Древесина перемещается со скоростью подачи $u = \text{const}$. Параметрические уравнения движения: главной режущей кромки зуба пилы $x_1 = -R \sin \Theta$ и $y_1 = R \cos \Theta$; движения заготовки $x_2 = ut$ и $y_2 = 0$.

Траектория относительного движения:

$$\begin{aligned} x &= -R \sin \Theta + ut; \\ y &= R \sin \Theta. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Это уравнение укороченной циклоиды. Разделим время одного оборота на число одинаковых промежутков, равных, например, числу зубьев пилы, тогда (рис. 4.4, б) зуб 1 проходит путь $1-2=t$, равный шагу, а брусок — путь c . При этом произойдет относительное перемещение зуба 1 в точку 2. Далее зуб 1 переходит в точку 3, пройдя двойной путь, соответствующий $2t$, а брусок — путь $2c$, который откладываем от точки 3, и т. д. Соединив точки 1, 2, 3, ... и т. д., получим циклоидальную кривую, которая будет относительной траекторией резания зуба 1.

Рассуждая аналогично, строим траекторию резания зуба 2, 3, ... и т. д. Все эти траектории сдвинуты одна относительно другой по направлению u на величину c , т. е. на величину подачи на резец.

Практически слагаемое ut уравнения (4.3) очень мало, поэтому за траекторию относительного движения режущей кромки можно принять окружность:

$$x^2 + y^2 = R^2.$$

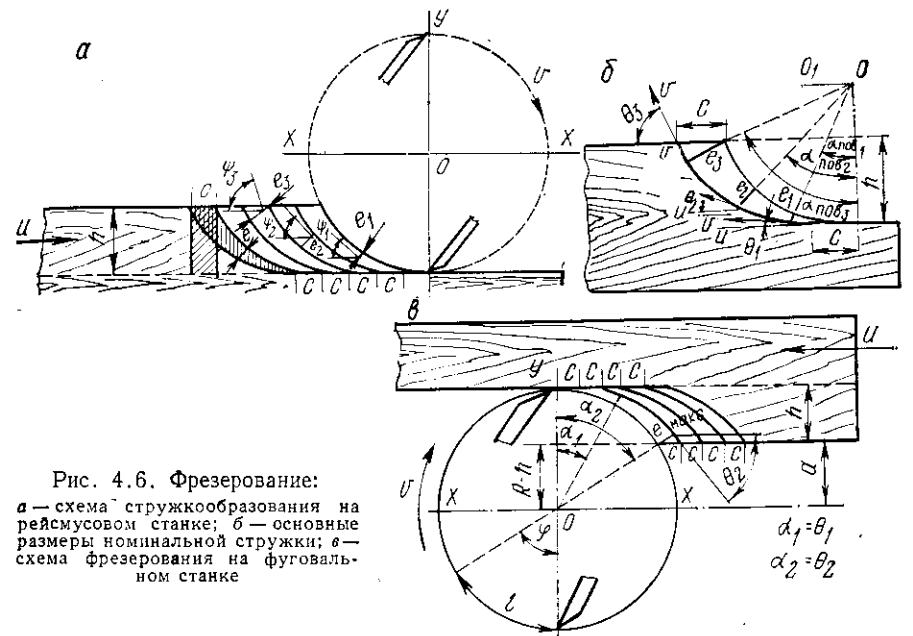
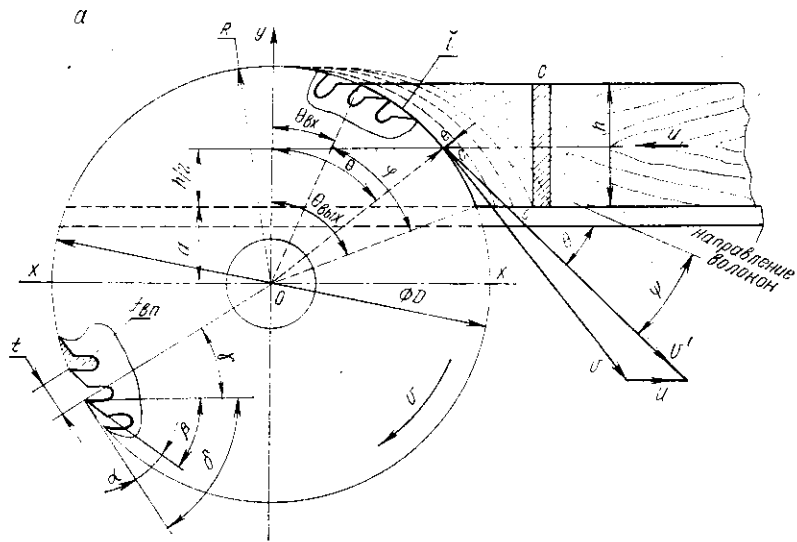


Рис. 4.6. Фрезерование:
 а — схема стружкообразования на рейсмусовом станке; б — основные размеры номинальной стружки; в — схема фрезерования на фуговальном станке

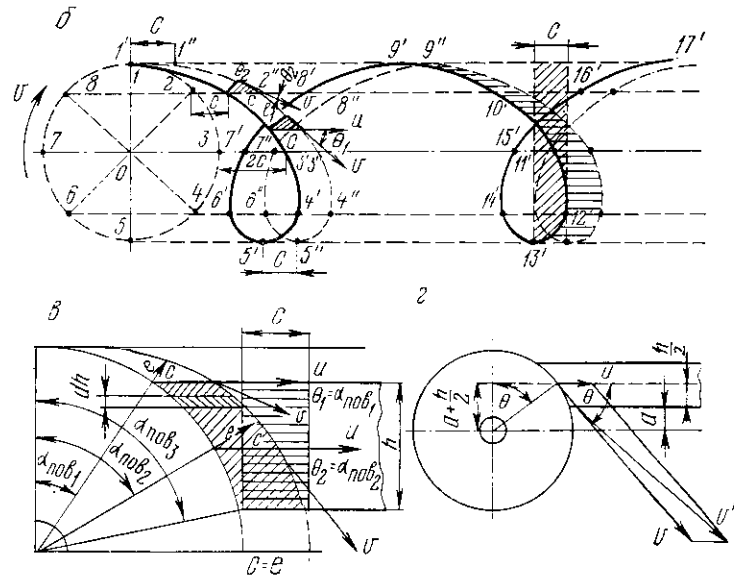


Рис. 4.5. Пиление дисковыми пилами:
 а — общая схема; б — траектории резания; в — основные размеры номинальной стружки; г — упрощенная схема для определения средней толщины стружки и угла θ

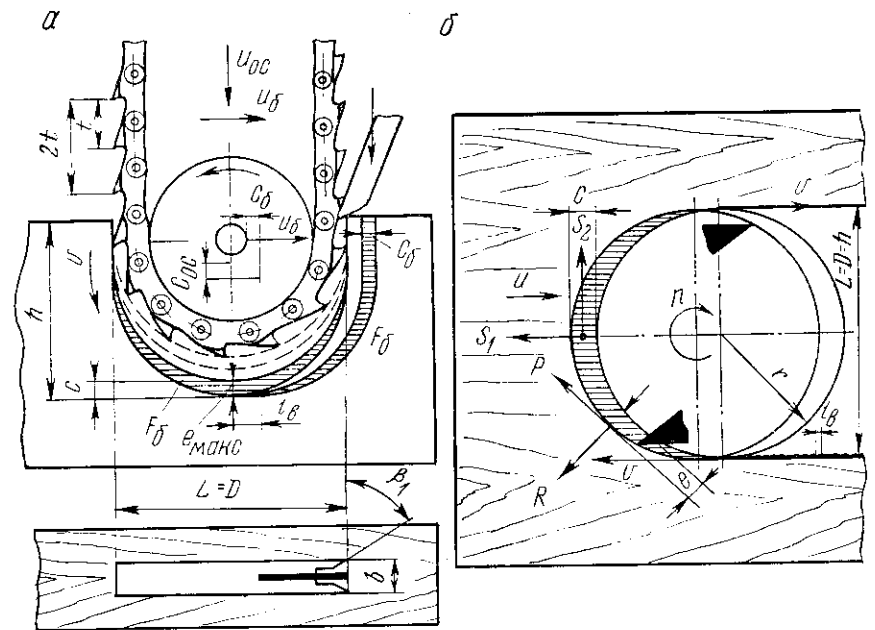


Рис. 4.7. Схема стружкообразования

Эти рассуждения относятся к продольному пиленю дисковыми пилами, фрезерованию, в том числе и фрезерными цепями на криволинейном участке, где цепь огибает направляющий ролик. Для каждого угла поворота $\alpha_{\text{пов}}$ угол Θ равен углу поворота (рис. 4.4, в) и непрерывно возрастает. Так же меняется и угол перерезания волокон ψ .

Длина резания l , или дуга контакта, равна длине циклоидальной кривой на высоте пропила h . Для каждого положения резца $c \parallel u$; $e \perp v$. На рис. 4.6 показан ножевой вал, вращающийся с постоянной скоростью главного движения v . Древесина перемещается равномерно-поступательно со скоростью подачи u .

Рассуждая, как и в случае резания дисковыми пилами, видим, что при фрезеровании вершины резцов описывают в древесине относительные траектории по циклоидальным кривым, сдвинутым одна по отношению другой по направлению u на подачу на резец c .

На рис. 4.7 дана схема стружкообразования при работе фрезерными цепочками (рис. 4.7, а) и пазовом фрезеровании (рис. 4.7, б). Зубья фрезерной цепочки, перемещаясь по дуговой траектории, срезают циклоидальную стружку. Фрезерование происходит при осевой подаче $u_{\text{ос}}$ или при наличии дополнительной боковой $u_{\text{б}}$.

4.2. Основные кинематические соотношения при резании

Скорость резания. При равномерно-вращательном движении в процессах фрезерования, пиления дисковыми и ленточными пилами скорость главного движения v примерно равна скорости резания v' :

$$v = \frac{\pi D n}{60\,000} = \frac{z t n}{60\,000} \text{ м/сек}, \quad (4.4)$$

где D — диаметр окружности резания пилы, фрезы или шкива ленточнопильного станка, мм;
 n — число оборотов вала, об/мин;
 t — шаг:

$$t = \frac{\pi D}{z} \text{ мм}. \quad (4.5)$$

При сверлении надо отличать

$$v_{\text{макс}} = \frac{\pi D n}{60\,000} \text{ м/сек}$$

от ее среднего значения

$$v = \frac{v_{\text{макс}}}{2} = \frac{\pi D n}{2 \cdot 60\,000} \text{ м/сек}, \quad (4.6)$$

так как при разных радиусах вращения точек лезвия скорость резания меняется от 0 до $v_{\text{макс}}$.

При точении и лущении

$$v = \frac{\pi (D + d) n}{2 \cdot 60\,000} \text{ м/сек}, \quad (4.7)$$

где D — диаметр заготовки, мм;

d — диаметр изделия или карандаша при лущении, мм.

При возвратно-поступательном движении пил в лесопильных рамах различают фактическую и среднюю скорость резания. Фактическая скорость резания зависит от угла поворота кривошипа:

$$v_a = v_0 \sin \alpha, \quad (4.8)$$

где v_0 — постоянная окружная скорость пальца кривошипа:

$$v_0 = \frac{\pi H n}{60\,000} \text{ м/сек};$$

H — ход пильной рамки: $H = 2R$ мм;

R — радиус кривошипа, мм.

α — угол поворота кривошипа, град.

Средняя скорость резания главного движения за двойной ход лесопильной рамы, соответствующая одному обороту кривошипа,

$$v = \frac{2Hn}{60\,000} = \frac{Hn}{30\,000} = \frac{z_H t n}{30\,000} \text{ м/сек}, \quad (4.9)$$

где z_H — число зубьев, приходящихся на ход лесопильной рамы:

$$z_H = \frac{H}{t}. \quad (4.10)$$

При равномерном поступательном движении скорость главного движения равна скорости резания. При строгании

$$v = \frac{L}{T} \text{ м/сек}, \quad (4.11)$$

где L — путь строгания, равный номинальной длине стружки, м;

T — время прохода резцом длины, сек.

Скорость подачи. Скорость подачи при равномерном поступательном движении материала зависит от подачи на резец c или на один оборот Δ , от числа зубьев z , срезающих древесину за рабочий ход, т. е. за ту часть цикла, на протяжении которой совершается резание, и числа оборотов вала в минуту:

$$u = \frac{c z n}{1000} = \frac{\Delta n}{1000} \text{ м/мин} \quad (4.12)$$

или

$$u = \frac{c z n}{60\,000} = \frac{\Delta n}{60\,000} \text{ м/сек}, \quad (4.13)$$

где Δ — $c z$ мм.

Подача на рабочий ход, или на один оборот

$$\Delta = \frac{u}{n} \text{ мм.} \quad (4.14)$$

При фрезеровании, пиленнии дисковыми и ленточными пилами, сверлении и точении рабочий ход

$$H = \pi D \text{ мм.} \quad (4.15)$$

Число зубьев, срезающих стружки за рабочий ход,

$$z = \frac{\pi D}{t} = \frac{H}{t}. \quad (4.16)$$

Следовательно,

$$\Delta = \frac{\pi Dc}{t} = \frac{H}{t}c \text{ мм.}$$

Для лесопильных рам следует различать фактическую среднюю скорость u_{ϕ} за рабочий ход и среднюю скорость подачи u за один оборот:

$$u_{\phi} = \frac{czn}{30\,000} = \frac{\Delta n}{30\,000} = 2u \text{ м/сек.} \quad (4.17)$$

Отношение $\frac{u}{v}$. При фрезеровании, пиленнии дисковыми и ленточными пилами отношение

$$\frac{u}{v} = \frac{\frac{czn}{60\,000}}{\frac{ztn}{60\,000}} = \frac{c}{t} < 1; \quad (4.18)$$

при сверлении

$$\frac{u}{v} = \frac{2c}{t}; \quad (4.19)$$

при точении и лущении

$$\frac{u}{v} = \frac{2c}{\pi(D+d)}; \quad (4.20)$$

при пиленнии рамными пилами

$$\frac{u}{v} = \frac{c}{2t}. \quad (4.21)$$

Скорости рабочих движений и их направление характеризуют разновидности процесса резания, их кинематику и динамику. Эти вопросы для типовых разновидностей резания подробно излагаются в отдельных главах.

4.3. Геометрия стружки

Разновидности главного движения и подачи и их взаимные сочетания чрезвычайно многообразны. В зависимости от сочетания скоростей главного движения и подачи по величине и направлению получаются разные траектории резания, определяющие форму и размеры — геометрию стружки.

При прямолинейном движении резания (строгании) срезается плоская равномерной толщины стружка (рис. 1.7). Ряд параллельных стружек 1, 2, 3, ... срезается за рабочий ход при подаче заготовки u_x за период холостого хода инструмента. При этом $u_x \perp v$, угол $\Theta = 90^\circ$, $e \perp v$, толщина стружки $e = c$.

При пиленнии ленточными пилами (рис. 4.4, в) при $v = \text{const}$ и $u = \text{const}$

$$e = c \sin \Theta = \text{const.}$$

Так как $\Theta \approx 90^\circ$, то практически принимают $e \approx c$, $l \approx h$. Тогда боковая поверхность стружки

$$f_{б.с} = el = ch. \quad (4.22)$$

Эти зависимости справедливы и для лесопильных рам с подачей при холостом ходе. Для остальных случаев распиловки на лесопильных рамах v_a и u_a — переменные величины и $\Theta \neq \text{const}$; следовательно, и $c \neq \text{const}$.

Однако учитывая, что при рамном пиленнии стружки срезаются на участке с малым изменением угла $\Theta \approx 90^\circ$, то средние значения при практических расчетах принимаются, как и при пиленнии ленточными пилами.

При круговом резании (продольном пиленнии дисковыми пилами) срезается циклоидальная стружка (рис. 4.5), ограниченная отрезками циклоидальной траектории резания.

Из рис. 4.5, в видна связь между подачей на резец c , толщиной стружки e и кинематическим углом встречи Θ для каждого положения резца:

$$e = c \sin \Theta. \quad (4.23)$$

Если направление волокон древесины совпадает с направлением подачи, то $\Theta = \psi$ и $e = c \sin \Theta = c \sin \psi$.

Угол Θ между вектором скорости подачи u и скорости главного движения v равен углу поворота радиуса пилы от начального положения, перпендикулярного к u , до момента выхода резца из древесины, т. е. он меняется от 0 до $\Theta_{\text{макс}}$. Следовательно, $e = c \sin \Theta$ изменится от $e = 0$ до $e_{\text{макс}}$.

Согласно рис. 4.5, в, боковая поверхность стружки

$$f_{б.с} = \int_0^h cdh = ch,$$

где c — подача на резец, мм;
 h — высота пропила, мм.

Средняя толщина стружки

$$e = \frac{f_{с.с}}{\tilde{l}} = \frac{ch}{\tilde{l}}, \quad (4.24)$$

где \tilde{l} — длина дуги контакта, мм.

Так как $c\tilde{l} \sin \Theta = ch$, то $\tilde{l} = \frac{h}{\sin \Theta}$ мм, (4.25)

в радианах $\tilde{l} = R\varphi$, (4.26)

в градусах $\tilde{l} = \frac{2\pi R\varphi}{360} = \frac{R\varphi}{57}$, (4.27)

где φ — угол контакта резца с древесиной:

$$\varphi = \Theta_{\text{вых}} - \Theta_{\text{вх}}; \quad (4.28)$$

$\Theta_{\text{вых}}$ — угол выхода резца из древесины, или угол между радиусом, нормальным к подаче, и радиусом, проходящим через точку выхода резца из древесины:

$$\Theta_{\text{вых}} = \arccos \frac{a}{R} \text{ град}; \quad (4.29)$$

$\Theta_{\text{вх}}$ — угол входа резца в древесину, или угол между радиусом, нормальным к подаче, и радиусом, проходящим через точку входа резца в древесину:]

$$\Theta_{\text{вх}} = \arccos \frac{a+h}{R} \text{ град}; \quad (4.30)$$

a — расстояние от оси пильного вала до поверхности древесины.

С учетом уравнения (4.24) и (4.27)

$$e = \frac{57ch}{R \left(\arccos \frac{a}{R} - \arccos \frac{a+h}{R} \right)}$$

или

$$e = \frac{57ch}{R \left(\arcsin \frac{a+h}{R} - \arcsin \frac{a}{R} \right)}. \quad (4.31)$$

Так как

$$e = c \sin \Theta,$$

то

$$\sin \Theta = \frac{57h}{R\varphi} = \frac{57h}{R \left(\arccos \frac{a}{R} - \arccos \frac{a+h}{R} \right)}$$

или

$$\sin \Theta = \frac{57h}{R \left(\arcsin \frac{a+h}{R} - \arcsin \frac{a}{R} \right)}. \quad (4.32)$$

Практически приближенное значение средней толщины стружки можно принимать на средней высоте пропила. В этом случае

$$e = c \sin \Theta = c \sin \left(\arccos \frac{2a+h}{D} \right),$$

где

$$\Theta = \arccos \frac{2a+h}{D}.$$

При фрезеровании кинематический угол встречи между векторами v и u равен центральному углу поворота $\Theta = \alpha_{\text{пов}}$ (рис. 4.6, б). Так как $\alpha_{\text{пов}}$ при вращении резца непрерывно растет, то непрерывно увеличивается и толщина стружки $e = c \sin \Theta$.

На рис. 4.6, а дана схема стружкообразования на рейсмусовом станке, а на рис. 4.6, в — на фуговальном станке.

Боковая поверхность стружки

$$f_{с.с} = ch = e\tilde{l}.$$

Средняя толщина стружки

$$e = \frac{ch}{\tilde{l}} = \frac{ch}{\frac{2\pi R\varphi}{360}} = \frac{57ch}{R\varphi}, \quad (4.33)$$

где φ — угол контакта, град.

Угол контакта

$$\varphi = \arccos \frac{R-h}{R}. \quad (4.34)$$

Толщина снимаемого слоя h обычно очень мала по сравнению с радиусом окружности резания, поэтому можно приближенно принять кинематический угол встречи Θ равным половине угла контакта φ (рис. 4.6):

$$\Theta = \frac{\varphi}{2}. \quad (4.35)$$

При этом

$$\sin \Theta = \sin \frac{\varphi}{2} = \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos \varphi)} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{R-h}{R} \right)},$$

откуда

$$\sin \Theta = \sqrt{\frac{h}{D}}. \quad (4.36)$$

Следовательно,

$$e = c \sqrt{\frac{h}{D}}. \quad (4.37)$$

Так как

$$ch = e \tilde{l} = \tilde{l}c \sqrt{\frac{h}{D}},$$

то

$$\tilde{l} = \sqrt{hD}. \quad (4.38)$$

При выходе резца из древесины (рис. 4.6) получается максимальная стружка:

$$e_{\max} = c \sin \varphi = c \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = c \sqrt{1 - \left(\frac{R-h}{R}\right)^2} = \frac{2c}{D} \sqrt{hD},$$

откуда

$$e_{\max} = 2c \sqrt{\frac{h}{D}} = 2e. \quad (4.39)$$

При целом фрезеровании с осевой подачей (рис. 4.7, а), а также при пазовом фрезеровании (рис. 4.7, б) $h=2R$ и $\cos \varphi = -1$, т. е. $\varphi = 180^\circ$.

Подставив в формулу (4.33) значение φ , получим

$$e = \frac{57ch}{R \arccos \frac{R-h}{R}}.$$

Из этого равенства и зависимости $e = c \sin \Theta$ определим

$$\sin \Theta = \frac{57h}{R \arccos \frac{R-h}{R}} = \frac{57h}{R\varphi},$$

откуда

$$M \quad \Theta = \arcsin \frac{57 \cdot 2R}{R \arccos \frac{R-2R}{R}}. \quad (4.40)$$

Подставив в уравнение (4.40) значение $h=2R$, получим

$$\Theta = \arcsin \left(\frac{57 \cdot 2R}{R \arccos \frac{R-2R}{R}} \right) = \arcsin \frac{114}{\arccos(-1)} = 39^\circ 30'.$$

Так как при целом фрезеровании угол встречи между направлением вектора подачи u и направлением волокна $\Theta = 90^\circ$, то средний угол перерезания волокон $\psi_{\text{ср}} = \Theta_1 - \Theta = 90 - 39^\circ 30' = 50^\circ 30'$.

При пазовом фрезеровании вдоль волокон, когда $\Theta = 0$, $\psi = 39^\circ 30'$.

При целом и пазовом фрезеровании и осевой подаче средняя толщина стружки

$$e = c \sin \Theta \approx 0,634 c \text{ мм};$$

длина стружки

$$l = \frac{\pi D}{2} \text{ мм.}$$

При боковой подаче длина стружки

$$l = \frac{\pi D}{4} + \left(h - \frac{D}{2} \right) \text{ мм.}$$

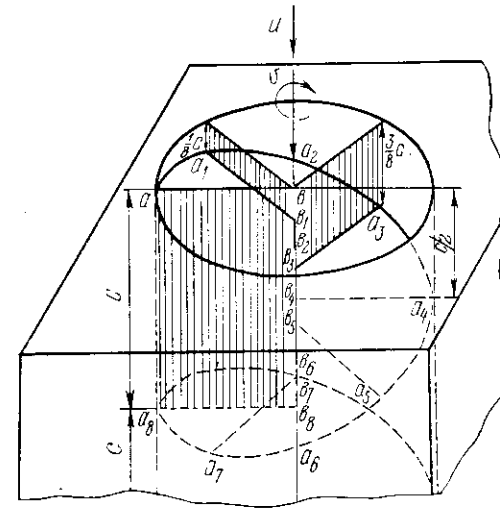


Рис. 4.8. Схема стружкообразования при сверлении

Толщина стружки при боковой подаче

$$e = \frac{ch}{\frac{\pi D}{4} \left(h - \frac{D}{2} \right)} = \frac{4ch}{1,14D + 4h} \text{ мм,}$$

где h — глубина гнезда, мм.

При сверлении, если режущие кромки сверла расположены нормально к оси вращения, толщина стружки равна подаче на резец (рис. 4.8):

$$e = c = \frac{60u}{zn}. \quad (4.41)$$

В винтовых сверлах с конической заточкой средняя толщина стружки

$$e = c \sin \frac{\varphi_k}{2}, \quad (4.42)$$

где φ_k — угол конуса сверла.

Чтобы рассчитать режимы, силу и мощность резания, надо знать среднюю номинальную стружку в поперечном сечении (ее толщину e , ширину b и площадь поперечного сечения $f_c = be$ мм²).

При строгании $f_c = bc$ мм².

При пиленни на ленточнопильных станках и на лесопильных рамах плющеными или разведенными зубьями получается разная конфигурация и толщина стружки в поперечном сечении (см. рис. 8.3).

При пиленни плющеными (Δ) зубьями толщина стружки

$$e_{\Delta} = c \text{ мм};$$

разведенными (λ) зубьями

$$e_{\lambda} = \frac{b}{b_{\lambda}} c, \quad (4.43)$$

где b — ширина пропила, мм;

b_{λ} — длина главной режущей кромки разведенного зуба, равная толщине пилы: $b_{\lambda} = s$ мм.

При пиленни плющеными зубьями длина главной режущей кромки равна ширине пропила: $b_{\lambda} = b$.

Однако, несмотря на различие средней толщины стружки при одной и той же подаче на резец, площадь поперечного сечения стружек одинакова (см. рис. 8.4):

$$f_c = f_{\lambda} = f_{\Delta} = b_{\lambda} e = bc \text{ мм}^2. \quad (4.44)$$

Поэтому при пиленни на ленточнопильных станках и лесопильных рамах

$$f_c = b_{\lambda} e = bc \text{ мм}^2. \quad (4.45)$$

При продольном пиленни на круглопильных станках

$$f_c = b_{\lambda} e = bc \sin \Theta \text{ мм}^2. \quad (4.46)$$

При фрезеровании

$$f_c = be = bc \sin \Theta \text{ мм}^2. \quad (4.47)$$

Здесь рассмотрены наиболее распространенные разновидности резания, остальные случаи будут изложены в соответствующих главах.

Глава 5

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ

5.1. Определения и нормативные данные

Качество деталей из древесины определяется точностью механической обработки, а также шероховатостью поверхности.

Точность, т. е. пределы отклонения действительных размеров деталей от заданных чертежом, устанавливается ГОСТ 6449—53 «Допуски и посадки в деревообработке». Шероховатость поверхности древесины, т. е. степень соответствия ее теоретическим гладким поверхностям, определяется ГОСТ 7016—68 «Древесина, шероховатость поверхности и обозначения».

Точность обработки и шероховатость поверхности деталей разных изделий различны и зависят от точности станка, его наладки, базирования, режимов резания, состояния инструмента, структуры древесины. Например, при распиловке бревен на доски большое значение имеет разнотолщинность получаемого пиломатериала, которая приводит к разным припускам при вторичной обработке. Однако, помимо разнотолщинности, важна шероховатость поверхности пропила, которая также влияет на припуски при последующей обработке и, следовательно, на расход сырья и объем трудозатрат.

Проф. Е. Г. Ивановский качество обработанной поверхности определяет по дефектному слою (рис. 5.1), который характеризуется макро- и микронеровностями, остаточными деформациями и разрушениями [8]:

$$h = m + h_1 + h_2,$$

где m — высота максимальных неровностей резания (микронеровности);

h_1 — максимальная толщина слоя с остаточными деформациями и разрушениями;

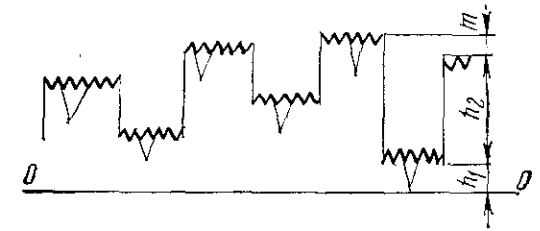


Рис. 5.1. Характеристика качества поверхности

h_2 — максимальная амплитуда отклонения поверхности резания относительно проектной поверхности обработки (макронеровности);

m и h_1 — результат действия одного резца при срезании одной стружки.

При срезании ряда стружек погрешности инструмента и станка приводят к образованию отклонений h_2 . Разрушения h_1 в виде трещин в наружном слое вновь обработанной поверхности не всегда заметны.

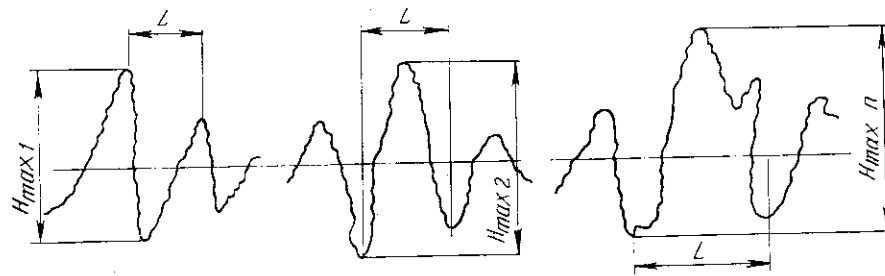


Рис. 5.2. Шероховатость поверхности

По ГОСТ 7016—68 шероховатость обработанной поверхности характеризуется среднеарифметической величиной R_z макс максимальных высот неровностей $H_{\text{макс}}$ (расстояние от вершины гребня до дна впадины) и визуальным определением наличия или отсутствия не вполне отделенных от поверхности древесины отдельных волокон (ворсности) и пучков волокон или частиц древесины (мшистости) (рис. 5.2):

$$R_z \text{ макс} = \frac{H_{\text{макс} 1} + H_{\text{макс} 2} + \dots + H_{\text{макс} n}}{n}$$

Расстояние между двумя соседними максимальными высотами или впадинами на поверхности называется *шагом неровности L*. Длина участка, на котором производится измерение $H_{\text{макс}}$, должна превышать шаг неровностей не менее чем в 1,5 раза.

В зависимости от размера неровностей ГОСТ 7016—68 устанавливает 12 классов шероховатости поверхности древесины и древесных материалов. Классы шероховатости и их обозначения даны в приложении I.

На обработанной поверхности различают погрешности обработки и структурные неровности. Структурные неровности (пористость древесины, вскрытые полости клеток, сердцевинных лучей), не зависящие от обработки, при оценке шероховатости поверхности не учитываются. Погрешности обработки бывают трех видов: макронеровности, неровности с нерегулярным шагом, неровности с регулярным шагом.

Макронеровность — отклонение поверхности от заданной правильной геометрической формы на относительно больших участках

(выпуклость, вогнутость плоскостей, эллипсность, отклонение от формы для цилиндров и т. д.).

Появление макронеровностей связано с проявлением, с одной стороны, внутренних напряжений древесины, которые (например, при пилении) создают коробление материала, с другой стороны — неточности базирования заготовки, нарушения геометрической точ-

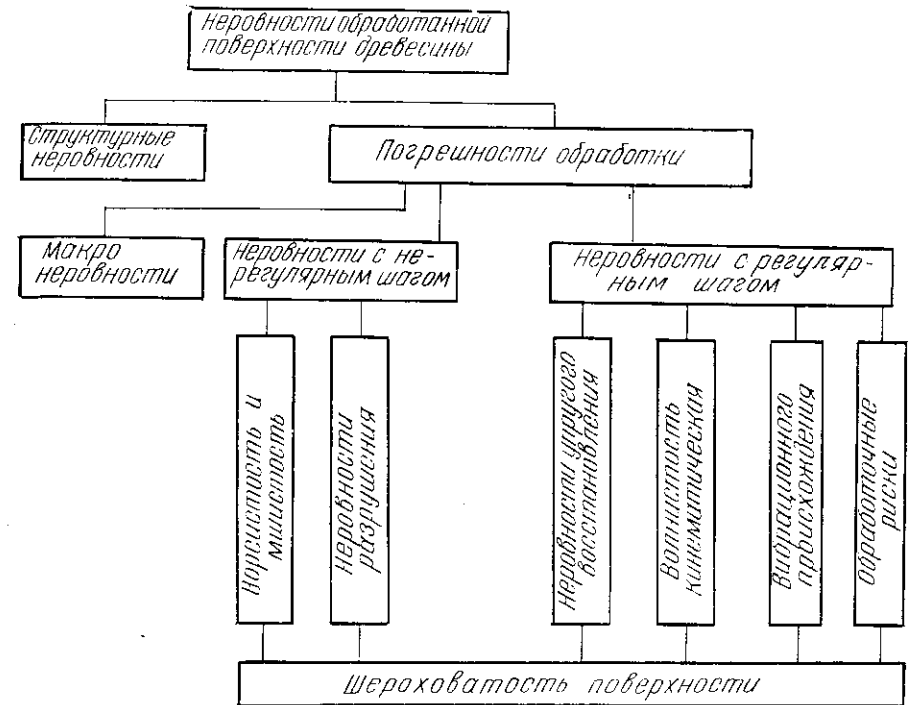


Рис. 5.3. Виды неровностей обработанной поверхности древесины

ности станка и инструмента, неточности установки и наладки станка. Поэтому макронеровности относятся не к шероховатости обработки, а к погрешности формы детали (рис. 5.3).

Неровности с нерегулярным и регулярным шагом — погрешности обработки древесины, характеризующие обработанную поверхность. Неровности с нерегулярным шагом характеризуются размерными показателями в виде неровностей разрушения, наличием или отсутствием ворсности и мшистости на обработанной поверхности.

Неровности разрушения в виде вырывов пучков древесины и заколов образуются при неправильно выбранном режиме резания или нарушении технологии.

Вырыв — неровность, образующаяся в результате отрыва от поверхности изделия частиц древесины.

Закол — углубление на обработанной поверхности по границам годичного слоя в местах его выхода на обработанную поверхность. Неровности разрушения по величине иногда превышают размеры других неровностей.

Ворсистость и мшистость — разновидности неровностей разрушения.

Ворсистость — частично отделенные единичные волокна древесины на поверхности деталей.

При мшистости от поверхности детали неполностью отделены пучки волокон и частицы древесины.

Неровности с регулярным шагом часто встречаются в виде волнистости или риски, равномерно чередующиеся, близкие по размерам возвышения и впадины кинематического и вибрационного происхождения или в виде неровностей упругого восстановления.

Обработочные риски — глубокие следы режущего инструмента, направление, форма и размеры которых определяются кинематикой процесса и геометрической формой режущей кромки резца.

Волнистость кинематическая — неровности на поверхности изделия в виде закономерной чередующихся волн, шаг и высота которых обусловлены кинематикой резания (волнистость фрезерованной поверхности и др.).

Неровности упругого восстановления образуются на участках разной плотности и твердости древесины вследствие неодинаковой величины упругой и вязкой деформации.

В лабораторных условиях для контроля неровностей высотой от 1 до 70 мкм, т. е. от 8-го класса и выше можно применять двойной микроскоп МИС-11. Неровности высотой от 30 до 800 мкм и более определяются прибором ТСП-4. Для более грубых классов, например в лесопилении, пользуются специальными индикаторными глубиномерами.

Приборы МИС-11 и ТСП-4 не пригодны для контроля волнистости.

Контроль кинематической волнистости фрезерованной поверхности рекомендуется определять замером на детали длины наибольших волн, а глубину волны рассчитывать по формуле

$$h_B = R_{z \max} = \frac{l_B^2}{8R} = \frac{l_B^2}{4D},$$

где h_B — глубина волны, мм;

l_B — замеренная длина волны, мм;

R, D — радиус и диаметр окружности резания, мм.

Цеховой контроль шероховатости поверхности осуществляют сравнением обработанных деталей с шероховатостью деталей — образцов или специальных образцов, изготовленных из той же породы древесины и обработанных тем же видом резания, что и контролируемые.

В приложении 2 приведены классы шероховатости поверхности древесины по видам обработки; в приложениях 3—7 — нормативные

данные шероховатости поверхности для разных процессов в зависимости от специфики, подачи на резец, угла встречи Θ и других условий обработки.

5.2. Шероховатость поверхности древесины при различных видах обработки

Шероховатость поверхности зависит от вида обработки и режимов резания. При одном и том же виде обработки в зависимости от режима резания можно получить разные классы шероховатости.

По исследованиям М. Х. Камалютдиновой при рамной распиловке на поверхности пиломатериалов могут иметь место риски, неровности разрушения, ворсистость и мшистость.

Шероховатость пиломатериалов рамного распила с поперечными рисками ступенчатого профиля с шагом, равным посылке, — результат дефектов подготовки рамных пил и настройки лесопильных рам. При нормальных условиях распиловки глубина рисков на поверхности сосновых и еловых досок 400—600 мкм. Доминирующими неровностями при рамной распиловке с большой подачей на резец являются вырывы глубиной до 2500 мкм.

Неровности разрушения образуются за счет отрыва от поверхности целых пучков волокон по годичным слоям; при этом зубьями пилы вырывается древесина ранней, менее прочной зоны годичного слоя и обнажается поверхность более плотной поздней древесины.

Ворсистость и мшистость на поверхности пиломатериалов возникают при распиловке с большей подачей на резец или при недостаточном уклоне пил.

В условиях зимней распиловки мерзлого пиловочника шероховатость поверхности пиломатериалов характеризуется рисками, так как вырывов на мерзлой древесине не наблюдается.

Из факторов, определяющих режим распиловки, самое большое влияние на шероховатость поверхности пиломатериалов оказывает подача на резец, так как с увеличением подачи на зуб возрастает длина отрыва волокон у стенок пропила (см. рис. 8.1), а следовательно, и глубина неровностей разрушения.

Для сосновых и еловых пиломатериалов

$$R_{z \max} = 660c + 252 \text{ мкм};$$

$$R_{z \max} = 29\Delta + 252 \text{ мкм},$$

где c — подача на резец, мм;

Δ — посылка, мм.

Нормативная подача на резец, обеспечивающая данный класс шероховатости поверхности пиломатериалов рамного распила, дана в приложении 3.

Образование неровностей разрушения тесно связано с прочностью древесины, которая характеризуется ее физико-механическими свойствами. С повышением объемного веса наблюдается тенденция к снижению $R_{z \max}$.

У хвойных пород древесины наблюдается резкий переход от поздней древесины одного слоя к ранней древесине другого, более позднего слоя. На стыке этих слоев и отмечается наиболее слабая поперечная связь между волокнами. Поэтому на наружных, т. е. обращенных к периферии бревен, сторонах досок и получаются наиболее глубокие вырывы.

С увеличением высоты пропила наблюдается уменьшение $R_{z \text{ макс}}$. Это объясняется возможным уменьшением вибраций пил в более высоком пропилах.

Колебания влажности в условиях производственной распиловки незначительно влияют на шероховатость сосновых и еловых пиломатериалов рамного пиления.

При продольном пилении дисковыми пилами решающее влияние на шероховатость поверхности оказывает подача на резец, в меньшей степени — объемный вес, затупление пил и кинематический угол встречи. Влияние высоты пропила и влажности древесины незначительно.

При малых подачах шероховатость поверхности характеризуется обработочными рисками, величина которых мало зависит от затупления зубьев пил. Однако при работе затупившимися пилами на поверхности резания появляется ворсистость и мшистость.

При пилении с подачей на резец $c > 0,8$ мм шероховатость поверхности характеризуется глубиной вырывов.

При распиловке мерзлой древесины на всем диапазоне подач (до $c = 1,5$ мм) на поверхности распила бывают только обработочные риски.

Зависимость неровностей от подачи на резец c по опытам Б. И. Кошуняева получена в виде формул:

$$R_{z \text{ макс}} = 620c + 88 \text{ мкм для талой древесины;}$$

$$R_{z \text{ макс}} = 475c + 192 \text{ мкм для мерзлой древесины.}$$

С увеличением объемного веса глубина неровностей уменьшается, и тем интенсивнее, чем больше подача на резец:

$$R_{z \text{ макс}} = c(2400 - 3600\gamma) - (1290 - 2650\gamma) \text{ мкм.}$$

Увеличение кинематического угла встречи Θ от минимального при входе пилы до максимального на выходе из пропила приводит к изменению толщины стружки, а следовательно, к изменению глубины рисок на высоте пропила. Глубина неровностей уменьшается на 130—140 мкм при уменьшении Θ на 10° .

При прочих равных условиях пилы с плющеными зубьями дают глубину неровностей на поверхности распила на 50—60 мкм меньше, чем пилы с разведенными зубьями, что объясняется увеличением в два раза подачи на резец ($c_{\Delta} = 2c_{\Lambda}$) у стенок пропила (см. рис. 8.3) и большим поперечным отгибом разведенных зубьев под действием сил резания.

По исследованиям канд. техн. наук М. И. Пекло, допустимая подача на резец при пилении чисторежущими пилами с поднутрением зависит от устойчивости пыльного диска и должна быть

$c < 0,6$ мм для сосны и $c < 0,3$ мм для дуба. Подача на зуб не должна быть меньше $c \geq 0,05$ мм, так как при работе с малой скоростью подачи строгальные пилы образуют много пыли, которая налипает на поверхность пилы, способствует нагреву лезвия и снижению устойчивости диска; при больших подачах зубья пил нагреваются и быстро затупляются.

Шероховатость поверхности древесины, обработанной строгальными пилами, характеризуется высотой микронеровностей 40—60 мкм, главным образом в виде рисок. Высокий класс шероховатости обеспечивают дисковые пилы без развода и плющения с ориентированным осевым биением не более 0,6 мм. Такое биение достигается установкой диска перпендикулярно к оси вала.

При поперечном пилении на шероховатость поверхности влияют подача на резец, объемный вес древесины, радиус кривизны лезвия и высота пропила. Влияние подачи на резец самое значительное, оно почти в три раза больше, чем другие факторы.

При поперечном пилении шероховатость торцов при подачах до 0,085 мм не выходит за пределы $\nabla\partial 3$ при пилении мерзлой древесины и находится на уровне $\nabla\partial 2$ при пилении талой древесины.

По опытам Б. И. Кошуняева: при талой древесине $R_{z \text{ макс}} = 110 + 11850c$ мкм, при мерзлой древесине $R_{z \text{ макс}} = 172 + 7580c$ мкм.

С повышением объемного веса древесины значительно уменьшается глубина неровностей:

$$R_{z \text{ макс}} = (22000c + 240)(1 - \gamma) \text{ мкм.}$$

При длительной работе торцевой пилы без переточки глубина вырывов увеличивается от 900—1100 мкм в начале работы пилы до 1100—1300 к концу третьей смены, а глубина рисок фактически остается неизменной, примерно 800 мкм.

Увеличение кинематического угла встречи Θ на 10° вызывает возрастание глубины неровностей примерно на 50 мкм. При высоте пропила $h = 22$ мм глубина неровностей максимальная, при $h = 51$ она уменьшается, а при $h = 103$ мм — снова возрастает.

При повышении влажности от 10 до 30% глубина неровностей на поверхности распила увеличивается на 60—80 мкм, дальнейшее увеличение влажности не сказывается на величине $R_{z \text{ макс}}$.

На поверхности фрезерования в зависимости от состояния системы станок-инструмент-деталь, а также режимов резания могут иметь место неровности разрушения и упругого восстановления, ворс и мшистость, кинематические и вибрационные неровности и даже макронеровности в виде заколов и вырывов.

Особо важное значение имеет подача на резец. Она влияет не только на волнообразование, но и на высоту неровностей разрушения. От подачи на резец зависит производительность станка.

При подаче на резец до 0,08—0,15 мм при фрезеровании образуется сливная стружка, при которой неровностей разрушения на фрезерованной поверхности не наблюдается даже при затупленном резце.

По опытам канд. техн. наук А. П. Клубкова, при фрезеровании сосны с подачей на нож $c=3,6$ мм, радиус кривизны лезвия $\rho=30$ мкм, $D=180$ мм, скорость подачи ограничивается не длиной волны, а ворсистостью и мшистостью.

Тупой резец при внедрении в древесину создает обширную зону деформации, что приводит к образованию дефектов обработки в виде ворса, мшистости, вырывов и упругого восстановления по годовым слоям.

Упругое восстановление по годовым слоям образуется при большом радиусе кривизны лезвия, малой подаче на нож и малой скорости резания. При резании затупленным инструментом на поверхности обработки дубовых образцов ворса не наблюдается, но имеются вырывы и прижоги. При работе тупыми резцами возникают большие усилия, деформирующие отделяемый слой, которые вызывают отслоение ранней древесины от поздней.

Радиус кривизны лезвия 40 мкм считается критическим для фрезерного инструмента, так как при работе острыми резцами производительность и класс шероховатости обработки выше.

Объемный вес древесины влияет на образование ворса и упругого восстановления волокон. С уменьшением объемного веса величина деформации увеличивается. По данным проф. Б. М. Буглая, разница в объемном весе древесины в 4—5 раз изменяет деформацию в 5—6 раз.

Слабая внутренняя связь между годовыми кольцами хвойных пород, резкое различие в физико-механических свойствах ранней и поздней древесины — основная причина образования ворса при фрезеровании хвойной древесины. Ворс образуется на ранней рыхлой древесине годовичного слоя, на участке выхода ножа из волны. Угол выхода ножа из волны, при котором образуется ворс,

$$\varphi' = \arcsin \frac{c}{D}.$$

При обработке дуба тупым инструментом ворс не образуется вследствие большой сопротивляемости волокон дуба перерезанию. Их легче вырвать, чем перерезать тупым резцом.

Изменение влажности древесины от $W=12-15\%$ и больше до $W=8-10\%$ сказывается на появлении ворса и упругого восстановления по годовым слоям. Наибольшая разница в деформации зон достигается при влажности, близкой к точке насыщения волокна, примерно в 2 раза превышая разницу в деформации ранней и поздней зон годовичного слоя при влажности $W=10\%$.

Скорость резания не оказывает заметного влияния на шероховатость поверхности. При больших скоростях могут возникнуть вибрационные риски. Однако при $v=5$ м/сек и $\rho=30$ и 40 мкм на фрезерованной поверхности наблюдается упругое восстановление по годовым слоям, величина которого превышает неровности разрушения.

Древесине присущи упругие и вязкие деформации. При определенной скорости нагружения упругая деформация возникает мгновенно

(со скоростью распространения звука), а вязкая будет развиваться во времени. Поэтому упругая деформация не зависит от скорости деформирования, а вязкая деформация будет тем больше, чем меньше скорость деформации. При больших скоростях деформирования вязкая деформация не успевает развиваться. В ранней древесине вязкие свойства выражены более ярко, чем в поздней. При малых скоростях резания и малых подачах на резец успевают развиваться вязкие деформации, и они будут больше в рыхлом слое, чем в твердом.

После прекращения контакта резца с древесиной через некоторый промежуток времени вязкие деформации восстанавливаются, а так как они были больше в ранней древесине, то этот слой будет иметь выступ, а на месте твердого слоя образуется впадина.

Качество шлифованной поверхности характеризуется ее микропрофилем — средней максимальной высотой неровностей $R_{z \text{ макс}}$ (по ГОСТ 7016—68).

При шлифовании абразивные зерна царапают, разрушают клетки древесины и отделяют ее частицы.

Шероховатость поверхности древесины зависит от номера зернистости абразивного материала, объемного веса древесины (породы), степени затупления шлифовальной шкурки. Глубина неровностей увеличивается пропорционально повышению номера зернистости шлифовальной шкурки и несколько уменьшается при затуплении ее. С увеличением объемного веса и скорости шлифования также улучшается обработанная поверхность древесины.

Удельное давление не оказывает существенного влияния на шероховатость поверхности.

Рекомендуемая зернистость шлифовальных шкурок для получения требуемого класса шероховатости поверхности дается в табл. 16.2. Оптимальные режимы шлифования подробно рассматриваются в гл. 16.

Глава 6

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

6.1. Теоретические основы резания древесины

Теоретические положения проф. И. А. Тиме. Резание древесины в торец (рис. 3.9 и 6.1) проф. И. А. Тиме сравнивал с резанием мягкой стали. Силы P и P_c действуют на сечение стружки $f_c = be$.

Сила резания P , действующая по направлению v , давит на элемент стружки, сжимая его в направлении, перпендикулярном к волокнам:

$$P = \sigma_p be,$$

где σ_p — условное среднее давление резания, кг/мм^2 .

Сила P_c производит скалывание элемента вдоль волокон:

$$P_c = \sigma_{ск \parallel} be,$$

где $\sigma_{ск \parallel}$ — напряжение скалывания вдоль волокон, кг/мм^2 .

Но $P = P_c \operatorname{tg} \delta$ или $\sigma_p be = \sigma_{ск \parallel} be$.

При $\delta = 45^\circ$ $\sigma_p = \sigma_{ск \parallel}$ и $P = P_c$.

Коэффициенты σ_p и $\sigma_{ск \parallel}$ называются *коэффициентами резания*. Их численное значение гораздо выше соответствующих коэффициентов скалывания в прессах, например,

	по опытам И. А. Тиме	при скалывании в прессах
сосна	$\sigma_{ск \parallel} = 2 - 2,5 \text{ кг/мм}^2$	$0,37 \text{ кг/мм}^2$
дуб	$\sigma_{ск \parallel} = 3,8 - 5,0 \text{ кг/мм}^2$	$0,5 \text{ кг/мм}^2$

Важность коэффициентов резания состоит в том, что они определены опытным путем непосредственно при резании и в них нашли объективное отражение неучтенные в теории факторы: трение по поверхностям резца, деформация отогнутых слоев древесины ниже линии реза, ее слоистость, влияние затупления резца и др.

Необходимо отметить, что диаграммы современных опытов, снятые самопишущими приборами, не подтвердили полностью предположения проф. И. А. Тиме: после отделения элемента стружки спада сил резания до нуля не наблюдается (рис. 6.1). Это объясняется тем, что из-за слоистости перед резцом и ниже его создается зона деформации (см. рис. 3.9). До образования достаточно напряженной зоны деформации отделения элементов не происходит. После отделения элемента стружки деформированная древесина перед и под резцом

продолжает воздействовать на резец непосредственно и через отделяемый элемент. Поэтому пульсация силы резания наблюдается, но спада до нуля нет.

Последующие элементы, благодаря оставшейся деформации, образуются легче, чем первый. Следовательно, первый элемент образуется иначе, чем последующие. Понятно также, что в результате

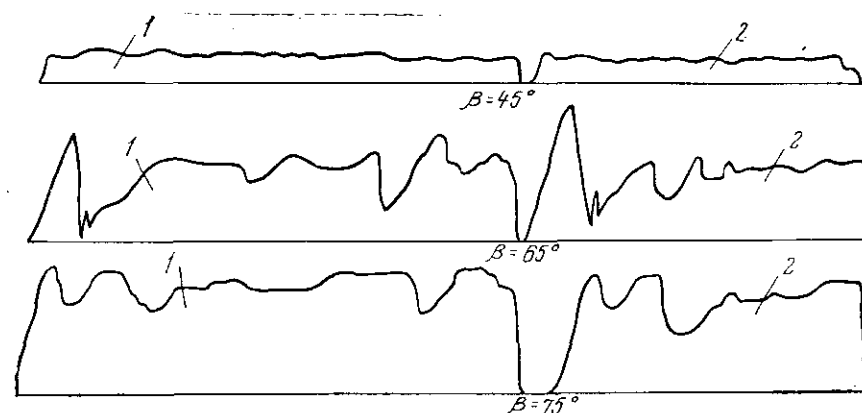


Рис. 6.1. Диаграмма записи сил самопишущим пером при торцевом резании: 1 — первая стружка; 2 — вторая стружка

отклонения и деформации слоев древесины ниже линии раздела образование второго реза будет происходить иначе, чем первого.

Предположение проф. И. А. Тиме о том, что увеличение N , P и P_c по мере проникновения резца в древесину происходит по закону прямой (см. рис. 3.9), равнозначно признанию постоянства давления σ_c на переднюю поверхность резца (рис. 6.2, а) по всей длине контакта резца с древесиной. Это положение соответствует второй зоне, рассмотренной при сжатии образца в замкнутом пространстве (см. рис. 3.12; 3.13).

Взаимодействие резца и древесины по теории проф. П. А. Афанасьева и М. А. Дешевого. Проф. П. А. Афанасьев предполагал распределение давления стружки на переднюю поверхность резца в виде треугольника (рис. 6.2, б), а равнодействующую нормального давления определял по формуле

$$N_d = \frac{P' \Delta b}{2 \sin \delta \cos \delta},$$

где P' — давление на лезвие в направлении движения резца;

Δ — глубина внедрения резца;

b — ширина стружки;

δ — угол резания, град;

Проф. М. А. Дешевой, восприняв гипотезу проф. П. А. Афанасьева, также полагал закономерность распределения горизонтальных p_1 и вертикальных p_2 составляющих силы N в виде площадей

треугольников (рис. 6.2, в). Площадь каждого треугольника давлений дает соответственно силы N , P_1 , P_2 , приложенные к точке I , которая находится на $1/3$ от лезвия a [5].

Под влиянием сил P_1 и P_2 возможны следующие деформации разрушения: P_1 — смятие (сжатие) по $\Delta \operatorname{tg} \delta$, $\kappa\Gamma$; P_2 — скалывание вдоль толщины стружки, отрыв у лезвия (или отщеп, $\kappa\Gamma$; момент $\frac{P_2 \Delta}{3}$ создает отгиб элемента у лезвия.

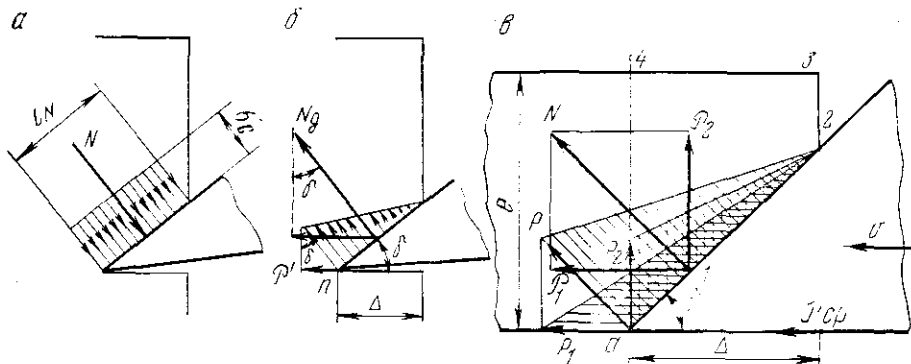


Рис. 6.2. Эпюры нагрузки на переднюю поверхность реза

Суммарная сила резания состоит из двух слагаемых:

$$P_p = P_1 + P_{ср\perp},$$

$$P_1 = \frac{p_1 \Delta \operatorname{tg} \delta}{2},$$

$$P_{ср\perp} = K_{ср\perp} \Delta,$$

где $K_{ср\perp}$ — временное сопротивление древесины на срез в направлении движения реза.

Полагая, что у лезвия не может быть разрыва непрерывности, проф. М. А. Дешевой считает $p_1 = P_{ср\perp}$. Тогда после подстановок в формулу силы резания соответствующих величин при $\Delta \operatorname{tg} \delta \ll e$ получим:

$$P_p = P_1 + P_{ср\perp} = \frac{K_{ср\perp} \Delta^2 \operatorname{tg} \delta}{2} + K_{ср\perp} \Delta.$$

Здесь первое слагаемое — составляющая давления на передней поверхности реза в направлении резания, сжимающая стружку; второй член суммы — усилие срезания древесины, приложенное к лезвию реза.

Далее проф. М. А. Дешевой определяет Δ из уравнений возможных простых деформаций и останавливается на меньшем из них, подставляя его значение в формулу для P_p .

М. А. Дешевой теоретически стремился с исчерпывающей полнотой описать влияние многочисленных факторов на процесс резания, чтобы получить единую аналитическую зависимость.

Чтобы проверить теоретические положения М. А. Дешевой, А. Е. Золотарев провел специальные опыты. Он исследовал зависимость между усилием P внедрения реза и клина в древесину и глубиной внедрения Δ без образования стружки.

Тщательный анализ опытов А. Е. Золотарева показал серьезные расхождения между расчетными данными проф. М. А. Дешевой и результатами эксперимента. Эти расхождения объясняются несколькими причинами.

Теория М. А. Дешевой опирается на гипотезу о распределении давления по передней поверхности реза в виде треугольника, что не соответствует современным опытам. Одно из основных положений М. А. Дешевой: $P_{ср\perp} = K_{ср\perp} \Delta$ трактует о мгновенном срезе, в то время как сдвиги происходят последовательно и непрерывно до Δ , при котором отделяется элемент стружки. Помимо того, М. А. Дешевой ошибочно приравнял силу среза $P_{ср\perp}$ (в $\kappa\Gamma$) к распределенной нагрузке p_1 (в $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$).

Система взглядов М. А. Дешевой значительно расширила и углубила знание процесса резания, и хотя из-за ошибочности аналитических решений в настоящее время ею не пользуются при расчетах, она наметила ряд новых задач и оказала значительное влияние на последующий этап развития теории резания древесины.

Теоретические положения М. А. Дешевой дальнейшее развитие получили в трудах проф. С. А. Воскресенского [3] и др.

Теоретические положения проф. К. А. Зворыкина и А. А. Брикса. Наиболее полное теоретическое и экспериментальное исследование силы резания было выполнено проф. К. А. Зворыкиным в 1893 г. Математическое обобщение результатов опытов по определению среднего условного давления резания он представил в виде формулы

$$K_e = \frac{K'}{e^m}, \quad (6.1)$$

где K_e — среднее условное давление резания при данной толщине стружки e , $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$;

K' — среднее условное давление резания при толщине стружки $e = 1 \text{ мм}$, $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$;

m — степенной показатель, меньший единицы и показывающий интенсивность изменения среднего условного давления в зависимости от e .

В системе координат K_e и e зависимостью между K_e и e при разных углах резания δ будет политроп (рис. 6.3, а).

В логарифмической системе координат ($\lg K_e$, $\lg e$) (рис 6.3, в) получается прямая AB , которой соответствует уравнение

$$\lg K_e = -m \lg e + \lg K',$$

где m — тангенс угла φ :

$$m = \operatorname{tg} \varphi;$$

φ — угол наклона прямой AB ;

$\lg K'$ — ордината логарифма при $e = 1$ мм.

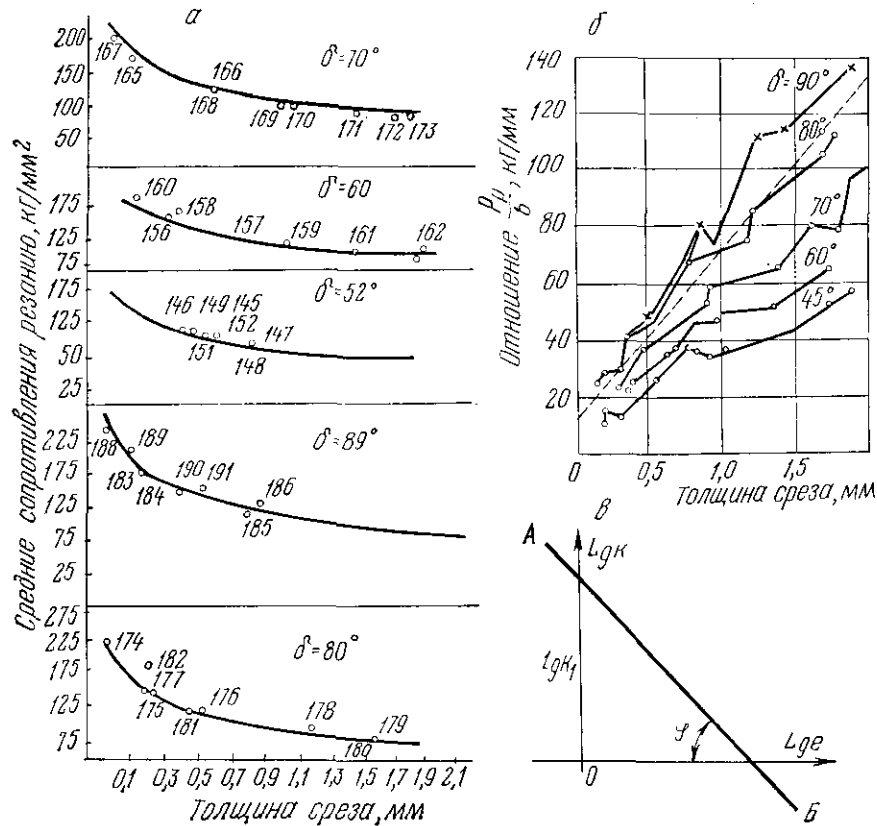


Рис. 6.3. Средние сопротивления резанию по опытам проф. К. А. Зворыкина

Из уравнения (6.1) следует, что среднее условное давление резания K_e увеличивается с уменьшением толщины стружки e .

Сила резания

$$P = K_e b e = K' b e^{1-m}. \quad (6.2)$$

При $e=0$ по уравнению (6.2) $P=0$, что нереально, так как при резании часть округленного лезвия резца ниже плоскости раздела продолжает воздействовать на слой древесины под плоскостью резания, поэтому $P > 0$ (см. рис. 3.9).

Проф. А. А. Брикс обработал те же опыты К. А. Зворыкина в системе координат $\left(\frac{P}{b}; e\right)$ для разных углов резания (рис. 6.3, б), при этом получил прямые, уравнением которых является формула

$$\frac{P_1}{b} = k_1 e + k_2 \quad (6.3)$$

или

$$P_1 = k_1 b e + k_2 b = P_n + P_3. \quad (6.4)$$

Смысл этого уравнения заключается в том, что сила резания состоит из двух слагаемых: одного, пропорционального площади сечения стружки $b e$, и другого, пропорционального только ширине стружки b .

Разделив обе части уравнения (6.3) на толщину стружки, получим

$$\frac{P_1}{b e} = K_e = k_1 + \frac{k_2}{e}. \quad (6.5)$$

Из уравнения (6.5) видно уменьшение K_e с ростом e . При $e=0$ $P_3 = k_2 b \neq 0$.

Формула (6.5) проф. А. А. Брикса (1896 г.) аналогична решению проф. И. А. Тиме (1883 г.) и показывает, что при $\rho > 0$ сила резания состоит из двух слагаемых: $P_3 = k_2 b = \text{const} \neq 0$ и не зависящей от e и $P_n = k_1 e$ или $P_n = f(e)$ при $k_1 = \operatorname{tg} \varphi = \text{const}$.

Обработка опытов по резанию древесины на основе теории проф. А. А. Брикса. Физико-технологическое направление в учении о резании древесины при обработке опытов базируется на методе проф. А. А. Брикса. Результаты опытов, обработанных этим методом проф. А. Л. Бершадским [2] за последние 40 лет, показали, что во всех процессах резания древесины при $e < 2$ мм сила резания состоит из двух слагаемых:

$$P = K b e = P_n + P_3. \quad (6.6)$$

Первое слагаемое представляет собой силу воздействия передней поверхности резца на сечение стружки (сила, действующая выше плоскости раздела), второе — силу резания по задней поверхности резца (ниже плоскости раздела) (см. рис. 7.1).

Опытами установлено, что

$$P_n = f(e, \delta, v, \varphi) \text{ кг/мм}^2,$$

$$P_3 = f(\rho, \psi, \alpha) \text{ кг/мм}.$$

Сила резания по передней поверхности резца изменяется пропорционально толщине стружки (по закону прямой), т. е. при данных условиях среднее условное давление на передней поверхности резца — величина постоянная (см. рис. 7.1, а).

Деление сил воздействия резца, включая и силы лезвия, на силы, действующие по передней и задней поверхностям резца, — условное, так как практически трудно отделить работу передней и задней поверхностей резца друг от друга и от воздействия лезвия.

Вопрос о распределении давления по рабочему контуру реза в теории резания является спорным. Опытным путем непосредственно определить давление на отдельных участках реза пока не удается.

Если при очень остром резе можно полагать, что на древесину воздействует только передняя поверхность с касательной и нормальной силами (см. рис. 7.1, а), то по мере затупления реза возникают значительные силы и ниже плоскости резания (см. рис. 7.1, б).

Есть много предположений и косвенных доказательств того, что постоянное (или переменное) сравнительно небольшое давление на передней поверхности реза резко увеличивается по мере изменения кривизны лезвия и поэтому эпюр имеет всплеск у лезвия. Так, например, давление по передней поверхности реза в разных опытах 0,9—14 кг/мм², а на лезвии достигает 50—500 кг/мм².

Разнообразие свойств древесины и сочетания условий резания в отдельных опытах и наблюдениях могут быть причиной образования любой другой формы эпюра распределения давления как на передней поверхности, так и на лезвии и задней поверхности реза.

Однако принятый метод обработки опытов позволяет расчленивать силу резания на две составляющие, из которых сила резания по передней поверхности пропорциональна изменению толщины стружки и почти не зависит от затупления реза, т. е. независимо от истинной формы эпюра на передней поверхности реза давление на ней условно принимается равномерно распределенным. Сила резания P_z зависит от радиуса кривизны лезвия ρ и не зависит от толщины стружки. Из сказанного следует, что принимается условие независимости действия сил выше и ниже плоскости резания, установленное проф. М. А. Дешевым [5].

Эти допущения дают возможность определить как касательные силы по поверхностям реза, так и нормальные по отношению к ним, а также усилие подачи и силу, нормальную к ней. Эти силы необходимы для расчета оптимальных режимов резания и конструкции станков.

В гл. 7 подробно описан физико-технологический метод расчета режимов резания, математическое обоснование его и содержание физической сущности процесса резания.

Физическое направление в теории резания древесины. Физические основы теории резания древесины разрабатываются проф. Е. Г. Ивановским (ЛТА). Это направление учения о резании ставит задачи:

- развивать физические основы механики резания;
- изучать все процессы, протекающие при образовании в древесине новых поверхностей;
- стабилизировать резание и получить установившийся режим резания путем управления износом реза с целью поддержания его режущей способности;
- изучать процессы, протекающие на поверхностях скольжения древесины и реза, распределение касательных сил (сил трения) по поверхностям реза и древесины;

изучать закономерности изменения режущей способности лезвия в процессе превращения механической энергии в другие виды — тепловую, химическую и электрическую;

изучать поля деформации и напряжений, образующихся в древесине.

Резание рассматривается как совокупность процессов образования новых поверхностей, деформирования и трения скольжения. Эти процессы сопровождаются электризацией поверхностей контакта реза и древесины.

Опытами установлен общий характер зависимости между электрическим зарядом реза и силами резания для разных пород древесины. Однако теоретические предпосылки для объяснения и расчетов электрических явлений, происходящих при резании древесины, в теории резания пока еще разработаны недостаточно.

Особое внимание уделяется качеству обработанной поверхности, созданию режимов резания, обеспечивающих необходимую гладкость поверхности обработки.

Эмпирические расчетные формулы. В ЛТА обработаны и обобщены многочисленные опыты для разных видов резания и получены эмпирические формулы для расчета мощности и силы резания в виде степенных функций:

$$P = A c^{0,78} h^{1,33} v^{0,25} \Theta^{0,16} \rho^{0,38} \gamma^{2b^{0,56}} W^m \text{ кг},$$

где A — общий коэффициент, зависящий от условий обработки;

$c^{0,78}, h^{1,33}, v^{0,25}, \dots$ — коэффициенты, полученные опытным путем и характерные для определенного процесса.

Для удобства пользования построены расчетные номограммы. В формулах такого типа влияние каждого фактора на силу резания представлено в виде независимых сомножителей, а это противоречит действительности, так как различные факторы в их общей взаимосвязи переплетаются и влияют друг на друга. Эмпирическими формулами в виде независимых сомножителей трудно отразить влияние всего сложного комплекса явлений, происходящих при действительном процессе.

Эти же недостатки присущи и формулам типа

$$K = K_T a_v a_p a_l a_{св},$$

где K_T — табличный коэффициент;

$a_v, a_p, a_l, a_{св}$ — постоянные коэффициенты, учитывающие влияние отдельных факторов и принимаемые по таблицам.

В дальнейшем для расчета отдельных процессов будем пользоваться и такими формулами. Но они справедливы только для тех условий, при которых получены. С изменением условий резания точность расчета по ним снижается.

Чтобы приблизиться к абсолютной истине, нужны новые исследования и обобщения, которые должны в расчетном методе учитывать влияние отдельных факторов и их сочетаний.

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

7.1. Общие сведения

Основная задача теории резания древесины — определение наилучших режимов резания при помощи расчетного метода. Создание расчетного метода с учетом многообразия видов резания, образования стружки и ее элементов в зависимости от породы древесины, физико-механических свойств, состояния, угла перерезания волокон, толщины слоев ранней и поздней древесины, угла резания, толщины стружки, скорости резания, остроты реза и других факторов — чрезвычайно сложная проблема. Она решается исследованием процесса резания на специальных лабораторных установках и рабочих шпинделях, работающих в условиях, аналогичных производственным. Результаты опытов при разнообразных сочетаниях условий резания математически обобщаются в уравнения резания, которые комплексно учитывают все объективные факторы процесса резания: действие сил резания, трение по поверхностям реза, пластическое и упругое деформирование стружки и обработанной поверхности, тепловые и прочие физические явления, сопровождающие процесс резания.

Это направление названо физико-технологическим учением о резании древесины, в отличие от механико-математического метода расчета с применением основ теории сопротивления материалов и теории упругости, основные положения которого также «требуют экспериментальной проверки, так как при их выводе не учитывается затрата энергии на деформирование древесины за пределами упругости. Кроме того, в состав формул входят коэффициенты прочности древесины и трения скольжения древесины по поверхностям реза, величины которых еще не определены с необходимой точностью для условий резания.* Таким образом, физико-технологический метод наиболее полно отражает реальные закономерности процесса резания и позволяет вести расчеты оптимальных режимов резания.

7.2. Взаимодействие реза с древесиной

Схема сил резания абсолютно острым резцом. При проникновении реза с радиусом кривизны лезвия ρ в древесину в точке a_1 соприкасания реза с древесиной (рис. 7.1, б) возникают большие

* Е. Г. Ивановский, П. В. Василевская, Э. М. Лаутнер. Фрезерование и пиление древесины и древесных материалов. М., 1971.

концентрации напряжений, которые достигают 50—60 кг/мм² и больше.

При таких напряжениях образуются новые поверхности и частицы древесины, находящиеся в уравновешенном состоянии внутри древесины, переходят на поверхность стружки, прилегающую к передней поверхности реза, и на поверхность резания. Однако работа,

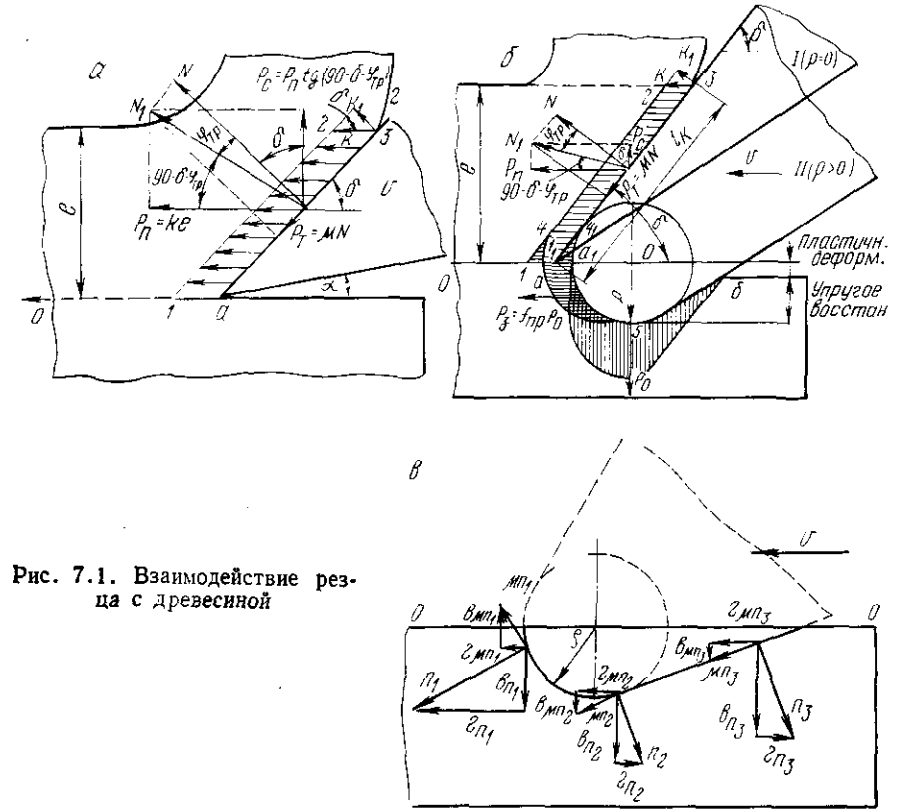


Рис. 7.1. Взаимодействие реза с древесиной

затрачиваемая на образование новой поверхности, очень мала вследствие ничтожно малого пути перемещения этих частиц, поэтому в расчетах она не учитывается. Если считать резец абсолютно острым (лезвие прямая линия), как полагал проф. И. А. Тиме, то при прямолинейном движении реза образование плоскости раздела будет происходить по направлению OO (рис. 7.1, а) под действием силы нормального давления N передней поверхности реза.

При перемещении стружки вверх по передней поверхности реза в направлении, обратном движению стружки, возникает сила трения:

$$P_T = \mu N,$$

где μ — коэффициент трения:

$$\mu = \frac{P_T}{N} = \operatorname{tg} \varphi_{\text{тр}} = 0,18 - 0,3.$$

Коэффициент трения зависит от материала трущихся тел, породы древесины, геометрии резца и режимов резания.

Сложив геометрически векторы \bar{N} и \bar{P}_T , получим суммарную силу:

$$\bar{N}_1 = \bar{N} + \bar{P}_T = \bar{N} + \mu \bar{N}.$$

Угол $\varphi_{\text{тр}}$ отклонения силы \bar{N}_1 от нормальной силы \bar{N} — угол трения.

Раскладывая силу N_1 на силу P_n по направлению движения резания v и перпендикулярно к нему — P_c , получаем одну систему сил над линией раздела OO :

а) силу резания по передней поверхности резца

$$P_n = ke, \quad (7.1)$$

где k — среднее условное давление (эпюр $a123a$), отнесенное к поперечному сечению стружки, кг/мм^2 ;

б) силу P_c , нормальную к вектору v :

$$P_c = P_n \operatorname{tg}(180 - \delta - 90 - \varphi_{\text{тр}}) = P_n \operatorname{tg}(90 - \delta - \varphi_{\text{тр}}). \quad (7.2)$$

В зависимости от угла резания δ сила $P_c \leq 0$, т. е. она знакопеременная и может быть направлена вверх или вниз.

Взаимодействие реального резца с древесиной. При резании реальным резцом с радиусом кривизны лезвия ρ (рис. 7.1, б) криволинейная передняя поверхность его a_14_1 активно воздействует на стружку над линией раздела OO , а задняя поверхность a_15_1 , углубленная в древесину ниже линии раздела OO , подминает ее под лезвие с силой P_0 в направлении, перпендикулярном к плоскости резания, и упругоупруго деформирует поверхностный слой силой P_3 при перемещении резца по направлению v .

При резании реальным резцом возникают две системы сил:

1) над линией OO , действующие на сечение стружки be :

$$P_n \parallel v \text{ и } P_c \perp v;$$

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

$$P_3 \parallel v \text{ и } P_0 \perp v.$$

Проф. М. А. Дешевой при абсолютно остром резце эпюр распределенной нагрузки по передней поверхности резца предполагал в виде $I_114234I_1$ (рис. 7.1, б, позиция 1).

При реальном резце с $\rho > 0$ по гипотезе М. А. Дешевого эпюр станет $a_1a_4234a_1$, т. е. он уменьшится на площадь $14a$ и увеличится на площадь $1_14_1a_1$, а эти площади почти равновелики.

Следовательно, эпюры

$$P_n = I_114234I_1 = a_1a_4234a_1 = \text{const},$$

т. е. $P_n = ke$ зависит от e , а от затупления не зависит.

То же самое относится к силе $P_c = P_n \operatorname{tg}(90 - \delta - \varphi_{\text{тр}}) = \text{const}$.

Сила P_n — равнодействующая равномерно распределенной нагрузки, направленной под углом δ к передней поверхности резца, и действует на сечение стружки be , контактной с передней поверхностью резца на длине l_k :

$$P_n = ke = k_1 l_k,$$

где

$$k_1 = k \sin \delta, \quad (7.3)$$

т. е.

$$k > k_1.$$

Из формул (7.1) и (7.3) устанавливаем, что сила резания по передней поверхности резца зависит от толщины стружки e и угла резания δ . Опытами также установлена зависимость этой силы от скорости резания v и угла перерезания волокон ψ , т. е. $P_n = f(e, \delta, v, \psi)$.

Силы P_0 и P_3 почти не зависят от e . Они зависят от ρ , α и ψ .

При данных ρ и α , т. е. данном заглублении резца ниже линии раздела OO , силы P_0 и $P_3 = \text{const}$.

Эти выводы устанавливают независимость действия сил по обе стороны от плоскости резания OO [5].

Нормальные давления, действующие по задней поверхности резца, разложим на горизонтальные и вертикальные составляющие (рис. 7.1, в):

n_i — нормальные давления в различных точках задней поверхности резца;

z_{n_i} — их горизонтальные составляющие;

v_{n_i} — вертикальные составляющие;

μ_{n_i} — силы трения, соответствующие нормальным давлениям;

$z_{\mu_{n_i}}$ — горизонтальные составляющие сил трения;

$v_{\mu_{n_i}}$ — их вертикальные составляющие.

1. Алгебраическая сумма v_{n_i} дает силу P_0 . Сила P_0 — знакопеременная, всегда направлена к обрабатываемой поверхности и действует против реактивных сил упругого восстановления древесины, стремящихся отжать резец с такой же силой.

2. $\sum z_{n_i}$ даст силу Γ , которая упруго и пластически деформирует древесину ниже линии OO по направлению резания. С увеличением ρ сила Γ возрастает в некоторой пропорции: $\Gamma = \mu_1 P_0$, где μ_1 — коэффициент трения, учитывающий упругую и пластическую деформацию древесины.

3. $\sum v_{\mu_{n_i}} = 0$, как разнонаправленные и взаимно компенсирующие (по гипотезе проф. М. А. Дешевого).

4. $\sum z_{\mu_{n_i}}$ являются силой трения T_p , действующей в направлении резания:

$$T_p = \mu P_0,$$

где μ — коэффициент трения между древесиной и задней поверхностью резца без учета деформации поверхности трения.

Таким образом, от задней поверхности резца в направлении резания действуют силы Γ и T_p , их сумма

$$P_3 = \Gamma + T_p$$

называется силой резания, действующей по задней поверхности резца:

$$P_3 = \mu_1 P_0 + \mu P_0 \quad (7.4)$$

и

$$P_3 = (\mu_1 + \mu) P_0 = f_{пр} P_0, \quad (7.5)$$

где $f_{пр}$ — суммарный (приведенный) коэффициент, учитывающий трение древесины по задней поверхности резца и упруго-пластическую деформацию древесины под линией раздела OO : $f_{пр} = \mu_1 + \mu$.

$$P_0 = \frac{P_3}{f_{пр}}. \quad (7.6)$$

Опытами В. И. Чуприна и других установлено, что с увеличением ρ коэффициент μ_1 уменьшается, а следовательно, уменьшается и $f_{пр}$.

Это объясняется тем, что вдавливать лезвие в древесину на величину ρ труднее, чем смять ее вдоль направления резания.

7.3. Радиальная сила R , сопротивление подаче Q и сила S , нормальная к подаче, при круговом резании

Суммируя силы, действующие по направлению скорости резания (рис. 7.1), получаем суммарную касательную силу резания:

$$P = P_{п} + P_3. \quad (7.7)$$

Алгебраическая сумма вертикальных сил P_c и P_0 — суммарная радиальная сила:

$$R = P_0 - P_c = P_0 - P_{п} \operatorname{tg}(90 - \delta - \varphi_{тр}) \leq 0. \quad (7.8)$$

Сила R при круговом резании (рис. 7.2) направлена по радиусу от центра, если $P_0 > P_c$, и к центру, если $P_0 < P_c$. Проекции сил P и R на направление подачи дают силу сопротивления подаче:

$$Q = P \cos \Theta + R \sin \Theta. \quad (7.9)$$

Алгебраическая сумма вертикальных проекций сил P и R составит равнодействующую силу S , нормальную к подаче:

$$S = P \sin \Theta - R \cos \Theta \geq 0. \quad (7.10)$$

Если эта сила положительная (направлена вниз), то она прижимает заготовку к столу, если она отрицательная, то отбрасывает ее. В этом случае по силе S рассчитывается механизм прижима.

Между силами Q , R , S и P существует зависимость

$$R = Q \sin \Theta - S \cos \Theta; \quad (7.11)$$

$$P = Q \cos \Theta + S \sin \Theta. \quad (7.12)$$

Экспериментально измеряются силы Q и S , а по формулам (7.11) и (7.12) определяются расчетные значения P и R .

Преобразуем уравнение (7.9):

$$Q = P \left(\cos \Theta + \frac{R}{P} \sin \Theta \right).$$

Обозначив $m = \frac{R}{P}$

(7.13)

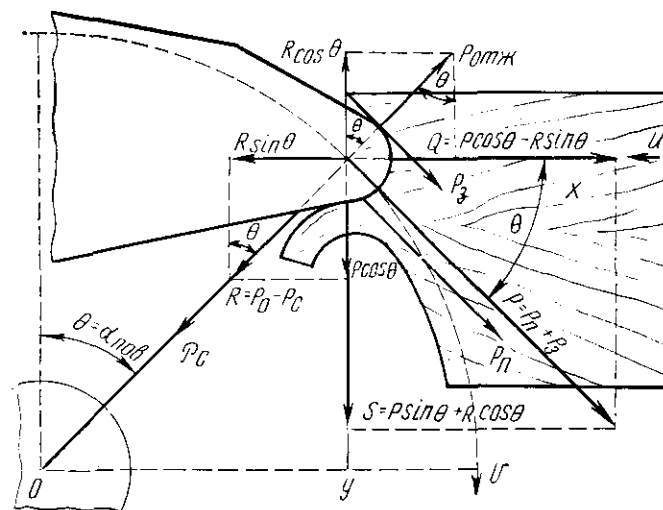


Рис. 7.2. Схема сил при круговом резании

и подставив в выражение (7.13) вместо R и P их значения, получим

$$m = \frac{P_0 - P_{п} \operatorname{tg}(90 - \delta - \varphi_{тр})}{P_3 + P_{п}}.$$

При $e=0$ и $P_{п}=0$

$$m = \frac{P_0}{P_3} = \frac{1}{f_{пр}}.$$

В осях координат R и e радиальная сила R изменяется по прямой (рис. 7.3) и при $e=0$

$$R_{e=0} = P_0 \approx 0,1\rho \text{ и } P_3 \approx 0,2\rho,$$

где ρ — фиктивная сила резания по задней поверхности резца (см. рис. 7.5) *.

Так как

$$f_{пр} = \frac{P_3}{P_0},$$

* Подробно о фиктивной силе ρ см. стр. 90—91.

то при остром резце ($\rho = 4-8$ мкм)

$$f_{пр} = \frac{0,2\rho}{0,1\rho} = 2.$$

По исследованиям МЛТИ значения m , $f_{пр}$, a_ρ от ρ приведены в табл. 7.1

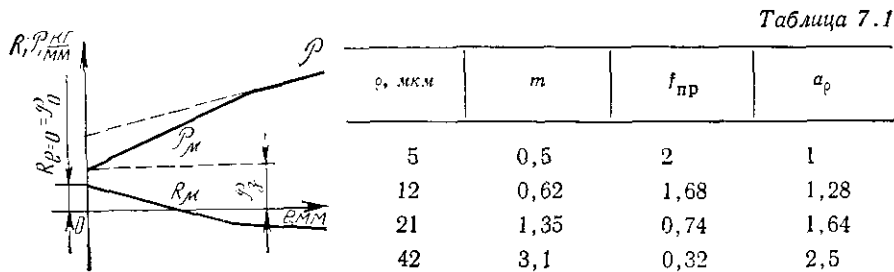


Рис. 7.3. Зависимость радиальной и касательной удельных сил резания от толщины стружки

По данным табл. 7.1 приближенно

$$f_{пр} = \frac{2}{a_\rho^2}, \quad (7.14)$$

где a_ρ — коэффициент, учитывающий затупление резца.

Анализ опытов по резанию древесины (табл. 7.1) показывает:

- 1) $m = \frac{R}{P}$ растет с увеличением ρ ;
- 2) $m = f(\rho, e)$. Каждому e и ρ соответствует только одно значение m . Нельзя произвольно задаваться значением m только по ρ или e ;
- 3) $f_{пр}$ уменьшается с увеличением толщины стружки e ;
- 4) при $e = 0$

$$m = \frac{P_0}{P_3} \quad \text{и} \quad f_{пр} = \frac{1}{m},$$

т. е. с увеличением ρ $f_{пр}$ уменьшается.

7.4. Исходные формулы расчета сил открытого резания

Линейный полином зависимости удельной силы резания от толщины стружки при остром резце. Определим опытным путем силу резания P , приходящуюся на один резец, при переменной толщине стружки e . Результаты опытов можно представить в виде вывода:

$$P_1, P_2, \dots, P_n,$$

$$e_1, e_2, \dots, e_n$$

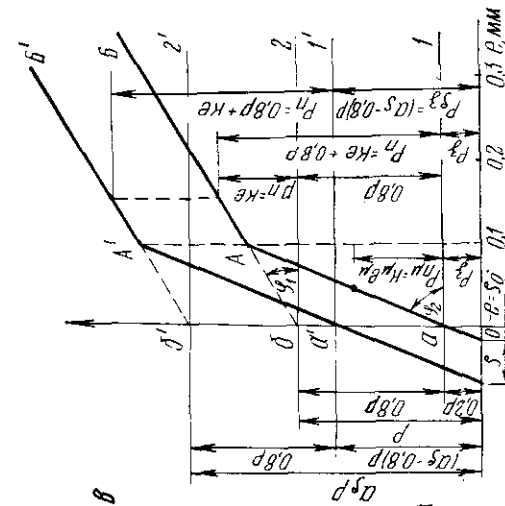
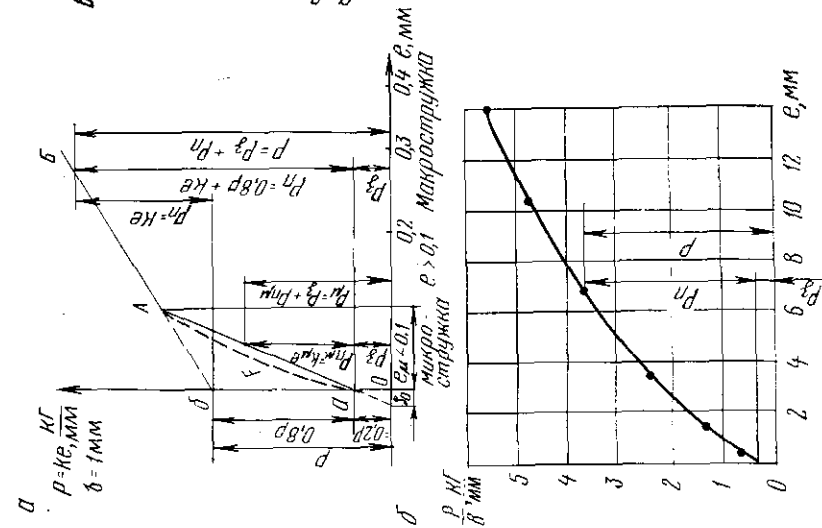


Рис. 7.4. График изменения $P = f(e)$: а — при резании микро- и макростружки; б — график $P = f(e)$ при резании сосны $\phi = 45^\circ$, $\psi = 45^\circ$ (по опытам Г. И. Завойского); в — изменение $P = f(e)$ при затупленном резце



или графика (рис. 7.4, а), где на оси ординат отложена удельная сила резания $\frac{P}{b=1} = Ke$, а по оси абсцисс — толщина стружки e .

В самом общем случае при переменной толщине стружки ($e = 0 - 25$ мм), постоянстве геометрических параметров резца, неизменных физико-механических свойствах древесины и других условиях резания зависимость удельной силы резания $\frac{P}{b}$ от e можно представить в виде параболической кривой (рис. 7.4, б.) При этом сила резания состоит из двух слагаемых P_{π} и P_3 , из которых P_3 постоянно.

Однако при резании древесины толщина стружки редко превышает 2 мм. Исследованиями процесса резания древесины установлено, что параболическое изменение удельной силы резания при толщине стружки $e_0 < 0,1 < e < 2$ мм почти совпадает с прямой AB (рис. 7.4, а), уравнение которой записывается так:

$$P = Ke = p + e \operatorname{tg} \varphi_1 = p + ke, \quad (7.15)$$

где

$$k = \operatorname{tg} \varphi_1 = \operatorname{const}.$$

Из графика (рис. 7.4, а) видно, что удельная сила резания $\frac{P}{b}$ растет прямо пропорционально толщине стружки при постоянном условном среднем давлении K .

Повышение удельной силы резания объясняется тем, что с увеличением толщины стружки пропорционально ей возрастает площадь контакта l_k передней поверхности резца с древесиной, а это приводит к росту всех сил, действующих по передней поверхности резца.

Постоянство давления на передней поверхности резца можно объяснить на основании диаграммы сжатия древесины в замкнутом пространстве (см. рис. 3.12), когда во второй фазе происходит разрушение и уплотнение клеток ранней древесины до плотности поздней. При резании аналогичный процесс происходит в полузамкнутом пространстве.

Слагаемое ke в уравнении (7.15) имеет физический смысл удельной силы резания p_{π} по передней поверхности резца, отнесенной к поперечному сечению стружки be , а слагаемое p — удельной силы резания по задней поверхности резца при $e = 0$. Предположим, что закономерность по прямой AB сохранится и при $e_0 < 0,1$ мм (при микростружке отрезок Ab).

При $e = 0$ на оси ординат получим отрезок $ob = p$. Назовем его фиктивной удельной силой резания по задней поверхности резца, а коэффициент k — фиктивным средним удельным давлением передней поверхности резца на поперечное сечение стружки be . Фиктивными эти величины названы потому, что они получены в результате

допущения, что зависимость $\frac{P}{b}$ от e по прямой AB сохранится и в области микростружек bA , когда $e_0 < 0,1$ мм.

В действительности опыты показывают, что при резании микростружки прямая пропорциональность нарушается и изменение реальной (опытной) силы резания происходит по некоторой параболической кривой Afa (рис. 7.4, а). Эта закономерность — результат влияния на силу резания двух переменных факторов — толщины стружки e и угла резания δ (см. рис. 7.5). С уменьшением толщины стружки e до величины, соизмеримой с радиусом кривизны лезвия ρ , реально угол резания возрастает и тем больше, чем меньше e_0 .

В первом приближении кривую Afa можно заменить прямой Aa , уравнение которой такое:

$$P_{\mu} = P_3 + k_{\mu} e_{\mu}, \quad (7.16)$$

где

$$P_3 = oa,$$

$$k_{\mu} = \operatorname{tg} \varphi_2.$$

Так как $\varphi_2 > \varphi_1$, то и $k_{\mu} > k$.

Отрезок oa , полученный на пересечении прямой aa с осью ординат, характеризует реальную силу резания P_3 по задней поверхности резца.

Реальная сила резания по передней поверхности резца при срезаии одной микростружки e_{μ}

$$P_{\pi\mu} = k_{\mu} e_{\mu}. \quad (7.17)$$

Полная сила резания при $e_0 < 0,1$ мм

$$P_{\mu} = P_3 + P_{\pi\mu}. \quad (7.18)$$

Реальными названы силы, полученные непосредственно опытным путем.

Обобщением многих исследований по резанию древесины острым резцом при $\rho_0 = 4 - 6$ мкм установлена зависимость между фиктивной и реальной силами резания по задней поверхности резца:

$$oa = P_3 = 0,2p = (1 - 0,8)p. \quad (7.19)$$

На основании графика (рис. 7.4, а) можно определить основные соотношения, необходимые для расчета режимов резания и зависимости между фактическими и фиктивными силами при остром резце.

Полная удельная сила резания при $e_0 < 0,1$ мм

$$P_{\mu} = 0,2p + k_{\mu} e_{\mu}. \quad (7.20)$$

Реальная удельная сила резания по передней поверхности резца при $e > 0,1$ мм

$$P_{\pi} = 0,8p + ke. \quad (7.21)$$

Полная удельная сила резания при $e > 0,1$ мм

$$P = P_{\pi} + P_3 = 0,2p + (0,8p + ke) = p + ke. \quad (7.22)$$

Определим k_x из условия, что граничная точка A (рис. 7.4) при $e = e_x = 0,1$ мм лежит как на прямой AB по уравнению (7.22), так и на прямой Aa по уравнению (7.20). Подставим в эти уравнения значение $e = e_x = 0,1$ и $P_z = 0,2p$.

Для точки A прямой AB

$$P = p + 0,1k. \quad (7.23)$$

Для той же точки A прямой aA

$$P_x = P_z + k_x e_x = 0,2p + 0,1k_x. \quad (7.24)$$

Приравняв (7.23) и (7.24), получим

$$\begin{aligned} p + 0,1k &= 0,2p + 0,1k_x; \\ 0,1k_x &= 0,8p + 0,1k. \end{aligned}$$

Определим

$$k_x = \frac{0,8p + 0,1k}{0,1},$$

откуда

$$k_x = 8p + k. \quad (7.25)$$

Решая совместно уравнения (7.18), (7.19), (7.20) и (7.24), получаем для $e_x < 0,1$ мм

$$P_x = P_{zп} + P_z = 0,2p + (8p + k)e_x. \quad (7.26)$$

7.5. Влияние различных факторов на процесс резания

Расчетные формулы с учетом затупления резца. Состояние режущей кромки существенно влияет на силы резания и качество обработки. Работа острым резцом ($\rho_0 = 4-8$ мкм) весьма эффективна и нецелесообразна при кривизне режущей кромки $\rho > 40-50$ мкм (иногда и меньше).

По данным Ф. М. Манжоса, при продольном фрезеровании с увеличением радиуса кривизны лезвия до $\rho = 35$ мкм мощность и сопротивление подаче повышаются на 25%, а при $\rho = 53$ мкм мощность — на 65%, а сопротивление подаче — на 51%. При обобщении результатов опытов Е. Кивимаа по резанию березы в торец острым и тупым резцом получены следующие уравнения силы резания:

$$P_{остр} = 0,4 + 3,8e = p + 3,8e;$$

$$P_{туп} = 0,8 + 3,8e = a_p p + 3,8e.$$

Отсюда можно полагать, что сила резания по передней поверхности как острого, так и тупого резца ($ke = 3,8e$) остается постоянной, что подтверждает гипотезу проф. М. А. Дешевого о независимости действия сил по обе стороны от линии раздела.

Сила резания по задней поверхности тупого резца увеличилась в a_p раз (в данном случае $a_p = 2$).

По исследованиям В. Г. Морозова при фрезеровании с переменной толщиной стружки и пути контакта резца в древесине $L = 0,10, 20, 30$ км получены обобщенные формулы:

$$P_L = 0 = 0,15 + 1,30e;$$

$$P_L = 10 = 0,18 + 1,32e;$$

$$P_L = 20 = 0,22 + 1,35e;$$

$$P_L = 30 = 0,27 + 1,36e,$$

$$P_L \approx a_p p + ke.$$

С увеличением пути резания и затупления резца k осталось почти постоянным, а значение p значительно (в 1,8 раза) увеличивается по мере затупления резца. Это значит, что решающее влияние на рост силы P_L оказывает сила по задней поверхности резца, которая возрастает в a_p раз, что также подтверждает гипотезу проф. М. А. Дешевого:

$$a_{p=10} = \frac{0,18}{0,15} = 1,2; \quad a_{p=20} = \frac{0,22}{0,15} = 1,46; \quad a_{p=30} = \frac{0,27}{0,15} = 1,8$$

или в общем виде

$$P_p = a_p p + ke = P_{zз} + P_{п}.$$

Коэффициент a_p , учитывающий затупление резца, относится только к силе резания по задней поверхности резца p :

$$P_{zз} = a_p p - 0,8p = (a_p - 0,8)p. \quad (7.27)$$

Сравнивая графики силы резания при остром резце (рис. 7.4, а) и тупом (рис. 7.4, в), видим, что по мере затупления резца сила резания по задней поверхности резца p возросла в a_p раз и стала $a_p p$.

Сила резания по передней поверхности резца (рис. 7.4, в) остается постоянной.

Сила резания при срезании микростружки P_x может равняться нулю только при выходе лезвия из контакта с древесиной (рис. 7.5):

$$\text{при } \rho_0 \quad P_{x\rho_0} = 0,2p + k_x e_x; \quad (7.28)$$

$$\text{при } \rho > \rho_0 \quad P_{x\rho} = (a_p - 0,8)p + k_x e_x. \quad (7.29)$$

Приравнивая уравнения (7.28) и (7.29) нулю, получаем

$$e_{\mu} = \frac{0,2\rho}{k_{\mu}} = -\rho_0;$$

$$e_{\mu} = \frac{(a_2 - 0,8)\rho}{k_{\mu}} = -\rho.$$

При резании резцом с радиусом кривизны лезвия ρ условно примем, что $e_{\mu} = 0$ по линии раздела OO , выше ее e берется с плюсом, ниже ее e — с минусом (рис. 7.5 и 7.1, б).

Условие $P_{\mu} = 0$ возможно только при выходе резца из контакта с древесиной, т. е.

$$-e_{\mu} = \rho_0.$$

Тогда

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{a_2 - 0,8}{0,2} = \frac{P_{\mu p}}{P_{\mu p_0}},$$

откуда

$$a_2 = 0,2 \frac{\rho}{\rho_0} + 0,8. \quad (7.30)$$

Обозначим $\Delta\rho$ приращение затупления резца на пути контакта L :

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0 = \epsilon L,$$

где ϵ — коэффициент, учитывающий удельное затупление резца на пути 1 м (приложение 9), мкм/м;
 ρ — радиус кривизны лезвия тупого резца:

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho \text{ мкм.} \quad (7.31)$$

Решая совместно уравнения (7.30) и (7.31), получаем

$$a_2 = 1 + \frac{0,2\Delta\rho}{\rho_0}. \quad (7.32)$$

Зависимость f_{np} от коэффициента a_2 представлена в виде таблицы (приложение 8).

Значения p и k в основных формулах продольно-торцевого резания. После обработки опытных данных методом математической статистики получены уравнения расчета сил для трех главных видов простого резания при различных режимах:

$$\begin{aligned} P_{\perp} &= (A_{\perp}\delta + B_{\perp}v - B_{\perp})e + a_2 p_{\perp} = k_{\perp}e + a_2 p_{\perp}; \\ P_{\parallel} &= (A_{\parallel}\delta + B_{\parallel}v - B_{\parallel})e + a_2 p_{\parallel} = k_{\parallel}e + a_2 p_{\parallel}; \\ P_{\#} &= (A_{\#}\delta + B_{\#}v - B_{\#})e + a_2 p_{\#} = k_{\#}e + a_2 p_{\#}, \end{aligned} \quad (7.33)$$

причем, если $v < 50$ м/сек, то вместо v надо брать $(90 - v)$. Коэффициенты A, B, V, p для сосны, березы и дуба при главных видах резания приведены в табл. 7.2 и 7.3.

Таблица 7.2

Коэффициенты A, B

Порода	A_{\perp}	A_{\parallel}	$A_{\#}$	B_{\perp}	B_{\parallel}	$B_{\#}$
Сосна	0,056	0,02	0,003	0,02	0,007	0,006-0,007
Береза	0,07	0,025	0,0045	0,024	0,008	0,007-0,010
Дуб	0,082	0,028	0,006	0,027	0,009	0,0085-0,012

* Меньшие значения $B_{\#}$ при $\delta < 55^\circ$, большие — при $\delta > 55^\circ$.

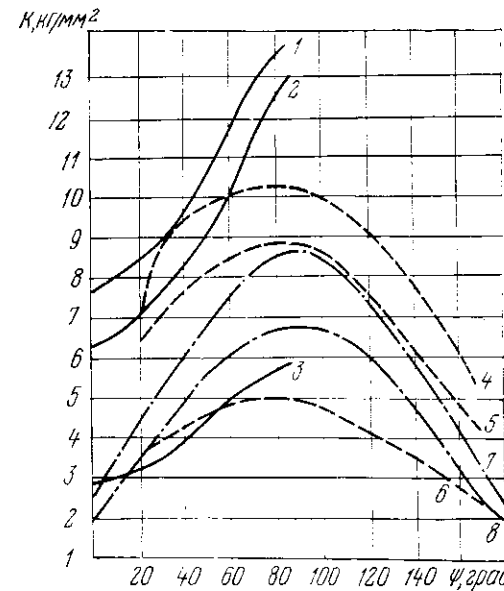


Рис. 7.6. Влияние угла перерезания волокон на среднее условное давление:
 1, 2, 3 — по опытам А. А. Смирнова (при пиленнии); 4, 5, 6 — по опытам М. М. Козела; 7, 8 — по опытам И. С. Кугеля (при фрезеровании)

Таблица 7.3

Коэффициенты B, p

Порода	B_{\perp}	B_{\parallel}	$B_{\#}$	p_{\perp}	p_{\parallel}	$p_{\#}$
Сосна	2	0,55	0,06	0,49	0,16	0,1
Береза	2,3	0,7	0,085	0,55	0,19	0,14
Дуб	2,56	0,76	0,1	0,64	0,21	0,17

Влияние угла перерезания волокон ψ . Влияние угла перерезания волокон ψ (между вектором скорости резания v и волокном) на силу резания учитывается коэффициентами $A_{\perp}, B_{\perp}, V_{\perp}$ и p_{\perp} . С увеличением угла перерезания волокон до 90° при пиленнии и фрезеровании (рис. 7.6) силы резания растут, затем уменьшаются, достигая минимума при $\psi = 180^\circ$.

Следует различать обработку по слою, когда $\psi < 90^\circ$, и против слоя, если $\psi > 90^\circ$ (см. рис. 3.8).

При разных видах обработки (пиление, фрезерование и др.) часто направление волокон совпадает с направлением скорости подачи u , в этом случае в расчетах принимают $\Theta = \psi$, где Θ — кинематический угол встречи: $\Theta = (u; v)$.

Если такого совпадения нет, то при резании против слоя

$$\psi = 180 - (\Theta - \Theta_1),$$

где Θ_1 — угол между вектором скорости подачи и направлением волокон древесины.

При резании по слою

$$\psi = \Theta_1 - \Theta.$$

В табл. 7.4 приведены опытные данные проф. Ф. М. Манжоса (ЦНИИМОД — МЛТИ, 1934—1965 гг.) по фрезерованию под углом $\psi = 0-90^\circ$.

Таблица 7.4

Значения K ($\kappa\Gamma/мм^2$) и $P = Ke$ ($\kappa\Gamma$)

$e, мм$	$\psi, град$						
	0	15	30	45	60	75	90
0,025	3,7*	4,3	5,4	6,5	7,7	8,8	9,7
	0,092	0,107	0,136	0,165	0,19	0,21	0,24
0,05	3,3	3,9	5	5,7	6,5	7,3	7,9
	0,105	0,196	0,25	0,285	0,325	0,365	0,395
0,1	2,5	3,3	4,1	4,6	5,1	5,5	6
	0,25	0,33	0,41	0,46	0,51	0,55	0,6
0,2	1,7	2,2	2,8	3,3	3,7	4,1	4,4
	0,34	0,44	0,56	0,66	0,74	0,82	0,88
0,3	1,3	1,7	2,2	2,7	3	3,3	3,6
	0,39	0,51	0,66	0,81	0,9	0,99	1,08
0,4	1,15	1,45	1,9	2,4	2,7	3	3,2
	0,46	0,58	0,76	0,96	1,08	1,2	1,28
0,5	1,05	1,4	1,7	2,1	2,4	2,6	3
	0,53	0,7	0,85	1,05	1,2	1,3	1,5
0,6	1	1,3	1,65	2	2,2	2,5	2,8
	0,6	0,78	1,02	1,2	1,32	1,5	1,68
0,7	1	1,3	1,6	2	2,2	2,45	2,7
	0,7	0,92	1,14	1,36	1,5	1,7	1,88

* В числителе даны K , в знаменателе — $P = Ke$.

Из табл. 7.4 видно, что сила резания и среднее условное давление K увеличиваются при изменении ψ от 0 до 90° .

Аналогичные результаты получены и при обработке других опытных данных, уравнения которых в общем виде представлены формулами для продольно-торцевого резания ($\parallel - \perp$)

$$\frac{P_{\parallel - \perp}}{be} = K_{\parallel - \perp} = K_{\parallel} + (K_{\perp} - K_{\parallel}) \frac{\psi}{90}, \quad (7.34)$$

для поперечно-торцевого резания ($\perp - \perp$)

$$\frac{P_{\perp - \perp}}{be} = K_{\perp - \perp} = K_{\perp} + (K_{\parallel} - K_{\perp}) \frac{\psi}{90},$$

для поперечно-продольного резания ($\perp - \parallel$)

$$\frac{P_{\perp - \parallel}}{be} = K_{\perp - \parallel} = K_{\perp} + (K_{\parallel} - K_{\perp}) \frac{90 - \psi}{90}.$$

В случае резания под углом перерезания волокон ψ , по аналогичным формулам определяют коэффициенты A_{ψ} , B_{ψ} , V_{ψ} , p_{ψ} , k_{ψ} . Например,

$$A_{\parallel - \perp} = A_{\parallel} + (A_{\perp} - A_{\parallel}) \frac{\psi}{90} \text{ и т. д.} \quad (7.35)$$

Однако проще определить только коэффициенты p_{ψ} и k_{ψ} по расчетным формулам (7.36)—(7.38), подставляя в них соответствующие значения ψ , δ и v .

Коэффициенты A_{ψ} , B_{ψ} , V_{ψ} и p_{ψ} при данных значениях можно также рассчитать по номограммам (см. рис. 7.8; 7.9).

Для всех случаев продольно-торцевого резания значения p_{ψ} определяются по формулам (7.36) при фрезеровании, по формулам (7.37) при пилении, значения k_{ψ} при $e > 0,1$ мм для пиления и фрезерования — по формулам (7.38):

при фрезеровании

$$\begin{aligned} \text{Сосны } p &= 0,16 + 0,0036\psi \\ \text{Березы } p &= 0,19 + 0,004\psi \\ \text{Дуба } p &= 0,21 + 0,0046\psi \end{aligned} \quad (7.36)$$

при пилении

$$\begin{aligned} p &= 0,4 + 0,0036\psi \\ p &= 0,45 + 0,004\psi \\ p &= 0,5 + 0,0046\psi \end{aligned} \quad (7.37)$$

Значение k_{ψ} при $e > 0,1$ мм для пиления и фрезерования:

сосны

$$\begin{aligned} k &= A_{\psi}\delta + B_{\psi}v^* - V_{\psi} = (0,02 + 0,0004\psi)\delta + (0,007 + 0,00015\psi)v^* - \\ &\quad - (0,55 + 0,015\psi); \end{aligned} \quad (7.38a)$$

* При скорости резания $v < 50$ м/сек надо вместо v подставлять $(90 - v)$.

березы

$$k = A_{\psi}\delta + B_{\psi}v^* - B_{\psi} = (0,025 + 0,0005\psi)\delta + (0,008 + 0,00018\psi)v^* - (0,7 + 0,018\psi); \quad (7.38б)$$

дуба

$$k = A_{\psi}\delta + B_{\psi}v^* - B_{\psi} = (0,028 + 0,0006\psi)\delta + (0,009 + 0,0002\psi)v^* - (0,76 + 0,02\psi). \quad (7.38в)$$

$$\text{При } e_{\mu} < 0,1 \text{ мм } k_{\mu} = 8\rho + k. \quad (7.38г)$$

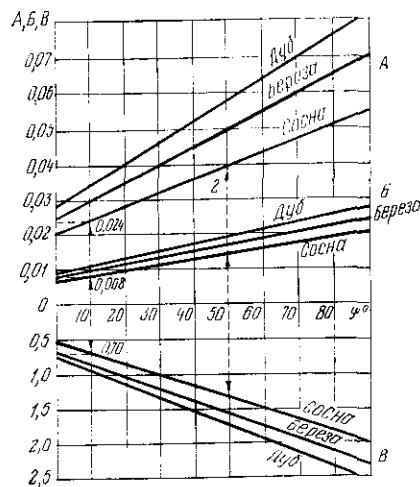


Рис. 7.7. Номограмма для расчета коэффициентов A , B , V в зависимости от ψ

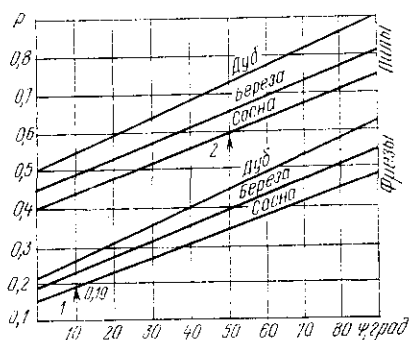


Рис. 7.8. Номограмма для расчета удельной силы ρ в зависимости от ψ

Номографический метод расчета параметров резания. В формулы (7.36)—(7.38) входят коэффициенты A_{ψ} , B_{ψ} , V_{ψ} и ρ_{ψ} , которые являются функциями угла ψ и выражаются уравнениями прямых. Графически эти прямые показаны на номограммах (рис. 7.7; 7.8). Номограммы значительно облегчают расчет k_{ψ} и ρ_{ψ} , а следовательно, и силы резания. Ниже приводятся примеры пользования номограммами.

Пример 1. Фрезерование. Дано: $\psi = \Theta = 10^{\circ}$, $\delta = 60^{\circ}$, $v = 42$ м/сек, порода — сосна. Определить ρ_{ψ} и k_{ψ} .

Решение. 1. На рис. 7.8 по стрелке 1 находим $\rho = 0,19$ кг/мм.

2. На рис. 7.7 по стрелке 1 $B = 0,008$, $A = 0,024$, $V = 0,7$. По формуле (7.38а)

$$k = A\delta + B(90 - v) - V = 0,024 \cdot 60 + 0,008(90 - 42) - 0,7 = 1,12 \text{ кг/мм}^2.$$

Пример 2. Пиление. Дано: $\psi = \Theta = 50^{\circ}$, $\delta = 55^{\circ}$, $v = 90$ м/сек, порода — сосна. Определить k и ρ .

Решение. 1. На рис. 7.8 по стрелке 2 находим $\rho = 0,6$ кг/мм.

2. По рис. 7.7 определяем $B = 0,014$, $A = 0,039$, $V = 1,3$. По формуле (7.38а)

$$k = A\delta + Bv - V = 0,039 \cdot 55 + 0,014 \cdot 90 - 1,3 = 2,1 \text{ кг/мм}^2.$$

Влияние углов резания. С увеличением заднего угла α уменьшаются площадь контакта деформированных слоев древесины с задней поверхностью резца (см. рис. 3.9) и сила трения, поэтому мощность, сила и удельная сила резания уменьшаются (рис. 7.9). Значительное увеличение α приводит к потере жесткости резца и вибрации лезвия, поэтому сопротивление резанию возрастает.

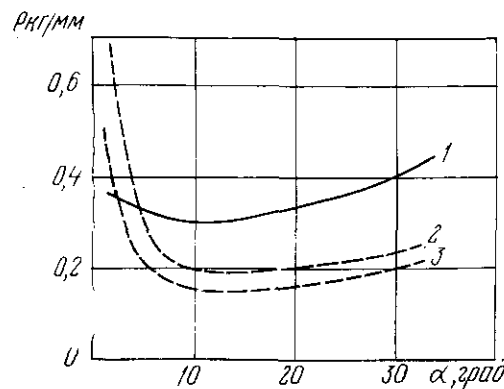


Рис. 7.9. Влияние заднего угла α на удельную силу резания при фрезеровании по опытам:

Е. Кивимаа 1 — береза, 2 — дуб; Г. Паллица 3 — пихта

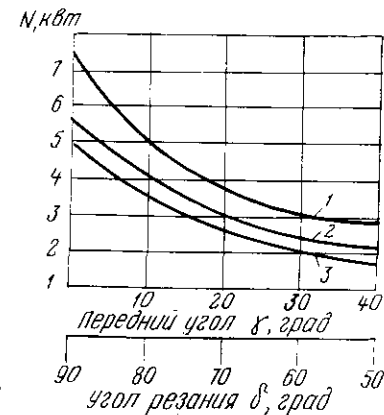


Рис. 7.10. Влияние геометрии инструмента на мощность резания по опытам Девиса, Нельсона:

фрезерование 1 — твердой; 2, 3 — мягкой древесины

При срезании тонкой стружки сила отжима древесины и трение по задней поверхности резца возрастают. Задний угол α желательно увеличить. При форсированных подачах одновременно возрастает давление и по передней поверхности резца.

При обработке древесины в торец упругое восстановление наибольшее и удельное давление на заднюю поверхность максимальное, поэтому и задний угол резания принимают возможно большим.

В зависимости от условий резания задний угол принимают $\alpha = 7-28^{\circ}$. Меньшие значения относятся к процессу фрезерования поперек волокон и при резании сухой и твердой древесины, большие — при резании в торец влажной древесины мягких пород.

При выборе заднего угла α надо учитывать отношение $\frac{u}{v}$

(см. рис. 2.6). Если $\frac{u}{v} \rightarrow 1$, то задний угол α следует брать больше, с увеличением скорости резания можно принимать меньшие значения α .

При увеличении заднего угла α больше $20-25^{\circ}$ при $\delta = \text{const}$ уменьшается угол заточки β . Меньший угол заточки β более длительно сохраняет остроту режущего инструмента, повышает его стойкость и обеспечивает работу инструмента при минимальной силе

и мощности резания. Минимально возможный угол заострения принимают из условий прочности резца в зависимости от конкретных условий резания и марки стали в пределах $\beta = 15-70^\circ$.

Из рис. 3.9, 3.10 и 3.11 видно, что в зависимости от угла резания изменяется характер образования стружки и деформация древесины. Угол резания влияет на составляющую силы резания P_n , которая с увеличением δ возрастает, и не влияет на силу P_a .

С увеличением угла резания δ мощность и сила резания возрастают (рис. 7.10), поэтому выбирается всегда оптимальный наименьший угол резания (от 15 до 90°) в зависимости от конкретных условий резания.

При резании поперек волокон гидротермически обработанной древесины угол резания минимальный, максимальный — при резании твердых пород древесины в торец.

При расчетах влияние угла резания δ учитывается в формулах

$$k = A\delta + Bv - B$$

и

$$P_n = 0,8p + ke = 0,8p + (A\delta + Bv - B)e.$$

Передний угол γ зависит от выбора угла резания ($\gamma = 90 - \delta$).

Влияние скорости резания. Резец, соприкасаясь с отделяемой стружкой, выводит ее из состояния покоя, почти мгновенно сообщая ей скорость v .

Несмотря на малую массу увлекаемой древесины возникают значительные ускорения и силы инерции (пропорционально квадрату скорости), которые препятствуют деформации древесины, уменьшают релаксацию, разрушая древесину за счет упругих деформаций, уменьшая или минуя пластические.

Анализируя кинокадры по фрезерованию древесины со скоростью 39 м/сек, проф. Е. Г. Ивановский заметил, что при поперечном резании резец в начальный момент сильно деформирует древесину, затем происходит разрушение стружки в виде «взрыва», причем скорость движения образовавшихся элементов стружки значительно (до 160%) превышает скорость движения резца. Объясняется это тем, что с ростом скорости деформирования древесины стружки увеличиваются упругие деформации и потенциальная энергия послеупругих деформаций. В процессе резания потенциальная энергия поля сжатия превращается в кинетическую энергию движения, сообщая стружке дополнительную скорость.

Влиянию скорости резания на силовые параметры и качество обработки исследователи уделили достаточное внимание, но далеко не все вопросы решены и нашли научное обоснование. Многие выводы противоречивы. Так, например, ряд явлений (отгибы, сколы и другие) не происходит благодаря скоростному подпору, поэтому качество обработки улучшается, хотя шероховатость поверхности почти не зависит от скорости резания.

Опытами по фрезерованию установлено, что сила резания уменьшается с увеличением скорости резания до $35-55$ м/сек, а при дальнейшем увеличении скорости резания растет (рис. 7.11). При

фрезеровании с увеличением скорости резания наблюдается уменьшение длины опережающей трещины при продольном резании (см. рис. 3.10) и деформации ниже линии раздела при торцевом резании (см. рис. 3.9), продольной усадки, а стружка от элементной переходит в сливную.

При пилении со скоростью резания до 20 м/сек сила резания растет (опыты БТИ), затем при дальнейшем увеличении скорости

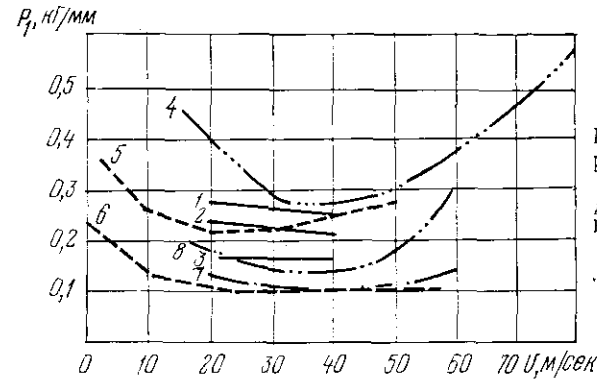


Рис. 7.11. Влияние скорости резания на удельную силу резания по опытам: 1, 2, 3 — А. А. Смирнова; 4, 5 — Н. И. Давыдовой (при пилении); 6, 7, 8 — М. М. Козела (при фрезеровании)

резания она уменьшается, достигая минимума при $v = 45-50$ м/сек, при дальнейшем увеличении скорости резания до $v = 120$ м/сек сила резания вновь возрастает (опыты ЦНИИМОД). При поперечном пилении сила резания не зависит от скорости резания.

Уменьшение силы резания при скоростях $v < 50$ м/сек и увеличение ее при $v > 50$ м/сек учитывается в расчетном методе. Так, сила резания по передней поверхности резца P_n при скорости резания до 50 м/сек определяется по формуле

$$P_n = 0,8p + [A\delta + B(90 - v) - B]e,$$

а при скорости резания $v > 50$ м/сек

$$P_n = 0,8p + (A\delta + Bv - B)e.$$

С увеличением скорости резания сопротивление подаче и мощность подачи уменьшаются.

Скорость резания — важнейший фактор увеличения производительности оборудования, поэтому понятно стремление к ее повышению.

Удельная сила при закрытом резании. При закрытом резании (пиление) боковые кромки у лезвия совершают сдвиг и вырывы волокон со стенок пропила. За счет этого возрастает удельное сопротивление резанию по задней поверхности резца. При этом удельная сила $p_{пл}$ больше, чем при открытом резании (фрезеровании) $p_{фр}$. Кроме того, стружка, срезанная зубом пилы, сильно деформируется и уплотняется во впадине зуба пилы (см. гл. 8). Объем уплотненной стружки составляет $0,45-0,5$ первоначального. Уплотнению стружки во впадине зуба способствует упругое восстановление сте-

нок пропила, вследствие чего ширина пропила в зоне впадины меньше, чем у главной режущей кромки.

На деформацию и прессование стружки во впадине зуба, трение при скольжении по боковым поверхностям пропила затрачивается дополнительная сила $P_{тр}$, которая учитывается в уравнениях резания и относится к сопротивлению по передней поверхности реза. Сила трения возрастает от нуля в начале врезания зуба до максимума $\alpha_\lambda eh$ на выходе резцов из пропила. Средняя сила трения и прессования по обоим стенкам пропила

$$P_{тр} = \frac{2(0 + \alpha_\lambda eh)}{2} = \alpha_\lambda eh \text{ кГ}, \quad (7.39)$$

где α_λ — коэффициент интенсивности трения, имеющий размерность условного удельного давления (приложение 10), кГ/мм^2 .

Удельное сопротивление трению, отнесенное к боковому сечению стружки eh ,

$$K_{тр} = \frac{\alpha_\lambda h}{b} \text{ кГ/мм}^2.$$

Если сопоставить опытные данные проф. Ф. М. Манжоса по фрезерованию (открытое резание): $\delta = 60^\circ$, $\psi = 60^\circ$, $v = 40 \text{ м/сек}$ при разных e , обобщенные в уравнение³

$$P = p + ke = 0,38 + 1,64e,$$

и опыты канд. техн. наук Н. К. Якунина, проведенные при аналогичных условиях, но при пиленнии ($h = 40 \text{ мм}$), то получим

$$P_{пил} = p_{пил} + k_{пил}e = 0,62 + 2,44e,$$

где $p_{пил} = 0,62 > p = 0,38$ на $0,24 \text{ кГ/мм}$ и $k_{пил} = 2,44 > k = 1,64$ на $0,8 \text{ кГ/мм}^2$.

При $h = 40 \text{ мм}$ на 1 мм высоты пропила при пиленнии дополнительное сопротивление резанию составит $\frac{0,8}{40} = 0,02 \text{ кГ/мм}^2$. С учетом этого

$$P_{пил} = (p + 0,24) + (k + K_{тр})e$$

или

$$P_{пил} = (p + 0,24) + (k + 0,02h)e.$$

При пиленнии сосны по опытам Н. К. Якунина $K_{тр} = 0,02 \frac{h}{b} \text{ кГ/мм}^2$, $h = 1$, $b = 3,6 \text{ мм}$, тогда

$$\alpha_\lambda = \frac{K_{тр}b}{h} = 0,02 \cdot 3,6 = 0,072 \text{ кГ/мм}^2.$$

Это значение α_λ получено для дисковых пил с разведенными зубьями. Аналогично определены α_λ и α_Δ при пиленнии ленточными и рамными пилами, которые приводятся в приложении 10.

Уравнение удельной силы срезания одной стружки при пиленнии (закрытом резании) с учетом силы трения при $e > 0,1 \text{ мм}$ следующее:

$$P = a_p p + \left(k + \frac{\alpha_\lambda h}{b}\right) e \text{ кГ/мм}; \quad (7.40)$$

при $e_\lambda < 0,1 \text{ мм}$

$$P_\mu = (a_p - 0,8) p + \left(8p + k + \frac{\alpha_\lambda h}{b}\right) e_\lambda \text{ кГ/мм}. \quad (7.41)$$

Среднее условное давление при закрытом резании (пиленнии): при $e > 0,1 \text{ мм}$

$$K = \frac{P}{e} = \frac{a_p p}{e} + k + \frac{\alpha_\lambda h}{b} \text{ кГ/мм}^2; \quad (7.42)$$

при $e_\lambda < 0,1 \text{ мм}$

$$K_\lambda = \frac{P_\mu}{e_\lambda} = \frac{(a_p - 0,8) p}{e_\lambda} + 8p + k + \frac{\alpha_\lambda h}{b} \text{ кГ/мм}^2. \quad (7.43)$$

Влияние высоты пропила и толщины снимаемого слоя. При продольно-торцевом резании с увеличением высоты пропила при пиленнии и толщины снимаемого слоя h при фрезеровании главная режущая кромка от продольного резания переходит к торцевому, возрастает угол перерезания волокон $\psi = \Theta$, средняя толщина стружки $e = c \sin \Theta$, длина стружки $l = \frac{h}{\sin \Theta}$, более значительной становится продольная остаточная деформация стружки. При поперечном фрезеровании появляются сколы и отщепы.

При фрезеровании с увеличением толщины снимаемого слоя $h \leq 4 \text{ мм}$ сила и мощность резания возрастают пропорционально h , при $h \geq 4 \text{ мм}$ сила и мощность резания увеличиваются более интенсивно, чем h .

При расчетах режимов пиления влияние h учитывается изменением $\Theta = \psi$, толщины стружки e и силы трения $P_{тр} = \alpha_\lambda eh$.

Влияние ширины стружки. Из рис. 7.12 видно, что при фрезеровании сила резания, а следовательно, и мощность изменяются пропорционально ширине стружки. При продольном пиленнии с увеличением ширины пропила b сила и мощность резания также возрастают почти пропорционально b .

Если уширение пропила b больше нормы, ширина пропила возрастает, увеличиваются потери ценной древесины, сила и мощность резания. При поперечной распиловке среднее условное давление K с увеличением ширины пропила b уменьшается (рис. 7.13).

До сих пор удельная сила резания определялась при ширине стружки $b = 1 \text{ мм}$. С увеличением ширины стружки удельная сила резания $\frac{P}{b}$ уменьшается пропорционально b , и в формулах (7.40) — (7.43) надо учитывать длину режущей кромки b_λ . При пиленнии

пилами с разведенными зубьями $b_n = s$ (где s — толщина пилы).
Во всех других случаях $b_n = b$.

При $e \geq 0,1$ мм

$$\frac{P_\lambda}{b_n} = a_p p + \left(k + \frac{\alpha_\lambda h}{b} \right) e \text{ кг/мм.} \quad (7.44)$$

При $e_\mu \leq 0,1$ мм

$$\frac{P_{\mu\lambda}}{b_n} = (a_p - 0,8) p + \left(8p + k + \frac{\alpha_\lambda h}{b} \right) e_\mu \text{ кг/мм.} \quad (7.45)$$

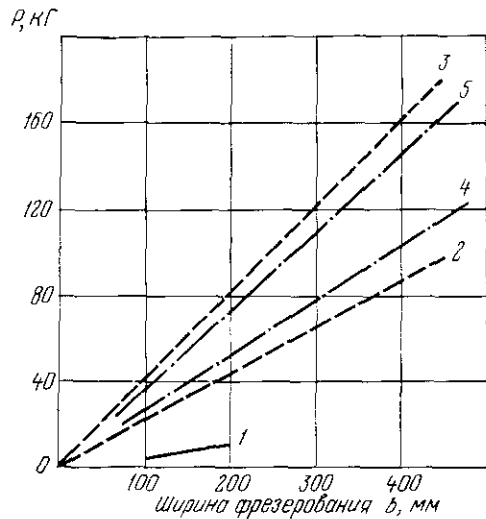


Рис. 7.12. Зависимость силы резания от ширины фрезерования по опытам:
1 — Ф. М. Манжоса; 2 — Е. Квициа; 3, 4, 5 — Г. Палича

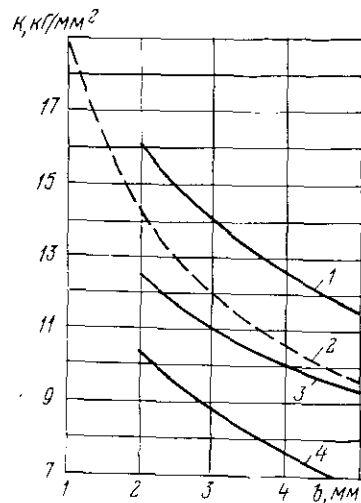


Рис. 7.13. Влияние ширины пропила на среднее удельное давление резания при поперечной распиловке по опытам А. Е. Золотарева, А. А. Смирнова:
1 — лиственница; 2 — дуб; 3 — ель; 4 — сосна

7.6. Основные формулы продольно-торцевого резания

Для расчета режимов резания и станков надо знать силу и мощность резания. Средняя за оборот сила резания для всех видов обработки

$$P^* = \frac{102 N}{v} = P_{зуб} \frac{l^{**}}{t} \text{ кг,} \quad (7.46)$$

* P — средняя сила резания на одну пилу, фрезу и т. д.

** При пиленнии рамными пилами вместо $\frac{l}{t}$ надо брать $\frac{h}{2t}$.

где N — мощность резания, кВт;

v — скорость резания, м/сек;

$P_{зуб}$ — средняя за оборот сила резания, приходящаяся на один резец, кг;

l — длина контакта резца с древесиной, мм;

t — шаг между резцами инструмента, мм.

Если уравнения (7.44) и (7.45) умножить на b_n и подставить в них значение $e_\lambda = \frac{b}{b_n} c \sin \Theta$, то получим: при $e \geq 0,1$ мм

$$P_{зуб} = P_3 + P_n = a_p b_n + c \sin \Theta (k b + \alpha_\lambda h) \text{ кг;} \quad (7.47)$$

при $e_\mu \leq 0,1$ мм

$$P_{зуб\mu} = P_3 + P_{п\mu} = (a_p - 0,8) p b_n + c_\mu \sin \Theta [(8p + k) b + \alpha_\lambda h] \text{ кг,} \quad (7.48)$$

где P_3 — сила резания по задней поверхности резца, реальная сила воздействия резца на слой древесины под плоскостью раздела:

$$P_3 = (a_p - 0,8) p b_n \text{ кг;} \quad (7.49)$$

a_p — коэффициент, учитывающий затупление резца, определяемый по формуле (7.32);

p — фиктивная удельная сила резания по задней поверхности резца, определяется по формулам (7.36), (7.37);

b_n — ширина режущей кромки резца, мм;

P_n — сила резания по передней поверхности резца, реальная активная сила воздействия резца на поперечное сечение стружки:

$$P_n = P - P_3 \quad (7.50)$$

или

$$P_n = 0,8 p b_n + c \sin \Theta (k b + \alpha_\lambda h) \text{ кг,}$$

$P_{п\mu}$ — то же, что и P_n , но при $e_\mu \leq 0,1$ мм:

$$P_{п\mu} = [(8p + k) b + \alpha_\lambda h] c \sin \Theta \text{ кг,} \quad (7.51)$$

k — фиктивное среднее условное давление резания на передней поверхности резца, определяемое по формуле (7.38), кг/мм²;

α_λ — коэффициент, учитывающий трение и прессование стружки во впадине зуба, принимаемый по приложению 10, кг/мм²;

h — высота пропила при пиленнии, толщина снимаемого слоя при фрезеровании, мм;

c — подача на резец:

$$c = \frac{1000 u}{z n} \text{ мм;}$$

Θ — кинематический угол встречи между векторами скорости резания \vec{v} и подачи \vec{u} , определяемый по формулам (4.32), (4.36), град.

Формулы (7.47) и (7.48) — основные при расчетах продольно-торцевого резания.

Средняя касательная сила резания за оборот:

$$P = [a_p b_{\pi} + c \sin \Theta (kb + \alpha_h h)] \frac{l}{t};$$

$$P_x = \{ (a_p - 0,8) pb_{\pi} + c_p \sin \Theta [(8p + k) b + \alpha_h h] \} \frac{l}{t}.$$

Примечание. При пилении рамными пилами вместо $\frac{l}{t}$ будет $\frac{h}{2t}$.

Основные формулы расчета режимов продольно-торцевого резания можно применить к процессам строгания, открытого фрезерования и пиления, если учесть:

1) при фрезеровании слагаемое, содержащее α_h , будет равно нулю; $b_{\pi} = b$;

2) при пилении ленточными и рамными пилами $\Theta = 90^\circ$, $\sin \Theta = 1$; кроме того, при пилении рамными пилами расчет ведется по $h_{ср}$ и вместо $\frac{l}{t}$ будет $\frac{h}{2t}$;

3) при пилении плющеными зубьями вместо α_h надо α_{Δ} и $b_{\pi} = b$.

Зная силы P , P_x и P_n , можно определить и другие составляющие силы резания: радиальную

$$R = 0,5 P_x a_p^2 - P_n \operatorname{tg} (90 - \delta - \varphi_{тр}) \text{ кг}; \quad (7.52)$$

сопротивление подаче

$$Q = P \cos \Theta + R \sin \Theta \text{ кг}; \quad (7.53)$$

нормальную к подаче ($S \perp Q$)

$$S = P \sin \Theta - R \cos \Theta \text{ кг}. \quad (7.54)$$

По формулам (7.47) и (7.48) решается обратная задача. В этом случае сила резания P известна и определяется подача на резец c и скорость подачи u при полном использовании мощности резания

$$u = \frac{czn}{1000} \text{ м/мин.}$$

7.7. Решение задач

В гл. 9, 10, 11 и других приводятся конкретные типовые примеры расчета режимов резания — определение силы и мощности резания или скорости подачи.

Здесь рассмотрим ход решения прямой и обратной задач в общем виде.

А. Ход решения прямой задачи

Дано: D мм, n об/мин, b мм, u м/мин, δ град, z шт., l мм, ρ_0 мкм, T мин, порода древесины.

Определить: силу P и мощность N резания.

Решение. 1. Определяем $\sin \Theta$ по формуле (4.36) при фрезеровании, по уравнению (4.32) при пилении дисковыми пилами, а при пилении на ленточнопильных станках и лесопильных рамах $\sin \Theta = 1$, $\Theta = 90^\circ$.

Зная $\sin \Theta$, по таблицам определяем $\cos \Theta$ и $\Theta = \varphi$.

2. Рассчитываем подачу на резец и толщину стружки:

$$c = \frac{1000u}{zn} \text{ мм.}$$

Если $e = \frac{b}{b_{\pi}} c \sin \Theta \geq 0,1$ мм, то дальше надо решать по формуле (7.47)

для макростружки; если $e_p = \frac{b}{b_{\pi}} c \sin \Theta < 0,1$ мм, то расчет ведут по формуле (7.48) для микростружки.

3. Определяем скорость резания:

$$v = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000} \text{ м/сек.}$$

4. По формулам (7.36) — (7.38) рассчитываем p и k .

5. Длина дуги контакта

$$l = \frac{h}{\sin \Theta} \text{ мм.}$$

6. Коэффициент a_p , учитывающий затупление резца,

$$a_p = 1 + \frac{0,2 \Delta \rho}{\rho_0},$$

где ρ_0 — начальный радиус кривизны лезвия острых резцов: при фрезеровании 5 мкм; при пилении 10 мкм;

$\Delta \rho$ — приращение затупления резца на пути L за время T (мин) резания:

$$\Delta \rho = \frac{\varepsilon \ln T}{1000} \text{ мкм};$$

ε — коэффициент, учитывающий приращение на 1 пог. м пути контакта (приложение 10).

7. Определяем силу резания $P_{зуб}$ по формуле (7.47), если $e \geq 0,1$ мм или по уравнению (7.48), если $e_p < 0,1$ мм.

8. Сила резания

$$P = P_{зуб} \frac{l}{t} \text{ кг.}$$

9. Мощность резания

$$N^* = \frac{Pv}{102} \text{ квт.}$$

Б. Ход решения обратной задачи (построение графика скоростей подачи)

Дано: N квт, D мм, n об/мин, b мм, h мм, z шт., l мм, δ град, ρ_0 мкм, T мин, порода древесины.

Определить: подачу на резец и скорость подачи, построить график скоростей подачи.

* N — мощность на одну фрезу, пилу и др. Если на валу установлено несколько одинаковых инструментов, то $N = N_{уст} \eta / i$, где i — количество одинакового инструмента на шпинделе станка, шт.

Решение. Решение обратной задачи с целью построения графика скоростей подачи удобно представить в виде табл. 7.5. По этой таблице рассчитаем скорость подачи при фрезеровании деталей шириной b_1, b_2, b_3 и b_4 с припуском на обработку h_1 и h_2 .

Таблица 7.5

Ход решения задачи

№ п. п.	Расчетные формулы	Размерность	Числовое значение при припусках на обработку, мм	
			h_1	h_2
1	$N^* = N_{\text{уст}} \eta$	квт		
2	$v = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000}$	м/сек		
3	$P = \frac{102 N}{v}$	кГ		
4	$\sin \theta = \sqrt{\frac{h}{D}}$			
5	$l = \frac{h}{\sin \theta}$	мм		
6	$P_{\text{зуб}} = \frac{Pl}{l}$	кГ		
7	k по формуле (7.38)	кГ/мм ²		
8	p по формуле (7.36)	кГ/мм		
9	$\Delta\rho = \frac{\varepsilon \ln T}{1000}$ и приложение 10	мкм		
10	$a_p = 1 + \frac{0,2 \Delta\rho}{\rho_0}$ Ширина фрезерования	мм	при b_1	при b_1
11	$e = c \sin \theta = \frac{P_{\text{зуб}}}{kb} - \frac{a_p p}{k}$	мм	b_2 b_3 b_4	b_2 b_3 b_4
	Если $e_p < 0,1$, то расчет ведется по формуле $c \sin \theta = \frac{P_{\text{зуб}} - (a_p - 0,8) pb}{(8p + k)b}$	мм		
12	$c = \frac{e}{\sin \theta}$	мм		
13	$u = \frac{cgn}{1000}$	м/мин		

Аналогичная форма таблицы будет и для пиления, когда расчет ведется для нескольких высот пропила h_1, h_2, h_3, h_4 при $b = \text{const}$.

По данным табл. 7.5 в системе координат u и b строится график скоростей подачи (см. рис. 12.10). Конкретный пример расчета и анализ графика скоростей подачи при фрезеровании даны в § 12.3.

Глава 8

ПИЛЕНИЕ

8.1. Классификация и характеристика видов пиления

Пиление — процесс закрытого резания многолезвийным инструментом — пилами, которые разделяют древесину на объемно-недеформированные части путем превращения в стружку номинального объема древесины между этими частями (пропилот).

В табл. 8.1 приведена классификация видов пиления (по данным проф. Ф. М. Манжоса).

По роду движения пилы подразделяются на пилы с возвратно-поступательным прямолинейным (рамные, поперечно-пильные, лобзиковые), с непрерывным прямолинейным (ленточные, цепные), с непрерывным вращательным движением (дисковые, цилиндрические, сферические).

По характеру образования пропила (относительно волокон древесины) — на пилы продольной, поперечной и смешанной распиловки. При этом пилы отличаются друг от друга только формой зуба (см. рис. 2.9) и углами заточки.

По конструкции — на пилы с плоским прямым полотном в виде пластинки (табл. 8.1), с плоским бесконечным полотном в виде ленты и диска (см. рис. 11.2).

Пила (см. рис. 2.9) — это стальное полотно толщиной s со штампованным на периферии рядом зубьев той или иной формы. Промежутки между зубьями называются *впадинами*.

У зубьев различают поверхности: передние — $OA, OA'AO'$, задние — $OB, O'BB'O$ и т. д. и боковые — $O'AB, OA'B$ и т. д.

Передняя поверхность зуба активно воздействует на стружку, деформируя ее.

Прямая, криволинейная или круговая линия, по которой расположены вершины зубьев, называется *линией вершин зубьев пилы*. Такая же линия, ограничивающая дно впадин, называется *линией впадин*. Дно впадин закругляется по радиусу r .

Кратчайшее расстояние между линией вершин и линией впадин зубьев называется *высотой зуба h_3* .

Расстояние между лезвиями двух смежных зубьев (мм), измеренное по линии вершин зубьев, называется *шагом зубьев t* .

Обычно для каждой пилы $h_3 = \text{const}$ и $t = \text{const}$. Однако бывают сложные зубчатые венцы, где различные зубья размещаются се-

Таблица 8.1

Классификация видов пиления

Пиление с неравномерным рабочим движением	Пиление с равномерным рабочим движением			
	на лесопильных рамах	ленточное	на круглых станках	
на лесопильных рамах	на поперечно-скользящих станках	с равномерной подачей	цилиндрическими	Перпендиц. нос
	на продольно-скользящих станках		Смешан. нос	
с продольной подачей	ленточное		цилиндрическими	Смешан. нос
			Смешан. нос	
			Продоль. нос	
			Смешан. нос	
			Перпендиц. нос	
			Продоль. нос	
			Смешан. нос	
			Продоль. нос	
с продольной подачей	ленточное	цилиндрическими	Перпендиц. нос	
		Смешан. нос		

риями (см. рис. 8.10). У таких пил h_2 и t постоянны только для одноименных зубьев.

При пилении образуются три поверхности обработки. Главные кромки зубьев OO' (рис. 2.9) образуют дно пропила. Боковые передние кромки OA и $O'A'$ и т. д. формируют стенки пропила. Углы резания при кромках реза выбираются в зависимости от вида резания относительно волокон древесины.

Когда пропил направлен вдоль волокон, пиление называется *продольным*, когда пропил перпендикулярен к волокнам, — *поперечным* (*торцевым*). Если пропил под углом к волокнам или криволинейный, то пиление — *смешанное*.

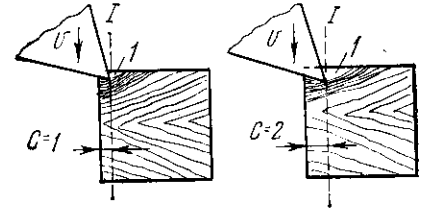


Рис. 8.1. Отгиб волокон при продольном пилении

При продольном пилении главная кромка зуба режет в торец, а боковые кромки — поперек волокон. В этом случае применяют пилы с прямой заточкой (см. рис. 2.9, а). Боковые поверхности перпендикулярны к передней и задней поверхностям реза, а углы у боковых кромок $\delta_1 = \beta_1 = 90^\circ$ и $\alpha_1 = \gamma_1 = 0^\circ$.

Наличие угла резания $\delta_1 = 90^\circ$ при боковых кромках вполне допустимо, так как главная режущая кромка при резании не только перерезает волокна по траектории резания $I-I$ (рис. 8.1), но и отгибает их за ней, отрывая волокна от стенок пропила I . Боковые кромки при этом в резании почти не участвуют, так как сдвиг волокон опережает их воздействие на древесину. Они только зачищают стенки пропила поперек волокон, а снимаемые ими неровности имеют микроразмеры.

Чем больше подача на резец c , тем больше забегание отгиба волокон за линию реза $I-I$, глубже отрывы у стенок пропила, больше шероховатость стенок пропила.

При поперечном пилении главная кромка режет поперек волокон, а боковые кромки — в торец. В этом случае, если боковые кромки будут иметь $\beta_1 = 90^\circ$, то получится значительный отгиб волокон и нечистый пропил.

Если применить косую заточку, т. е. наклонить переднюю поверхность $O'A'O$ к боковой $AO'B$ (см. рис. 2.9, б) под углом меньше 90° , то у кромки $O'A$ получим $\delta_1 = \beta_1 < 90^\circ$, $\alpha_1 = 0$, $\gamma_1 = 90^\circ - \delta_1$. При этом боковая поверхность скользит по стенке пропила. У другой боковой кромки $\delta_2 = \beta_2 > 90^\circ$, $\alpha_2 = 0$ и γ_2 отрицательный и равен $90 - \delta < 0$.

При $\alpha_1 = 0$ создаются неблагоприятные условия резания: возникает отжим и силы трения возрастают (см. рис. 3.9). Для того чтобы задние углы α_1 , α_2 были больше нуля, необходимо боковым поверхностям зуба придать наклон по отношению к стенкам пропила (косую боковую обточку). При этом конструкция пилы усложняется, затрудняется ее изготовление и эксплуатация. Поэтому цельные

пилы таких конструкций не получили практического применения, а применяются пилы с пластинками из твердого сплава с косой боковой обточкой.

8.2. Уширение пропила

При резании древесины, имеющей волокнисто-слоистое строение с небольшим сопротивлением деформированию, по обе стороны пилы на поверхности раздела древесины возникают упругие и пла-

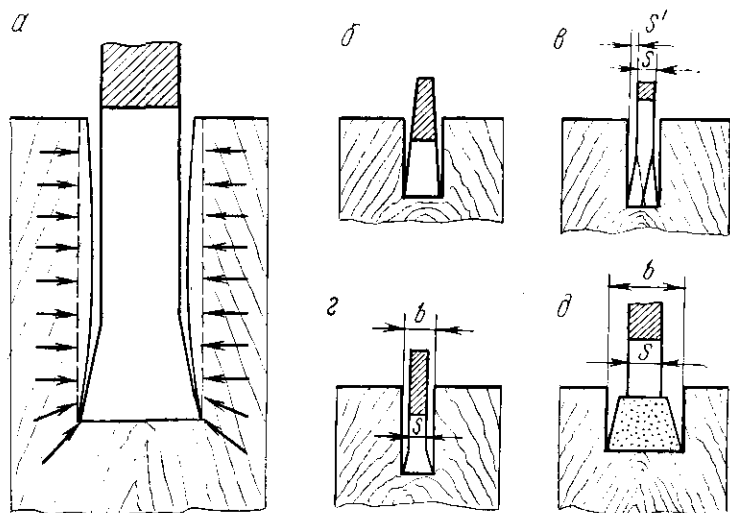


Рис. 8.2. Уширение пропила

стические деформации. Вследствие несимметричности механических свойств древесины относительно плоскости пропила упруговосстановившаяся древесина, сужая пропил, не только зажимает пилу между стенками пропила, но и создает поперечные деформации полотна пилы (рис. 8.2, а). При движении пилы в пропилах происходит сильное трение не только боковой поверхности зуба, но и полотна пилы о древесину.

Древесина и инструмент сильно нагреваются, пила теряет необходимую жесткость и начинает резать в стороны, ухудшая качество распиловки. Значительно возрастает мощность на резание и подачу.

Сила трения между пилой и стенками пропила может достигнуть такой величины, что пиление станет невозможным. Это явление называется *заеданием пилы*. По опытам СТИ, коэффициент трения между металлом и древесиной мало зависит от наклона волокон в плоскости стенок пропила и поверхности трения. В зависимости от влажности его значение изменяется от 0,25 до 0,65. Чтобы устранить трение полотна о стенки пропила, избежать заедания пилы, надо

уширить пропил, т. е. увеличить расстояние между стенками пропила. Тогда пила в пропилах будет перемещаться свободнее. Однако это уширение не должно быть больше, чем необходимое для устранения трения полотна пилы о стенки пропила, иначе увеличатся потери древесины в отходы и потребуется дополнительная энергия на превращение ценной древесины в стружку (опилки). Рекомендуемые нормы уширения для разных пил даны в приложении 15. Уширение пропила достигается:

1) применением пилы трапециевидного сечения, причем зубья штампуют на утолщенной кромке полотна (рис. 8.2, б), или резцов с пластинками из твердого сплава;

2) уширением вершин зубьев: а) разводом λ — отгибанием зубьев поочередно (через зуб) на обе стороны на одну и ту же величину s' мм (рис. 8.2, в); б) пластическим сдвигом; в) плющением Δ каждого зуба до ширины b (рис. 8.2, г); г) напаванием на зубья пластинок из твердого сплава (рис. 8.2, д).

При пиленнии дисковыми пилами (без развода и плющения) уширение пропила может быть достигнуто установкой пил перпендикулярно к оси вращения. Уширение на сторону зависит от ширины или диаметра пилы, наличия на ней выпучин и коробления, точности установки и почти не зависит от толщины пилы и расположения волокон в плоскости стенок пропила.

8.3. Стружкообразование при продольном пиленнии

На рис. 8.3, а изображена пила в пропилах при продольном пиленнии. Передняя стенка пропила (со стороны читателя) условно снята.

При движении пилы вниз (по стрелке v) главные режущие кромки зубьев перемещаются по вертикальным прямым, отрывая волокна от стенок пропила и разрушая их перпендикулярно к длине. Рассмотрим план пропила при пиленнии плющеными (рис. 8.3, б, д) и разведенными зубьями (рис. 8.3, в, г). При одной и той же подаче на резец c и ширине пропила b получаются равновеликие площади поперечного сечения стружки разной конфигурации. Длина главной режущей кромки плющеного зуба $b_{\text{д}}$ соответствует ширине пропила b .

Врезаясь один за другим в древесину, плющенные зубья отделяют стружку за стружкой по всей ширине пропила b , поперечное сечение которой

$$f_{\Delta} = bc.$$

Длина лезвия разведенного зуба $b_{\text{д}} = s$. Первый зуб, отведенный вправо, снимет стружку 1, поперечное сечение которой будет иметь стороны, равные подаче на зуб c и длине лезвия $b_{\text{д}}$. Площадка 2 размером c ($b - b_{\text{д}}$) остается не срезанной первым зубом.

Второй зуб, отведенный влево, срезает площадки 3 и 2, оставляя следующему зубу площадку, равновеликую площадке 2, и т. д. В результате каждый разведенный зуб срезает стружку, площадка поперечного сечения которой такая же, как и при плющенных зубьях.

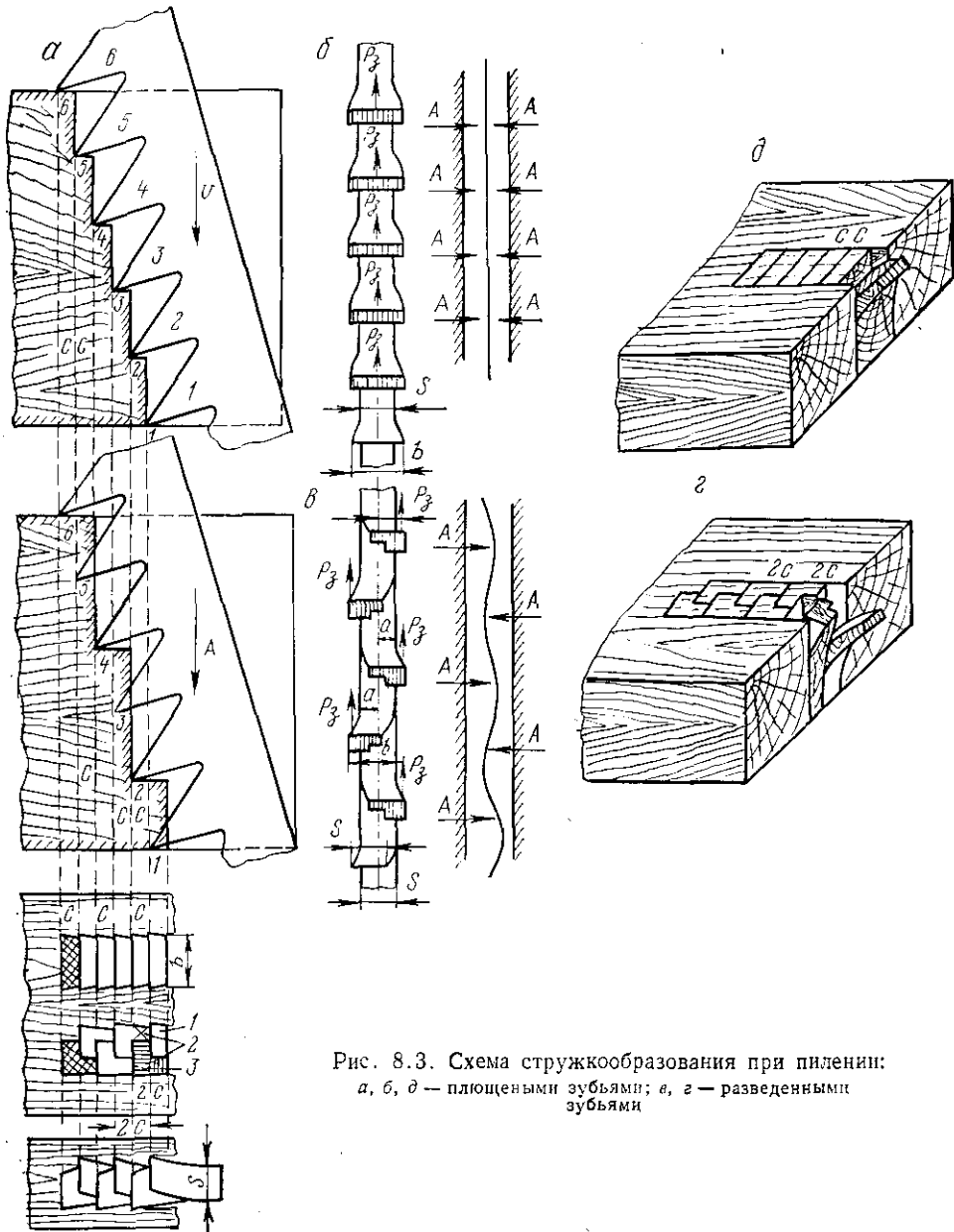


Рис. 8.3. Схема стружкообразования при пилении:
 а, б, д — плющеными зубьями; в, г — разведенными
 зубьями

хотя форма стружки в обоих случаях разная (рис. 8.3, б, в), т. е. $f_{\Delta} = f_{\lambda}$.

Из различия конфигурации стружки при плющенных и разведенных зубах вытекает ряд следствий.

1. При одной и той же подаче на резец с средняя толщина стружки e_{λ} больше средней толщины стружки e_{Δ} во столько раз, во сколько ширина пропила больше толщины пилы:

$$e_{\Delta} = \frac{f_c}{b} = \frac{bc}{b} = c \text{ мм}; e_{\lambda} = \frac{f_c}{b_{\lambda}} = \frac{bc}{b_{\lambda}} = \frac{b}{b_{\lambda}} c.$$

2. При прочих равных условиях работа резания при разведенных зубах будет меньше, чем при пилении плющеными зубьями, так как $e_{\lambda} > e_{\Delta}$.

3. Шероховатость распила при пилении плющеными зубьями меньше, чем разведенными. Это объясняется тем, что у стенок пропила подача равна $2c$ при разведенных зубах и c при плющенных (рис. 8.3, а). Длина отрыва волокон древесины от стенок пропила при разведенных зубах увеличивается, что повышает шероховатость распила.

Кроме того, боковые кромки разведенных зубьев, врезаясь в древесину под углом к плоскости стенки пропила, образуют на ней риски более глубокие, чем риски от плющенных зубьев.

4. Стенки пропила разведенных зубьев более шероховаты, чем у плющенных, поэтому трение стружки о стенки пропила больше при разведенных зубах и

$$P_{тр\lambda} = \alpha_{\lambda} e h > P_{тр\Delta} \alpha_{\Delta} e h,$$

где $\alpha_{\Delta} = 0,8 \alpha_{\lambda}$.

5. У разведенных зубьев внутренняя боковая кромка не имеет зазора, и поэтому происходит трение по древесине на глубине подачи на резец c . Наружная боковая кромка глубже внедряется в обрабатываемый материал — на $2c$. Если разведенные зубья имеют косую заточку по задней поверхности резца, то внутренняя боковая кромка зуба будет находиться в контакте с древесиной и подвергаться трению при

$$c > \frac{\text{tg } \varphi_2}{\sin \theta} (b - 2s'),$$

где φ_2 — угол косой заточки по задней поверхности резца.

При c , меньшем этого значения, внутренняя боковая кромка не соприкасается с древесиной.

В зависимости от режима пиления с учетом сил трения сила резания, приходящаяся на один зуб, может быть $P_{\Delta} \leq P_{\lambda}$.

Целесообразность применения плющенных или разведенных зубьев по расходу мощности устанавливается в каждом конкретном случае. Качество распила всегда лучше при пилении плющеными зубьями.

6. Пила с плющеными зубьями меньше деформируется, она более жесткая и устойчивая. Сила сопротивления резанию $P_{зуб \Delta}$ располагается по оси полотна пилы (рис. 8.3, б), а $P_{зуб \lambda}$ (рис. 8.3, в) — по обе стороны оси полотна. При пилении разведенными зубьями это приводит к образованию поперечных моментов $\pm ar_3$, которые попеременно (влево, вправо) действуют на полотно пилы и вызывают дополнительную вибрацию пилы в пропилах.

7. Так как пилы с плющеными зубьями более устойчивы, то можно применять более тонкие пилы. В результате уменьшится ширина пропила $b_{\Delta} < b_{\lambda}$, т. е. увеличится полезный выход пиломатериалов. Кроме того, дополнительно должен сократиться расход мощности на распиловку, так как сократится объем материала, размельченного в стружку. Уменьшить потребление мощности на резание при плющенных зубьях можно также за счет увеличения шага на 30—40%, т. е. $t_{\Delta} > t_{\lambda}$. За счет получающегося при этом относительного увеличения объема впадины улучшаются условия стружкообразования.

8. В результате уменьшения числа плющенных зубьев с увеличенным шагом и уменьшения общей длины затачиваемых поверхностей снижается время на заточку и расход точильных кругов. Так как боковые поверхности плющенных зубьев изнашиваются меньше, чем разведенных, то уменьшается толщина слоя, подлежащего снятию при заточке. За счет этого износ пил с плющеными зубьями снижается на 25—30%, хотя общий расход рамной пилы по ширине за счет плющения значительно больше, чем расход пилы с разведенными зубьями.

К преимуществу пил с разведенными зубьями следует отнести простоту техники развода зубьев пил.

8.4. Заполнение стружкой впадины зуба при продольном пилении

Проф. М. А. Дешевой полагал, что для размещения опилок в пропилах служат исключительно впадины между зубьями.

Теоретические предположения проф. А. Л. Бершадского (1930 г.), рентгено снимки, полученные им в Архангельском лесотехническом институте (1936 г.), исследования канд. техн. наук М. Н. Орлова (1935 г.), проф. А. Э. Грубе подтвердили мысль, впервые высказанную проф. Н. С. Войтинским (1929—1930 гг.), о том, что впадина не «мешок», куда насыпаются опилки, а пресс, в котором они запрессовываются.

На рис. 8.4, а показана пила в момент выхода зубьев из пропила, а на рис. 8.4, б — рентгено снимок пилы в пропилах, показывающий размещение сильно уплотненной стружки во впадине зуба пилы, находящейся в пропилах. Когда зуб выходит из пропила, освободившись от трения о стенки пропила спрессованные ленточно-элементные стружки под влиянием центробежных и инерционных сил рассыпаются.

В БТИ заполнение впадины стружкой наблюдали при малой скорости резания.

При пилении плющеными зубьями ширина пропила равна длине режущей кромки только в момент контакта резца со стенками пропила (рис. 8.6, в, сечение А—А), после прохода резца на высоте шага зубьев стенки пропила упруго восстанавливаются, уменьшают про-

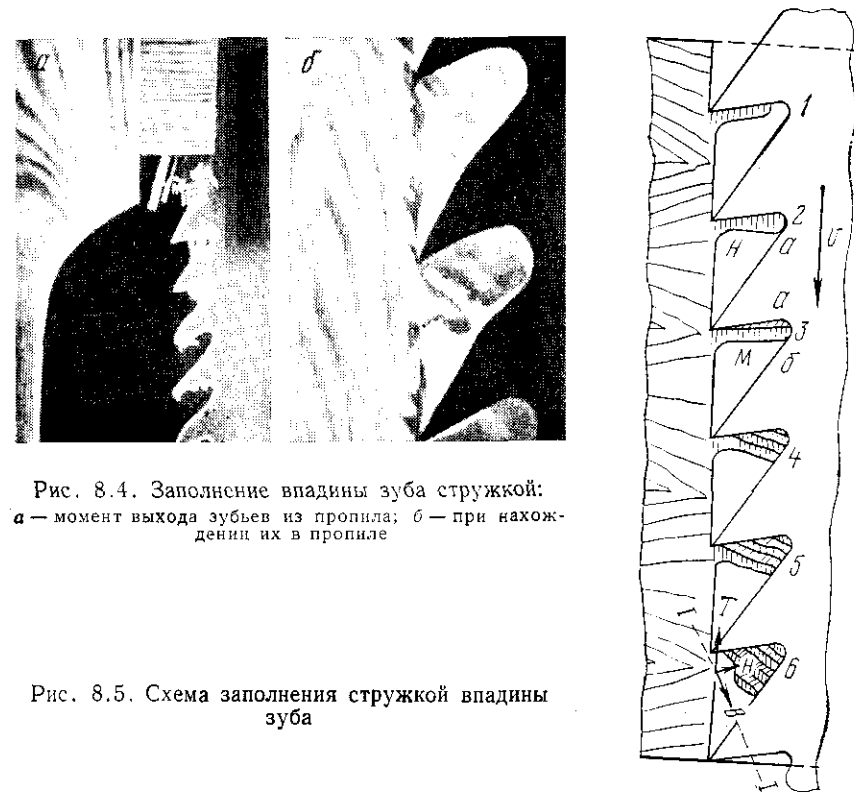


Рис. 8.4. Заполнение впадины зуба стружкой: а — момент выхода зубьев из пропила; б — при нахождении их в пропилах

Рис. 8.5. Схема заполнения стружкой впадины зуба

пил в области впадины зуба до b_1 . Срезанная стружка шириной $b > b_1$ вдавливается в узкую впадину зуба.

Впадина зуба заполняется под действием равнодействующей N сил нормального давления N со стороны передней поверхности резца и силы трения стружки о стенки пропила T (рис. 8.5, позиция б).

Давление со стороны стенок пропила на боковые поверхности стружки при рабочем движении пилы по v вызывает силу трения, которая поджимает стружку к передней поверхности зуба. Продвигаясь по передней поверхности зуба пилы, стружка достигает дна впадины. Упираясь в дно впадины, она дополнительно уплотняется, изгибается и надламывается в сечении H . В дальнейшем стружка перемещается по предыдущей, прижатой трением к передней поверхности резца, подпрессовывая ее, упирается в дно впадины и опять

надламывается в точке *М*. Заполнение впадины происходит неравномерно с увеличением высоты пропила. Первоначально стружка мало уплотнена и находится в разрыхленном состоянии. С увеличением высоты пропила уплотнение стружки возрастает до тех пор, пока она разместится до линии *I—I*, приблизительно перпендикулярно к передней поверхности реза. Дальнейшее заполнение затрудняется тем, что перед резцом в зоне лезвия образуется плотный слой деформированной стружки, поджатой резцом, и резание происходит этой массой уплотненной стружки без непосредственного участия реза. При этом растет сила резания, резко ухудшается качество распила, из-за перегрузки пила нагревается и начинает вибрировать. Часть впадины за линией *I—I* незаполнена. Опыты показали, что впадину удается заполнить не более чем на 80% даже при рекордных посылках.

Так, непрерывной подпрессовкой вышерасположенных стружек, поджимаемых силой трения к передней поверхности реза и одной стружки к другой, заполняется впадина за рабочий ход пилы. Опыты показали, что объем стружки, уплотненной во впадине зуба, в 1,5—2 раза меньше номинального объема срезанной древесины. Объясняется это тем, что при заполнении впадины стружкой сближаются деформированные клетки и сокращаются межклеточные пустоты ранней древесины. Разрушить и сжать более мелкие и прочные клетки поздней древесины затруднительно.

При пилении сила резания растет пропорционально высоте пропила до тех пор, пока впадина зуба заполнится до линии *I—I*, примерно нормальной к передней поверхности реза. Заполнение впадины происходит при постоянном давлении, что и является подтверждением основной физической закономерности. При разной конфигурации стружки у пил с плющеными и разведенными зубьями впадина у них заполняется по-разному.

Плющенные зубья срезают стружку прямоугольного сечения *bc*, элементы которой изогнутой или частично спирально-свернутой лентой сразу равномерно и плотно заполняют впадину зуба по всей ее ширине (рис. 8.3, *д*).

При разведенных зубьях номинальная толщина стружки у стенок пропила равна $2c$, а внутри пропила — c , поэтому боковая поверхность впадины заполняется быстрее, чем середина ее. Элементы стружки смещаются и прессуются хаотично.

Процесс заполнения впадины наблюдали при пилении образца древесины, когда в одной стенке пропила вырезались отверстия, которые заменялись стеклом. Наблюдения показали, что при одинаковых условиях пиления вместимость впадины пил с плющеными зубьями на 20% больше, чем вместимость у разведенных. Следовательно, при том же шаге и профиле зуба можно повысить производительность по емкости впадины на 20% при пилении плющеными зубьями по сравнению с разведенными.

Принимая коэффициент заполнения впадины по ширине пропила плющенных зубьев $\beta_{\Delta \text{зап}}$ за единицу, т. е. $\beta_{\Delta \text{зап}} = 1$, можно считать для разведенных зубьев $\beta_{\Delta \text{зап}} = 0,8$.

На рис. 8.6, *а* приведена запись ряда повторных опытов на одной ленте, когда зуб пилы срезал стружку без погружения впадины зуба в пропил, т. е. боковая поверхность стружки не соприкасалась со стенками пропила. На рис. 8.6, *б* аналогичная запись, когда зуб пилы погружен в пропил на всю высоту зуба, т. е. боковые поверхности стружки во впадине соприкасались со стенками пропила.

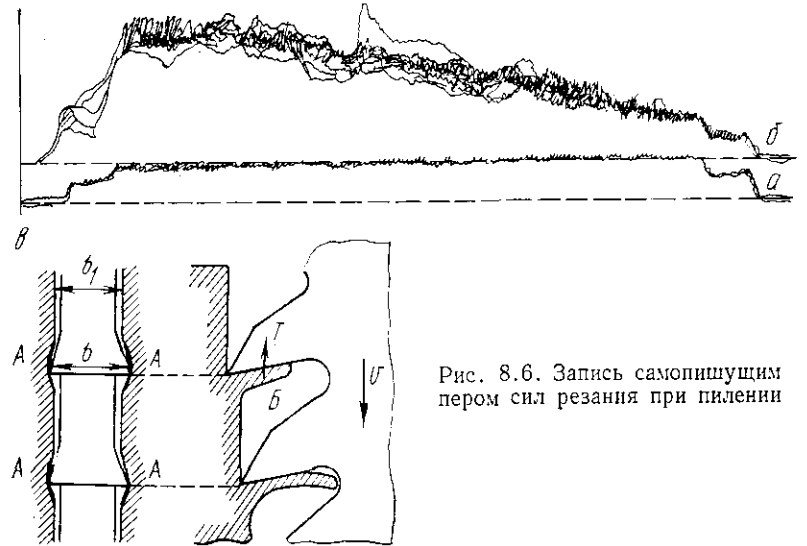


Рис. 8.6. Запись самопишущим пером сил резания при пилении

Опыты показывают, что с самого начала резания, когда впадина находится в пропиле, растет сила резания. Это явление подтверждает гипотезу о трении стружки о стенки пропила.

Интенсивность силы трения в расчетах учитывается коэффициентом пропорциональности α_x или α_{Δ} .

При возвратно-поступательном движении пил в лесопильных рамах различают проходные зубья ($z_{\text{пр}} = \frac{H}{t}$), производящие рас-

пил на всю высоту пропила h , и непроходные зубья ($z_{\text{н}} = \frac{h}{t}$), остающиеся в пропиле. Сумма зубьев, находящихся в пропиле, $z = \frac{H + h}{t}$.

Непроходные зубья образуют пропил меньше $h : h - t; h - 2t; h - 3t, \dots$. Впадина этих зубьев будет заполнена стружкой частично. При холостом ходе стружка, зажата во впадине непроходного зуба, создает трение о стенки пропила на высоте h , компенсируя недогрузку этих зубьев в период рабочего хода, поэтому зависимость $K_{\text{тр}} = \frac{\alpha_x h}{b}$ за полный оборот коренного вала спра-

ведлива и для случая, когда в работе имеются и непроходные зубья, а сила трения должна учитываться для всех зубьев $\frac{H+h}{t}$ на всей высоте пропила h .

8.5. Определение посылки по производительности пилы (по впадине зуба)

В процессе резания каждый зуб срезает древесину, номинальный объем которой

$$O_{\text{ном}} = bch \text{ мм}^3,$$

где b — ширина пропила:

$$b = s + 2s' \text{ мм};$$

s — толщина пилы, мм;

s' — уширение на сторону, мм;

c — подача на резец, мм;

h — высота пропила, мм.

В условиях напряженной работы (большая высота пропила и подача на резец) при пилении стружка сильно деформируется во впадине зуба, ее объем O будет меньше номинального $bch \text{ мм}^3$.

Отношение

$$\frac{O}{bch} = \alpha_{\text{упл}} \quad (8.1)$$

назовем коэффициентом уплотнения $\alpha_{\text{упл}}$.

Практически в зависимости от объема стружки и емкости впадины зуба коэффициент $\alpha_{\text{упл}}$ может быть больше единицы (при разрыхлении), когда объем стружки небольшой, и меньше единицы, когда высота пропила и подача на резец значительные. При этом стружка сильно деформируется и уплотняется во впадине зуба и $\alpha_{\text{упл}} \geq 0,4$.

Стружка размещается во впадине зуба объемом $f_{\text{вп}}b$ (где $f_{\text{вп}}$ — площадь боковой поверхности впадины, мм^2). Однако впадина зуба никогда полностью не заполняется стружкой.

Коэффициентом заполнения называется отношение

$$\frac{O}{f_{\text{вп}}b} = \beta_{\text{зап}} \quad (8.2)$$

Коэффициент $\beta_{\text{зап}}$ всегда меньше единицы, при форсированных режимах резания $\beta_{\text{зап}} \leq 0,8$.

Отношение $\frac{\alpha_{\text{упл}}}{\beta_{\text{зап}}}$ характеризует напряженность работы впадины зуба пилы:

$$\sigma_{\text{вп}} = \frac{\alpha_{\text{упл}}}{\beta_{\text{зап}}} = \frac{f_{\text{вп}}}{ch} \quad (8.3)$$

Коэффициент $\sigma_{\text{вп}}$ может быть меньше или больше единицы. Чем меньше $\sigma_{\text{вп}}$, тем напряженнее работа зуба пилы. Если стружка во впадине зуба пилы сильно уплотненная (при большой подаче на

резец и высоте пропила), а объем впадины мал, то $\sigma_{\text{вп}} = 0,6-0,8$. Когда впадина имеет достаточную емкость, а подача на резец и высота пропила небольшие, то $\sigma_{\text{вп}} > 1$, т. е. возможно разрыхление стружки.

Для нормальных условий работы пилы (без вибрации и срыва качества) необходимо выполнить условие — объем уплотненной

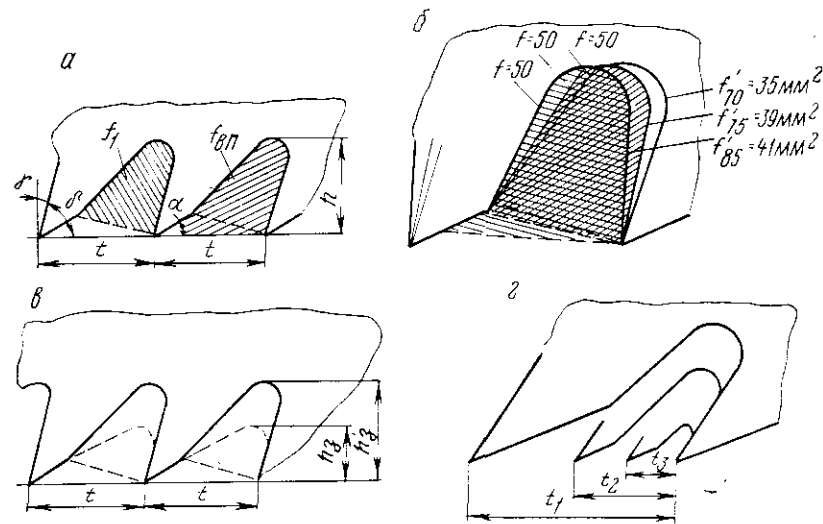


Рис. 8.7. Влияние профилировки зуба и размеров впадины на стружкозаполнение:

a — общая схема; $б$ — заполняемость впадины при разных профилях и $\delta = 70^\circ$, 75° , 85° ; $в$ — оформление впадины без перегиба и с перегибом задней поверхности; $г$ — одинаковые профили при разном шаге

стружки не должен быть больше заполняемого объема впадины зуба, т. е.

$$\alpha_{\text{упл}} bch \leq \beta_{\text{зап}} f_{\text{вп}} b \quad (8.4)$$

Из уравнений (8.3) и (8.4) допустимая подача на резец (обозначим ее c_0) по производительности пилы (вместимости впадины)

$$c_0 = \frac{f_{\text{вп}}}{\sigma_{\text{вп}} h} \quad (8.5)$$

Но в формуле (8.5) одному значению $f_{\text{вп}}$ могут соответствовать разные профили впадины (рис. 8.7, б).

Заменим площадь впадины зуба $f_{\text{вп}}$ равновеликим прямоугольником с основанием t и высотой h'_3 (рис. 8. 8):

$$f_{\text{вп}} = t h'_3 \quad (8.6)$$

Коэффициентом площади впадины (формы зуба) называется отношение

$$\Theta_{\text{вп}} = \frac{h'_3}{t} \quad (8.7)$$

Подставим в формулу (8.6) вместо h'_3 его значение из выражения (8.7):

$$f_{вп} = \Theta_{вп} t^2, \quad (8.8)$$

откуда

$$\Theta_{вп} = \frac{f_{вп}}{t^2}. \quad (8.9)$$

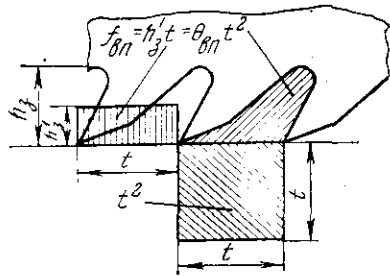


Рис. 8.8. Определение коэффициента формы зуба $\Theta_{вп}$

Из формулы (8.9) и рис. 8.8 видно, что коэффициент $\Theta_{вп}$ показывает, во сколько раз площадь впадины зуба меньше площади квадрата со стороной, равной шагу зуба t . Значение $\Theta_{вп}$ на основании практических данных колеблется от 0,12 до 0,6:

Для рамных пил $\Theta_{вп\lambda} = 0,4 - 0,5$; $\Theta_{вп\Delta} = 0,5$

Для дисковых пил продольной распиловки $\Theta_{вп\lambda} = 0,25 - 0,35$

Для дисковых пил поперечной распиловки $\Theta_{вп} = 0,35 - 0,6$

Для ленточных ребровых пил $\Theta_{вп\Delta} = 0,12 - 0,15$

Для столярных ленточных пил $\Theta_{вп\lambda} = 0,25 - 0,3$

Подставим значение $f_{вп}$ из уравнения (8.8) в формулу (8.5):

$$c_0 = \frac{\Theta_{вп} t^2}{\sigma_{вп} h}. \quad (8.10)$$

Зная, что для лесопильных рам $\Delta = \frac{H}{t}$ с, определяем допустимую посылку по производительности пилы:

$$\Delta_0 = \frac{H f_{вп}}{t \sigma_{вп} h} = \frac{H \Theta_{вп} t}{\sigma_{вп} h}. \quad (8.11)$$

Из формул (8.10) и (8.11) можно найти оптимальный шаг с учетом профиля зуба и емкости впадины:

$$t_0 = \sqrt{\frac{\sigma_{вп} c_0 h}{\Theta_{вп}}} = \sqrt{\frac{\sigma_{вп} h \Delta_0}{H \Theta_{вп}}}. \quad (8.12)$$

При пилении неравномерной высоты пропила (лесопильные рамы) при расчетах c_0 , Δ_0 и t_0 в формулы (8.10) — (8.12) надо подставить максимальную высоту пропила h_{\max} .

Если в формулы (8.10) и (8.11) подставить средние значения $\Theta_{вп}$ и $\sigma_{вп}$, то для расчета можно пользоваться более простыми формулами:

пиление рамными пилами

$$c_0 = \frac{t^2}{2h_{\max}}; \quad (8.13)$$

ленточными пилами *

$$c_0 = \frac{t^2}{(5 - 6) h_{\max}}; \quad (8.14)$$

пиление дисковыми пилами **

$$c_0 = \frac{t^2}{(4 - 5) h_{\max}}. \quad (8.15)$$

ГОСТ 5524—62 предусматривается изготовление унифицированного профиля зубьев рамных пил с ломанно-линейной задней поверхностью. Этот профиль достаточно производителен, устойчив против вибраций, а задняя поверхность зуба, имеющая наклон, удобна для отвода выпадающей стружки.

8.6. Стружкообразование при поперечной распиловке

При закрытом резании (пилении) работа, производимая главными и боковыми кромками резца, различна, так как связь волокон древесины в разных направлениях неодинакова. При поперечной распиловке наблюдается сложное резание, при котором передняя поверхность резца производит поперечный сдвиг волокон, перерезанных в торец боковыми кромками (рис. 8.9 и рис. 8.10, а).

Боковые кромки с углом боковой заточки $\delta_1 < 90^\circ$ работают как лезвие ножа. По мере пиления зубья все глубже и глубже входят в древесину. Испытывая значительное трение, они все сильнее будут зажиматься в прорези.

Скошенная передняя поверхность зуба давит с силой P_3 на среднюю часть древесины, скалывая ее то вправо, то влево вдоль волокон, по мере углубления боковых резцов в древесину, и создает хрупкую стружку, рассыпающуюся в опилки. Поскольку часть дна пропила меньше ширины пропила, то стружка и опилки не сжимаются боковыми стенками пропила, как при продольном пилении.

Для сдвига внутренней части пропила вдоль волокон необходимо, чтобы зуб с косой заточкой значительно внедрился в древесину и образовалось соответствующее боковое давление P_3 со стороны передней поверхности резца.

Опытами установлено, что P_3 достигает значения, достаточного для сдвига древесины от дна пропила, лишь при углублении резца до 0,8 мм. Чем глубже вдавливание зуба, тем больше работа тре-

* Коэффициент 5 принимается при $\delta = 65^\circ$, $\alpha = 20^\circ$; 6 — при $\delta = 60^\circ$, $\alpha = 15^\circ$.

** Коэффициент 4 — при $\delta = 60^\circ$, $\alpha = 15 - 20^\circ$; 5 — при $\delta = 65^\circ$, $\alpha = 15 - 20^\circ$.

ния и, следовательно, тем больше расход мощности на резание. Поэтому целесообразно осуществлять распиловку пилами с комбинированными зубьями. На рис. 8.10, а изображена работа комбинированных зубьев пил: зубья A_1, A_2 с косой заточкой надрезают древесину, зубья B с прямой заточкой, несколько укороченные по сравнению с зубьями A_1 и A_2 , удаляют часть дна пропила, снимая стружку.

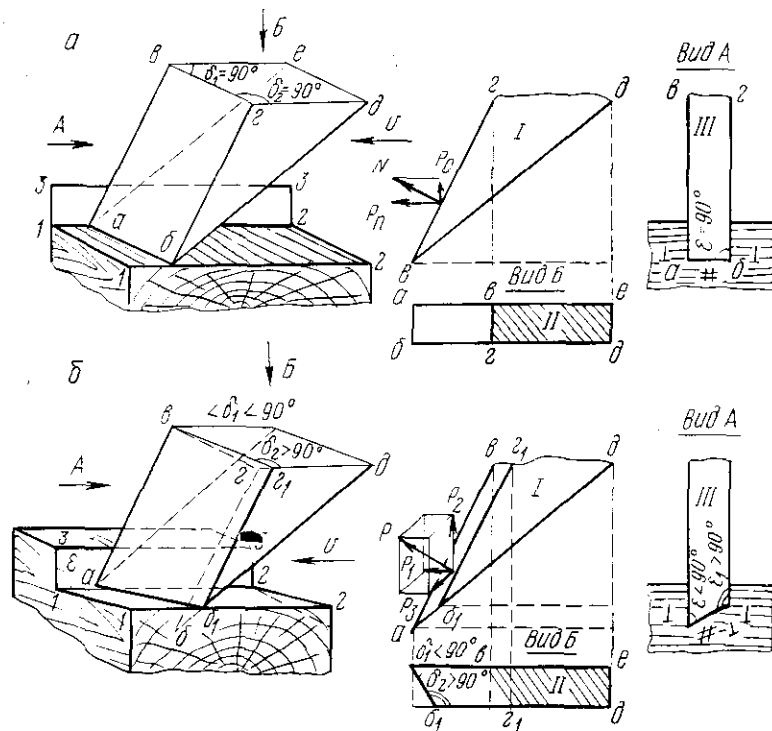


Рис. 8.9. Схема поперечной распиловки:

а — резец с прямой заточкой; б — косая заточка реза; I — вид на резец перпендикулярно к его боковой поверхности, II — то же по стрелке Б; III — то же по стрелке А

В данном случае резание зубом B — поперечное и требует небольших затрат энергии. Зубья B — стружкообразующие (подчищающие), они устраняют боковые сдвиги дна пропила.

Схема образования поперечных сечений стружки при подрезающих и подчищающих зубьях приводится на рис. 8.10, в. При скорости резания $v = \text{const}$ и подаче $u = \text{const}$ траектории вершин зубьев параллельны скорости резания, равной

$$\vec{v}' = \vec{v} + \vec{u}.$$

Древесина подрезается у стенок пропила зубьями 1 и 2. Стружкообразующий зуб 3, укороченный на $2c$, срезает стружку. Следую-

щими подрезающими будут зубья 4 и 5, а стружкообразующим зуб 6, укороченный на $2c$, и т. д. В результате получаются поперечные сечения стружек, заштрихованные на рис. 8.11, в. Их толщина больше c . Основная работа по сему стружки происходит при открытом резании поперек волокон укороченными зубьями. Эта работа требует сравнительно небольших затрат энергии.

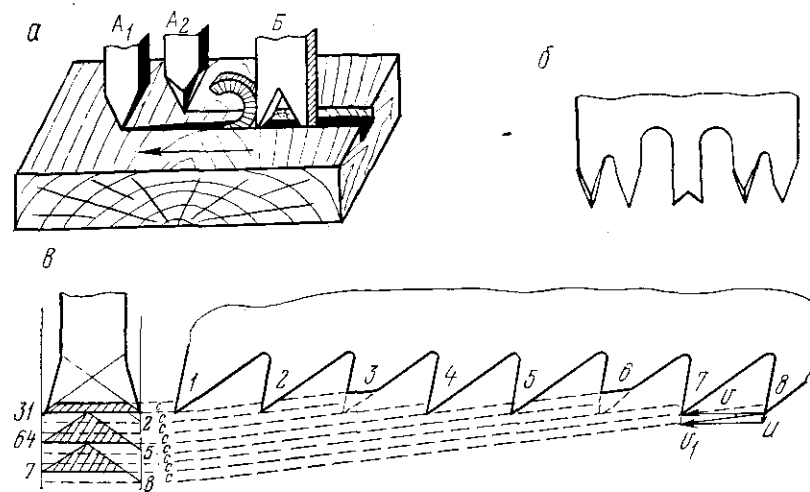


Рис. 8.10. Схема пилы пониженного энергопотребления при поперечной распиловке

Без стружкообразующих зубьев, подчищающих дно пропила, размельчение происходит в значительно большей степени, с большей затратой энергии.

Практика показала неэффективность применения одних треугольных (симметричных) зубьев с косой заточкой. Значительно большая производительность при той же мощности получается при использовании комбинированных зубчатых венцов с подрезающими зубьями (рис. 8.10, б).

Выше отмечалось, что при косо́й заточке подача на зуб должна быть такой величины, чтобы внутренняя кромка с $\delta_2 > 90^\circ$ не соприкасалась с древесиной.

Рассмотрим план пропила на рис. 8.11, а, где при заданной подаче c участвует в работе кромка с углом $\delta > 90^\circ$. Если уменьшить подачу до $aa_1 = s \text{ ctg } \delta_1 = 2c_1$ вместо $AA_1 = 2c$, то кромка с $\delta_2 > 90^\circ$ не будет участвовать в резании. Однако при этом производительность уменьшится в пропорции (рис. 8.11, б):

$$\frac{s \text{ ctg } \delta_1}{2c}.$$

На основании изложенного можно сделать ряд выводов.

1. Если при данных s и δ_1 уменьшить подачу на зуб c_2 по сравнению с $c_1 = \frac{s \operatorname{ctg} \delta_1}{2}$, то произойдет врезание кромки не на всю длину s' (рис. 8.11, в).

2. При поперечном резании в процессе врезания возникают боковые усилия (рис. 8.9, б), нормальные к осевой плоскости резания, скалывающие внутреннюю часть пропила. Значительное углуб-

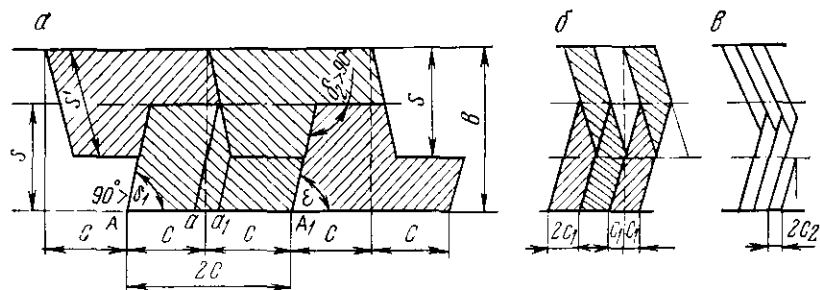


Рис. 8.11. Планы пропила при косой заточке и разной подаче на зубья

ление подрезающих резцов нежелательно, так как при этом увеличивается работа трения древесины о грани резца. Необходимо облегчить работу врезания уменьшением угла заострения боковой кромки до $35\text{--}40^\circ$ вместо $60\text{--}75^\circ$ при симметричном зубе, работающем за счет скалывания вправо и влево внутренней части дна пропила. При этом получается чистое надрезание древесины у стенок пропила.

3. Чтобы уменьшить углубление подрезающих резцов до скалывания элементов, применяется укороченный стружкообразующий прямой зуб, следующий за рядом надрезающих зубьев.

Глава 9

ПИЛЕНИЕ РАМНЫМИ ПИЛАМИ

9.1. Кинематика лесопильных рам

Назначение процесса пиления рамными пилами. На лесопильных рамах производится резание древесины (бревен, брусьев) с разделением ее одновременно на несколько частей — брусья, доски и горбыли. Одновременно с пиломатериалами на потоке можно получать технологическую щепу (стружку) и технологические опилки, пригодные для переработки на целлюлозу и изготовление древесностружечных плит.

Кинематика механизма резания. Лесопильные рамы относятся к типам станков, где главное движение осуществляется центральным (рис. 9.1) или внецентренным (рис. 9.2) кривошипно-шатунным механизмом. Отсчитывая угол поворота α от вертикали, составим уравнения пути S_x , скорости v_x и ускорения a_x для пил в пильной рамке в функции от угла α поворота кривошипа [14]:

$$S_x = \sqrt{(L+R)^2 - l^2} - L \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{e}{L} \mp \frac{R}{L} \sin \alpha \right)^2 \right] - R \sin \alpha; \quad (9.1)$$

$$v_x = R\omega \left(\sin \alpha + \frac{R}{2L} \sin 2\alpha \mp \frac{e}{L} \cos \alpha \right); \quad (9.2)$$

$$a_x = R\omega^2 \left(\cos \alpha + \frac{R}{L} \cos 2\alpha \mp \frac{e}{L} \sin \alpha \right). \quad (9.3)$$

В уравнениях (9.1)–(9.3) верхние знаки (–, –, +) в скобках относятся к механизмам резания с положительным смещением, а нижние (+, +, –) — с отрицательным смещением.

Учитывая, что в вертикальных лесопильных рамах отношение радиусов кривошипа R к длине шатуна h сравнительно большое $\left(\frac{R}{L} = \frac{1}{2} \right)$, для центрального механизма при $e = 0$ приближенно можно принять:

$$S_x = R(1 - \cos \alpha); \quad (9.4)$$

$$v_x = R\omega \sin \alpha; \quad (9.5)$$

$$a_x = R\omega^2 \cos \alpha. \quad (9.6)$$

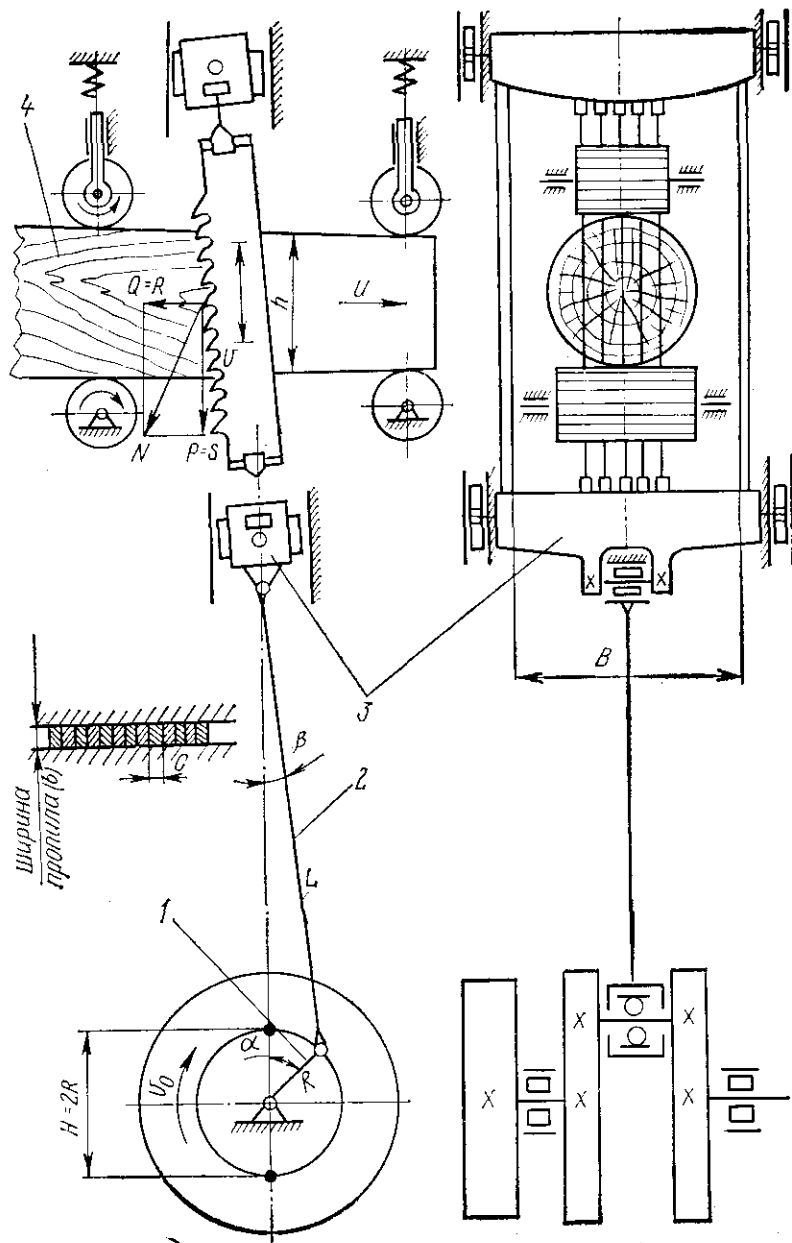


Рис. 9.1. Кинематическая схема лесопильной рамы с центральным кривошипно-шатунным механизмом:

1 — кривошип; 2 — шатун; 3 — нижняя поперечина пильной рамы; 4 — бревно

При расчетах часто пользуются средней скоростью главного движения:

$$v = \frac{2Hn}{60\,000} = \frac{Hn}{30\,000} \text{ м сек.} \quad (9.7)$$

Резание происходит во время рабочего хода — при перемещении пильной рамки из верхней мертвой точки в нижнюю. Обратное дви-

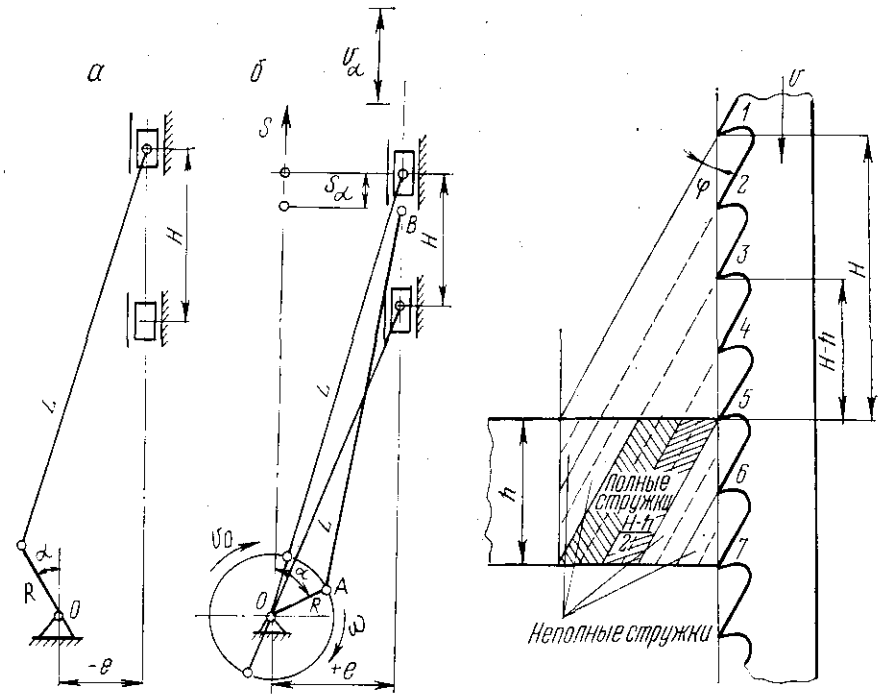


Рис. 9.2. Схема внецентренного кривошипно-шатунного механизма:

а — с отрицательным смещением; б — с положительным смещением пильной рамки

Рис. 9.3. Схема стружкообразования при подаче за рабочий ход

жение (из нижней мертвой точки в верхнюю) соответствует холостому ходу. Из уравнения (9.5) видно, что скорость движения пильной рамки (скорость резания) — переменная: при $\alpha=0$ и $\alpha=180^\circ$ она равна нулю и при $\alpha \approx 90^\circ$ — максимальная.

Движение подачи осуществляется рифлеными вальцами, которые вращаются либо периодически (толчками), либо равномерно в зависимости от конструкции механизма подачи. Толчковую подачу можно осуществить полностью или частично за рабочий или холостой ход.

Скорость подачи

$$u = \frac{czn}{1000} = \frac{cHn}{1000t} = \frac{\Delta n}{1000} \text{ м/мин или } u = \frac{czn}{60\,000} \text{ м/сек.}$$

Подача на один оборот коренного вала (посылка)

$$\Delta = \frac{1000 u}{n} = \frac{Hc}{t} \text{ мм.}$$

При толковой подаче за рабочий ход пилы можно устанавливать вертикально (рис. 9.3). Траектории резания зубьев пилы (наклонные прямые) образуют ступенчатое дно пропила. Во время холостого хода вершины зубьев скользят по наклонным ступенькам дна пропила, отжимая древесину. Посылка $H \operatorname{tg} \varphi = \Delta_{p,x}$ (где φ — кинематический угол отклонения траектории резания от направления главного движения). Тангенс $\operatorname{tg} \varphi = \frac{u}{v}$ зависит от u и может изменяться без перестановки пил. Поэтому в процессе распиловки посылку можно увеличивать или уменьшать.

При подаче за холостой ход вертикальное положение пил недопустимо, так как древесина набегает на тыльную часть зубьев пилы, не приспособленную к резанию. В этом случае пилы устанавливают наклонно (со свесом) (см. рис. 4.3) или специальным устройством отводят пыльную рамку от дна пропила. *Свесом (уклоном) пил* называется проекция линии вершин зубьев (на высоте хода H) на направление подачи, а угол отклонения пил от вертикали — *углом свеса* или *углом жесткой установки пил* $\varphi_{ж}$. Свес, или отклонение пыльной рамки от дна пропила в сторону, противоположную движению подачи, всегда соответствует той части посылки, которая приходится на холостой ход. Например, при подаче за холостой ход $H \operatorname{tg} \varphi_{ж} = \Delta_{x,x} + (1-2) \text{ мм}$. Если свес пил увеличить, то часть рабочего хода произойдет без пиления, с потерей рабочего хода. *Потерей рабочего хода* называется часть пути пыльной рамки, которую проходят пилы из крайнего верхнего положения до встречи с дном пропила. На протяжении этого пути пилы опускаются вниз, не совершая работы.

При непрерывно-равномерной подаче (рис. 9.4) траектория режущей кромки зуба в древесине — кривая (косинусоида), уравнение которой запишется так:

$$x = \frac{\Delta}{2\pi} \arccos \frac{R-y}{R}. \quad (9.8)$$

На часть посылки, подаваемую за холостой ход, необходимо обеспечить свес пил или горизонтальное перемещение пил от дна пропила в сторону, противоположную движению подачи:

$$H \operatorname{tg} \varphi_{ж} = \frac{\Delta}{2} + (1 \div 2) \text{ мм} = \Delta_{x,x} + (1 \div 2) \text{ мм}. \quad (9.9)$$

В крайних положениях пыльной рамки создаются очень неблагоприятные условия резания: в начале и конце рабочего хода в несколько раз увеличивается подача на резец, так как в это время скорость резания минимальна, а древесина подается равномерно. При наклонном положении пил на этих участках траектории резания происходит трансформация резца и скобление дна пропила тыльной

частью зуба пилы. Скобление дна пропила начинается с момента, когда задняя поверхность зуба пилы займет положение, касательное к траектории резания, и продолжается до пересечения траектории нижнего зуба с вышерасположенным. Скобление дна пропила всеми зубьями пилы приводит к отбрасыванию (отбою) древесины на всей высоте пропила. Стружка, подлежащая удалению задней поверхностью зуба, на рис. 9.4 заштрихована.

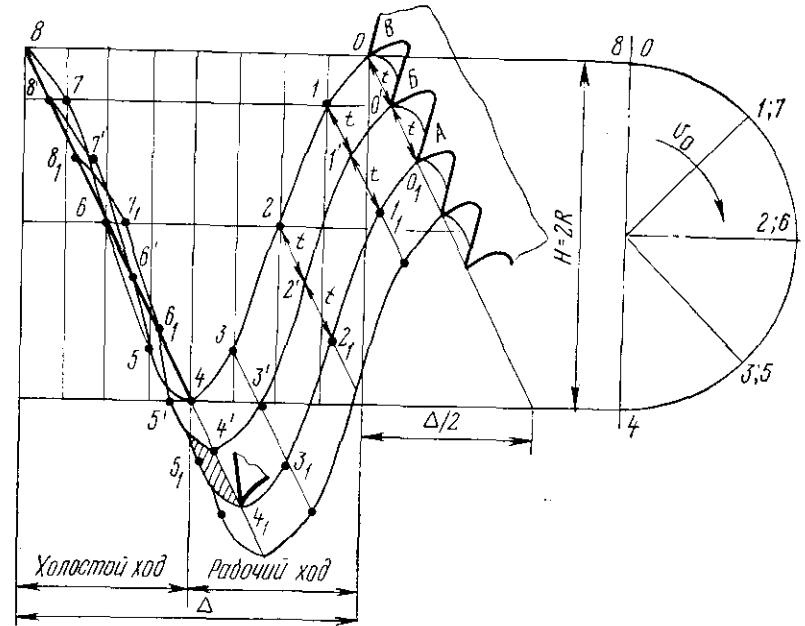


Рис. 9.4. Стружкообразование при непрерывной подаче

Увеличение уклона пил сверх нормы может привести к потере рабочего хода, но не устраняет вдавливания зуба в древесину, не оказывает заметного влияния на продолжительность скобления дна пропила и на величину объема древесины, удаляемой задней поверхностью зуба. На конкретном примере определим размеры стружки для лесопильной рамы с непрерывной подачей.

Пусть дано $\Delta = 40 \text{ мм}$, $R = 300 \text{ мм}$, $t_{\Delta} = 32 \text{ мм}$, угол свеса пил $\varphi = 2^{\circ}$ или $H \operatorname{tg} \varphi_{ж} = \frac{\Delta}{2} + (1-2) = \Delta_{x,x} + (1-2) \text{ мм} = 22 \text{ мм}$, при этом $\cos \varphi \approx 1$.

Средняя подача на зуб

$$c = \frac{\Delta t}{H(1-H')} = \frac{\Delta}{zH} = \frac{40 \cdot 32}{600} \approx 2 \text{ мм,}$$

где H' — коэффициент потери рабочего хода: $H' = 1$.

Максимальная подача на зуб в конце рабочего хода

$$c_{\text{макс}} = \frac{\Delta}{2} \left[\frac{t\xi}{R} + \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{t}{R} \left(2 - \frac{t}{R} \right)} \right] =$$

$$= \frac{40}{2} \left[\frac{32 \cdot 0,55}{300} + \frac{1}{3,14} \sqrt{\frac{32}{300} \left(2 - \frac{32}{300} \right)} \right] = 3,88 \text{ мм},$$

где ξ — отношение линейного уклона к посылке Δ , принимаем

$$\xi = \frac{H \operatorname{tg} \varphi_{\text{ж}}}{\Delta} = 0,55.$$

Максимальная подача на заднюю поверхность зуба во время холостого хода и скобления

$$c_{\text{ск.макс}} = \frac{\Delta}{\pi} \operatorname{arccos} \left(1 - \frac{t \cos \varphi}{R} \right) =$$

$$= \frac{40}{3,14} \operatorname{arccos} \left(1 - \frac{32}{300} \right) \approx 5,8 \text{ мм}.$$

Из расчетов видно, что $c < c_{\text{макс}} < c_{\text{ск.макс}}$.
Продолжительность скобления дна пропила

$$t_{\text{ск}} = \frac{1}{\omega} \operatorname{arccos} \left(1 - \frac{t \cos \varphi}{R} \right) \approx$$

$$\approx \frac{1}{32} \operatorname{arccos} \left(1 - \frac{32}{300} \right) = 0,0136 \text{ сек}.$$

Угол поворота коренного вала, соответствующий времени скобления,

$$\alpha_{\text{ск}} = \omega t_{\text{ск}} = \operatorname{arccos} \left(1 - \frac{32}{300} \right) \approx 26^\circ.$$

На такой угол повернется коренной вал при подаче за холостой ход, когда зуб пилы поднимется на шаг t_{Δ} . При разведенных зубьях $t_{\Delta} = 2t$, т. е. отжим увеличится. Теоретически его принимают равным расчетной подаче $c_{\text{ск.макс}}$. На эту величину необходимо обеспечить горизонтальное перемещение пил. В современных станках это достигается применением механизма поперечного качания пильной рамки.

9.2. Общие сведения для расчета режимов резания

Выбор пилы и расчет средней высоты пропила. Пилы для вертикальных лесопильных рам применяются как с плющеными, так и с разведенными зубьями. Размеры, характеризующие профиль зубьев пил с ломанно-линейной задней поверхностью (рис. 9.5) по ГОСТ 5524—62, даны в табл. 9.1, данные об уширении зубьев пил на сторону — в приложении 15. В условиях производства иногда применяют и другие профили зубьев — с прямой и закругленной задней поверхностью зуба, а также допускаются изменения углов резания

Таблица 9.1

Угловые и линейные параметры зубьев пил

t , мм	h_3 , мм	β°	γ°	l , мм	r , мм	$\rho_{\text{вп}}$	Примечание
18	16	47	15	7	3	0,43	Ширина новых пил $B = 160, 180$ мм, минимальная ширина $B = 80$ мм
22	18	47	15	9	4	0,42	
26	20	47	15	11	5	0,42	
32	22	47	15	14	6	0,42	
40	26	47	15	16	8	0,38	

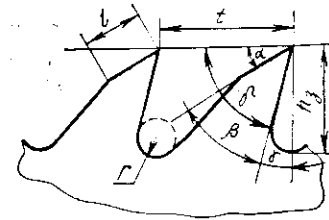


Рис. 9.5. Унифицированный профиль зуба рамной пилы

в сторону уменьшения угла δ при пилении мягких лиственных пород древесины в летнее время и увеличения при пилении твердых пород древесины в зимнее время.

Пилы для тарных лесопильных рам (ГОСТ 10482—63) имеют $t = 15; 22$ мм, толщина их 1,0; 1,2; 1,4 мм, ширина пилы $B = 80$ мм.

Средняя $h_{\text{ср}}$ и максимальная $h_{\text{макс}}$ высоты пропила в зависимости от вида распиловки и вершинного диаметра $d_{\text{в}}$ даны в табл. 9.2 при длине бревна $6—6,5$ м с учетом сбега бревна c_{δ} на половине его длины (табл. 9.3).

Таблица 9.2

Значения $h_{\text{ср}}$ и $h_{\text{макс}}$ в зависимости от вида распиловки и вершинного диаметра $d_{\text{в}}$

Вид распиловки	$h_{\text{ср}}$, мм	$h_{\text{макс}}$, мм
Развал бревна	$0,8(10d_{\text{в}} + c_{\delta})$	$10d_{\text{в}} + c_{\delta}$
бруса	$10h$	$10h$
Брусовка на два бруса при $h \geq 0,75 d_{\text{в}}$	$0,8(10d_{\text{в}} + c_{\delta})$	$10d_{\text{в}} + c_{\delta}$
Брусовка на один брус при $h < 0,5 d_{\text{в}}$	$0,8(10d_{\text{в}} + c_{\delta})$	$\sqrt{(10d_{\text{в}} + c_{\delta})^2 - (10h)^2}$
$h > 0,5 d_{\text{в}}$	$0,65(10d_{\text{в}} + c_{\delta})$	
$h = 0,7 d_{\text{в}}$	$0,55(10d_{\text{в}} + c_{\delta})$	

Рекомендации для выбора шага t_{Δ} , t_{λ} и толщины рамных пил s в зависимости от вида распиловки и высоты пропила приведены в табл. 9.4.

Таблица 9.3

Сбег c_6 бревна				
d_B , см	До 28	30—40	45—52	54
c_6 на половине длины бревна, мм	30	40	50	80

Таблица 9.4

Зависимость t и s от d_B , h и вида распиловки					
t_{λ} , мм	$t_{\Delta} = 1,5 t_{\lambda}$, мм	s , мм	Развал бревна и выпилка двух брусьев d_B , см	Выпилка одного бруса d_B , см	Развал бруса толщиной h , см
18	22	0,8; 2,2	<14	<16	<14
18	26	2; 2,2	<20	<30	<22
22	32	2; 2,5	<32	<42	<36
26	40	2; 2,5	>34	>44	>38

Угол перерезания волокон $\psi = \Theta \approx 90^\circ$, поэтому при пилении плющеными зубьями толщину стружки можно принять равной подаче на резец $e_{\Delta} = c$, а при пилении разведенными зубьями

$$e_{\lambda} = \frac{b}{b_{\lambda}} c, \quad (9.10)$$

где b — ширина пропила: $b = s + 2s'$, мм,
 $b_{\lambda} = s$ — толщина пилы, мм,
 s' — уширение на сторону, мм.

Подача на один оборот коренного вала (посылка)

$$\Delta = \frac{1000 u}{n} = \frac{Hc}{t} \text{ мм.} \quad (9.11)$$

Подача на один оборот Δ , характеризующая производительность лесопильной рамы, зависит от производительности инструмента (вместимости впадины зуба пилы) Δ_0 , жесткости полотна пилы $\Delta_{кр}$, требований к шероховатости поверхности распила Δ_n , использования мощности Δ_N . Все значения Δ_n , Δ_0 , $\Delta_{кр}$, Δ_N определяются по формулам, а за расчетную (искомую) принимается меньшая из них, так как она удовлетворяет всем требованиям.

1. Подача на резец в зависимости от требований к шероховатости поверхности Δ_n берется из приложения 3, а соответствующая ей посылка

$$\Delta_n = \frac{H}{t} c_n. \quad (9.12)$$

Класс шероховатости в зависимости от группы качества определяется по табл. 9.5.

Таблица 9.5

Класс шероховатости				
Группа качества	Класс шероховатости	c_{λ} , мм	c_{Δ} , мм	Примечание
I — тарные дощечки для пищевой промышленности	$\nabla\partial 3$	1,0—1,2	1,5—1,8	Большие значения — для твердых листовых пород
	$\nabla\partial 4$	0,5—0,7	0,7—0,1	
II — пиломатериалы пониженного качества	$\nabla\partial 1$	1,2—1,4	1,7—2,2	Обобщение работ АЛТИ, БТИ, В. Ф. Фонкина
	$\nabla\partial 2$	1,2	1,7—2,0	

2. Формулы для определения посылки по производительности пилы (по вместимости впадины зуба) даны в табл. 9.6.

Таблица 9.6

Формулы для определения Δ_0		
Группа качества	$h_{\max} \leq H - 50$ мм	$h_{\max} > H - 50$ мм
I	$\Delta_0 = \frac{Ht}{2h_{\max}}$	$\Delta_0 = \frac{Ht}{3,6h_{\max}}$
II	$\Delta_0 = \frac{Ht}{1,8h_{\max}}$	—

3. В процессе резания на полотне пилы действуют вертикальные, горизонтальные и боковые силы. Полотно пилы находится в устойчивом состоянии под действием этих сил, пока их величина не достигнет критического значения, при котором оно теряет устойчивость плоской формы изгиба и выкручивается на сторону. Для того чтобы избежать потери устойчивости (по исследованиям канд. техн. наук Г. Ф. Прокофьева, ЦНИИМОД), необходимо соблюдать условие:

$$\Delta_{кр} \leq \frac{HP_{кр}}{2,1Kbh} \text{ мм,} \quad (9.13)$$

где $\Delta_{кр}$ — посылка при условии сохранения жесткости пилы, мм;
 H — ход пильной рамки, мм;
 $P_{кр}$ — критическая сила:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 Q_{нат}}{l_{п}} \left(\frac{B}{12} + \frac{C_{кр}}{Q_{нат} B} \right) \text{ кг;} \quad (9.14)$$

$$Q_{\text{нат}} = sB\sigma \text{ кг},$$

σ — средняя величина нормальных напряжений в поперечном сечении пилы от тыльной кромки до линии впадин, кг/мм^2 .

Для нормальной жесткости $\sigma = 8-12 \text{ кг/мм}^2$:

B — ширина пилы, мм ;

$l_{\text{д}}$ — свободная длина пилы: $l_{\text{д}} = h + H + 50 \text{ мм}$;

$C_{\text{кр}}$ — крутильная жесткость:

$$C_{\text{кр}} = G I_{\text{кр}} \text{ кг/мм}^2;$$

G — модуль упругости при кручении: $G = 8 \cdot 10^3 \text{ кг/мм}^2$;

$I_{\text{кр}}$ — момент инерции при кручении: $I_{\text{кр}} = \frac{Bs^3}{3} \text{ мм}^4$;

K — удельная работа резания, $\text{кг} \cdot \text{м} / \text{см}^3$;

b — ширина пропила, мм ;

h — средняя высота пропила, мм ;

s — толщина пилы, мм .

4. Чтобы определить посылку при полном использовании мощности резания

$$\Delta_N = \frac{H}{t} c_N,$$

надо из основной формулы (7.47), (7.48) определить подачу на резец c_N с учетом особенностей пиления рамными пилами: $\sin \Theta = 1$;

$\frac{u}{v} = \frac{c}{2t}$. Подача на резец при полном использовании мощности резания $c_{N\Delta}$ при пилении плюшевыми зубьями и $e > 0,1 \text{ мм}$

$$c_{N\Delta} = \frac{\frac{2t}{h} P - a_p pb}{kb + \alpha_\Delta h} \text{ мм}, \quad (9.15)$$

При пилении пилами с разведенными зубьями и $e > 0,1 \text{ мм}$

$$c_{N\lambda} = \frac{\frac{2t}{h} P - a_p pb_\lambda}{kb + \alpha_\lambda h} \text{ мм}; \quad (9.16)$$

если $e_p < 0,1 \text{ мм}$, то

$$c_{i\Delta N} = \frac{\frac{2t}{h} P - (a_p - 0,8) pb_\lambda}{(8p + k)b + \alpha_\lambda h} \text{ мм}, \quad (9.17)$$

где P — средняя касательная сила резания за оборот, приходящаяся на одну пилу в поставе:

$$P = \frac{102 N}{iv} \text{ кг};$$

N — мощность резания, квт ;

i — количество пил в поставе;

v — скорость резания, м/сек ;

a_p — коэффициент, учитывающий затупление резца:

$$a_p = 1 + \frac{0,2 \Delta\rho}{\rho_0}; \quad (9.18)$$

$\Delta\rho$ — прирост затупления за время T (мин) работы пил в поставе, мкм ;

ρ_0 — начальный радиус кривизны лезвия: $\rho_0 = 10 \text{ мкм}$.

p — фиктивная удельная сила резания по задней поверхности резца (табл. 9.7), кг/мм ;

$b_\lambda = s$ — длина режущей кромки при пилении плюшевыми зубьями: $b_\lambda = b \text{ мм}$;

k — фиктивное среднее условное давление резания на передней поверхности резца (табл. 9.7), кг/мм^2 ;

α_Δ — коэффициент интенсивности трения, прессования и перемещения стружки во впадине зуба (табл. 9.8): для разведенных зубьев $\alpha_\lambda = 1,25 \alpha_\Delta$, кг/мм^2 .

Для хвойных пород древесины

$$\Delta\rho = \frac{0,002 hnT}{1000}. \quad (9.19)$$

При пилении твердых лиственных пород древесины вместо 0,002 надо брать коэффициент 0,0025.

Таблица 9.7

Значения p и k для разных пород (по данным ЦНИИМОД)

Порода	p , кг/мм	k , кг/мм^2
Сосна, ель, пихта	0,72	3,7
Кедр	0,5	2,4
Лиственница	0,85	4,3
Дуб, бук	1,2	5,2
Береза	1	4,1

Таблица 9.8

Коэффициент α_Δ , кг/мм^2

H , мм	α_Δ при высоте пропила $h_{\text{макс}}$, мм								Примечание
	$h_{\text{макс}} < H - 50$	500	550	600	650	700	800	900	
500	0,02	0,028	0,035	0,04	—	—	—	—	
600	0,02	0,02	0,02	0,025	0,032	0,045	0,05	0,063	$\alpha_\lambda = 1,25\alpha_\Delta$
700	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,025	0,03	0,05	

Силы и мощность резания. Характер изменения сил резания за оборот кривошипа в рамах с непрерывно-постоянной подачей бревна и центральным кривошипно-шатунным механизмом резания во многом определяется кинематикой и технологическими условиями про-

цесса рамного пиления. Решающее значение на изменение сил резания за оборот кривошипа оказывают характер изменения толщины стружки, мгновенной подачи на зуб за время рабочего хода и характер изменения глубины вдавливания зубьев пилы в древесину во время холостого хода. Это наглядно видно из графиков сил резания и подачи (рис. 9.6). График сил резания P имеет два максимума

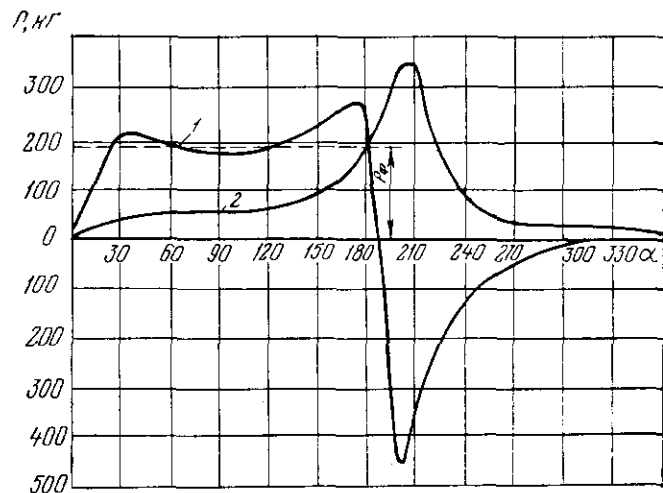


Рис. 9.6. График силы резания (1) и силы подачи (2) в функции угла поворота α коленчатого вала лесопильной рамы с непрерывной подачей (по опытам Е. Кивимаа)

вблизи нижнего и верхнего положения пильной рамки. Сила сопротивления подачи (кривая 2) резко возрастает, превышая по некоторым данным значения вертикальной силы резания в начале холостого хода, когда происходит отжим бревна вследствие скобления зубьев о дно пропила (при $\alpha \approx 200^\circ$).

Для расчетов энергопотребления и режимов резания используется средняя сила резания за оборот кривошипа

$$P = \frac{102 N}{v} = \frac{Kbhv}{v} = \frac{Kbhv}{2t} \text{ кг.} \quad (9.20)$$

Назовем среднюю силу резания за рабочий ход фактической силой резания

$$P_\phi = \frac{Kbhv}{t}, \quad (9.21)$$

где P_ϕ — фактическая сила резания, кг;
 K — среднее условное давление резания:

$$K_i = k + \frac{\alpha_\Delta h}{b} + \frac{a_r p b_\Delta}{bc} \text{ кг/мм}^2; \quad (9.22)$$

$$K_\Delta = k + \frac{\alpha_\Delta h}{b} + \frac{a_r p}{c} \text{ кг/мм}^2. \quad (9.23)$$

Сравнивая зависимости (9.20) и (9.21), видим, что

$$P = 0,5 P_\phi.$$

По опытам канд. техн. наук А. В. Моисеева (БТИ) и других мгновенная сила резания (рис. 9.6) изменяется в течение рабочего хода в пределах 20—30%, а поэтому при динамических расчетах надо применять максимальную силу резания

$$P_{\max} = (1,2-1,3) P_\phi = (2,4-2,6) P.$$

Опытами также установлено, что работа сил резания составляет 80—85% всей работы, затрачиваемой на пиление, остальные 15—20% тратятся на работу резания и трения (скобления) во время холостого хода.

По формуле (9.20) определяется средняя сила резания при решении обратной задачи, когда известна мощность резания. Если мощность резания неизвестна (прямая задача), то по основным формулам (раздел 7.5) определяется сила резания. Средняя сила резания, приходящаяся на один плющенный зуб, при $e \geq 0,1$ мм

$$P_{\Delta \text{зуб}} = a_r p b + c (kb + \alpha_\Delta h) \text{ кг}; \quad (9.24)$$

то же при пилении пилами с разведенными зубьями:

$$P_{\lambda \text{зуб}} = a_r p b_\lambda + c (kb + \alpha_\lambda h) \text{ кг}; \quad (9.25)$$

при $e_\mu \leq 0,1$ мм

$$P_{\lambda \mu \text{зуб}} = (a_r - 0,8) p b_\lambda + c [(8p + k) b + \alpha_\lambda h]^* \text{ кг}. \quad (9.26)$$

Средняя сила резания на одну пилу за полный оборот кривошипа

$$P = \frac{P_{\text{зуб}} h}{2t} \text{ кг}. \quad (9.27)$$

Необходимым условием устойчивой работы пил является

$$P \leq P_{\text{бр.}}$$

Мощность резания на одну пилу

$$N_1 = \frac{Pv}{102} \text{ квт.}$$

Мощность резания на все пилы (i) поставка

$$N = \frac{iPv}{102} = \frac{iKbhv}{102 \cdot 60} \text{ квт.} \quad (9.28)$$

Сила резания по задней поверхности резца одной пилы

$$P_s = (a_r - 0,8) p b_\lambda \frac{h}{2t} \text{ кг}. \quad (9.29)$$

* При пилении плющеными зубьями вместо α_λ будет α_λ и $b_\lambda = b$.

Сила резания по передней поверхности резцов одной пилы

$$P_{\Pi} = P - P_3 \text{ кГ.} \quad (9.30)$$

Радиальная сила резания (для одной пилы)

$$R = 0,5 P_3 a_p^2 - P_{\Pi} \operatorname{tg} (90 - \delta - \varphi_{\text{тр}}). \quad (9.31)$$

Соппротивление подаче

$$Q = R. \quad (9.32)$$

Сила, нормальная к подаче,

$$S = P. \quad (9.33)$$

По опытным данным средняя сила сопротивления подаче за рабочий ход составляет 20—50% соответствующей силы резания (рис. 9.6). Пиковые значения силы подачи в 2—2,5 раза больше средней силы резания за рабочий ход. Эти сведения надо иметь в виду при динамических расчетах механизма подачи. Средняя мощность подачи не превышает 2% мощности резания.

9.3. Расчет режимов резания при пилении рамными пилами

Пример 1. Прямая задача — определить мощность резания при заданном режиме работы.

Дано: распиливается брус $h=200$ мм, порода — сосна, количество пил в поставе $i=10$, $H=600$ мм, $n=300$ об/мин, угол резания $\delta=85^\circ$, начальный радиус кривизны лезвия $\rho_0=10$ мм, время пиления $T=90$ мин, посылку определить из условия, чтобы класс шероховатости соответствовал $\nabla\delta 2$.

Решение. 1. По табл. 9.4 выбираем $t=18$ мм, $s=2,2$ мм, ширина пилы $B=160$ мм, из приложения 15 $s'_x=0,7$ мм, тогда ширина пропила $b=2,2 + 2 \cdot 0,7 = 3,6$ мм.

2. Прирост радиуса кривизны лезвия за время $T=90$ мин $\Delta\rho=0,002 \cdot 0,2 \cdot 300 \times 90 = 10,8$ мм, тогда по формуле

$$a_p = 1 + \frac{0,2 \cdot 10,8}{10} = 1,22.$$

Посылка по вместимости впадины зуба из табл. 9.7

$$\Delta_0 = \frac{600 \cdot 18}{2 \cdot 200} = 27 \text{ мм.}$$

Посылка, необходимая для получения шероховатости распила не ниже $\nabla\delta 2$ и определяемая по формуле (9.12), возможна при $s_n=1$ мм (приложение 3):

$$\Delta_n = \frac{600 \cdot 1}{18} = 33,3 \text{ мм.}$$

Меньшей из этих двух посылок является $\Delta=27$ мм, ее примем в дальнейшем за расчетную. Надо было определить еще и $\Delta_{\text{кр}}$, но условие устойчивой работы пил проверим потом, сравнением силы резания $P < P_{\text{кр}}$.

4. По табл. 9.7 $p=0,72$ кГ/мм, $k=3,7$ кГ/мм², по табл. 9.9 $\alpha_k = 1,25$ $\alpha_{\Delta} = 0,025$ кГ/мм².

5. Определим среднюю силу резания на одну пилу

$$P_{\lambda} = a_p p b_{\lambda} + c (k b + \alpha_k h) \frac{h}{2t} = 1,22 \cdot 0,72 \cdot 2,2 + 0,81 (3,7 \times \\ \times 3,6 + 0,025 \cdot 200) \frac{200}{18} = 176,5 \text{ кГ.}$$

Сила резания всего постава $iP=176,5 \cdot 10=1765$ кГ. Критическая сила, определенная по формуле (9.14), $P_{\text{кр}}=595$ кГ. Условие необходимой жесткости пилы $P < P_{\text{кр}}$ не нарушено: $176,5 < 595$.

6. Мощность резания

$$N = \frac{iPv}{102} = \frac{10 \cdot 176,5 \cdot 6}{102} = 102,6 \text{ квт,}$$

где

$$v = \frac{Hn}{30 \cdot 1000} = \frac{600 \cdot 300}{30 \cdot 1000} = 6 \text{ м/сек.}$$

7. Касательная сила резания по задней поверхности резцов одной пилы

$$P_3 = \frac{(1,22 - 0,8) \cdot 0,72 \cdot 200 \cdot 2,2}{2 \cdot 18} = 3,7 \text{ кГ.}$$

8. Сила резания по передней поверхности резцов

$$P_{\Pi} = 176,5 - 3,7 = 172,8 \text{ кГ.}$$

9. Радиальная сила резания

$$R = 0,5 \times P_3 a_p^2 - P_{\Pi} \operatorname{tg} (90 - \delta - \varphi_{\text{тр}}) = 0,5 \cdot 3,7 \cdot 1,22^2 - 172,8 \times \\ \times (\tan 90^\circ - \tan 85^\circ - \tan 15^\circ) = 2,66 + 162,8 \cdot 0,0875 = 17,8 \text{ кГ,}$$

а для всего постава пил $17,8 \cdot 10 = 178$ кГ.

10. Соппротивление подаче

$$iQ = iR = 178 \text{ кГ,}$$

что составляет около 10% общей силы резания.

Глава 10

ПИЛЕНИЕ ЛЕНТОЧНЫМИ ПИЛАМИ

10.1. Общие сведения

Пиление ленточными пилами происходит при непрерывном равномерном движении пильной ленты и подачи (см. рис. 4.4). Оно подобно процессу резания дисковой пилой при бесконечно большом радиусе ($R = \infty$), когда круговое резание переходит в прямолинейное.

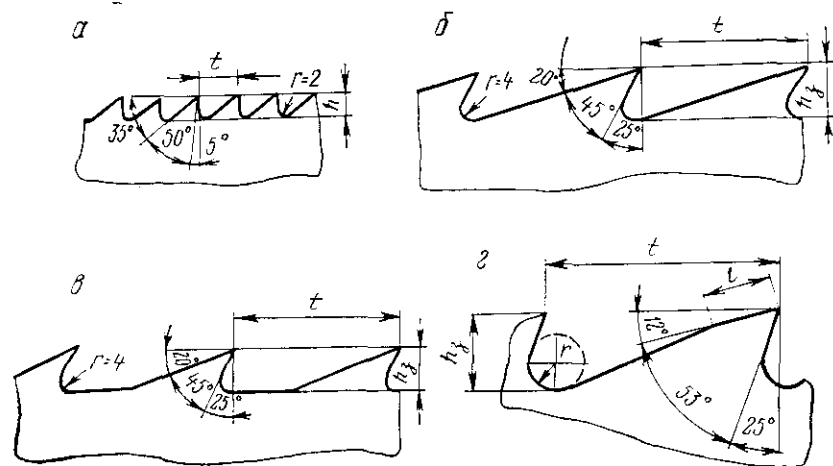


Рис. 10.1. Профиль зубьев ленточных пил:

а — узких (столярных); б, в — средних (делительных); г — широких (бревнопильных)

1. Основные параметры пил (ГОСТ 6532—53) и станков приведены в табл. 10.1—10.3. Пиление ленточными пилами (продольное, поперечное и смешанное) применяется для раскроя тонких и толстых древесных материалов и бревен (рис. 10.1). Узкими (столярными) ленточными пилами выпиливают криволинейные заготовки.

Зубья широких ленточных пил — плющенные, а более узких — разведенные. Для направления ленты над заготовкой и под столом имеются направляющие устройства.

Расстояние между направляющими

$$l_n = h + 100 \text{ мм.}$$

Зазоры между направляющими и лентой рекомендуются 0,15—0,2 мм. Стрела просвета вальцовки при прямом ободе $f_b = 0,2—0,4$ мм, при выпуклом ободе $f_b = 0,3—0,5$ мм.

Выпуклость задней кромки при вальцовке составляет $f_b = 0,3—0,5$ мм на длине 1000 мм. Наклон шкива $10'—15'$.

2. При первом приближении соотношение между силой резания P и критической силой $P_{кр}$, при которой вибрация пил нарушает точность распиловки (с учетом опытов А. Е. Феоктистова, ЦНИИМОД), примем

$$P = \frac{102 N}{v} \leq P_{кр} = \frac{10^5 s^3 (0,82 + 0,002 B_1) (0,95 + 0,01 \sigma)}{L}, \quad (10.1)$$

где s — толщина пилы, мм;

B_1 — ширина пилы до линии впадин зубьев:

$$B_1 = B - h_z, \text{ мм;}$$

B — ширина ленты до линии вершин зубьев, мм;

h_z — высота зуба, мм;

σ — среднее напряжение нормально натянутой пилы, кг/мм²:

для бревнопильных $\sigma = 7—10$;

для делительных $\sigma = 5—6$;

для столярных пил $\sigma = 3—4$.

Ширина и толщина пил

Таблица 10.1

Виды пил	ГОСТ	Ширина B , мм	Толщина s , мм	Шаг t , мм	Примечание
Столярные	6532—53	10—100	0,6—0,9	6—12	По А. Э. Грубе
Делительные	6532—53	50—175	1,0—1,2	30—50	Общая формула
Пилы для бревен и брусьев	10670—63	230—350	1,4—2,2	50—80	$s \leq (0,001) D$

Таблица 10.2

Примерные данные о диаметрах шкивов D , максимальной высоте пропила h и расстоянии между центрами шкивов L

Виды пил	D , мм	h , мм	L , мм
Столярные	400—1000	100—500	1400
Делительные	1250—1900	400—900	1800—2000
Пилы для бревен и брусьев	1525—2400	300—1500	2730—3450

Потребная мощность резания

$$N = \frac{Pv}{102} \leq \frac{P_{кр}v}{102};$$

Угловые значения зубьев пил

Профиль зуба	Угол резания, град				Примечание
	γ	β	α	δ	
Пилы для бревен и брусьев	25	53	12	65	ГОСТ 10670—63
Делительные					ГОСТ 6532—53
Зуб с прямой впадиной	25—15	45—55	20	65—75	Для твердых пород и мерзлой древесины
Зуб с прямой задней поверхностью	30	45	15	60	Для хвойных пород ГОСТ 6532—53
Столярные пилы	5	50	35	85	Для хвойных и твердых пород ГОСТ 6532—53

$$N = \eta_{\text{пр}} N_{\text{пр}},$$

где $\eta_{\text{пр}} = 0,8 - 0,85$.

Факторы, ограничивающие среднюю скорость подачи, определяют по формуле

$$u = 60 v \frac{c}{t}.$$

Значение v ограничивается центробежной силой (35—50 м/сек).

Увеличение D позволяет применять более толстые пилы и уменьшить блуждание пил при более высокой производительности. Это перекрывает потери древесины от уширения пропила, равного

$$b = s + 2s',$$

где $s' = 0,4 - 0,7$ мм.

Подача на зуб $c = c_n$ ограничивается требованиями шероховатости поверхности распила (приложение 4).

Подача на резец по производительности пилы (емкости впадины) при $\delta = 60^\circ$ и $\alpha = 15^\circ$, а при $\delta = 60^\circ$ и $\alpha = 20^\circ$

$$c_0 = \frac{t^2}{6h_{\text{макс}}}; \quad c_0 = \frac{t^2}{5h_{\text{макс}}}. \quad (10.2)$$

4. Так как у делительных пил для распиловки бревен зубья плющенные, угол встречи $\Theta = 90^\circ$, то из формулы (4.47) подача на резец при полном использовании мощности

$$c_N = \frac{P_{\text{зуб}} - a_c pb}{kb + \alpha_{\Delta} h}, \quad (10.3)$$

где

$$P_{\text{зуб}} = \frac{P}{ht} = \frac{102 Nt}{\sigma h}. \quad (10.4)$$

5. По формуле (7.37) фиктивная средняя сила резания задней поверхности резца p (кг/мм): для сосны $p = 0,72$; для березы $p = 0,81$ и для дуба $p = 0,91$.

6. По формулам (7.38 а, б, в) фиктивное среднее условное давление на сечение стружки k (кг/мм²):

для сосны

$$k = 0,056\delta + 0,02v - 2 *;$$

для березы

$$k = 0,07\delta + 0,024v - 2,32 *;$$

для дуба

$$k = 0,082\delta + 0,027v - 2,56 *.$$

7. Коэффициент, учитывающий затупление резца,

$$a_p = 1 + \frac{0,2 \Delta\rho}{\rho_0}, \quad (10.5)$$

где

$$\text{для сосны } \Delta\rho = 0,001 \frac{hnT}{\left(1 + 2 \frac{L}{\pi D}\right) 1000}; \quad (10.6)$$

$$\text{для дуба } \Delta\rho = 0,0013 \frac{hnT}{\left(1 + 2 \frac{L}{\pi D}\right) 1000}. \quad (10.7)$$

8. Ширина пропила $b = s + 2s'$.

9. Значение $\alpha_{\Delta} = 0,02$ кг/мм² (приложение 10).

10. Сила резания

$$P_{\text{зуб}} = a_c pb + c (kb + \alpha_{\Delta} h); \quad (10.8)$$

$$P_{\mu \text{ зуб}} = (a_p - 0,8) pb + c [(8p + k) b + \alpha_{\Delta} h]. \quad (10.9)$$

11. Средняя касательная сила резания за оборот

$$P = P_{\text{зуб}} \frac{h}{t}.$$

12. Касательная сила резания по задней поверхности резца

$$P_3 = \frac{(a_p - 0,8) pbh}{t}. \quad (10.10)$$

13. Касательная сила резания по передней поверхности резца

$$P_n = P - P_3. \quad (10.11)$$

14. Радиальная сила

$$R = 0,5 P_3 a_p^2 - P_n \operatorname{tg} (90 - \delta - \varphi_{\text{тр}}). \quad (10.12)$$

* При $v < 50$ м/сек вместо v надо брать $90 - v$.

15. Сопротивление подаче

$$Q = R. \quad (10.13)$$

16. Сила, нормальная к подаче,

$$S = P. \quad (10.14)$$

10.2. Расчет режимов резания

Пример 1. Дано: диаметр пильного шкива делительного станка $D = 1400$ мм, число оборотов $n = 500$ об/мин; ширина ленты $B = 140$ мм, толщина ленты $s = 1.2$ мм, развод зубьев $s' = 0.4$ мм, ширина пропила $b = 2$ мм, $\delta = 60^\circ$, $\beta = 40^\circ$, $t = 40$ мм, $N_{пр} = 45$ кВт, $\eta_{пр} = 0.8$, расстояние между центрами шкивов $L = 2000$ мм. Зубья — плоские. Время работы $T = 4$ ч. Коэффициент использования станка 0,5. Высота пропила $h = 400$ мм, порода древесины — сосна.

Определить скорость подачи u , $\nabla\delta$ и все силовые параметры.

Решение. 1. Мощность на резание $N = 0.8 \cdot 45 = 36$ кВт.

2. Угол $\Theta = 90^\circ$ при ленточном пиленнии.

3. Приращение затупления

$$\Delta\rho = 0,001 \frac{hnT}{1 + 2 \frac{L}{\pi D}} 0,5 = 0,001 \cdot 0,4 \frac{500}{2} 240 \cdot 0,5 \approx 12 \text{ мкм},$$

где

$$1 + 2 \frac{L}{\pi D} = 1 + \frac{2 \cdot 2000}{3,14 \cdot 1400} \approx 2 \text{ оборота.}$$

4. Условно примем, что $\rho_0 = 10$ мкм.

5. Коэффициент затупления реза

$$a_f = 1 + \frac{0,2 \Delta\rho}{\rho_0} = 1 + \frac{0,2 \cdot 12}{10} = 1,24.$$

6. По формуле (7.37) фиктивная средняя сила резания по **задней поверхности** реза

$$p = 0,4 + 0,0036 \cdot 90 = 0,72 \text{ кг/мм}.$$

7. По формуле (7.38 а)

$$k = (0,2 + 0,0004 \cdot 90) 60^\circ + (0,007 + 0,00015 \cdot 90) (90 - 37) - (0,55 + 0,015 \cdot 90) = 2,54 \text{ кг/мм}^2.$$

Так как $v = 37$ м/сек ≤ 50 м/сек, берем не v , а $(90 - v)$.

8. Сила резания: средняя

$$P = \frac{102 N}{v} = \frac{102 \cdot 36}{37} = 99,25 \text{ кг};$$

на один зуб

$$P_{зуб} = P \frac{t}{h} = 99,25 \frac{40}{400} = 9,93 \text{ кг}.$$

9. Рассчитываем допустимую подачу на зуб при полном использовании мощности:

$$c_N = \frac{P_{зуб} - a_f p b}{k b + \alpha_\Delta h} = \frac{9,93 - 1,24 \cdot 0,72 \cdot 2}{2,54 \cdot 2 + 0,02 \cdot 400} = 0,67 \text{ мм}.$$

10. Определим подачу на резец, необходимую для получения заданного класса $\nabla\delta$ шероховатости поверхности. По приложению 4 $c_N = 0,6 - 1,0$ мм.

11. Подача на резец по производительности пилы (по вместимости впадины зуба)

$$c_0 = \frac{t^2}{6h} = \frac{1600}{6 \cdot 400} = 0,66 \text{ мм}.$$

12. Надо касательную силу резания P сопоставить с допустимой критической силой $P_{кр}$ по формуле (10.1)

$$P_{кр} = \frac{10 s^3 (0,82 + 0,002 B_1) (0,95 + 0,01 \sigma)}{L}.$$

Примем $\sigma = 6$ кг/мм². Тогда $P_{кр} = 95$ кг, т. е. $P > P_{кр}$, что недопустимо.

13. Определим подачу на резец по критической силе

$$P_{зуб.кр} = P_{кр} \frac{t}{h} = 95 \frac{40}{400} = 9,5 \text{ кг};$$

$$c_{кр} = \frac{P_{зуб.кр} - a_f p b}{k b + \alpha_\Delta h} = \frac{9,5 - 1,24 \cdot 0,72 \cdot 2}{2,54 \cdot 2 + 0,02 \cdot 400} = 0,59 \text{ мм}.$$

14. Сопоставляя найденные значения подачи на резец

$$c_N = 0,67; c_0 = 0,6 - 1,0; c_h = 0,66; c_{кр} = 0,59 \text{ мм},$$

выбираем меньшее из них $c = 0,59$ мм. Это и будет искомое значение.

15. Скорость подачи

$$u = \frac{c}{t} 60 = \frac{0,59}{40} 36,6 \cdot 60 = 32,4 \text{ м/мин}.$$

16. Сила резания: по задней поверхности реза

$$P_3 = (a_f - 0,8) p b \frac{h}{t} = (1,24 - 0,8) 0,72 \cdot 2 \frac{400}{40} = 6,34 \text{ кг};$$

по передней поверхности реза

$$P_n = P - P_3 = 95 - 6,34 = 88,66 \text{ кг}.$$

17. Радиальная сила

$$R = 9,5 P_3 a_f^2 - P_n \text{tg}(90 - \delta - \varphi_{тр}) = 0,5 \cdot 6,34 \cdot 1,24^2 - 88,66 \times \times \text{tg}(90 - 60 - 15) = -22,92 \text{ кг}, \text{ т. е. заготовка прижимается к столу.}$$

18. Сила сопротивления подаче

$$Q = R = -22,92 \text{ кг}.$$

19. Сила, нормальная к подаче, $S = P = 95$ кг.

20. Сила сопротивления подаче с учетом сил трения

$$eQ = Q + fS = -22,92 + 0,3 \cdot 95 = 5,58 \text{ кг}.$$

Значение f берется в зависимости от вида механизма подачи, $f = 0.3$ соответствует перемещению заготовки по столу (дерево по металлу).

Пример 2. Требуется построить график скоростей подачи для ленточно-пильного станка при $N_{пр} = 38$ кВт, $\eta_{пр} = 0,8$, $D = 1400$ мм, $s = 0,001 D = 1,4$ мм, $T = 120$ мин времени пиления, $b = 2,2$ мм, $n = 500$ об/мин, $t = 50$ мм, $B = 110$ мм, $L = 2000$ мм, $\delta = 60^\circ$, $\sigma = 6$ кг/мм²; $\rho_0 = 10$ мкм, $v = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000} = 36,6$ м/сек. Породы — сосна.

Решение. 1. По формуле (7.38 а) определяем $k = 2,54$ кг/мм² и по формуле (7.37) $p = 0,72$ кг/мм.

2. Сила резания

$$P = \frac{102 N}{v} = \frac{102 \cdot 38 \cdot 0,8}{36,6} = 84,72 \text{ кг}.$$

Расчет графика скорости подачи при высотах пропила $h=100; 200; 300; 400$ мм дается в табл. 10.4.

Таблица 10.4

Результаты расчета

Расчетная величина	Размерность	Высота пропила h , мм			
		100	200	300	400
$P_{зуб} = P \frac{t}{h} = \frac{4236}{h}$	кГ	42,36	21,18	14,12	10,59
k по формуле (7.38a)	кГ/мм ²	2,54	2,54	2,54	2,54
ρ по формуле (7.37)	кГ/мм	0,72	0,72	0,72	0,72
$\Delta\rho = \frac{ghnT}{1 + 2 \frac{L}{\pi D}} = 0,066$	мкм	6,6	13,2	19,8	26,4
$a_\rho = 1 + \frac{0,2 \Delta\rho}{\rho_0}$		1,13	1,26	1,40	1,53
$c_{\Delta N} = \frac{P_{зуб} - a_\rho \rho b}{kb + \alpha_\Delta h} = \frac{\frac{4236}{h} - 1,58}{5,6 + 0,02 h}$	мм	5,35	2,05	1,03	0,60
$u_N = \frac{60vc}{t} = 54,5$	м/мин	291	111,7	56,1	32,7
$u_0 = \frac{\pi D n t}{6000 h} = \frac{183,16}{h}$	м/мин	183	91,5	61,0	45,8

Из табл. 10.4 видно, что при $h \leq 200$ мм $u_N > u_0$, поэтому расчетной величиной надо считать меньшее значение $u_0 = 183$ и $91,5$ м/мин. При $h \geq 200$ мм надо принимать $u_N < u_0$ (рис. 10.2).

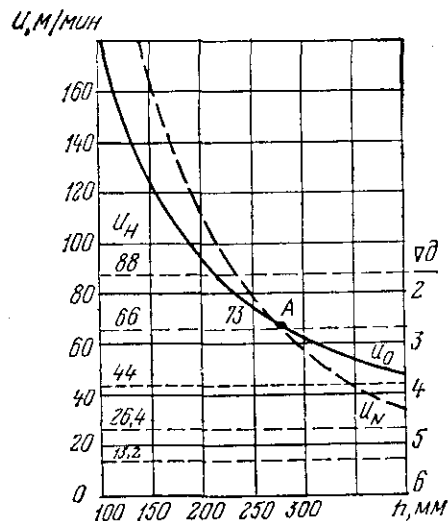


Рис. 10.2. График скоростей подачи ленточнопильного станка

3. Среднюю силу резания проверим по критической

$$P_{кр} = \frac{10^5 \cdot 1,4^3 (0,82 + 0,002 B_1) (0,95 + 0,01 \sigma)}{2000} = 144 \text{ кГ.}$$

Так как $P = 84,7 < P_{кр} = 144$ кГ, то условие жесткости пилы сохраняется при всех подачах при полном использовании мощности.

4. По данным табл. 10.4 строится график скоростей подачи в осях координат u , м/мин, h , мм (рис. 10.2). По кривой u_N можно определить для любой высоты пропила скорость подачи при полном использовании мощности. Например, при $h = 250$ мм $u = 73$ м/мин.

Кривая u_0 показывает возможную скорость подачи по производительности пилы (вместимости впадины зуба). Кривые u_N и u_0 пересекаются в точке А с координатами $h = 270$ мм, $u = 68$ м/мин. Так как за расчетную скорость подачи принимается меньшее значение, то рекомендуемые скорости подачи для высот пропила $h < 270$ мм берутся по кривой u_0 , а при $h > 270$ мм — по кривой u_N .

На рис. 10.2 горизонталями разделены границы класса шероховатости поверхности распила. Расчет скорости подачи u_N выполнен по данным приложения 4 и формуле (4.12). При заданном $\nabla\theta$ скорость подачи u_N следующая:

	$\Delta\theta$	$\Delta\theta 6$	$\Delta\theta 5$	$\Delta\theta 4$	$\Delta\theta 3$	$\Delta\theta 2$
c_N , мм		0,3	0,6	1	1,5	2
u_N , м/мин		13,2	26,4	44	66	88

Например, $h = 250$ мм и $u = 62$ м/мин; этому условию соответствует $\nabla\theta 3$. Если при $h = 250$ мм надо получить $\nabla\theta 4$, то скорость подачи следует снизить до $u = 44$ м/мин и т. д. Если $h = 150$, то при $u > 88$ м/мин класс шероховатости будет $\nabla\theta 1$ и т. д.

ПИЛЕНИЕ ДИСКОВЫМИ ПИЛАМИ

11.1. Общие сведения

Классификация и назначение процесса пиления дисковыми пилами. Процесс резания дисковыми пилами применяется при распиловке древесины (бревен, брусков, досок) и древесных материалов. В зависимости от направления волокон в древесине различают пиление — продольное, поперечное и под углом к волокнам. При продольном пилении производится раскрой заготовок по толщине или ширине, а при поперечном — по длине.

Главное движение — равномерное вращательное движение пильного диска. Движение подачи — поступательное обрабатываемого материала или пилы. Направление подачи может быть попутное — по направлению вектора главного движения (рис. 11.1, а, в) или встречное (рис. 11.1, б, г). По конструктивным особенностям круглопильные станки весьма многообразны: однопильные и многопильные; с расположением пильного вала под столом (заготовкой) (рис. 11.1, а, б) или над ним (рис. 11.1, в, г); с вальцевой, конвейерной, дисковой и другими видами механизма подачи.

По форме диска в поперечном сечении дисковые пилы бывают трёх типов: плоские, конические и с поднутрением боковых поверхностей (рис. 11.2).

Пиление пилами с плоским диском. Пилы с плоским диском (рис. 11.2, а) бывают цельные или со вставными зубьями и служат для продольной или поперечной распиловки. Профили зубьев пил с плоским диском для распиловки древесины даны на рис. 11.2, е, а значения угловых параметров в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Углы резания зубьев пил с плоским диском (ГОСТ 980—69), град

Номер профиля	γ	β	α	δ
<i>Пилы для продольной распиловки</i>				
I	35	40	15	55
II	20	40	30	70
<i>Пилы для поперечной распиловки</i>				
III	0	40	50	90
IV	-25	50	60	115

Для пил продольной распиловки большие углы резания применяются при пилении твердых пород древесины.

С целью уширения пропила зубья пил разводятся или плющатся. Уширение зубьев пил на одну сторону даны в приложении 15.

Пиление пилами с поднутрением боковых поверхностей (строгальными). Пилы дисковые с поднутрением боковых поверхностей (рис. 11.2, д) цельные и с пластинками из твердого сплава приме-

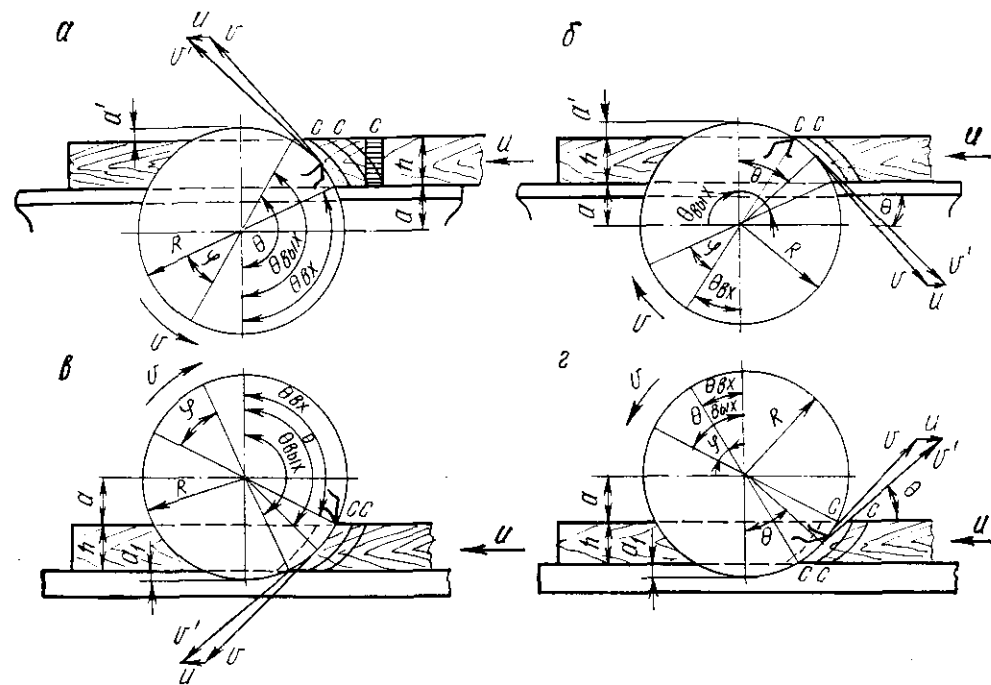


Рис. 11.1. Кинематика пиления на круглопильных станках

няются для пиления древесины вдоль, поперек и под углом к волокнам, а также для обработки древесных материалов. Диск строгальной пилы имеет боковое поднутрение под углом $20'—30'$, идущее от периферии к центру. Поднутрение производят на точных шлифовальных станках и в дальнейшем зубья не разводят и не плющат, благодаря чему точность уширения пропила значительно выше, чем у плющенных или разведенных зубьев, а гладкая чистая поверхность распила равноценна строганой. При продольной распиловке делается профиль II, при поперечной распиловке — профиль IV (табл. 11.1).

Пилы дисковые дереворежущие с пластинками из твердого сплава (ГОСТ 9789—69) делают трех типов:

I — для продольной распиловки древесностружечных и столярных плит, фанеры, фанерованных щитов, щитов, облицованных волокнистой плитой, листовыми пластинками, и клееной древесины;

II — для продольной распиловки цельной и клееной древесины, волокнистых плит и слоеных пластиков;

III — для распиловки фанерованных щитов поперек волокон при высоких требованиях к качеству обработки.

Режущие пластинки зубьев пил изготавливаются из твердого сплава марки ВК15 или ВК6.

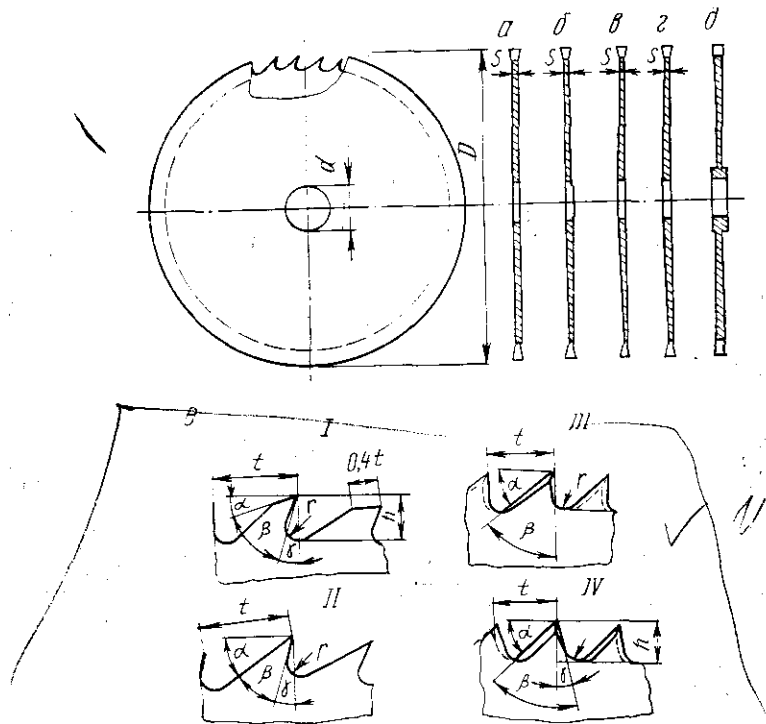


Рис. 11.2. Дисковые пилы:

a — пила с плоским диском; б — правоконическая; в — левоконическая; г — двухконическая; д — с поднутрением; e — профили зубьев дисковых пил: I, II — для продольной распиловки; III, IV — для поперечной распиловки

Угловые параметры пил с пластинками из твердого сплава даны в табл. 11.2.

Скорость резания допускается в пределах 35—50 м/сек, при больших v нарушается плоскостность пропила. Рекомендуемые скорости подачи приведены в табл. 11.3.

Пиление пилами с коническим диском. Конические пилы применяют для продольной распиловки. Они бывают односторонние (правые и левые) и двусторонние (рис. 11.2, б, в, г). Односторонние применяют при делении заготовок на неравные части по толщине для отпиливания тонких дощечек (толщиной до 12 мм), например тарных, а двусторонние, кроме того, — при делении брусков (досок) пополам.

Таблица 11.2

Угловые параметры зубьев пил с пластинками из твердого сплава, град

Тип пилы	Углы резания, град				
	передний γ	задний α	заострения β	углы косой заточки	
				передней поверхности β_1	задней поверхности β_2
I	0; 10	15	75; 65	75; 65	75
II	10; 20	15	65; 55	90	90
III	10; 20	15	65; 55	60	90

Таблица 11.3

Рекомендуемые скорости подачи при работе строгальными пилами, м/мин

Высота пропила h, мм	Пиление					
	продольное		поперечное		смешанное	
	древесина					
	мягкая	твердая	мягкая	твердая	мягкая	твердая
10	16—36	10—20	4—12	4—10	6	5
30	15—25	8—15	4—10	4—8	6	5
50	10—18	6—10	4—10	4—8	6	5
80	8—13	5—9	4—8	4—5	4	3
100	6—10	4—7	4—8	3—5	3	3

Размеры односторонних конических пил, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 11.4.

Таблица 11.4

Размеры односторонних конических пил

Место измерения	Толщина диска при диаметре пилы, мм				Диаметр плоской части D, мм	Число зубьев z
	500	630	710	800		
У зубьев s	1	1,2	1,4	1,4	—	100
В центре пилы	3,4	3,8	4,4	4,4	150	—

Развод зубьев при распиловке сухой хвойной древесины на плоскую сторону $s' = 0,3$ мм, на коническую $s' = 0,4$ мм, а для сырых материалов соответственно 0,4 и 0,5 мм.

Профиль зубьев конических пил такой же, как и у пил с плоским диском (рис. 11.2, e, профили I и II). Углы резания: $\alpha = 25^\circ$, $\beta = 40^\circ$, $\gamma = 25^\circ$, $\delta = 65^\circ$.

Рекомендуемые скорости подачи при работе коническими пилами в зависимости от высоты пропила и толщины дощечки приведены в табл. 11.5.

Таблица 11.5

Скорости подачи при работе коническими пилами

Высота пропила h , мм	Толщина дощечки B , мм	Скорость подачи u , м/мин	Высота пропила h , мм	Толщина дощечки B , мм	Скорость подачи u , м/мин
100	6—10	≤ 60	140	6—10	≤ 40
100	11—19	≤ 55	140	11—19	≤ 25
120	6—13	≤ 55	160	6—10	≤ 25
120	14—19	≤ 40	160	11—12	≤ 20

Минимальный диаметр пилы в зависимости от размера распиливаемого материала и конструкции станка продольной распиловки определяется по формулам:

1) при нижнем расположении пыльного вала

$$D_{\text{мин}} = 2(h + a + a_1), \quad (11.1)$$

где h — высота пропила, мм;

a — подъем стола над центром пыльного вала, мм;

a_1 — величина выхода пилы из пропила:

$$a_1 \approx \sqrt{D_{\text{мин}}} \text{ мм};$$

2) при верхнем расположении вала

$$D_{\text{мин}} = 2(h + r_{\text{ш}} + a_1), \quad (11.2)$$

где $r_{\text{ш}}$ — радиус зажимной шайбы, мм.

Диаметр зажимной шайбы

$$D_{\text{ш}} = 5 \sqrt{D}.$$

Толщина пилы определяется из соотношения

$$s = (0,08 - 0,15) \sqrt{D} \quad (11.3)$$

и окончательно выбирается по ГОСТ 980—69.

Выбор пил по числу зубьев зависит от требований к шероховатости поверхности распила. С увеличением числа зубьев уменьшается подача на резец и повышается точность обработки и класс шероховатости поверхности.

В тех случаях, когда к шероховатости поверхности не предъявляются большие требования, особенно на станках с ручной подачей, следует работать пилой с меньшим числом зубьев.

Число зубьев определяется по формуле

$$z = \frac{1000 u}{c \pi}.$$

В приложении 5 приведены средние опытные данные класса шероховатости поверхности при продольной распиловке дисковыми пилами.

Зубья пил для продольной распиловки целесообразно плющить, так как плющение улучшает поверхность распиловки. При плющении можно увеличить шаг

$$t_{\Delta} = (1,25 - 1,5) t_s,$$

т. е. по ГОСТ 980—69 вместо $z=60$ брать $z=48$ или 36, а вместо $z=48 - z=36$.

Подача на резец по требованиям к шероховатости поверхности c_n зависит от подачи на резец c , угла встречи Θ и способа подготовки зубчатого венца разводом, плющением или поднутрением полотна пил (строгальные пилы).

Подача на резец по производительности инструмента (по вместимости впадины зуба пилы) определяется по формуле:

$$c_0 = \frac{t^2}{4h} \text{ мм при } \delta = 55^\circ; \quad (11.4)$$

$$c_0 = \frac{t^2}{5h} \text{ мм при } \delta = 60^\circ. \quad (11.5)$$

Шаг по производительности пилы (по вместимости впадины)

$$t_0 = \sqrt{4c_0 h} \text{ при } \delta = 55^\circ;$$

$$t_0 = \sqrt{5c_0 h} \text{ при } \delta = 60^\circ$$

Подачу на резец при полном использовании мощности резания определяют по формуле (7.47).

11.2. Продольное пиление дисковыми пилами

Кинематика пиления дисковыми пилами. Оптимальные режимы резания на круглопильных станках должны обеспечить высокую производительность, безопасность в работе, необходимую точность и класс шероховатости поверхности обработки при наименьших затратах древесины, труда и энергопотреблении.

Траектория относительного движения главной режущей кромки зуба пилы в древесине описывается уравнением укороченной циклоиды (4.3). Основные кинематические зависимости и расчетные формулы даны в гл. 4. Здесь дополнительно определим кинематический угол встречи при работе на станках с верхним расположением пыльного вала и на станках, работающих с полутной подачей.

При встречной подаче для станков с верхним расположением пыльного вала (рис. 11.1, з):

угол входа реза в древесину

$$\Theta_{\text{вх}} = \arccos \frac{a + h}{R} = \arccos \frac{R - a_1}{R} \text{ град}, \quad (11.6)$$

где a_1 — высота сегмента пилы, выступающая из пропила:

$$a_1 = 3-5 \text{ мм};$$

угол выхода реза из древесины

$$\Theta_{\text{вых}} = \arccos \frac{a}{R} = \arccos \frac{R - (h + a_1)}{R} \text{ град}; \quad (11.7)$$

угол контакта реза с древесиной

$$\varphi = \Theta_{\text{вых}} - \Theta_{\text{вх}} \text{ град};$$

длина пути контакта

$$l = 0,0175R\varphi = 0,0175R(\Theta_{\text{вых}} - \Theta_{\text{вх}}); \quad (11.8)$$

средняя толщина стружки

$$e = \frac{57ch}{R\varphi} = \frac{57ch}{R \left[\arccos \frac{R - (h + a_1)}{R} - \arccos \frac{R - a_1}{R} \right]} \text{ мм}. \quad (11.9)$$

Так как $e = c \sin \Theta$, то средний кинематический угол встречи

$$\Theta = \arcsin \frac{57h}{R \left[\arccos \frac{R - (h + a_1)}{R} - \arccos \frac{R - a_1}{R} \right]} \text{ град} \quad (11.10)$$

или приближенно

$$\Theta = \arccos \frac{2a + h}{D} \text{ град}.$$

При попутной подаче для станков с верхним расположением пильного вала (рис. 11.1, в):

угол входа реза в древесину

$$\Theta_{\text{вх}} = \arcsin \frac{a}{R} = \arcsin \frac{R - (h + a_1)}{R};$$

угол выхода реза из древесины

$$\Theta_{\text{вых}} = \arcsin \frac{a + h}{R} = \arcsin \frac{R - a_1}{R}.$$

Так же рассчитываются углы встречи для станков с нижним расположением пильного вала, но при попутной подаче (рис. 11, а):

$$\Theta_{\text{вх}} = \arcsin \frac{a}{R} = \arcsin \frac{R - (h + a_1)}{R};$$

$$\Theta_{\text{вых}} = \arcsin \frac{a + h}{R} = \arcsin \frac{R - a_1}{R}.$$

✓ Для станков с нижним расположением пильного вала $a_1 \approx \sqrt{D}$.

Попутная подача широко используется при поперечной распиловке в конструкциях торцовочных станков, а при продольной — на станках с применением пил для получения технологической

стружки вместо опилок. При попутной подаче увеличивается длина непрерывной стружки, процесс резания происходит более организованно, класс шероховатости распиленной поверхности высокий.

Расчет режимов резания. Рассмотрим порядок решения типовых задач для дисковых пил продольной распиловки.

Пример 1. Решить прямую задачу. Дано: круглопильный станок с механической подачей: $D = 450 \text{ мм}$, $n = 2900 \text{ об/мин}$, подъем стола над центром вала $a = 90 \text{ мм}$, высота пропила $h = 25 \text{ мм}$, число зубьев $z = 60 \text{ шт.}$, угол резания $\delta = 60^\circ$, скорость подачи $u = 55,7 \text{ м/мин}$, порода — сосна, $b_{\text{п}} = b = 2,2 \text{ мм}$, $s' = 0,7 \text{ мм}$, $b = 3,6 \text{ мм}$, $W = 15\%$, резец — острый ($\alpha_r = 1$), $\alpha_\lambda = 0,075$.

Определить: класс шероховатости обработки поверхности $\nabla \delta$, мощность резания N , силы резания и сопротивления подачи, мощность подачи.

Решение. 1. Для определения класса шероховатости поверхности найдем: а) подачу на резец

$$c = \frac{1000u}{zn} = \frac{1000 \cdot 55,7}{60 \cdot 2900} = 0,32 \text{ мм};$$

б) угол Θ , $\sin \Theta$, $\cos \Theta$

$$\Theta = \arcsin \frac{57h}{R \left(\arcsin \frac{a+h}{R} - \arcsin \frac{a}{R} \right)} = \arcsin \frac{57 \cdot 25}{225 \left(\arcsin \frac{90+25}{225} - \arcsin \frac{90}{225} \right)} = 65^\circ;$$

$$\sin \Theta = 0,91; \quad \cos \Theta = 0,42.$$

При $c = 0,32 \text{ мм}$ и $\Theta = 65^\circ$ по приложению 5 класс шероховатости поверхности $\nabla \delta 4$.

2. Удельное сопротивление резанию на передней поверхности реза при $e > 0,1 \text{ мм}$ для пиления сосны

$$k = (0,02 + 0,0004\psi)\sigma + (0,007 + 0,00015\psi)v - (0,55 + 0,015\psi).$$

$$\text{При } v = \frac{\pi D n}{60000} = \frac{3,14 \cdot 450 \cdot 2900}{60000} = 68,3 > 50 \text{ м/сек}$$

$$k = (0,02 + 0,0004 \cdot 65) 60 + (0,007 + 0,00015 \cdot 65) 68,3 - (0,55 + 0,015 \cdot 65) = 2,76 + 1,16 - 1,52 = 2,4 \text{ кг/мм}^2.$$

3. Удельная сила резания по задней поверхности реза при пиления сосны

$$p = 0,4 + 0,0036\psi = 0,4 + 0,0036 \cdot 65 = 0,63 \text{ кг/мм}.$$

4. Дуга контакта

$$\bar{l} = \frac{h}{\sin \Theta} = \frac{25}{0,91} = 27,5 \text{ мм}.$$

Шаг зубьев пилы

$$t = \frac{\pi D}{z} = \frac{3,14 \cdot 450}{60} = 23,5 \text{ мм}.$$

5. Сила резания

$$P_\lambda = [a_r p b_{\text{п}} + c \sin \Theta (k b + \alpha_\lambda h)] \frac{\bar{l}}{t} =$$

$$= 1 \cdot 0,63 \cdot 2,2 + 0,32 \cdot 0,91 (2,4 \cdot 3,6 + 0,072 \cdot 25) \frac{27,5}{23,5} = 6 \text{ кг}.$$

6. Мощность резания

$$N = \frac{Pv}{102} = \frac{6 \cdot 68,3}{102} = 4,02 \text{ квт.}$$

7. Сила резания по задней поверхности реза

$$P_{3\lambda} = (a_p - 0,8) pb_{\lambda} \frac{\bar{l}}{l} = (1 - 0,8) 0,63 \cdot 2,2 \frac{27,5}{23,5} = 0,32 \text{ кг.}$$

8. Сила резания по передней поверхности реза

$$P_{\text{пл}} = P_{\lambda} - P_{3\lambda} = 4,02 - 0,32 = 3,7 \text{ кг.}$$

9. Радиальная сила

$$R = 0,5 P_{3\lambda} a_p^2 - P_{\text{пл}} \operatorname{tg}(90 - \delta - \varphi_{\text{тр}}) = 0,5 \cdot 0,32 \cdot 1^2 - 3,7 \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - 60^\circ - 15^\circ) = 0,16 \text{ кг.}$$

10. Сила, нормальная к подаче,

$$S = P \sin \Theta - R \cos \Theta = 6 \cdot 0,91 - 0,16 \cdot 0,42 = 5,39 \text{ кг.}$$

11. Сопротивление подаче от сил резания

$$Q_1 = P \cos \Theta + R \sin \Theta + \mu S = 6 \cdot 0,42 + 0,16 \cdot 0,91 + 0,3 \cdot 5,39 = 3,84 \text{ кг.}$$

12. Мощность подачи

$$N_{\text{п}} = \frac{Q_1 u}{102 \cdot 60} = \frac{3,84 \cdot 55,7}{60 \cdot 102} = 0,035 \text{ квт.}$$

Пример 2. Решить обратную задачу. Дано: $N_{\text{уст}} = 10 \text{ квт}$, $\eta = 0,9$,

$$N = N_{\text{уст}} \cdot \eta = 10 \cdot 0,9 = 9 \text{ квт}, \quad n = 3000 \text{ об/мин}, \quad D = 500 \text{ мм}, \quad v = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 500 \cdot 3000}{60 \cdot 1000} = 78,5 \text{ м/сек} > 50, \quad z = 60 \text{ шт.}, \quad t = \frac{\pi D}{z} = \frac{3,14 \cdot 500}{60} = 26,16 \text{ мм}, \quad h = 50 \text{ мм}, \quad a = 90 \text{ мм}, \quad s = b_{\lambda} = 2 \text{ мм}, \quad s' = 0,8 \text{ мм}, \quad b = s + 2s' = 2 + 2 \cdot 0,8 = 3,6 \text{ мм}, \quad \text{зубья разведены}, \quad \alpha_{\lambda} = 0,072 \text{ кг/мм}^2, \quad \delta = 60^\circ, \quad \rho_0 = 10 \text{ мкм}, \quad \text{время работы до заточки } T = 3,5 \text{ ч} = 210 \text{ мин}, \quad \text{коэффициент использования рабочего времени } a_p = 0,9, \quad \text{коэффициент использования машинного времени } a_m = 0,9, \quad \text{порода древесины} - \text{сосна}, \quad W = 15\%.$$

Определить скорость подачи, силы резания и класс шероховатости обработки поверхности $\nabla \delta$.

Решение. 1. Определяем $\sin \Theta$, $\psi = \Theta$, $\cos \Theta$:

$$\sin \Theta = \frac{57 h}{R \left(\arcsin \frac{a+h}{R} - \arcsin \frac{a}{R} \right)} = \frac{57 \cdot 50}{250 \left(\arcsin \frac{90+50}{250} - \arcsin \frac{90}{250} \right)} = 0,875; \\ \Theta = \psi = 61^\circ; \quad \cos \Theta = 0,485.$$

2. Удельное сопротивление резанию по задней поверхности реза

$$p = 0,4 + 0,0036 \cdot 61 = 0,62 \text{ кг/мм.}$$

Удельное сопротивление по передней поверхности реза

$$k = (0,02 + 0,0004 \cdot 61) 60 + (0,007 + 0,00025 \cdot 61) 78,5 - (0,55 + 0,15 \cdot 61) = 2,58 \text{ кг/мм}^2.$$

3. Дуга контакта

$$\bar{l} = \frac{h}{\sin \Theta} = \frac{50}{0,875} = 57,2 \text{ мм.}$$

4. Определяем $\Delta \rho$ и a_p . По приложению 9 $\varepsilon = 0,001$

$$\Delta \rho = \frac{\bar{l} n \Gamma \varepsilon}{1000} = \frac{57,2 \cdot 3000 \cdot 210 \cdot 0,001}{1000} = 36 \text{ мкм.}$$

Примечание. На переточку пила пойдет с $\rho = \rho_0 + \Delta \rho \geq 40 \text{ мкм}$. При $\rho = 40 - 60 \text{ мкм}$ образуется ворсистость стенок пропила.

$$a_p = 1 + \frac{0,2 \Delta \rho}{\rho_0} = 1 + \frac{0,2 \cdot 36}{10} = 1,72.$$

5. Силы резания: а) касательная

$$P = \frac{102 N}{v} = \frac{102 \cdot 9}{78,5} = 11,69 \text{ кг.}$$

б) сила резания, приходящаяся на один зуб,

$$P_{\text{зуб}} = P \frac{t}{z} = 11,69 \frac{26,16}{60} = 5,35 \text{ кг.}$$

6. Подача на зуб определяется по формуле

$$P_{\text{зуб}} = a_p pb_{\lambda} + c \sin \Theta (kb + \alpha_{\lambda} h),$$

$$5,35 = 1,72 \cdot 0,62 \cdot 2 + c \cdot 0,875 (2,58 \cdot 3,6 + 0,072); \quad 11,28 c = 5,35 - 2,13,$$

$$c = \frac{3,22}{11,28} = 0,29 \text{ мм.}$$

Проверим правильность выбора формулы для определения c . Если $c \sin \Theta > 0,1 \text{ мм}$, то формула выбрана правильно, если $c \sin \Theta < 0,1 \text{ мм}$, то подачу на резец c надо определять по формуле $P_{\text{п}}$:

$$P_{\text{п}} = (a_p - 0,8) pb_{\lambda} + [(8\rho + k) b + \alpha_{\lambda} h] c \sin \Theta.$$

В нашем примере $c \sin \Theta = 0,29 \cdot 0,875 = 0,25 > 0,1 \text{ мм}$, т. е. формула сразу выбрана правильно. По приложению 5 подача на резец $c_{\lambda} = 0,3$ и $\Theta = 60^\circ$ соответствует $\Delta \delta 4$.

7. Скорость подачи

$$u_N = \frac{c z n}{1000} = \frac{0,29 \cdot 60 \cdot 3000}{1000} = 52,5 \text{ м/мин.}$$

8. Окружная сила резания по задней поверхности реза

$$P_3 = (a_p - 0,8) pb_{\lambda} \frac{\bar{l}}{l} = (1,72 - 0,8) 0,62 \cdot 2 \frac{57,2}{25,16} = 2,48 \text{ кг.}$$

9. Сила резания по передней поверхности реза

$$P_{\text{п}} = P - P_3 = 11,69 - 2,48 = 9,21 \text{ кг.}$$

10. Радиальная сила

$$R = 0,5 P_3 a_p^2 - P_{\text{п}} \operatorname{tg}(90 - \delta - \varphi_{\text{тр}}) = 0,5 \cdot 2,48 \cdot 1,72^2 - 9,21 (90^\circ - 60^\circ - 15^\circ) = 1,10 \text{ кг.}$$

11. Сопротивление подаче

$$Q = P \cos \Theta + R \sin \Theta = 11,69 \cdot 0,485 + 1,19 \cdot 0,875 = 6,7 \text{ кг.}$$

12. Сила S , нормальная к подаче,

$$S = P \sin \Theta - R \cos \Theta = 11,69 \cdot 0,875 - 1,19 \cdot 0,485 = 9,58 \text{ кг.}$$

13. Сопротивление подаче с учетом трения по столу

$$Q_1 = Q + \mu S = 6,7 + 0,3 \cdot 9,58 = 9,57 \text{ кг.}$$

14. Мощность подачи

$$N_p = \frac{Q_{1u}}{\eta_n 60 \cdot 102} = \frac{9,57 \cdot 52,5}{0,76 \cdot 60 \cdot 102} = 0,11 \text{ квт,}$$

где η_n — к.п.д. механизма подачи, определяемый по кинематической схеме станка: $\eta_n = 0,76$.

Пример 3. Построить график скоростей подачи при $N = 8 \text{ квт}$, $n = 2900 \text{ об/мин}$, $z = 60 \text{ шт.}$, $\delta = 60^\circ$, $D = 450 \text{ мм}$, $a = 90 \text{ мм}$, $s = 2,2 \text{ мм}$, $b = 3,4 \text{ мм}$, $h = 25$; 50 ; 75 ; 100 мм , порода — сосна, зубья пилы — острые. По конструкции $u_{\text{макс}} = 90 \text{ м/мин}$, $u_{\text{мин}} = 20 \text{ м/мин}$.

Решение. Расчет аналогичен решению в предыдущем примере. Порядок решения и ответы даны в табл. 11.6.

Таблица 11.6

Результаты расчета

$h, \text{ мм}$	$\Theta, \text{ град}$	$\sin \Theta$	$\cos \Theta$	$k, \text{ кг/мм}^2$	$p, \text{ кг/мм}$	$\tilde{l}, \text{ мм}$	$\frac{\tilde{l}}{l}$	$c, \text{ мм}$	$u, \text{ м/мин}$	Класс шероховатости
25	65	0,905	0,423	1,27	0,63	27,6	1,17	1,39	242	$\nabla \partial 2$
50	68	0,846	0,53	1,18	0,61	59,2	2,52	0,51	89	$\nabla \partial 4$
75	54	0,808	0,588	1,16	0,59	92,8	3,92	0,2	34,9	$\nabla \partial 5$
100	48	0,745	0,669	1,11	0,57	134,2	5,64	0,09	15,6	$\nabla \partial 6$

По данным табл. 11.6 строится в осях координат u (м/мин) и h (мм) график скоростей подачи при полном использовании мощности.

Если требуется получить пиленую поверхность не ниже $\nabla \partial 5$, то по приложению 5 классу $\nabla \partial 5$ соответствует подача на резец $c = 0,2 \text{ мм}$ и скорость подачи $u = \frac{0,2 \cdot 60 \cdot 2900}{1000} = 34,8 \text{ м/мин}$.

Классу шероховатости $\nabla \partial 4$ соответствует подача на резец $c = 0,2 - 0,8 \text{ мм}$ и скорость подачи $u = 34,8 - 139,2 \text{ м/мин}$. На графике скоростей подачи (рис. 11.3) проведем горизонтали, соответствующие ограничению скоростей, по требованиям шероховатости поверхности ($u_k = 20$ и 90 м/мин). Например, при $h = 65 \text{ мм}$, $u = 54 \text{ м/мин}$ при полном использовании мощности и класс шероховатости будет $\nabla \partial 4$. Для получения $\nabla \partial 5$ надо снизить скорость подачи по крайней мере до $34,8 \text{ м/мин}$.

Пример 4. Дано: коническая пила $D = 600 \text{ мм}$ (табл. 11.4), $N_{\text{пр}} = 20 \text{ квт}$, $\eta_{\text{пр}} = 0,9$, $n = 2500 \text{ об/мин}$, развод $s' = 0,4 \text{ мм}$ с конической и $s' = 0,3 \text{ мм}$ со стороны плоской части пилы, ширина пропила $b = 1,2 + 0,4 + 0,3 = 1,9 \text{ мм}$, $\delta = 65^\circ$, $h = 160 \text{ мм}$, толщина дощечки $B = 10 \text{ мм}$, $a = 90 \text{ мм}$, порода — сосна. Определить скорость подачи при пилении конической пилой.

Решение. При пилении конической пилой мощность резания

$$N = \eta N_{\text{пр}} - N' \text{ квт,}$$

где η — к.п.д. механизма резания;

N' — мощность, затрачиваемая на трение дощечки о коническую часть пилы.

Примерный расчет (по М. А. Дешевому) [5]:

$$N' = \frac{hb^3 (0,85 s_1 - s - s') n \sqrt{a^2 + 0,25 d^2}}{10^4 (R \sin \Theta_{\text{вых}} - 0,5 d)^3} \text{ квт,} \quad (11.11)$$

h — высота пропила, мм;

b — толщина дощечки, мм;

s_1 — толщина средней части пилы, мм;

s — толщина пилы у зубьев, мм;

s' — развод зубьев на сторону, мм;

a — подъем стола над центром вала, мм;

d — диаметр средней утолщенной части пилы, мм;

R — радиус пилы, мм;

$\Theta_{\text{вых}}$ — угол встречи при выходе зуба из пропила, град.

Определяем мощность резания

$$N = 0,9 \cdot 20 - N'$$

По формуле (11.14) мощность, расходуемая на трение,

$$N' = \frac{160 \cdot 10^3 (0,85 \cdot 3,8 - 1,2 - 0,4) 2500 \sqrt{90^2 + 0,25 \cdot 150^2}}{10^4 (300 \cdot 0,95 - 0,5 \cdot 150)^3} = 0,83 \text{ квт.}$$

$$\text{Следовательно, } N = 18 - 0,83 = 17,17 \text{ квт, } P = \frac{102 \cdot 17,17}{78,5} = 22,3 \text{ кг.}$$

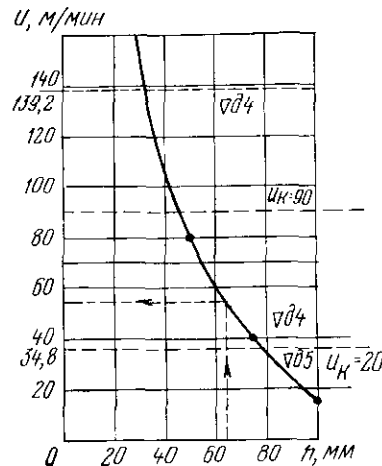


Рис. 11.3. График скоростей подачи

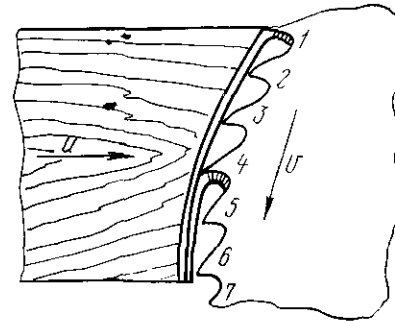


Рис. 11.4. Стружкообразование при пилении дисковой пилой с прорезанными зубьями

По выражению (7.38 а) $k = 2,35 \text{ кг/мм}^2$, по формуле (7.37) $p = 0,55 \text{ кг/мм}$. Из уравнений (7.46) и (7.47) определяем подачу на резец:

$$22,3 = \left[(8 \cdot 0,55 + 2,34) 1,9 + 0,075 \cdot 160 \right] c 0,723 + (1 - 0,8) 0,55 \cdot 1,2; \frac{221}{17,1}$$

Подача на резец $c = 0,12 \text{ мм}$. По приложению 5 определяем класс шероховатости — $\nabla \partial 6$.

Скорость подачи

$$u = \frac{0,12 \cdot 110 \cdot 2500}{1000} = 33 \text{ м/мин.}$$

Все остальные расчеты сил резания производятся так же, как в примере 2, но при расчете сопротивления подаче следует прибавить сопротивление трения по конической части пилы:

$$P_{\text{тр}} = \frac{102 N'}{v'} = \frac{102 \cdot 0,83}{28,8} = 2,94 \text{ кг,}$$

где

$$v' = \frac{2\pi n \sqrt{a^2 + 0,25 d^2}}{60 \cdot 1000} = 2 \frac{3,14 \cdot 2500 \sqrt{90^2 + 0,25 \cdot 150^2}}{60 \cdot 1000} = 28,8 \text{ м/сек.}$$

Следовательно,

$$Q = P \cos \Theta + R \sin \Theta + \mu S + P_{\text{тр}}$$

Остальные величины рекомендуется определить самостоятельно по формулам, приведенным в предыдущих примерах.

Дисковая пила продольной распиловки пониженного энергопотребления. Повышение производительности при продольной распиловке можно получить при соответствующей подготовке дисковых пил. По ГОСТ 980—69 число зубьев пил продольной распиловки кратно трем. Это не случайно. На станках с ручной подачей и других, когда подача на резец очень мала, выгодно применять пилы с увеличенным шагом путем прореживания зубьев пил, не ломая их (рис. 11.4).

В каждой группе из трех зубьев первый зуб 1, 4, 7, ... оставляют без изменения, а вершинки последующих 2, 3, 5, 6, ... срезаются на наждаке со снижением высоты зуба на 1,5—2 мм. Так получается пила с увеличенным шагом между режущими (стружкообразующими) зубьями 1, 4, 7, ... Промежуточным укороченным зубьям 2, 3, 5, 6, ... делается развод, одинаковый с режущими, тогда они касаются стенок пропила, подчищают их и гасят вибрации пилы.

При пилении такой пилой толщина стружки возрастает пропорционально увеличению шага, т. е. в 3 раза, а энергопотребление уменьшается практически на 25—35%. Если укороченным зубьям сделать косую заточку, то расход энергии и шероховатость поверхности распила будут еще меньше. В этом случае усложнится подготовка инструмента. Ожидаемое уменьшение силы и мощности резания при работе пилой с прореженными зубьями можно подсчитать теоретически.

Пример 5. Дано: распиливается сосна дисковой пилой $D = 450$ мм, $z = 60$ мм, $t = 236$ мм, $\delta = 60^\circ$, $v = 60$ м/сек, $\Theta = 60^\circ$, $c = 0,2$ мм, $s = b_{\pi} = 2,2$ мм, $s' = 0,7$ мм, $b = 3,6$ мм, $h = 50$ мм, $a_p = 1$, $\alpha_k = 0,072$.

Определить силу и мощность резания при пилении этой пилой, а затем такой же, но с прореженными зубьями.

Решение. Толщина стружки

$$e = \frac{b}{b_{\pi}} c \sin \Theta = \frac{3,6}{2,2} 0,2 \cdot 0,87 = 0,28 \text{ мм.}$$

Длина пути контакта

$$\bar{l} = \frac{h}{\sin \Theta} = \frac{50}{0,87} = 57,5 \text{ мм.}$$

Сила резания по задней поверхности реза при пилении сосны

$$p = 0,4 + 0,0036\psi = 0,4 + 0,0036 \cdot 60 = 0,62 \text{ кг/мм.}$$

Удельное сопротивление резанию по передней поверхности реза

$$k = (0,02 + 0,0004 \cdot 60) 60 + (0,007 + 0,00015 \cdot 60) 60 - (0,55 + 0,015 \cdot 60) = 2,25 \text{ кг/мм}^2.$$

Сила резания

$$P_1 = [a_p p b_{\pi} + c \sin \Theta (k b + \alpha_k h)] \frac{l}{t} = \\ = [1 \cdot 0,62 \cdot 2,2 + 0,2 \cdot 0,87 (2,25 \cdot 3,6 + 0,072 \cdot 50)] \frac{57,5}{23,6} = 8,25 \text{ кг.}$$

Сила резания при пилении пилой с прореженными зубьями

$$P_2 = [a_p p b_{\pi} + 3c \sin \Theta (k b + \alpha_k h)] \frac{l}{3t} = \\ = [1 \cdot 0,62 \cdot 2,2 + 3 \cdot 0,2 \cdot 0,87 (2,25 \cdot 3,6 + 0,072 \cdot 50)] \frac{57,5}{3 \cdot 23,6} = 6,06 \text{ кг.}$$

Мощность резания

$$N_1 = \frac{P_1 v}{102} = \frac{8,25 \cdot 60}{102} = 4,84 \text{ квт; } N_2 = \frac{P_2 v}{102} = \frac{6,06 \cdot 60}{102} = 3,56 \text{ квт;}$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{8,25}{6,06} = 1,36.$$

Итак, мощность и сила резания уменьшаются в 1,36 раза, уменьшится сопротивление подаче, появятся резервы повышения производительности. Чем меньше подача на резец, тем выгоднее применять пилы с прореженными зубьями.

За рубежом имеются попытки использования очень толстых пил и максимальной подачи на резец (около $s = 8,4$ мм) с целью получения толстой стружки в качестве сырья для производства целлюлозы. Однако не следует забывать, что при больших подачах на резец (больше 2 мм) энергопотребление снижается незначительно, а шероховатость поверхности увеличивается и снижается точность распила.

11.3. Поперечное пиление дисковыми пилами

Процесс резания дисковыми пилами поперечной распиловки используется на круглопильных станках со встречной или попутной подачей, с верхним или нижним расположением пильного вала. Дисковые пилы имеют профиль III или IV (рис. 11.2, табл. 11.1) с косой заточкой по передней и задней поверхностям. Угол косой заточки, равный для мягкой древесины 25—30°, для твердой — 10—15°, выполняется по передней и задней поверхностям одинаковым или по задней поверхности делается с меньшим наклоном. По данным П. П. Есипова (ЦНИИМОД), угол косой заточки должен быть увеличен до 45°.

Стружка лучше размещается во впадине зуба, если косую заточку производить только на верхней части зуба, не касаясь впадины.

Профиль III с контурными углами $\delta = 90^\circ$ и $\beta = 40^\circ$ рекомендуется для станков с нижним расположением пильного вала. Профиль IV с контурными углами $\delta = 115^\circ$ и $\beta = 50^\circ$ — для торцовок с верхним расположением пилы, так как при ручной подаче в этом случае исключается возможность выброса распиливаемого материала и самопроизвольного набегания (самоподачи) пилы на рабочее.

Острозаточенные боковые кромки зубьев пилы перерезают волокна в торец (см. рис. 8.9), формируя стенки пропила. Стружка образуется скалыванием поперек дна пропила, ее толщина $e = b > 0,1$ мм, а ширина меньше ширины пропила.

Среднее основное давление резания при поперечной распиловке не зависит от скорости резания v , высоты пропила h и угла встречи Θ между векторами скорости резания v и подачи u и определяется по формуле

$$K = k + \frac{a_p p}{c} \text{ кг/мм}^2. \quad (11.12)$$

Значения k определяются по формуле (11.13), а \bar{p} принимают в зависимости от породы древесины:

Сосна	$p=0,1$ кг/мм;
Береза	$p=0,12$ кг/мм;
Дуб	$p=0,15$ кг/мм.

Значения k :

$$\begin{aligned} \text{сосна } k &= 6,2 - 1,4b + (0,042 - 0,0006\gamma) \beta_1 \text{ кг/мм}^2; \\ \text{береза } k &= 8 - 1,8b + (0,058 - 0,0008\gamma) \beta_1 \text{ кг/мм}^2; \\ \text{дуб } k &= 10 - 2,2b + (0,07 - 0,001\gamma) \beta_1 \text{ кг/мм}^2. \end{aligned} \quad (11.13)$$

Здесь $\gamma = 90 - \delta$ и β_1 — угол заточки боковой кромки реза: $\beta_1 = 45 - 80^\circ$, b — ширина пропила, $b \leq 3,5$ мм.

При решении обратной задачи определяется подача на резец

$$c_N = \frac{6 \cdot 10^6 N}{k b h n z} - a_p p \text{ мм.} \quad (11.14)$$

Сила сопротивления подаче

$$\left. \begin{aligned} Q &= 0,5P \text{ при } 100^\circ \leq \delta \leq 125^\circ \\ Q &= 0,4P \text{ при } 90^\circ \leq \delta \leq 110^\circ \\ Q &= 0,36P \text{ при } 80^\circ \leq \delta \leq 90^\circ \end{aligned} \right\} \text{ при } \beta_1 = 45^\circ. \quad (11.15)$$

Шероховатость поверхности зависит от подачи на резец и угла резания (переднего угла γ) и определяется по табл. 11.7.

Таблица 11.7

Классы шероховатости при поперечной распиловке

Классы шероховатости	Подача на резец c_n (мм) при углах			
	$\beta_1 = 40^\circ$		$\beta_1 = 60^\circ$	
	$\gamma = -35^\circ$	$\gamma = -5^\circ$	$\gamma = -35^\circ$	$\gamma = -5^\circ$
$\nabla 5$	0,05	—	0,05	—
$\nabla 4$	0,20	0,05	0,15	0,05
$\nabla 3$	0,02	0,02	0,2	0,2

Пример 1. Дано: $D=500$ мм, $a=100$ мм, $z=96$ шт., $s=2,2$ мм, $b=3,4$ мм, $n=1200$ об/мин, $u=15$ м/мин, $h=50$ мм, $\delta=115^\circ$, $\beta=45^\circ$, $T=120$ мин времени резания, порода — сосна. Определить N , P , Q и $\nabla \delta$, β_1 .

Решение. 1. Определяем кинематический угол встречи Θ и $\sin \Theta$:

$$\begin{aligned} \Theta &= \arcsin \frac{57h}{R \left(\arcsin \frac{a+h}{R} - \arcsin \frac{a}{R} \right)} = \\ &= \arcsin \frac{57 \cdot 50}{250 \left(\arcsin \frac{100+50}{250} - \arcsin \frac{100}{250} \right)} = 60^\circ, \sin \Theta = 0,87. \end{aligned}$$

2. Приращение затупления реза за время его работы

$$\Delta \rho = \epsilon \frac{nTh}{1000 \sin \Theta} = 0,001 \frac{1200 \cdot 120 \cdot 50}{1000 \cdot 0,87} = 8 \text{ мкм.}$$

Коэффициент, учитывающий затупление реза,

$$a_p = 1 + \frac{0,2 \Delta \rho}{\rho_0} = 1 + \frac{0,2 \cdot 8}{10} = 1,16.$$

3. Подача на резец

$$c = \frac{1000 u}{z n} = \frac{1000 \cdot 15}{96 \cdot 1200} = 0,13 \text{ мм.}$$

4. Удельное сопротивление резанию по передней поверхности реза по формуле (11.13):

$$k = 6,2 - 1,4 \cdot 3,4 + (0,042 - 0,0006 \cdot 25) 45 = 4,01 \text{ кг/мм}^2.$$

Удельная сила резания по задней поверхности реза (стр. 164) $p=0,1$ кг/мм.

5. Среднее условное давление резания

$$K = k + \frac{a_p p}{c} = 4,01 + \frac{1,16 \cdot 0,1}{0,13} = 4,9 \text{ кг/мм}^2.$$

6. Мощность резания $\sqrt{P_{рез}}$

$$N = \frac{K b h u}{60 \cdot 102} = \frac{4,9 \cdot 3,4 \cdot 50 \cdot 15}{60 \cdot 102} = 2,05 \text{ квт.}$$

7. Сила резания

$$P = \frac{102 N}{v} = \frac{102 \cdot 2,05}{31,4} = 6,65 \text{ кг.}$$

8. Сила сопротивления подаче

$$Q = 0,5p = 0,5 \cdot 6,65 = 3,33 \text{ кг.}$$

9. Мощность подачи

$$N_n = \frac{Q u}{102 \cdot 60} = \frac{3,35 \cdot 15}{102 \cdot 60} = 0,008 \text{ квт.}$$

10. Класс шероховатости поверхности $\nabla \delta 4$ выбирается по данным табл. 11.7.

11.2
30

ФРЕЗЕРОВАНИЕ И СТРОГАНИЕ

12.1. Виды и назначение фрезерования

Классификация видов фрезерования. Фрезерование — процесс резания со снятием циклоидальной стружки вращающимся инструментом с резами на цилиндрической или торцевой поверхности. Разновидности фрезерования даны в классификационной таблице проф. Ф. М. Манжоса (табл. 12.1).

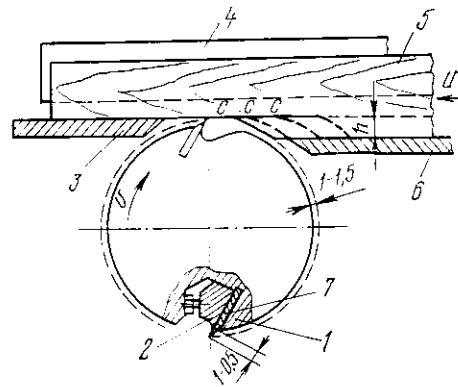


Рис. 12.1. Схема фрезерования на фуговальном станке

Назначение процесса. Назначение фрезерования — чистовая обработка деталей с целью получения поверхностей заданной формы путем снятия припуска.

На фуговальном станке выравнивают коробленную поверхность черновой детали, создавая геометрическую плоскость по широкой поверхности (пласти) заготовки, которая служит базовой для последующей обработки кромки под заданным углом и других поверхностей (рис. 12.1).

Ножевой вал 1 располагается между двумя столами. Рабочая поверхность заднего стола 3 устанавливается по касательной к окружности резания, а передний стол 2 опускается на толщину h срезаемого с заготовки 5 слоя древесины. Режущие кромки ножей 7 выступают из ножевого вала на 1—1,5 мм и на 0,5—1 мм — над губкой стружколомателя 2.

Прижимая базовую поверхность заготовки к направляющей линейке 4, установленной под углом к столу, и направляя ее по линейке, фрезеруют кромку в угол.

Направление движения подачи противоположно направлению врезания (встречное фрезерование). Случай, когда движение подачи совпадает с направлением врезания (см. рис. 12.30), т. е. попутное фрезерование, рассматриваются особо.

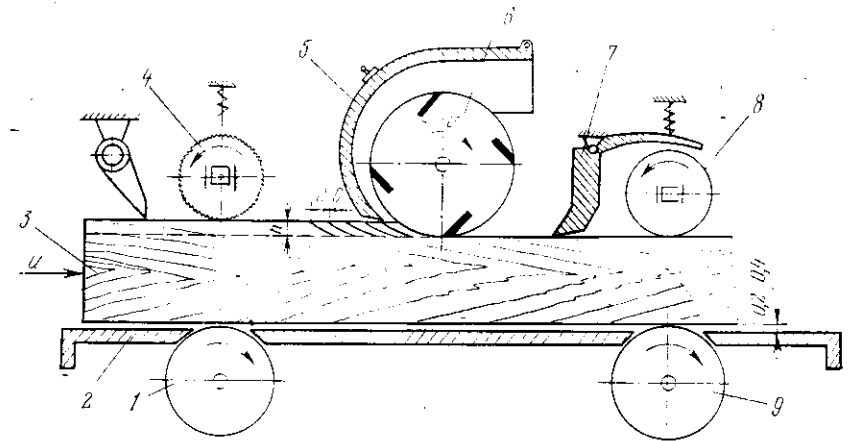


Рис. 12.2. Схема резания на рейсмусовом станке

На фуговальном станке нельзя получить деталь с взаимно параллельными сторонами, так как снимается слой постоянной толщины. После обработки на фуговальном станке вторая плоскость заготовки обрабатывается на рейсмусовом — параллельно первой.

Рейсмусовые станки служат для плоского фрезерования заготовок в размер по толщине (рис. 12.2).

Ножевой вал 6 расположен над столом 2 и заготовкой 3. Перед ножевым валом и за ним расположены две пары валов: передние 1, 4 и задние 8, 9; подача — встречная.

Силы, действующие на резец, вызывают отжим заготовки 3, что ухудшает шероховатость поверхности и точность обработки. Чтобы устранить отжим вблизи ножевого вала, устанавливают прижимы — подпор-стружколоматель 5 и задний прижим 7.

Четырехсторонние продольно-фрезерные станки производят плоскостную и профильную обработку досок, планок и брусков четырьмя, пятью и большим количеством ножевых валов, головок или фрез, укрепляемых на шпинделях.

Фрезерный станок — один из универсальных станков, на котором выполняются разнообразные работы при изготовлении деталей прямолинейной и криволинейных форм. Фрезерный вал 1 имеет шпindel 3 для установки фрез 4 разных типов (рис. 12.3, а).

При криволинейном очертании деталей фрезерование производится по упору 2. В этом случае обрабатываемая деталь 5 прижи-

Классификация видов резания фрезерованием

Цилиндровые	одноосевые вспереди; позднее		продольное; поперечное; диагональное		фасонно-продольное вспереди; позднее	целочное выдавливание	Стержневые		смашиные	
	двухосевые									
Конические	одноосевые вспереди; позднее		продольное; поперечное; диагональное		фасонно-продольное вспереди; позднее	целочное выдавливание	Стержневые		смашиные	
	двухосевые									
Грицевые	одноосевые		продольное		фасонно-продольное вспереди; позднее	целочное выдавливание	Стержневые		смашиные	
	двухосевые		продольное							
Копировальные	одноосевые		продольное		фасонно-продольное вспереди; позднее	целочное выдавливание	Стержневые		смашиные	
	двухосевые		продольное							

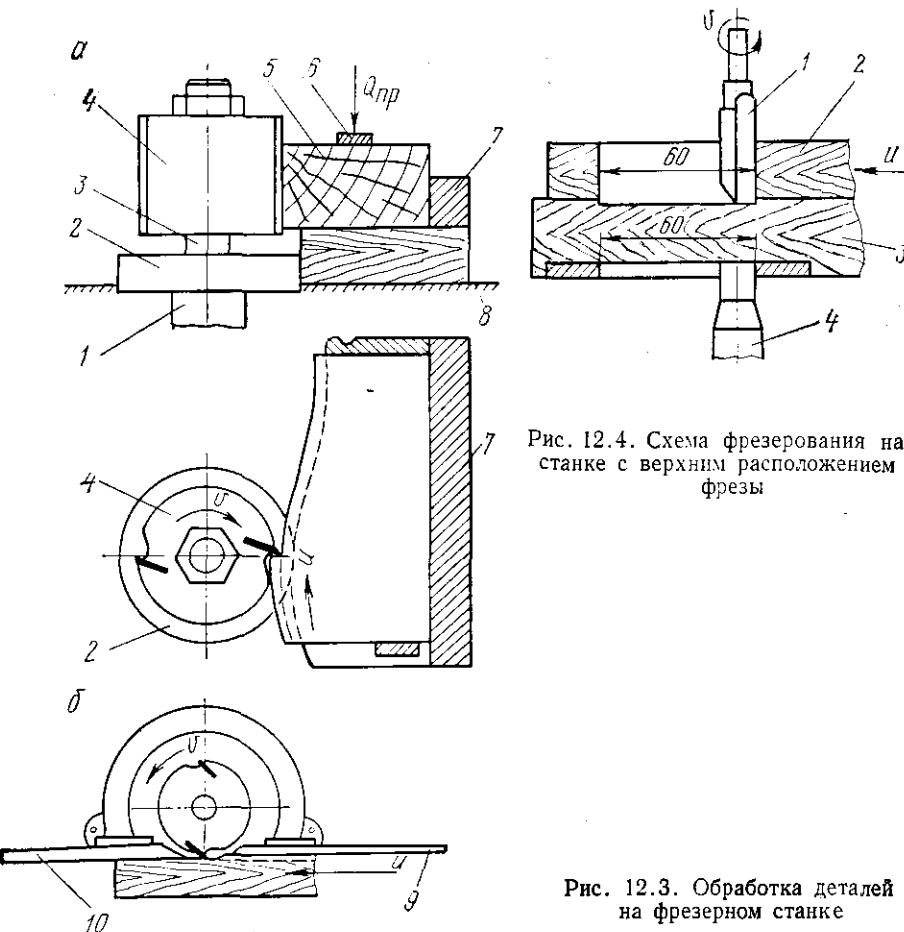


Рис. 12.4. Схема фрезерования на станке с верхним расположением фрезы

Рис. 12.3. Обработка деталей на фрезерном станке

мом 6 закрепляется на шаблоне 7. Прижимая шаблон к упору 2, деталь 5 приводят в соприкосновение с фрезой 4, которая обрабатывает соответствующий криволинейный профиль.

На столе 8 может быть установлена направляющая линейка 9, 10 (рис. 12.3, б), которая нужна для обработки прямых деталей по их длине.

Фрезерные станки с верхним расположением вала фрезы (рис. 12.4) служат для копировальных и гравировальных работ. При обработке на этих станках деталь 2 фиксируется шаблоном 3, который с нижней стороны имеет вырезы, соответствующие контуру обрабатываемой детали. Прижимая упорный палец 4 к стенкам выреза, получают соответствующую отборку фрезой 1 в заготовке 2.

Скорость резания универсальных фрезерных станков 30—80 м/сек, скорость подачи 6—25 м/мин, $n=4000-10\ 000$ об/мин и более.

12.2. Стругание

Виды строгания. *Струганием* называется процесс резания с прямолинейным движением резца или древесины, при котором обработанная поверхность, поверхность резания и плоскость резания совпадают (см. рис. 1.8).

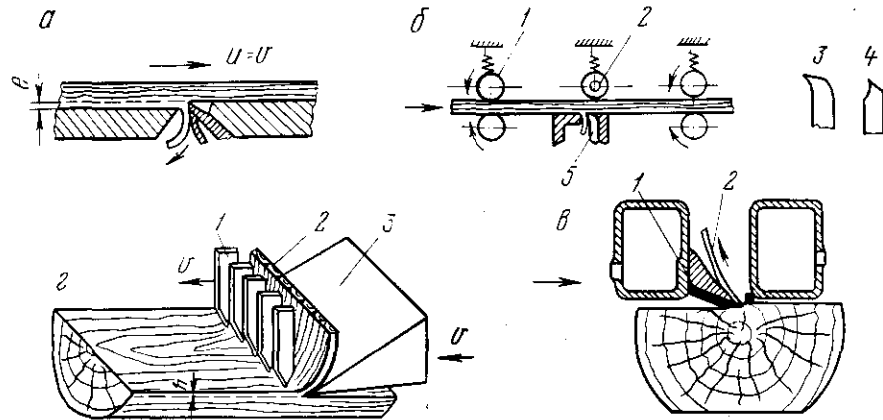


Рис. 12.5. Схемы строгания:

а, б — циклевание: 1 — подающие пальцы; 2 — прижимные ролики; 3, 4 — нож; в — строгание фанеры: 1 — нож; 2 — фанера; а — получение стружки заданной ширины и толщины; 1 — подающие ножи; 2 — стружка; 3 — срезающий нож

Все случаи строгания (без пьезотермической обработки) можно рассматривать как фрезерование при бесконечно большом радиусе округлости резания.

Стругание древесины производится вручную стругами и рубанками и механическим способом. Механическое строгание применяется для получения плоскостной обработки. Для этой цели используются гладильные ножи на четырехсторонних строгальных станках, циклевальные, фанеростругальные, стружечные станки и другие (рис. 12.5).

Стругание механическим способом. Гладильные ножи применяются на четырехсторонних строгальных станках для удаления кинематических неровностей (гребней) (рис. 12.5, а), получающихся после обработки вращающимися ножами.

Ножи закреплены в неподвижной коробке и работают как двойные железки обычного рубанка. Гладильные ножи используются также в циклевальных станках для зачистки фанеры. В этих станках подача на нож колеблется в пределах 0,01—0,05 мм, скорость достигает 0,5 м/сек и более.

На рис. 12.5, б показано оформление циклевальных ножей для получения гладкого среза поверхностного тонкого слоя без опережающих трещин путем отделения сливной стружки. Нож устанавливается под прямым углом к направлению резания, а специально отогнутое лезвие (под углом $\delta < 90^\circ$) опережает тело ножа при-

мерно на 0,5 мм. Надрезанная без опережающей трещины древесина упирается в тело ножа под углом 90° . В итоге методом циклевания отделяется уплотненная сливная стружка.

Применяют еще цинубельные ножи для нанесения на фрезерованную поверхность мелких рисок, при которых лучше склеиваются детали.

Различают строгание под углом ψ к волокнам в плоскости резания (рис. 12.6) и строгание в плоскости резания, когда лезвие повернуто в плане под углом ω к линии, перпендикулярной к направлению резания (см. рис. 2.3).

В первом случае, в зависимости от угла ψ , будут меняться силовые и энергетические параметры при резании.

Во втором случае усилия уменьшаются за счет уменьшения угла $\delta = \arctg(\cos \omega \operatorname{tg} \delta_1)$. При лезвии, повернутом в плане, получается более плавное врезание, обеспечивающее высокий класс шероховатости обработки.

Для получения чистой поверхности используются прижимы (рис. 12.5, в).

Расчет режимов резания при строгании. Формулы фрезерования можно использовать для расчета режимов строгания, если рассматривать его как фрезерование при бесконечно большом радиусе округлости резания и при $v \leq 1$ м/сек.

Пример 1. Дано: ширина заготовки $b = 100$ мм, выставка ножа $c = 0,1$ мм, $\delta = 50^\circ$, $v = 20$ м/мин, порода — дуб; резание вдоль волокон ($\psi = 0^\circ$); резец — острый ($\alpha_r = 1$), угол трения $\varphi_{тр} = 15^\circ$.

Определить силу резания P , радиальную силу $R \perp v$, мощность резания N .
Решение. 1. По формуле (7.36) определяем фиктивную удельную силу резания задней поверхности резца

$$p = 0,21 + 0,0046\psi = 0,21 \text{ кг/мм.}$$

2. По формуле (7.38 б) рассчитываем фиктивное среднее давление резания по передней поверхности резца

$$k = (0,028 + 0,0006\psi)50 + (0,009 + 0,0002\psi)(90 - v) - (0,76 + 0,02\psi) = 1,4 + 0,81 - 0,76 = 1,46 \text{ кг/мм}^2.$$

3. При $e = c = 0,1$ мм сила резания

$$P_{зуб} = a_p pb + c \sin \Theta kb = 0,21 \cdot 100 + 0,1 \cdot 1,46 \cdot 100 = 21 + 14,6 = 35,6 \text{ кг.}$$

4. Мощность резания

$$N = \frac{P_{зуб} v}{102} = \frac{35,6 \cdot 20}{102 \cdot 60} = 0,12 \text{ квт.}$$

5. Сила резания по задней поверхности резца

$$P_3 = (a_p - 0,8) pb = 0,2 \cdot 0,21 \cdot 100 = 4,2 \text{ кг.}$$

6. Сила резания по передней поверхности резца

$$P_n = P_{зуб} - P_3 = 35,6 - 4,2 = 31,4 \text{ кг.}$$

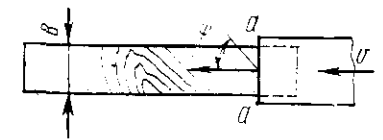


Рис. 12.6. Стругание под углом ψ к направлению волокон: а — а — линия лезвия

7. Радиальная сила

$$R = 0,5 a_p^2 P_s - P_n \operatorname{tg}(90^\circ - 50^\circ - 15^\circ) = 2,1 - 31,4 \cdot 0,47 = -12,66 \text{ кг}.$$

Отрицательный знак свидетельствует о том, что сила R направлена в сторону стружки, заготовка прижата к столу (рис. 12.5, б). Это вызывает дополнительное сопротивление при перемещении бруска при резании — трение его по столу. Аналогично решаются все задачи по продольному строганию.

Долбление как закрытое строгание. Рассмотрим процесс долбления как закрытого строгания (см. рис. 4.2). Этот процесс характеризуют основные величины: $\delta = 45^\circ$; $\Theta = 90^\circ$; $v_{\text{ср}} = 0,5 - 1,2 \text{ м/сек}$, глубина долбления $h \leq 150 \text{ мм}$, $c = 0,7 - 2,5 \text{ мм}$.

Пример 2. Дано: $b = 20 \text{ мм}$, $h = 50 \text{ мм}$, $\delta = 45^\circ$, $\psi = 90^\circ$, резание в торце, $c = 1,0 \text{ мм}$. Интенсивность трения стружки $\alpha_\Delta = 0,02 \text{ кг/мм}^2$. Порода — сосна; $v = 1 \text{ м/сек}$, $a_p = 1,2$.

Определить силу резания P и мощность N , пользуясь формулами закрытого резания.

Решение. 1. Фиктивная удельная сила резания задней поверхности реза

$$p = 0,4 + 0,0036 \cdot 90 = 0,72 \text{ кг/мм}.$$

2. Фиктивное среднее условное давление резания передней поверхности реза

$$k = (0,02 + 0,0004 \cdot 90)45 + (0,007 + 0,00015 \cdot 90)(90 - 1) - (0,55 + 0,015 \cdot 90) = 2,52 + 2,03 - 1,9 = 2,65 \text{ кг/мм}^2.$$

3. По формуле (7.47) сила резания

$$P = a_p p b + c \sin \Theta (k b + \alpha_\Delta h) = 1,2 \cdot 0,72 \cdot 20 + 1(2,65 \cdot 20 + 0,02 \cdot 50) = 71,3 \text{ кг}.$$

4. Мощность резания

$$N = \frac{71,3 \cdot 1}{102} = 0,72 \text{ квт}.$$

Резание стружечными станками. Стружечные станки (рис. 12.5, г) бывают одинарного и двойного действия. Нож может отклоняться от плоскости обработки при холостом ходе в то время, как работает другой нож.

На рис. 12.5, г дана схема получения древесной стружки. Срезающий нож и надрезатели имеют возвратно-поступательное движение. Древесина за каждый ход струга подается периодически действующим устройством на величину s .

Силовые параметры рассчитываются так же, как и при строгании, однако при этом необходимо дополнительно учитывать работу надрезателей. Согласно исследованиям Ф. Н. Масленкова (ЦНИИМОД), усилие на один надрезатель

$$p_n = k_n c,$$

где k_n — коэффициент: для ели $k_n = 1,2$; для сосны $k_n = 1,4$; для березы $k_n = 1,8$; для дуба $k_n = 2,4 \text{ кг/мм}$;

c — номинальная толщина стружки, отделяемой строгальным ножом, мм.

Следовательно, полная фактическая сила резания

$$P = (a_p p + k e) b_1 + k_n c,$$

где b_1 — ширина одной ленты стружки, мм.

При числе лент y , т. е. $y b_1 = b$ (где b — полная ширина строгания, мм) получаем

$$P'_\phi = P_\phi y = (a_p p + k e) b + (y + 1) k_n c \text{ кг}.$$

Для станков двустороннего действия

$$N = \frac{P'_\phi v_{\text{ср}}}{102} \text{ квт}.$$

Для станков одностороннего действия

$$N = \frac{P_{\text{ср}} v_{\text{ср}}}{2 \cdot 102} \text{ квт},$$

где

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_\phi}{2} \text{ кг}.$$

Следует отметить, что при трении сырой древесины и стружек по станине во время перемещения суппорта усилие возрастает на 15—20% (по опытам ЦНИИМОД).

Пример 3. Определить N при $\delta = 50^\circ$, $b = 165$, числе стружек 33, $c = 0,5 \text{ мм}$, $n = 220$, $H = 580 \text{ мм}$, $v_{\text{ср}} = \frac{Hn}{30} = 4,25 \text{ м/сек}$. Порода — сосна; $W = 30\%$, $a_p = 1,3$, $a_W = 1,2$.

Решение. Число надрезателей

$$y = 33 + 1 = 34.$$

Следовательно,

$$P = (a_p p + k c) b a_W + y p_n = (1,3 \cdot 0,21 + 1,46 \cdot 0,5) 165 \cdot 1,2 + 34 \cdot 1,4 \cdot 0,5 = 222,4 \text{ кг}.$$

Величины p и k определяются так же, как и в примере 1, или по номограмме (см. рис. 7.10; 7.11).

Для станков двустороннего действия

$$N = \frac{P_\phi v_{\text{ср}}}{102} = \frac{222,4 \cdot 4,25}{102} = 9,5 \text{ квт}.$$

Для станков одностороннего действия

$$N = \frac{P_\phi v_{\text{ср}}}{2 \cdot 102} = \frac{222,4 \cdot 4,25}{2 \cdot 102} = 4,75 \text{ квт}.$$

Продольно-поперечное резание. Резание в продольно-поперечном направлении встречается при строгании, фрезеровании и других процессах обработки деталей на соответствующих станках. При этом угол перерезания волокон ψ задается условиями обработки, поэтому он не рассчитывается (при строгании) и не равен углу Θ . Угол ψ при продольно-поперечном резании не следует путать с углом поворота лезвия в плане ω . Если $0 < \psi < 90^\circ$, то коэффициенты $A_{\parallel-\perp}$, $B_{\parallel-\perp}$, $B_{\parallel-\perp}$, $p_{\parallel-\perp}$, $k_{\parallel-\perp}$ определяются по такой же методике, как и при продольно-торцевом фрезеровании, по формуле (7.35) и табл. 7.2 и 7.3

Величины A_ψ , B_ψ , V_ψ , p_ψ , k_ψ при поперечно-продольном резании можно определить и по номограммам (рис. 12.7). Способ пользования номограммами такой же, как и на рис. 7.10.

Пример 4. Стругание — открытое, $\psi = 30^\circ$, порода — сосна, другие данные см. в примере 1.
Определить силу резания.

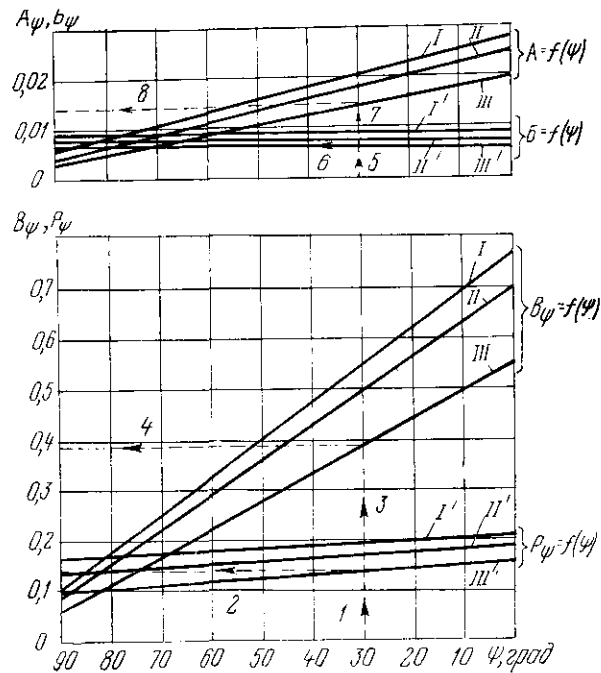


Рис. 12.7. Номограммы для расчета коэффициентов при поперечно-продольном резании:
а — для расчета A_ψ , B_ψ в зависимости от угла ψ ; б — для расчета V_ψ , P_ψ в зависимости от угла ψ ; I, I' — дуб; II, II' — береза; III, III' — сосна.

Решение. Находим $P_{\perp} = p_{\perp} + k_{\perp}e$,

$$P_{\parallel} = p_{\parallel} + k_{\parallel}e$$

$$\text{и } P_{\perp-\parallel} = [P_{\perp} + (P_{\parallel} - P_{\perp})] \frac{90 - \psi}{90} \text{ или}$$

$$P_{\perp-\parallel} = (p_{\perp} + k_{\perp}e) + [(p_{\parallel} + k_{\parallel}e) - (p_{\perp} + k_{\perp}e)] \frac{90 - \psi}{90}.$$

По табл. 7.3 $p_{\perp} = 0,1$, $p_{\parallel} = 0,16$ кг/мм, тогда:

$$k_{\perp} = A_{\perp} \delta + B_{\perp} (90 - v) - V_{\perp} = 0,003 \cdot 50 + 0,006 (90 - 20) - 0,006 = 0,56 \text{ кг/мм}^2;$$

$$k_{\parallel} = 0,02 \cdot 50 + 0,007 (90 - 20) - 0,35 = 0,94 \text{ кг/мм}^2.$$

Удельная сила резания

$$P_{\perp-\parallel} = (0,1 + 0,56 \cdot 0,1) + [(0,16 + 0,94 \cdot 0,1) - (0,1 + 0,56 \cdot 0,1)] \times \frac{90 - 30}{90} = 0,156 + (0,254 - 0,156) \frac{2}{3} = 0,22 \text{ кг/мм},$$

а при $b = 100$ мм $P_{\perp-\parallel} = 22$ кг вместо 35,6 кг в примере 1.

Этот же пример значительно проще решить с применением номограмм (рис. 12.7). По стрелкам 1—2 $p_{\psi=30} = 0,14$, по стрелкам 3—4 $B_{\psi=30} = 0,385$, по стрелкам 5—6 $V_{\psi=30} = 0,006$, по стрелкам 7—8 $A_{\psi=30} = 0,014$. Тогда

$$k_{\psi} = A_{\psi} \delta + B_{\psi} (90 - v) - V_{\psi} = 0,014 \cdot 50 + 0,006 \times (90 - 20) - 0,385 = 0,755 \text{ кг/мм}^2.$$

Удельная же сила резания

$$P_{\psi} = p_{\psi} + k_{\psi}e = 0,14 + 0,755 \cdot 0,1 = 0,22 \text{ кг/мм},$$

а сила резания при $b = 100$ мм $P = P_{\psi}b = 100 \cdot 0,22 = 22$ кг, т. е. результат такой же, как и в предыдущих расчетах по формулам.

12.3. Продольно-торцевое фрезерование

Справочные данные. Число оборотов для фуговальных и рейсмусовых станков $n = 5000-6000$ об/мин, для фрезерных $n = 4000-12000$ об/мин, для шипорезных головок $n = 3000$ об/мин. Углы резания $\delta = 50-75^\circ$, $\alpha = 10-15^\circ$.

Кинематическая шероховатость поверхности определяется длиной волны:

$$l_B = cz, \quad (12.1)$$

где c — подача на резец, мм;

z — число ножей.

Нормативная длина волны, определяющая класс шероховатости поверхности в зависимости от диаметра резания D , дается в приложении 6.

По многим исследованиям, обобщенным Н. А. Кряжевым, скорость резания $v = 15-50$ м/сек на шероховатость обработки не влияет. Существенное влияние на шероховатость обработки оказывает радиус кривизны лезвия ρ . При остром резе принимают $\rho_0 = 4-5$ мм. Нельзя допускать, чтобы $\rho_{\max} > 40$ мм, так как получаются большие вырывы и мшистость поверхности.

Численная зависимость между ρ и шероховатостью поверхности по опытам Н. А. Кряжева и других (МЛТИ) дается в приложении 7.

Расчетные формулы продольно-торцевого фрезерования. На диаграмме сил резания (рис. 12.8) по опытам К. Е. Бахматова (ЦНИИМОД) наблюдается плавный рост мгновенных сил резания на пути контакта l от нуля при входе резца в древесину до максимального значения при выходе из нее. Периодичность процесса фрезерования схематично представлена на рис. 12.9, б, где также сила резания равна нулю в начале дуги контакта и достигает максимального значения на выходе резца из древесины, затем происходит холостой ход, после чего — врезание очередного резца. Площадь между кривой мгновенных сил и осью абсцисс — работа резания

одного резца на пути контакта (рис. 12.8). Согласно рис. 12.9, б, работу многолезцового вала за один его оборот можно записать в виде уравнения

$$A = \frac{1}{2} z \bar{l} P_{\max} = z \bar{l} P_{l \text{ зуб}} = \pi D P, \quad (12.2)$$

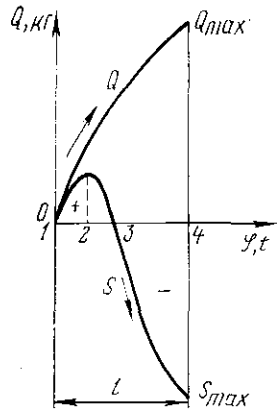


Рис. 12.8. Силы резания при фрезеровании по опытам К. Е. Бахматова:

1 — начало касания резца с древесиной; 2 — максимальное положительное значение S (прижим); 3 — величина и направление силы резания P совпадает с $S = P$; 4 — максимальные значения Q и S

где P_{\max} — максимальная сила резания, фактически действующая при выходе резца из древесины, по ней рассчитываются инструмент и детали станка на прочность:

$$P_{\max} = \frac{2A}{z \bar{l}} 2P_{l \text{ зуб}}; \quad (12.3)$$

$P_{l \text{ зуб}}$ — условно постоянная по величине средняя сила резания, действующая на дуге контакта \bar{l} при срезании одной стружки и условно приложенная к середине дуги контакта при повороте резца на угол $\Theta = \varphi/2$ (рис. 12.9, а):

$$P_{l \text{ зуб}} = \frac{A}{\bar{l} z} = \frac{1}{2} P_{\max};$$

P — условно постоянная по величине средняя окружная сила резания, действующая на всем пути цикла πD (за полный оборот вала фрезы):

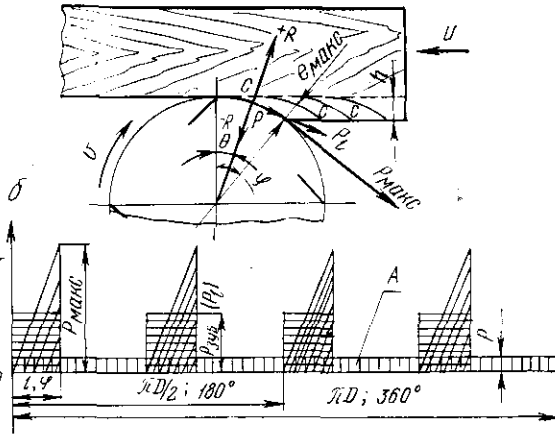


Рис. 12.9. Схема сил резания при фрезеровании: а — действие сил на дуге контакта; б — работа силы резания при срезании одной стружки и за один оборот вала

$$P = \frac{A}{\pi D}. \quad (12.4)$$

Из отношений (12.3) и (12.4)

$$\frac{P_{l \text{ зуб}}}{P} = \frac{\pi D}{\bar{l} z}$$

определяем

$$P_{l \text{ зуб}} = \frac{\pi D}{\bar{l} z} P = \frac{t}{\bar{l}} P = \frac{\pi}{z} \sqrt{\frac{D}{h}} P, \quad (12.5)$$

т. е. средняя сила $P_{l \text{ зуб}}$ на пути контакта при срезании одной стружки во столько раз больше средней окружной силы резания P , во сколько раз длина окружности резания больше длины дуги контакта \bar{l} .

Для простоты дальнейших рассуждений силу $P_{l \text{ зуб}}$ обозначим $P_{\text{зуб}}$:

$$P_{\text{зуб}} = P_{l \text{ зуб}} = K b e, \quad (12.6)$$

где K — среднее условное давление резания при срезании одной стружки, кг/мм^2 ;

e — средняя толщина стружки, мм .

Из уравнений (12.5) и (12.6)

$$F = \frac{\bar{l}}{t} P_{\text{зуб}} = K b e \frac{\bar{l}}{t}. \quad (12.7)$$

Учитывая, что $e \bar{l} = ch$ и $\frac{u}{60v} = \frac{c}{t}$,

$$P = \frac{K b h c}{t} = \frac{K b h u}{60v} \text{ кг}.$$

По средней силе резания P определяется мощность резания

$$N = \frac{P v}{102} = \frac{K b h u}{102 \cdot 60} \text{ квт}.$$

Средняя касательная сила резания, приходящаяся на один резец, за один оборот вала при $e \geq 0,1 \text{ мм}$

$$P_{\text{зуб}} = a_1 p b + c \sin \Theta k b; \quad (12.8)$$

при $e_p \leq 0,1 \text{ мм}$

$$P_{\text{зуб}} = (a_2 - 0,8) p b + c \sin \Theta (8p + k) b \quad (12.9)$$

или с учетом формул (12.7)—(12.9) имеем: при $e \geq 0,1 \text{ мм}$

$$P = (a_1 p b + c \sin \Theta k b) \frac{\bar{l}}{t}; \quad (12.10)$$

при $e_s < 0,1$ мм

$$P_z = [(a_p - 0,8) pb + c \sin \Theta b (8p + k)] \frac{\bar{l}}{t}, \quad (12.10a)$$

где a_p — коэффициент, учитывающий остроту резца по формуле (7.32);

p — удельная сила резания по задней поверхности резца, определяемая по формуле (7.36), кг/мм;

b — ширина фрезерования, мм;

c — подача на резец:

$$c = \frac{1000 u}{zn} \text{ мм};$$

Θ — кинематический угол встречи:

$$\sin \Theta = \sqrt{\frac{h}{D}};$$

h — толщина снимаемого слоя, мм;

D — диаметр фрезы, мм;

k — среднее условное давление по передней поверхности резца, определяемое по формуле (7.38), кг/мм²;

\bar{l} — длина дуги контакта:

$$\bar{l} = \sqrt{hD} \text{ мм};$$

t — шаг между резцами, мм.

Расчет режимов резания продольно-торцевого фрезерования. По формулам (12.8) и (12.9) рассчитываются режимы продольно-торцевого открытого фрезерования.

Пример 1. Ход решения прямой задачи. Дано: $u = 12$ м/мин, $D = 120$ мм, $n = 3000$ об/мин, $z = 2$, $\delta = 60^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, $h = 4$ мм, $b = 200$ мм, $\rho_0 = 5$ мкм, время резания $T = 160$ мин, $t = \frac{\pi D}{z} = \frac{3,14 \cdot 120}{2} = 190$ мм,

$$v = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 120 \cdot 3000}{60 \cdot 1000} \approx 19 \text{ м/сек, порода — сосна.}$$

Определить силу и мощность резания.

Решение. 1. Определяем

$$\Theta = \arcsin \sqrt{\frac{h}{D}} = \arcsin \sqrt{\frac{4}{120}};$$

$$\sin \Theta = 0,18; \quad \cos \Theta = 0,98; \quad \Theta = 10^\circ.$$

2. Длина дуги контакта

$$\bar{l} = \frac{h}{\sin \Theta} = \frac{4}{0,18} = 22 \text{ мм.}$$

3. Подача на резец

$$c = \frac{1000 u}{zn} = \frac{1000 \cdot 12}{2 \cdot 3000} = 2 \text{ мм.}$$

Толщина стружки $e = c \sin \Theta = 2 \cdot 0,18 = 0,36$ мм $> 0,1$ мм, следовательно, расчет надо вести по формуле (12.8).

4. Определяем

$$a_p = 1 + \frac{0,2 \Delta \rho}{\rho_0},$$

где

$$\Delta \rho = e \frac{\bar{l} n T}{1000} = 0,0008 \frac{22 \cdot 3000 \cdot 160}{1000} = 8,5 \text{ мкм.}$$

Тогда

$$a_p = 1 + \frac{0,2 \cdot 8,5}{5} = 1,34.$$

5. По выражению (7.36)

$$p = 0,16 + 0,0036 \cdot 10 = 0,2 \text{ кг/мм.}$$

6. По уравнению (7.38)

$$k = (0,02 + 0,0004 \cdot 10) 60 + (0,007 + 0,00015 \cdot 10) (90 - 19) - (0,55 + 0,017 \cdot 10) = 1,38 \text{ кг/мм}^2.$$

7. Средняя касательная сила резания по формуле (12.10)

$$P = (1,34 \cdot 0,2 \cdot 200 + 2 \cdot 0,18 \cdot 1,38 \cdot 200) \frac{22}{190} = 17,7 \text{ кг.}$$

8. Мощность резания

$$N = \frac{Pv}{102} = \frac{17,7 \cdot 19}{102} = 3,3 \text{ квт.}$$

9. Сила резания по задней поверхности резца

$$P_z = (a_p - 0,8) pb \frac{\bar{l}}{t} = (1,34 - 0,8) 0,2 \cdot 200 \frac{22}{190} = 2,5 \text{ кг.}$$

10. Сила резания по передней поверхности резца

$$P_n = P - P_z = 17,7 - 2,5 = 15,5 \text{ кг.}$$

11. Радиальная сила

$$R = 0,5 a_p^2 P_z - P_n \operatorname{tg} (90^\circ - \delta - \varphi_{\text{ТР}}) = 0,5 \cdot 1,34^2 \cdot 2,5 - 15,5 \operatorname{tg} (90^\circ - 60^\circ - 15^\circ) = -1,9 \text{ кг, где } \varphi_{\text{ТР}} = 15^\circ, \operatorname{tg} 15^\circ = 0,27.$$

12. Сопротивление подаче

$$Q = P \cos \Theta + R \sin \Theta = 17,7 \cdot 0,98 + (-1,9 \cdot 0,18) = 17,0 \text{ кг.}$$

13. Сила, нормальная к подаче,

$$S = P \sin \Theta - R \cos \Theta = 17,7 \cdot 0,18 + 1,9 \cdot 0,98 = 5,06 \text{ кг.}$$

Пример 2. По условиям примера 1 при мощности резания $N = 3,3$ квт определить скорость подачи (обратная задача).

Решение. 1. По формуле (12.8) следует, что

$$c = \frac{P_{\text{зуб}} - a_p pb}{\sin \Theta kb}. \quad (12.11)$$

Определим величины, входящие в формулу (12.11). Средняя окружная сила резания

$$P = \frac{102 N}{v} = \frac{102 \cdot 3,3}{19} = 17,7 \text{ кг.}$$

Сила резания, приходящаяся на один резец,

$$P_{зуб} = \frac{tP}{l} = \frac{190 \cdot 17,7}{22} = 153 \text{ кг.}$$

По формуле (7.36) фиктивная удельная сила резания по задней поверхности резца $p = 0,2 \text{ кг/мм}$. По формуле (7.38) фиктивное среднее удельное давление резания $k = 1,38 \text{ кг/мм}^2$. По формуле (7.32) $a_f = 1,34$. Тогда

$$c = \frac{153 - 1,34 \cdot 0,2 \cdot 200}{0,18 - 1,38 \cdot 200} = 2 \text{ мм.}$$

Скорость подачи

$$u = \frac{czn}{1000} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 3000}{1000} = 12 \text{ м/мин.}$$

Класс шероховатости определяем по длине волны l_b из приложения 7 при $D = 120 \text{ мм}$ и $l_b = cz = 2 \cdot 2 = 4 \text{ мм}$, $\nabla \partial 9$ дополнительно проверим по приложению 7. С учетом радиуса кривизны лезвия при $\rho = \rho_0 + \Delta\rho = 5 + 8,5 = 13,5 \text{ мкм}$ класс шероховатости $\nabla \partial 7$. Окончательно принимаем $\nabla \partial 7$.

Пример 3. Построить график скоростей подачи фрезерного станка.

Дано: $N_{уст} = 2,8 \text{ квт}$, $\eta = 0,9$, $N = 2,8 \cdot 0,9 = 2,5 \text{ квт}$, $D = 128 \text{ мм}$, $n = 5000 \text{ об/мин}$, $\delta = 55^\circ$, $z = 2$, $v = \frac{3,14 \cdot 128 \cdot 5000}{60 \cdot 1000} = 33,6 \text{ м/сек}$, $\rho_0 = 5 \text{ мкм}$, $T = 120 \text{ мин}$, конструктивная скорость подачи $u_k \leq 56 \text{ м/мин}$.

Определить оптимальную скорость подачи при полном использовании мощности резания при:

$h = 1$	1,5	2	3 мм
$b = 50$	100	200	300 мм.

Построить график скоростей подачи в осях координат u и b .

Решение. Все расчеты сводятся в табл. 12.2. По полученным значениям u_k строим график скоростей подачи при полном использовании мощности (рис. 12.10), где по оси абсцисс откладывается ширина фрезерования b , а по оси ординат — расчетная скорость подачи u . Каждому припуску h_1, h_2, \dots и т. д. соответствует своя кривая изменения $u_N = f(b)$. Такие графики рассчитываются для разных пород древесины. Используются ими при эксплуатации существующего оборудования на производстве.

График (рис. 12.10) построен без учета конструктивных возможностей механизма подачи станка, поэтому, кроме расчетных скоростей подачи $u_N = f(b)$ при полном использовании мощности, на оси ординат наносятся конструктивные скорости подачи из паспорта станка (например, $u_k = 56 \text{ м/мин}$) и прямые, характеризующие класс шероховатости фрезерованной поверхности.

Класс шероховатости определяется по приложению 6. По условию примера $D = 128 \text{ мм}$. В приложении 6 в графе 1 имеются значения $D = 120, D = 140$ и т. д. Возьмем строку, наиболее близкую к $D = 120 \text{ мм}$. Этому диаметру соответствуют следующие значения:

класс шероховатости (ГОСТ 7016—68)	$\nabla \partial 9$	$\nabla \partial 8$	$\nabla \partial 7$	$\nabla \partial 6$	$\nabla \partial 5$
$l_b = cz, \text{ мм}$	4	5,5	7	10	12

Определим скорость подачи, соответствующую каждому классу шероховатости:

класс шероховатости (ГОСТ 7016—68)	$\nabla \partial 9$	$\nabla \partial 8$	$\nabla \partial 7$	$\nabla \partial 6$	$\nabla \partial 5$
$u_N = \frac{c_N z n}{1000} = \frac{l_b n}{1000} \text{ м/мин}$	20	27,5	35	50	60

Эти значения также наносятся на график скоростей подачи. График позволяет определить оптимальную скорость подачи и класс шероховатости поверхности в зависимости от ширины детали и припуска на обработку. Допустим, что на станке установлена скорость подачи $u_k = 30 \text{ м/мин}$. По стрелке 1—2 находим оптимальную ширину детали $b = 100 \text{ мм}$ при $h_4, b = 146 \text{ мм}$ при h_3 и т. д. При этом класс шероховатости будет $\nabla \partial 7$.

Рассмотрим положение точек 5, 6 и 7 относительно кривой h_3 при обработке детали шириной $b = 200 \text{ мм}$. Точке 5 соответствует скорость подачи $u = 23 \text{ м/мин}$ и $\nabla \partial 8$. Однако деталь шириной $b = 200 \text{ мм}$ не может быть обработана с такой

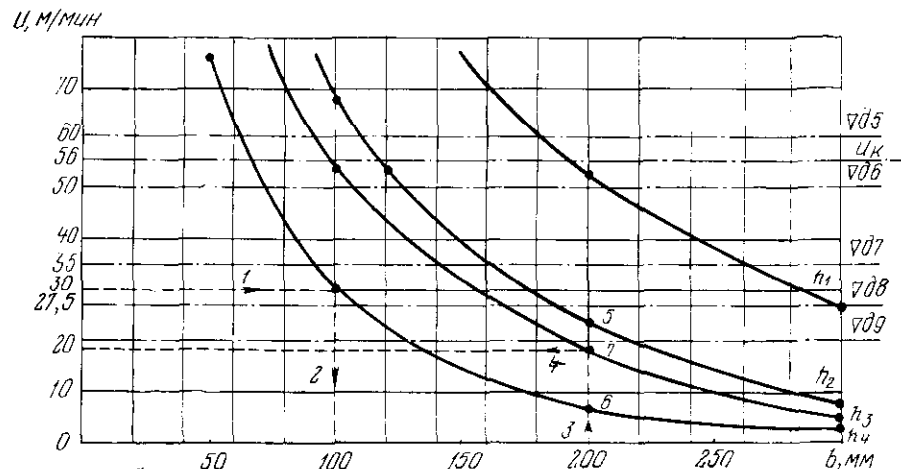


Рис. 12.10. График скоростей подачи

скоростью подачи, так как точка 5 находится выше кривой h_3 — не хватит мощности резания. Эту деталь при полном использовании мощности надо обрабатывать со скоростью подачи $u = 18 \text{ м/мин}$ (точка 7 на кривой h_3), класс шероховатости при этом $\nabla \partial 9$.

Если деталь шириной $b = 200 \text{ мм}$ обрабатывать со скоростью подачи $6,1 \text{ м/мин}$, то будет неполное использование мощности резания (точка 6 — ниже кривой h_3). Мощность используется полностью, если эту деталь обрабатывать со скоростью $u = 6,1 \text{ м/мин}$ с припуском h_4 . Точки пересечения ординат с абсциссой, расположенные на кривых, указывают на полное использование мощности. Если они пересекаются ниже кривой, то это говорит о неполном использовании мощности резания, если выше ее, то мощности мало — надо снизить скорость подачи. Наличие графика скоростей подачи для каждого станка в дальнейшем освобождает от расчетов и ориентирует на выбор рациональных режимов работы.

Продольно-торцевое полузакрытое и закрытое фрезерование. Опытами канд. техн. наук З. И. Онезашвили, А. П. Шаповалова (МЛТИ), А. И. Санковича (БТИ) при фрезеровании четверти и гребня (полузакрытое фрезерование) установлена независимость действия сил по передней, задней и боковой поверхностям резца.

При фрезеровании четверти с рекомендуемым углом поднутрения $\lambda = 2^\circ$ и при заднем угле резания около 5° сила трения у боковой кромки не зависит от толщины стружки, угла резания и постоянна для данного припуска на обработку h , т. е.

$$P = P_3 + P_n + P_{тр.}$$

117

№ п.п.	Расчетные формулы	Размерность	Результаты			
			Толщина			
			1	2	3	4
1	$P = \frac{102 N}{\psi}$	кГ	7,6			
2	$\sin \Theta = \sqrt{\frac{h}{D}}$		0,09			
3	$\Theta = \psi$	град	5			
4	$\tilde{l} = \frac{h}{\sin \Theta}$	мм	11,1			
5	$P_{зуб} = \frac{tP}{\tilde{l}}$	кГ	136,8			
6	$p = 0,16 + 0,0036 \Theta$	кГ/мм	0,18			
7	$k = (0,02 + 0,0004 \Theta) 55 + (0,007 + 0,00015 \Theta) 57 - (0,55 + 0,015 \Theta)$	кГ/мм ²	1			
8	$\Delta\rho = \frac{\tilde{l} \ln \Gamma}{1000} = 0,48 \tilde{l}$	мкм	5,3			
			10,3			
9	$a_z = 1 + \frac{0,2 \Delta\rho}{\rho_0} = 1 + 0,04 \Delta\rho$		1,21			
	Ширина фрезерования B	мм	50	100	200	300
10	Толщина стружки:					
	а) $e = c \sin \Theta = \frac{P_{зуб}}{kb} - \frac{a_z p}{k}$	мм	2,52	1,01	0,47	0,23
	б) $e_z = c \sin \Theta = \frac{P_{зуб} - (a_z - 0,8) pb}{(8p + k) b}$	мм				
11	$c_N = e / \sin \Theta$	мм	28	11,2	5,2	2,6
12	$u_N = \frac{c_N z n}{1000} = 10 c_N$	м/мин	280	112	52	2,6

Примечание. В пункте 10 расчет ведется по формуле «б», если при

где $P_{тр}$ — сила трения по боковой поверхности обрабатываемой четверти.

Сила трения изменяется пропорционально припуску h , а следовательно, и кинематическому углу Θ , так как $\sin \Theta = \sqrt{\frac{h}{D}}$.

Сила трения по боковой кромке фрезеруемой четверти по опытам канд. техн. наук А. И. Санковича для сосны рассчитывается по формулам:

расчета	Таблица 12.2													
	сняваемого слоя h , мм													
			1,5	2	3									
			7,6	7,6	7,6									
			0,11	0,13	0,15									
			6	7,5	9									
			13,6	15,4	20,0									
			100,3	98,8	76									
			0,19	0,19	0,19									
			1,04	1,06	1,1									
			6,5	7,4	9,8									
			11,5	12,4	14,8									
			1,26	1,29	1,39									
			50	100	200	300	50	100	200	300	50	100	200	300
			1,7	0,74	0,25	—	1,61	0,70	0,23	—	1,14	0,45	0,105	—
						0,09				0,05				0,36
			15,5	6,7	2,3	0,7	12,4	5,3	1,8	0,4	7,6	3	0,61	0,24
			155	67	23	7	124	53	18	4	76	30	6,1	2,4

расчете по формуле «а» $e_z = c \sin \Theta < 0,1$ мм или получается отрицательное значение.

для продольного фрезерования

$$P_{тр\parallel} = 0,015 \Theta - 0,055 \text{ кГ}; \quad (12.12)$$

для торцевого фрезерования

$$P_{тр\perp} = 0,021 \Theta - 0,038 \text{ кГ}. \quad (12.13)$$

При фрезеровании шпунта, гребня, а также при резке шипов и проушин, где обрабатываются две боковые поверхности, необхо-

димо учитывать силу трения для обеих боковых кромок, т. е. $2P_{тр}$, которая суммируется с силой обычного открытого фрезерования с учетом направления волокон (продольного или торцевого).

Пример 4. Дано: $\Theta=10^\circ$, $h=4$ мм, сила резания при свободном фрезеровании $P=17$ кг.

Определить силу резания при обработке четверти и паза при продольном фрезеровании.

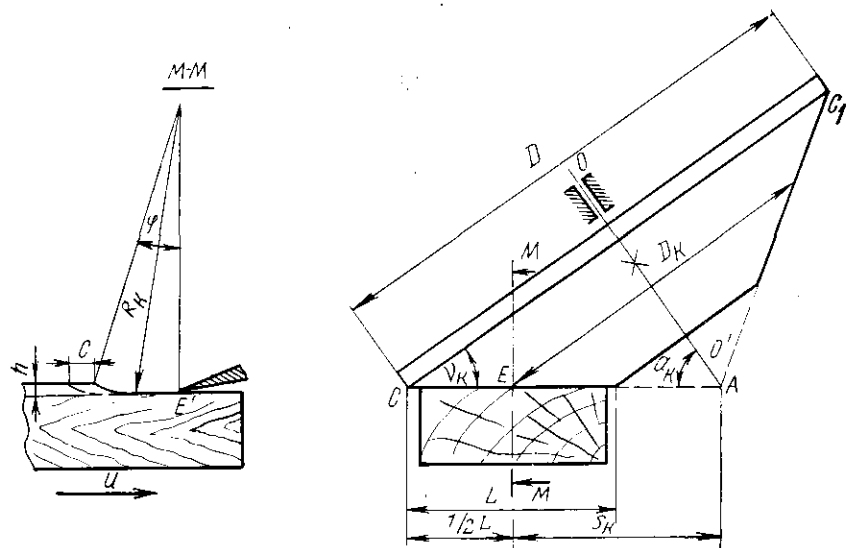


Рис. 12.11. Схема конического фрезерования

Решение. Сила трения

$$P_{тр} = 0,015 \cdot 10 = 0,015 = 0,095 \text{ кг.}$$

Сила резания при обработке четверти

$$P = P_3 + P_n + P_{тр} = 17 + 0,095 = 17,095 \text{ кг.}$$

Сила резания при обработке паза

$$P = P_3 + P_n + 2P_{тр} = 17 + 2 \cdot 0,095 = 17,19 \text{ кг.}$$

Из приведенного примера видно, что сила трения по боковой кромке составляет 1—3% общей силы резания, поэтому при приближенных расчетах ею можно пренебречь.

Коническое фрезерование. Схема конического фрезерования дана на рис. 12.11 [9]. При вращении фрезы относительно оси OO' резец описывает в пространстве коническую поверхность. Главная особенность процесса заключается в том, что в сечениях, перпендикулярных к обработанной поверхности детали, режущая кромка резца описывает не окружность, а гиперболу — кривую с большим радиусом кривизны.

При коническом фрезеровании на поверхности заготовки в любом нормальном сечении (например, $M-M$) на расстоянии S_K от

вершины конуса A и параллельном скорости подачи u кривизна волны радиусом R_K более пологая, чем циклоидальной волны радиусом R при цилиндрическом фрезеровании, так как $R_K \gg R$, поэтому кинематические неровности будут значительно меньше.

Угол у вершины конуса A , равный $2\alpha_K$, близок к прямому (около 85°), у основания же при C и C_1 угол ν_K очень мал, не более 10° . Сумма их

$$\alpha_K + \nu_K = 90^\circ.$$

На основании теории конических сечений радиус кривизны гиперболы в любой точке образующей конуса

$$R_K = S_K \operatorname{tg} \alpha_K.$$

Максимальная высота кинематических неровностей определяется по общеизвестной формуле

$$R_{z \text{ макс}} = \frac{c^2}{8R} \text{ мм.}$$

Например, при $S_K=60$ мм, $\alpha_K=85^\circ$, $\operatorname{tg} 85^\circ=11,43$, $c=4$ мм

$$R_K = 60 \cdot 11,43 = 685,8 \text{ мм;}$$

$$R_{z \text{ макс}} = \frac{4^2}{8 \cdot 685,8} = 0,003 \text{ мм,}$$

что соответствует $\nabla \partial 12$.

При таких же условиях и $R=60$ мм для цилиндрической фрезы

$$R_{z \text{ макс}} = \frac{4^2}{8 \cdot 60} = 0,033 \text{ мм,}$$

что значительно хуже, так как соответствует $\nabla \partial 8$.

При коническом фрезеровании на обработанной поверхности практически нет кинематических неровностей, поэтому иногда отпадает необходимость в дальнейшей обработке. Кинематические расчеты и определение силы резания аналогичны расчетам цилиндрического фрезерования.

Пример 5. Дано: $\alpha_K=85^\circ$, $\nu_K=5^\circ$, $S_K=75$ мм, $\delta=60^\circ$, $b=50$ мм, $h=2$ мм, $c=4$ мм, $z=2$ шт., $n=3000$ об/мин, порода — сосна.

Определить силу и мощность резания.

Решение. 1. Скорость подачи

$$u = \frac{cgn}{1000} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 3000}{1000} = 24 \text{ м/мин.}$$

2. Скорость резания

$$v_K = \frac{\pi D_K n}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 150 \cdot 3000}{60 \cdot 1000} = 23,7 \text{ м/сек,}$$

где D_K — средний диаметр окружности резания, проходящий через точку E и делящий ширину заготовки пополам:

$$D_K = 2S_K \sin \alpha_K = 2 \cdot 75 \cdot 0,966 \approx 150 \text{ мм.}$$

3. Кинематический угол

$$\sin \theta = \sqrt{\frac{h}{2R_k}} = \sqrt{\frac{2}{1714}} = 0,034 \text{ и } \theta = 2^\circ,$$

где $R_k = S_k \operatorname{tg} \alpha_k = 75 \cdot \operatorname{tg} 85^\circ = 857 \text{ мм}$.

Толщина стружки $e = c \sin \theta = 4 \cdot 0,034 = 0,14 \text{ мм}$.

4. По номограммам (рис. 7.10 и 7.11) при $\theta = \psi = 2^\circ$ $p = 0,17$; $A = 0,022$; $B = 0,007$; $V = 0,51$. Тогда $k = A\delta + B(90 - v) - V = 1,28 \text{ кг/мм}^2$ и среднее условное давление резания

$$K = k + \frac{p}{e} = 1,28 + \frac{0,17}{0,14} = 2,49 \text{ кг/мм}^2.$$

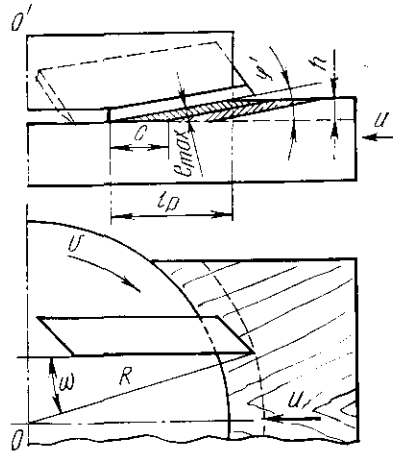


Рис. 12.12. Схема торцово-конического фрезерования

5. Мощность резания

$$N = \frac{Kbhv}{102 \cdot 60} = \frac{2,49 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 24}{102 \cdot 60} = 0,98 \text{ кат.}$$

6. Сила резания

$$P = \frac{102 N}{v_k} = \frac{102 \cdot 0,98}{23,7} = 0,42 \text{ кг.}$$

7. Класс шероховатости при $R_k = 857 \text{ мм}$

$$R_{z \text{ макс}} = \frac{c^2}{8 R_k} = \frac{4^2}{8 \cdot 857} = 0,0023 \text{ мм,}$$

что соответствует $\nabla 012$.

На рис. 12.12 дана схема торцово-конического фрезерования, когда ось фрезы $00'$ перпендикулярна к обработанной поверхности, а лезвие резца наклонено под углом ϕ' , что позволяет получить стружку малой толщины:

$$e_{\text{макс}} = c \sin \phi'.$$

Длина проекции режущей кромки должна быть меньше R , т. е.

$$l_{p \text{ макс}} = \frac{h}{\operatorname{tg} \phi'} < R,$$

где h — толщина снимаемого слоя, мм;

ϕ' — угол наклона режущей кромки к обработанной поверхности, град.

Угол перерезания волокон ψ можно регулировать углом установки ω между радиусом к лезвию и лезвием резца.

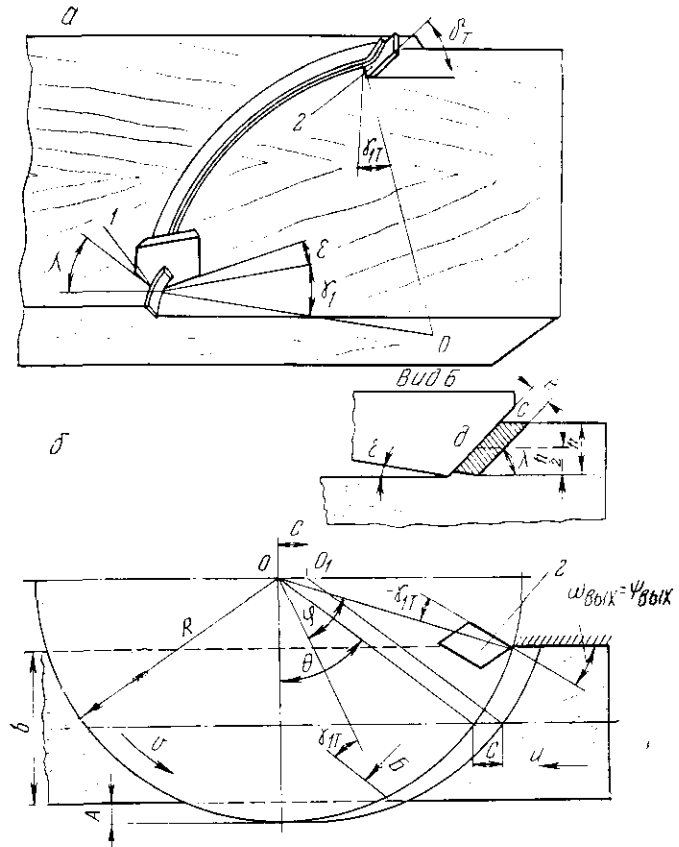


Рис. 12.13. Схема несимметричного встречного фрезерования: а — углы установки резцов; б — схема резания

Опытами установлено, что мощность резания при торцово-коническом фрезерования на 25—30% меньше, чем при цилиндрическом.

Когда $e_{\text{макс}} < 0,1 \text{ мм}$, получается удовлетворительная шероховатость поверхности. С учетом этого определяется связь между c и ϕ' :

$$0,1 = c \sin \phi'; \quad \sin \phi' = \frac{0,1}{c}.$$

При работе торцово-коническими фрезами на шероховатости поверхности отражается торцевое биеие фрезы, образующей на обработанной поверхности дуговые риски.

Коническое фрезерование не нашло широкого применения в обрабатывающей промышленности.

Если угол γ_k у основания конической фрезы равен 0 (рис. 12.11), можно перейти к торцевому фрезерованию.

Торцевое фрезерование. Торцевое фрезерование — процесс продольно-поперечного резания (рис. 12.13) плоской поверхности фрезой, ось вращения которой перпендикулярна к обрабатываемой поверхности.

Торцевое фрезерование свободно от некоторых недостатков, присущих цилиндрическому фрезерованию:

в момент врезания резца в древесину отсутствует скольжение его лезвия по обрабатываемой поверхности;

на обработанной поверхности нет кинематической волнистости;

неточность установки боковых резцов не оказывает существенного влияния на неравномерность процесса;

резцы торцевых фрез имеют меньшие размеры, их легче оснащать пластинками твердого сплава и др.

Торцевые фрезы (рис. 12.13) имеют боковые I и торцевые 2 режущие лезвия. Боковые лезвия работают по принципу несвободного цилиндрического фрезерования и производят отделение стружки (грубая строжка), а торцевые резцы, лезвия которых расположены параллельно обрабатываемой поверхности, формируют и защищают ее.

Углы установки резцов показаны на рис. 12.13:

γ_T — угол установки торцевого резца (между лезвием и радиусом, проведенным в отдаленную точку резца);

λ — угол наклона главного лезвия бокового резца;

ϵ — угол поднутрения вспомогательного лезвия бокового резца;

γ_1 — передний угол вспомогательного бокового лезвия.

Наличие отдельных бокового и торцевого резцов позволяет располагать их режущие лезвия независимо один от другого с оптимальными угловыми параметрами. При обработке брусковых деталей для боковых резцов оптимальными следует считать угол поднутрения $\epsilon = 1-2^\circ$ (меньшие значения для твердых лиственных пород, большие — для хвойных), угол наклона главного лезвия к обработанной поверхности $\lambda = 45^\circ$, угол наклона лезвия резца к осевой плоскости фрезы $\phi' = 15^\circ$.

Для торцевых резцов: передний угол $\gamma_T = 40^\circ$, задний угол $\alpha_T = 15-5^\circ$.

Угол пересечения волокон ψ_L лезвием торцевого резца непрерывно изменяется, резание переходит от продольного к поперечному, поэтому шероховатость поверхности на всем пути контакта резца с древесиной разная (рис. 12.14). По мере перехода к поперечному резанию образуются вырывы волокон, шероховатость поверхности возрастает, а при выходе резца из древесины получают отщепы.

Подача на резец на шероховатость поверхности влияет незначительно.

Опытами МЛТИ (Н. А. Кряжев) и БТИ (Н. С. Кузьмич) установлено, что при $\psi_L < 40^\circ$ шероховатость увеличивается, а при

$\psi_L > 40^\circ$ угол пересечения волокон не влияет на шероховатость. При $\psi_L = 90^\circ$ шероховатость обработанной поверхности наименьшая, а с уменьшением его шероховатость возрастает, так как резание от продольного переходит к поперечному. Минимальный угол ψ_L допускается: для хвойных пород древесины 40° ; для твердых лиственных пород 30° .

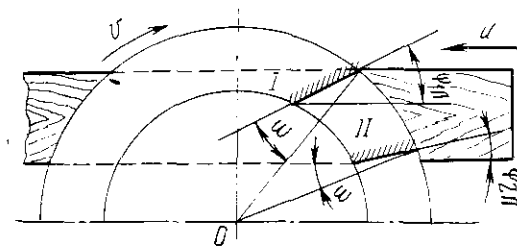


Рис. 12.14. Угол пересечения волокон ψ_L :
I — при входе резца в древесину; II — при выходе резца из древесины

Чтобы исключить резание поперек волокон и получить необходимый угол ψ_L , ширина обрабатываемой заготовки должна быть меньше радиуса фрезы и располагаться (проходить), минуя центр фрезы (рис. 12.14). Это ограничивает ширину фрезерования до 100 мм при диаметре фрезы $D = 250$ мм.

Средняя скорость резания наклонного главного бокового резца — переменная и зависит от радиуса R_0 для средней точки ∂ , лежащей на высоте $0,5h$ от обработанной поверхности (рис. 12.13):

$$v = \frac{\pi n}{60} \left(D_c + \frac{h}{\operatorname{tg} \lambda} \right);$$

$$\frac{D_0}{2} = R_0 = R_c + \frac{h}{2 \operatorname{tg} \lambda},$$

где D_c — диаметр окружности резания точки перехода главного и вспомогательного лезвий;

h — толщина снимаемого слоя, мм.

Угол контакта резца с древесиной

$$\varphi = \arccos \frac{R - (A + b)}{R} - \arccos \frac{R - A}{R}.$$

Дуга контакта резца с древесиной

$$\tilde{l} = R \left[\arccos \frac{R - (A + b)}{R} - \arccos \frac{R - A}{R} \right],$$

где R — радиус резания, мм;

A — вылет фрезы, величина выхода фрезы за обрабатываемую заготовку, мм;

b — ширина заготовки, мм.

Кинематический угол встречи

$$\Theta = \arccos \frac{R - \left(A + \frac{h}{2} \right)}{R}.$$

Толщина стружки в любой точке дуги контакта

$$e = c \sin \lambda \sin \Theta \text{ мм.}$$

Углы поворота при входе и выходе реза из древесины:

$$\varphi_{\text{вх}} = \arccos \frac{R - A}{R};$$

$$\varphi_{\text{вых}} = \arccos \frac{R - (A + b)}{R}.$$

Угол пересечения волокон $\psi_{\text{л}}$ лезвием торцевого реза (между лезвием торцевого реза и направлением волокон):

$$\psi_{\text{л вх}} = \arcsin \frac{R - A}{R} - \gamma_{\text{т}};$$

$$\psi_{\text{л вых}} = \arcsin \frac{R - (A + b)}{R} - \gamma_{\text{т}}.$$

При расчетах режимов резания можно пользоваться формулами для удельной силы резания при торцевом фрезеровании, которые получены канд. техн. наук Н. С. Кузьмичем при следующих условиях: $\delta = 60^\circ$, $\lambda = 45^\circ$, $\varepsilon = 2,5$ — для хвойных пород древесины и $\varepsilon = 1,5^\circ$ — для твердых лиственных пород; $\varphi' = 30^\circ$, $\delta_{\text{т}} = 50^\circ$, $\gamma_{\text{т}} = 30^\circ$, $R = 125 \text{ мм}$, $v = 36,7 \text{ м/сек}$, $c = 0,4 - 2,7 \text{ мм}$, $b = 40 - 100 \text{ мм}$, $h = 1,5 - 5 \text{ мм}$.

При обработке хвойных пород древесины

$$P = 0,551 + \left(\frac{1,03}{h^{0,5}} + 0,0024 b \right) e \text{ кг/мм.} \quad (12.14)$$

При обработке твердых лиственных пород

$$P = 0,75 + \left(\frac{1,7}{h^{0,47}} + 0,0048 b \right) e \text{ кг/мм.} \quad (12.15)$$

Обработка плоских поверхностей заготовок торцевым фрезерованием дает положительные результаты и внедрена в производство. Иногда торцевые фрезы устанавливают на одном валу с цилиндрической фрезой. Таким комбинированным инструментом можно обрабатывать одновременно две смежные кромки под углом (чаще 90°). Применение комбинированного инструмента в поточных линиях позволяет сократить количество рабочих шпинделей, упростить конструкцию станков, увеличить производительность и улучшить качество обработки.

Винтовое фрезерование. Процесс цилиндрического фрезерования прямыми ножами, параллельными оси вращения фрезы, характеризуется периодичностью сил, действующих со стороны инструмента на древесину (рис. 12.9), что ускоряет износ рабочих органов

станка, снижает стойкость режущего инструмента, увеличивает шероховатость обработанной поверхности и точность фрезеруемой детали, а также способствует возникновению производственного шума, утомляющего рабочих.

Следовательно, важно создать условия плавного непрерывного входа и выхода реза из древесины, сохраняя равномерное фрезерование за оборот фрезы. Фрезерование будет равномерным, если сумма срезов номинальной стружки, отделяемой резами за оборот, будет постоянной.

Это достигается применением винтовых фрез, зубья которых расположены по винтовым линиям под углом $\omega > 0$ к оси. Винтовые линии играют ту же роль, что и угол поворота лезвия в плане при строгании — распределить усилие врезания на отделяемый слой, плавно и постепенно перерезать волокна до вырыва более слабо связанных элементов.

Кроме того, благодаря углу поворота лезвия в плане создаются условия скользящего резания, подобно второму движению вдоль лезвия, придаваемому при нарезании хлеба, при рубке саблей с протяжкой, что обеспечивает более чистое и легкое перерезание волокон.

Угол поворота лезвия в плане $\omega > 0$ приводит к кинематическому заострению ножа, когда угол $\delta < \delta_N$, так как

$$\text{tg } \delta = \text{tg } \delta_N \cos \omega.$$

Плавное врезание и устранение вибраций бесспорно создают лучшие условия для стойкости реза и увеличивают период его работы от заточки до переточки.

У металлостов сплошные винтовые фрезы нашли широкое применение. В деревообработке использование длинных валов на фуговальных, рейсмусовых и многосторонних станках сдерживало внедрение винтовых ножей толщиной $s = 3 \text{ мм}$. Такие толстые винтовые ножи очень сложны в изготовлении и эксплуатации. Заточка их требует специальных сложных приспособлений и, кроме того, при ряде переточек нарушается плотность прилегания винтовых ножей к винтовому пазу вала и накладке, что отражается на качестве фрезерования.

Основной проблемой внедрения в производство винтовых ножей было упрощение их изготовления и эксплуатации. Эти вопросы решены ВНИИдревом за счет применения тонких серповидных ножей толщиной $s = 0,6 - 1 \text{ мм}$, которым винтовая форма придается непосредственно на ножевом валу с винтовой канавкой. ВНИИдрев провел большие исследования по внедрению тонких винтовых ножей на ряде предприятий, доказав целесообразность их применения.

На рис. 12.15 даны развертка и основные элементы винтовой цилиндрической фрезы: диаметр D , число зубьев z (I—IV), угол наклона лезвия ω , окружной шаг $t_{\text{окр}}$, осевой шаг

$$t_{\text{ос}} = \frac{t_{\text{окр}}}{\text{tg } \omega} = \frac{\pi D}{z \text{ tg } \omega}; \quad (12.16)$$

нормальный шаг

$$t_n = t_{окр} \cos \omega = \frac{\pi D}{z} \cos \omega.$$

Понятно, что при любом значении ω все лезвия винтовой фрезы лежат на ее цилиндрической поверхности и будь то прямоугольная фреза при $\omega = 0$ или любая винтовая с $\omega > 0$, все лезвия равно

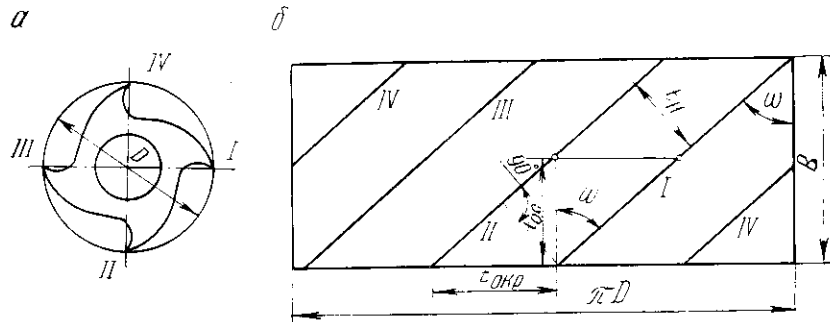


Рис. 12.15. Винтовая фреза:
а — элементы фрезы; б — развертка винтовой фрезы

удалены от центра на расстояние $\frac{D}{2} = R$. Следовательно, при одинаковых u , v и z подача на резец

$$c = \frac{1000 u}{zn}$$

и

$$e_\omega = e \sin \varphi,$$

где φ — угол поворота в рассматриваемый момент времени (угловая координата), град.

При прямоугольной фрезе все точки лезвия одновременно врезаются в древесину и каждому углу φ будет соответствовать толщина стружки

$$e = c \sin \varphi.$$

Так как лезвие винтовой фрезы наклонено к оси вращения, то оно будет врезаться постепенно при непрерывном увеличении угла φ_ω и

$$e_\omega = c \sin \varphi_\omega > e \sin \varphi.$$

Следовательно, при наклонном лезвии под углом ω на его длине l , увеличивающейся по мере врезания, толщина стружки e_ω также будет непрерывно возрастать и сечение стружки вместо прямоугольного be при $\omega = 0$ будет в виде треугольника или трапеции.

Это показано на рис. 12.16 и рис. 12.17, где дана развертка в зоне контакта резца с древесиной,

$$\frac{\pi D}{360} \varphi_0 = \frac{2\pi R \varphi_0}{360} = \frac{R \varphi_0}{57} = R \varphi_0 \text{ рад.}$$

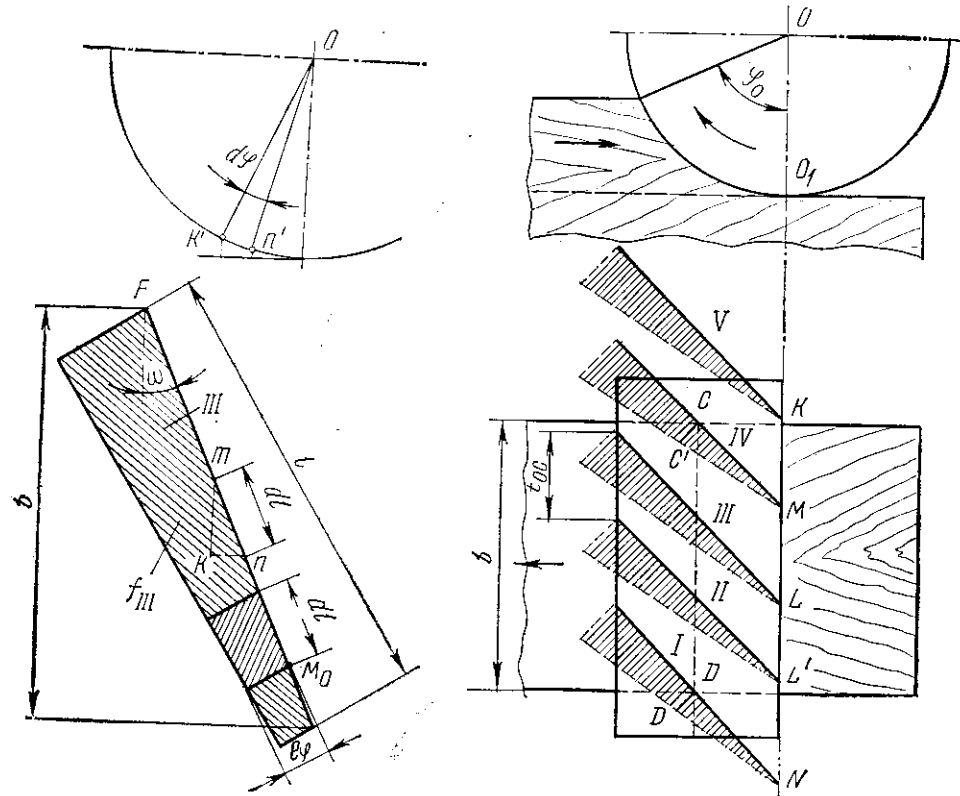


Рис. 12.16. Изменение толщины стружки по длине зуба винтовой фрезы

Рис. 12.17. Равномерное фрезерование

При ширине заготовки b и длине фрезы по оси B осевой шаг

$$t_{ос} = NL' = L'L = LM = MK$$

и в рассматриваемом случае

$$b = 3t_{ос}.$$

Если зуб II врезается в начале дуги контакта O_1 и выходит из древесины в конце дуги контакта φ_0 , то в точке L' входа $e_{\varphi_0} = 0$, а в точке выхода из дуги контакта

$$e_{\varphi_0} = c \sin \varphi_0$$

и сечение стружки будет иметь форму треугольника.

Зуб III, лезвие которого параллельно лезвию зуба II и отстоит по оси на расстоянии t_{oc} , также грезается от θ_1 до φ_0 , площадь сечения будет иметь форму треугольника.

Зуб I в это время в положении I снимает площадь в виде трапеции, в положении IV — дополнительно в виде треугольника, а в сумме такую же стружку, как и зубья II и III.

Итак, за оборот будут постепенно сняты три одинаковые стружки. Однако при разных углах поворота от $\varphi=0$ до φ_0 зуб снимает только часть этого сечения и, следовательно, в любой момент на сколько один зуб увеличивает сечение среза, на столько другой, соответствующий зуб уменьшает его, а сумма срезов всех зубьев за один оборот фрезы остается неизменной и фрезерование будет равномерным.

Если ширина b делится зубьями на неравные части, т. е. $\frac{b}{t_{oc}}$ — неправильная дробь, то увеличение и уменьшение срезов будет неодинаковым и фреза будет работать неравномерно.

Если взять элемент длины зуба dl (рис. 12.16) и определить толщину стружки, соответствующую точке элемента M_0 , где $e_\varphi = c \sin \varphi$, то очевидно, что элементарное сечение

$$df = e_\varphi dl,$$

а общее сечение стружки, срезаемой в данный момент f всей режущей частью зуба,

$$f = \int_0^l c \sin \varphi dl.$$

Из треугольника mnk следует

$$dl = mn = \frac{nk}{\sin \omega},$$

где

$$nk = n'k' = \frac{D}{2} d\varphi,$$

т. е.

$$dl = \frac{Dd\varphi}{2 \sin \omega},$$

и выражение для всего сечения стружки примет вид

$$f = \frac{Dc}{2 \sin \omega} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi = \frac{Dc}{2 \sin \omega} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2).$$

Существенное отличие работы винтовой фрезы от прямозубой заключается в том, что у прямозубой фрезы ширина стружки постоянна и равна ширине фрезерования; у спиральной фрезы ширина стружки, равная активной длине режущей кромки, переменна и определяется для данного положения зуба по формуле

$$l_{\varphi_1-\varphi_2} = \frac{D}{2 \sin \omega} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi = \frac{D}{2 \sin \omega} (\varphi_2 - \varphi_1),$$

где φ_1 и φ_2 — углы входа и выхода резца из древесины, рад.

Условие равномерности фрезерования. Определим угол ω исходя из условий равномерности фрезерования. На рис. 12.17 приведен пример, при $b=3t_{oc}$, когда за оборот фрезы последовательное увеличение и соответствующее уменьшение площадей срезов отдельными зубьями в сумме было постоянно. Это определило равномерность фрезерования и постоянную нагрузку на фрезу в любой момент, а следовательно, и одинаковое суммарное касательное усилие и мощность резания.

Если ширина фрезерования b не будет кратна осевому шагу t_{oc} , то сумма площадей срезов в каждый момент непостоянна и фрезерование будет неравномерным.

Условие равномерности фрезерования

$$Ц = \frac{b}{t_{oc}},$$

где $Ц$ — целое число.

С возрастанием $Ц$ увеличивается количество зубьев, одновременно участвующих в работе, и растут мощность N и сила резания P . Проф. М. Н. Ларин рекомендует принимать $Ц=2-3$. Однако специфика фрезерования древесины при больших длинах B пожевых валов позволяет принимать $Ц=1$ для снижения N и P :

$$\frac{b}{t_{oc}} = \frac{b}{\frac{\pi D}{z \operatorname{tg} \omega}} = Ц$$

или

$$Ц = \frac{bz \operatorname{tg} \omega}{\pi D},$$

откуда

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{\pi D}{bz}. \quad (12.17)$$

Пример 6. Дано: $b=640$ мм, $D=128$ мм, $z=2$.

Определить угол наклона винтовой линии резца.

Решение. По формуле (12.17) угол наклона винтовой линии резца

$$\omega = \operatorname{arctg} \frac{\pi D}{bz} = \operatorname{arctg} \frac{3,14 \cdot 128}{640 \cdot 2} = 18^\circ.$$

Динамика винтового фрезерования. В процессе фрезерования винтовыми ножами с $\omega > 0$ на древесину действует сила $P_{об}$ (рис. 12.18) под углом к режущей кромке.

Сила $P_{об}$ зависит от геометрии резца, породы древесины, режимов резания и других факторов, имеющих место при фрезеровании

вообще. Но при фрезеровании винтовой фрезой с $\omega > 0$ приходится еще учитывать непрерывное увеличение активно действующей режущей кромки $l_\varphi = f(\varphi)$. Толщина стружки

$$e_\varphi = c \sin \varphi.$$

Длина стружки

$$l_\varphi = \frac{D}{2 \sin \omega} (\varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}}),$$

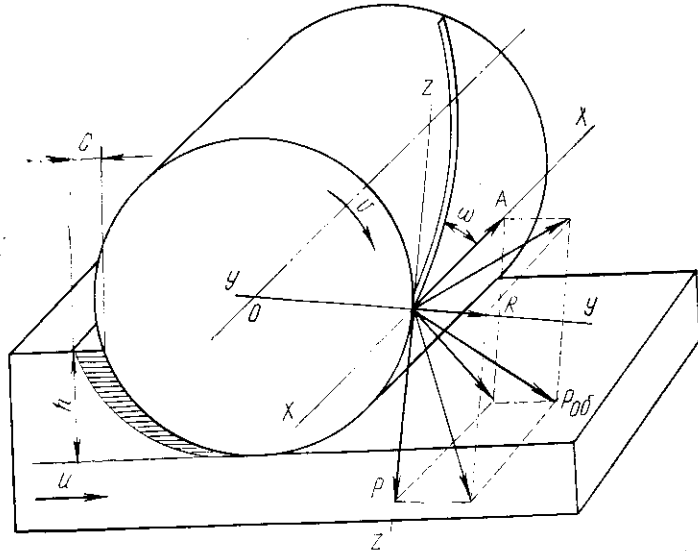


Рис. 12.18. Силы, действующие на резец при винтовом фрезеровании

где $\varphi_{\text{вых}}$ и $\varphi_{\text{вх}}$ — углы входа и выхода резца из древесины, рад.

Это обстоятельство создает трудности для аналитического расчета силовых параметров.

Если при прямозубой фрезе, когда $\omega = 0$, сила

$$\bar{P}_{00} = \bar{P} + \bar{R}$$

в координатных осях zz и yy (рис. 12.18), то при винтовой фрезе с $\omega > 0$ появляется еще по оси xx осевая сила A и

$$\bar{P}_{00} = \bar{P} + \bar{R} + \bar{A}.$$

Здесь \bar{A} и \bar{R} не влияют на крутящий момент, а следовательно, и на мощность резания N , так как они лежат в плоскости, перпендикулярной к P .

В точке M на лезвии выделим бесконечно малый элемент dl и соответствующее ему поперечное сечение df стружки (рис. 12.19).

На длине dl необходимо приложить элементарное касательное усилие dP для среза стружки:

$$dP = Kc \sin \varphi dl = K \frac{Dc \sin \varphi}{2 \sin \omega} d\varphi.$$

Так как толщина стружки переменная на изменяющейся длине режущей кромки, то

$$P = \int_{\varphi_{\text{вх}}}^{\varphi_{\text{вых}}} \frac{KDc \sin \varphi}{2 \sin \omega} d\varphi.$$

Но вынос значения K за знак интеграла недопустим, так как с изменением угла φ изменяется также e .

Таким образом, силу P аналитически определить нельзя. Также нельзя аналитически рассчитать радиальную силу

$$R = P_0 - P_n \operatorname{tg}(90 - \delta - \varphi_{\text{тр}})$$

и осевую силу (рис. 12.18)

$$A = P \operatorname{tg} \omega.$$

Так как при припусках на обработку $h = 1 - 2$ мм (даже до 15 мм, по опытам БТИ) различие между P и Q ничтожно мало, то допустимо в формуле

$$Q = P \cos \varphi + R \sin \varphi$$

заменить Q на P , и тогда

$$R = \frac{1 - \cos \varphi}{\sin \varphi} P.$$

В приведенных формулах берется среднее значение угла φ .

Определить силы можно экспериментально, но это сложный многогранный процесс, пока не имеющий завершенных решений.

Изложенные ранее обобщения

$$P_{+-||} = p_{+-||} + k_{+-||} e$$

показывают, что с увеличением угла φ сила $P_{+-||}$ при продольном резании уменьшается, резание переходит в продольно-поперечное

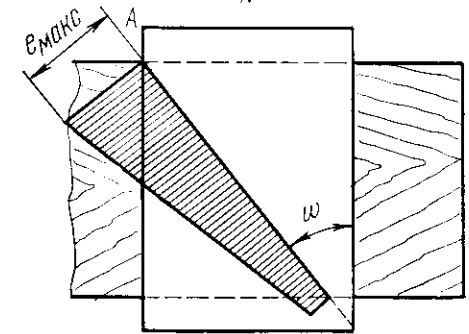
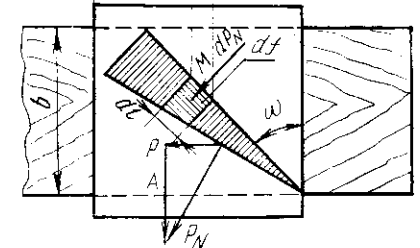
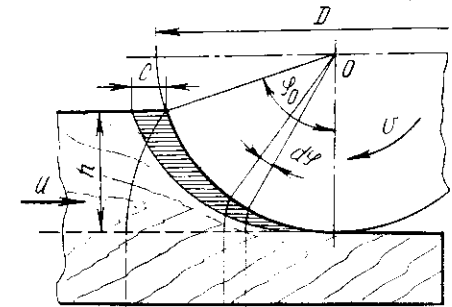


Рис. 12.19. Схема для определения [силы P_N , действующей нормально к лезвию, расположенному под углом $\omega > 0^\circ$

направление, а при поперечном резании с увеличением угла ω резание переходит в поперечно-продольное.

В порядке первого приближения можно принять

$$N_{\omega} = N a_{\omega}, \quad (12.18)$$

где N — мощность фрезерования прямыми ножами при $\omega = 0$, рассчитываемая по ранее изложенной методике для прямозубой фрезы;

a_{ω} — коэффициент, учитывающий изменение мощности при резании винтовыми ножами с углом поворота в плане ω .

Коэффициент a_{ω} при продольном фрезеровании винтовыми ножами берется из приложения 13, а при поперечном фрезеровании — из приложения 14.

С увеличением угла ω при продольном фрезеровании шероховатость поверхности уменьшается на 1—2 класса, но получаются боковые вырывы, что ограничивает увеличение угла ω сверх 30° .

При поперечном фрезеровании шероховатость поверхности уменьшается на 2—4 класса, но увеличение $\omega > 30^{\circ}$ влечет за собой значительный рост K .

Случай фрезерования винтовыми тонкими ножами при $s = 0,6-1$ мм дается в исследованиях канд. техн. наук А. М. Векшина.

Сложность и многофакторность процесса винтового фрезерования не позволили пока дать методику расчета силовых параметров и режимов резания.

Но эти исследования установили практическую возможность перехода на тонкие серповидные ножи толщиной до 1 мм, производство которых налаживается. С внедрением винтовых ножей производственный шум снижается в 2—3 раза. Заточка винтовых ножей методом прифуговки значительно упрощает их эксплуатацию.

Приближенный метод расчета заключается в следующем.

1. При заданных условиях обработки рассчитывается мощность N прямозубой фрезы с $\omega = 0$ для продольного или поперечного фрезерования по методу, изложенному ранее.

2. При заданном угле ω находим поправочные коэффициенты из приложения 13 или 14 и определяем мощность

$$N_{\omega} = a_{\omega} N \text{ кВт.}$$

3. Рассчитываем касательную силу резания

$$P_{\omega} = \frac{102 N_{\omega}}{v} \text{ кг.}$$

4. Радиальная сила

$$R = \frac{1 - \cos \varphi}{\sin \varphi} P_{\omega} \text{ кг.}$$

5. Осевая сила

$$A = P_{\omega} \operatorname{tg} \varphi \text{ кг.}$$

12.4. Анализ факторов, влияющих на производительность и шероховатость поверхности при фрезеровании

Общие сведения. Основные формулы (12.8) и (12.9) расчета средней силы резания при фрезеровании используем для анализа влияния отдельных факторов на производительность и шероховатость фрезерованной поверхности.

Подставив в формулу (12.8) $\bar{l} = \frac{h}{\sin \Theta} = \sqrt{hD}$, получим

$$P = a_p p b \frac{h}{t \sin \Theta} + \frac{chkb}{t} \quad (12.19)$$

или

$$P = a_p p b \frac{\sqrt{hD}}{t} + \frac{chkb}{t}, \quad (12.20)$$

откуда

$$c = \frac{Pt - a_p p b \sqrt{hD}}{kbh}. \quad (12.21)$$

Влияние угла резания. С увеличением угла резания δ возрастает величина k , что приводит к росту силы резания P . Если принять мощность N и силу резания P постоянными, то по формуле (12.21) подача на резец s , а следовательно, и скорость подачи u уменьшатся при увеличении k , которое зависит от угла резания δ и определяется по формуле (7.38).

Так как производительность уменьшится, то шероховатость поверхности будет также меньше, а путь контакта резца в древесине остается постоянным, поэтому величина a_p почти не изменяется.

На станках с механической подачей рекомендуются углы резания $\delta = 75-85^{\circ}$. При этом шероховатость поверхности улучшается за счет образования уплотненной стружки.

Влияние припуска на обработку. С увеличением припуска на обработку h возрастают средний кинематический угол встречи $\Theta = \arcsin \sqrt{\frac{h}{D}}$ и зависящие от него величины P и N , а следовательно, сила P и мощность резания N . Рост силы P и мощности резания превышает увеличение припуска на обработку h .

При постоянных силе и мощности резания, подаче на резец производительность уменьшается, так как с увеличением припуска на обработку h возрастают удельное давление k и удельная сила резания по задней поверхности резца p .

Уменьшение подачи на резец при остром резце благоприятно скажется на уменьшении шероховатости поверхности. Но с увеличением припуска на обработку h путь контакта $\bar{l} = \sqrt{hD}$ возрастает, ускорится затупление резца, увеличится коэффициент a_p , поэтому можно ожидать ухудшения шероховатости обработки.

Влияние диаметра ножевого вала. С увеличением диаметра ножевого вала уменьшаются кинематический угол встречи $\Theta = \psi = \arcsin \sqrt{\frac{h}{D}}$ и зависящие от него величины p и k , одновременно возрастает шаг $t = \frac{\pi D}{z}$, поэтому средняя сила и мощность резания уменьшаются. Следовательно, на станках с ручной подачей можно повысить производительность. С увеличением диаметра ножевого вала удлиняется путь резца в древесине ($\bar{l} = \sqrt{hD}$), при этом возрастает a_p .

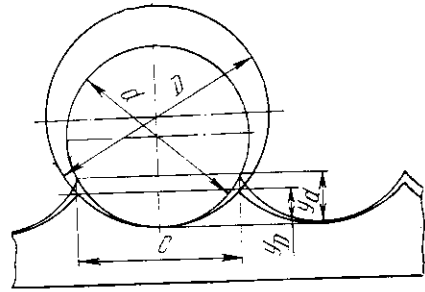


Рис. 12.20. Волнообразование при разных диаметрах вала:
 h — высота гребня (глубина волны)

Влияние числа ножей z и оборотов вала n . С увеличением числа резцов уменьшается шаг между ними. Согласно формулам (12.9) и (12.10), это повышает среднюю касательную силу резания P и мощность резания N .

Средняя сила P_t на пути контакта \bar{l} при срезании одной стружки

$$P_t = \frac{\pi D}{z \bar{l}} P = \frac{t}{\bar{l}} P \quad (12.22)$$

с уменьшением шага t также уменьшается.

При ручных подачах увеличение числа «ножей» нежелательно, так как может привести к снижению производительности вследствие роста силы резания и сопротивления подаче. Путь контакта \bar{l} и a_p остаются без изменения.

При механической подаче с целью повышения производительности и улучшения шероховатости поверхности обработки при больших скоростях подачи целесообразно применять многоножевые валы. С увеличением числа оборотов ножевого вала при постоянном диаметре уменьшаются силы резания P , $P_{зуб}$, P_t и сопротивление подаче Q , а мощность резания $N = \frac{Pv}{102}$ возрастает.

При $N = \text{const}$ сила резания

$$P = \frac{102 N}{v} = \frac{102 \cdot 60 N}{\pi D n}$$

и подача на резец

$$c = \frac{1000 u}{z n}$$

уменьшаются.

Значительное уменьшение P и Q на станках с ручной подачей повышает производительность. Увеличение пути контакта $\sqrt{hD} \cdot n$ приводит к росту a_p .

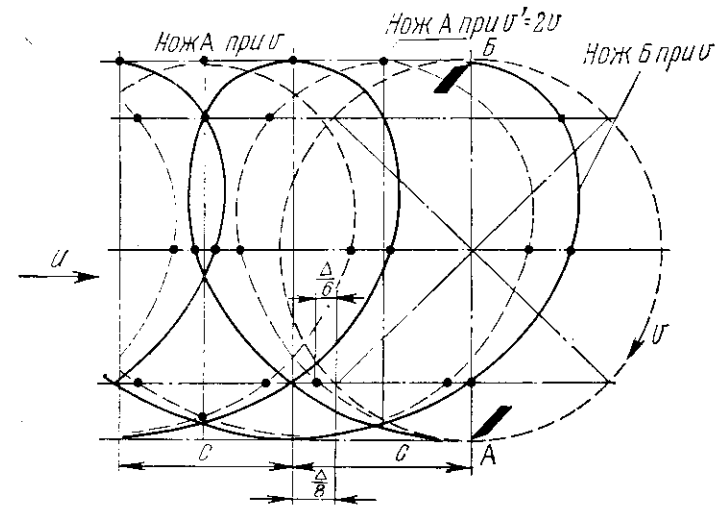


Рис. 12.21. Траектория лезвия ножа при фрезеровании

Уменьшение подачи на резец и возмущающей силы P_t улучшает качество обработки, так как уменьшается вибрация заготовки.

Чтобы выяснить влияние числа ножей и оборотов на глубину неровностей при фрезеровании, рассмотрим траекторию лезвия ножа. На рис. 12.21 пунктиром показана траектория ножа A при увеличенном в два раза числе оборотов, когда при повороте ножа на $1/8$ окружности заготовка переместилась не на $\Delta/8$, а на $\Delta/16$ при той же скорости подачи.

Как при увеличении числа ножей до двух (A и B), так и при повышении числа оборотов в два раза при одном ноже A была получена одна и та же длина волны c . Высота гребня при увеличении числа ножей меньше, чем при увеличении числа оборотов, т. е. шероховатость меньше. Следовательно, теоретически увеличение числа ножей уменьшает кинематические неровности. Однако при ручной подаче материала увеличение числа ножей ведет к снижению производительности. Поэтому рекомендуется повышать число оборотов и диаметр вала.

При механической подаче целесообразно увеличивать число ножей, так как это обеспечивает значительный рост производительности и уменьшение шероховатости поверхности.

Теоретически увеличение числа ножей приводит к уменьшению длины волны и высоты ее гребня, причем длина волны при прочих равных условиях равна подаче на нож c :

$$c = \frac{1000 u}{zn},$$

т. е. чем больше ножей, тем меньше длина волны.

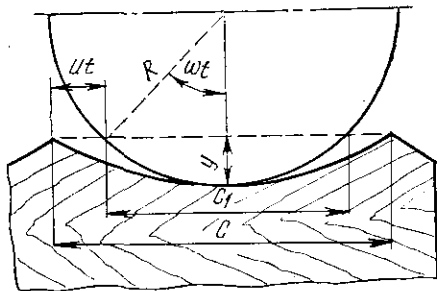


Рис. 12.22. Элементы для расчета высоты гребня и длины волны

Основным показателем шероховатости поверхности является не длина волны, а высота гребня. Определение шероховатости по показателю длины волны приводит к снижению производительности.

Например, при $z=2$, $n=4000$ и $c=1$ мм

$$u = \frac{czn}{1000} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 4000}{1000} = 8 \text{ м/мин.}$$

Однако в волнообразовании при скорости подачи до 40 м/мин участвует всего один нож, т. е. фактически можно будет работать

при $c=1$ мм только со скоростью подачи $u = \frac{czn}{1000} = 4$ м/мин.

Вместе с тем даже для достижения минимальной глубины 0,02 мм, которая требуется при склеивании и при чистовом фрезеровании без дальнейшей обработки, можно работать при $c=4-5$ мм, т. е. при

$$u = \frac{8 \cdot 4000}{1000} = 32 \text{ м/мин.}$$

Из рис. 12.22 следует, что

$$\frac{c}{2} = R \sin \omega t + ut, \quad (12.23)$$

где R — радиус окружности резания, мм;
 ω — угловая скорость вращения ножевого вала, град/сек;
 u — скорость подачи, м/мин;
 t — время поворота ножевого вала на угол ωt , сек.

С достаточной для практических расчетов точностью можно за длину волны c принять хорду c_1 окружности резания. Например, при $c_1 \approx c=2$ мм, $n=3600$ об/мин, $R=60$ мм и $z=2$

$$\sin \omega t = \frac{c_1}{2r} = \frac{2}{120} = 0,0167, \text{ откуда } \omega t = 1^\circ.$$

Следовательно,

$$t = \frac{60'' (\omega t)^\circ}{360^\circ} = \left(\frac{1}{21600} \right)''$$

и

$$u = \frac{czn}{60} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 3600}{60} = 240 \text{ мм/сек.}$$

откуда

$$c = 2ut + 2r \sin \omega t = 2 \cdot 240 \frac{1}{21600} + 120 \cdot 0,0167 = 2,026 \text{ мм.}$$

Если принять хорду c_1 за длину волны c , допустим ошибку в 1,3%, которая не влияет на практические результаты.

Определим возможную подачу на нож исходя из глубины волны $y=R_{z \text{ макс}}$. Глубина волны (рис. 12.22) определяется из соотношения

$$R_{z \text{ макс}} = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{c}{2}\right)^2}, \quad (12.24)$$

т. е. $R_{z \text{ макс}} = 60 - \sqrt{60^2 - 1^2} = 0,009$ мм.

Практически же для склеивания допустимо $R_{z \text{ макс}}=0,02$ мм, т. е. при обратном расчете получим

$$0,02 = 60 - \sqrt{60^2 - \left(\frac{c}{2}\right)^2},$$

т. е. $c=3,1$ мм. Следовательно, показателем шероховатости поверхности надо принять

$$R_{z \text{ макс}} = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{c}{2}\right)^2}, \text{ а не } c = \frac{1000 u}{zn}.$$

Кроме того, величина c , рассчитанная по последней формуле, не соответствует практическим значениям, так как точность установки ножей не обеспечивает работу всех лезвий по одной окружности резания.

Влияние точности установки ножей. Проф. Ф. М. Манжос приводит следующие данные о неточности радиусов резцов (табл. 12.3).

Из табл. 12.3 следует, что практически трудно достичь точности установки меньше 0,02 мм. Причина этому — неточность установки резцов в ножевых валах и фрезах, отклонение режущих лезвий от заданной формы, эксцентриситет установки фрез на рабочих шпинделях и биение шпинделей. Все это приводит к тому, что радиусы резания отдельных режущих лезвий отличаются друг от друга на некоторую величину $\tau=0,07-0,15$ мм. Прифуговка лезвий уменьшает неточность установки.

Схемы цилиндрического фрезерования при различной точности установки резов изображены на рис. 12.23: а — теоретическая схема волнообразования, когда $R = \text{const}$ для всех лезвий; б — резец с меньшим радиусом резания r участвует в формировании поверхности обработки и подрезает вершинки гребней, образуемых резцом с большим радиусом R .

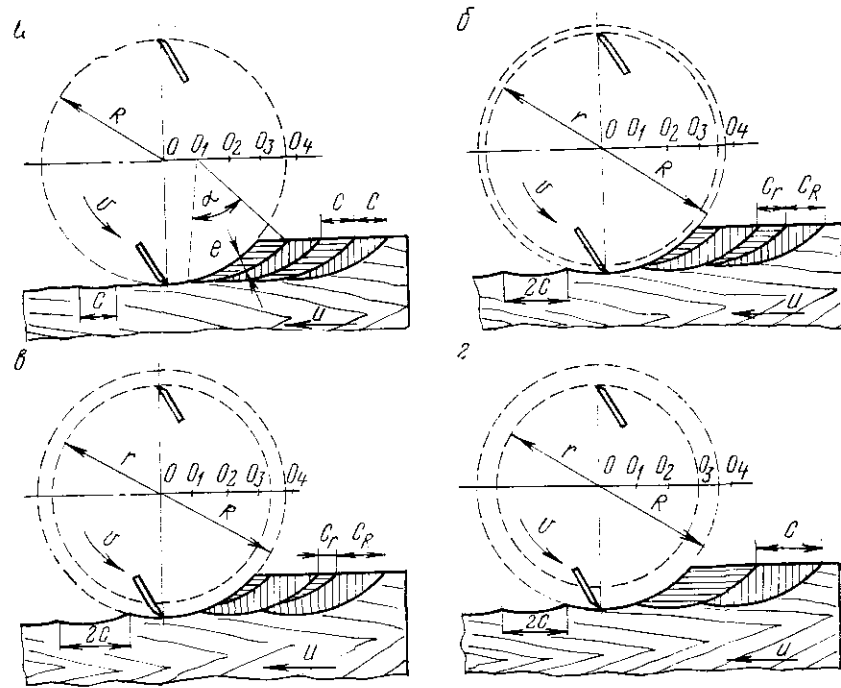


Рис. 12.23. Схемы фрезерования при различной точности установки резов ($z = 2$)

Если траектория ножа с меньшим радиусом r проходит над гребнем, образуемым ножом с радиусом R , то неточность установки для этого случая определится по уравнению

$$\tau = \frac{c_{кр}^2}{R + r}$$

Подача на резец

$$c_{кр} = \sqrt{\tau(R + r)} \approx \sqrt{D\tau} \quad (12.25)$$

и скорость подачи

$$u_{кр} = \frac{zn}{1000} \sqrt{D\tau},$$

соответствующие случаю, когда второй нож перестает формировать обрабатываемую поверхность, называются критическими.

Неточность установки ножей

Способы установки ножей и заточки режущего инструмента	Значение τ , мм	
	на ножевых валах	на фрезерных инструментах
Установка по контрольному бруску:		
ножей, заточенных на ножеточильных автоматах	0,1—0,15	0,05—0,1
ножей, подогнанных оселком по проверочной линейке	0,07—0,1	
Установка при помощи индикатора:		
ножей, заточенных на ножеточильных автоматах	0,08—0,15	0,05—0,1
ножей, подогнанных оселком	0,07—0,1	
Установка фрезы:		
при заточке на заточных аппаратах с подгонкой оселком		0,08—0,15
с подгонкой оселком		0,02—0,06
Заточка заточным приспособлением:		
на шпинделе	0,06—0,1	0,05—0,1
фугованием лезвий	0,02—0,03	0,02

При $c > c_{кр}$ обработанная поверхность формируется двумя ножами (рис. 12.23, б). При $c < c_{кр}$ резец с меньшим радиусом участвует в стружкообразовании (рис. 12.23, в). Неточность установки при этом

$$\tau \leq \frac{2c \sqrt{2Rh - h^2 - c^2}}{R + r} \quad (12.26)$$

При

$$\tau \geq \frac{2c \sqrt{2Rh - h^2 - c^2}}{R + r} \quad (12.27)$$

второй нож в резании не участвует (рис. 12.23, г).

Для числа ножей $z > 2$ закон формирования поверхности выражается более сложно. Однако практически применение многолезцового инструмента не уменьшает кинематические неровности при обработке. Только при $u > 60$ м/мин многолезцовые ножевые валы используются более полно. В этом случае все резцы инструмента или почти все участвуют в формировании поверхности.

Влияние выставки ножей. Выставка ножа над телом ножевого вала и стружколомателем влияет на выбор количества ножей при больших скоростях подачи. Обозначим выставку лезвия ножа A (рис. 12.24) над окружностью тела вала через x и определим bc и ac в момент выхода ножа из древесины:

$$bc = \sqrt{r_b^2 - (r_b + x - h)^2};$$

$$ac = \sqrt{(r_b + x)^2 - (r_b + h)^2},$$

отсюда

$$ab = ac - bc.$$

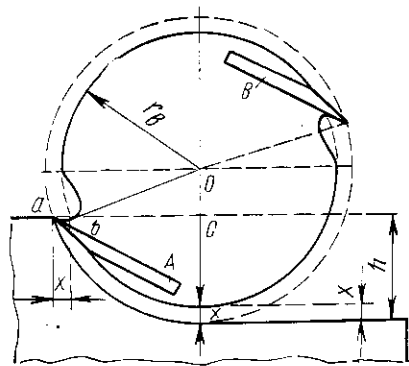


Рис. 12.24. Влияние выставки ножа на подачу

При повороте вала на $\frac{360^\circ}{z}$

до выхода следующего ножа *B* из древесины нельзя переместить заготовку по направлению подачи больше, чем на величину *ab*. Время от выхода ножа *A* до входа ножа *B*

$$t_{\text{сек}} = \frac{GO}{nz}.$$

Следовательно,

$$u_{\text{макс}} \leq \frac{abzn}{60}. \quad (12.28)$$

Например, $n=4160$ об/мин, $x=8$, $r_b=58$ мм, $h=5$ мм, $z=2$, тогда $bc=13,4$ мм, $ac=24$ мм и $ab=5,6$ мм,

$$u_{\text{макс}} \leq \frac{5,6 \cdot 4160 \cdot 2}{60 \cdot 1000} \approx 47 \text{ м/мин.}$$

При больших скоростях *u* брусок будет касаться тела вала, что недопустимо. Для $u > 47$ м/мин необходимо увеличить число ножей или обороты вала. Выставка ножа ограничивается величиной 1—1,5 мм во избежание вибрации.

О стружколомателе. Фрезерующие ножевые валы снабжаются клиньями-стружколомателями (см. рис. 12.1), которые выполняют две функции: 1) закрепляют нож в ножевом валу; 2) надламывают стружку с изгибом ее для предотвращения образования опережающей трещины и улучшения обработанной поверхности.

По опытам В. А. Тихонова (МЛТИ) при $e < 0,2$ мм угол наклона грани стружколомателя $\delta_{\text{стр}}=50^\circ$, а расстояние от лезвия ножа до кромки стружколомателя должно быть 0,5—1 мм; при $e > 0,2$ мм и угле $\delta_{\text{стр}}=50^\circ$ расстояние от лезвия ножа до кромки стружколомателя рекомендуется 0,5 мм, при этом отсутствует опережающая трещина, стружка близка к сливной, качество обработки улучшается.

Заточка ножей. Резцы и ножи строгальных станков затачиваются шлифовальным кругом с последующей правкой оселком для удаления заусениц.

На рис. 12.25 показаны различные относительные положения круга *A* и ножа *C* при заточке. На рис. 12.25, *a* лезвие ножа расположено перпендикулярно к плоскости вращения, т. е. составляет

с этой плоскостью угол $\delta=90^\circ$. Салазка с ножом *C* перемещается параллельно оси OO_1 круга.

Задняя поверхность ножа получается при этом цилиндрической с основанием в виде дуги *ij*, радиус которой равен радиусу круга *A*. Это так называемая *вогнутая заточка*. На рис. 12.25, *б* угол φ между лезвием *ab* резца и средней плоскостью круга меньше прямого.

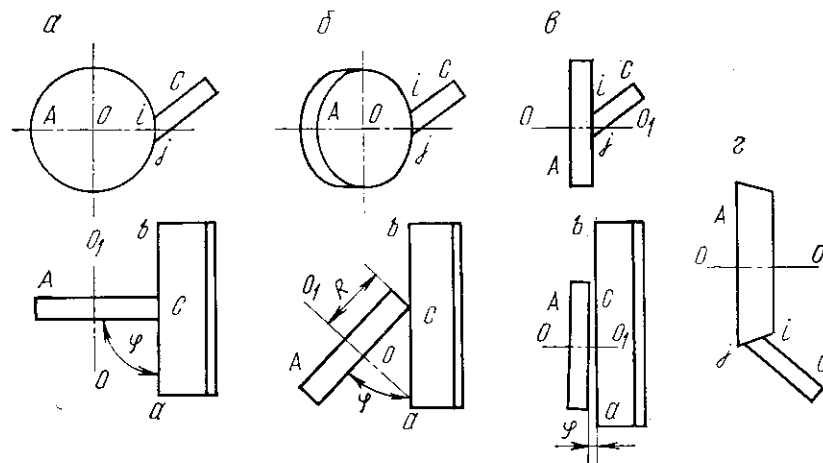


Рис. 12.25. Способы заточки ножей

В этом случае задняя поверхность резца будет дугой эллипса *ij*. Ее можно принять приблизительно за дугу круга радиусом

$$R' = \frac{R}{\sin \varphi}, \quad (12.29)$$

где *R* — радиус шлифовального круга.

На рис. 12.25, *в* показана плоская заточка. Угол φ равен 1—3°, причем торцевая поверхность круга *A* — рабочая и лезвие *ab* перемещается почти в плоскости этого торца, поэтому задняя поверхность ножа получается почти плоской. Для этого случая нужно принять $R=\infty$.

На рис. 12.26, *г* приведен случай заточки коническим кругом с образующей *ij*. В этом случае заточка тоже будет плоской.

Для того чтобы выяснить влияние заточки ножа на подачу, обратимся к рис. 12.26, где показан вращающийся в направлении стрелки 1 около оси *O* вал. На нем установлен нож *acdf*, лезвие которого описывает в подаваемой по стрелке 2 заготовке *A* траекторию *jna* — циклоиду, принимаемую приблизительно за дугу круга радиуса $D/2$ (где *D* — диаметр окружности, описываемой точкой *a* лезвия ножа).

Точки *c* и *a* ножа, вращаясь около оси *O*, движутся по дугам *ci* и *ab*, а точка *a* на заготовке перемещается при подаче по прямой *aiH*. При нормальной работе ножа точка *a* в заготовке не долж-

на на своем пути встречать точку c на задней поверхности резца, иначе заготовка будет давить на резец.

Обозначим в треугольнике cOa угол через ξ , соответствующий стороне $ca = f_0$, и угол ζ в треугольнике iOa , соответствующий стороне $ia = \Sigma$. Длина пути Σ точки a при движении заготовки соответствует промежутку времени t , в течение которого точки c и a движутся по дугам ci и ab . Очевидно, им соответствуют равные центральные углы cOi и aOb .

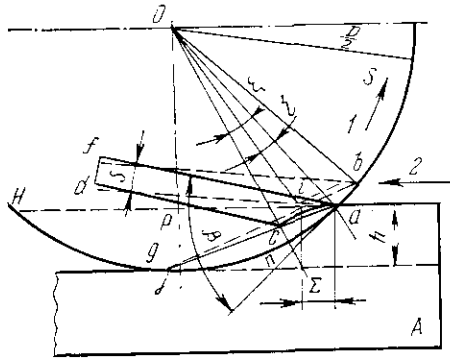


Рис. 12.26. Влияние заточки ножа на подачу

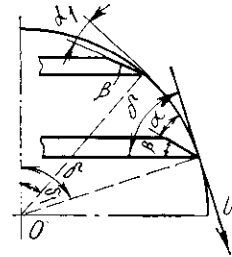


Рис. 12.27. Влияние расстояния от ножа до центра вала на углы резания

Обозначим через ω угловую скорость вращения вала. Определим скорость подачи заготовки

$$u = \frac{\Sigma \omega}{t}.$$

Время

$$t = \frac{\xi - \zeta}{\omega},$$

отсюда

$$u_{\max} = \frac{\omega \Sigma}{\xi - \zeta}.$$

Например, при $\xi = 11,5^\circ$, $\zeta = 6^\circ$, $n = 4160$ об./мин, $h = 5$ мм, $z = 2$, $\Sigma = 0,46$ мм:

$$\omega = \frac{360 n}{60} = 6 n = 24\,960,$$

$$u_{\max} = \frac{0,46 \cdot 24\,960 \cdot 60}{(11,5 - 6) 1000} = 138 \text{ м/мин.}$$

Установлено, что с учетом выставки ножей можно работать со скоростью подачи 47 м/мин. Следовательно, если при той же выставке ножей увеличить число ножей в три раза, т. е. до шести, то можно будет работать со скоростью подачи 141 м/мин ($47 \text{ м/мин} \times 3$). Сопоставляя $u = 138 \text{ м/мин}$ и $u = 141 \text{ м/мин}$, приходим к выводу, что можно работать со скоростью подачи $u_{\max} = 138 \text{ м/мин}$.

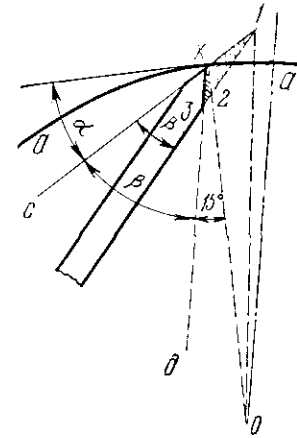


Рис. 12.28. Схема обратной заточки

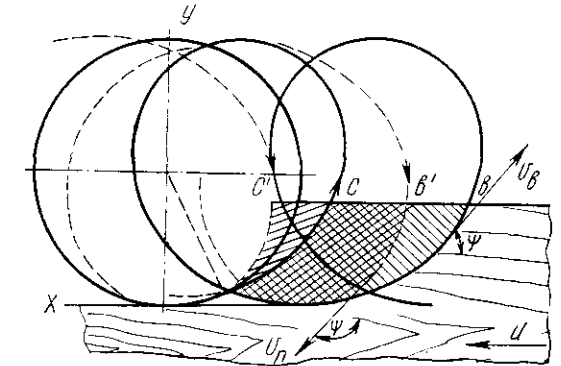


Рис. 12.29. Схема стружкообразования при встречном и попутном фрезеровании (по Ф. М. Манжосу)

Плоская заточка создает более благоприятные условия для повышения производительности, чем вогнутая. Вогнутая удобна при правке ножа и обеспечивает получение острой кромки, исключая ее изгиб при правке.

Для обычных условий при скоростях подачи 4—20 м/мин описанное явление имеет лишь теоретический интерес. Оно приобретает значение только при больших скоростях $u > 80-100 \text{ м/мин}$.

Если задний угол мал, то нажим материала на тыльную часть резца можно наблюдать не только в ножевых валах строгальных станков, но также и в дисковых пилах, цепнодолбежных станках и др.

В многоножевых валах при одном и том же радиусе окружности резания и угле заострения резца β с расположением ножей дальше от центра угол резания δ уменьшается (рис. 12.27). Следовательно, при угле $\beta = \text{const}$ уменьшается также и задний угол α , в результате чего возникает трение задней поверхности резца о древесину и возрастает сила отжима.

Для увеличения угла α пришлось бы уменьшить угол β , что нежелательно, если β соответствует нормативным требованиям прочности.

Уменьшение угла резания δ не всегда рационально. При фрезеровании для получения гладкой поверхности угол резания δ должен

быть около 75° . В указанных случаях для увеличения угла резания применяют обратную заточку, т. е. дополнительную заточку со стороны передней поверхности резца (рис. 12.28). На рисунке aa — окружность резания; точка x — пересечение задней поверхности резца с окружностью aa . Сточив со стороны передней поверхности резца по радиусу ox часть ножа $1x2$, получим резец с углом резания $\delta=90^\circ$.

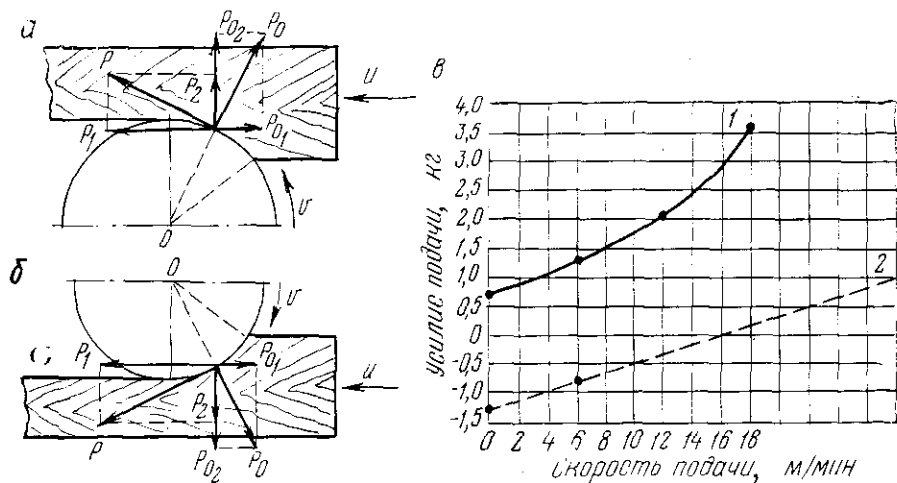


Рис. 12.30. Схема сил резания при попутном фрезеровании

Необходимый угол резания, например 75° , получим дополнительно стачиванием ножа $x23$ под углом 15° к радиусу ox . Понятно, что угол $dxs=\beta$ будет больше угла β_1 . Следовательно, можно заточить резец с оптимальными углами α , β и γ .

Попутное фрезерование. Фрезерование по направлению подачи (попутное), редко встречающееся на практике, по ряду наблюдений имеет некоторые преимущества.

Рассмотрим попутное и встречное фрезерование, базируясь на теоретических положениях и опытах проф. Ф. М. Манжоса и канд. техн. наук М. Д. Товстолеса, сопоставим основные показатели благоприятных условий процесса фрезерования: шероховатость поверхности обработки, потребляемую мощность, сопротивление подаче, особенности станков с ручной подачей, стойкость резцов, безопасность работы.

На рис. 12.29 дана схема стружкообразования при встречном и попутном фрезеровании. Сплошной линией показана траектория резца при встречном (инверсионном), а пунктирной — при попутном фрезеровании. Из рисунка видно, что глубина волны больше во втором случае.

При попутном фрезеровании перерезание волокон происходит под тупым углом ψ , когда создается естественный подпор. Следовательно, уменьшаются заколы и вырывы волокон, создаются усло-

вия для более «организованного» процесса резания. При встречном фрезеровании угол $\psi < 90^\circ$.

Однако, кроме глубины заколов и кинематических неровностей, практически шероховатость определяется и иными условиями.

При попутном фрезеровании в отличие от встречного по направлению подачи образуются силы, действующие в разные стороны, и односторонние — прижимающие или отбрасывающие (рис. 12.30).

Так как толщина слоя h незначительна по сравнению с диаметром окружности резания, то $P_1 > P_0$, т. е. происходит затягивание бруска. На рейсмусовом станке прижимающее усилие создает трение по столу, препятствующее затягиванию бруска (рис. 12.30, б). На фуговальном станке (рис. 12.30, а) отбрасывающая сила больше, чем на рейсмусовом. Значит, требуется и больший прижим.

Опытами Ф. М. Манжоса и М. Д. Товстолеса установлены разные сопротивления подачи при попутном (кривая 2, рис. 12.30, в) и встречном (кривая 1, рис. 12.30, в) фрезеровании. При встречном фрезеровании сосны при $h=1,25$ мм и силе подачи от 0,4 до 3,6 кг обеспечивается скорость подачи до 18 м/мин. При попутном фрезеровании такая же скорость подачи была при отрицательной силе подачи и происходило затягивание заготовки.

Для того чтобы устранить подбрасывание бруска, пришлось сделать прижим силой 0,4 кг на 1 см ширины при встречном и 1 кг на 1 см ширины заготовки при попутном фрезеровании.

При увеличении толщины срезаемого слоя сила прижима соответственно возрастает. При попутном фрезеровании требуется значительно больший прижим, чем при встречном; при подаче ощущаются резкие толчки вследствие сильного удара ножей при срезании стружки от толстого ее конца к тонкому.

При попутном ударе ножа происходит смещение бруска на большую величину, чем подача на один нож, причем каждый следующий удар вызывает еще большее проскальзывание бруска по ножам, в результате чего весь слой полностью не срезается и на поверхности бруска образуются желобки.

Следовательно, при ручном прижиге попутный метод фрезерования применять нельзя. При механической подаче с надлежащим прижимом явление проскальзывания заготовки можно устранить.

При попутном фрезеровании резец в начальный период нагружается больше, ударная нагрузка плавно снижается, резец при этом оказывается менее стойким. Опытами доказано, что кривизна лезвия $\rho=29$ острого резца увеличивается при встречном фрезеровании до 67, а при попутном до 176 мкм, т. е. почти в три раза. По другим наблюдениям резец с начальной кривизной лезвия $\rho=25$ мкм при встречном фрезеровании стал $\rho=32$, а при попутном фрезеровании при тех же условиях — $\rho=196$ мкм, т. е. притупился в шесть раз больше.

Вследствие более крутой траектории резания (перерезание волокон происходит под большим углом встречи ψ , чем при встречном фрезеровании) и быстрой затупляемости резцов при попутном фрезеровании увеличивается потребление мощности резания. Кроме

того, возникают большие вертикальные силы (рис. 12.30, а). Однако сила резания изменяется более плавно, без резких колебаний, а стружка образуется непрерывно, шероховатость поверхности уменьшается. Только более быстрое затупление резцов приводит к увеличению шероховатости поверхности и частой заточке резцов.

На основании приведенного анализа можно сделать выводы:

попутное фрезерование при остром резце обеспечивает улучшение шероховатости поверхности;

стойкость резцов снижается в 4—6 раз по сравнению со стойкостью при встречном фрезеровании;

на станках с ручной подачей затягивание бруска приводит к увеличению шероховатости поверхности.

При обработке многорезцовыми фрезами тяжелых заготовок в шаблонах или заготовок, закрепленных в столе карусельного фрезерного станка, при подаче на резец не более 0,5 мм следует рекомендовать попутное фрезерование с целью уменьшения шероховатости поверхности.

12.5. Фрезерование по копирам

Назначение и виды копирного фрезерования. В процессе копирования получают фасонные детали, не представляющие собой тела вращения. Концевыми фрезами малого диаметра фрезеруют рельефные элементы в скульптурной резьбе.

Различают копирование продольное и поперечное. При поперечном копировании ось вращения детали параллельна оси фрезерной головки, которая от копира получает поперечное движение подачи, среза стружку поперек волокон. При поперечном копировании детали сложной формы получают при двух движениях подачи — поперечной (нормальной к оси вращения детали) и продольной — вдоль детали (рис. 12.31).

При продольном копировании ось вращения детали перпендикулярна к оси вращения фрезы, поперечная подача от копира и вдоль заготовки обеспечивает процесс резания аналогично продольному фрезерованию (рис. 12.32).

Схема и расчеты процессов копирования. Принципиальная схема копирования дана на рис. 12.33. Копир 1 имеет форму, подобную изготавливаемой детали 7, а длина его точно соответствует длине копируемой детали. Промежуточным звеном между копиром и деталью служит балансир 3—5. Балансир может вращаться около неподвижного шарнира 4. На конце стержня 3 балансира находится кольцо 2, прижимаемое к копиру 1, а на конце стержня 5 — вращающаяся фрезерная головка 6, прижимаемая к заготовке. При вращении копира 1 и заготовки 7 вокруг собственной оси с одинаковым небольшим числом оборотов n_1 фреза 6 описывает в пространстве контур, подобный контуру копира.

Траектория резания представляет собой сложные кривые, сочетающие эпициклоидальные и винтовые перемещения с перемещениями по спиральям.

Фрезерная головка b диаметром D и с числом n оборотов в минуту имеет скорость главного движения

$$v = \frac{\pi D n}{60\,000} \text{ м/сек}$$

и подачу по радиусу вращения заготовки u_r .

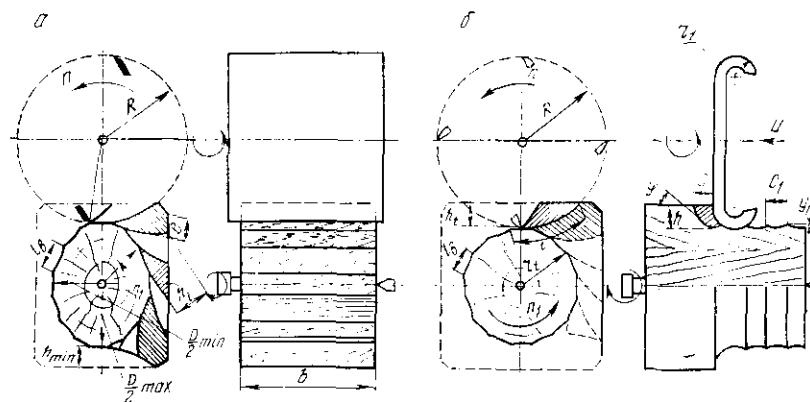


Рис. 12.31. Поперечное копирование:
а — без продольной подачи; б — с продольной подачей

Рассмотрим расчеты процессов копирования.

1. При поперечном фрезеровании без продольной подачи резание поперечное (\perp), средняя толщина стружки

$$e = \frac{360 n_1 h_t \left(r_t + \frac{h_t}{2} \right)}{z n R \arccos \left(1 + \frac{h_t}{2} \right)} \text{ мм,}$$

где n_1 — число оборотов заготовки, об/мин;

h_t — текущая толщина снимаемого слоя в зоне рассматриваемой стружки, мм;

r_t — текущий радиус заготовки в зоне срезаемой стружки, мм;

z — число резцов фрезерной головки, шт.;

n — число оборотов фрезы, об/мин;

R — радиус фрезы, мм.

Максимальная толщина стружки

$$e_{\max} = 2e.$$

Сила и мощность резания определяются по средней толщине срезаемого слоя h и среднему радиусу заготовки r .

Средняя толщина срезаемого слоя

$$h = \frac{F_s - F_d}{p} \text{ мм,}$$

где F_3 — площадь сечения заготовки, $м^2$;
 F_d — площадь сечения обработанной детали, $мм^2$;
 p — периметр фигуры сечения детали, $мм$.
 Средний радиус детали

$$r = \sqrt{\frac{F_d}{\pi}}$$

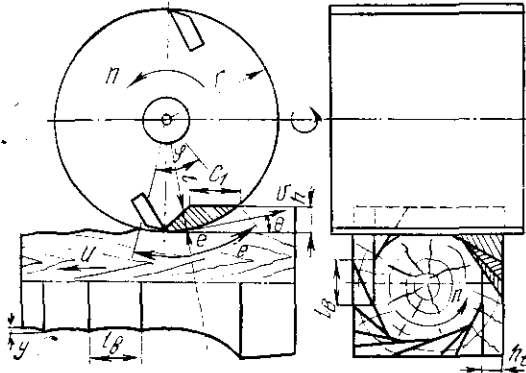


Рис. 12.32. Продольное копирование

Средняя площадь стружки

$$\bar{f}_{стр} = \frac{(F_3 - F_d)}{nz} \text{ мм}^2.$$

Средняя толщина стружки

$$e = \frac{\bar{f}_{стр}}{l} \text{ мм.}$$

Средняя дуга контакта

$$\bar{l} = \sqrt{hD} \text{ мм.}$$

Средний угол контакта

$$\varphi = \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right) \text{ град.}$$

Средняя касательная сила резания на дуге контакта

$$P_{\mp} l = (p_{\mp} + k_{\mp} e) b \frac{\bar{l}}{t}.$$

Здесь, $k_{\mp} = A_{\mp} \delta + B_{\mp} (90 - \psi) - V_{\mp}$, а коэффициенты A_{\mp} , B_{\mp} , V_{\mp} и p_{\mp} берутся из табл. 7.2 и 7.3.

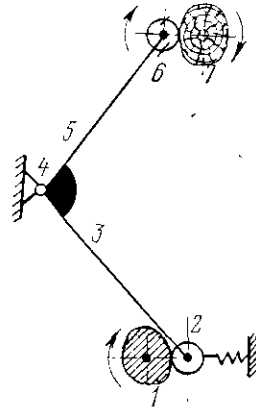


Рис. 12.33. Принципиальная схема копирования

Максимальная сила резания

$$P_{\text{макс}} = 2P_l.$$

Средняя окружная сила резания

$$P = \frac{\bar{l}}{t} P_l.$$

Мощность резания

$$N = \frac{Pv}{102} \text{ квт.}$$

При резании резцом с углом поворота в плане сила и мощность резания возрастают пропорционально коэффициенту a_w (приложения 13 и 14).

2. При поперечном копировании с продольной подачей резание — поперечно-торцевое, сечение стружки — сложной конфигурации. При копировании дугowymi резцами с радиусом закругления r_1 средняя толщина стружки определяется делением среднего объема ее $O_{стр}$ на среднюю длину l и ширину b :

$$e = \frac{O_{стр}}{b\bar{l}} \text{ мм,}$$

где

$$O_{стр} = \frac{1000 \cdot 2\pi r_1 h u}{z n n_1};$$

u — продольная подача, $м/мин$;

r — средний радиус детали, $мм$;

$$b = \frac{2\pi r_1}{360} \arccos\left(1 - \frac{h}{r_1}\right);$$

$$\bar{l} = \frac{2\pi r}{360} \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right).$$

Угол контакта дугового резца с древесиной

$$\varphi = \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right) \text{ град.}$$

Средний кинематический угол встречи

$$\Theta = \frac{\varphi}{2} \text{ град.}$$

Если направление волокон совпадает с направлением осевой (продольной) подачи, то угол перерезания волокон $\psi = \Theta$.

Удельная сила поперечно-торцевого резания

$$P_{\mp} - \perp \text{ зуб} = p_{\mp} + k_{\mp} e + [(p_{\perp} + k_{\perp} e) - (p_{\mp} + k_{\mp} e)] \frac{\psi}{90} \text{ кг/мм,}$$

где

$$k_{\pm} = A_{\pm} \delta \pm B_{\pm} (90 - \nu) - B_{\pm};$$

$$k_{\perp} = A_{\perp} \delta + B_{\perp} (90 - \nu) - B_{\perp}.$$

Коэффициенты p, A, B, V берутся из табл. 7.2 и 7.3.

Средняя касательная сила резания на дуге контакта \bar{l}

$$P_l = P_{\pm} - \perp_{\text{зуб}} b \frac{\bar{l}}{t} \text{ кг},$$

где t — шаг между дугowymi резцами фрезерной головки, мм.

Максимальная сила резания

$$P_{\text{макс}} = 2P_l = \frac{2\pi D}{z\bar{l}} P = \frac{2t}{\bar{l}} P, \text{ откуда } P = \frac{\bar{l}}{t} P_l.$$

Мощность резания

$$N = \frac{Pv}{102} \text{ квт.}$$

3. При продольном копировании траектория резания — сложная кривая — результат взаимодействия главного равномерно-вращательного движения фрезы, продольной подачи со скоростью u_n и вращательного движения заготовки, имеющей n_1 число оборотов в минуту. Резание — сложное, переходящее одновременно от продольного к торцевому и поперечного к продольному.

Продольное сечение стружки по форме аналогично фрезерной стружке прямолинейного продольного фрезерования, поэтому кинематику процесса можно рассчитывать по формулам продольного прямолинейного фрезерования, а за основу расчета силовых параметров принять методику расчета процесса фрезерования при продольно-торцевом резании.

12.6. Цепное и пазовое фрезерование

Цепное фрезерование. Цепное фрезерование применяется для образования сквозных или несквозных прямоугольных отверстий под шиповые соединения. Главное движение фрезерной цепи — вращательное со скоростью

$$v = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000} = \frac{\pi L n}{60 \cdot 1000} \text{ м/сек},$$

где D — диаметр фрезерной головки, мм (рис. 4.7);

L — длина гнезда (при одном проходе), мм (табл. 12.4).

Одновременно фрезерная цепь получает равномерное осевое перемещение — подачу по радиусу. Траектория относительного движения в этом случае будет циклоидой, направление резания относительно волокон все время меняется, изменяется толщина стружки $e = c \sin \Theta$ и сила резания аналогично тому, как это происходит при работе вращающегося резца дисковой пилы или фрезы.

Каждое звено цепи срезает стружку не по всей ширине образуемого гнезда, а только на части его. Общая ширина гнезда создается смежными звеньями цепи, лезвия которых размещены с расстоянием в два шага цепи, т. е. $t_3 = 2t_{\text{ц}}$:

$$\pi d_3 = z_3 t_3 = 2z_3 t_{\text{ц}},$$

где z_3 — число зубьев ведущей звездочки: $z_3 = 4$.

Осевая подача на резец

$$c_{\text{ос}} = \frac{u_{\text{ос}}}{n z_3} \text{ мм.}$$

Длина стружки при осевой подаче

$$l_{\text{ос}} = \frac{\pi D}{2} = \frac{\pi L}{2} \text{ мм.}$$

Площадь стружки

$$f_{\text{ос}} = c_{\text{ос}} l_{\text{ос}}.$$

Средняя толщина стружки при осевой подаче

$$e_{\text{ос}} = \frac{cL}{l_{\text{ос}}} = \frac{2cL}{\pi L} = \frac{2c}{\pi} = 0,64 \text{ мм}, \quad (12.30)$$

так как $e_{\text{ос}} = c_{\text{ос}} \sin \Theta$, то $\sin \Theta = 0,64$ и $\Theta = 40^\circ$, а угол перерезания волокон

$$\varphi = 90^\circ - \Theta = 50^\circ. \quad (12.31)$$

Для получения отверстия длиннее ширины фрезерной головки, заготовке, закрепленной на специальном столе, сообщают боковое перемещение — тангенциальную подачу. На рис. 4.7, а показано резание углубленной фрезерной цепью при боковой подаче u_b . На криволинейном участке траектория резца будет циклоидой, аналогично работе дисковой пилы, а на прямолинейном участке — прямой линией, как при пилении ленточной пилой.

При формировании гнезда с боковой подачей древесины резко возрастает потребляемая мощность, бывают разрывы фрезерной цепи. Поэтому при тяжелых условиях работы рекомендуется делать заглабления фрезерной головки по краям древесины (гнезда), а затем фрезеровать промежутки боковой подачей.

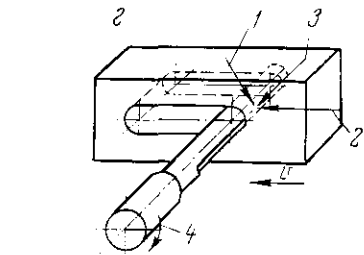
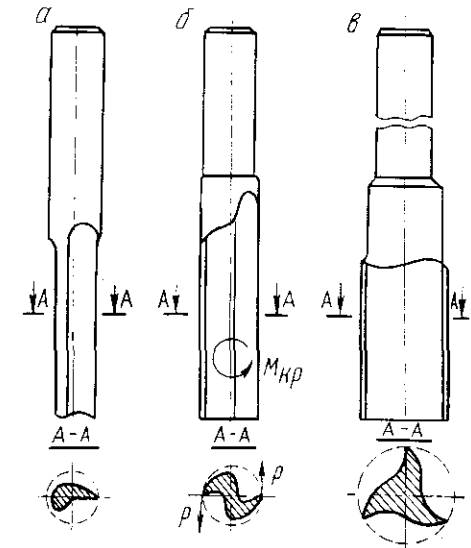


Рис. 12.34. Пазовое фрезерование: а — однорезцовая фреза; б — двухрезцовая фреза; в — трехрезцовая фреза; г — общая схема фрезерования гнезд: 1 — направление касательной силы; 2 — усилия подачи; 3 — осевого усилия; 4 — направление вращения фрезы

Боковая подача на резец

$$c_6 = \frac{u_6}{nz_3} \text{ мм.} \quad (12.32)$$

Длина стружки при боковой подаче

$$l_6 = \frac{\pi R}{2} + (h - R) = 2,14R + h \text{ мм,} \quad (12.33)$$

где R — радиус фрезерной головки:

$$R = \frac{D}{2} = \frac{L}{2}.$$

Площадь стружки при боковой подаче

$$f_6 = c_6 h \text{ мм}^2.$$

Средняя толщина стружки при этом

$$e_6 = \frac{c_6 h}{\frac{\pi R}{2} + (h - R)} = \frac{2 c_6 h}{1,14 R + 2h} = c_6 \sin \Theta = c_6 \sin \psi, \quad (12.34)$$

откуда

$$\sin \Theta = \sin \psi = \frac{h}{0,57R + h}, \quad (12.35)$$

т. е. при боковой подаче и фрезеровании несквозного паза угол $\Theta = \psi$.

Фрезерная цепь состоит из пластинок-зубьев, закрепленных на одном шарнире. Цепь шириной до 10 мм состоит из трех пластинок, шириной 12 и 16 мм — из пяти, шириной 20 и 25 мм — из семи пластинок. У каждой пластинки в процессе резания принимают участие главная и две боковые кромки, как у дисковых пил с плющеными зубьями.

Цепное фрезерование относится к закрытому виду резания, поэтому при расчетах надо учитывать:

удельное сопротивление трения стружки о стенки пропила

$$K_{\text{тр}} = \frac{\alpha_3 h}{b_1} \cdot \frac{(i + 1)}{2} \text{ кг/мм}^2, \quad (12.36)$$

где α_3 — коэффициент, учитывающий интенсивность трения:

$$\alpha_3 = 0,06;$$

b_1 — ширина пластинки (табл. 12.4):

$$b_1 = \frac{b}{i};$$

i — количество пластинок по ширине (табл. 12.4);

$\frac{i + 1}{2}$ — количество парных боковых стенок, образуемых пластинками на ширине гнезда b .

При цепном фрезеровании срезаются микростружки, поэтому среднее условное напряжение резания

$$K = \frac{(a_0 - 0,8) p}{c \sin \Theta} + 8p + k + K_{\text{тр}} \text{ кг/мм}^2. \quad (12.37)$$

Чтобы определить K при осевой подаче, надо в уравнение (12.37) подставить значение $e_{\text{ос}}$ из формулы (12.30) и ψ из выражения (12.31), а при боковой подаче — значение e_6 из формулы (12.34) и $\sin \Theta$ из формулы (12.35).

Средняя окружная сила резания: при осевой подаче

$$P_{\text{ос}} = \frac{K_{\text{ос}} b D u_{\text{ос}}}{60 v} \text{ кг};$$

при боковой подаче

$$P_6 = \frac{K_6 b h u_6}{60 v} \text{ кг}.$$

Соответственно мощность резания:

$$N_{\text{ос}} = \frac{P_{\text{ос}} v}{102} \text{ кВт};$$

$$N_6 = \frac{P_6 v}{102} \text{ кВт}.$$

Для цепного фрезерования характерны следующие режимы: $v = 4 - 10$ м/сек, $u_{\text{ос}} = 0 - 3,6$ м/мин, $u_6 = (0,5 - 0,7) u_{\text{ос}}$ (меньшие скорости подачи берутся при фрезеровании глубоких гнезд в твердой породе); число оборотов звездочки $n = 3000$ об/мин, число зубьев звездочки $z_3 = 4$, шаг зубьев фрезерной цепи $t = 22,6$ мм, углы резания $\delta = 70^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, $\beta = 55^\circ$.

Основные размеры фрезерной головки по ГОСТ 10509—63 приведены в табл. 12.4.

Таблица 12.4

Размеры фрезерной головки

Наименование параметров	Размеры									
	8	10	12	16	20	25				
Толщина фрезерной цепочки (ширина выбираемого гнезда b), мм	8	10	12	16	20	25				
Наименьшая длина гнезда L (диаметр фрезерной головки D), мм	40	40	60	40	60	40	60	70	60	60
Наибольшая глубина выбираемого гнезда h , мм	100	125	125	160	125	160	160	160	160	
Количество пластин i на ширине цепи b	3	3	5	5	5	5	7	7		

При несквозном фрезеровании края дна гнезда — закругленные, на дне образуются кинематические волны, как при фрезеровании, а на боковых поверхностях — риски, как при пилении дисковыми пилами. Для предохранения древесины от скалывания на выходе резца из древесины делается подпор с силой, большей P_{\max} .

Пример 1. Дано: $n = 2850$ об/мин, $D = 2R = 40$ мм, $u_{oc} = 18$ мм/сек, $a_p = 1$, $z_3 = 4$, $h = 80$ мм, $b = 12$ мм, $b_1 = \frac{b}{i} = \frac{12}{3} = 4$ мм, $\delta = 70^\circ$, подача — сосна.

Определить силы и мощность резания при осевой подаче фрезерной головки.
Решение. 1. Скорость резания

$$v = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 40 \cdot 2850}{60 \cdot 1000} = 6 \text{ м/сек.}$$

2. Подача на резец

$$e_{oc} = \frac{60 u_{oc}}{z_3 n} = \frac{60 \cdot 18}{4 \cdot 2850} = 0,095 \text{ мм.}$$

Средняя толщина стружки

$$e_{oc} = c_{oc} \sin \Theta = 0,095 \cdot 0,64 = 0,06 < 0,1 \text{ мм, где } \Theta = 40^\circ.$$

Длина стружки

$$l_{oc} = \frac{\pi D}{2} = \frac{3,14 \cdot 40}{2} = 62,8 \text{ мм.}$$

3. Фиктивная удельная сила резания по задней поверхности резца

$$p = 0,16 + 0,0036\phi = 0,34 \text{ кг/мм,}$$

где $\phi = 90^\circ - \Theta = 90^\circ - 40^\circ = 50^\circ$.

4. Фиктивное среднее условное давление резания по передней поверхности резца

$$k = (0,02 + 0,0004 \cdot 50) 70 + (0,007 + 0,00015 \cdot 50) (90 - 6) - (0,55 + 0,015 \cdot 50) = 2,72 \text{ кг/мм}^2.$$

5. Удельное сопротивление трения о боковые стенки

$$K_{тр} = \frac{\alpha_{\Delta} h}{b_1} \cdot \frac{(i+1)}{2} = \frac{0,06 \cdot 40}{4} \cdot \frac{(3+1)}{2} = 1,2 \text{ кг/мм}^2.$$

6. Среднее условное давление резания при $e_p < 0,1$ мм

$$K_{oc} = \frac{(a_p - 0,8) p}{e_{oc}} + 8p + k + K_{тр} = \frac{(1 - 0,8) 0,34}{0,06} + 8 \cdot 0,34 + 2,72 + 1,2 = 7,77 \text{ кг/мм}^2.$$

7. Мощность резания

$$N_{oc} = \frac{K_{oc} b D u_{oc}}{102 \cdot 1000} = \frac{7,77 \cdot 12 \cdot 40 \cdot 18}{102 \cdot 1000} = 0,65 \text{ квт.}$$

8. Средняя касательная сила резания

$$P_{oc} = \frac{120 N_{oc}}{v} = \frac{102 \cdot 0,65}{6} = 11,05 \text{ кг.}$$

9. Средняя сила резания по задней поверхности резца

$$P_3 = (a_p - 0,8) \frac{l_{oc}}{i_{ц}} b = 0,2 \cdot 0,34 \frac{62,8}{22,6} 12 = 2,28 \text{ кг.}$$

10. Средняя сила резания по передней поверхности резца

$$P_n = P_{oc} - P_3 = 11,05 - 2,28 = 8,77 \text{ кг.}$$

11. Радиальная сила $R = 0,5 P_3 a_p^2 - P_n \operatorname{tg} (90^\circ - \delta - \varphi_{тр}) = 0,5 \cdot 2,28 \cdot 1 - 8,77 \operatorname{tg} (90^\circ - 70^\circ - 15^\circ) = 0,38 \text{ кг.}$

12. Сопротивление подаче

$$Q = P_{oc} \cos \Theta + R \sin \Theta = 11,05 \cdot 0,77 + 0,38 \cdot 0,64 = 8,75 \text{ кг.}$$

13. Сила, нормальная к подаче,

$$S = P_{oc} \sin \Theta - R \cos \Theta = 11,05 \cdot 0,64 - 0,38 \cdot 0,77 = 6,78 \text{ кг.}$$

Пазовое фрезерование. При выборке фасонных пазов, шиповых гнезд, при скульптурных резьбовых работах и фасонных обработках боковых поверхностей деталей применяются концевые фрезы. Процесс резания разделяется на углубление фрезы — сверление и перемещение ее или обрабатываемой детали в заданном направлении перпендикулярно к оси фрезы — процесс фрезерования (рис. 12.34). Следовательно, режущие элементы фрезы должны располагаться как на боковой поверхности, так и на торце фрезы. При пазовом фрезеровании наблюдается встречная подача при входе резца в древесину и попутная при выходе резца. Поэтому при выходе резца из древесины наблюдается затягивание заготовки, подача возрастает, тем на большем плече будут действовать возросшая сила резания и крутящий момент. Это особенно сказывается при работе однорезцовой фрезой.

При двухрезцовой фрезе затягивание древесины выходящим резцом компенсируется подпором, который создает входящий резец. Поэтому увеличение диаметра меньше сказывается на возрастании подачи, чем при однорезцовой фрезе. Трехрезцовая фреза занимает среднее положение между однорезцовой и многорезцовой.

Чтобы улучшить условия резания, боковую режущую кромку иногда выполняют по винтовой линии с углом наклона $\omega = 10^\circ - 15^\circ$.

Подача на резец

$$c = \frac{1000 u}{z n} = e_{\max} \text{ мм.}$$

Толщина срезаемого слоя $h = 2R$ мм. Длина стружки $l = \pi R$ мм при угле контакта $\varphi = 180^\circ$.

Сечение циклоидальной стружки

$$el = ch = 2Rc,$$

откуда средняя толщина стружки

$$e = \frac{2Rc}{\pi R} = 0,64 c \text{ мм.}$$

Средний угол перерезания волокон при продольном фрезеровании $\psi = \Theta = \arcsin 0,64 = 40^\circ$ и при поперечном $\psi = 90^\circ - \Theta = 50^\circ$.

Сложный процесс пазового фрезерования не обобщается по линейным формулам. Крутящий момент можно определить по эмпирической формуле проф. Е. Г. Ивановского:

$$M_{кр} = 97\,550 \frac{N}{n} = \frac{A\Delta^{0,78}D^{1,2}h^{1,7}}{\gamma^{0,06}} \text{ кг}\cdot\text{см},$$

где N — мощность резания:

$$N = \frac{A\Delta^{0,78}D^{1,2}h^{1,7}n}{97\,550\gamma^{0,06}} \text{ квт};$$

A — коэффициент, равный 0,0083 для сосны при $z = 1$; 0,015 при $z = 2$; 0,017 при $z = 3$;

Δ — подача на один оборот фрезы, мм;

D — диаметр фрезы, мм;

h — глубина снимаемого слоя, мм;

γ — передний угол резания, град.

Глава 13

СВЕРЛЕНИЕ

13.1. Сверление древесины

Сверление — процесс обработки цилиндрических отверстий при поступательной подаче материала или сверла по оси вращающегося инструмента с резами на торцевой поверхности. Форма стружки — винтовая.

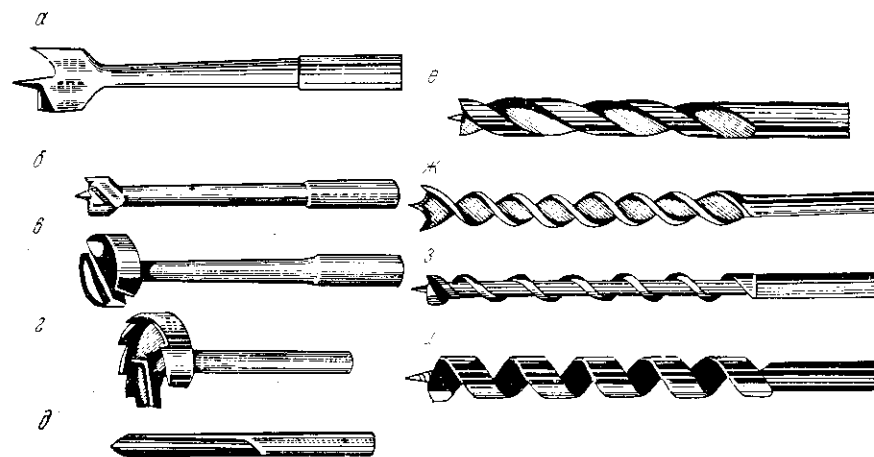


Рис. 13.1. Сверла для работы по дереву

В отличие от концевых (пазовых) фрез, работающих боковыми кромками по принципу фрезерования, сверла для образования круглых отверстий работают торцевыми режущими кромками.

На рис. 13.1, *а* показано простое центровое сверло для сверления неглубоких цилиндрических гнезд или сквозных отверстий. Такое сверло испытывает несимметричную нагрузку, поэтому при больших подачах оно получает биение и вибрацию.

Станочное центровое сверло (рис. 13.1, *б*) имеет симметричные режущие кромки. Однако у центровых сверл затруднен вывод стружки, поэтому при сверлении глубоких отверстий применяются винтовые сверла (рис. 13.1, *в*) с канавками для отвода стружки.

Винтовые сверла для дерева отличаются от конструкции сверла для металла формой режущей части, которая может быть либо кони-

ческой с разными углами 2φ при вершине (рис. 13.3), либо с направляющим центром 2 и подрезателями 3 при главной (торцевой) режущей кромке 1 (рис. 13.2, в). Винтовое сверло имеет две винтовые канавки, образующие два рабочих пера с режущими элементами по торцевой части (рис. 13.1, е, ж). Винтовые сверла изготовляют также при навивании одного рабочего пера вокруг цилиндрического стержня

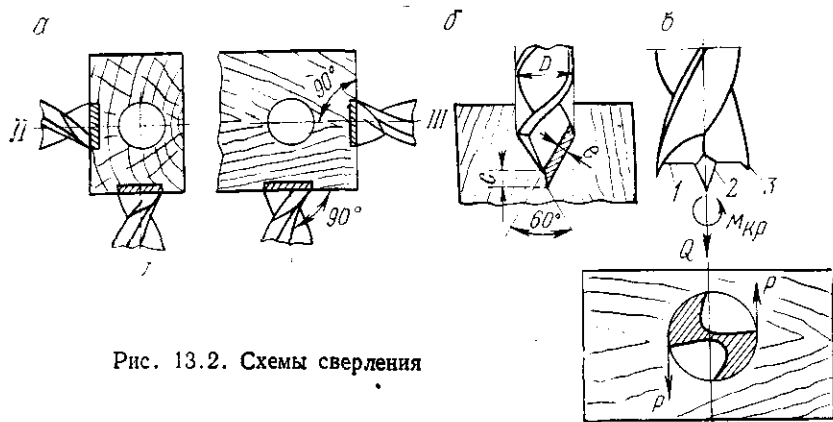


Рис. 13.2. Схемы сверления

ня (рис. 13.1, з). В конечной части сверла в пределах одного витка сформировано второе перо. Такое сверло называется шнековым.

Различают еще штопорные сверла (рис. 13.1, и), где сердцевинного стержня нет, одно рабочее перо завивается по винтовой линии. В этом сверле имеется только одна режущая грань. Шнековые и штопорные сверла применяются для образования глубоких отверстий. Сверла с круговыми и зубчатыми подрезателями (рис. 13.1, в и г) применяются для сверления неглубоких сквозных отверстий.

Режущие элементы сверла должны формироваться по-разному в зависимости от направления сверления по отношению к волокнам древесины.

Рассмотрим процесс сверления поперек волокон, в радиальном и тангенциальном направлениях (рис. 13.2, а, позиции I и II). При работе сверлом, у которого угол при вершине $2\varphi = 180^\circ$, направление резания главной режущей кромки меняется от поперечного до резания вдоль волокон, чередуясь по квадрантам. В общем случае будем иметь продольно-поперечное резание для торцевой кромки и торцово-продольное резание для подрезателей. В этом случае применение угла конусности $2\varphi = 180^\circ$ целесообразно, так как если уменьшить его ($2\varphi < 180^\circ$), то главная кромка будет в более трудных условиях перерезать волокна в торцово-продольно-поперечном направлении. Угол φ надо уменьшить при сверлении отверстий, расположенных вдоль волокон (рис. 13.2, б), иначе главные кромки сверла с углом конусности $2\varphi = 180^\circ$ выполняют трудное торцевое резание (рис. 13.2, а, позиция III). Лучше заточить сверло с небольшим углом φ , например $2\varphi = 60^\circ$ (рис. 13.2, б). В этом случае волокна

перерезаются в торцово-продольном направлении, что значительно легче, чем торцевое резание.

Для сверления вдоль волокон обычно применяется ложечное сверло (рис. 13.1, д), недостатком которого является одностороннее действие. Для сверления отверстий вдоль волокон применяют винтовые сверла с углом $2\varphi = 60^\circ$.

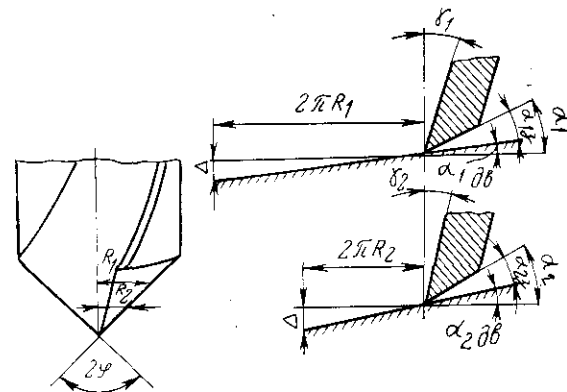


Рис. 13.3. Изменение углов резания при сверлении

Схема образования гнезда приведена на рис. 4.8. Траектория отдельных точек лезвия — винтовые линии одного и того же шага, но с разными углами подъема, причем скорость резания в этих точках будет разная по величине и направлению:

$$\vec{v}' = \vec{u} + \vec{v}_R,$$

где \vec{v}_R — вектор окружной скорости (главное движение), зависящий от расстояния R данной точки лезвия от центра вращения.

Процессы стружкообразования и скалывания происходят не одновременно по лезвию, а при отличных друг от друга условиях. Следовательно, давление не постоянно, а изменяется по всей ширине передней поверхности резца. Естественно, что при одном и том же угле заострения β будут разные углы резания δ_R и α_z (где α_z — угол зазора, рис. 13.3). Углы движения $\alpha_{\text{движ}}$ достигают наибольшего значения вблизи оси вращения. Так как $\alpha = \alpha_{\text{движ}} + \alpha_z$, то для получения допустимого минимального угла зазора необходимо иметь достаточный задний угол резания ($\alpha = 20-30^\circ$).

При подаче Δ на оборот сверла угол движения $\alpha_{\text{движ}} = \text{arctg} \frac{\Delta}{2\pi r}$.

Чем меньше R , тем больше $\alpha_{\text{движ}}$ (рис. 13.3). Чтобы обеспечить нормальные условия резания для центральных частей сверла, следует делать задний угол переменным, увеличивающимся к центру (коническая заточка).

Основные кинематические соотношения при сверлении для винтового сверла с конической заточкой (рис. 13.3) с углом при вершине 2φ следующие:

$$\text{скорость резания у периферии } v_{\text{макс}} = \frac{\pi D n}{1000} \text{ м мин};$$

$$\text{скорость резания у центра } v_0 = 0;$$

$$\text{средняя скорость резания } v = \frac{\pi D n}{2 \cdot 1000} \text{ м мин};$$

$$\text{подача на оборот } \Delta = \frac{1000 u}{n}, \text{ где } u = \frac{\Delta n}{1000} = \frac{c z n}{1000} \text{ м'мин};$$

$$\text{подача на один резец } c = \frac{1000 u}{z n} = \frac{\Delta}{z} \text{ (где } z \text{ — число режущих кромок);}$$

$$\text{толщина стружки } e = c \sin \frac{2\varphi}{2} = c \sin \varphi, \text{ если } 2\varphi = 180^\circ, \text{ то}$$

$$e = c \text{ и } \frac{v_{\text{макс}}}{v} = \frac{2\Delta}{\pi D}, \text{ но так как } v \text{ значительно больше } u, \text{ то } e < c;$$

$$\text{поперечное сечение стружки } f_c = \frac{D \Delta}{2z};$$

$$\text{длина стружки у центра } l_0 = 0;$$

$$\text{длина стружки у периферии } l_{\text{макс}} = \pi D;$$

$$\text{средняя длина стружки } l = \frac{\pi D}{2} \text{ мм};$$

$$\text{объем одной стружки } O_c = f_c l = \frac{\pi D^2 \Delta}{4 \cdot 10^3 z} \text{ см}^3;$$

$$\text{мощность резания } N = \frac{K \Delta \pi D^2 n}{4 \cdot 6 \cdot 10^6} \text{ кВт}$$

$$\text{или } N = \frac{K \frac{\Delta D}{2} v}{102 \cdot 60} \text{ кВт};$$

$$\text{сила резания } P = \frac{60 \cdot 102 N}{v} = K \frac{\Delta D}{2} \text{ кг};$$

$$\text{крутящий момент } M_{\text{кр}} = 97500 \frac{N}{n} \text{ кг·см.}$$

Р. Гудчайлдом (Англия) проведены опыты по сверлению древесины смоковницы плотностью $0,64 \text{ Г/см}^3$, $W=12\%$ и рамин плотностью $0,79 \text{ Г/см}^3$, $W=11\%$ сверлом с направляющим центром и подрезателями $D=25,4 \text{ мм}$, $h_1=5,08 \text{ мм}$ (высота направляющего центра над главной режущей кромкой), $h_2=1,35 \text{ мм}$ (высота подрезателя над главной режущей кромкой), $n=2110 \text{ об/мин}$, $u=0,546 \text{ м/мин}$; $\gamma=40^\circ$, $\beta=35^\circ$, $\alpha=15^\circ$ — углы резания главной режущей кромки; $\beta_1=20^\circ$, $\alpha_1=1^\circ$ — подрезателя. По его наблюдениям, работа общего крутящего момента $M_{\text{кр}}$ (рис. 13.2, в) и осевого усилия $P_{\text{ос}}$ распределяется согласно табл. 13.1 [10].

Распределение $M_{\text{кр}}$ и $P_{\text{ос}}$

Параметр	Главные режущие кромки	Направляющий центр	Подрезатели
Крутящий момент (100%), кг·см	46%	37%	17%
Осевое усилие (100%), кг	65%	10%	25%

Математическая обработка отечественных и зарубежных исследований по сверлению древесины подтверждает общую закономер-

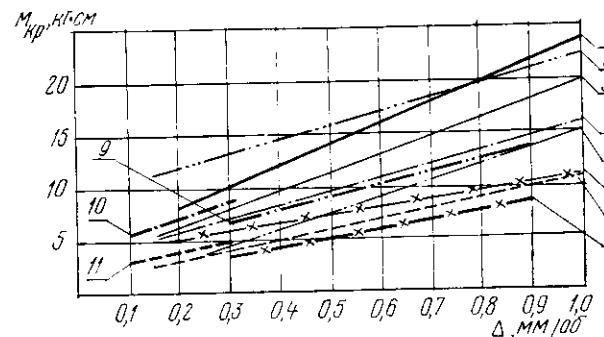


Рис. 13.4. Зависимость крутящего момента от подачи на один оборот:

1 — польская сосна (двухрезцовое пазовое сверло, $h=40 \text{ мм}$; $n=1300 \text{ об/мин}$, $D_{\text{св}}=15 \text{ мм}$, $\alpha=42^\circ$; $\delta=90^\circ$); 2, 6 — дуб и сосна (шнековое сверло, $n=2880 \text{ об/мин}$, $D=10 \text{ мм}$, $\alpha=15^\circ$; $\delta=44^\circ$); 3, 7 — дуб и сосна (винтовое сверло, $n=2880 \text{ об/мин}$, $D=10 \text{ мм}$, $\alpha=15^\circ$, $\delta=40^\circ$); 4, 5 — дуб, сосна (сверло спиральное с заточкой по металлу, $D=10 \text{ мм}$, $\alpha=15^\circ$, $\delta=60^\circ$; $n=2880 \text{ об/мин}$); 8, 11 — ель, дуб (спиральное сверло с прямой заточкой режущих кромок и с подточкой сердцевинки, $\delta=64-67^\circ$, $\alpha=40^\circ$, $n=1400 \text{ об/мин}$, $h=50 \text{ мм}$, $D=10 \text{ мм}$); 9, 10 — то же, $D=14 \text{ мм}$

ность зависимости среднего условного давления резания от толщины стружки:

$$K = k + \frac{a_p P}{c}. \quad (13.1)$$

На рис. 13.4 видно изменение крутящих моментов по закону прямых в зависимости от $\Delta=c$ для разных конструкций и размеров сверл.

В порядке первого приближения (ввиду неполноты опытов) в табл. 13.2 приведены значения K для центровых сверл.

Усилие подачи (по оси) сверла определяют по формуле

$$Q = (0,25 + 0,07 D) P \text{ кг}, \quad (13.2)$$

* П. Кох. Процессы механической обработки древесины. М., 1969.

где

$$P = \frac{KDc}{2} \text{ кг}; \quad (13.3)$$

$$u = \frac{czn}{1000} \text{ м/мин.}$$

Так как

$$N = \frac{K\pi D^2 czn}{4 \cdot 6 \cdot 10^8}, \quad (13.4)$$

то для обратных задач при заданных N , z , n определяют

$$cK = \frac{24 \cdot 10^8 N}{\pi D^2 zn}. \quad (13.5)$$

Подставив в формулу (13.5) значение K из табл. 13.2, получим уравнение с неизвестным c . Глубина сверления $h \leq 10D$.

Таблица 13.2

Среднее условное давление резания для центровых сверл

D, мм	K, кг·м/см³ или кг/мм²			Примечание
	для сосны	для березы	для дуба	
5	$15,6 + \frac{6,24}{c}$	$27 + \frac{10,6}{c}$	$37,5 + \frac{15}{c}$	
10	$4,2 + \frac{1,68}{c}$	$7,1 + \frac{2,85}{c}$	$10 + \frac{4}{c}$	Для винтовых сверл
	$2 + \frac{0,8}{c}$	$3,4 + \frac{0,38}{c}$	$4,8 + \frac{1,72}{c}$	$K_{\text{винт}} = 1,5 K$
20	$1,4 + \frac{0,56}{c}$	$2,33 + \frac{0,95}{c}$	$3,4 + \frac{1,3}{c}$	
25	$1 + \frac{0,4}{c}$	$1,7 + \frac{0,68}{c}$	$2,4 + \frac{0,96}{c}$	

13.2. Примеры расчета режимов резания

Пример 1. Дано: $D=20$ мм, $n=3500$ об/мин, порода — дуб, сверло — центровое, $z=1$, $v=1$ м/мин. Определить N , P и Q .

Решение. 1. Определяем подачу на резец:

$$c = \frac{1000 u}{zn} = \frac{1000}{3500} = 0,3 \text{ мм.}$$

2. По табл. 13.2 находим среднее условное давление резания

$$K = 3,4 + \frac{1,3}{0,3} = 7,7 \text{ кг·м/см}^3 \text{ или кг/мм}^2.$$

3. Сила резания

$$P = \frac{KDc}{2} = 7,7 \cdot 10 \cdot 0,3 = 23 \text{ кг.}$$

4. Мощность резания

$$N = \frac{Pv_{\text{макс}}}{2 \cdot 100} = \frac{23 \cdot 3,67}{2 \cdot 100} = 0,42 \text{ квт,}$$

где

$$v_{\text{макс}} = \frac{\pi Dn}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,02 \cdot 3500}{60} = 3,67 \text{ м/сек.}$$

5. Усилие подачи (по оси) сверла $Q = (0,025 + 0,07 \cdot 20)23 = 38$ кг. При спиральном сверле все силовые параметры увеличиваются. Преимущество спиральных сверл — лучший отвод стружки при глубоком сверлении, симметричность расположения лезвий, обеспечивающих более точное сверление, а также больший срок службы сверла. Для данного случая при $z=2$

$$K = 1,5 \left(3,4 + \frac{1,3}{0,15} \right) = 18 \text{ кг·м/см}^3 \text{ или кг/мм}^2;$$

$$P = 18 \frac{D}{2} 0,15 \cdot 2 = 54 \text{ кг};$$

$$N = \frac{54 \cdot 3,67}{2 \cdot 100} = 0,99 \text{ квт};$$

$$Q = (0,25 + 0,07 \cdot 20)54 = 89 \text{ кг.}$$

Пример 2. Дано: $N=0,21$ квт, центровое сверло $D=15$ мм, $n=3500$ об/мин, древесина — сосна. Определить скорость подачи и силы резания.

Решение. 1. По формуле (13.5)

$$Kc = \frac{24 \cdot 10^8 \cdot 0,21}{1 \cdot 3500} = 2,04.$$

2. По табл. 13.2 берут значение K для сосны при $D=15$ мм, и тогда $Kc = \left(2 + \frac{0,8}{c} \right) c = 2,04$ или $2c + 0,8 = 2,04$, откуда подача на резец $c = 0,62$ мм и скорость подачи

$$u = \frac{czn}{1000} = \frac{0,62 \cdot 3500}{1000} = 2,17 \text{ м/мин.}$$

3. Сила резания

$$P = \left(2 + \frac{0,8}{c} \right) \frac{D}{2} c = Dc + 0,4 = 9,3 + 6 = 15,3 \text{ кг.}$$

4. Усилие подачи

$$Q = (0,25 + 0,07 \cdot 15)15,3 = 20 \text{ кг.}$$

Основные данные по осевому точению

Глава 14

ТОЧЕНИЕ

14.1. Осевое точение

Точение — процесс резания при вращательном движении заготовки или резца и подаче вдоль или поперек оси вращения.

Осевое точение характеризуется вращательным движением заготовки и подачи вдоль или поперек оси вращения (рис. 14.1). Получаемая стружка — винтовая при осевой подаче и спиральная при

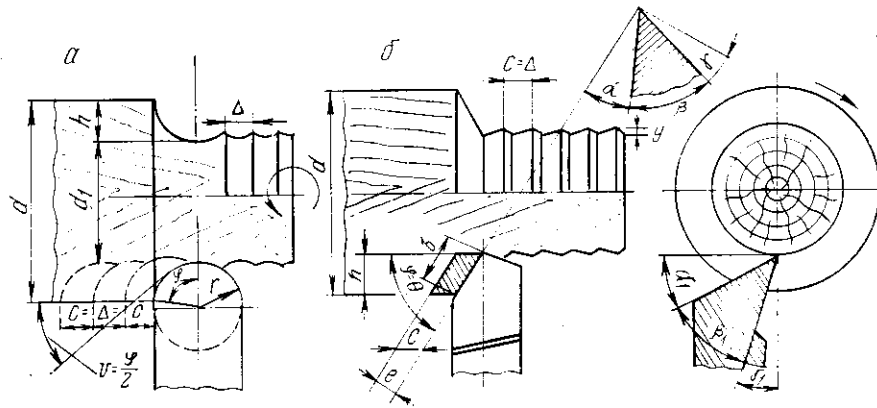


Рис. 14.1. Осевое точение с продольной подачей:
а — черновое; б — чистовое

поперечной подаче. Сочетание главного вращательного движения с продольным и поперечным движением подачи дает возможность получить любую форму тела вращения. Осевое продольное точение, при котором лезвие резца находится на уровне центров токарного станка, а резец перемещается вдоль оси вращения детали, подразделяется на черновое и чистовое.

Требуемая шероховатость поверхности при точении соответствует $\nabla\delta 6$ — $\nabla\delta 8$ и получается при подаче на оборот $\Delta = c < 0,8$ мм. Припуск h на обработку значительно больше. Поэтому необходимо вначале снимать толстый слой, производя черновое точение. При этом применяют закругленные резцы с радиусом

Черновое (рис. 14.1, а)	Чистовое (рис. 14.1, б)
-------------------------	-------------------------

- | | |
|--|---|
| 1. Геометрия резца
$\alpha = 10 - 12^\circ, \delta = 45^\circ$ | $\alpha = 10 - 12^\circ, \delta = 35 - 50^\circ$
(рекомендуется $\delta = 45^\circ$) |
| 2. Подача $\Delta = c$ мм/об
$\Delta = c = \frac{1000 u}{n}$
(рекомендуется $c = 1,6 - 2$ мм) | $\Delta = c = \frac{1000 u}{n}$
(рекомендуется $c < 0,8$ мм для получения $\nabla\delta 6 - \nabla\delta 8$ в зависимости от затупления резца) |
| 3. Припуск h , мм: $h = 2 - 5$ | $h = 0,25 - 3$ |
| 4. Толщина стружки e , мм
$e = c \sqrt{\frac{h}{2r}}$, где $r = 10 - 20$ мм,
$\sin \Theta = \sqrt{\frac{h}{2r}}$ | $e = \Delta \sin \Theta = e \sin \Theta$ |
| 5. Длина лезвия b , мм
$b = l = \sqrt{hD}$,
где l — длина дуги контакта, мм | $b = \frac{h}{\sin \Theta}$ |
| 6. Средняя скорость резания v , м/сек
$v = \frac{\pi (d + d_1) n}{2 \cdot 60 \cdot 1000}$,
где d — диаметр заготовки, мм;
d_1 — диаметр детали, мм | |
| 7. По опытам канд. техн. наук
А. А. Пижурина (МЛТИ)
Значение k кг/мм ² :
Значение p кг/мм, k кг/мм ² | Значение k кг/мм ² :
Значение p , кг/мм: |
| Сосна 0,35 1,5 | Сосна $k = (0,003 \pm 0,0006 \Theta) \delta + (0,006 + \pm 0,00016 \Theta) v - (0,06 + 0,023 \Theta)$ |
| Береза 0,55 2,1 | Береза, дуб $k = (0,005 + 0,00095 \Theta) \delta + (0,007 + \pm 0,00022 \Theta) v - (0,09 + 0,023 \Theta)$ |
| Дуб 0,75 2,8 | Береза $p = 0,12 + 0,0048 \Theta$ |
| | Дуб $p = 0,15 + 0,006 \Theta$ |
| 8. Сила резания P , кг
$P = (a_p p + ke) b$ | |
| 9. Мощность резания N , квт
$N = \frac{Pv}{102}$ | |

Черновое (рис. 14.1, а)	Чистовое (рис. 14.1, б)
-------------------------	-------------------------

10. На шероховатость поверхности влияет радиус кривизны лезвия ρ :

при 5—10 мкм	$\nabla\delta 8$
при 10—20 мкм	$\nabla\delta 7$
при 20—40 мкм	$\nabla\delta 6$

На 1 м реза прирост радиуса кривизны лезвия равен 0,001 мм для реза из стали ХВГ и 0,0008 мм для стали Х12Ф1:

$$\Delta\rho = (0,001 - 0,0008) \frac{\pi D_n}{1000};$$

$$a_p = 1 + \frac{0,2 \Delta\rho}{\rho_0},$$

$$\text{где } \rho_0 = 4 - 5 \text{ мкм.}$$

$r = 10 - 30$ мм, при которых получается более плавное и чистое срезание стружки толщиной $e = c \sqrt{\frac{h}{2r}}$, меньшей припуска h .

При прямолинейном лезвии $e = h$, поэтому получаются вырывы и отщепы у боковых кромок реза.

Основные сведения по черновому и чистовому точению приводятся в табл. 14.1.

14.2. Расчет режимов резания при точении

Пример 1. Дано: $d_3 = 46$ мм, $d_{\text{дет}} = 40$ мм, $\delta = 50^\circ$, $n = 750$ об/мин, порода — береза, $u = 1,5$ м/мин, $r = 10$ мм.

Определить N при черновом точении.

Решение. 1. Подача на резец (по табл. 14.1, п. 2)

$$c = \Delta = \frac{1000 u}{n} = \frac{1000 \cdot 1,5}{750} = 2 \text{ мм.}$$

2. Длина дуги контакта (длина режущей кромки)

$$l = b = \sqrt{hD} = \sqrt{3 \cdot 20} = 7,75 \text{ мм.}$$

3. Сила резания

$$P = \left(\rho + c \sqrt{\frac{h}{2r}} k \right) b \left(0,55 + 2 \sqrt{\frac{3}{2 \cdot 10}} 2,1 \right) 7,75 = 4,26 + 12,13 = 16,37 \text{ кг.}$$

4. Мощность резания

$$N = \frac{Pv}{102} = \frac{16,37 \cdot 3,14 (46 + 40) 750}{102 \cdot 2 \cdot 60 \cdot 000} = 0,28 \text{ квт.}$$

Пример 2. Дано: $d_3 = 54$ мм, $d_{\text{дет}} = 50$ мм, $\delta = 45^\circ$, $\Theta = 45^\circ$, $n = 3000$ об/мин, $u = 1,5$ м/мин, $a_p = 1$, порода — береза.

Определить N при чистовом точении.

Решение. 1. Подача на резец

$$c = \frac{1000 u}{n} = \frac{1000 \cdot 1,5}{3000} = 0,5 \text{ мм.}$$

Толщина стружки

$$e = c \sin \Theta = 0,5 \sin 45^\circ = 0,5 \cdot 0,707 = 0,535 \text{ мм.}$$

2. Длина режущей кромки

$$b = \frac{h}{\sin \Theta} = \frac{2}{0,707} = 2,83 \text{ мм.}$$

3. Скорость резания

$$v = \frac{\pi (d + d_1) n}{2 \cdot 60 \cdot 000} = \frac{3,14 (54 + 50) 3000}{2 \cdot 60 \cdot 000} = 8,2 \text{ м/сек.}$$

4. Фиктивное среднее условное давление на поперечное сечение стружки

$$k = (0,005 + 0,00095 \cdot 45) 45 + (0,007 + 0,00022 \cdot 45) 8,2 - (0,09 + 0,023) 45 = 2,14 + 0,13 - 1,12 = 1,15 \text{ кг/мм}^2.$$

5. Фиктивная удельная сила резания по задней поверхности реза

$$p = 0,12 + 0,0048 \cdot 45 = 0,32 \text{ кг/мм.}$$

6. Сила резания

$$P = (p + ek) b = (0,32 + 0,535 \cdot 1,15) 2,83 = 2,08 \text{ кг.}$$

7. Мощность резания

$$N = \frac{Pv}{102} = \frac{2,08 \cdot 8,2}{102} = 0,17 \text{ квт.}$$

Пример 3. Дано: исходные данные примера 2 и время работы реза из стали ХВГ $T = 60$ мин.

Определить мощность резания и класс шероховатости обработки.

Решение. 1. Определяем коэффициент затупления реза a_p при

$$\Delta\rho = 0,001 \cdot 3,14 \cdot 0,043 \cdot 3000 \cdot 60 = 25 \text{ мкм,}$$

$$a_p = 1 + \frac{0,2 \cdot 25}{5} = 2.$$

2. Сила резания

$$P = (a_p p + ek) b = (2 \cdot 0,32 + 0,535 \cdot 1,15) 2,83 = 2,96 \text{ кг.}$$

3. Мощность резания

$$N = \frac{Pv}{102} + \frac{2,96 \cdot 8,2}{102} = 0,24 \text{ квт.}$$

Мощность увеличилась на 41%.

4. Так как

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho = 5 + 25 = 30 \text{ мкм,}$$

то по табл. 14.1 шероховатость поверхности обработки будет $\nabla\delta 6$.

образуется опережающая трещина. Направление трещины не совпадает с траекторией резания, и шпон будет иметь шероховатую поверхность. При лущении нижняя сторона шпона оказывается удлиненной, растянутой, а верхняя сжатой. В результате растягивающих усилий перед ножом на нижней стороне шпона образуются мельчайшие трещины, шпон надламывается, делается непрочным

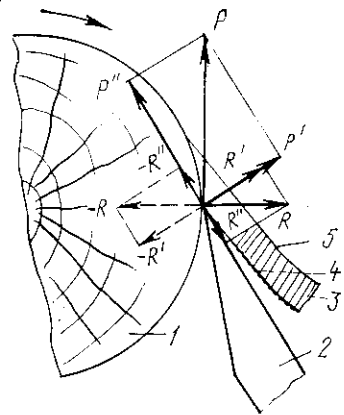


Рис. 15.3. Схема сил резания:

1 — чурак; 2 — лущильный нож; 3 — шпон; 4 — нижняя сторона шпона; 5 — верхняя (лицевая) сторона шпона; P — касательная сила резания; R — радиальная сила

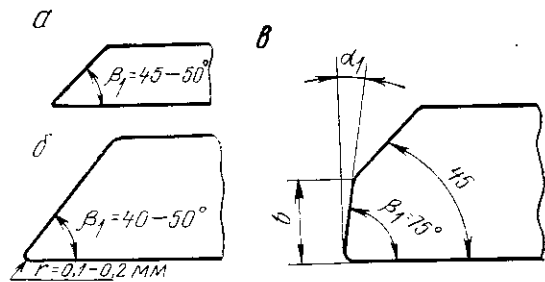


Рис. 15.4. Профили прижимных линеек

и рыхлым. Чтобы получить плотный высокого качества шпон, применяют прижимную линейку (рис. 15.4).

Кромка прижимной линейки устанавливается параллельно лезвию ножа так, чтобы продолжение передней поверхности линейки проходило через лезвие ножа (рис. 15.2). Просвет между кромкой линейки и ножом s_0 должен быть меньше толщины шпона e . Проходя через суженный просвет, шпон обжимается. Обжим шпона препятствует образованию опережающей трещины и свободному скалыванию шпона. Кроме того, между поверхностью чурака и кромкой прижимной линейки возникает сила трения, вызывающая дополнительное сжатие наружных слоев верхней стороны шпона. Это сжатие как бы укорачивает, стягивает верхнюю сторону шпона и уменьшает или почти ликвидирует растягивающие напряжения на нижней стороне шпона. При этом на ней не образуются трещины и разрывы между волокнами. Шпон получается достаточной плотности.

Длина прижимной линейки соответствует длине ножа, а толщина ее $s = 12-15$ мм. Угловые параметры линейки $\alpha_1 = 5-7^\circ$, $\beta_1 = 45-55^\circ$, угол наклона линейки $\delta_1 = \alpha_1 + \beta_1 = 50-57^\circ$.

В зависимости от породы древесины и толщины шпона прижимные линейки применяются с острой (рис. 15.4, а) и закругленной

(рис. 15.4, б) ($r = 0,1-0,2$ мм) нажимными кромками или нажимной фаской b (рис. 15.4, в).

Положение прижимной линейки относительно ножа определяется величиной просвета между нажимной кромкой линейки и ножом s_0 и высотой нажимной кромки линейки над режущей кромкой ножа h_0 (рис. 15.2).

Степень обжима шпона зависит от толщины шпона e и просвета s_0 :

$$\Delta = \frac{e - s_0}{e} 100\%.$$

Рекомендуемые степени обжима и температура чурака:

e , мм	$\leq 0,8$	$\leq 1,5$	$\leq 2,5$	$> 2,5$
Δ , %	10-20	16-20	21-25	26-30
t , °C	20-25	25-35	25-35	35-45

На дощечкорезательных станках при толщине дощечек 6-12 мм и $\Delta = 10-15\%$ сила прижима 5-6 кг/мм по длине ножа.

Высота установки линейки над лезвием ножа h_0 (рис. 15.2) при лущении:

$e = 0,5$ мм	$h_0 = 0,1 - 0,13$ мм;
$e = 1$ мм	$h_0 = 0,2 - 0,25$ мм;
$e = 1,5$ мм	$h_0 = 0,3 - 0,35$ мм;
$e = 2$ мм	$h_0 = 0,4 - 0,5$ мм.

Для строгания

$$h_0 = \left(2 + \frac{\Delta}{100} \right) \text{ мм.}$$

Кинематика лущения. При постоянной радиальной подаче u , при $n = \text{const}$ и уменьшающемся диаметре чурака, т. е. при уменьшающейся скорости главного движения v , толщина шпона

$$e = \frac{1000 u}{n} = \text{const.}$$

Откладывая радиальные перемещения подачи, соответствующие повороту радиус-вектора на угол φ в сторону, обратную вращению чурака, получим траекторию резания при лущении в виде архимедовой спирали (рис. 15.2).

Рассмотрим поворот чурака на 1/8, 2/8, 3/8, 4/8 полного оборота в 360° . Если, например, $e = 8$ мм, то перемещение по лучу от окружности к центру будет соответствовать углу поворота 1/8—1 мм; 2/8—2; 3/8—3 и т. д. до 8/8—8 мм = e .

Повторяя построение при повороте на 9/8—9, 10/8—10 и т. д., при повороте 16/3—16 мм = 2 и т. д., получаем траекторию резания — архимедову спираль, где число витков шпона

$$z = \frac{R_{кр}}{e},$$

где $R_{кр}$ — радиус кряжа, мм.

Конечный диаметр лущения определяется размерами кулачка, закрепляющего чурак в центрах. Недолущенный остаток называется карандашом и является отходом.

Средняя скорость резания

$$v_{ср} = \frac{\pi n(D_{кр} + D_{кар})}{2} \text{ м/сек},$$

где $D_{кр}$ и $D_{кар}$ — соответственно диаметры края и карандаша.

Из рис. 15.2 видно, что скорость подачи

$$u = \frac{en}{1000 \cdot 60} = \text{const м/сек},$$

а мгновенная скорость резания соответствует

$$v_{\phi} = \frac{\pi D_{\phi} n}{1000 \cdot 60} \text{ м/сек},$$

где $D_{\phi} = D_{кр} - \frac{e\phi}{180}$, т. е. D_{ϕ} непрерывно уменьшается с увеличением угла ϕ .

Согласно рис. 15.2, угол движения

$$\alpha_{дв} = \arctg \frac{u}{v_{\phi}} = \arctg \frac{e}{\pi D_{\phi}}$$

непрерывно увеличивается при уменьшении D_{ϕ} , а следовательно, при данном установочном угле $\alpha_{уст}$ задний угол

$$\alpha_{\phi} = \alpha_{уст} - \alpha_{дв}$$

и угол резания

$$\delta_{\phi} = \alpha_{\phi} + \beta$$

непрерывно уменьшаются.

При установке ножа ниже центра вращения чурака (рис. 15.5) задний угол резания

$$\alpha_{\phi} = \alpha_{уст} + \alpha_h - \alpha_{дв}.$$

Из треугольника OAB определяем

$$\alpha_h = \angle OAB = \arcsin \frac{h_0}{R_{\phi}},$$

тогда

$$\alpha_{\phi} = \alpha_{уст} + \arcsin \frac{h_0}{R_{\phi}} - \arctg \frac{e}{\pi D_{\phi}}.$$

С уменьшением диаметра чурака второе и третье слагаемые увеличиваются, а $\alpha_{\phi} \approx \text{const}$ и $\delta \approx \text{const}$, т. е. изменяются незначительно.

При установке ножа выше центра вращения чурака

$$\alpha_{\phi} = \alpha_{уст} - \arcsin \frac{h_0}{R_{\phi}} - \arctg \frac{e}{\pi D_{\phi}},$$

т. е. второе и третье слагаемые увеличиваются, а задний угол α_{ϕ} и угол резания δ_{ϕ} уменьшаются аналогично случаю при $h_0 = 0$ (рис. 15.2).

Силы резания. По общим формулам сила резания

$$P = P_3 + P_{п}.$$

При уменьшении заднего угла α_{ϕ} сила резания по задней поверхности P_3 растет, а при уменьшении угла резания δ_{ϕ} уменьшается сила резания по передней поверхности резца $P_{п}$.

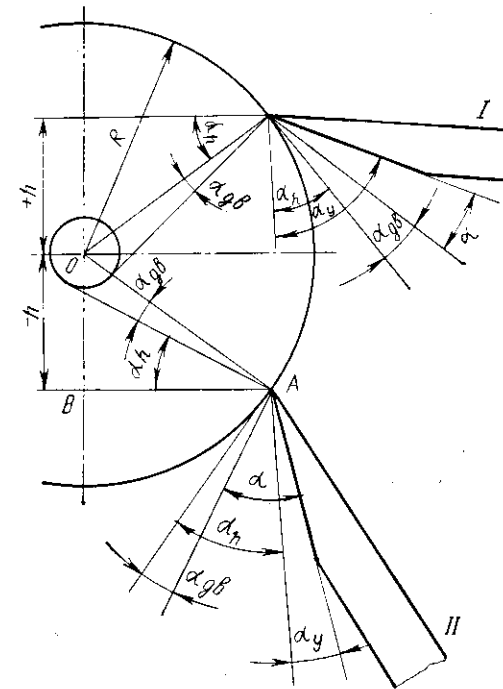


Рис. 15.5. Схема установки режущей кромки ножа:

I — выше осевой линии шпинделей; II — ниже осевой линии шпинделей

Как показывают опыты В. Н. Фелищука (ЛЛТИ), с уменьшением $\alpha_{\phi} < 1^{\circ}30'$ происходит рост нормальной силы, а следовательно, и P_3 интенсивнее (табл. 15.1). Это значит, падение $P_{п}$ с уменьшением δ_{ϕ} не перекрывает рост P_3 , вследствие чего касательная сила резания P растет.

По исследованиям В. Н. Фелищука и В. И. Любченко (МЛТИ) получены следующие обобщенные формулы для расчета среднего условного давления резания K (кг/мм^2):

для березы

$$K = (0,15 - 0,0015t) + (0,016 - 0,00012t) \Delta + \frac{a_p(0,24 - 0,002t)}{c}; \quad (15.1)$$

для дуба

$$K = (0,25 - 0,0025t) + (0,027 - 0,00021t) \Delta + \frac{a_p(0,4 - 0,005t)}{c}; \quad (15.2)$$

для бука

$$K = (0,22 - 0,0021t) + (0,023 - 0,00017t) \Delta + \frac{a_p(0,34 - 0,003t)}{c}; \quad (15.3)$$

Таблица 15.1

Зависимость сил резания от α

Усилие	Задний угол α , град					
	0°30'	0°00'	0°30'	1°30'	2°30'	3°30'
Касательное P	1,41	1,32	1,25	1,07	1,03	1
Нормальное R	1,8	1,5	1,3	1,05	1,03	1

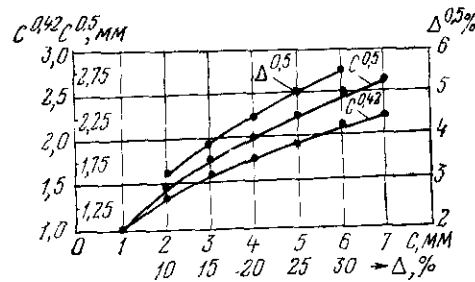


Рис. 15.6. Расчетный график для $c^{0,42}$, $c^{0,5}$ и $\Delta^{0,5}$

Касательная сила резания при длине чурака L

$$P = KcL \text{ кг}. \quad (15.4)$$

Мощность резания

$$N = \frac{Pv_{\text{ср}}}{102} \text{ квт}; \quad (15.5)$$

$$N = N_{\text{пр}} \eta_{\text{пр}}; \quad (15.6)$$

где $\eta_{\text{пр}} = 0,6 - 0,75$.

Радиальная сила для березы при $t = 20^\circ$

$$R = L \left[\frac{0,125}{c^{0,42}} - 0,2 + 0,185(\Delta c)^{0,5} \right] \text{ кг}. \quad (15.7)$$

Значения $c^{0,42}$, $c^{0,5}$ и $\Delta^{0,5}$ принимаем по рис. 15.6. При других температурах надо вводить для R поправочный коэффициент a_t :

t , град	10	20	30	40	50	60
a_t	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6

При других породах надо учитывать для R поправочный коэффициент a_p :

для кедра $a_p = 0,8$; для бука $a_p = 1,3$;
для березы $a_p = 1$; для дуба $a_p = 1,7$.

Усилие подачи $Q = R$ кг.

На прижимную линейку действуют следующие силы: касательная

для березы $P_1 = (0,016 - 0,00012t) \Delta cL$ кг;
для бука $P_1 = (0,023 - 0,00017t) \Delta cL$ кг;
для дуба $P_1 = (0,027 - 0,00021t) \Delta cL$ кг; (15.8)

радиальная для березы при $t = 20^\circ$

$$R = 0,185 (\Delta c)^{0,5} L \text{ кг}. \quad (15.9)$$

При других t и породах надо принимать поправочные коэффициенты a_t и a_p .

Температура нагрева древесины на поверхности при лущении чурака $20 - 45^\circ \text{C}$, при строгании $50 - 60$, при безопилочном резании дощечек $90 - 100^\circ \text{C}$.

Шероховатость поверхности шпона. На шероховатость поверхности шпона влияют физико-механические свойства древесины, толщина шпона, угол резания, острота реза, температура чурака и степень обжима шпона.

Влияние температуры t на шероховатость поверхности:

t , град	20	30	40	50	60	70
$\nabla \delta$	$\nabla \delta 5$	$\nabla \delta 5$	$\nabla \delta 5$	$\nabla \delta 6$	$\nabla \delta 6$	$\nabla \delta 6$

Примерные данные о влиянии обжима шпона на шероховатость его поверхности приведены в табл. 15.2.

Таблица 15.2

Класс шероховатости лущеного шпона

Δ , %	$\varepsilon = c$, мм			
	< 1	≤ 1.2	≤ 1.5	< 2
5	$\nabla \delta 5$	$\nabla \delta 5$	$\nabla \delta 5$	$\nabla \delta 5$
10	5	5	5	5
15	6	5	5	5
20	6	6	5	5
25	7	6	6	5
30	6	6	6	6

15.2. Обработка древесины на дощечкорезательных станках

В ходе исследований канд. техн. наук М. Д. Товстолесом на дощечкорезательных станках получены значения среднего условного давления резания K , кг/мм²:

$$\begin{aligned} \text{для сосны} \quad K &= 0,025 + \frac{0,13}{c}; \\ \text{для осины} \quad K &= 0,027 + \frac{0,135}{c}; \\ \text{для березы} \quad K &= 0,041 + \frac{0,14}{c}. \end{aligned} \quad (15.10)$$

Зная K , определяем N и P :

$$N = \frac{Kbev}{102}; \quad (15.11)$$

$$P = \frac{102 N}{v} = Kbe. \quad (15.12)$$

15.3. Расчет режимов резания

Пример 1. Дано: лущится шпон березы при $v_{ор} = 0,8$ м/сек, $e = c = 1,5$ мм, $L = 1620$ мм, $t = 25^\circ$.
Определить силы N , P , Q , действующие на линейку.

Решение. 1. При $e = 1,5$ мм рекомендуют $\Delta = 20\%$, $t = 25^\circ$.

2. По выражению (15.2)

$$K = (0,15 - 0,0015 \cdot 25) + (0,016 - 0,00012 \cdot 25) 20 + \frac{0,24 - 0,002 \cdot 25}{1,5} = 0,33 \text{ кг/мм}^2.$$

3. По уравнению (15.5)

$$P = 1620 \cdot 0,33 \cdot 1,5 = 810 \text{ кг}.$$

4. По формуле (15.6)

$$N = \frac{810 \cdot 0,8}{102} = 6,5 \text{ кат}.$$

5. По выражениям (15.8) и (15.9) с учетом a_t получаем силы, действующие на линейку: касательную

$$P_t = (0,016 - 0,00012 \cdot 25) 20 \cdot 1,5 \cdot 1620 \cdot 0,95 = 594 \text{ кг};$$

радиальную

$$R = 0,185 (20 \cdot 1,5)^{0,5} \cdot 1650 \cdot 0,95 = 1520 \text{ кг},$$

где $0,95 = a_t$.

6. Усилие подачи по формуле (15.7) с учетом коэффициента a_t

$$Q = \left(\frac{0,125}{1,2} - 0,2 + 0,185 \cdot 5,48 \right) 1620 \cdot 0,95 = 1385 \text{ кг}.$$

7. Согласно табл. 15.2, шероховатость обработки $\nabla \delta 6$ при $t = 25^\circ$.

Аналогично решаются все примеры по лущению шпона и по строганой фанере.

Пример 2. Определить N и P при нарезании дощечек березы толщиной 10 мм

Решение. По формуле (15.10)

$$K = 0,041 + \frac{0,14}{10} = 0,055 \text{ кг/мм}^2.$$

При $b = 200$ мм и $v = 2,2$ м/сек

$$N = \frac{0,055 \cdot 200 \cdot 10 \cdot 2,2}{102} = 2,62 \text{ кат};$$

$$P = \frac{102 N}{v} = 120 \text{ кг}.$$

Глава 16

ШЛИФОВАНИЕ

16.1. Шлифование шлифовальными шкурками

Назначение и схемы шлифования. Шлифование — процесс обработки деталей абразивными инструментами с целью придания гладкости. Процесс шлифования завершает механическую обработку древесины. Шлифованием устраняются неровности предыдущей обработки:

а) кинематические — риски, волны, вырывы, заусеницы и др.;
б) технологические — выступающие части (провесы) у рам и щитов, склеенных из делянок;

в) выравниваются плоскости и калибруются материалы в размер по толщине;

г) производится зачистка фанеры и фанерованных деталей и др. При этом обработанная поверхность получается гладкой и достигается требуемый класс шероховатости поверхности $\nabla \delta 7 - \nabla \delta 10$.

Для шлифования древесины используются шлифовальные шкурки и абразивные круги.

В зависимости от конструкции станка (рис. 16.1) шлифовальный инструмент имеет вид бесконечной ленты, диска или цилиндра.

Шлифовальная шкурка. Шлифовальные шкурки состоят из абразивных зерен на гибкой основе (ткань или бумага) и эластичной связки, которая удерживает абразивные зерна до момента потери ими режущих свойств.

В качестве абразивного материала для изготовления шлифовальных шкурок применяются природные материалы — кремний, гранаты и искусственные — электрокорунд (окись алюминия), карборунд (карбид кремния), стекло и др.

Метод нанесения абразивных зерен на шкурку — механический (гравитационный) или электростатический. Ориентация частиц абразива длинной осью к основе при первом способе достигается встряхиванием основы, при втором — поляризацией их в электростатическом поле.

Абразивные зерна наносят на основу одним слоем. Структура абразивного инструмента определяется количеством зерен и клея, приходящимся на единицу поверхности шлифовальной шкурки. По структуре различают 100%-ную (плотную) для чистового шлифования твердой древесины, 75%-ную (среднюю) и 50%-ную (редкую) для шлифования влажной и смолистой древесины.

Абразивные круги для шлифования древесины изготавливаются из стекла на бакелитовой связке.

Номер зернистости шкурки. Шлифовальные шкурки на тканевой основе имеют следующие номера зернистости (ГОСТ 3647—59) в порядке измельчения: 125, 100, 80, 63, 50, 40, 32, 25, 20, 16, 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3; на бумажной основе: 50, 40, 32, 25, 20, 16, 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3; а водостойкие, кроме этих, еще и М40, М28, М14.

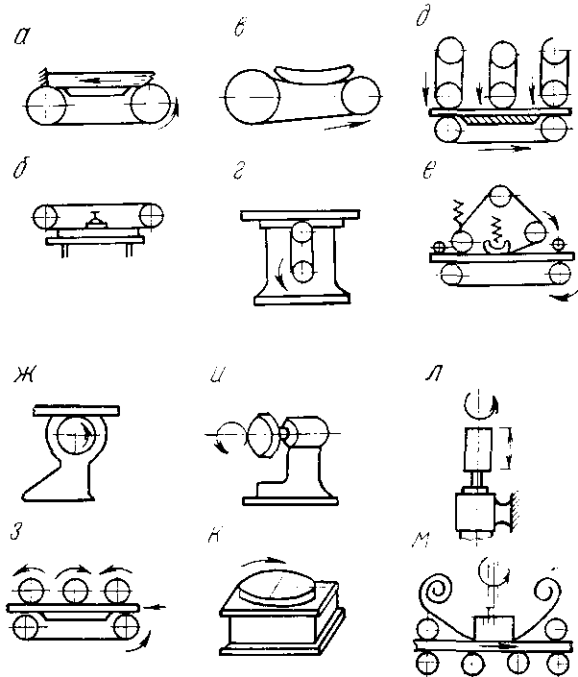


Рис. 16.1. Схемы шлифования на станках:

а — с неподвижной опорой шлифовальной ленты; б — с нажимом на шлифовальную ленту контактного прижима; в — со свободной шлифовальной лентой; г — одноленточных со шкивной рабочей частью; д — многоленточных со шкивной рабочей частью; е — ленточных с плоской и со шкивной рабочей частью; ж — одноцилиндровых; з — многоцилиндровых; и — горизонтальных дисковых; к — вертикальных дисковых; л — с бобиной; м — вибрационных

Примечание. Для шлифзерна (№ 200—16) и шлифпорошков (№ 12—3) номер зернистости показывает средний размер в поперечнике в сотых долях миллиметра, а для микропорошков (М40—М5) — в микрометрах, например в шкурках с номером зернистости 50 средний размер зерна 0,5 мк, а в М40 — 40 мкм.

В зависимости от класса шероховатости поверхности деталей, поступающих на шлифование, рекомендуется начинать обработку шлифовальными шкурками, номера зернистости которых даются в табл. 16.1.

По опытам канд. техн. наук В. В. Жукова наилучшие результаты как по производительности, так и по наиболее быстрому дости-

Рекомендуемые номера зернистости шлифовальных шкурочек для предварительного шлифования

Шероховатость поверхности, поступающей на шлифование		Рекомендуемый номер зернистости шлифовальной шкурки
класс шероховатости по ГОСТ 7016—68	R_z макс., мкм	
▽д4	315—500	80 или 50
▽д5	200—315	50 или 40
▽д6	100—200	40 или 32
▽д7	60—100	32 или 25
▽д8	30—60	25, 20 или 16

жению требуемого класса шероховатости получают при последовательном шлифовании номерами зернистости (80, 63, 50, 40, 32, 25), расположенными через один номер, например 80, 50, 32, и при номерах зернистости 20, 16, 12, 10, 8, 6 и 5 — через один-два, например 16, 10, 6 или 20, 12, 8, 5.

В табл. 16.2 приведены рекомендации по выбору номера зернистости шлифовальной шкурки в зависимости от требований шероховатости поверхности.

Таблица 16.2

Рекомендуемые номера зернистости шлифовальных шкурочек для получения требуемого класса шероховатости поверхности

Требуемый класс шероховатости поверхности по ГОСТ 7016—68	R_z макс., мкм	Номер зернистости шлифовальной шкурки
▽д7	60—100	80, 50
▽д8	30—60	40, 32, 25, 20
▽д9	16—30	16, 100, 10
▽д10	< 16	8, 6, 5

Качество шлифования и производительность шлифования зависят от правильного выбора шлифовальной шкурки и режимов ее работы. Во время работы шлифовальная шкурка располагается на жестком (чугун, дерево) или мягком (войлок, фетр) основании.

Удаление грубых неровностей и погрешностей формы с целью получения точной поверхности достигается шлифованием на жестком основании или абразивными кругами. При шлифовании мелких неровностей (риски, волны, вырывы и др.) шлифовальной шкуркой на эластичном основании можно получить очень гладкую поверхность (▽д9—▽д10), но невысокой точности.

Для удаления ворса рекомендуется поверхность древесины смачивать. На смоченной поверхности ворс поднимается и после просушивания легко удаляется тонким шлифованием.

Влияние длины контакта на процесс шлифования. Канд. техн. наук М. Н. Гиндин (МЛТИ) исследовал тепловые явления при шлифовании и влияние длины контакта l_k шлифовальной шкурки с древесиной на ее работу без прижога обрабатываемой поверхности.

В ходе шлифования абразивные зерна снимают с обрабатываемой поверхности такое количество стружки, которое помещается в пространстве между абразивными зернами. При большой длине пути абразивного зерна в контакте с древесиной объем срезаемой стружки может превысить объем межзерновой впадины. Когда стружка переполняет межзерновое пространство, она оттесняет шлифовальную шкурку от поверхности древесины, поэтому при превышении некоторой длины контакта производительность ее быстро снижается.

Длина контакта, при которой происходит заполнение межзерновых впадин, называется *критической*. Решающее влияние на критическую длину контакта оказывает номер зернистости. Критическая длина контакта растет по мере увеличения размеров абразивных зерен и несколько уменьшается при росте удельного давления. Для шлифования древесины без прижогов шлифовальными шкурками разных номеров зернистости рекомендуется выбирать оптимальную длину контактного утюжка:

Номер зернистости шлифовальной шкурки	10	16	25
Длина контакта l_k , мм	65	100	125

Производительность шлифования. 1. Удельная производительность 1 см² шлифовальной шкурки в кубических сантиметрах древесины, сошлифованной с 1 см² заготовки за один проход:

$$A = \frac{hbl_k}{bl_kv t} = \frac{h}{vt} \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{см}, \quad (16.1)$$

где h — толщина сошлифованного слоя, см;
 b — ширина шлифования, см;
 l_k — длина контакта шкурки с древесиной, см;
 v — скорость резания, см/сек;
 t — время шлифования, сек.

Удельная производительность зависит от номера зернистости, метода насыпки абразивных зерен, от степени затупления, удельного давления шлифовальной шкурки на древесину и объемного веса древесины.

Средняя удельная производительность шлифовальной шкурки по опытам Ю. П. Попова:

$$A = a_z a_0 a_p \frac{145,5 q}{10^6 \gamma \sqrt{z}} \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{см}, \quad (16.2)$$

где a_z — коэффициент, учитывающий материал абразивных зерен:

материал абразивный	a_z
электрокорунд	1
кремнь	1,33
стекло	0,4

a_0 — коэффициент, учитывающий метод насыпки:

метод насыпки	a_0
гравитационный	1
электростатический	1,2

a_p — коэффициент, учитывающий затупление шлифовальной шкурки:

состояние шлифовальной шкурки	a_p
острая	1,33
среднезатупленная	1
тупая	0,7

q — удельное давление (табл. 16.3), кг/см²;

γ — удельный вес древесины:

порода древесины γ , г/см ³	
сосна	0,5
береза	0,6
дуб	0,725
бук	0,7

z — номер зернистости по ГОСТ 3647—59.

Таблица 16.3

Вид прижима	Удельное давление	
	q , кг/см ²	
	$z = 80-50$	$z = 25-10$

Для лент с неподвижным столом (большая поверхность контакта)	0,015—0,04	0,01—0,025
Для утюжков с малой поверхностью контакта	0,05—0,2	0,02—0,05
Для дисковых станков	0,05—0,57	—
Для вальцового шлифования*	0,5—2	0,2—0,5

* Удельное давление q_1 для вальцового шлифования дается также в табл. 16.4.

Удельное давление в диапазоне производственных значений приводит к удельной производительности шлифовальной шкурки по закону, близкому к линейному.

2. Удельная производительность инструмента

$$A_n = Av \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{сек}, \quad (16.3)$$

где A — средняя удельная производительность шкурки, определяемая по формуле (16.2).

3. Время контакта

$$t_k = \frac{l_k}{v} \text{ сек},$$

где l_k — длина контакта, см.

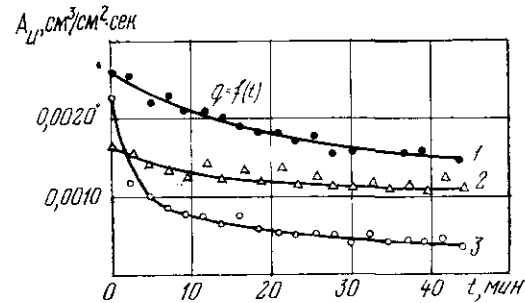


Рис. 16.2. График зависимости удельной производительности шлифования от времени работы шлифовальной шкурки (по В. Е. Жукову). Породы древесины бук, шлифование ленточное: 1 — кремний 46; 2 — электрокорунд 46; 3 — стекло 46

При подаче $u \parallel v$

$$t_k = \frac{l_k}{v \pm u} \text{ сек}.$$

4. Припуск на шлифование

$$H = H_{\tau\partial'} - H_{\tau\partial''}, \quad (16.4)$$

где $H_{\tau\partial'}$ — высота неровностей при $\nabla\partial$ до шлифования (табл. 16.1); $H_{\tau\partial''}$ — то же при $\nabla\partial$ после шлифования (табл. 16.2).

5. Время шлифования

$$t_{ш} = \frac{H}{A_n} \text{ сек}.$$

6. Скорость подачи

$$u = \frac{l_k}{t_{ш}} \text{ см. сек}.$$

Износостойкость 1 см² шлифовальной шкурки. Удельная производительность шлифовальной шкурки A уменьшается по мере затупления абразивных зерен.

По опытам канд. техн. наук Е. В. Жукова (рис. 16.2) удельная производительность шлифовальной шкурки A_n интенсивно падает за первый период ее работы (5—10 мин). За это время наиболее

выступающие и непрочно закрепленные абразивные зерна обламываются и выкрашиваются из связи.

В дальнейшем процесс почти стабилизируется, производительность шлифовальной шкурки и шероховатость поверхности уменьшаются незначительно. Но после шлифовки 1 см² шкуркой некоторой предельной длины древесины $L_{ш}$ шлифовальная шкурка изна-

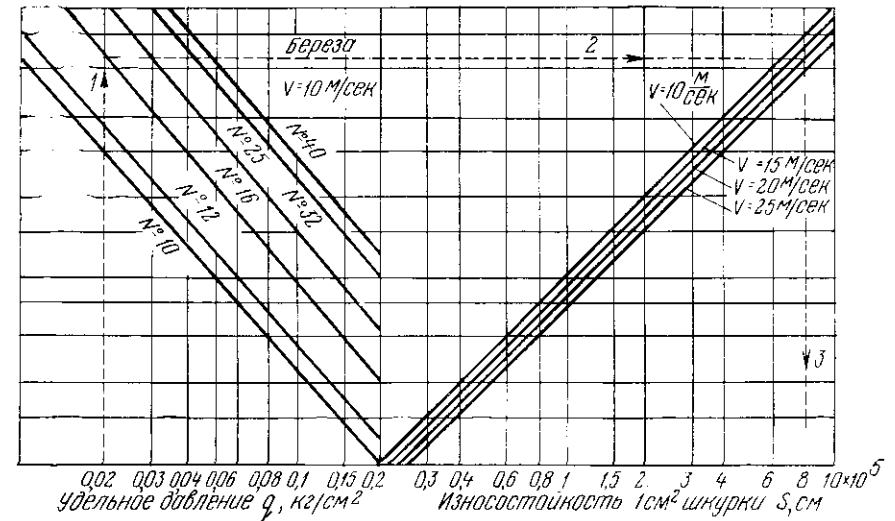


Рис. 16.3. Номограмма для расчета износостойкости 1 см² шкурки (по Ю. П. Попову)

шивается настолько, что перестает резать, т. е. $A_n = 0$. Считается нецелесообразным работать шлифовальной шкуркой, удельная производительность которой снизилась наполовину, до 0,5A.

Путь S , пройденный 1 см² шкурки в контакте с древесиной до потери ею производительности наполовину (0,5A), называется износостойкостью. По опытам Ю. П. Попова износостойкость

$$S = 8 \cdot 10^5 \left(\frac{0,01}{q} \right)^{1,15} \left(\frac{100}{z} \right)^{1,4} \left(\frac{v}{10} \right) 0,31 a_n a_{ш} \text{ см}. \quad (16.5)$$

В этом уравнении приведены следующие коэффициенты:

$a_n = 0,35$ при шлифовании хвойных пород древесины мелкозернистыми шкурками;

$a_n = 0,55$ для шлифовальных шкурок с номерами зернистости 80—25; $a_n = 1,0$ для шлифования лиственных пород; $a_{ш} = 1$ для шлифовальной шкурки на бумажной основе и мездровом клее; $a_{ш} = 2,5$ для шлифовальных шкурок на тканевой основе, мездровом клее, с номерами зернистости 20—3; $a_{ш} = 3$ для шлифовальной шкурки с номерами зернистости 80—25.

Формулу (16.5) запишем в виде

$$S = S_1 a_n a_{ш}, \quad (16.6)$$

где

$$S_1 = 8 \cdot 10^5 \left(\frac{0,01}{q} \right)^{1,15} \left(\frac{100}{z} \right)^{1,4} \left(\frac{v}{10} \right) 0,31. \quad (16,7)$$

По выражению (16.7) построена номограмма (рис. 16.3), которая значительно упрощает расчет износостойкости шкурки S .

Например, дано: $q = 0,02 \text{ кг/см}^2$, $z = 16$, $v = 20 \text{ м/сек}$, порода древесины — береза. Определить износостойкость шлифовальной шкурки S .

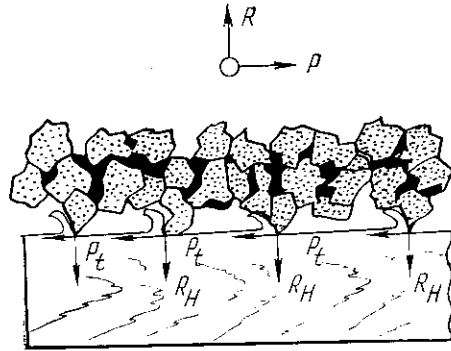


Рис. 16.4. Силы резания при шлифовании

По стрелкам 1, 2, 3 (рис. 16.3) находим $S_1 = 800\,000 \text{ см}$. При шлифовании березы коэффициенты $a_n = 1$, $a_{ш} = 1$, тогда износостойкость

$$S = S_1 a_n a_{ш} = 800\,000 \cdot 1 \cdot 1 = 800\,000 \text{ см}.$$

Время работы до износа

$$t_s = \frac{SL_{ш}}{60 v l_k a_{р.в} a_{м.в}} \text{ мин}, \quad (16,8)$$

где $L_{ш}$ — полная длина шлифовальной шкурки за цикл, см;
 v — скорость шлифования, см/сек;
 l_k — длина контакта с древесиной, см;
 $a_{р.в}$ — коэффициент использования рабочего времени;
 $a_{м.в}$ — коэффициент использования машинного времени.

Например, $L_{ш} = 400 \text{ см}$, $l_k = 12,5 \text{ см}$, $v = 2000 \text{ см/сек}$, $a_{р.в} = 0,9$, $a_{м.в} = 0,66$:

$$t_s = \frac{800\,000 \cdot 400}{60 \cdot 2000 \cdot 12,5 \cdot 0,66 \cdot 0,9} = 360 \text{ мин, или } 6 \text{ ч}.$$

Сила резания при шлифовании. Вершины абразивных зерен разной формы излома неравномерно выступают над поверхностью шлифовальной шкурки, поэтому глубина внедрения их, толщина и форма стружки для каждого резца будут разные. Каждое абразивное зерно воздействует на древесину с элементарной касательной силой P_t и нормальной R_n (рис. 16.4). Сумма этих элементарных сил

составляет общую касательную силу P и нормальную R , которая компенсируется силой прижима $S_{пр}$.

В виду того что процесс шлифования не имеет стабильных условий резания, касательную силу P рассматривают как фрикционную силу трения:

$$P = CqF \text{ кг}, \quad (16,9)$$

где q — удельное давление, кг/см^2 ;

F — площадь контакта: $F = bl_k$, см^2 ;

l_k — длина контакта шлифовальной шкурки шириной b ;

C — коэффициент сцепления с древесиной.

По опытам Ю. П. Попова и обобщениям проф. А. Л. Бершадского:

$$\text{для березы} \quad C_b = \frac{2300 A_b}{q} + 0,4;$$

$$\text{для сосны} \quad C_c = \frac{1800 A_c}{q} + 0,4; \quad (16,10)$$

$$\text{для дуба и бука} \quad C_d = \frac{2450 A_d}{q} + 0,27.$$

Мощность шлифования. Мощность шлифования рассчитывается с учетом силы трения обратной стороны шлифовальной ленты по основанию.

1. Для ленточных станков: а) с горизонтальным и вертикальным неподвижным столом

$$N = qF(C + f) \frac{v}{102} \text{ кВт}, \quad (16,11)$$

где v — скорость шлифования, м/сек;

f — коэффициент трения обратной стороны шлифовальной ленты по основанию (по столу): $f = 0,4$;

б) со свободной шлифовальной лентой

$$N = \frac{qFCv}{102} \text{ кВт}; \quad (16,12)$$

в) с подвижным столом и утюжком

$$N = qF(C + f_1) \frac{v}{102} \text{ кВт}; \quad (16,13)$$

где f_1 — коэффициент трения обратной стороны шлифовальной ленты о рабочую поверхность утюжка: $f_1 = 0,36$;

г) для дисковых станков

$$N = qF \frac{v}{102} \text{ кВт}; \quad (16,14)$$

д) для цилиндрических станков (на один цилиндр)

$$N = q_1 F \frac{v}{102} \text{ кВт}, \quad (16,15)$$

где q_1 — удельное давление на 1 мм ширины шлифования, кг/мм (табл. 16.4, графа 10).

Условия и режимы шлифования на многовальцовых станках

Объект шлифования	Характеристика поверхности до обработки	Глубина слоя, мм	Класс шероховатости	Номер шлифовального цилиндра	Толщина слоя, подложка-целесо шлифованию, мм	Номер зернистости шлифовальной шкурки	Жесткость основания под шлифовальной шкуркой	Необходимость оцилиндрования	Рабочее давление шлифовальной шкурки на древесину на 1 см ширины цилиндра, кг
Щиты из древесных и брусовые детали	Обработана на продольно-фрезерных станках	8-9	1	0,17-0,3	80	Жесткое	Да	1,2-3	
	Класс шероховатости $\nabla\delta 7 - \nabla\delta 8$	2	2	0,05-0,15	25; 40	Среднее	Да	1,0-2	
	Итого:	3	3	0,03-0,05	10; 25	Мягкое	Нет	0,3-1	
Щиты фанеро-ваные (толщина фанеры 0,6-0,8 мм)	Глубина неровностей 0,03-0,1 мм	0,03-0,1	8-10	1	0,1-0,2	40	Среднее	Да	1,5-2,
	Погрешность формы 0,2-0,4/1000 мм	0,2-0,4	2	2	0,05-0,12	16	То же	Да	0,6-1,2
	Итого:	0,23-0,5							

Продолжение табл. 16.4

Объект шлифования	Характеристика поверхности до обработки	Глубина слоя, мм	Класс шероховатости	Номер шлифовального цилиндра	Толщина слоя, подложка-целесо шлифованию, мм	Номер зернистости шлифовальной шкурки	Жесткость основания под шлифовальной шкуркой	Необходимость оцилиндрования	Рабочее давление шлифовальной шкурки на древесину на 1 см ширины цилиндра, кг
Фанера клееная	Погрешности формы 0,2/1000 мм	0,1-0,15	3	0,02-0,03	12	Мягкое	Нет	0,3-0,6	
	Итого:	0,15-0,35			0,17-0,35				
	Класс шероховатости $\nabla\delta 7 - \nabla\delta 8$	8-9	1	0,1-0,2	50	Среднее	Да	1,2-2	
Рамы плоские после сборки	Глубина неровностей 0,06-0,2 мм	0,1-0,2	2	0,07-0,15	25	То же	Да	0,6-1,2	
	Погрешность толщины 0,1-0,2	0,1-0,2	3	0,03-0,5	12	Мягкое	Нет	0,3-1	
	Итого:	0,2-0,4			0,2-0,4				
Щиты фанеро-ваные (толщина фанеры 0,6-0,8 мм)	Провесы высотой 0,4-0,8 мм	0,45-0,9	8-7	1	0,3-0,6	80	Жесткое и очень жесткое	Да	3-6
	Класс шероховатости $\nabla\delta 7 - \nabla\delta 8$	0,05-0,1	2	0,15-0,3	40; 25	Среднее или жесткое	Да	1,2-3	
	Глубина неровностей 0,03-0,1 мм	0,05-0,1	3	0,05-0,1	10; 12	Мягкое или среднее	Нет	0,6-1	
Итого:	0,5-1			0,5-0,1					

16.2. Шлифование древесины хвойных пород абразивными кругами

Абразивный круг в отличие от шлифовальной шкурки — инструмент многократного использования и под воздействием сил сопротивления резанию обладает свойствами самозатачивания за счет откалывания кусочков от абразивных зерен и выкрашивания целых абразивных зерен из связки.

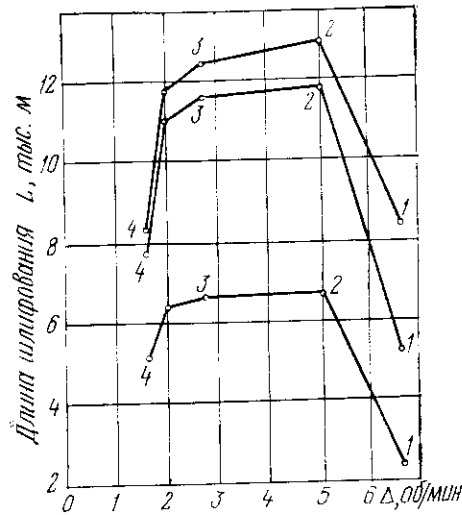


Рис. 16.5. Режимы работы шлифовального круга в зависимости от подачи на оборот

Абразивные круги могут применяться для шлифования и калибрования плоских и профильных поверхностей деталей хвойных пород. Они имеют в 2,5—4 раза большую удельную производительность и намного большую стойкость по сравнению со шлифовальной шкуркой того же номера зернистости, обеспечивая сравнительно высокий класс шероховатости поверхности и точность обработки.

Удельная производительность шлифования — количество материала, снятое абразивным кругом с обрабатываемого материала шириной в 1 см за секунду:

$$A = 0,32 bh \frac{\Delta v}{D} \text{ см}^3/\text{сек}, \quad (16.16)$$

где b — ширина шлифования, мм;
 h — глубина резания, мм;
 Δ — подача на оборот абразивного круга, мм/об;
 v — скорость резания, м/сек;
 D — диаметр в начале периода стойкости, мм.

Исследованиями канд. техн. наук И. М. Зайца (рис. 16.5) установлено, что в зависимости от подачи на оборот абразивный круг может работать в режиме интенсивного самозатачивания (износа) — участок кривых 1—2; оптимального самозатачивания — участок 2—3 и засаливания с частичным самозатачиванием — участок 3—4.

Диапазон подач, обеспечивающий работу абразивного круга в режиме самозатачивания и частично в режиме износа, считается оптимальным. Оптимальная скорость подачи при шлифовании абразивными кругами

$$u = (10,7 - 19,1) \frac{v 0,01 H_k + 0,2}{D m_D h^{1,1}} m_z m_n, \quad (16.17)$$

где v — скорость резания, оптимальное ее значение 25—50 м/сек;
 H_k — твердость абразивного круга:

$$H_k = 1150 h + 800 \text{ кг см}^2;$$

D — диаметр абразивного круга, мм;

m_D — поправочный коэффициент, учитывающий диаметр:

D , мм	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
m_D	1,32	1,20	1,12	1,06	1,00	0,95	0,91	0,87	0,83	0,79

h — глубина резания, мм;

m_z — поправочный коэффициент, учитывающий номер зернистости абразива:

Номер зернистости	32	40	50	63	80
Поправочный коэффициент m_z	0,62	0,77	1,00	1,2	1,6

m_n — поправочный коэффициент, учитывающий породу древесины.

Порода древесины	сосна	ель	лиственница
Поправочный коэффициент m_n	1,00	1,05	1,10

Оптимальная глубина резания и пределы высоты неровностей шлифованной поверхности, которые можно получить при разном номере зернистости абразивного круга, даны в табл. 16.5.

Таблица 16.5

Глубина резания и высота неровностей

Номер зернистости	32	40	50	63	80
-------------------	----	----	----	----	----

Оптимальная глубина резания h_0 , мм	0,05—0,15	0,15—0,25	0,25—0,35	0,35—0,50	0,50—0,80
Высота неровностей шлифованной поверхности R_z макс., мкм	18—36	20—40	25—50	30—60	35—70

Касательная P и радиальная R составляющие силы резания определяются по формулам:

$$P = b [(0,284 - 0,0011 z) h - 0,00093z + 0,14] \frac{1}{a_\Delta} a_v a_n a_k a_n;$$

$$R = b [(0,448 - 0,0014 z) h - 0,0006 z + 0,153] \frac{1}{a_\Delta} a_v a_n a_k a_n;$$

где b — ширина шлифования, мм;

z — номер зернистости абразива (ГОСТ 3647—59);

a_Δ — поправочный коэффициент, учитывающий подачу на оборот абразивного круга:

Δ , мм/об	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
a_{Δ}	1,60	1,26	1,00	0,84	0,71	0,63	0,58	0,53	0,49	0,47

a_v — поправочный коэффициент, учитывающий скорость резания:

v , м/сек	15	20	25	30	35	40	45
a_v	1,22	1,12	1,05	1,02	1,00	0,98	0,96

$a_{н.к}$ — поправочный коэффициент, учитывающий твердость абразивного круга:

Твердость H_k , кг/см ²	50	700	900	1100	1300	1500	1700	1900	2100	2300	2500
Поправочный коэффициент $a_{н.к}$	0,75	0,81	0,87	0,94	1	1,04	1,12	1,18	1,24	1,30	1,36

$a_{п}$ — поправочный коэффициент, учитывающий породу древесины:

Порода древесины	Сосна	Ель	Пихта
Поправочный коэффициент $a_{п}$	1	0,8	0,6

В случае шлифования деталей с постоянным прижимом их к абразивному кругу сила прижима

$$Q = b [(0,443 - 0,0014z)h - 0,0006z + 0,153] \frac{1}{a_{\Delta}} a_v a_{н.к} a_{п}$$

Пример 1. Дано: шлифуется береза на ленточном станке с утюжком, $q = 0,044$ кг/см², $v = 10$ м/сек, $F = 150$ см², $z = 16$, абразив — электрокорунд гравитационной насыпки.

Определить среднюю удельную производительность A , силу P и мощность N .

Решение. 1. Средняя удельная производительность для березы по формуле (16.2)

$$A = 1 \cdot 1 \cdot 1 \frac{145,5 \cdot 0,044}{10^6 \cdot 0,6 \sqrt{16}} = \frac{2,67}{10^6} \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{см.}$$

2. Коэффициент сцепления шлифовальной шкурки с древесиной по уравнению (16.10)

$$C_6 = \frac{2300}{0,044} \cdot \frac{2,67}{10^6} + 0,4 = 0,54.$$

3. Касательная сила резания по выражению (16.9)

$$P = 0,54 \cdot 0,044 \cdot 150 = 3,56 \text{ кг.}$$

4. Мощность по формуле (16.11)

$$N = 0,044 \cdot 150 (0,54 + 0,36) \frac{10}{102} \approx 0,6 \text{ квт.}$$

Пример 2. После фрезерования деталь с классом шероховатости $\nabla 7$ поступила на шлифовальный станок с неподвижным столом, длина контакта $l_k = 12,5$ см и $b = 10$ см. Требуемый класс шероховатости $\nabla 9$. Длина шлифовальной ленты за один цикл $L_{ш} = 400$ см, порода — береза, $v = 20$ м/сек, $T = 420$ мин, $a_{р.в} \cdot a_{м.в} = 0,7$; абразив — электрокорунд, насыпка — гравитационная, затупление — среднепроизводственное.

Определить: припуск на обработку, среднюю удельную производительность A , время шлифования, количество обрабатываемых деталей Q , износоустойчивость шлифовальной шкурки S и время t_s работы до износа, силу P и мощность N .

Решение. 1. Припуск на обработку по формуле (16.4)

$$H = H_{\nabla 7} - H_{\nabla 9} = 0,1 - 0,016 = 0,084 \text{ мм.}$$

Значения 0,1 и 0,016, как максимальная глубина неровностей для $\nabla 7$ и $\nabla 9$, взяты из табл. 16.2.

2. По табл. 16.2 принимаем номер зернистости $z = 16$, по табл. 16.3 $q = 0,02$ кг/см², для электрокорунда $a_z = 1$, $a_0 = 1$, $a_p = 1$, тогда по выражению (16.2)

$$A = 1 \cdot 1 \cdot 1 \frac{0,02 \cdot 145,5}{10^6 \cdot 0,6 \sqrt{16}} = \frac{1,21}{10^6} \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{см.}$$

3. Удельная производительность шлифовальной шкурки

$$A_u = Av = \frac{1,21}{10^6} \cdot 2000 = 0,0024 \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{сек.}$$

4. Время шлифования

$$t_{ш} = \frac{H}{A_u} = \frac{0,084}{0,0024} = 35 \text{ сек.}$$

Если надо шлифовать деталь с двух сторон, то

$$t_{ш} = 35 \cdot 2 = 70 \text{ сек.}$$

5. Количество обрабатываемых деталей за смену

$$Q_{шт} = \frac{T_{см}}{t_{ш} a_{р.в} a_{м.в}} = \frac{2800}{70 \cdot 0,7} = 588 \text{ шт.,}$$

где $T_{см} = 8 \cdot 60 \cdot 60 = 2800$ сек.

6. По номограмме (рис. 16.3) $S_1 = 800\,000$ см, по уравнению (16.6)

$$S = 800\,000 \cdot 1 \cdot 1 = 800\,000 \text{ см.}$$

Время работы шлифовальной шкурки до износа

$$t_s = \frac{800\,000 \cdot 400}{60 \cdot 2000 \cdot 12,5 \cdot 0,7} = 305 \text{ мин}$$

или около 5 часов, т. е. шкурку надо менять за восьмичасовую работу два раза.

7. По формуле (16.10) определяем

$$C_6 = \frac{2300 \cdot 1,21}{0,02} + 0,4 = 0,41.$$

Сила резания по выражению (16.9)

$$P = 0,02 \cdot 0,41 \cdot 12,5 \cdot 10 = 1,03 \text{ кг.}$$

Мощность по уравнению (16.13)

$$N = 0,02 \cdot 12,5 \cdot 10 (0,41 + 0,4) \frac{20}{102} = 0,4 \text{ квт.}$$

Пример 3. Шлифуется береза шириной $b = 20$ см, $v = 20$ м/сек = 2000 см/сек, $H = 0,2$ см, $q = 0,05$ кг/см², $L_{ш} = 50$ см, площадь прижима утюжка $F = l_k b = 15 \cdot 10$ см², $z = 25$, $a_z = 1$, $a_0 = 1$, $a_p = 1$.

Определить производительность шлифования в штуках, скорость подачи u , P и N .

Решение. 1. По формуле (16.2)

$$A = 1 \cdot 1 \cdot 1 \frac{145,5 \cdot 0,05}{10^6 \cdot 0,6 \sqrt{25}} = \frac{2,42}{10^6} \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{см.}$$

2. По выражению (16.3)

$$A_u = Av = \frac{2,42}{10^6} \cdot 2000 = 0,00484 \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{сек.}$$

3. Скорость подачи

$$u = \frac{l_k}{\frac{H}{A}} = \frac{15}{\frac{0,2}{0,00484}} = 0,35 \text{ см/сек} = 21 \text{ см/мин.}$$

4. По табл. 16.2 при работе шлифовальной шкуркой средней производственной затупленности $z=25$ шероховатость поверхности $\nabla 08$.

5. Сила резания по уравнению (16.9)

$$P = 0,42 \cdot 0,05 \cdot 15 \cdot 10 = 3,15 \text{ кг},$$

где

$$C = \frac{2300 \cdot 2,42}{0,02 \cdot 10^6} + 0,4 = 0,42.$$

6. Мощность по формуле (16.13)

$$N = 0,05 \cdot 15 \cdot 10 (0,42 + 0,36) \frac{20}{102} = 1,17 \text{ квт.}$$

Пример 4. Рассчитать допустимое рабочее давление шлифовальной шкурки на цилиндрах по мощности привода цилиндров.

Решение. Из формулы мощности привода

$$N_{\text{пр}} = \frac{Pv}{102 \eta_{\text{пр}}} \text{ квт}$$

получим допустимую силу

$$P = \frac{102 N_{\text{пр}}}{v} \eta_{\text{пр}} \text{ кг},$$

где P — окружная сила на цилиндре, кг;

v — скорость шлифования, м/сек;

$\eta_{\text{пр}}$ — к.п.д., равный 0,9.

Касательная сила шлифования выражается формулой

$$P = qCb \text{ кг},$$

где q — давление на 1 см ширины;

b — ширина шлифования, см;

C — коэффициент сопротивления шлифованию.

Поэтому

$$q = \frac{P}{bC} \text{ или } q = \frac{102 N_{\text{пр}} \eta_{\text{пр}}}{vbC}, \quad (16.18)$$

где q — допустимое по мощности давление.

Обычно мощность привода на всех цилиндрах одинакова и колеблется для различных станков от 0,045 до 0,1 квт на 1 см ширины.

Для $v = 25-30$ см/сек и $C = 0,3-0,4$

$$q = \frac{102 (0,045 - 0,1)}{(25 - 30) (0,3 - 0,4)} \approx 0,4 - 1,3 \text{ кг/см.}$$

Для отечественных станков $q = 0,6-0,75$ кг/см.

Условия и режимы шлифования на многоцилиндровых станках приведены в табл. 16.4.

Глава 17

ПРОЧИЕ ВИДЫ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

17.1. Окорка древесины

Окорка, т. е. очистка древесины от коры, применяется для обработки круглых лесоматериалов (пиловочника, фанерных кряжей, балансов и др.), а иногда реек и горбылей. Удаление коры и загрязненности дает возможность получить качественную технологическую щепу и улучшить процессы распиловки и лущения за счет увеличения стойкости резцов. Ценность технологической щепы, а также стружек и опилок возрастает при отсутствии примеси коры, так как различие физико-механических и химических свойств коры и древесины ограничивает возможность утилизации отходов с содержанием коры. Окорку древесины иногда производят с целью повышения срока службы древесины (столбов линий связи и электропередач, рудничной стойки и т. д.).

Окорку можно производить следующими способами:

1) механическим: а) резанием (фрезерованием), б) сдвигом коры тупыми короснимателями;

2) фрикционным — трением рабочих органов станка о поверхность окориваемого бревна или бревен друг о друга при параллельной укладке в барабанах, бункерах или цепями, плотно прижатыми к древесине и соскабливающими кору;

3) ударным — окорка ударами с помощью твердых инструментов (молотков, качающихся цепей);

4) химическим — введением под кору растущего дерева в период сокодвижения химических веществ для нарушения связей коры с древесиной;

5) термическим — путем воздействия жидкости и пара различных давлений и температур;

6) гидравлическим — путем воздействия струей воды под давлением (45—1000 атм);

7) пневматическим — путем воздействия воздушных струй под давлением с твердым наполнителем, например отделением коры за счет кинетической энергии воздушной струи и мелких древесных частиц, разогнанных до сверхзвуковой скорости;

8) электрическими разрядами в жидкости — путем преобразования электрической энергии, накопленной в конденсаторной батарее, в механическую энергию для разрушения коры и отделения ее от древесины.

Окорка резанием в настоящее время почти не применяется вследствие повреждения стволовой древесины и потерь ее до 20%. Все другие виды окорки не являются резанием.

Процесс окорки тупыми короснимателями путем сдвига коры по камбиальному слою (рис. 17.1) — наиболее распространенный вид окорки основан на различной механической прочности коры и древесины $\sigma_{\# \text{сдв.к}} < \sigma_{\# \text{сдв.др}}$. Это условие сохраняется для мерзлой и талой древесины, что обуславливает круглогодичную работу станков.

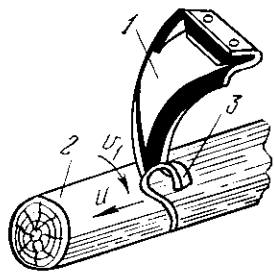


Рис. 17.1. Схема окорки древесины тупыми короснимателями

Коросниматели 1 (от трех до восьми) шарнирно крепятся к ротору и под действием центробежных сил и пружин прижимаются к окориваемому бревну 2. Коросниматель имеет степень свободы в радиальном направлении, что обеспечивает ему возможность копирования поверхности окориваемого бревна.

При вращении ротора по стрелке v_1 и поступательном движении бревна u коросниматели 1 снимают по винтовой линии узкие полоски коры 3.

Скорость окорки

$$v_{\text{ок}} = \sqrt{v_1^2 + u^2},$$

где v_1 — скорость вращения ротора, м/сек;
 u — скорость движения бревна, м/сек.

Ширина снимаемой полоски коры зависит от количества короснимателей z , числа оборотов ротора n и скорости подачи окориваемого бревна u :

$$B = \frac{100 \cdot 60}{nz} \text{ см},$$

где n — число оборотов ротора, об/мин.

Сила прижима короснимателя характеризуется удельным давлением, приходящимся на единицу длины рабочей кромки короснимателя,

$$P_d = \frac{P_y}{B_0} \text{ кг см},$$

где P_y — суммарное усилие прижима одного короснимателя, кгГ;
 B_0 — ширина рабочей кромки короснимателя, см.

Для окорки сплавной древесины $P_d = 15 \text{ кг см}$; свежесрубленной $P_d = 20$; мерзлой $P_d = 25 - 30 \text{ кг см}$.

Суммарная касательная сила окоривания

$$P = (K_{\text{ок}}B + P_d B_0 f) z,$$

где $K_{\text{ок}}$ — удельное сопротивление окориванию (табл. 17.1), кгГ/см;
 f — коэффициент трения рабочей кромки короснимателя:

$f = 0,18$ для свежесрубленной сосны и ели;
 $f = 0,22$ для мерзлой древесины.

Мощность, затрачиваемая на окоривание,

$$N = \frac{P v_{\text{ок}}}{102} \text{ квт}.$$

Таблица 17.1

Удельное сопротивление окориванию, кгГ/см

Порода и состояние окориваемой древесины	Удельное сопротивление при ширине снимаемой полосы коры, см					
	1,07	1,61	2,14	2,68	3,22	3,73
Ель:						
свежесрубленная	5,87	4,92	4,32	4,03	3,82	3,64
полусухая	9,6	7,69	6,75	6,35	6,18	5,84
сплавная	7,39	5,74	4,81	4,33	4,09	3,83
мерзлая	33,1	27,4	23,3	—	—	—
Сосна:						
свежесрубленная	4,38	3,75	3,28	3,19	3,15	2,97
полусухая	9,42	6,44	4,85	4,1	3,79	3,25
сплавная	4,53	4,02	3,73	3,56	3,5	3,5
мерзлая	23,4	19,5	17,2	—	—	—

17.2. Рубка щепы

Назначение процесса и расчет режимов резания. Растущие потребности в древесине в различных отраслях народного хозяйства остро ставят вопрос об использовании древесных отходов (около 20 млн. м³ в год) и низкосортной древесины (около 100 млн. м³). Важным средством резкого повышения использования древесины и всех видов древесных отходов является развитие механических, химических и химико-механических методов переработки лесного сырья, таящих огромный резерв увеличения производства за счет использования отходов древесины, превращаемых в технологическую щепу, т. е. размельченных до разных размеров (фракций), необходимых для того или иного вида производства. Помимо использования технологической щепы для производства целлюлозы и картона, опилок и стружек, в качестве сырья для гидролиза, технологическая щепка широко применяется для производства древесностружечных, древесноволокнистых и строительных плит и других прессованных материалов.

Тип оборудования, применяемый для производства технологической щепы, зависит от вида перерабатываемого сырья и назначения получаемой продукции. Рубка щепы для целлюлозно-бумажного производства производится рубильными машинами с плоским или

геликоидальным диском. Для производства древесноволокнистых и древесностружечных плит и для получения топливной щепы могут использоваться как дисковые, так и барабанные рубильные машины. В производстве древесностружечных плит щепу после рубильных машин измельчают вторично на центробежных станках.

Размеры частиц измельченной древесины зависят от технологического назначения получаемой продукции. Для получения щепы

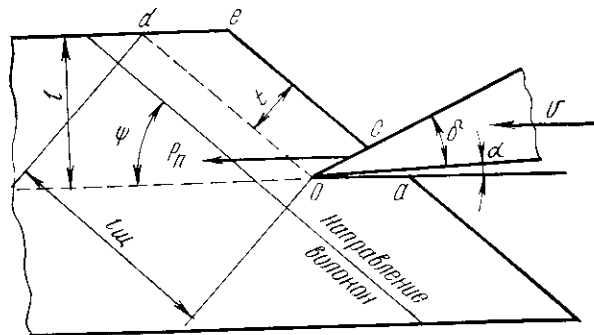


Рис. 17.2. Схема продольно-торцевого отделения толстой стружки скалывания (при рубке щепы)

точных размеров и формы древесина режется по длине в торец или под углом к направлению волокон. Процесс образования стружки-щепы толщиной (длиной по волокну) $l_{щ} \leq 25$ мм при рубке (рис. 17.2) существенно отличается от образования тонкой сливной стружки или стружки скалывания толщиной до 2 мм при резании на деревообрабатывающих станках.

При резании древесины стружка по всей толщине e находится в контакте с передней поверхностью реза (см. рис. 3.9—3.11). Под воздействием передней поверхности реза в процессе резания стружка ($e \leq 2$ мм) упругопластически деформируется по всему объему, она получает продольную усадку и деформацию по всей площади поперечного сечения.

При рубке щепы толщина стружки скалывания ($e \leq 25$ мм) значительно превышает зону контакта с резаком (рис. 17.2), поэтому стружка испытывает упругопластические деформации только частично в области, близлежащей к плоскости раздела oa , и по поверхности контакта с передней поверхностью реза oc , а над зоной контакта — затухающие упругие деформации. Это обстоятельство влияет на силу и мощность при рубке щепы.

При резании со стружкообразованием сила, работа и мощность резания выражаются зависимостью, пропорциональной объему измельчения древесины, т. е.

$$N = \frac{Kbhv}{102 \cdot 60} = \frac{P_v}{102} \text{ квт};$$

$$P = Kbe = (p + ek) b \text{ кГ},$$

где p — фиктивная сила резания по задней поверхности реза, не зависящая от толщины стружки;

k — фиктивное условное давление по передней поверхности реза.

Фиктивное давление уменьшается по мере увеличения высоты слоя над площадью контакта передней поверхности с древесиной, так как чем больше e , тем меньше k в зоне недеформированных клеток. Поэтому при рубке щепы работа резания не пропорциональна объему стружки. Это подтверждается опытами канд. техн. наук Г. И. Завойских (БТИ) при рубке сосны и ели. Им установлена закономерность изменения удельной силы резания по параболической кривой (см. рис. 7.4, б):

$$P_{зуб} = p + ke^m \text{ кГ/мм.}$$

Значением p , по его опытным данным, можно пренебречь за малостью. Тогда

$$P_{зуб} = ke^m.$$

Математической обработкой результатов опытов при $\psi = 45^\circ$, $\delta = 29-45^\circ$ и $\alpha = 5^\circ$ Г. И. Завойских получил формулы удельной силы резания:

$$\text{для березы } P_{зуб} = (0,28 + 0,0233 \delta) e^{(0,009 \delta + 0,33)} \text{ кГ/мм};$$

$$\text{для ели } P_{зуб} = (0,72 + 0,0029 \delta) e^{(0,183 \delta - 0,12)} \text{ кГ/мм};$$

$$\text{для сосны } P_{зуб} = (0,78 + 0,162 \delta) e^{(0,0177 \delta - 0,13)} \text{ кГ/мм.}$$

Для щепы $e \geq 8$ мм эти формулы можно упростить спрямлением кривых по методу А. А. Брикса. Тогда

$$\text{для ели } P_{зуб} = 0,7 + 0,025 \delta + (0,010 \delta - 0,2) e \text{ кГ/мм};$$

$$\text{для сосны } P_{зуб} = 0,5 + 0,33 \delta + (0,014 \delta + 0,3) e \text{ кГ/мм.}$$

Сила затягивания может принимать значения

$$P_{зат} = (0,9 - 1) P \text{ кГ.}$$

Установка ножей с отклонением от радиального направления ($\omega = 0$) под углом $\omega \pm 30^\circ$ уменьшает силу резания до 5%. Такое же влияние оказывает уменьшение среднего радиуса резания на 200 мм.

Средняя касательная сила резания

$$P = P_{зуб} \frac{\bar{l}}{t} \text{ кГ.}$$

Мощность резания

$$N = \frac{Pv}{102} \text{ квт.}$$

Пример 1. На дисковой рубильной машине из древесины ели $d_{ср} = 16$ см рубится щепа длиной по волокну $l_{щ} = 22$ мм, $\psi = 45^\circ$, $\delta = 35^\circ$, средний диаметр резания $D_{ср} = 800$ мм, $n = 450$ об/мин, $z = 12$ шт. Определить силы и мощность резания.

Решение. 1. Удельная сила резания

$$P_{зуб} = 0,7 + 0,0256 + (0,01\delta - 0,2)e = 0,7 + 0,025 \cdot 35 + (0,01 \cdot 35 - 0,2)15,55 = 3,91 \text{ кг/мм.}$$

где e — толщина стружки:

$$e = l_{ш} \sin \psi = 22 \cdot 0,707 = 15,55 \text{ мм.}$$

2. Средняя касательная сила резания, приходящаяся на один нож,

$$P = P_{зуб} b_{ср} = 3,91 \cdot 126 = 492,66 \text{ кг.}$$

где $b_{ср}$ — средняя ширина реза:

$$b_{ср} = \frac{\pi d_{ср}^2}{4 \sin \psi} : \frac{d_{ср}}{\sin \psi} = \frac{\pi d_{ср}}{4} = \frac{3,14 \cdot 16}{4} = 12,6 \text{ см} = 126 \text{ мм.}$$

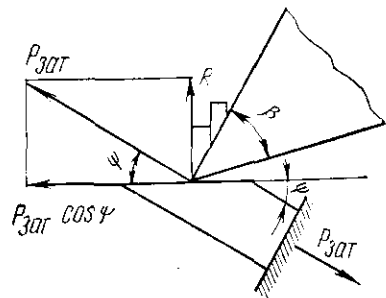


Рис. 17.3. Схема сил резания при рубке щепы

3. Средняя касательная сила резания за один оборот диска

$$P = P_{зуб} \frac{\bar{l}}{t} = \frac{P_{зуб} d_{ср} z}{\pi D_{ср} \sin \psi} = \frac{492,66 \cdot 160 \cdot 12}{3,14 \cdot 800 \cdot 0,707} = 532 \text{ кг.}$$

где \bar{l} — средняя длина дуги контакта:

$$\bar{l} = \frac{d_{ср}}{\sin \psi} = \frac{160}{0,707} = 226,3 \text{ мм.}$$

t — средний шаг между резами:

$$t = \frac{\pi D_{ср}}{z} = \frac{3,14 \cdot 800}{12} = 209,33 \text{ мм.}$$

4. Сила затягивания (рис. 17.3)

$$P_{зат} = 0,9P = 0,9 \cdot 532 = 478,8 \text{ кг.}$$

5. Осевое усилие

$$R = P_{зат} \sin \psi = 478,8 \cdot 0,707 = 338,5 \text{ кг.}$$

Эта величина R соответствует случаю работы станка с подающим механизмом, когда древесина удерживается им. Без подающего механизма $P_{зат}$ будет меньше:

$$P_{зат} \approx 0,5P \text{ и } R \approx 0,3P.$$

6. Мощность резания при работе станка с подающим механизмом

$$N = \frac{Pv}{102} = \frac{532 \cdot 18,8}{102} \approx 100 \text{ квт.}$$

где v — средняя скорость резания:

$$v = \frac{\pi D_{ср} n}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 800 \cdot 450}{60 \cdot 1000} = 18,8 \text{ м/сек.}$$

На станках без подающего механизма мощность резания определяется по формуле

$$N = \frac{(P + P_T) v}{102} = \frac{(532 + 56) 18,8}{102} = 108 \text{ квт.}$$

где P_T — сила трения древесины по задней поверхности ножа:

$$P_T = Rf = 0,3Pf = 0,3 \cdot 532 \cdot 0,35 = 56 \text{ кг.}$$

f — коэффициент трения древесины по задней поверхности ножа:

$$f = 0,35.$$

При расчете мощности резания на переработку короткомерной древесины с малым коэффициентом загрузки (при наличии межторцевых разрывов) желательно учесть возможность использования кинетической энергии рубильного диска за счет уменьшения его оборотов до минимально допустимой величины, так как масса диска достаточно велика и при холостых оборотах он набирает значительную кинетическую энергию.

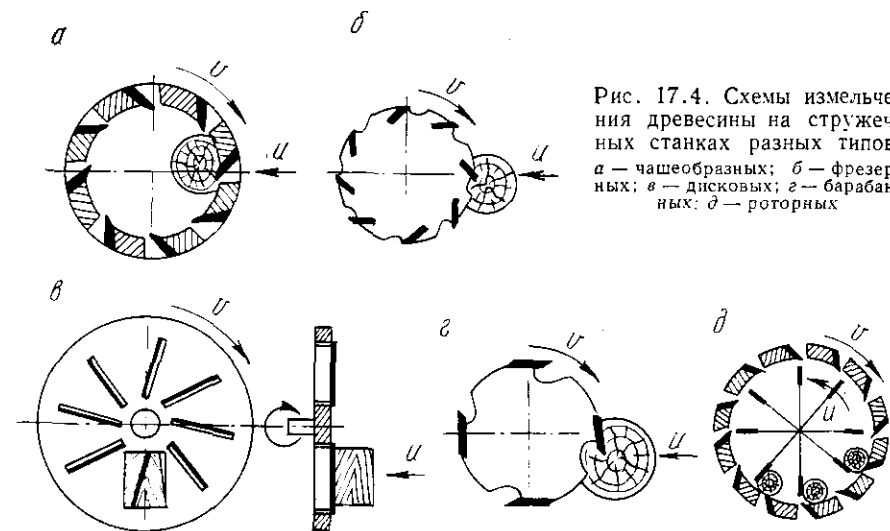


Рис. 17.4. Схемы измельчения древесины на стружечных станках разных типов: а — чашеобразных; б — фрезерных; в — дисковых; г — барабанных; д — роторных

Изготовление технологической стружки резанием на стружечных станках. Для изготовления стружек из круглого и дровяного сырья в производстве древесностружечных плит применяются стружечные станки дискового, барабанного, роторного и фрезерного типа (рис. 17.4). Для получения стружек хорошего качества измельчаемая древесина должна быть так ориентирована по отношению к режущим ножам, чтобы резание происходило поперек волокон, причем количество перерезанных волокон должно быть минимальным. Исходя из этого условия, удобной будет подача параллельно оси вращения режущего инструмента.

По данным канд. техн. наук Ф. С. Стовпюка (ЛТА), наиболее пригодным для фрезерующих стружечных станков является режущий инструмент с плоскими сменными резами с прямолинейным

лезвием, установленным под углом в плане $\omega > 0$. Поверхность, образованная прямолинейным лезвием ножа, установленным под углом в плане к оси вращения инструмента, при вращении последнего представляет собой однополостный гиперболоид вращения (рис. 17.5). Однако в реальных условиях резания отклонение этой поверхности от цилиндрической незначительно. Поэтому данный вид фрезерования можно считать цилиндрическим.

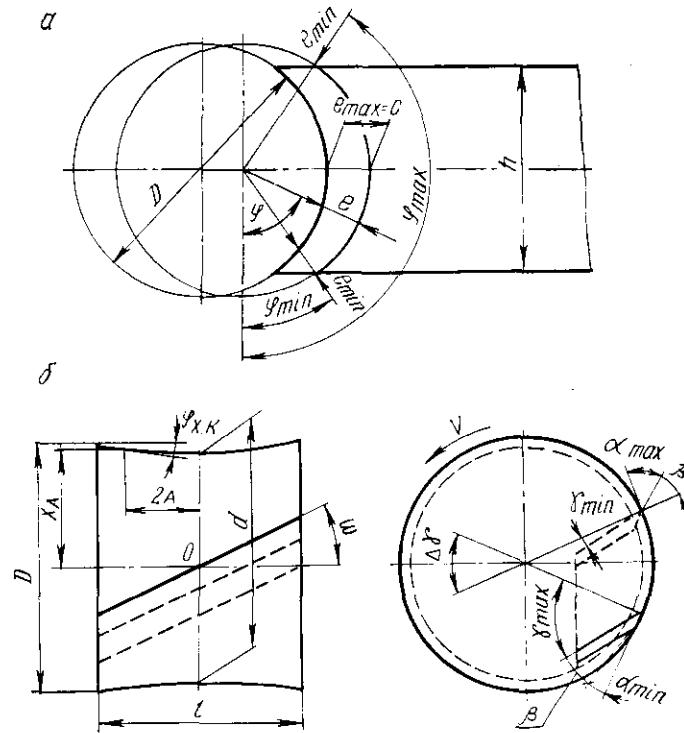


Рис. 17.5. Схема измельчения древесины на фрезерных станках:

а — геометрия стружки; б — геометрия режущего инструмента, имеющего форму однолопастного гиперболоида вращения

Практически рекомендуется принимать $\omega = \psi_{\pi} = 10^{\circ} - 15^{\circ}$. Направление наклона ножей ($\omega = 10^{\circ}$) в соседних секциях должно быть противоположным, что устранит действие осевой силы на древесину. Рекомендуемый диапазон изменения кинематических углов резания по длине режущего инструмента и его отдельных секций следующий: $\delta = 45 - 55^{\circ}$, $\alpha = 6 - 16^{\circ}$, при этом $\beta = 39^{\circ}$.

Примечание. При постоянном угле заточки $\beta = \text{const}$ кинематические углы резания изменяются по длине режущего инструмента от γ_{\min} и α_{\max} на опережающем конце лезвия ножа (по ходу вращения инструмента) до γ_{\max}

и α_{\min} на отстающем, что является недостатком. Абсолютная величина изменения углов γ и α определяется по формуле

$$\Delta\gamma = \Delta\alpha = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{l}{d} \operatorname{tg} \omega \right) = 2 \operatorname{arcsin} \left(\frac{l}{D} \operatorname{tg} \omega \right),$$

где l — длина ножевого вала;
 D — наибольший диаметр;
 d — наименьший диаметр.

Эти рекомендации соответствуют ножевому валу диаметром 565 мм, длиной 1100 мм и четырем секциям длиной 275 мм. Ножедержатели с ножами гребенчатой формы крепятся в пазах ножевого вала.

Для расчета удельных сил взаимодействия резца с древесиной при резании на стружечных станках рекомендуют эмпирические формулы, полученные канд. техн. наук Ф. С. Стовпюком при $\gamma = 40^{\circ}$, $\omega = \psi_{\pi} = 10^{\circ}$, $c = 0,18 - 0,5$, $\psi = 0 - 10^{\circ}$, $v = 0,75 - 33,5$ м/сек, $L = 0 - 30 \cdot 10^3$ пог. м.

При обработке сосны объемным весом 520 кг/м^3 и влажностью 15% средняя касательная удельная сила резания

$$P = \frac{33,9 c^{0,41}}{(50 - L)^{0,8} (20 - \psi)^{0,55} v^{0,098}} \text{ кг/мм};$$

радиальная удельная сила резания

$$R = \frac{2810 (1 - c)^{2,5}}{(50 - L)^2 (20 - \psi)^{0,847}} - 0,05 \text{ кг/мм};$$

удельная сила, нормальная к подаче,

$$S = \frac{3,2 c^{0,326}}{(50 - L)^{0,855} (20 - \psi)^{0,49}} \text{ кг/мм}.$$

При обработке березы объемным весом $0,63 \text{ Г/см}^3$ и влажностью 15% средняя касательная удельная сила резания

$$P = \frac{25,2 c^{0,5}}{(50 - L)^{0,63} (20 - \psi)^{0,55} v^{0,053}} \text{ кг/мм};$$

радиальная удельная сила резания

$$R = \frac{23,8 (1 - c)^{2,8}}{(50 - L)^{0,85} (20 - \psi)^{0,46}} - 0,15 \text{ кг/мм};$$

удельная сила, нормальная к подаче,

$$S = \frac{0,94 c^{0,4}}{(50 - L)^{0,565} (20 - \psi)^{0,32}} \text{ кг/мм}.$$

Кроме рассмотренного процесса, технологическая стружка может быть получена при повторной обработке технологической щепы. Для этого щепы, полученная измельчением различных по виду и размеру кусковых отходов — горбылей, реек, шпона-рванины, а также круглого дровяного сырья, перерабатывается на технологическую стружку на центробежных стружечных станках роторного или турбинного типа. Измельченная щепы подается к станку через дозирующее устройство, самотеком непрерывно поступает к ножевому

ротору и увлекается крыльчаткой, которая отбрасывает щепу на внутреннюю поверхность ножевого барабана. Под действием центробежной силы инерции щепа подается к ножам, срезающим стружку.

Центробежный стружечный станок имеет ножевой ротор, внутри которого помещается крыльчатка (рис. 17.4). Ножевой ротор собирается из сегментов, на которых крепится нож острием (режущей кромкой) вниз. На противоположной стороне сегмента закрепляется планка. Между ножом и планкой образуется щель, через которую проходят срезанные стружки. Планка позволяет регулировать размер щели.

Крыльчатка имеет лопасти со сменными пластинами на конце, рабочие кромки которых заточены под прямым углом. Лопастные крыльчатки подводят измельченную щепу к режущим ножам и поджимают ее в процессе резания. Ножевой ротор и крыльчатка могут вращаться в противоположных направлениях (встречная подача) или в одном направлении (попутная подача). Привод их осуществляется от индивидуальных электродвигателей. Число оборотов ножевого ротора и крыльчатки разное.

Размеры перерабатываемого сырья (щепы), мм;

длина	< 90
толщина	< 30
ширина	< 50
толщина стружек	0,3—0,8

Недостаток центробежных стружечных станков — неравномерность получаемых стружек по толщине. На разнотолщинность стружки оказывают влияние несколько факторов — отклонение выставки ножей (Δx); размер подножевой щели, несколько больший, чем толщина срезаемой стружки; упругая деформация древесины, зависящая от радиуса кривизны лезвия резца (ρ); неоднократность толщины измельчаемой щепы (∇e_m) по отношению к толщине срезаемой стружки. Однако толщина стружки определяется в основном выставкой ножа x над плоскостью сегмента ножевого ротора. По опытам канд. техн. наук Ю. М. Демидова (ЦНИИФМ) зависимость между выставкой ножа (x) и средней толщиной стружки (e) определяется уравнением прямой

$$e = 0,676x + 0,054. \quad (17.1)$$

Для внутреннего слоя трехслойных древесностружечных плит получение стружки средней толщины $e = 0,4$ мм обеспечивается при $x = 0,45 \pm 0,03$ мм. Размер подножевой щели при этом должен быть 0,6—0,7 мм.

Мощность привода приближенно рассчитывается по формуле

$$N_{пр} = (P + Q_f l_T) \frac{nz}{6 \cdot 10^6} \text{ квт},$$

где P — средняя касательная сила резания одного ножа:

$$P = Kbe \text{ кг};$$

K — среднее условное давление резания, при $e = 0,4$ мм и резании хвойных пород древесины $K = 0,7$, для березы $K = 0,85$:

$$K = A_{\pm} \delta + B_{\pm} v - B_{\pm} + \frac{P_{\pm}}{e} \text{ кг/мм}^2;$$

b — суммарная ширина среза на длине режущей части лезвия ножа:

$$b = 0,6 l_n \text{ мм};$$

0,6 — коэффициент использования длины ножа;

l_n — длина лезвия ножа, мм;

e — средняя толщина стружки, определяемая по формуле (17.1), мм;

Q_f — сила давления нерабочей поверхности режущего инструмента (ротора) о древесину, зависящая от системы подачи; для станков с крыльчаткой

$$Q_f = m \omega_{кр}^2 r_{кр} = \frac{\gamma_c}{g} \cdot \frac{G}{z} \omega_{кр}^2 \frac{d_{кр}}{2} \text{ кг};$$

$\omega_{кр}$ — угловая скорость крыльчатки, 1/сек;

γ_c — удельный вес древесной стружки, кг/м³;

g — ускорение силы тяжести, м/сек²;

G — вес стружки в роторе, кг;

z — количество ножей;

$d_{кр}$ — диаметр крыльчатки, м;

f — коэффициент трения поверхности режущего инструмента о древесину: $f = 0,35$;

l_T — путь трения нерабочей поверхности инструмента о древесину между сменными ножами:

$$l_T = \frac{\pi D}{z} \text{ мм};$$

D — диаметр ротора (окружности резания), мм;

n — число оборотов инструмента (ротора) в минуту.

17.3. Механическая обработка древесных материалов

Резание древесностружечных плит. Технологическая щепка заданных размеров соединяется клеевой связкой (связующим) и прессуется в горячих прессах под давлением, обычно перпендикулярным к плоскости плиты. На физико-механические свойства и качество древесностружечных плит оказывает влияние исходное сырье. Условно обозначим: плиты I группы — из резаной специальной стружки, плиты II группы — из технологической щепы, полученной рубкой и дроблением отходов, плиты III группы — из стружек-отходов от деревообрабатывающих станков.

Сложное хаотическое чередование стружек с различным направлением волокон в них как в плоскости плиты, так и по глубине их залегания создает индифферентную однородность для сопротивления резанию и независимость этого сопротивления от угла ψ , хотя каждая отдельная стружка и сохраняет анизотропность строения цельной древесины.

Таким образом, в отличие от цельной древесины, где $K = f(e, \psi)$, в древесностружечных плитах $K = f(e)$, где $e = c \sin \Theta$.

Однако нельзя делать общий вывод о невлинии направления резания при обработке плит на K . Например, при фрезеровании плиты по пласти и по кромке $K_{пл} < K_{кр}$, так как по пласти стружки

имеют расположение волокон от продольного к поперечному ($\parallel - \perp$), а по кромке — от продольного до торцевого ($\parallel - \perp$), что и сказывается на K .

Объемный вес трехслойных плит по толщине распределяется неравномерно: в средних слоях $\gamma \approx 0,6 \text{ Г/см}^3$ и $\gamma \approx 0,95 \text{ Г/см}^3$ в наружных. Распределение связующего по толщине плиты также неравномерно: в наружных слоях его больше, чем во внутреннем. Все это влияет на процесс обработки плит резанием. Так, при фрезеровании с припуском на обработку $h=2-3 \text{ мм}$ с поверхности плиты срезается материал с максимальным объемным весом, а при пилении, где резание распространяется на всю высоту плиты, $\gamma \neq \text{const}$ и $\gamma_{\text{ср}} < \gamma_{\text{макс}}$, что снижает силовые параметры. При пилении вдоль или поперек плиты условия пиления одинаковые — распил волокон стружек будет продольно-поперечный ($\parallel - \perp$), что подсказывает одновременно целесообразность применения зубьев пил с косою заточкой.

Рабочие движения, кинематика резания, геометрия номинальной стружки при обработке древесностружечных плит такие же, как и при резании древесины.

Сложное хаотическое расположение стружек, неравномерное распределение связующего создают непреодолимые трудности для теоретического определения силовых параметров. Динамические показатели процессов пиления, фрезерования и сверления, по опытам канд. техн. наук Ю. А. Цуканова и канд. техн. наук В. В. Амалицкого (МЛТИ), приводятся ниже [16].

Режимы пиления древесностружечных плит. Математической обработкой опытов по пилению древесностружечных плит дисковыми пилами канд. техн. наук Ю. А. Цуканов получил формулу для определения удельной работы резания с учетом влияния толщины стружки:

$$K_T = \frac{0,085 A}{e} + 4,1,$$

где K_T — табличное значение удельной работы резания, кГм/см^3 ;
 A — коэффициент, зависящий от группы плит:

Группа плит	I	II	III
A	1	0,833	0,825

e — средняя толщина стружки, мм.

Умножением K_T на поправочные коэффициенты $a_v, a_p, a_\gamma, a_{св}$ получаем расчетную величину удельной работы резания $K = f(v, \rho, \gamma, св)$ с учетом скорости резания (a_v), затупления резца (a_p), объемного веса (a_γ), процента содержания связующего ($a_{св}$):

$$K = K_T a_v a_p a_\gamma a_{св}, \quad (17.2)$$

где a_v — коэффициент, учитывающий влияние скорости резания;

$v, \text{ м/сек}$	a_v	m_v	$v, \text{ м/сек}$	a_v	m_v
15	1,39	1,2	55	1,08	0,92
20	1,29	1,17	60	1,17	0,89
25	1,19	1,13	70	1,3	0,84
30	1,11	1,1	80	1,44	0,76
35	1,05	1,07	90	1,58	0,69
40	1	1,04	100	1,75	0,62
45	1	1	110	1,9	0,56
50	1,03	0,96	120	2,06	0,49

a_γ — коэффициент, учитывающий влияние объемного веса γ .

Отношение радиальной силы резания к касательной

$$m = \frac{R}{P} \text{ кГ}, \quad (17.3)$$

где

$$m = m_T m_v m_p m_\gamma m_{св},$$

m_T — табличное значение коэффициента m , зависящее от подачи на резец s :

$s, \text{ мм}$	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
m_T	1,15	0,82	0,63	0,5	0,42	0,35	0,3	0,26	0,22	0,19	0,17
$\gamma, \text{ Г/см}^3$		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9					
a_γ		0,64	0,82	1	1,18	1,36					
m_v		1	1	1	1	1					

$a_{св}, m_{св}$ — коэффициенты, учитывающие процент содержания связующего:

связующее, %	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$a_{св}$	0,84	0,88	0,92	0,96	1	1,04	1,08	1,12	1,16
$m_{св}$	0,86	0,9	0,94	0,96	1	1,04	1,07	1,09	1,13

a_p, m_p — коэффициенты, учитывающие износ по задней поверхности резца ϕ :

$\phi, \text{ мм}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
a_p	1,0	1,0	1,03	1,1	1,25	1,38	1,6	1,8	2,06	2,3	2,55
m_p	0,436	0,6	0,815	1,0	1,22	1,38	1,48	1,6	1,76	1,86	2,1

Износ по задней поверхности резца определяется по номограмме (рис. 17.6) в зависимости от пути резца L , материала резца и процентного содержания связующего в древесностружечных плитах.

Средняя касательная сила резания

$$P = \frac{Kbhv}{v} = \frac{Kb\tilde{v}}{t} = \frac{Kbe h}{t \sin \Theta} \text{ кг.} \quad (17.4)$$

Мощность резания

$$N = \frac{Pv}{102} \text{ квт.} \quad (17.5)$$

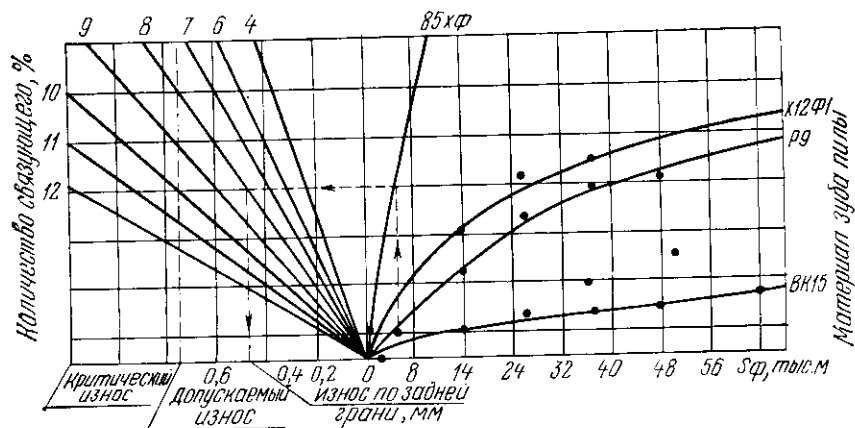


Рис. 17.6. Номограмма для определения износа зубьев пилы по задней поверхности реза

Радиальная сила

$$R = mP \text{ кг,} \quad (17.6)$$

Сила сопротивления подаче

$$Q = P \cos \Theta + R \sin \Theta \text{ кг.} \quad (17.7)$$

Сила, нормальная к подаче,

$$S = P \sin \Theta - R \cos \Theta. \quad (17.8)$$

Рекомендуемые режимы пиления: скорость резания $v = 40 - 50$ м/сек и подача на резец:

$c = 0,03 - 0,05$ мм при $\gamma < 0,7$ Г/см ³ и связующего 8%	
$c = 0,05 - 1$ мм при $\gamma < 0,9$ Г/см ³	то же 12%
$c = 0,15 - 0,25$ мм при $\gamma < 0,9$ Г/см ³	» 12%

Пила должна выступать над распиливаемым материалом на 5—15 мм. Углы резания: $\delta = 75^\circ$, $\beta = 60^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, угол косой заточки по передней поверхности реза $\varphi = 75^\circ$. Развод зубьев на сторону $s' = 0,6 - 0,7$ мм.

Пример 1. Дисковая пила $D = 300$ мм, $z = 36$ шт., $b = 3$ мм, $n = 3000$ об/мин, $h = 30$ мм, $u = 10$ м/мин, подъем стола $a = 105$ мм, группа плит — II, $\gamma = 0,6$ Г/см³, связующего — 8%, $T = 30$ мин, сталь 65 XФ, $\delta = 75^\circ$, $\alpha = 15^\circ$.

Определить силы и мощность резания.

Решение. 1. Подача на резец и толщина стружки:

$$c = \frac{1000 u}{zn} = \frac{1000 \cdot 10}{36 \cdot 3000} = 0,1 \text{ мм;}$$

$$\sin \Theta = \frac{57 h}{R \left(\arcsin \frac{a+h}{R} - \arcsin \frac{a}{R} \right)} = \frac{57 \cdot 30}{150 (\arcsin 0,9 - \arcsin 0,7)}$$

$$= \frac{57 \cdot 30}{160 (64 - 44)} = 0,57;$$

$$e = c \sin \Theta = 0,1 \cdot 0,57 = 0,057 \text{ мм.}$$

2. Скорость резания

$$v = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 300 \cdot 3000}{60 \cdot 1000} = 47,1 \text{ м/сек.}$$

3. Удельная работа резания в зависимости от подачи на резец (табличное значение)

$$K_T = \frac{0,085 A}{e} + 4,1 = \frac{0,085 \cdot 0,883}{0,057} + 4,1 = 5,41 \text{ кг} \cdot \text{м/см}^3.$$

4. Путь контакта реза в пропиле

$$L = \frac{hn\Gamma}{1000 \sin \Theta} = \frac{30 \cdot 3000 \cdot 30}{1000 \cdot 0,57} = 4740 \text{ пог. м.}$$

По номограмме (рис. 17.6) при $L = 4740$ пог. м, стали 85 XФ и 8% связующего длина фаски $\phi = 0,5$ мм, тогда поправочный коэффициент, учитывающий затупление реза, $a_s = 1,06$. Определяем другие поправочные коэффициенты $a_v = 1,03$; $a_l = 0,82$, $a_{св} = 1$.

5. Удельная работа резания с учетом поправочных коэффициентов

$$K = K_T a_v a_l a_s a_{св} = 5,41 \cdot 1,06 \cdot 1,03 \cdot 0,82 \cdot 1,0 = 4,85 \text{ кг} \cdot \text{м/см}^3.$$

6. Средняя касательная сила резания

$$P = Kbe \frac{\tilde{v}}{t} = 4,85 \cdot 3 \cdot 0,057 \cdot 2 = 1,64 \text{ кг,}$$

где

$$\tilde{v} = \frac{h}{\sin \Theta} = \frac{30}{0,57} = 53 \text{ мм;}$$

$$t = \frac{3,14 D}{z} = \frac{3,14 \cdot 300}{36} = 26 \text{ мм.}$$

7. Определяем коэффициенты $m_T = 0,42$, $m_p = 0,96$, $m_l = 1$, $m_{св} = 1 \times m_v = 1$, тогда $m = 0,42 \cdot 0,42 \cdot 0,96 \cdot 1 \cdot 1 = 0,4$.

8. Радиальная сила резания

$$R = mP = 0,4 \cdot 1,64 = 0,66 \text{ кг.}$$

9. Мощность резания

$$N = \frac{Pv}{102} = \frac{1,64 \cdot 47,1}{102} = 0,77 \text{ квт.}$$

Режимы фрезерования древесностружечных плит. По экспериментальным обобщениям и табличным данным канд. техн. наук Ю. А. Цуканова [16] при фрезеровании, как и при пилении древесностружечных плит, удельная работа резания с учетом подачи на

При фрезеровании пласти при любых значениях объемного веса и содержания связующего $c=0,4-0,6$ мм.

Пример 2. Фрезерование по кромке, плита II группы, $\gamma=0,6$, связующего 10%, $D=120$ мм, $\delta=85^\circ$, $\alpha=25^\circ$, $n=6000$ об/мин, $z=4$ шт., сталь ХВГ, $h=2$ мм, $b=20$ мм, $u=8$ м/мин, $T=15$ мин.

Определить: силы и мощность резания.

Решение 1. Чтобы найти удельную работу резания K , необходимо определить K_T , a_γ , $a_{св}$, a_δ , a_p :

$$K_T = \frac{1}{e} + 2,6 = \frac{1}{0,043} + 2,6 = 25,79 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{см}^3,$$

где

$$e = c \sin \theta = \frac{1000 u}{zn} \sqrt{\frac{h}{D}} = \frac{1000 \cdot 8}{4 \cdot 6000} \sqrt{\frac{2}{120}} = 0,043 \text{ мм}.$$

Поправочные коэффициенты при фрезеровании по кромке $a_{ГР}=0,89$, $a_\gamma=0,72$, $a_{св}=1,13$, $a_\delta=1,08$, $a_p=1,5$. Чтобы определить a_p , находим

$$L = \frac{znT}{1000} = \frac{\sqrt{hDnT}}{1000} = \frac{\sqrt{2 \cdot 120 \cdot 6000 \cdot 15}}{1000} = 1549 \text{ м},$$

при этом $\phi=0,215$, а с поправкой на материал стали ХВГ $a_m=1$ и $\eta=\phi a_m=0,215 \cdot 1=0,215$ мм, тогда $a_p=1,5$.

Удельная работа резания с учетом поправочных коэффициентов

$$K = K_T a_{ГР} a_\gamma a_{св} a_\delta a_p = 25,79 \cdot 0,89 \cdot 0,72 \cdot 1,13 \cdot 1,08 \cdot 1,5 = 29,17 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{см}^3.$$

2. Мощность резания

$$N = \frac{K b h u}{102 \cdot 60} = \frac{29,17 \cdot 20 \cdot 2 \cdot 8}{102 \cdot 60} = 1,52 \text{ квт}.$$

3. Средняя касательная сила резания

$$P = \frac{102 N}{v} = \frac{1102 \cdot 1,52}{37,7} = 4,14 \text{ кг},$$

где v — скорость резания:

$$v = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 120 \cdot 6000}{60 \cdot 1000} = 37,7 \text{ м/сек}.$$

4. Раднальная сила

$$R = \frac{P(1 - \cos \theta)}{\sin \theta} = \frac{4,14(1 - 0,99)}{0,12} = 0,34 \text{ кг}.$$

Режимы сверления древесностружечных плит. Среднее условное давление резания K при сверлении древесностружечных плит острыми резцами по опытам канд. техн. наук В. В. Амалицкого, обработанным по методике проф. А. Л. Бершадского, определяется по следующим зависимостям:

для 8%-ного связующего при $D=7,5-13$ мм

$$K = 2,8 + 2,11\gamma - (0,17 - 0,078\gamma)D + \frac{0,5 + 1,89\gamma - (0,03 + 0,089\gamma)D}{c} \text{ кг}/\text{мм}^2;$$

при $D=13-25$ мм

$$K = 2,8 + 2,11\gamma - (0,17 - 0,078\gamma)D + \frac{0,1 + 1,39\gamma - (0,005 + 0,042\gamma)D}{c} \text{ кг}/\text{мм}^2;$$

для 12%-ного связующего при $D=7,5-13$ мм

$$K = 8\gamma - 0,25\gamma D + \frac{2,3\gamma - (\gamma - 0,242) \cdot 0,182 D}{c} \text{ кг}/\text{мм}^2;$$

при $D=13-25$

$$K = 8\gamma - 0,25\gamma D + \frac{0,15 + 0,835\gamma - (0,0085 + 0,009\gamma)D}{c} \text{ кг}/\text{мм}^2,$$

где γ — объемный вес плиты, $\Gamma/\text{см}^3$,

D — диаметр сверла, мм;

c — подача на резец, мм.

Имеющихся в настоящее время экспериментальных данных недостаточно, чтобы вывести подобные формулы для всего многообразия свойств стружечных плит, и поэтому для всех промежуточных случаев определения K_T , которые могут возникнуть при обработке плит с другой характеристикой или сверлении с другими размерами обработки, предлагается табличный метод расчета (табл. 17.3).

Таблица 17.3

Подача на резец c , мм	Значение K_T , кг/мм ²					
	K_T при диаметре сверла D , мм					
	5	7,5	10	15	20	25
0,1	26,7	12,4	9,2	7,3	6,4	5,65
0,2	16	9,5	6,42	5,1	4,5	3,51
0,3	11,7	7,65	5,4	4,1	3,41	2,84
0,4	10	6,5	5	3,75	3	2,49
0,5	8,96	5,96	4,63	3,6	2,82	2,29
0,6	8	5,3	4,47	3,4	2,65	2,16
0,7	7,55	4,95	4,33	3,3	2,5	2,12
0,8	7,2	4,88	4,22	3,24	2,41	2,09
0,9	6,95	4,73	4,14	3,19	2,34	2,07
1	6,63	4,62	4,07	3,17	2,3	2,02

В табл. 17.2 приводятся значения K_T , полученные при сверлении в плась плиты с объемным весом $\gamma=0,7 \text{ Г/см}^3$ и содержанием связующего 8% на глубину, не превышающую $2D$. Условия сверления: сверло — спиральное с подрезателями и направляющим центром; $\delta=60^\circ$; $\alpha=20^\circ$; $n=3150 \text{ об/мин}$. При сверлении плит с другой характеристикой значения K надо пересчитывать с помощью вспомогательных коэффициентов:

$$K = K_T a_\gamma a_{св} a_r a_n a_p \text{ Г/мм}^2, \quad (17.12)$$

где a_γ — коэффициент, учитывающий изменение объемного веса:

$\gamma, \text{ Г/см}^3$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
a_γ	0,72	0,86	1,0	1,14	1,29	1,43

$a_{св}$ — коэффициент, учитывающий содержание связующего:

Содержание связующего, %	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$a_{св}$	0,84	0,89	0,92	0,96	1,0	1,03	1,07	1,1	1,14

a_r — коэффициент, учитывающий изменение глубины сверления:

Глубина сверления, мм	2	3	4	5	6
a_r при объемном весе плиты $\gamma < 0,7 \text{ Г/см}^3$	1	1,2	1,35	1,44	1,85
при объемном весе плиты $\gamma > 0,7 \text{ Г/см}^3$	1	1,32	1,61	1,86	2,1

a_n — коэффициент, учитывающий направление сверления

Направление сверления	в плась	в кромку
a_n	1	1,2

a_p — коэффициент, учитывающий затупление инструмента (табл. 17.4).

Коэффициент затупления a_p

Таблица 17.4

Содержание связующего, %	a_p при фактическом пути сверла в материале (лог. м)					
	200	400	600	800	1000	1200

Сверление в плась

4	1,31/1,11	1,31/1,11	1,32/1,12	1,34/1,12	—	—
8	1,30/1,11	1,32/1,12	1,35/1,13	1,38/1,14	—	—
12	1,35/1,13	1,41/1,15	1,49/1,18	1,56/1,21	—	—

Сверление в кромку

4	1,14/1,06	1,15/1,06	1,17/1,06	1,19/1,07	1,21/1,08	1,24/1,09
8	1,15/1,06	1,17/1,06	1,19/1,07	1,22/1,08	1,25/1,09	1,29/1,10
12	1,19/1,07	1,23/1,08	1,31/1,11	1,41/1,15	1,51/1,19	1,62/1,23

Примечание. В числителе значения a_p для хромокремнистой стали (ХС, 9ХС), в знаменателе — для быстрорежущей (Р9, Р18).

Окружное усилие P и крутящий момент $M_{кр}$:

$$P = K \frac{D\Delta}{4} \text{ кгГ}; \quad (17.13)$$

$$M_{кр} = K \frac{D^2\Delta}{8} \text{ кгГ}\cdot\text{мм}. \quad (17.14)$$

Осевое усилие может быть найдено по формуле

$$P_{ос} = mP \text{ кгГ}, \quad (17.15)$$

где m — коэффициент, зависящий от диаметра сверла:

$D = 5-8 \text{ мм}$	$m = 0,5-0,9$
$D = 9-12 \text{ мм}$	$m = 0,7-1,2$
$D = 13-16 \text{ мм}$	$m = 1-1,5$
$D = 17-25 \text{ мм}$	$m = 1,3-2$

Большие величины отношения берутся для стружек меньшей толщины (0,1—0,25) и меньшие — для стружек большей толщины (0,25—0,75 мм).

Мощность сверления

$$N = K \frac{D\Delta v}{408} \text{ квт}. \quad (17.16)$$

Фактический путь сверла в материале

$$S = \frac{\pi D h i}{1000 \Delta} \text{ м}, \quad (17.17)$$

где h — глубина сверления, мм;

i — количество отверстий.

Пример 3. Сверлится стружечная плась $\gamma=0,8 \text{ Г/см}^3$ и 8% связующего спиральным сверлом из стали 9ХС $D=10 \text{ мм}$. Форма заточки сверла — с подрезателями и направляющим центром, $\alpha=20^\circ$, $\delta=60^\circ$, $u=3 \text{ м/мин}$, $n=2985 \text{ об/мин}$, $h=20 \text{ мм}$, $i=650$ отверстий в плась плиты.

Определить $M_{кр}$, $P_{ос}$.

Решение. 1. Подача на один оборот и резец

$$\Delta = \frac{1000 u}{n} = \frac{3 \cdot 1000}{2985} = 1 \text{ мм};$$

$$c = \frac{\Delta}{z} = \frac{1,0}{2} = 0,5 \text{ мм}.$$

2. Значение $K_T = 4,63$, поправочные коэффициенты: $a_\gamma = 1,14$; $a_p = 1,0$;

$$a_r = 1,0; a_n = 1.$$

3. Путь реза

$$S = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 650}{1,0 \cdot 1000} = 408 \text{ лог. м}.$$

При $D = 10 \text{ мм}$ и $S = 408 \text{ лог. м}$ значение $a_p = 1,32$.

4. Удельное сопротивление резанию

$$K = K_T a_\gamma a_p a_{св} a_n a_r = 4,63 \cdot 1,14 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,32 = 6,96 \text{ кгГ/мм}^2.$$

5. Силы резания и крутящий момент:

а) средняя окружная сила

$$P = \frac{6,96 \cdot 10 \cdot 1,0}{4} = 17,4 \text{ кг},$$

$$M_{кр} = \frac{6,96 \cdot 10^2 \cdot 1,0}{8} = 87 \text{ кг} \cdot \text{мм} = 8,7 \text{ кг} \cdot \text{см};$$

б) осевая сила резания

$$P_{ос} = 0,7 \cdot 17,4 = 12,2 \text{ кг}.$$

6. Скорость резания

$$v = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 2985}{60 \cdot 1000} = 1,56 \text{ м/сек.}$$

7. Мощность сверления

$$N = \frac{6,96 \cdot 10 \cdot 1,0 \cdot 1,56}{408} = 0,266 \text{ квт.}$$

Режимы пиления древесноволокнистых плит. Строение древесноволокнистых плит резко отличается от древесностружечных плит из технологической щепы, соединенных со связующим. В древесноволокнистых плитах дробление щепы производится до состояния отдельных волокон, смешиваемых со связующим в жидкий ковер, который прессуется в холодном или горячем многоэтажном прессе до заданной толщины. За счет сокращения межклеточных пространств, уменьшения объема клеток, хаотического переплетения волокон древесноволокнистые плиты имеют более однородную структуру, чем древесина и древесностружечные плиты.

Древесноволокнистые плиты вследствие хаотического расположения волокон имеют индифферентную однородность сопротивления резанию, поэтому силы резания не зависят от угла φ . Учитываются только углы встречи Θ при определении толщины стружки $e = c \sin \Theta$.

Средняя толщина плиты, применяемой в мебельной промышленности взамен фанеры, $h = 3-4$ мм. В строительстве древесноволокнистые плиты применяются для облицовки стен вместо штукатурки, в качестве материала для изготовления тары, для звуко- и теплоизоляции и т. д. Древесноволокнистые плиты в основном твердые с удельным весом $\gamma = 0,85 \text{ г/см}^3$, резание которых мы в дальнейшем и рассматриваем. Раскрой древесноволокнистых плит производится пилением дисковыми пилами, бесстружечным резанием плоскими или дисковыми ножами, штампованием и высечкой.

На основании исследований канд. техн. наук А. Г. Туфанова (АЛТИ) при пилении дисковыми пилами рекомендуются следующие режимы резания: скорость резания $v = 40-60$ м/сек, подача на резец $s = 0,08-0,11$ мм, подача материала — встречная; пиление выполнять так, чтобы зубья выходили на сторону плиты с отпечатком сетки; величина выступа зубьев над поверхностью обрабатываемого материала 10—15 мм. Профиль зубьев — с ломанно-линейной задней поверхностью. Для пил из стали 9ХФ оптимальными углами резания являются:

а) при раскрое и форматной обрезке плит по одному листу $\gamma = 40^\circ$, $\beta = 37^\circ$, $\alpha = 13^\circ$, угол косой заточки по передней поверхности $\beta_1 = 45^\circ$;

б) при раскрое и форматной обрезке плит пакетом $\gamma = 30^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, $\varphi = 50^\circ$.

При применении пил с пластинками твердого сплава рекомендуются типы пил I и II.

Шероховатость поверхности пропила при принятых условиях получается $\nabla \delta 6$.

Появление бахромы при $\delta \leq 50-60^\circ$ и $\beta_1 < 75^\circ$ не наблюдается. При износе реза происходит приглаживание поверхности, так что практически износ не влияет на $\nabla \delta 6$.

Уменьшение $s \leq 0,08-0,1$ на $\nabla \delta 6$ не влияет (происходит приглаживание неровностей). Таким образом, можно принять шероховатость при распиловке плит $\nabla \delta 6$.

При оптимальных условиях $\alpha = 13^\circ$, $\beta_0 = 45^\circ$, $\delta_0 = 50^\circ$, $D = 375$ мм, $n = 3000$ об/мин, $z = 72$, $\Theta = 30^\circ$, $b = 3,4$ мм, $h = 13,6$ мм, т. е. распил пачки в четыре листа, А. Г. Туфанов получил обобщенную формулу:

$$P_{зуб} = (0,054 + 5,44 e) b,$$

дополняя ее поправочными коэффициентами a_s , a_φ при изменении факторов процесса резания.

По его опытам радиальная сила

$$R = Pa_e,$$

где при заданных условиях

$$a_e = 0,09-0,3e.$$

С учетом затупления реза, где $a_s = 1 + 0,0007 L$,

$$P = P_{зуб} \frac{h}{\sin \Theta t} a_s$$

$$\text{и } R = a_s P_{зуб} \frac{h}{\sin \Theta t} a_e.$$

При других значениях δ и φ при $\alpha = 13-15^\circ$ надо вводить поправочные коэффициенты a_s , a_φ :

$$a_s = \frac{0,14 \delta_0 + 0,2}{0,14 \delta + 0,2};$$

$$a_\varphi = \frac{0,13 \varphi_0 + 5,25}{0,13 \varphi + 5,25},$$

$$\text{т. е. } P_{s, \varphi, e, L} = a_s a_\varphi a_e P_{зуб} \frac{hb}{\sin \Theta t};$$

$$R_{s, \varphi, e, L} = a_s a_\varphi a_e a_L P_{зуб} \frac{hb}{\sin \Theta t}.$$

Пример 4. Дано: $\alpha_0=13^\circ$, $\beta=50$, $\delta=60^\circ$, $D=400$ мм, $n=3000$ об/мин, $z=72$ шт., $b=3,4$ мм, $u=16$ м/мин, $h=13,6$ мм, $T=60$ мин, $a=160$ мм.

Определить N и все силовые параметры.

Решение. 1. Кинематический угол встречи

$$\sin \Theta = \frac{57h}{R \left(\arcsin \frac{a+h}{R} - \arcsin \frac{a}{R} \right)} = 0,55;$$

$$\cos \Theta = 0,84; \Theta = 33^\circ.$$

2. Подача на резец и толщина стружки:

$$c = \frac{1000 u}{zn} = \frac{1000 \cdot 16}{72 \cdot 3000} = 0,074 \text{ мм};$$

$$e = c \sin \Theta = 0,074 \cdot 0,55 = 0,038 \text{ мм}.$$

3. Средняя касательная сила резания, приходящаяся на один зуб пилы,

$$P_{зуб} = (0,054 + 5,44 \cdot 0,038) 3,4 = 0,89 \text{ кг},$$

но так как $\delta=60^\circ$, а не 50° , и $\varphi=50^\circ$, а не 45° , вводим поправочные коэффициенты

$$\alpha_c = \frac{0,14 \cdot 60 + 0,2}{0,14 \cdot 50 + 0,2} = 1,2;$$

$$\alpha_\varphi = \frac{0,13 \cdot 50 + 5,25}{0,13 \cdot 45 + 5,25} = 1,06;$$

$$\alpha_c = 1 + 0,0007 L = 1 + 0,0007 \cdot 4500 = 4,15,$$

где

$$L = \frac{hnT}{1000 \sin \Theta} = \frac{13,6 \cdot 3000 \cdot 60}{0,55 \cdot 1000} = 4500 \text{ пог. м}.$$

Средняя касательная сила резания, приходящаяся на один резец, с учетом поправочных коэффициентов

$$P_{зуб} = 0,89 \cdot 1,2 \cdot 1,06 \cdot 4,15 = 4,7 \text{ кг}.$$

Средняя касательная сила резания за один оборот пилы

$$P = P_{зуб} \frac{h}{t \sin \Theta} = 4,7 \frac{1,36}{0,55 \cdot 17,3} = 6,72 \text{ кг},$$

где

$$t = \frac{\pi D}{z} = \frac{3,14 \cdot 400}{72} = 17,3 \text{ мм}.$$

4. Мощность резания

$$N = \frac{Pv}{102} = \frac{6,72 \cdot 63}{102} = 4,23 \text{ квт},$$

где

$$V = \frac{3,14 \cdot 0,4 \cdot 3000}{60} = 63 \text{ м/сек}.$$

5. Радиальная сила

$$R = Pa_c = 6,72 \cdot 0,79 = 0,53 \text{ кг},$$

где $\alpha_c = 0,09 - 0,3 \cdot 0,038 = 0,079$.

6. Сила сопротивления подаче

$$Q = 6,72 \cdot 0,84 + 0,53 \cdot 0,55 = 5,9 \text{ кг}.$$

7. Сила, нормальная к подаче,

$$S = 6,72 \cdot 0,55 - 0,53 \cdot 0,84 = 3,2 \text{ кг}.$$

Бесстружечное резание листового материала. К этому виду резания относятся: просечка с прижимом (рис. 17.7, а) и без прижима (рис. 17.7, б), пробивка (рис. 17.7, в), вырубка (рис. 17.7, г), отрезка на ножницах с параллельными (рис. 17.7, д) или наклонными ножами (рис. 17.7, е). Эти схемы различают по числу степеней свободы отделяемого отрезка в момент штамповки. Например, при просечке

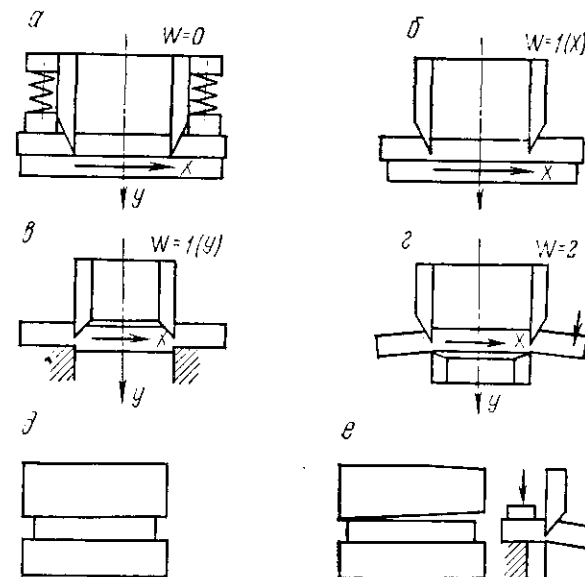


Рис. 17.7. Схемы листовой штамповки неметаллических материалов

с прижимом отделяемый отрезок прижат и под действием возникающих сил резания не может перемещаться. Для этой схемы число степеней свободы отделяемого среза $W=0$. При просечке без прижима срезок может перемещаться горизонтально (в направлении оси x). Число степеней свободы при этом $W=1x$. В соответствии с этим все операции штампования можно свести к четырем основным схемам: просечка с прижимом — $W=0$, просечка без прижима — $W=1x$, пробивка-вырубка — $W=1y$, отрезка — $W=2$.

Преимуществами этого вида обработки по сравнению с пилением являются высокая производительность, точность обработки, улучшение санитарно-гигиенических и противопожарных условий труда.

Характерной особенностью этого процесса является отделение отрезка заданной длины без образования элементной стружки. Размер e соответствует толщине стружки $e \perp v$, а путь резца в древесине $l=h$ значительно меньше e , т. е. $l \ll e$.

Резание древесноволокнистых плит ножницами. Ножницы бывают с плоскими и дисковыми ножами. Режущие кромки ножниц

с плоскими ножами устанавливаются параллельно или наклонно (рис. 17.8). Подвижный нож у параллельных ножниц может перемещаться перпендикулярно к лезвиям или под углом к ним. В последнем случае процесс резания происходит с протягиванием, при этом будет иметь место кинематическое заострение реза, сила резания меньше, чем в первом случае. Лезвия обеих ножей располагаются строго в одной плоскости, допустимый зазор 0,2—0,3 мм.

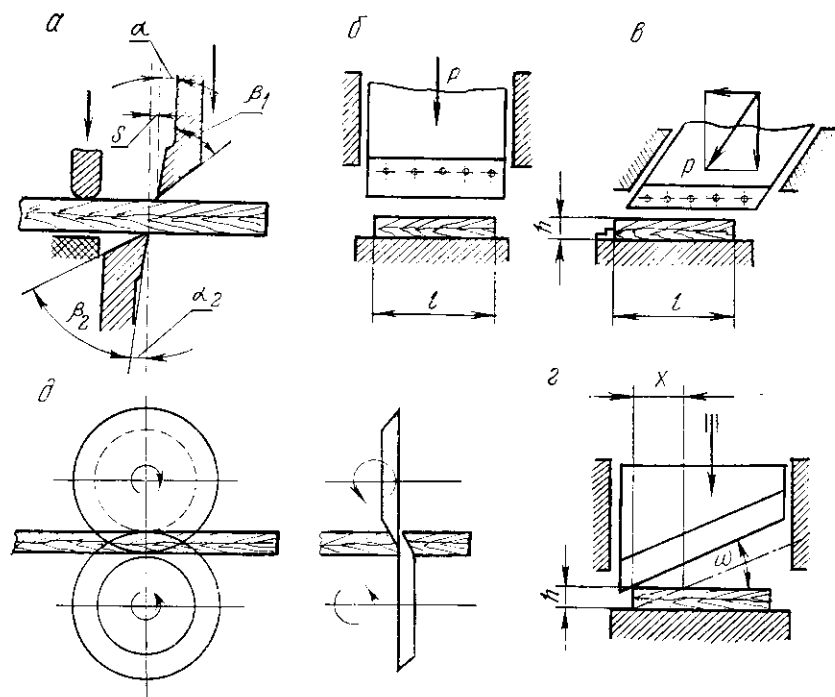


Рис. 17.8. Схемы резания ножницами:

а — общая схема; б — резание ножницами с плоскими ножами и при движении резания, перпендикулярном к лезвиям; б₁ — то же, но с наклонным перемещением подвижного ножа; б₂ — резание наклонными подвижными ножами; д — резание дисковыми ножницами

Процесс резания на ножницах с параллельными ножами характеризуется тремя стадиями: врезание, резание, резание с отгибом. Так как при бесстружечном резании объем срезаемой заготовки не деформируется и не превращается в стружку, а деформация распространяется лишь на длину (периметр) резания, то в расчетах учитывается удельная сила резания K , приходящаяся на квадратную единицу площади среза hl , или сила резания, приходящаяся на единицу длины реза $P_{b=1}$:

$$P = P_{b=1} l \text{ кг},$$

где $P_{b=1}$ — удельная сила резания, приходящаяся на единицу длины реза, кг/мм;

l — длина режущей части лезвия, мм.

Для расчета удельной силы резания древесноволокнистых плит на ножницах с параллельными ножами в зависимости от удельного веса ($\gamma_n = 0,607—0,956 \text{ Г/см}^3$), угла резания верхнего ножа ($\delta_1 = 15—60^\circ$) и толщины плиты (h) канд. техн. наук В. В. Шостак (ЛТИ) получил эмпирические формулы:

$$P_{\text{макс}} = [(1,74\gamma_n - 0,393) \text{ tg } \delta_1 + 1,665\gamma_n - 0,857] h + (0,573\gamma_n - 0,2) \text{ tg } \delta_1 - 3,15\gamma_n + 1,349 \text{ кг/мм};$$

$$P_{\text{ср}} = [(0,68\gamma_n - 0,001) \text{ tg } \delta_1 + 0,1795\gamma_n - 0,009] h - (0,367\gamma_n + 0,957) \text{ tg } \delta_1 + 0,2035 - 0,098\gamma_n \text{ кг/мм}.$$

Процесс резания на ножницах с наклонными ножами происходит с протягиванием и характеризуется тем, что после достижения кончиком ножа нижней пласти перерезаемого листа длина лезвия, находящегося в контакте с материалом, остается постоянной. Это постоянство сохраняется до тех пор, пока лезвие ножа не достигнет противоположной кромки листа. Сила резания на этом участке остается постоянной:

$$P_{\text{макс}} = p_{\text{пл}} \frac{h}{\text{tg } \omega},$$

где $p_{\text{пл}}$ — удельная сила резания, приходящаяся на единицу длины лезвия, находящегося в контакте с материалом:

$$p_{\text{пл}} = [(0,74\gamma_n + 0,168) \text{ tg } \delta_1 + 1,88\gamma_n - 1,09] h - 0,26 \text{ tg } \delta_1 - 5,02\gamma_n + 3,046 \text{ кг/мм};$$

h — толщина материала, мм;

ω — угол наклона верхнего ножа: $\omega = 3—5 \text{ град}$.

В однодисковых ножницах в качестве инструмента используются ножи $D = 300 \text{ мм}$ и толщиной 5 мм с двусторонней заточкой $\beta = 30^\circ$. Нож крепится над столом на валу суппорта. На столе крепится жестко неподвижный плоский нож с углом заточки $\beta = 90^\circ$. Плоскость верхнего ножа строго параллельна плоскостям движения и нижнего ножа. Ножи перекрывают друг друга на 5 мм. Зазора между ними нет. Дисковый нож неприводной. Он свободно вращается на валу и вместе с суппортом перемещается вдоль нижнего ножа, разрезая при этом плиты. Плиты разрезают пакетом по 3—4 шт.

У двухдисковых ножниц (рис. 17.8, д) ножи $D = 150 \text{ мм}$, толщиной 15—20 мм и с углом резания 90° . Оба диска приводятся от цепной передачи со скоростью резания $v = 55 \text{ м/сек}$, скорость подачи $u = 50—60 \text{ м/мин}$.

Дисковые ножи с $\beta = 30^\circ$ применяются для форматной обрезки плит на заводах-изготовителях, а с $\beta = 90^\circ$ — для раскроя плит.

При резании на ножницах шероховатость поверхности среза соответствует $\nabla \delta 6—\nabla \delta 8$.

Штамповка-вырубка древесноволокнистых плит. Листовые древесные материалы — шпон, фанера, древесноволокнистые плиты обладают высокими техническими качествами — прочностью, легкостью, сравнительно малой формоизменяемостью, возможностью обработки штампованием. При штамповке-высечке большее значение имеет структура штампуемого материала и его физико-механические свойства.

Древесноволокнистые плиты по способу их изготовления индифферентны к анизотропии древесины, которая обезличивается хаотическим расположением волокон в смеси со связующим. В отличие от штамповки фанеры и шпона в данном случае по периметру штампа сохраняются почти постоянные условия, но в отличие от металла будет иметь место не сдвиг сечения по периметру, а резание резцом без стружкообразования с обязательным перерезанием волокон. Как бы хаотически не располагались волокна, они препятствуют чистому сдвигу, поэтому их надо перерезать. Волокнистое строение материала требует концентрации напряжений у лезвия. Применение штампов с $\delta < 90^\circ$ способствует этому. При штампе с $\delta = 90^\circ$ происходит значительное деформирование материала перед, под и над резцом. На обработанной поверхности по всему периметру появляются вырывы от неперерезанных волокон, поэтому рекомендуются углы заострения: $\beta_1 = 30^\circ$ для неподвижной матрицы, $\beta_2 = 75^\circ$ для подвижного пуансона.

Процессы пробивки и вырубки аналогичны и характеризуются тремя стадиями: врезанием, резанием и сдвигом среза.

По опытам В. В. Шостака удельная сила резания при пробивке и вырубки определяется по формулам:

$$P_{\text{макс}} = (0,40\gamma_{\text{п}} - 0,90) \text{tg } \delta + 1,68 \gamma_{\text{л}} - 0,42h + 6,5\gamma_{\text{п}} \text{tg } \delta - 0,9 \text{tg } \delta - 0,2 \text{ кг/мм};$$

$$P_{\text{ср}} = (0,32\gamma_{\text{п}} + 0,13) \text{tg } \delta + 1,33\gamma_{\text{п}} - 0,65h + 1,21\gamma_{\text{п}} \text{tg } \delta - 0,44 \text{tg } \delta + 0,81\gamma_{\text{п}} + 1,01 \text{ кг/мм}.$$

Эти формулы получены при следующих условиях: зазор между пуансоном и матрицей 0,35 мм, задний угол $\alpha = 0$, угол заострения матрицы — 90° . Переменным был угол резания пуансона $\delta = 10, 15, 25, 30, 45, 60^\circ$.

При пробивке и просечке без прижима на поверхности среза можно выделить две зоны — резания и сдвига или отрыва. Шероховатость поверхности в зоне резания $\nabla\delta 6 - \nabla\delta 8$, а в зоне отрыва $\nabla\delta 3 - \nabla\delta 4$.

Для резцов из стали У10А при $\delta = 25 - 30^\circ$ величина $P_{\text{макс}}$ и $R_{2 \text{ макс}}$ остается постоянной на пути резания 27—30 м. В дальнейшем шероховатость поверхности снижается до $\nabla\delta 6 - \nabla\delta 7$, а сила резания возрастает на 25—30%. Ножи затупляются после пути резания $L = 50 - 75$ м, при $\rho = 50 - 60$ мкм. Для увеличения глубины просечки рационально использовать двойной угол заточки ножа 25° у лезвия и 15° выше, т. е. с фаской на лезвии 0,2—0,3 мм.

Штампование фанеры и шпона. Древесина благодаря анизотропному волокнисто-слоистому строению имеет неблагоприятное

сочетание сопротивлений смятию $\sigma_{\text{см}}$ и срезу $\sigma_{\text{ср}}$: $\sigma_{\text{ср}} = (1,5 - 5) \sigma_{\text{см}}$ в направлении, перпендикулярном к волокнам, и $\sigma_{\text{ср}} = (0,4 - 1,5) \sigma_{\text{см}}$ в направлении, параллельном волокнам. Это значит, что смятие (упругопластическое деформирование) предшествует срезу. Эти два процесса (смятие и срез) успешно достигаются применением резания без образования стружки (принципа ножниц). Углы заострения матрицы и пуансона должны быть острыми (для перерезания волокон), в то время как при штамповании металла они прямые (для чистого сдвига).

Если круговым штампом штампуются шпон или фанера, то по всему периметру непрерывно изменяются условия штампования и перерезания волокон от продольного до торцевого. При штамповании фанеры скажется еще и влияние клеевых прослоек.

При пробивке и вырубки фанеры и шпона штампом происходит врезание (смятие), т. е. проникновение резца в древесину, затем резание (скалывание).

По штампованию фанеры и шпона известны опыты Ф. Гетцеля. Он определил удельную силу резания на единицу площади среза (коэффициент резания) K (табл. 17.5).

Таблица 17.5

Коэффициент резания при штамповании фанеры и шпона

Порода древесины	Углы заточки, град		K , кг/мм ²
	матрицы	пуансона	
<i>Фанера</i>			
Бук	30	75	0,86—0,96
Дуб	30	75	0,68—0,7
Береза	30	75	0,6—0,67
Сосна	30	75	0,56—0,52
<i>Шпон</i>			
Бук	90	75	1,28—1,64
Дуб	90	75	1,34—1,74
Сосна	90	75	1,03—1,26

Сила резания при штамповании

$$P = F_p K \text{ кг},$$

где F_p — площадь среза:

$$F_p = h S_p \text{ мм}^2;$$

h — толщина листа, мм;

S_p — периметр штампуемого контура, мм;

K — удельная сила резания на единицу площади среза, кг/мм².

Для круглого штампа

$$F_p = \pi D h \text{ мм}^2,$$

где D — диаметр контура, мм.

Толщина листа шпона в пределах 1—4 мм не влияет на удельную силу резания. Для клееной фанеры толщиной 4 мм за счет клеевых прослоек удельная сила резания (при прочих равных условиях) на 20—25% выше, чем для шпона. Удвоение числа клеевых слоев фанеры повышает давление на 20—25%.

Наивыгоднейшая разница между диаметром пуансона и матрицы (зазор) — 0,3 мм. При большем зазоре получают расщепления и возрастает шероховатость среза. Поверхность среза твердых пород древесины чище, чем мягких. При углах пуансона меньше 75° наблюдается значительное смятие краев листа.

17.4. Новые способы резания древесины и древесных материалов

Деление ножом-пластинкой. Процесс резания с вынужденными колебаниями инструмента или обрабатываемого объекта получил название вибрационного резания. В МЛТИ с 1953 г. ведутся теоретические и экспериментальные исследования вибрационного резания с применением тонких полосовых пластинок. Нож-пластинка (рис. 17.9), раздвигая частицы древесины, внедряется по заданному направлению. При этом резец толщиной Δ боковыми поверхностями деформирует древесину с силой N [13]. При движении резца по направлению подачи по упруговосстановившейся древесине возникнут силы трения T . Сила R , образующая новую поверхность, ничтожно мала, поэтому ею можно пренебречь. Тогда сила сопротивления движению ножа-пластинки по одной ее стороне

$$P' = P_1 + P'_T + T_1,$$

где P_1 — составляющая сил деформации древесины наклонной фаски резца по направлению подачи u ;

P'_T — составляющая сил трения по фаске резца;

T_1 — сила трения по боковой поверхности резца.

Резанием ножом-пластинкой без зубьев удается получить направленный рез в заготовке толщиной до 20 мм при резании вдоль волокон прямослойной древесины. При поперечном и продольном делении в случае непрямослойной древесины возможно раскалывание по волокнам. Если резцу сообщить вибрации в плоскости раздела, то обработанная поверхность древесины окажется более плотной, пластически деформированной, уменьшатся коэффициент трения резца по древесине и силы резания, улучшатся условия резания и становится возможной обработка древесины по трем главным направлениям относительно волокон.

Вибрационное пиление и строгание. Под руководством проф. С. А. Воскресенского инж. В. Г. Суханов (МЛТИ) исследовал про-

цесс вибрационного пиления тонкой полосовой пластинкой с зубчатой режущей кромкой. Этот процесс характеризуется следующими оптимальными параметрами: толщина пластинки $D=0,8$ мм (работает без развода или плющения), шаг зубьев $t=5-7$ мм, высота зуба $h_3=3$ мм, профиль зуба симметричен контурному углу заточки $\beta_R=90-120^\circ$, угол косой заточки $\beta_1=45-60^\circ$. Этот резец

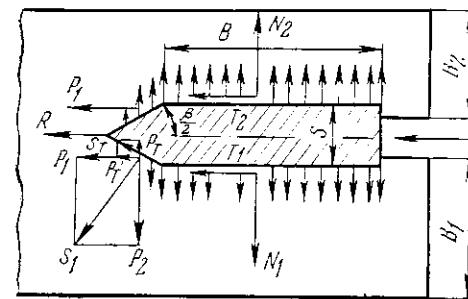


Рис. 17.9. Схема деления древесины ножом-пластинкой (по Ф. М. Манжосу)

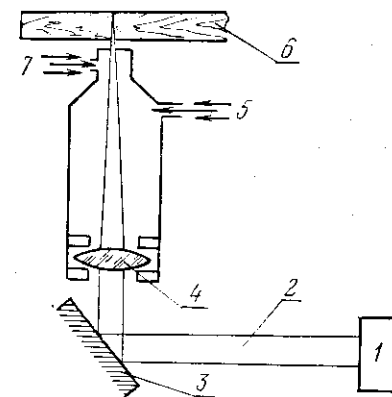


Рис. 17.10. Схема резания лучом лазера

может осуществлять процесс резания при ходе инструмента в обе стороны. Ход пластинки (двойная амплитуда колебаний) 15—20 мм — значительно меньше высоты пропила $h=50-200$ мм. Число двойных ходов в минуту $n=1500-3000$. При пилении древесины толщиной до 50 мм рекомендуемая скорость подачи до 17,5 м/мин, а толщиной до $h=100$ мм $u=11,5$ м/мин. Доказана возможность пиления поставом пил. При вибрационном делении материала и вибропилении уменьшается трение между инструментом и древесиной. Пиление без развода и плющения позволяет уменьшить пропил.

Качество обработки при этом довольно высокое — шероховатость пиленной поверхности мерзлой древесины соответствует $\nabla\delta 5-\nabla\delta 7$, а влажной древесины — $\nabla\delta 4-\nabla\delta 5$; шероховатость поверхности вибрационного пиления $\nabla\delta 3-\nabla\delta 4$.

Вибрационное пиление может найти применение при распиловке заготовок на паркетные, карандашные и тарные дощечки.

Исследуя процессы вибрационного резания (виброделение и вибрационное строгание), инж. В. Г. Суханов (МЛТИ) определил частоту вибрационной обработки. По его теоретическим исследованиям для древесины с конкретными свойствами оптимальная частота вибрационного деления должна быть около 2000 гц. В зависимости от конкретных условий обработки при вибрострогании для качественного изменения процесса стружкообразования частота возбуждаемых продольных колебаний должна быть в пре-

делах 25—1600 *гц*. При наложении поперечных колебаний без качественного изменения процесса стружкообразования оптимальная частота может быть значительно снижена. В этом случае достаточно, чтобы вибрационная скорость v_v была меньше скорости резания v .

Исходя из условий стружкообразования, процессы резания с вибрациями целесообразно разделить на низкочастотные (10—100 *гц*), среднечастотные (100—1000 *гц*), высокочастотные (1—15 *кГц*) и вибрации ультразвуковой частоты. Низкочастотные колебания приводят только к количественному изменению стружкообразования, среднечастотные — к количественному и для некоторых режимов резания к качественному изменению стружкообразования, высокочастотные — к изменению условий стружкообразования любых режимов резания.

Механические колебания резца или обрабатываемого объекта, дополнительно накладываемые на существующие технологические схемы обработки древесины, позволяют значительно интенсифицировать существующие процессы шлифования и фрезерования. В ближайшее время вибрационное резание древесины может найти широкое применение для получения высококачественной поверхности путем вибрострогания, виброшлифования, вибролушения, вибродолбления и вибро сверления.

Резание древесины лучом лазера. При точной фокусировке лазерного луча достигается высокая концентрация энергии, позволяющая в тонких материалах получить прорез (узкую щель). Преимущество лазерного резания в том, что достигается узкая ширина прореза, не изнашивается режущий инструмент, не деформируется обрабатываемый материал, можно обрабатывать отверстия и детали сложного профиля. В настоящее время этот вид резания изучен еще недостаточно.

По данным проф. Е. Г. Ивановского (ЛТА), работа резания, затрачиваемая на удаление 1 *см*³ древесины лучом лазера, значительно больше удельной работы пиления. Высота неровностей поверхности прореза зависит от угла, составленного направлением волокон к плоскости прореза. При обработке отверстия в сухой древесине наблюдается сплошное обугливание, которое распространяется по сосудам волокон в виде тонких полос, на выходе отверстия заметны трещины-отщепы разной длины в ранней и поздней древесине. Поверхность отверстия в сырой древесине без обугливания и более гладкая, чем в сухой. Окружая лазерный луч струей какого-либо инертного газа, можно значительно уменьшить действие дыма и пламени на древесину.

Схема резания лучом лазера дана на рис. 17.10. По такой схеме в Англии работает станок для прецизионного резания деталей сложной формы толщиной до 18 *мм*.

Рубиновый лазер (200 *вт*) 1 испускает пучок лучей 2 диаметром 15 *мм* и длиной волны 15 *мк*. Посредством зеркала 3 пучок поворачивается на 90°, проходит через собирающую линзу 4 и попадает на заготовку 5.

Для повышения точности и качества резания, а также предотвращения обугливания фанеры луч проходит через сопло 5, куда подается холодный воздух 7 под давлением.

Ширина прореза 0,7 *мм* устанавливается линзой. Управление процессом электронное, профиль задается рисунком или шаблоном. Достоинства по сравнению с лобзиковыми пилами — отсутствие опилок, малая ширина прореза, чистый пропилен, высокая точность при обработке сложных профилей, более высокая скорость подачи и производительность.

Специалисты считают, что лазерные установки с газовой струей вокруг луча в будущем найдут более широкое применение.

Измельчение древесины струей воды. Исследования гидравлического способа окорки, резания и измельчения при помощи тонких водяных струй высоких и сверхвысоких давлений проведены у нас и за рубежом.

По данным кафедры Мичиганского университета и Мэдисонской лаборатории, резание древесины возможно струей воды, вытекающей из сопла диаметром от 0,025 до 0,25 *мм* со скоростью 915 *м/сек*, т. е. почти в три раза быстрее, чем скорость звука. Давление струи воды 3500 *кГ/см*². Однако обычный метод резания древесины в 50 раз эффективнее водоструйного.

Исследованиями канд. техн. наук М. Д. Ласицы (ЦНИИМЭ) установлено, что измельчение древесины струями — сложный комплексный процесс, зависящий от динамических качеств струи, физико-механических свойств древесины и условий взаимодействия струи с древесиной.

Процесс измельчения древесины происходит тогда, когда критическое давление струи приближается к твердости древесины в направлении действия струи, например древесина ели твердостью 204 *кГ/см*² измельчалась струей диаметром 1,2 *мм* при давлении 200 *ат*. Дальнейшее увеличение давления струи обеспечивало рост глубины внедрения струи в древесину и производительность измельчения без существенного изменения качества. По удельному расходу воды, а также по производительности наиболее эффективными являются удельные давления гидравлических струй от 800 *ат* и выше.

Диаметр струи 1,2 *мм* является оптимальным как по производительности, так и по энергоёмкости, т. е. при наименьших расходах воды и затратах энергии.

Наблюдения за характером разрушения и степенью измельчения древесины показали, что на минимальных расстояниях от насадки происходит резание древесины.

Исследовалось воздействие струй вдоль, поперек и в торец древесины. При поперечном воздействии струи (начальный диаметр 1,2 *мм*, давление воды 600 *ат*, скорость подачи $u=4,8$ *м/мин*) от монолитной древесины отделяется элемент длиной, равной длине образца, толщиной, равной величине подачи, и шириной, равной глубине внедрения струи в древесину, т. е. достигается процесс поперечного резания с ровными, но ворсистыми стенками прорези и мини-

мальными потерями древесины в виде опилок. При продольном воздействии струи резание подобно резанию при поперечном воздействии. При торцевом воздействии также обеспечивается резание без скалывания подрезанной части (стружки) с малыми отходами в виде опилок. Происходит это потому, что на выходе из насадки струя имеет плотную структуру и всем своим поперечным сечением воздействует на древесину нормально, без тангенциальной скалывающей составляющей. Увеличение расстояния насадки более 5—6 см обеспечивает надрезание древесины и скалывание подрезанных элементов с разделением на крупные частицы в виде технологической щепы. С этой целью и ставил свои опыты канд. техн. наук М. Д. Ласица. Увеличение расстояния от насадки до 8—12 см для диаметра насадки $d_n = 0,96—1,5$ мм обеспечивает разделение по волокнам на мелкие частицы. Максимальная производительность измельчения древесины на щепу достигается на рабочем участке струи на расстоянии от насадки $l_p(80—375)d_n$.

Максимальная глубина внедрения струи в древесину получается при однократном воздействии. Каждое последующее воздействие по сравнению с предыдущим снижает производительность, потому что остающаяся несрезанная стенка оказывает сопротивление струе, несколько изменяет ее направление и этим снижает ее работоспособность. Поэтому необходимо движение подачи. Относительное перемещение струи и древесины устраняет вредное влияние водяного барьера на плоскости контакта.

Установлено, что каждому удельному давлению соответствует определенная скорость подачи u_{\max} , при которой достигается максимальная производительность. С увеличением давления u_{\max} возрастает. Скорость подачи, обеспечивающая максимальную производительность, зависит от скорости струи и соответствует их отношению $\frac{v \text{ м сек}}{u \text{ м мин}} = 10$. Рабочими пределами можно считать отношение $\frac{v}{u} = 40—10$. Более эффективными являются многоструйные гидравлические установки.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Классы шероховатости поверхности древесины (ГОСТ 7016—68)

$R_{z \max}$, мкм (не более)	1250—1600	800—1250	500—800	315—500	200—315	100—200	60—100	30—60	16—30	8—16	4—8	4
Классы	∇d1	∇d2	∇d3	∇d4	∇d5	∇d6	∇d7	∇d8	∇d9	∇d10	∇d11	∇d12

2. Шероховатость поверхности древесины по видам обработки (по Б. М. Буглаю)

Виды обработки	Группы	Класс шероховатости по ГОСТ 7016—68	Пределы глубины неровностей $R_{z \max}$
Рамное пиление хвойной древесины	Грубое	∇d1	1600—1250
	Получистое	∇d2—∇d3	1250—500
То же лиственной древесины	То же	∇d2—∇d4	1250—315
	Пиление дисковыми пилами	Грубое	∇d3—∇d4
То же	Получистое	∇d5—∇d6	315—100
	»	Чистое	∇d7—∇d8
Фрезерование	Грубое	∇d6—∇d7	200—60
	То же	Получистое	∇d7—∇d8
»	Чистое	∇d9	30—16
	Шлифование	Грубое	∇d7—∇d8
То же	Получистое	∇d9	30—16
	»	Чистое	∇d10

3. Классы шероховатости обработанной поверхности при пилении рамными пилами

Классы шероховатости	c_{λ} , мм	c_{Δ} , мм
$\nabla\partial 1$	$\geq 1,2-1,4$	$\geq 1,8-2,2$
$\nabla\partial 2$	$0,8-1,2$	$1,2-1,8$
$\nabla\partial 3$	$0,6-0,8$	$0,9-1,2$
$\nabla\partial 4$	$0,25-0,4$	$0,4-0,6$

Примечание. Большие значения даны для твердых листовых пород.

4. Классы шероховатости обработанной поверхности при пилении ленточными пилами

Классы шероховатости	c_{λ} , мм	c_{Δ} , мм
$\nabla\partial 1-2$	$1,4-1,8$	$2-2,5$
$\nabla\partial 3$	$1,0-1,2$	$1,5-2,0$
$\nabla\partial 4$	$0,65-0,68$	$1,0-1,2$
$\nabla\partial 5$	$0,4-0,55$	$0,6-0,8$
$\nabla\partial 6$	$0,2-0,25$	$0,3-0,4$
$\nabla\partial 7$	$0,15-0,2$	$0,1-0,15$

Примечание. Большие значения даны для твердых листовых пород.

5. Классы шероховатости обработанной поверхности в зависимости от c (мм) и $\Theta_{\text{вых}}$ при продольной распиловке дисковыми пилами

Подача на зуб c , мм	Угол $\Theta_{\text{вых}}$, град						
	20	30	40	50	60	70	
$\geq 1,2$	$\geq 1,8$	$\nabla\partial 2$	$\nabla\partial 2$	$\nabla\partial 2$	$\nabla\partial 2$	$\nabla\partial 2$	$\nabla\partial 2$
≥ 1	$\geq 1,5$	$\nabla\partial 3$	$\nabla\partial 3$	$\nabla\partial 3$	$\nabla\partial 3$	$\nabla\partial 2$	$\nabla\partial 2$
$\geq 0,8$	$\geq 1,2$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 3$	$\nabla\partial 3$
$\geq 0,5$	$\geq 0,75$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$
$\geq 0,3$	$\geq 0,45$	$\nabla\partial 5$	$\nabla\partial 5$	$\nabla\partial 5$	$\nabla\partial 5$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 4$
$\geq 0,2$	$\geq 0,3$	$\nabla\partial 5/\nabla\partial 7$	$\nabla\partial 5/\nabla\partial 7$	$\nabla\partial 5/\nabla\partial 7$	$\Delta\partial 5/\nabla\partial 7$	$\nabla\partial 4/\nabla\partial 6$	$\nabla\partial 4/\nabla\partial 6$
$\geq 0,1$	$\geq 0,15$	$\nabla\partial 6/\nabla\partial 8$	$\nabla\partial 6/\nabla\partial 8$	$\nabla\partial 6/\nabla\partial 8$	$\nabla\partial 6/\nabla\partial 8$	$\nabla\partial 6/\nabla\partial 7$	$\nabla\partial 5/\nabla\partial 7$
$< 0,1$	$0,15$	$\nabla\partial 7/\nabla\partial 9$	$\nabla\partial 7/\nabla\partial 9$	$\nabla\partial 7/\nabla\partial 9$	$\nabla\partial 7/\nabla\partial 9$	$\nabla\partial 6/\nabla\partial 8$	$\nabla\partial 6/\nabla\partial 8$

Примечание. В числителе $\nabla\partial$ для λ и Δ , а в знаменателе — для строгальных пил.

6. Классы шероховатости в зависимости от волнообразования поверхности при фрезеровании (по данным проф. Б. М. Буглая)

Диаметр фрезы D , мм	Класс шероховатости по длине волны $l_{\text{в}}$, мм				
	$\nabla\partial 9$	$\nabla\partial 8$	$\nabla\partial 7$	$\nabla\partial 6$	$\nabla\partial 5$
100	3,5	5,0	6,5	9	11
120	4	5,5	7	10	12
140	4,2	6	7,5	10,5	13
160	4,5	6,5	8,0	11	14
180	4,8	7	8,5	12	15

Примечание. Допустимая подача на резец определяется по формуле

$$c = \frac{l_{\text{в}}}{z}$$

где $l_{\text{в}}$ — длина волны, мм;
 z — число ножей.

7. Классы шероховатости поверхности в зависимости от затупления резца (по опытным данным Н. А. Кряжева и др.)

Радиус кривизны лезвия ρ , мкм	Продольное фрезерование		Поперечное фрезерование	
	хвойные породы	лиственные породы	хвойные породы	лиственные породы
< 10	$\nabla\partial 9$	$\nabla\partial 10$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 5$
< 20	$\nabla\partial 8$	$\nabla\partial 9$	$\nabla\partial 4$	$\nabla\partial 5$
< 30	$\nabla\partial 7$	$\nabla\partial 8$	$\nabla\partial 3$	$\nabla\partial 4$
< 35	$\nabla\partial 6$	$\nabla\partial 7$	$\nabla\partial 3$	$\nabla\partial 4$
< 40	$\nabla\partial 5$	$\nabla\partial 6$	—	—

8. Зависимость приведенного коэффициента трения $f_{\text{пр}}$ от $a_{\text{с}}$

$a_{\text{с}}$	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$f_{\text{пр}}$	2	1,5	1,25	1,1	1,0	0,9	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6

9. Коэффициент ϵ — приращение затупления резца на пути резания 1 м для сталей 9ХФ и ХВГ, мкм/м

Порода древесины	Строгание и фрезерование	Пиление дисковыми и ленточными пилами	Пиление рамными пилами
Сосна	0,0008	0,001	0,002
Дуб	0,0014	0,0013	0,0026

Примечание. Для углеродистых сталей брать 2 ϵ , для 9ХС — 0,75 ϵ , для Х12Ф — 0,6 ϵ , для Р18 — 0,5 ϵ .

10. Коэффициенты α_λ и α_Δ , кг/мм³

Коэффициент	При открытом резании			
	Рамные пилы при $h < H - 50$ мм	Ленточные пилы	Дисковые пилы	При открытом резании
α_λ	0,025	0,025	0,072—0,075	0
α_Δ	0,02	0,02	0,058—0,06	0

11. Коэффициенты А, В

Порода	Коэффициенты А, В					
	A_\perp	A_\parallel	A_\pm	B_\perp	B_\parallel	B_\pm^*
Сосна	0,056	0,02	0,003	0,02	0,007	0,006 < 0,007
Береза	0,070	0,025	0,0045	0,024	0,008	0,007 < 0,01
Дуб	0,082	0,028	0,006	0,027	0,009	0,0085 < 0,012

* Меньшие значения B_\pm при $\delta < 55^\circ$, большие — при $\delta > 55^\circ$.

12. Коэффициенты В, р

Порода	Коэффициенты В, р					
	B_\perp	B_\parallel	B_\pm	p_\perp	p_\parallel	p_\pm
Сосна	2	0,55	0,06	0,49	0,16	0,1
Береза	2,3	0,7	0,085	0,55	0,19	0,14
Дуб	2,56	0,76	0,10	0,64	0,21	0,17

13. Поправочные коэффициенты для К, Р и N в зависимости от угла поворота лезвия в плане ω при продольном фрезеровании, по данным Н. А. Кряжева (МЛТИ)

$\omega = 0$	10	20	30°
$\alpha_\omega = 1$	0,7	0,55	0,4

14. Поправочные коэффициенты α_ω для К, Р и N при поперечном фрезеровании, по данным Г. А. Комарова (МЛТИ)

$\omega = 0^\circ$	10	20	30°
$\alpha_\omega = 1$	1,07	1,25	1,5

15. Уширение пропила s' , мм

Виды пил	Распиловка хвойных пород древесины			Распиловка твердых пород древесины	
	влажностью до 25% в любое время года	влажностью свыше 25% зимой	влажностью свыше 25% летом	влажностью до 25%	влажностью свыше 25%
Рамные	0,6 — 0,7	0,6 — 0,7	0,7 — 0,8	0,45—0,5	0,55—0,6
Дисковые:					
для обрезных станков	0,55—0,65	0,55—0,65	0,65—0,75	0,4 — 0,45	0,55—0,6
для ребровых станков	0,6 — 0,7	0,6 — 0,7	0,7 — 0,8	0,45—0,5	0,55—0,6
для реечных станков	0,5 — 0,6	0,5 — 0,6	0,6 — 0,7	0,4 — 0,45	0,5 — 0,55
для универсальных станков	0,5 — 0,6	0,5 — 0,6	0,6 — 0,7	0,4 — 0,45	0,5 — 0,55
Конические *	0,4 — 0,5	0,4 — 0,5	0,5 — 0,6	—	—
Шпалорезные	0,8 — 0,9	0,8 — 0,9	1 — 1,1	—	—
Торцовочные	0,4 — 0,5	0,4 — 0,5	0,45—0,55	0,3 — 0,35	0,4 — 0,55
Дроворезные	0,5 — 0,6	0,5 — 0,6	0,55—0,65	0,4 — 0,45	0,5 — 0,55
Ленточные столлярные	0,25—0,3	—	—	0,2 — 0,25	—
Ленточные делительные	0,4 — 0,5	0,4 — 0,5	0,5 — 0,6	0,4 — 0,45	0,45—0,55

* У конических пил величина развода с конической стороны должна быть на 0,1 мм больше, чем с плоской.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ *

Абразивный инструмент 243, 254

Бесстружечное резание 283
Боковая поверхность резца 18

Волнистость кинематическая 68
Ворсистость 68
Впадина зуба 109, 117
Вырыв 67
Высота пропила 103
Выставка ножа 205

Геометрия стружки 59
Главная режущая кромка 19
Главное движение 150
Гнутье 7

Движение подачи 150
Деление ножом-пластинкой 288
Делимость 7
Дефибрование 10
Длина контакта 14, 246
— номинальной стружки 14
Долбление 172
Дощечкорезательный станок 241
Древесина 34
Дробление 10

Задний угол 20
Задняя поверхность резца 18
Заедание пилы 112
Закол 68
Заточка ножей 206

Изготовление технологической стружки 265

* Составлен Л. А. Нагорской

Измельчение древесины струей воды 291
Износостойкость шлифовальной шкурки 248

Касательная сила резания 15, 86, 145
Кинематический угол встречи 50
Клин 11
Контурный угол резания 19
Копирование 212
Коэффициент заполнения 120
— площади впадин 121
— уплотнения 120
Круглопильный станок 150

Лезвие реального резца 19
Линия вершин зубьев пилы 109
— впадин 109
Лущение 234

Макронеровность 66
Механическая обработка древесины 269
Мощность 251
Мшистость 68

Неровности с нерегулярным шагом 67
— с регулярным — 67
— упругого восстановления 68

Неустановившийся процесс образования стружки 46
Нож гладильный 170
— циклевальный 170
— цинубельный 171
Номер зернистости шкурки 244

Номинальная стружка 13
Номинальный объем 15
— — среза 13

Обрабатываемая поверхность 16
Обработанная — 17
Обработочные риски 68
Объемная деформация стружки 15
Окорка древесины 259
Относительная продольная усадка стружки 14
Относительное поперечное расширение 14

Передний угол резания 20
Передняя поверхность резца 18
Пила 109, 127, 132
— дисковая 150, 151, 152, 163
— ленточная 142
— рамная 127
Пиление 109, 127, 142, 150
— вибрационное 288—290
— под углом к волокнам 150
— поперечное 111, 150
— продольное 111, 150
— смешанное 111
Пластичность 7
Плоскость движения 26
— резания 17
Подача на резец 50
Прессование 9
Припуск на обработку 199
Производительность пилы 120
Пропил 109

Рабочее движение главное 49
— — подачи 49
— — резания 49

Раскальвание 10, 11
Радиальная сила резания 86, 145
Размол 10
Резание 12, 74—81, 92, 234, 290
— без стружкообразования 13
— вдоль волокон 44
— древесностружечных плит 269, 283
— поперек волокон 44, 45
— продольно-поперечное 173
— со стружкообразованием 13
Резец 18, 24
Рейсмусовый станок 167
Рубка щепы 261

Сверление 223
Сверло 223
Сила резания 250
Скорость подачи 57

Скорость резания 49, 56, 100
Слонистость 40
Сопротивление подаче 86
Составляющая процесса резания 16
Строгание 170
— вибрационное 288—290
Стружечный станок 172
Стружколоматель 206
Стружкообразование при поперечном пилении 123
— — продольном пилении 113
Стружкообразующая кромка 19

Технология древесины механическая 7
— — химическая 7
Толщина номинальной стружки 14
— снимаемого слоя 103
Точение 230
Точность механической обработки 65
— установки ножей 203

Удельная производительность шлифования 254
— сила 101
Угловые параметры 23, 24
Угол движения 23
— зазора 23
— заострения резца 11, 20
— резания 20, 22, 99, 199
Уравнение укороченной циклоиды 53
Установившийся процесс образования стружки 46

Фактическая стружка 14
Фрезерный станок 167—169, 266
Фрезерование 166

— винтовое 190
— коническое 184
— пазовое 221
— по копирам 212
— попутное 210
— продольно-торцевое 175
— продольно-торцевое закрытое 181—184
— продольно-торцевое полузакрытое 181—184
— торцевое 188
— цепное 212
Фуговальный станок 166

Чурак 234

Шаг зуба 51, 109
— неровности 66

Шероховатость поверхности древесины 65, 69, 241
Ширина номинальной стружки 14, 103
Шлифовальная шкурка 243
Шлифование 243
Шпон 234
Штампование фанеры 286

Штампование шпона 286, 287
Штамповка-вырубка 286
Штамповка-вытяжка 9

Элементарное резание 40
Элементы износа реза 29

ЛИТЕРАТУРА

1. Бершадский А. Л. Резание древесины. М., 1956.
2. Бершадский А. Л. Расчет режимов резания древесины. М., 1967.
3. Воскресенский С. А. Резание древесины. М., 1955.
4. Грубе А. Э. Дереворежущие инструменты. М., 1971.
5. Дешевой М. А. Механическая технология дерева. Ч. I. М., 1934.
6. Ивановский Е. Г. Станки и инструменты по механической обработке древесины. Л., 1959.
7. Ивановский Е. Г. Станки и инструменты по механической обработке древесины. Л., 1961.
8. Ивановский Е. Г., Василевская П. В., Лаутнер Э. М. Новые исследования резания древесины. М., 1972.
9. Кряжев Н. А. Цилиндрическое и коническое фрезерование древесины. М., 1963.
10. Кох П. Процессы механической обработки древесины. М., 1969.
11. Любославский В. Д. Деревообрабатывающие станки и инструменты. Раздел «Учение о резании древесины». Простые виды резания. Л., 1973.
12. Любченко В. И., Соловьев А. А. Практикум по резанию древесины. Ч. I и II. М., 1970.
13. Манжос Ф. М. Деревообрабатывающие станки. М., 1963.
14. Филькевич В. Я. Динамика лесопильных рам. М., 1966.
15. Цветкова Н. И. Деревообрабатывающие станки и инструменты. Минск, 1971.
16. Цуканов Ю. А., Амалицкий В. В. Обработка резанием древесностружечных плит. М., 1966.
17. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М., 1970.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Предисловие	3
Введение	5
ГЛАВА 1. РЕЗАНИЕ ДРЕВСИНЫ. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	7
1.1. Классификация технологии древесины	7
1.2. Общие понятия и определения	13
ГЛАВА 2. РЕЗЦ	18
2.1. Элементы и геометрия резца	18
2.2. Затупление и элементы износа резца	29
2.3. Роль лезвия в процессе резания	31
ГЛАВА 3. ДРЕВСИНА	34
3.1. Основные свойства древесины, учитываемые при резании	34
3.2. Главные виды элементарного резания	40
3.3. Особенности деформирования древесины в замкнутом пространстве	46
ГЛАВА 4. РАБОЧИЕ ДВИЖЕНИЯ И ГЕОМЕТРИЯ СТРУЖКИ	49
4.1. Рабочие движения	49
4.2. Основные кинематические соотношения при резании	56
4.3. Геометрия стружки	59
ГЛАВА 5. ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ДРЕВСИНЫ	65
5.1. Определения и нормативные данные	65
5.2. Шероховатость поверхности древесины при различных видах обработки	69
ГЛАВА 6. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ	74
6.1. Теоретические основы резания древесины	74
ГЛАВА 7. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ	82
7.1. Общие сведения	82
7.2. Взаимодействие резца с древесиной	82
7.3. Радиальная сила R , сопротивление подачи Q и сила S , нормальная к подаче, при круговом резании	86
7.4. Исходные формулы расчета сил открытого резания	88
7.5. Влияние различных факторов на процесс резания	92
7.6. Основные формулы продольно-торцевого резания	104
7.7. Решение задач	106

ГЛАВА 8. ПИЛЕНИЕ	109
8.1. Классификация и характеристика видов пиления	109
8.2. Уширение пропила	112
8.3. Стружкообразование при продольном пилении	113
8.4. Заполнение стружкой впадины зуба при продольном пилении	116
8.5. Определение посылки по производительности пилы (по впадине зуба)	120
8.6. Стружкообразование при поперечной распиловке	123
ГЛАВА 9. ПИЛЕНИЕ РАМНЫМИ ПИЛАМИ	127
9.1. Кинематика лесопильных рам	127
9.2. Общие сведения для расчета режимов резания	132
9.3. Расчет режимов резания при пилении рамными пилами	140
ГЛАВА 10. ПИЛЕНИЕ ЛЕНТОЧНЫМИ ПИЛАМИ	142
10.1. Общие сведения	142
10.2. Расчет режимов резания	146
ГЛАВА 11. ПИЛЕНИЕ ДИСКОВЫМИ ПИЛАМИ	150
11.1. Общие сведения	150
11.2. Продольное пиление дисковыми пилами	155
11.3. Поперечное пиление дисковыми пилами	163
ГЛАВА 12. ФРЕЗЕРОВАНИЕ И СТРОГАНИЕ	166
12.1. Виды и назначение фрезерования	166
12.2. Строгание	170
12.3. Продольно-торцевое фрезерование	175
12.4. Анализ факторов, влияющих на производительность и шероховатость поверхности при фрезеровании	199
12.5. Фрезерование по копирам	212
12.6. Цепное и пазовое фрезерование	216
ГЛАВА 13. СВЕРЛЕНИЕ	223
13.1. Сверление древесины	223
13.2. Примеры расчета режимов резания	228
ГЛАВА 14. ТОЧЕНИЕ	230
14.1. Осевое точение	230
14.2. Расчет режимов резания при точении	232
ГЛАВА 15. РЕЗАНИЕ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННОЙ ДРЕВСИНЫ	234
15.1. Лущение	234
15.2. Обработка древесины на дощечкорезательных станках	241
15.3. Расчет режимов резания	242
ГЛАВА 16. ШЛИФОВАНИЕ	243
16.1. Шлифование шлифовальными шкурками	243
16.2. Шлифование древесины хвойных пород абразивными кругами	254
ГЛАВА 17. ПРОЧИЕ ВИДЫ ОБРАБОТКИ ДРЕВСЯНЫХ МАТЕРИАЛОВ	259
17.1. Окорка древесины	259
17.2. Рубка щепы	261
17.3. Механическая обработка древесных материалов	269
17.4. Новые способы резания древесины и древесных материалов	288
Приложения	293
Предметный указатель	298
Литература	301