



И.Т. ГЛЕБОВ

**РЕЗАНИЕ
ДРЕВЕСИНЫ**
Пиление и фрезерование

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Уральский государственный лесотехнический
университет

И.Т. ГЛЕБОВ

РЕЗАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ

Избранные лекции

Екатеринбург 2005

УДК 674.023 : 621.9

Рецензенты:

кафедра графики и деталей машин Уральской государственной сельскохозяйственной академии,

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

Глебов И.Т.

Резание древесины: Избранные лекции. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. университет, 2005. – 98 с.

ISBN 5–94984–058–5

Изложены основные положения теории резания древесины одиночным лезвием, рассмотрены процессы обработки древесины на станках: пиление и фрезерование. Описана методика расчетов и выбора рациональных режимов резания с примерами.

Ил. 33. Табл. 9. Библиогр.: 6 назв.

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

УДК 674.023 : 621.9

ISBN 5–94984–058–5

© И.Т. Глебов, 2006

© Уральский государственный лесотехнический университет, 2005

Учебное издание

Иван Тихонович Глебов
Резание древесины

Избранные лекции

Редактор Р.В. Сайгина

Подписано в печать	30.06.04	Формат 60 x 84 1/16
Бумага тип. №1	Печать офсетная	Уч.– изд. л. 5,1
Усл. печ. л. 5,81	Тираж 300 экз.	Заказ 6

Уральский государственный лесотехнический университет
620032, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.

Размножено с готового оригинал-макета ГУП СО Талицкая
типография: 623640, г. Талица, ул. Исламова, 2.

Часто слышишь, что молодежь говорит: я не хочу жить чужим умом, я сам обдумаю. Зачем же тебе обдумывать обдуманное. Бери готовое и иди дальше. В этом сила человечества.

Л.Н. Толстой

...для того, чтобы усовершенствовать ум, надо больше размышлять, чем заучивать.

Р. Декарт

Предисловие

Учебное издание с названием "Резание древесины. Избранные лекции" предназначено для студентов лесотехнических вузов и может быть использовано учащимися колледжей, рабочими, повышающими свою квалификацию в области механической обработки древесины и древесных материалов, а также инженерно-технических работников лесопромышленного комплекса.

Учебной литературы по резанию древесины написано немного. До настоящего времени вопросы резания древесины преподаются по различным учебным пособиям А.Л. Бершадского, Е.Г. Ивановского, В.И. Любченко и учебнику В.В. Амалицкого и В.И. Санева, которые были изданы более десяти лет назад. В УГЛТУ в преподавании учебной дисциплины по резанию древесины используется учебное пособие И.Т. Глебова, изданное в 2001 г.

В последние годы автором проведены исследования динамики резания древесины, которые нашли отражение в предлагаемых избранных лекциях. Исследования автора развивают взгляды А.Л. Бершадского и повышают точность расчетов режимов резания. Для повышения эффективности самостоятельной работы обучающихся издание избранных лекций по резанию древесины становится актуальным.

Книга написана в соответствии с типовой программой и образовательным стандартом для вузовских специальностей. Это книга для обучения. В ней много иллюстраций, текст, обязательный для запоминания, выделен

шрифтом. Для закрепления знаний и приобретения умений в пособии приведено много контрольных вопросов, тестов, примеров решения задач.

Термины и обозначения, использованные в книге, унифицированы, единицы измерения физических величин приведены в соответствии с действующими стандартами. Использован опыт автора по преподаванию учебной дисциплины "Оборудование отрасли" в Уральском государственном лесотехническом университете.

При изучении материала лекций обучающийся должен, прежде всего, освоить термины, определения и обозначения. Надо научиться мыслить и разговаривать языком науки о резании древесины. Текст, выделенный жирным шрифтом, следует заучивать.

При работе с книгой надо серьезно относиться к контрольным вопросам. Если Вы уверенно отвечаете на вопросы, можно приступать к изучению следующего материала.

Наиболее трудный и важный материал книги относится к силам резания, методике их расчета. Надо научиться решать обратную задачу по определению скоростей подач. Это позволит Вам успешно справиться с любыми практическими задачами, в том числе и с курсовыми и дипломными проектами.

Введение

Основоположником науки о резании древесины считается профессор Петербургского горного института И.А. Тиме [1]. В его исследовательской работе "Сопротивление металлов и дерева резанию", опубликованной в 1870 г., а позднее в сочинении "Основы машиностроения" (всего опубликовано 10 научных работ И.А. Тиме по резанию древесины и металлов), приводится анализ и обобщение результатов опытов, проведенных на Луганском заводе. И.А. Тиме впервые приводит определение процесса резания, делает классификацию стружек, объясняет явление усадки стружки (изменение размеров в результате пластического деформирования), доказывает, что ширина и толщина среза по-разному влияют на работу резания.

Проблемы ученых того времени сводились главным образом к изучению деформирования материала в зоне резания и зависимости сил резания от поперечного сечения срезаемого слоя.

И.А. Тиме считал, что работу по резанию выполняет только передняя поверхность лезвия и нормальное давление обрабатываемого материала на ней одинаково по всей площади контакта (рис. 1, а). Сила, действующая на лезвие, может быть найдена по формуле

$$N = klb, \quad (1)$$

где k – нормальное давление;

l, b – соответственно длина и ширина сдавливаемой площади.

В 1886 г. выходит книга П.А. Афанасьева "Курс механической технологии дерева", в которой используются методы науки о сопротивлении материалов, проводится анализ характера стружкообразования, уточняется форма эпюры давления стружки на лезвие. П.А. Афанасьев впервые указывает на роль трения в процессе резания.

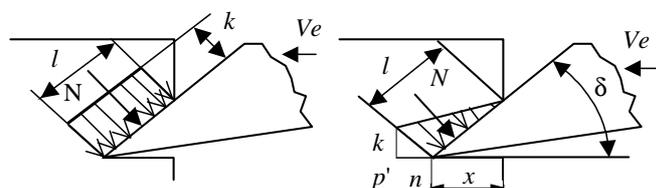


Рис. 1. Эпюры нормальных давлений материала на переднюю поверхность лезвия: а – по И.А. Тиме; б – по П.А. Афанасьеву

В отличие от И.А. Тиме П.А. Афанасьев считал, что давление обрабатываемого материала на переднюю поверхность лезвия распределено неравномерно, и что наибольшее давление имеет место у режущей кромки, а в точке входа в древесину оно равно нулю. Давление от нуля до максимума изменяется по линейной зависимости, поэтому эпюра нормальных давлений имеет форму треугольника (рис. 1, б).

Проблема доказательства формы эпюры при резании сохранилась до наших дней.

Первые исследования по резанию древесины и металлов были связаны с изучением зависимости сил резания от поперечного сечения срезаемого слоя и его размеров.

В ранних работах И.А. Тиме считал, что сила резания пропорциональна ширине и толщине срезаемого слоя. Позднее в сочинении "Основы машиностроения" он пересмотрел свои взгляды. Найдя массу стружек, приходящихся на единицу работы резания, он делает заключение, что для срезания тонких стружек затрачивается работы больше, чем для срезания толстых стружек. Отсюда следует, что удельная работа резания уменьшается с увеличением толщины срезаемого слоя. При этом толщина и ширина срезаемого слоя влияют на силу резания по-разному.

Таким образом, И.А. Тиме первым из исследователей пришел к правильному выводу, что ширина и толщина срезаемого слоя оказывают разное влияние на силу резания.

Заметное место в науке о резании древесины занимают работы К.А. Зворыкина, особенно книги "Работа и усилие для отделения металлических стружек" и "Курс механической технологии дерева" (1894 г.). В своих работах К.А. Зворыкин делает попытку вывести теоретическим путем расчетную формулу для силы резания, находит главные факторы, влияющие на силу резания. Им проведено большое количество экспериментов, на основании которых сделан важный вывод о том, что работа, затраченная на срезание единицы объема стружек, уменьшается с увеличением толщины стружек. Сила резания изменяется пропорционально ширине срезаемого слоя. Со всем другие результаты получились, когда сечение срезаемого слоя изменялось только за счет его толщины. Проведя 230 опытов, К.А. Зворыкин делает вывод, что удельная работа резания – величина не постоянная, а переменная и уменьшается с увеличением толщины срезаемого слоя. Была предложена эмпирическая зависимость для расчета удельной работы резания:

$$K = \frac{K'}{a^{0,33}}, \quad (2)$$

где K' – удельная работа резания при толщине срезаемого слоя 1 мм;

a – толщина срезаемого слоя, мм.

Так, К.А. Зворыкин первым из исследователей экспериментально доказал, что удельная работа резания убывает с увеличением толщины сре-

заемого слоя, подтвердив, таким образом, правильность взглядов И.А. Тиме.

Впервые проанализировать указанную закономерность попытался А.А. Брикс. В 1896 г., обрабатывая экспериментальные данные К.А. Зворыкина, он пришел к выводу, что если указанные данные рассмотреть в осях координат, где ордината – отношение силы резания к ширине среза, а абсцисса – толщина среза, то сила резания изменяется по линейному закону. Графически это изображается наклонной прямой линией, проходящей выше начала координат и отсекающей положительную ординату. Уравнение имеет вид

$$F_x = K_1b + K_2ab, \quad (3)$$

где F_x – сила резания, Н;

K_1, K_2 – коэффициенты с размерностью соответственно Н/мм и МПа;

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

Отсюда следует, что сила резания изменяется пропорционально ширине и непропорционально толщине срезаемого слоя.

В 1925 г. выходит в свет работа А.Н. Челюскина "Влияние размеров стружки на усилие резания металлов", которая, по словам автора, является "результатом критической обработки главнейших сочинений, относящихся к вопросу резания металлов на станках, а также собственных изысканий и опытов автора в этой области". А.Н. Челюскин цифрами и графиками подтвердил неодинаковое влияние ширины и толщины срезаемого слоя на силу резания.

В 1934 г. М.А. Дешевой в работе "Механическая технология дерева" изложил оригинальную, глубоко разработанную и методично построенную научную теорию резания древесины. Как и И.А. Тиме, он, применяя методы механики в анализе процесса стружкообразования при резании, установил связи между сопротивлением древесины резанию и показателями ее механических свойств. Были разработаны более совершенные методы расчета мощности и производительности деревообрабатывающих машин.

В тридцатых годах выполняются первые исследовательские работы А.Э. Грубе, А.Л. Бершадского, С.А. Воскресенского, Ф.М. Манжоса. Научными трудами этих ученых мы широко пользуемся в настоящее время.

В работах С.А. Воскресенского развиваются идеи М.А. Дешевого в применении методов механики в анализе процессов резания. Большое внимание при этом уделяется выявлению эпюры нормальных давлений в зоне резания и определению силы резания. Одной из главных черт теории С.А. Воскресенского является расчленение силы резания на составные части.

Приступая к анализу отдельных частей, С.А. Воскресенский отмечал, что между процессами, происходящими по отдельным зонам, существует тесная неразрывная связь. Однако при синтезе сила резания представляется им как сумма трех сил: силы надрезания $F_{хн}$, силы деформации стружки $F_{хд}$ и силы резания по задней грани $F_{хз}$. В результате синтеза сил, действующих на лезвие, получены уравнения:

$$\begin{aligned} F_x &= F_{хн} + F_{хз} + F_{хд}, \\ F_x &= F_{хо} + F_{хд}, \\ F_x &= F_{хо} + K_0 a. \end{aligned} \quad (4)$$

В этих уравнениях ширина срезаемого слоя равна 1 мм.

В приведенных уравнениях остается неясной функция отдельных составных частей в целом процессе резания, так как они изолированы друг от друга и не взаимосвязаны между собой. Это послужило поводом для критики теории С.А. Воскресенского другими учеными. А.Л. Бершадский замечает по этому поводу, что условность разделения резца и его работы на самостоятельно выделенные слагаемые, допустимая для общих предварительных рассуждений, совершенно не допустима для распространения ее на расчетную практическую формулу. Процесс резания неделим. В нем нет границ раздела между отдельными процессами. Наоборот, один процесс действует на другой, связь между процессами интегральная, а не арифметическая. Следовательно, изолированные независимые слагаемые не отражают реальную сущность процесса резания.

Анализируя книгу С.А. Воскресенского по резанию древесины, Е.Г. Ивановский писал, что применение только одного механико-математического метода сдерживает развитие науки о резании. Резание древесины есть одно из самых сложных физических явлений. Именно так надо подходить к его изучению. Такое понимание метода исследования не предполагает открытия новых физических законов, но требует выявления характера действия известных законов при резании. Начала механики материалов помогают выявить ряд закономерностей резания, но не все, и поэтому нельзя ограничиваться только ими.

Линейная зависимость силы резания от толщины срезаемого слоя получена также в исследованиях Е. Кивимаа. Исследования показали, что ни одна из кривых, будучи продлена, не проходит через начало координат, и все кривые отсекают некоторую положительную ординату. Из этого делается вывод, что усилие, расходуемое на резание древесины, расходуется на

две части. Одна часть расходуется собственно на резание и остается постоянной при изменении толщины среза. Другая часть усилия резания расходуется на деформирование срезаемых слоев передней поверхностью лезвия и зависит от толщины срезаемого слоя.

Так, Е. Кивимаа поделил силу резания на две части, одна из которых приложена к режущей кромке лезвия и производит вальцевание поверхности резания и перерезание или разделение волокон древесины, а другая – приложена к передней поверхности лезвия и производит сжатие срезаемого слоя древесины. Для единичной силы резания шириной 1 мм сила резания выражается формулой

$$F_{x1} = F_c + Ka.$$

Если единичную силу резания поделить на соответствующее ей значение толщины срезаемого слоя a , то получится значение удельной силы резания, количественно равное удельной работе резания.

В работах А.Л. Бершадского удельная работа резания древесины выражалась следующей формулой:

$$K = \frac{K'}{a^m}, \quad (5)$$

где K' – удельная работа резания при толщине срезаемого слоя 1 мм;

m – коэффициент, характеризующий интенсивность роста удельной работы резания.

Эта формула получена путем обработки экспериментальных данных в логарифмических осях координат. Она показывает, что удельная работа резания убывает с ростом толщины срезаемого слоя. Эта формула оказалась удобной для практических расчетов и широко использовалась до 60-х годов. Однако такая формула затрудняла определение радиальной составляющей полной силы резания.

Радиальная сила (сила отжима) определялась по формуле:

$$F_z = \pm mF_x, \quad (6)$$

где m – коэффициент, зависящий от остроты режущей кромки лезвия и толщины срезаемого слоя. Значение m изменяется в пределах $m = 0,1- 1,0$.

Исследования по резанию древесины и древесных материалов в нашей стране ведут все высшие учебные заведения лесопромышленного профиля, а также отраслевые научно-исследовательские институты (ЦНИИМОД, г. Архангельск; ЦНИИМЭ, г. Химки Московской обл.; ВНИИДрев, г. Балабаново Калужской обл.; СибНИИЛП, г. Красноярск).

Резание древесины – сложный процесс. Его сложность обусловила появление разных направлений в развитии теории резания этого материала.

В итоге научных дискуссий по теории резания древесины, состоявшихся в Ленинграде (1952 г.) и в Москве (1953 г.), было установлено, что уже в то время наука о резании древесины развивалась по трем направлениям.

Первое направление применяет метод механико-математического анализа процесса резания. Это школа И.А. Тиме, М.А. Дешевого, С.А. Воскресенского. Ученые этой школы переносят методы науки о сопротивлении материалов на анализ действия сил и поведения стружки в процессе резания древесины.

Второе направление развивает физическую теорию резания древесины. Процесс резания рассматривается как физический. Изучаются прежде всего процессы упругого и остаточного деформирования древесины, трения на молекулярном уровне, влияние на эти процессы скорости резания. Это направление представлено школой В.Д. Кузнецова и Е.Г. Ивановского.

Третье направление использует физико-технологический метод, математически обобщающий экспериментальные данные процессов резания в эмпирические формулы, пригодные для практических расчетов. Формулы объединяют физические и технологические параметры. Это школа А.Л. Бершадского.

Между указанными тремя теориями резания нельзя провести четких границ. Они части одной теории, дополняющие и обогащающие друг друга, объединенные единством цели.

В заключение отметим, что научные труды основоположника науки о резании древесины И.А. Тиме дали возможность целой плеяде русских ученых (П.А. Афанасьеву, К.А. Зворыкину, А.Н. Челюскину, Я.Г. Усачеву, М.А. Дешевому, А.Л. Бершадскому, А.Э. Грубе, С.А. Воскресенскому, Е.Г. Ивановскому, А.Е. Золотареву, И.П. Лапину, Ф.М. Манжосу, В.С. Рыбалко и многим другим) создать отечественную российскую школу обработки древесины резанием. Эта школа занимает сейчас ведущее место в мире.

Силы резания при взаимодействии лезвия с древесиной

План лекции. Главная, радиальная и осевая составляющие силы резания. Удельная сила, удельная работа и единичная сила резания. Контактные зоны лезвия. Эпюры нормальных давлений по зонам лезвия. Рабочая эпюра. Определение составляющих сил резания по эпюрам нормальных и касательных давлений. Величина сил резания, действующих по контактным зонам лезвия. Зависимость главной составляющей силы резания от толщины срезаемого слоя. Общий закон резания древесины А.Л. Бершадского. Зависимость единичной касательной силы резания от толщины срезаемого слоя в диапазоне микрослоев ($a \leq 0,1$ мм). Сила резания по задней поверхности лезвия.

1.1. Основные понятия и определения

1.1.1. Составляющие силы резания

При резании древесина оказывает сопротивление перемещению лезвия. Для непрерывности процесса резания к лезвию необходимо приложить силу, способную преодолеть сопротивления среды. Эту силу, действующую со стороны лезвия на заготовку, называют силой резания F . В зависимости от условий резания эта сила может изменяться по величине и направлению действия.

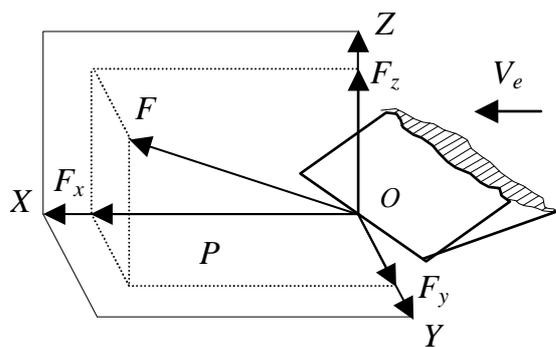


Рис. 2. Составляющие силы резания

В расчетах и исследованиях динамики резания обычно пользуются составляющими силы резания – проекциями на координатные оси (рис. 2). Причем ось X проводят параллельно направлению скорости главного движения V_e , а координатную плоскость XOY совмещают с плоскостью резания.

Проекциям силы резания присвоены следующие названия: главная составляющая силы резания (касательная) F_x , радиальная (нормальная) составляющая силы резания F_z и осевая составляющая силы резания F_y .

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

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

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

1.1.2. Удельная сила, удельная работа, единичная сила резания

Удельная сила резания $F_{y\partial}$ есть отношение главной составляющей силы резания к площади поперечного сечения срезаемого слоя и имеет размерность МПа (Н/мм^2):

$$F_{y\partial} = \frac{F_x}{ab}, \quad (7)$$

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

Удельная работа резания K есть работа главной составляющей силы резания в Дж, необходимая для срезания 1 см^3 древесины. Согласно определению

$$K = \frac{A}{v} = \frac{F_x l}{abl} = \frac{F_x}{ab} = F_{y\partial}, \quad (8)$$

где K – удельная работа резания, Дж/ см^3 ;

A – работа резания, Дж;

v – объем срезаемого слоя, см^3 ;

l – длина срезаемого слоя, м.

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

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

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

1.1.3. Контактные зоны лезвия

При проникновении лезвия в древесину на его контактной поверхности создаются нормальное давление и силы трения. Для анализа указанных сопротивлений контактную поверхность делят на зоны. В сечении нормальной плоскостью контактная поверхность лезвия (рис. 3) изображается в виде контура $abmncd$.

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

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

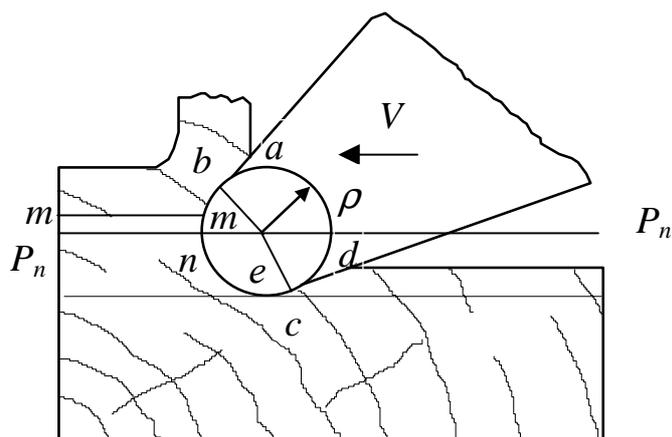


Рис. 3. Зоны контактного контура лезвия

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

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

1.1.4. Эпюры нормальных давлений по зонам лезвия

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

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

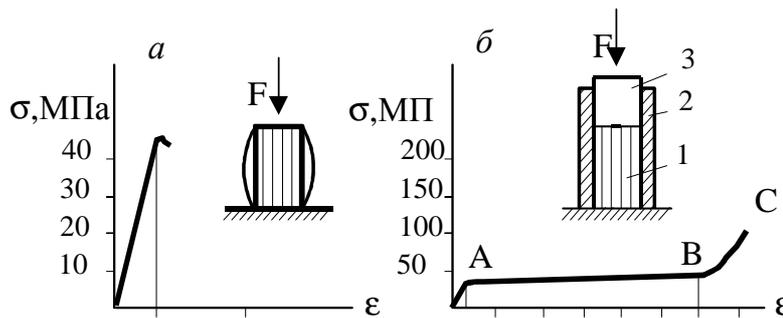


Рис. 4. Сжатие древесины:
а – свободное; б – в замкнутом пространстве

подчиняется зависимости напряжений от деформации при сжатии древесины в замкнутом пространстве (рис. 4).

Перенесем график этой зависимости на переднюю поверхность (рис. 5) и будем считать, что давление стружки на переднюю поверхность распределено равномерно.

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

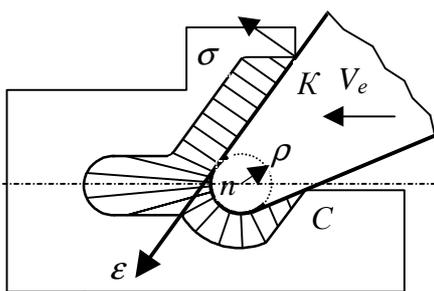


Рис. 5. Эпюра нормальных давлений по контактным площадкам лезвия

Задняя поверхность лезвия испытывает нормаль-

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

Учитывая сказанное, а также особенность деформирования древесины в замкнутом пространстве, принимаем рабочую эпюру нормальных давлений по контактными площадкам, изображенную на рис. 5.

1.2. Определение составляющих силы резания

1.2.1. Силы резания по контактными площадкам лезвия

Силы резания в зоне стружки. Заменяем эпюру нормальных давлений в зоне стружки (передней поверхности лезвия) сосредоточенной силой N и векторно прибавим к ней силу трения T (рис. 6, а). Полученную силу F спроецируем на направление V_e и на нормаль к нему. Получим следующие силы: F_{xn} – касательную силу резания по передней поверхности; F_{zn} – нормальную силу резания по передней поверхности.

Главная составляющая силы резания может быть найдена из эпюры касательных давлений в зоне стружки. Построим такую эпюру. Для этого каждый вектор нормального давления N_i и созданный им вектор силы трения T_i (рис. 6, б) спроецируем на направление V_e . Полученные точки соединим линией 234. Величина силы F_{xn} будет равна площади эпюры касательных давлений (все расчеты ведутся на ширину срезаемого слоя 1 мм).

Эпюру касательных давлений на передней поверхности можно рассматривать состоящей из двух слоев: микрослоя 6345, опирающегося на поверхность лезвия и соизмеримого по толщине с радиусом его округления, и внешней части срезаемого слоя 1236. Максимальную толщину микрослоя принимают равной 0,1 мм. Касательное давление в микрослое обозначим k_m , а во внешнем слое – k .

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

$$F_{xn} = 0,1k_m + k(a - 0,1), \quad (9)$$

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

a – толщина срезаемого слоя, мм;

$0,1$ – толщина микрослоя, мм.

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

$$F_{хлм} = k_m a_m. \quad (10)$$

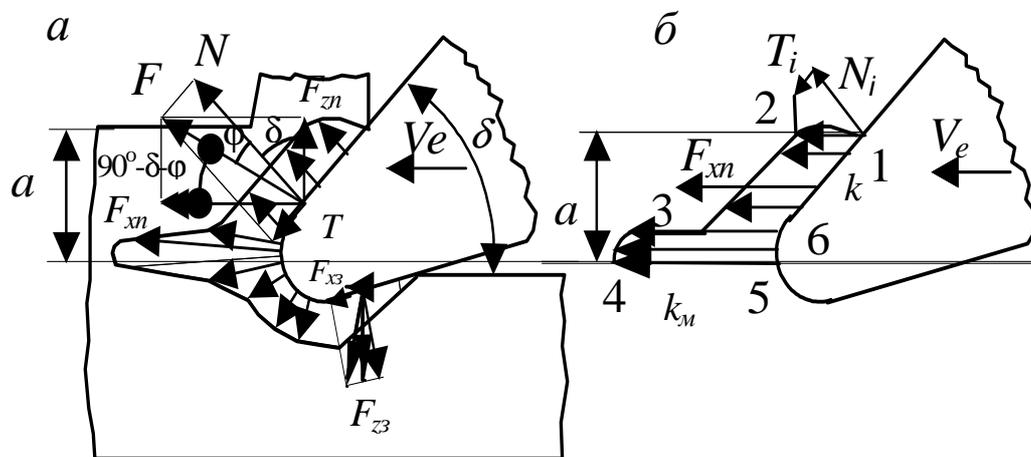


Рис. 6. Силы на лезвии:

a – общая схема сил; b – касательная сила на передней грани

Радиальная составляющая силы резания находится путем следующих рассуждений. Силы N и F (см. рис. 6, a) образуют между собой угол трения φ ($\varphi = \arctg \mu$, где μ – коэффициент трения древесины по передней грани). При этом силы F_{zn} и F_{xn} связаны между собой следующим уравнением:

$$F_{zn} = F_{xn} \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi), \quad (11)$$

где δ – угол резания.

Принимая во внимание уравнение (9), отметим, что F_{zn} состоит из двух слагаемых, относящихся к микрослою и внешнему слою:

$$F_{zn} = 0,1 k_m \operatorname{tg}(90^\circ - \delta_m - \varphi_m) + k(a - 0,1) \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi). \quad (12)$$

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

$$F_{zn} = k(a-0,1) \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi), \quad (13)$$

при $a < 0,1$ мм $F_{zn} = 0$.

Силы в зоне поверхности резания. Обращаясь к силам резания на задней грани (см. рис. 6, а), можно по аналогии получить касательную силу резания по задней поверхности F_{xz} и нормальную силу резания по задней поверхности F_{z3} . Так как упругопластическое деформирование поверхности резания задней гранью невелико (на величину радиуса округления режущей кромки, т. е. не более 0,06 мм), можно рассматривать касательную силу по задней грани как силу трения:

$$F_{xz} = f F_{z3}, \quad (14)$$

где f - коэффициент трения по задней поверхности лезвия.

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

Вывод. Итак, на лезвие (см. рис. 6, а) действуют две системы сил: над плоскостью резания и под ней. При этом силы F_{xn} и F_{xz} действуют в одном направлении и составляют вместе касательную единичную силу резания:

$$\begin{aligned} \text{при } a \geq 0,1 \text{ мм} \quad F_{x1} &= F_{xz} + 0,1k_M + k(a - 0,1), \\ \text{при } a_M < 0,1 \text{ мм} \quad F_{x1M} &= F_{xz} + k_M a_M. \end{aligned} \quad (15)$$

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

$$\begin{aligned} F_{z1} &= F_{z13} - F_{z1n} \\ \text{при } a \geq 0,1 \text{ мм} \quad F_{z1} &= F_{x13}/f - k(a - 0,1)\operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi), \\ \text{при } a_M < 0,1 \text{ мм} \quad F_{z1M} &= F_{x3M}/f. \end{aligned} \quad (16)$$

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

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

1.2.2. Зависимость главной составляющей силы резания от толщины срезаемого слоя

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

Обобщенная зависимость главной составляющей силы резания от толщины срезаемого слоя в диапазоне от 0 до 2 мм названа А.Л. Бершадским "Общий закон резания древесины" [2]. График изменения единичной касательной силы резания (ширина срезаемого слоя равна 1 мм) показан на рис. 7.

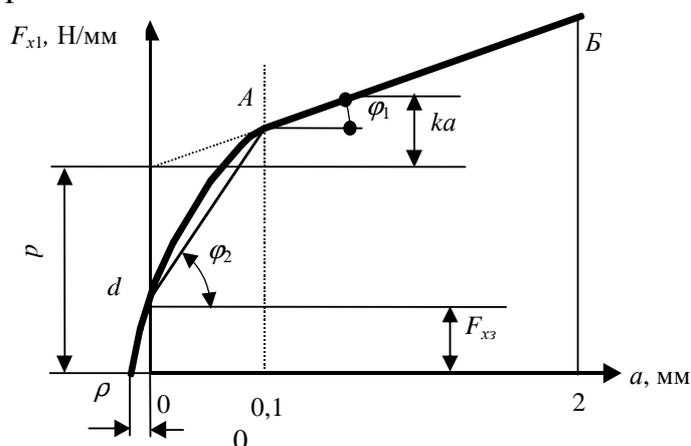


Рис. 7. Зависимость касательной силы резания от толщины срезаемого слоя

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

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

$$F_{x1} = p + a \operatorname{tg} \varphi_1 = p + ka, \quad (17)$$

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

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

Для упрощения расчетов отрезок параболы можно заменить прямой линией, наклоненной к оси абсцисс под углом φ_2 и отсекающей на оси ординат отрезок Od , равный по величине касательной силе резания по зад-

ней грани. Уравнение единичной касательной силы резания для микрослоев

$$F_{x1m} = F_{xz} + a_m \operatorname{tg} \varphi_2 = F_{xz1} + k_m a_m, \quad (18)$$

где F_{xz} – единичная касательная сила резания по задней поверхности, Н/мм;

k_m – касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность лезвия, МПа; $k_m = \operatorname{tg} \varphi_2$;

a_m – толщина срезаемого микрослоя, мм.

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

$$F_{xz} = 0,2p.$$

Для произвольно взятой точки графика касательная сила резания состоит из суммы двух частей: силы резания по задней поверхности $F_{xz} = 0,2p$ и силы резания по передней поверхности $F_{xp} = 0,8p + ka$. Сумма этих частей дает уравнение (17).

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

1.2.3. Изменение силы резания в диапазоне микрослоев

Вывод расчетной формулы. В диапазоне микрослоев ($a \leq 0,1$ мм) линия зависимости единичной касательной силы резания от толщины срезаемого слоя имеет параболическую форму (рис. 8). Общее уравнение параболы в осях координат F_{x1} и a

$$F_{x1} = ca^2 + da + e, \quad (19)$$

где c, d, e – параметры параболы.

Парабола проходит через точку E , и вершина ее расположена в точке A .

Координаты точки A :

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

$$F_{x1A} = AG = F_{x0,1} = \frac{4ce - d^2}{4c}, \quad (20)$$

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

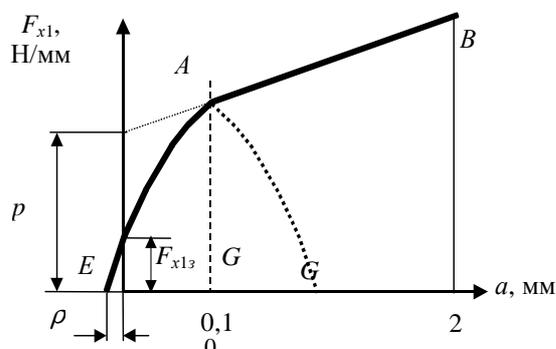


Рис. 8. Расчетная схема к определению касательной силы резания по задней грани

Отсюда получим

$$\begin{aligned} d &= -0,2c, \\ 4ce - d^2 &= 4c F_{x0,1}. \end{aligned} \quad (21)$$

Точка E , лежащая на параболе, имеет координаты:

$$\begin{aligned} a_E &= -\rho_0; \\ F_{x1E} &= 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Подставляя эти координаты в уравнение параболы, получим

$$\begin{aligned} 0 &= c\rho_0^2 - d\rho_0 + e, \\ e &= -c\rho_0^2 + d\rho_0. \end{aligned} \quad (23)$$

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

$$\begin{cases} d = -0,2c; \\ 4ce - d^2 = 4c F_{x0,1}; \\ e = -c\rho_0^2 + d\rho_0. \end{cases} \quad (24)$$

После решения системы уравнений получено

$$c = -\frac{F_{x0,1}}{\lambda}; \quad d = \frac{0,2F_{x0,1}}{\lambda}; \quad e = F_{x0,1}\left(1 - \frac{0,01}{\lambda}\right), \quad (25)$$

где λ – коэффициент: $\lambda = \rho_0^2 + 0,2\rho_0 + 0,01$; где ρ_0 – начальный радиус закругления режущей кромки, мм.

Уравнение параболы

$$F_{x1} = (p + 0,1k)\left(-\frac{1}{\lambda}a^2 + \frac{0,2}{\lambda}a + 1 - \frac{0,01}{\lambda}\right). \quad (26)$$

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

$$F_{xz} = (p + 0,1k)(1 - \frac{0,01}{\lambda})$$

или

$$F_{xz} = (p + 0,1k)(1 - \frac{0,01}{\rho_o^2 + 0,2\rho + 0,01}). \quad (27)$$

Пренебрегая значением ρ_o^2 в виду его малости, упрощая выражение и переходя к размерности ρ в мкм, получим формулу для расчета единичной касательной силы резания по задней поверхности острого лезвия:

$$F_{xz} = (p + 0,1k)(\frac{\rho_o}{\rho_o + 50}). \quad (28)$$

Примеры. По Е. Кивимаа при резании березы в торец и $\rho_o = 5$ мкм, $F_{x1} = 4 + 38a$ получим

$$F_{xz} = (4 + 0,1 \cdot 38)(\frac{5}{5 + 50}) = 0,71 \text{ мкм.}$$

Доля силы резания по задней поверхности в фиктивной силе резания

$$F_{x1z} = \frac{0,71}{p} p = \frac{0,71}{4} p = 0,18 p.$$

В исследованиях В.Г. Морозова при фрезеровании древесины единичная касательная сила резания выражается уравнением $F_{x1} = 1,5 + 13a$, силы резания по задней поверхности $F_{x1z} = 0,26 \text{ Н/мм}$

$$F_{x1z} = \frac{0,26}{p} p = \frac{0,26}{1,5} p = 0,17 p.$$

Расчетные значения по величине близки к принятым А.Л. Бершадским $F_{x1z} = 0,2p$. Отклонения составляют соответственно 10 и 15%.

Касательное давление на переднюю поверхность. Точка А (рис. 8) является общей для участков микро- и макрослоев при толщине 0,1 мм. Напишем уравнение для силы резания при $a = 0,1$ мм:

$$\text{для макрослоев } F_{x1} = p + 0,1k;$$

$$\text{для микрослоев } F_{x1m} = F_{xz} + 0,1k_m,$$

где k_m – среднее касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность в диапазоне микростружек. МПа;

$$F_{x1m} = (\alpha p + 0,1k) \frac{\rho}{\rho + 50} + 0,1k_m.$$

Приравняем F_{x1} и F_{x1m} .

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

Отсюда

$$k_{\mu} = (\alpha_{\rho} p + 0,1k) \frac{500}{\rho_o + \Delta_{\rho} + 50}, \quad (29)$$

где ρ_o , Δ_{ρ} подставляются в мкм.

1.3. Коэффициент трения

Изучение процесса внешнего трения связано с именем Леонардо да Винчи (1508 г.), который ввел понятие о коэффициенте трения и определил, что его величина равна 0,25.

Французский исследователь Гильом Амонтон (1699 г.) утверждал, что для всех твердых тел коэффициент трения равен 0,3. В настоящее время разработана молекулярно-механическая теория трения [3]. Согласно этой теории твердые тела вследствие шероховатости и волнистости их поверхностей при взаимодействии контактируют не всей номинальной поверхностью, а только пятнами, выступами. В результате различной твердости тел их контактирующие области взаимно внедряются. При движении происходит упругое оттеснение материала, пластическое оттеснение и выцарапывание, нагребание материала.

На чистой обнаженной поверхности тела атомы легко вступают в соединение с окружающими элементами. В местах контакта происходит молекулярное сцепление, сопровождающееся глубинным вырыванием материала, или молекулярное сцепление пленок, которыми тела покрыты.

В общем случае сила трения может быть найдена по следующей формуле:

$$F = f(N + Sp_o),$$

где f – коэффициент трения скольжения;

N – сила нормального давления на поверхность;

S – фактическая площадь контакта между телами;

p_o – добавочное давление, вызванное молекулярным сцеплением.

Коэффициент трения скольжения f передней контактной поверхности лезвия с древесиной уменьшается с увеличением ее плотности, твердости и давления на контактной поверхности. С повышением влажно-

сти и температуры древесины, шероховатости поверхности лезвия и скорости скольжения коэффициент трения скольжения **увеличивается**.

Коэффициент трения скольжения f лезвия по поверхности резания зависит от радиуса округления режущей кромки.

В теории резания древесины используют приближенные величины коэффициентов трения. Для расчета сил резания по передней грани принимают $f = 0,18 \dots 0,5$. Для расчета сил резания по задней грани коэффициент трения берут в диапазоне от 0,32 до 2 по формуле [4]

$$f = \frac{2}{\alpha_p^2}, \quad (30)$$

где α_p – коэффициент затупления лезвия.

Контрольные вопросы и задания

Зависимость касательной силы резания от толщины срезаемого слоя в диапазоне микро- и макростружек с достаточной степенью точности можно изобразить на графике соответственно прямой линией и отрезком параболы.

Лекция 2

Влияние различных факторов на силы резания и качество обработки

План лекции. Исследование процесса резания как технологической системы. Структура технологической системы. Анализ и синтез.

Влияние затупления лезвий. Коэффициент затупления. Силы резания и удельная сила резания для затупленного лезвия. Влияние породы, влажности и температуры древесины. Расчет касательной силы резания для главных и переходных видов резания. Влияние параметров режущего инструмента. Влияние скорости главного движения. Влияние размеров срезаемого слоя.

2.1. Анализ и синтез процесса резания древесины

Резание древесины – сложный процесс. При изучении такой процесс принято рассматривать как технологическую систему (ТС), состоящую из нескольких взаимосвязанных и относительно неделимых частей, образующих единое целое. Технологическая система "процесс резания" состоит из четырех частей, называемых подсистемами (рис. 9): заготовки, условий резания, станка, режущего инструмента.

Подсистемы технологической системы пронизаны между собой причинно-следственными связями и влияют на функционирование друг друга. Подсистемы только относительно неделимые части. При отдель-



Рис. 9 . Технологическая система "процесса резания"

ном их рассмотрении как систем в каждой из них можно выделить свои подсистемы как условно неделимые части.

Заготовку можно характеризовать следующими условно неделимыми частями: породой, влажностью, плотностью, прочностью, упругостью, пластичностью, температурой, размерами и др.

Режущий инструмент включает такие элементы, как угол заострения, количество лезвий, остроту режущих кромок, физико-механические свойства материала зубьев, шероховатость поверхности лезвий, длину режущих кромок и др.

Станок включает следующие элементы: механизм главного движения с вращательным или возвратно-поступательным движением, механизм подачи, механизм базирования, количество рабочих движений и последовательность их выполнения, толщину и ширину срезаемого слоя, угол резания, задний угол, угол встречи (наклона, скоса) режущей кромки лезвия с волокнами древесины, скорость главного движения и движения подачи, силы резания и трения, мощность приводов и др.

Условия резания представляют собой совокупность условий, относящихся к заготовке, режущему инструменту и станку, необходимых и достаточных для осуществления требуемого процесса резания. Если условия резания изменить, то и остальные подсистемы (заготовка, инструмент, станок) следует изменить так, чтобы они обеспечили реализацию процесса резания. Если изменить параметры заготовки, например древесина ее будет мерзлая, в которой свободная влага находится в твердой фазе, то другие части системы тоже должны быть изменены. Режущий инструмент, станок и условия резания должны обеспечить выполнение процесса резания. Таким образом, изменение любой подсистемы отразится на состоянии других подсистем.

Анализ и синтез. Для изучения процесса резания древесины широко используют научные методы анализа и синтеза.

Анализ – это метод познания, заключающийся в расчленении подсистемы на составные части с целью их всестороннего изучения.

Синтез – это метод познания, заключающийся в соединении отдельных элементов в единое целое.

Анализ и синтез возможны только тогда, когда объект изучения рассматривается системно. При анализе выявляются наиболее существенные факторы (причины, движущие силы) подсистемы и изучается их влияние на процесс резания с определением положительного эффекта.

При синтезе подсистемы объединяются в единое целое, где разрозненные факторы взаимодействуют совместно. Совместное взаимодействие факторов, их причинно-следственные связи создают общий

положительный эффект системы, превышающий сумму положительных эффектов, создаваемых отдельными факторами.

2.2. Учет затупления лезвий

По мере затупления режущих кромок лезвий значения касательной силы резания увеличиваются. Увеличение силы резания учитывают коэффициентом затупления α_{ρ_3} по задней поверхности лезвия и коэффициентом затупления α_{ρ_1} по передней поверхности лезвия.

Было предложено рассчитывать единичную касательную силу резания для затупленного лезвия по следующей формуле:

$$F_{x1} = \alpha_{\rho_3} p + \alpha_{\rho_1} ka. \quad (31)$$

Коэффициент α_{ρ_1} при резании массивной древесины незначительно отличается от единицы, поэтому принимают $\alpha_{\rho_1} = 1$. На рис. 10 линией $EdAB$ представлен график зависимости касательной силы резания для острого лезвия, линией $E_T d_T A_T B_T$ – для тупого лезвия. Фиктивная сила резания для тупого лезвия находится с учетом коэффициента затупления α_ρ : $p_T = \alpha_\rho p$.

Из точки T проходит прямая линия $A_T B_T$ зависимости касательной силы резания от толщины срезаемых макрослоев. Если $\alpha_{\rho_1} = 1$, то прямые линии графика AB и $A_T B_T$ проходят параллельно.

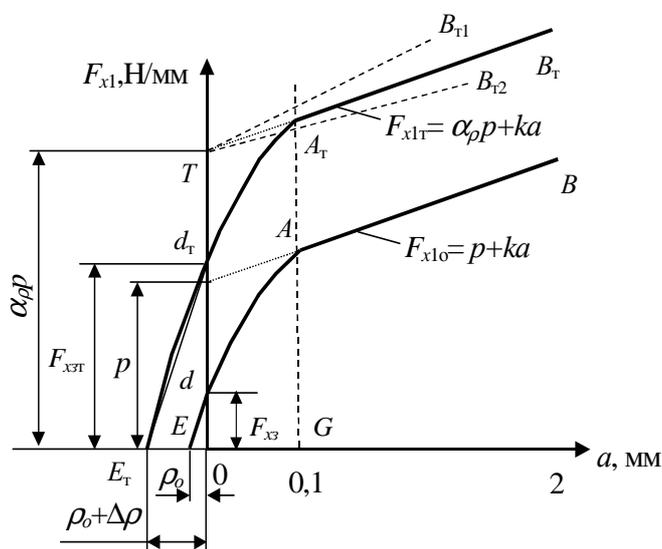


Рис. 10. Графики для расчета коэффициента затупления

Уравнение параболы AdE

$$F_{x1} = (p + 0,1k) \left(-\frac{1}{\lambda} a^2 + \frac{0,2}{\lambda} a + 1 - \frac{0,01}{\lambda} \right), \quad (32)$$

где λ – коэффициент: $\lambda = \rho_o^2 + 0,2\rho_o + 0,01$. Здесь ρ_o подставляется в мм: для острых фрез $\rho_o = 0,005$ мм, для пил – $\rho_o = 0,010$ мм.

При $a = 0$ парабола пересекает ось ординат в точке, соответствующей значению силы резания по задней грани лезвия. Таким образом, для острого лезвия, переведя значения ρ_o в мкм, получим

$$F_{x3} = (p + 0,1k) \left(\frac{\rho_o}{\rho_o + 50} \right). \quad (33)$$

Для тупого лезвия

$$F_{x3T} = (\alpha_\rho p + 0,1k) \left(\frac{\rho_o + \Delta_\rho}{\rho_o + \Delta_\rho + 50} \right). \quad (34)$$

Заменим отрезки парабол Ed и $E_T d_T$ прямыми линиями и получим два подобных треугольника: $0d_T E_T$ и $0dE$. Составим отношение сторон этих треугольников

$$\frac{0d_T}{0d} = \frac{0E_T}{0E}. \quad (35)$$

В случае, когда касательная сила резания равна нулю, толщина срезаемого слоя равна $-\rho$ (см. рис. 10 и 11).

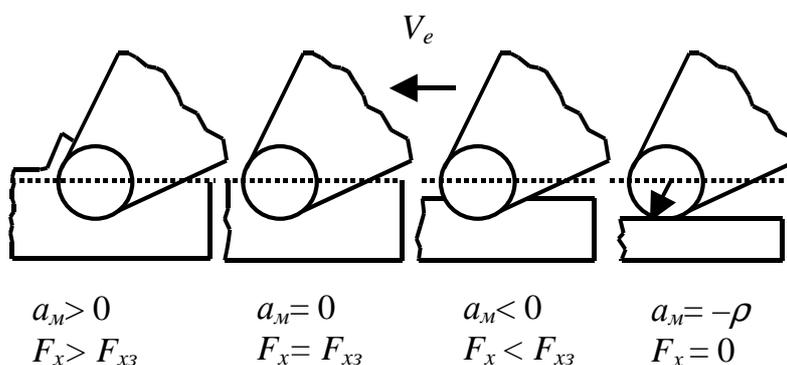


Рис. 11. Положительные и отрицательные значения толщины среза

Подставляя выше приведенные выражения (33) и (34) в (35), получим

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

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

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

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

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

После преобразований получим формулу для коэффициента затупления лезвий.

$$\alpha_p = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta\rho}{\rho_o + 50}. \quad (36)$$

Из (36) следует, чем больше значение k и меньше p , тем больше значение коэффициента затупления α_p .

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

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

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

Для первого уравнения получим следующее выражение для α_p :

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

Для второго уравнения получим

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

Для сравнения приведем результат по формуле А.Л. Бершадского

$$\alpha_p = 1 + \frac{0,2\Delta\rho}{\rho_o} = 1 + \frac{0,2 \cdot 20}{5} = 1,8.$$

Таким образом, значения коэффициента затупления, вычисляемые по формуле (36), получаются несколько ниже, чем по методу А.Л. Бершадского. Отклонения составляют соответственно 5 и 6,7%.

Уравнения для определения единичной касательной силы резания. С учетом коэффициента затупления α_p касательные единичные силы резания при работе лезвием любой степени затупления могут быть найдены по следующим выражениям:

– для макрослоев

$$F_{x1} = \alpha_p p + ka, \quad (37)$$

– для микрослоев

$$F_{x1\mu} = (\alpha_p p + 0,1k) \left(-\frac{1}{\lambda} a^2 + \frac{0,2}{\lambda} a + 1 - \frac{0,01}{\lambda} \right), \quad (38)$$

где λ – коэффициент: $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$. Здесь ρ подставляется в мм.

Зависимость удельной силы резания от толщины срезаемого слоя. Для определения удельной силы резания надо главную составляющую (касательную) силы резания поделить на поперечное сечение среза или касательную единичную силу при ширине среза 1 мм поделить на толщину срезаемого слоя. Для макрослоев

$$F_{y\partial} = \frac{F_{x1}}{a} = k + \frac{\alpha_p p}{a}. \quad (39)$$

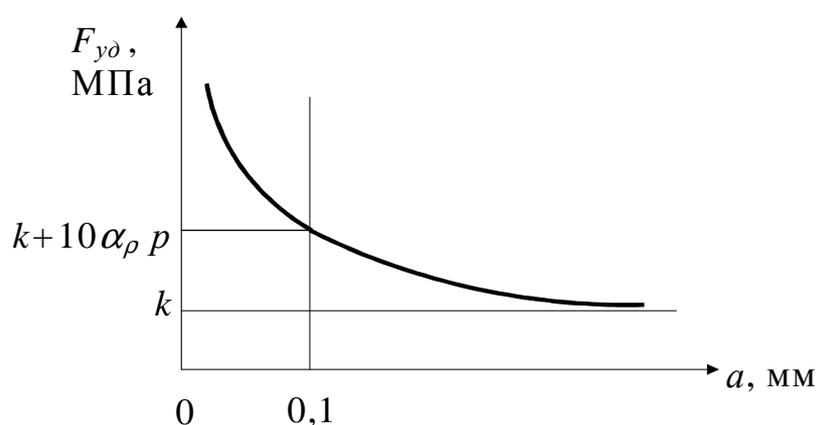


Рис. 12. Зависимость удельной силы резания от толщины среза

Это уравнение гиперболы. Найдя предельные значения $F_{y\partial}$ при $a \rightarrow 0$ и $a \rightarrow \infty$, получим оси асимптот $a = 0$ и $F_{y\partial} = k$. График зависимости удельной силы резания от толщины срезаемого слоя показан на рис. 12. С ростом толщины среза $F_{y\partial}$ убывает. Для микрослоев

$$F_{y\partial\mu} = \frac{F_{x1\mu}}{a_{\mu}}.$$

График удельной силы резания для макро - и микрослоев имеет общую точку при $a = 0,1$ мм, в которой $F_{y\partial} = k + 10\alpha_{\rho}$.

2.3. Учет при резании породы, влажности и температуры древесины

2.3.1. Влияние породы древесины

Породы древесины различаются строением и плотностью. Плотность древесины – физическая величина, определяемая отношением массы натуральной древесины к ее объему.

В зависимости от влажности древесины различают следующие способы выражения плотности: стандартная (табличная), ρ_{12} (при стандартной влажности 12%); во влажном состоянии ρ_w ; в абсолютно сухом состоянии ρ_o ; условная $\rho_{усл.}$ (отношение массы абсолютно сухой древесины к объему максимально разбухшей или свежесрубленной).

Значение плотности зависит от строения древесины и содержания в ней экстрактивных веществ (смола). Для одной и той же древесной породы значения плотности изменяются в зависимости от условий роста дерева или местоположения образца в стволе дерева. Средние значения плотности древесины приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средние значения плотности пород древесины

Порода	Плотность, кг/м ³			Порода	Плотность, кг/м ³		
	ρ_{12}	ρ_o	$\rho_{усл.}$		ρ_{12}	ρ_o	$\rho_{усл.}$
Пихта	375	350	300	Ольха	520	490	420

Кедровая сосна	435	410	350	Береза	630	600	500
Осина	495	470	400	Лиственница	660	630	520
Ель	445	420	360	Бук	670	640	530
Сосна	500	470	400	Дуб	690	650	550

Древесинное вещество представляет собой материал клеточных стенок древесины. Плотность древесинного вещества не зависит от породы древесины и равна 1530 кг/м^3 .

Различная плотность, прочность на растяжение, сжатие и скалывание делают процесс резания многообразным.

С увеличением плотности удельная сила резания F_{y0} растет. Зависимость эту для торцового (\perp), продольного ($//$) и поперечного ($\#$) видов резания можно представить прямолинейной (рис. 13). Частные отклонения от такой закономерности указывают на влияние особенностей строения каждой породы.

При расчете сил резания порода древесины учитывается коэффициентами на породу a_n , значения которых приводятся в относительных единицах. При этом коэффициент на породу древесины сосны принят равным единице. Поправочные коэффициенты на породу древесины a_n других пород имеют следующие значения:

Порода	Липа	Осина	Ель	Сосна	Ольха
a_n	0,8	0,85	0,95	1,0	1,05
Порода	Листвен- ница	Береза	Бук	Дуб	Ясень
a_n	1,1	1,25	1,4	1,55	1,75



Рис. 13. Зависимость удельной силы резания от плотности древесины: 1– пихта сибирская; 2– кедр сибирский; 3– осина; 4– липа; 5– ель; 6– сосна; 7– вяз; 8– клен; 9– береза; 10– тис; 11– ясень; 12– лиственница; 13– дуб; 14

Зная поправочные коэффициенты на породу, можно найти касательную силу при резании любой древесины:

$$F_x = F_{xc} a_{п},$$

где F_{xc} – касательная сила резания для сосны.

Касаясь качества обработанных поверхностей, отметим, что древесина более прочных пород обладает большим сопротивлением проникновению в нее лезвия, меньше подвержена трещинообразованию в зоне резания, новые поверхности при ее резании в большей степени формируются режущей кромкой и поэтому получаются более гладкими.

2.3.2. Влияние влажности

В механической технологии используют древесину с влажностью 5...100%. С увеличением влажности до предела насыщения клеточных стенок ($W = 30\%$) прочность древесины при всех видах нагрузений значительно снижается. Наибольшее уменьшение прочности от увлажнения древесины наблюдается при сжатии вдоль волокон и статическом изгибе. Сопротивление резанию тоже убывает.

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

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

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

Касательная сила резания при любой влажности:

$$F_{xw} = a_w F_x,$$

где F_x – касательная сила резания при влажности $W = 10...15\%$.

Увлажнение древесины повышает ее пластические свойства, и это при срезании тонких и средних стружек позволяет достичь процесса резания с хорошим качеством обработанных поверхностей. Однако при резании влажной древесины на обработанной поверхности образуется ворсистость и мшистость.

2.3.3. Влияние температуры

В зимнее время на первичную станочную обработку часто поступает мерзлая древесина. Прочность такой древесины выше, чем не замороженной, так как влага в клетках затвердевает при замораживании и сообщает древесине дополнительную прочность. Максимальная прочность мерзлой древесины наблюдается при ее влажности примерно 85%.

На рис. 14 показана зависимость единичной силы резания от температуры древесины сосны при угле резания 45° и угле заострения 35° [5].

Из графиков видно, что при температуре древесины 0°C , когда влага в клетках превращается в лед и оказывает сопротивление продви-

жению лезвия, касательная сила резания скачкообразно увеличивается. Дальнейшее понижение температуры вызывает заметное увеличение касательной силы резания.

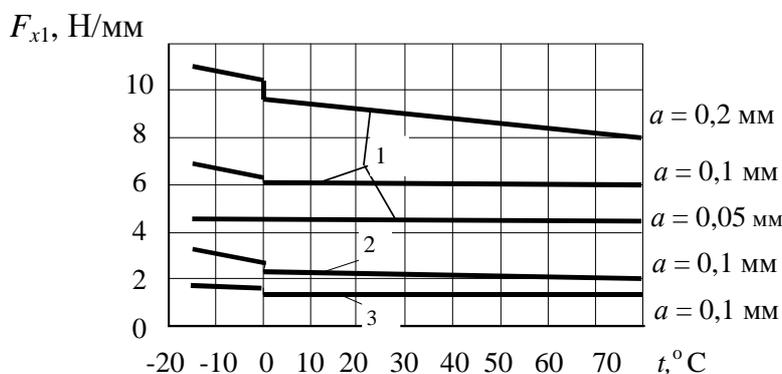


Рис. 14. Влияние температуры на касательную силу резания влажной ($W = 80\%$) сосны:
1 – резание торцовое; 2 – продольное; 3 – поперечное

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

Воздействие высоких температур на влажную древесину вызывает существенное необратимое снижение прочности. Сопротивление резанию при этом понижается.

2.4. Влияние видов резания

Для расчета единичной касательной силы для трех главных видов резания по методике А.Л. Бершадского получены следующие выражения:

$$\begin{aligned}
 F_{x1\perp} &= (A_{\perp} \delta + B_{\perp} V' - B_{\perp}) a + \alpha_{\rho} p_{\perp} = k_{\perp} a + \alpha_{\rho} p_{\perp}; \\
 F_{x1//} &= (A_{//} \delta + B_{//} V' - B_{//}) a + \alpha_{\rho} p_{//} = k_{//} a + \alpha_{\rho} p_{//}; \\
 F_{x1\#} &= (A_{\#} \delta + B_{\#} V' - B_{\#}) a + \alpha_{\rho} p_{\#} = k_{\#} a + \alpha_{\rho} p_{\#},
 \end{aligned} \quad (40)$$

где F_{x1} – касательная единичная сила резания, соответствующая ширине среза 1 мм, Н/мм;

δ – угол резания, град;

a – толщина срезаемого слоя, мм;

V' – условная скорость резания, м/с, причем, если $V < 50$ м/с, то $V' = (90 - V)$, иначе $V' = V$, где V – скорость главного движения. Эмпирические коэффициенты A, B, B, p для древесины сосны приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения эмпирических коэффициентов A и $B, B, МПа,$
и $p, Н/мм^2$ для древесины сосны

A_{\perp}	$A_{//}$	$A_{\#}$	B_{\perp}	$B_{//}$	$B_{\#}^*$
0,550	0,196	0,029	0,196	0,069	0,059 ...0,069
B_{\perp}	$B_{//}$	$B_{\#}$	p_{\perp}	$p_{//}$	$p_{\#}$
19,62	5,40	0,59	4,80	1,57	0,98
* Меньшее значение $B_{\#}$ при $\delta < 55^{\circ}$, большее – при $\delta > 55^{\circ}$.					

Табличные коэффициенты можно пересчитать для переходных видов резания древесины. Если принять, что с переходом резания, например, от продольного к торцовому сопротивление резанию увеличивается пропорционально росту угла перерезания волокон, то можно любой коэффициент для переходного вида резания записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 A_{//-\perp} &= A_{//} + (A_{\perp} - A_{//}) \frac{\varphi_{\delta}}{90}, \\
 A_{\#-\perp} &= A_{\#} + (A_{\perp} - A_{\#}) \frac{\varphi_{\delta}}{90}, \\
 A_{\#-//} &= A_{\#} + (A_{//} - A_{\#}) \left(1 - \frac{\varphi_{\delta}}{90}\right),
 \end{aligned}
 \tag{41}$$

где $\varphi_{\delta}, \varphi_{\delta}, \varphi_{\delta}$ – соответственно углы перерезания волокон, наклона и скоса, град.

При $\varphi_{\delta} = 0^{\circ}$, $A_{//-\perp} = A_{//}$ – резание продольное; при $\varphi_{\delta} = 90^{\circ}$, $A_{//-\perp} = A_{\perp}$ – резание торцовое. Аналогичные выражения можно получить с уче-

том угла наклона для поперечно–торцового резания и угла скоса для поперечно–продольного резания.

По формулам (40) и (41) получены выражения для фиктивной силы резания и касательного давления древесины на переднюю грань при переходных видах резания древесины сосны:

$$\begin{aligned}
 p_{//\perp} &= 1,57 + (4,8-1,57) \varphi_6/90; \\
 p_{//\perp} &= 1,57 + 0,0359 \varphi_6; \\
 p_{#\perp} &= 0,98 + 0,0420 \varphi_n; \\
 p_{#\perp} &= 1,57 - 0,0065 \varphi_c. \\
 k_{//\perp} &= [0,196 + (0,55 - 0,196) \varphi_6/90] \delta + [0,069 + (0,196 - \\
 &- 0,069) \varphi_6/90] V' - [5,4 + (19,62 - 5,4) \varphi_6/90]; \\
 k_{//\perp} &= (0,196 + 0,0039 \varphi_6) \delta + (0,069 + 0,0014 \varphi_6) V' - \\
 &- (5,4 + 0,158 \varphi_6); \\
 k_{#\perp} &= (0,029 + 0,0058 \varphi_n) \delta + (0,069 + 0,0014 \varphi_n) V' - (5,9 + 0,152 \varphi_n); \\
 k_{#\perp} &= (0,196 - 0,00184 \varphi_c) \delta + [0,069 - (0,069 - Б) 0,011 \varphi_c] V' - (5,4 - \\
 &- 0,053 \varphi_c).
 \end{aligned}
 \tag{42}$$

Здесь φ_6 , φ_n , φ_c , δ подставляют в град., V' – в м/с. Кроме того, значение $Б = 0,059$ при $\delta \leq 55$ и $Б = 0,069$ при $\delta > 55$.

Пример. При строгании $\delta = 60^\circ$, $V = 0,5$ м/с, $a = 1$ мм, лезвие острое, порода – сосна, $\varphi_6 = \varphi_n = \varphi_c = 30^\circ$.

Определить k и F_{x1} для главных видов резания, а также p , k и F_{x1} для переходных видов резания.

Решение. По формулам (37) получим $k_{\perp} = k_{//\perp}$ при $\varphi_6 = 90^\circ$ или $k_{\perp} = k_{#\perp}$ при $\varphi_n = 90^\circ$.

$$k_{\perp} = 0,55 \cdot 60 + 0,196(90 - 0,5) - 19,62 = 30,9 \text{ МПа или}$$

$$k_{\perp} = (0,029 + 0,0058 \cdot 90)60 + (0,069 + 0,0014 \cdot 90)89,5 - (5,9 + 0,152 \cdot 90) = 30,9 \text{ МПа};$$

$$k_{//} = k_{//\perp} \text{ при } \varphi_6 = 0^\circ \text{ или } k_{//} = k_{#\perp} \text{ при } \varphi_c = 90^\circ.$$

$$k_{//} = 0,196 \cdot 60 + 0,069(90 - 0,5) - 5,4 = 12,54 \text{ МПа или}$$

$$k_{//} = (0,029 + 0,00186 \cdot 90)60 + 0,069 \cdot 89,5 - (5,9 - 0,0056 \cdot 90) = 12,56 \text{ МПа};$$

$k_{\#} = k_{\#-\perp}$ при $\varphi_n = 0^\circ$ или $k_{\#} = k_{\#-//}$ при $\varphi_c = 0^\circ$.

$k_{\#} = 0,029 \cdot 60 + 0,069(90 - 0,5) - 0,59 = 7,33$ МПа;

$$F_{x1} = \alpha_p p + ka.$$

$$F_{x1\perp} = 1 \cdot 4,8 + 30,9 \cdot 1 = 35,7 \text{ Н/мм},$$

$$F_{x1//} = 1 \cdot 1,57 + 12,54 \cdot 1 = 14,1 \text{ Н/мм},$$

$$F_{x1\#} = 1 \cdot 0,98 + 7,33 \cdot 1 = 8,31 \text{ Н/мм}.$$

По формулам (36) и (37) получим

$$p_{//-\perp} = 1,57 + 0,0359 \cdot 30 = 2,647 \text{ Н/мм},$$

$$p_{\#-\perp} = 0,98 + 0,042 \cdot 30 = 2,24 \text{ Н/мм},$$

$$p_{\#-//} = 1,57 + 0,0065 \cdot 30 = 1,375 \text{ Н/мм};$$

$$k_{//-\perp} = (0,196 + 0,0039 \cdot 30) \cdot 60 + (0,069 + 0,0014 \cdot 30)(90 - 0,5) - (5,4 + 0,158 \cdot 30) = 18,57 \text{ МПа},$$

$$k_{\#-\perp} = (0,029 + 0,0058 \cdot 30)60 + (0,069 + 0,0014 \cdot 30)89,5 - (5,9 + 0,152 \cdot 30) = 11,655 \text{ МПа},$$

$$k_{\#-//} = (0,196 - 0,00184 \cdot 30)60 + 0,069 \cdot 89,5 - (5,4 - 0,053 \cdot 30) = 5,064 \text{ МПа};$$

$$F_{x1//-\perp} = 1 \cdot 2,647 + 18,57 \cdot 1 = 21,2 \text{ Н/мм},$$

$$F_{x1\#-\perp} = 1 \cdot 2,24 + 11,655 \cdot 1 = 13,9 \text{ Н/мм},$$

$$F_{x1\#-//} = 1 \cdot 1,375 + 5,064 \cdot 1 = 6,4 \text{ Н/мм}.$$

2.5. Влияние режущего инструмента

2.5.1. Влияние угла резания

Угол резания определяет положение передней поверхности лез-

вия относительно плоскости резания. При внедрении лезвия в древесину передняя поверхность производит сжатие волокон, сдвиг или изгиб стружки при ее образовании.

Чем больше угол резания, тем сильнее деформируется материал перед лезвием и больше сила

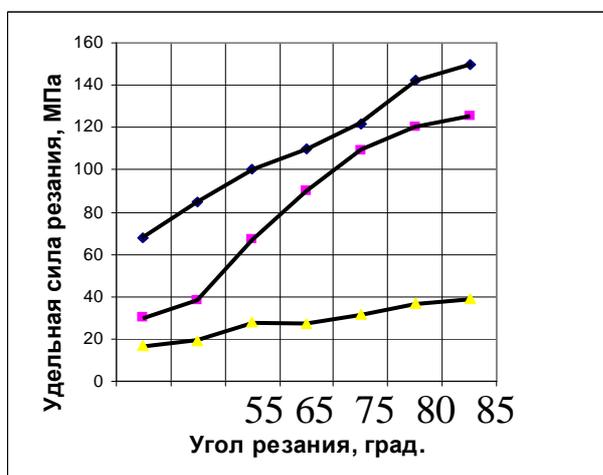


Рис. 15. Влияние угла резания на удельную силу резания по

Е. Кивимаа

(береза, $W=11\%$, $a = 0,1$ мм, $\rho =$

резания. Такая зависимость подтверждается экспериментальными данными (рис. 15). При этом для продольного резания увеличение $F_{y\partial}$ происходит наиболее интенсивно, и связано это с тем, что в данном случае стружка деформируется более сильно. Чем больше угол резания, тем сильнее тонкая стружка закручивается в спираль. На это затрачивается дополнительная работа.

Нормальная сила резания F_{z1} с ростом угла резания увеличивается в сторону отжима, а установившийся процесс резания переходит к неустановившемуся, высота неровностей на обработанной поверхности увеличивается.

2.5.2. Влияние заднего угла

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

С увеличением заднего угла при постоянном угле резания удельная сила резания убывает, так как при этом уменьшаются площадь контакта задней грани с древесиной, нормальное давление на заднюю грань и силы трения (рис. 16). Однако это убывание не может происходить бесконечно. Минимальное значение кривые графиков имеют при $\alpha = 10^\circ$. При дальнейшем увеличении заднего угла теряется жесткость лезвия, тело его ослаблено, режущая кромка выкрашивается, быстро затупляется, возможен даже аварийный износ лезвия. В этом случае силы резания по задней грани из-за износа лезвия возрастают.

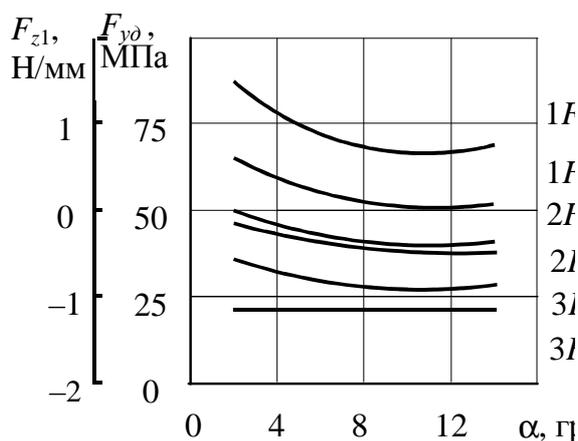


Рис. 16. Зависимость удельной силы и единичной нормальной силы от заднего угла при резании древесины бука:

$W = 10\%$, $a = 0,1$ мм, $\delta = 50^\circ$, $V = 0,1$ м/с, $\rho_0 = 4$ мкм:

1 – торцовое резание; 2 – продольное;

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

Уменьшение сил трения с ростом заднего угла благоприятно сказывается на гладкости обработанных поверхностей. Вырывов, ворсистости и мшистости на поверхностях становится меньше.

2.5.3. Влияние положения лезвия при резании

С целью улучшения условий резания и достижения хорошего результата при обработке древесины широко используют прием смещения главной секущей плоскости P_τ относительно нормальной секущей плоскости P_n (рис. 17). Для этого используют прямое или косое лезвие.

При работе косым лезвием (рис. 17, а) между секущими плоскостями P_n и P_τ создают угол, равный углу наклона режущей кромки λ .

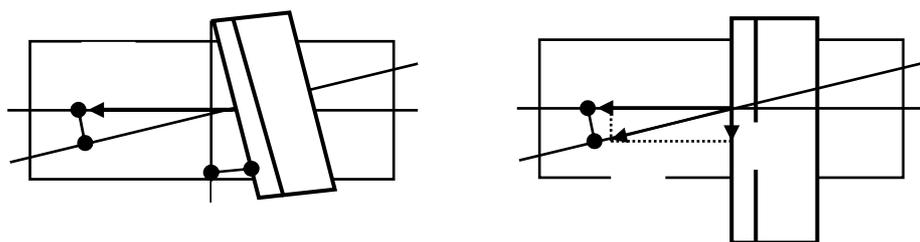


Рис. 17. Положение главной секущей плоскости при резании лезвием: а – косым; б – прямым

При работе прямым лезвием иногда создают касательное рабочее движение со скоростью V_k

(рис. 17, б), которое при одновременном действии главного рабочего движения обеспечивает результирующее рабочее движение со скоро-

стью V_e . В этом случае главная секущая плоскость P_τ пройдет перпендикулярно плоскости резания и параллельно направлению V_e .

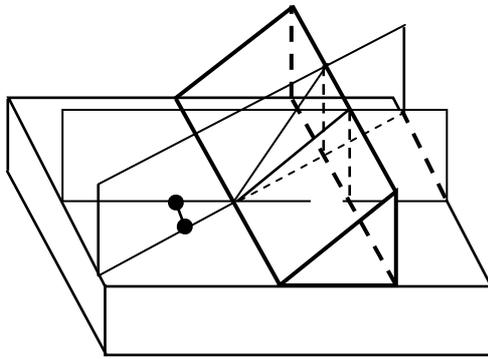


Рис. 18. Изменение угловых параметров лез-

$$\text{tg } \delta_\tau = \cos \lambda \text{tg } \delta_n.$$

Угол λ для прямого лезвия (рис. 17, б) находят из выражения

$$\lambda = \text{arctg } \frac{V_\kappa}{V}. \quad (45)$$

Таким образом, при большом угле резания лезвия в нормальной секущей плоскости можно получить угол резания в главной секущей плоскости сколь угодно малым. Это особенно важно при поперечном резании древесины.

Приведенное доказательство справедливо и для заднего угла лезвия:

$$\text{tg } \alpha_\tau = \cos \lambda \text{tg } \alpha_n. \quad (46)$$

Такое равенство ухудшает условия резания.

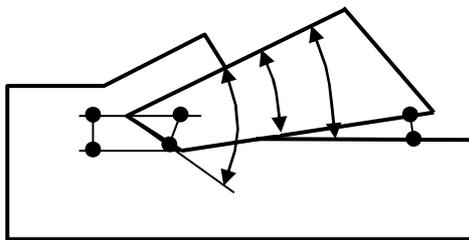


Рис. 19. Резание лез-
вием с отрицательным зад-
ним углом

Изменение углов резания. Отклонение положения главной секущей плоскости относительно нормальной секущей плоскости позволяет уменьшить угол резания. Из рис. 18 следует, что

$$h = \text{oktg } \delta_\tau = \text{odtg } \delta_n.$$

Отсюда

$$\frac{\text{od}}{\text{ок}} = \cos \lambda = \frac{\text{tg } \delta_\tau}{\text{tg } \delta_n}$$

или

$$(44)$$

Для общего случая резания древесины можно сформулировать правило – резание с задним углом $\alpha = 0$ недопустимо.

В некоторых случаях организуют резание с отрицательным задним углом (рис. 19), делая на задней поверхности фаску. В этом случае задняя поверхность лезвия получается ломаной с зад-

ними углами α и α_0 . Угол заострения при режущей кромке

$$\beta_0 = \delta + \alpha_0 > \delta. \quad (47)$$

Величина заглубления h фаски по задней поверхности должна быть не более 0,04 мм.

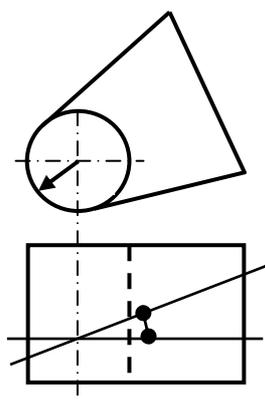


Рис. 20.
Радиус закруг-
ления в секущих
плоскостях

Радиус закругления режущей кромки. На рис. 20 показано сечение цилиндра, условно вписанного в поверхность режущей кромки. Радиус цилиндра в нормальной плоскости равен ρ . В сечении цилиндра главной секущей плоскостью получается эллипс с радиусом кривизны

$$\rho_\tau = \frac{a^2}{b},$$

где $a = \rho_n$ – малая полуось эллипса;

$b = \frac{\rho_n}{\cos \lambda}$ – большая полуось эллипса.

Отсюда

$$\rho_\tau = \frac{\rho_n^2}{\rho_n / \cos \lambda} = \rho_n \cos \lambda. \quad (48)$$

Таким образом, увеличение угла смещения λ главной секущей плоскости относительно нормальной секущей плоскости позволяет уменьшить радиус закругления режущей кромки и повысить период стойкости лезвия.

2.6. Влияние скорости резания

Скорость деформирования древесины меняет ее механические свойства. С увеличением скорости главного движения древесина деформируется в зоне резания в большей степени упруго. Доля пластических деформаций при стружкообразовании сокращается, полная деформация уменьшается, коэффициент трения убывает. Все это должно привести к уменьшению удельной работы резания.

При этом с увеличением скорости резания растет инерционный подпор. Частицы древесины, расположенные в массиве, находятся в покое, но, оказавшись в стружке, за короткий промежуток времени изменяют свою скорость от нуля до скорости резания. Величина силы инерции стружки увеличивается от скорости резания во второй степени. Это должно вызвать увеличение удельной работы резания.

Таким образом, с увеличением скорости резания проявляют себя несколько по-разному действующих явлений.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что с увеличением скорости резания удельная работа резания сначала убывает, а затем возрастает. По данным Н.К. Якунина, при пилении круглыми пилами удельная работа резания имеет минимальное значение при скорости резания 40...60 м/с. При цилиндрическом фрезеровании, по данным М.М. Козела, этот минимум наблюдается при скорости резания 40...55 м/с.

Усредненно принимают, что удельная работа резания имеет минимальное значение при $V = 50$ м/с.

Качество обработанных поверхностей с увеличением скорости резания улучшается. С появлением добавочного к естественному сопротивлению инерционного подпора деформации в древесине не успевают развиваться до образования трещин, и поверхность формируется режущей кромкой лезвия. В результате высота неровностей на поверхности уменьшается. С увеличением скорости резания увеличивается также производительность процесса.

2.7. Влияние размеров среза

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

Ширина среза. Проведенными исследованиями доказано, что, несмотря на неоднородность строения древесины, можно считать силы ре-

зания прямо пропорциональными ширине срезаемого слоя. С учетом ширины срезаемого слоя b формулы для касательных сил резания будут иметь следующий вид:

– для макрослоев

$$F_x = (\alpha_\rho p + ka)b, \quad (49)$$

– для микрослоев

$$F_{x\mu} = [(\alpha_\rho p + 0,1k)(-\frac{1}{\lambda}a^2 + \frac{0,2}{\lambda}a + 1 - \frac{0,01}{\lambda})]b, \quad (50)$$

где λ – коэффициент: $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$. Здесь ρ подставляется в мм.

Толщина среза. Зависимость касательной силы резания от толщины срезаемого слоя описана формулами (49) и (50).

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

при $a \geq 0,1$ мм

$$F_z = [\frac{F_{xz1}}{f} - F_{xn1} \operatorname{tg}(\gamma - \varphi)]b, \quad (51)$$

где $F_{xz1} = (\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{\rho}{(\rho + 50)}$;

$$F_{xn1} = 0,1k_m + k(a - 0,1).$$

$$F_z = [(\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{\rho}{(\rho + 50)f} - [0,1k_m + k(a - 0,1)] \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi)]b; \quad (52)$$

при $a_m < 0,1$ мм

$$F_{zm} = [(\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{\rho}{(\rho + 50)f} - a_m k_m \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi)]b,$$

где φ – угол трения на передней грани лезвия;

f – коэффициент трения на задней грани, $f = \frac{2}{\alpha_\rho^2}$;

$90 - \delta = \gamma$, где γ – передний угол лезвия.

Выражение (50) можно записать в следующем виде:

$$F_z = [(\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{0,5\rho\alpha_\rho^2}{(\rho + 50)} - [0,1k_m + k(a - 0,1)] \operatorname{tg}(\gamma - \varphi)]b. \quad (53)$$

Графически это уравнение изображено на рис. 21.

При толщине срезаемого слоя $a \leq 0,1$ мм радиальная сила равна:
при $\gamma = \varphi$

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

что соответствует точке *B* рис. 21.

С изменением толщины срезаемого слоя нормальная сила резания остается постоянной;

при $\gamma > \varphi$

$$F_{z(\gamma>\varphi)} = [(\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{0,5\rho\alpha_\rho^2}{(\rho + 50)} - k_m a_m \operatorname{tg}(\gamma - \varphi)]b, \text{ (точка } A).$$

Если передний угол $\gamma > \varphi$, то F_z с ростом толщины срезаемого слоя убывает и может получить отрицательное значение и превратиться в силу затягивания;

при $\gamma < \varphi$

$$F_{z(\gamma<\varphi)} = [(\alpha_\rho p + 0,1k) \frac{0,5\rho\alpha_\rho^2}{(\rho + 50)} + k_m a_m \operatorname{tg}(\varphi - \gamma)]b, \text{ (точка } C).$$

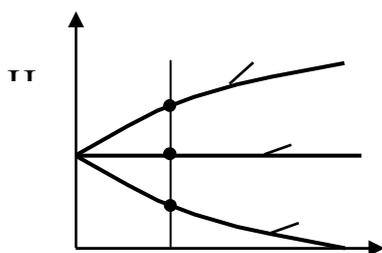


Рис. 21. Зависимость радиальной силы резания от толщины срезаемого слоя

Если $\gamma < \varphi$, то с увеличением толщины среза F_z непрерывно возрастает.

Верхняя и нижняя линии графика кривые, так как с изменением толщины срезаемого слоя угол трения φ тоже изменяется. Совместное решение приведенных уравнений показывает, что линии графика пересекаются в одной точке с координатой $a_m = 0$ мм.

С увеличением толщины срезаемого

слоя во всех случаях резания установившийся процесс резания переходит в неустановившийся. В зоне резания образуются трещины. Качество обработанной поверхности ухудшается.

Выводы. Расчетные формулы с учетом влияния различных факторов можно записать в следующем виде.

Главная составляющая силы резания (касательная сила резания)

– для макрослоев

$$F_x = (\alpha_p p + ka) b a_n a_w, \quad (54)$$

– для микрослоев

$$F_{x\mu} = [(\alpha_p p + 0,1k) \left(-\frac{1}{\lambda} a^2 + \frac{0,2}{\lambda} a + 1 - \frac{0,01}{\lambda} \right)] b a_n a_w. \quad (55)$$

Лекция 3

Пиление круглыми пилами

План лекции. Виды пиления, их предварительная характеристика. Условия формирования пропила. Удельная сила трения, методика ее определения. Условия срезания опилок в различных точках траектории движения зубьев круглой пилы. Периферийная и центральная зоны круглой пилы. Диаметры пилы для работы периферийной или центральной зоной. Период стойкости пилы. Выбор диаметра пилы. Моделирование процесса пиления. Кинематика и динамика процесса продольного пиления. Кинематика и динамика процесса поперечного пиления.

3.1. Общие сведения о технологической операции пиления

3.1.1. Назначение и виды пиления

Пиление древесины на станках может быть продольное, поперечное и смешанное. При продольном пилении плоскость пильного диска параллельна волокнам древесины, а при поперечном – перпендикулярна им. При смешанном пилении плоскость пилы составляет с направлением волокон острый угол (от 5 до 85°).

Продольное пиление дисковыми (круглыми) пилами – самый распространенный процесс обработки древесины. По принципу продольного пиления работают станки, распиливающие бревна или брусья, а также станки обрезные, прирезные, реечные, ребровые и др.

Основную работу при продольном пилении выполняют главные (короткие) режущие кромки зубьев. Они перерезают волокна, формируют дно пропила. Боковые режущие кромки формируют стенки пропила.

Пиление характеризуется большими значениями скорости главного движения (50...70 м/с) и скорости подачи (до 150 м/мин), непрерывностью вращательного движения режущего инструмента. Станки имеют сравнительно простую конструкцию, удобны в экс-

плутации и обладают большими возможностями для автоматизации. Однако на станках часто приходится применять толстые круглые пилы, из-за чего снижается полезный выход пилопродукции и увеличивается объем опилок. Количество опилок достигает 12...16% от объема распиливаемого сырья.

Поперечное пиление используется для прямолинейного поперечного раскроя пиломатериалов на заготовки в столярно-строительном, мебельном и других деревообрабатывающих производствах. Для пиления используются специальные круглые пилы, у которых основную работу по перерезанию древесных волокон выполняют боковые режущие кромки, имеющие косую заточку под углом 40...45°.

3.1.2. Удельная сила трения опилок в пропилах

Формирование пропила. При продольном пилении древесины пилой, например, с плющеными зубьями (рис. 22) режущие кромки имеют длину b и срезают слой древесины шириной b . Из-за упругости древесины боковые стенки образовавшегося пропила после прохода зуба частично восстанавливаются. В результате этого ширина пропила $b_{\text{п}} < b$. Таким образом, срезаемый зубом слой древесины шириной b попадает в узкий пропил шириной $b_{\text{п}}$. Стружка оказывается зажатой с боков стенками пропила.

При дальнейшем движении зуба стружка, преодолевая силы трения по стенкам пропила и передней поверхности зуба, впрессовывается в междузубную впадину, постепенно заполняя ее. Стружка сначала упирается в дно впадины, надламывается, поджимается к передней поверхности следующей за ней стружкой, которая скользит уже по предыдущей стружке.

Объем срезаемого слоя равен $S_z bt$, где S_z – величина подачи на зуб, мм; t – высота пропила (толщина заготовки), мм; b – ширина срезаемого слоя, мм.

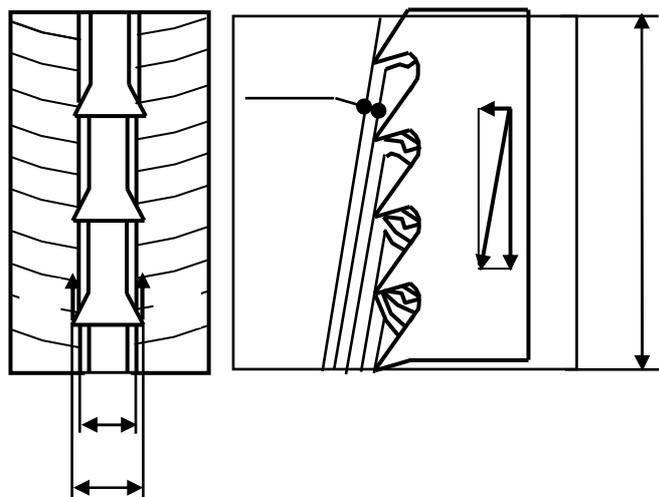


Рис. 22. Схема удаления стружек из пропила: а – упругое восстановление стенок пропила; б – заполнение междузубных

стенки пропила, МПа;

f – коэффициент трения скольжения стружки по стенкам пропила.

Для упрощения обозначим $\alpha = qf$, где α – касательное давление на зуб от трения стружки в пропиле (интенсивность силы трения), МПа. Тогда

$$F_{\text{т max}} = 2\alpha S_z t.$$

Средняя сила трения за проход зуба в заготовке

$$F_{\text{cp}} = \frac{F_{\text{тн}} + F_{\text{т max}}}{2} = \alpha S_z t.$$

Удельная сила трения стружки в пропиле равна отношению средней силы трения к поперечному сечению срезаемого слоя:

$$k_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{cp}}}{S_z b} = \frac{\alpha S_z t}{S_z b} = \alpha \frac{t}{b}. \quad (56)$$

Значения α находят для пил с разведенными α_λ и плющеными α_Δ зубьями (табл. 3).

Таблица 3

Удельная сила трения. В момент врезания зуба в древесину начальная сила трения стружки о стенки пропила $F_{\text{тн}} = 0$. При дальнейшем движении зуба сила трения увеличивается пропорционально боковой поверхности стружки, накопившейся в междузубной впадине. При выходе зуба из пропила сила трения достигает максимальной величины, равной

$$F_{\text{т max}} = 2qS_z t f,$$

где q – нормальное давление стружки на боковые

Касательное давление на зуб пилы от трения стружки в пропи-
ле

α , МПа	Рамные	Ленточ- ные	Диско- вые
α_λ	0,25	0,25	0,70...0, 74
α_Δ	0,2	0,2	0,57...0, 59

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

$$k_{\text{тр}} = \frac{\alpha t}{b}.$$

Методика определения значений интенсивности силы трения α . При открытом цилиндрическом фрезеровании древесины сосны (угол резания $\delta = 60^\circ$, угол перерезания волокон $\varphi = 60^\circ$ и скорость главного движения $V = 40$ м/с), по данным Ф.М. Манжоса, получено уравнение единичной касательной силы резания

$$F_{x1} = p + ka = 3,8 + 16,4a.$$

По данным Н.К. Якунина, при пилении древесины сосны пилой с разведенными зубьями при высоте пропила $t = 40$ мм (остальные условия примерно одинаковые) получено

$$F_{x1\text{пил}} = p_{\text{пил}} + k_{\text{пил}}a = 6,2 + 24,4a.$$

Можно отметить, что $k_{\text{пил}} = 24,4 > k = 16,4$ на 8 МПа. При пилении $k_{\text{пил}}$ больше k на величину $k_{\text{тр}}$, и это отражается в формуле так:

$$F_{x1\text{пил}} = p_{\text{пил}} + (k + k_{\text{тр}})a$$

или

$$F_{x1\text{пил}} = 6,2 + (16,4 + 8)a.$$

Следовательно

$$k_{\text{тр}} = \alpha_{\lambda} \frac{t}{b} = 8 \text{ МПа.}$$

Отсюда

$$\alpha_{\lambda} = \frac{8b}{t}.$$

Для $b = 3,6$ мм и $t = 40$ мм

$$\alpha_{\lambda} = \frac{8 \cdot 3,6}{40} = 0,72 \text{ мм.}$$

Учитывая (56), напишем уравнения для единичной касательной силы резания при пилении одним зубом:

при $a \geq 0,1$ мм

$$F_{x1} = [\alpha_{\rho} p + (k + \frac{\alpha t}{b})a] a_n a_w, \quad (57)$$

при $a \leq 0,1$ мм

$$F_{x1\mu} = [(\alpha_{\rho} p + 0,1(k + \frac{\alpha t}{b}))(-\frac{1}{\lambda} a^2 + \frac{0,2}{\lambda} a + 1 - \frac{0,01}{\lambda})] a_n a_w, \quad (58)$$

где λ – коэффициент: $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$. Здесь ρ подставляется в мм.

3.1.3. Условия работы круглой пилы

По характеру стружкообразования у пилы выделяют две зоны: периферийную (П) и центральную (Ц) (рис. 23). В периферийной зоне угол встречи главной режущей кромки с волокнами древесины меньше угла резания лезвия, $\varphi_{\delta} < \delta$. В центральной зоне $\varphi_{\delta} > \delta$. На границе между зонами $\varphi_{\delta} = \delta$.

Процесс стружкообразования в указанных зонах происходит по-разному.

В периферийной зоне (рис. 23,б) волокна древесины упираются в переднюю грань лезвия, которая сжимает их и изгибает, как консольно закрепленную балку. Изогнутые волокна встречаются затем с главной режущей кромкой, которая надрезает их. Происходит непрерывный изгиб и подрезание волокон. Перед главной режущей кромкой может образоваться опережающая трещина, распространяющаяся

в плоскости волокон в массив. Боковые режущие кромки нагружены меньше, они срезают слой в продольно поперечном направлении.

Непрерывный подпор срезаемого слоя обеспечивает установившийся режим пиления с образованием гладких распиленных по-

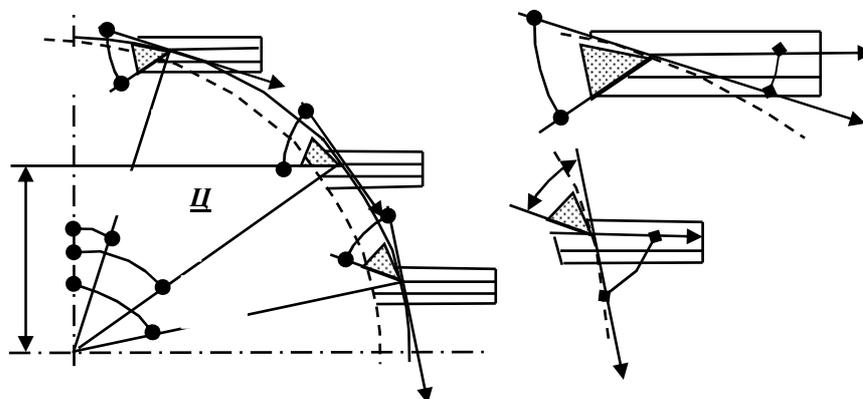


Рис. 23. Условия стружкообразования по зонам пилы:

a – зоны пилы; *б* – условия резания в периферийной зоне; *в* – условия резания в центральной зоне

верхностей.

В граничной зоне угол встречи с волокнами равен углу резания лезвия. Волокна древесины параллельны передней грани лезвия. Срезаемый слой сжимается в поперечном направлении, изгибается, а затем режущая кромка перерезает волокна древесины.

При пилении центральной зоной пилы, главная режущая кромка встречается с волокнами древесины раньше, чем передняя грань. Волокна сначала перерезаются, а затем поступают на переднюю грань, которая подрезанный слой сжимает и изгибает. При этом касательные напряжения в плоскости волокон могут достичь предела прочности, и элементы стружки скалываются. Распиленные поверхности получаются более шероховатыми, чем при работе периферийной зоной пилы.

При пилении центральной зоной угол входа

$$\varphi_{ex} = \varphi_{\delta}; \quad \varphi_{\delta} > \delta; \quad \varphi_{ex} > \delta; \quad \cos \delta > \cos \varphi_{ex} .$$

Из рис. 23, *a* следует, что для граничного случая

$$\cos \varphi_{ex} = \frac{h+t}{R},$$

где h – расстояние от центра пилы до стола, мм;

t – высота пропила, мм;

R – радиус пилы, мм.

Условие резания центральной зоной пилы можно записать так:

$$\cos \delta > \frac{h+t}{R}.$$

Для работы центральной зоной необходима пила диаметром:

для станков с нижним расположением пильного вала

$$D > \frac{2(h+t)}{\cos \delta}, \quad (59)$$

для станков с верхним расположением пильного вала

$$D > \frac{2h}{\cos \delta}. \quad (60)$$

Для работы периферийной зоной стол станка следует поднять над центром пилы на высоту

$$h = R \cos \varphi_{ex2} = R \cos \delta.$$

Тогда при толщине распиливаемой заготовки t радиус пилы будет равен

$$R = h + t + a_1,$$

где a_1 – выступ зубьев пилы из пропила; $a_1 = 10$ мм.

После подстановки значения h получим

$$R(1 - \cos \delta) = t + a_1.$$

Отсюда диаметр пилы при работе периферийной зоной D , мм:

$$D \geq \frac{2(t+a_1)}{1-\cos \delta}. \quad (61)$$

3.1.4. Период стойкости пилы

Периодом стойкости пилы называют время непрерывной работы новой или восстановленной пилы до наступления стойкостного или точностного отказа. Чем больше период стойкости, тем меньше износ лезвий пилы, тем меньше времени тратится на подготовку и установку режущего инструмента на станок, тем выше производительность и качество обработанных поверхностей.

Методы повышения периода стойкости в настоящее время рассматривают главным образом на подсистемном уровне, то есть на уровне подбора состава и структуры металла (стали инструментальные качественные, высококачественные, легированные, быстрорежущие, твердые сплавы и др.). При системном подходе можно найти другие пути повышения периода стойкости, например, во взаимосвязи функционирования подсистем пилы и заготовки.

Известно, что износ лезвий пилы зависит от длины пути контакта зубьев в заготовке. Зубья круглой пилы совершают в заготовке дугообразные траектории (рис. 24).

Заготовку можно расположить относительно центра пилы в положение 1 или 2. Тогда длина дуги контакта зуба пилы с заготовкой будет соответственно AB или $A'B'$. Ясно, что дуга AB длиннее дуги $A'B'$. Если длину дуги контакта обозначить символом l , то за время T между переточками величина затупления режущей кромки зуба будет равна, мкм:

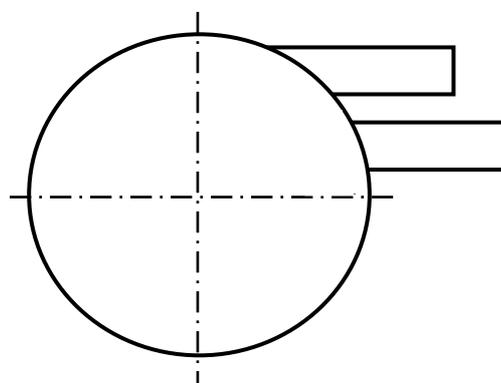


Рис. 24. Расположение пилы относительно за-

$$\Delta\rho = \gamma_{\Delta} l n T K_n K_u / 1000, \quad (62)$$

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

n – частота вращения пилы, мин^{-1} ;

K_n, K_u – соответственно коэффициент производительности и использования станка.

Отсюда следует следующее правило: для увеличения периода стойкости пилы заготовку следует размещать ближе к ее центру.

3.1.5. Выбор диаметра пилы

Пила 1, многолезвийный режущий инструмент (рис. 25, а), крепится на пильном валу станка зажимными фланцами 2 и выполняет главное движение. Заготовка 3, сбазированная по плоскости стола 4,

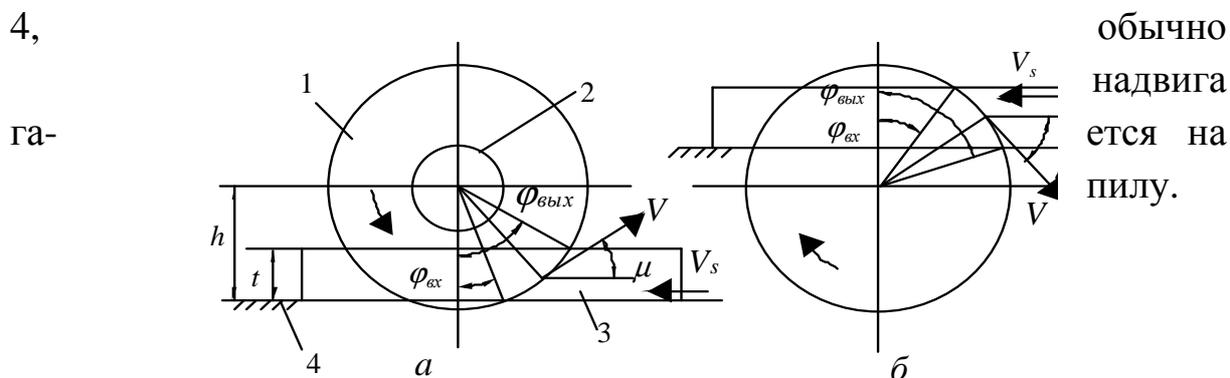


Рис. 25. Продольное пиление дисковой пилой:

а – с верхним расположением пилы; б – с

При выборе диаметра круглой пилы в настоящее время руководствуются требованиями ГОСТ 380-80 и РТМ по определению режимов пиления древесины круглыми пилами [6]. Минимальный диаметр пилы определяют по формуле

$$D_{мин} = 2(t + r_{\phi} + a_1 + a_2), \quad (63)$$

- где t – высота пропила, мм;
- r_{ϕ} – радиус зажимных фланцев, мм;
- a_1 – зазор между зажимным фланцем и заготовкой, мм;
- a_2 – выступ пилы из пропила, мм.

Рекомендуемое ГОСТ 980–80 соотношение между диаметром пил и диаметром зажимных фланцев приведено ниже

Диаметр пилы, мм:	16	4	5	90		
	0...360	00...500	60...800	0...1000	250	500
Диаметр фланцев, мм:	10	1	1	20		
	0	25	60	0	40	00

Зазор a_1 принимают для станков с нижним расположением пилы $(5 + C)$ мм, где C – толщина стола; для станков с верхним расположением пилы – 10 мм; для бревнопильных – более 15 мм.

Минимальный диаметр пилы увеличивают на 100 мм ($D < 710$ мм) или 200 мм ($D > 710$ мм) для переточек и округляют в большую сторону до стандартного значения.

Минимальный диаметр пилы затем увеличивают для переточек на 100 мм ($D < 700$ мм) или на 200 мм ($D > 700$ мм) и округляют в большую сторону до стандартного значения.

Выбранная таким образом пила работает периферийной зоной. В этом случае пила физически может распилить заготовку, но это не оптимальный вариант пиления, так как дуги контакта зубьев с заготовкой имеют большую длину. Это неблагоприятные условия для работы пилы. Для увеличения периода стойкости пила должна работать центральной зоной.

Пример. Дано: станок с верхним расположением пильного вала, толщина распиливаемой заготовки $t = 40$ мм, диаметр зажимных фланцев $D_\phi = 125$ мм. Определить минимальный диаметр пилы.

Решение. 1. По требованию ГОСТ 980-80

$$D_{\min} = 2(t + r_\phi + a_1 + a_2) = 2(40 + 0,5 \cdot 125 + 10 + 5) = 235 \text{ мм.}$$

2. По формуле (60) при

$$h = 40 + 0,5 \cdot 125 + 10 = 112,5 \text{ мм,}$$

$$D_{\min} = \frac{2h}{\cos \delta} = \frac{2 \cdot 112,5}{\cos 55} = 394 \text{ мм.}$$

Таким образом, для работы центральной зоной требуется пила большего диаметра. В периферийной зоне пилы дуги контакта зубьев с заготовкой длинные, в центральной зоне короче. При этом, чем больше диаметр пилы, тем короче дуги контакта, тем меньше износ и затупление зубьев.

3.1.6. Моделирование процесса пиления

Из вышесказанного следует, что для пиления древесины предпочтительнее брать пилу большего диаметра. В этом случае умень-

шаются длины дуг контакта зубьев с заготовкой. Однако с увеличением диаметра пилы резание приближается от продольного к торцовому, увеличивается угол перерезания волокон. Это приводит к росту значений фиктивной силы резания и касательного давления срезаемого слоя на переднюю поверхность зуба. Энергозатраты на резание должны увеличиться. Таким образом, в процессе резания наблюдается действие двух противоположно влияющих факторов: с одной стороны – уменьшение длин дуг контакта, уменьшение износа и затупления, а с другой – увеличение энергозатрат. Конечный результат совместного действия этих факторов пока неочевиден.

Исследование задачи можно выполнить методом математического моделирования процесса пиления на модели станка с верхним расположением пильного вала.

Условия пиления: мощность электродвигателя главного движения $P = 5,5$ кВт, КПД – 0,9, диаметры пил 255 - 295 - 335 - 375 - 415 - 455 - 495 мм, число зубьев 48, толщина дисков 2,8 мм, ширина пропила 4 мм, зубья разведены, диаметр зажимных фланцев 125 мм, частота вращения пил 2850 мин^{-1} , порода заготовок сосна, влажность 15% высота пропила 32, 40, 50 мм.

Расчет выполнялся по методу А.Л. Бершадского с использованием выше приведенных формул. Результаты расчетов представлены на рис. 26 и в табл. 4.

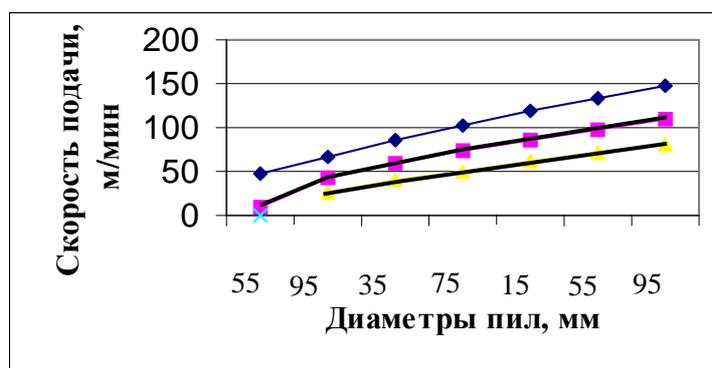


Рис. 26. Зависимость скорости подачи станка от

Таблица 4

Зависимость величины затупления и коэффициента затупления от диаметра пил и высоты

пропила

Высота пропи-ла, мм	Диаметры пил, мм						
	255	295	335	375	415	455	495
	Величина затупления режущей кромки $\Delta\rho$, мм						
32	28,06	22,44	17,43	14,47	12,47	11,0	9,85
40	39,91	26,33	20,65	17,30	14,98	13,27	11,93
50	-	30,35	24,26	20,50	17,87	15,90	14,35
	Величина коэффициента затупления $\alpha\rho$						
32	1,60	1,48	1,38	1,31	1,27	1,24	1,21
40	1,85	1,59	1,45	1,37	1,32	1,29	1,26
50	-	1,65	1,52	1,44	1,39	1,35	1,31

Результаты исследований показывают, что с увеличением диаметра пил износ и затупление зубьев уменьшается, и это позволяет работать на станке с большей скоростью подачи, с большей производительностью. Использование пил большего диаметра при одном и том же электродвигателе механизма главного движения позволяет увеличить максимально допустимую скорость подачи.

3.2. Кинематика пиления

Принципиальные кинематические схемы пиления. Процесс пиления древесины круглыми пилами основан на сочетании двух одновременно действующих равномерных движений – главного вращательного и движения подачи прямолинейного поступательного (рис. 27). Пила, установленная на горизонтальном валу, может взаимодействовать с заготовкой нижней частью диска, когда вал расположен над столом станка (см. рис. 25, а), или верхней частью диска при расположении пильного вала под столом (см. рис. 25, б). Кроме того, пилу можно вращать в направлении движения часовой стрелки или против часовой стрелки. При этом в зоне пиления проекция вектора скорости главного движения на направление подачи будет встречной или попутной к вектору скорости подачи.

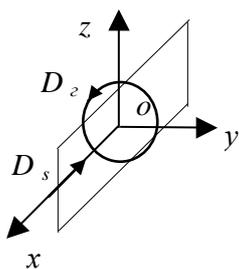


Рис. 27. Схема пиления круглыми пилами

Указанные варианты обусловили создание круглопильных станков, работающих по одной из следующих кинематических схем:

–с нижним расположением пилы и встречной подачей;

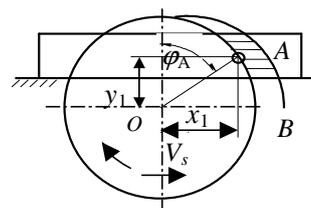
– с нижним расположением пилы и попутной подачей;

–с верхним расположением пилы и встречной подачей;

–с верхним расположением пилы и попутной подачей.

Траектории резания и подачи. Движение зуба пилы в древесине происходит одновременно по окружности (главное движение) и по прямой линии (движение подачи).

Рис. 28. Схема для расчета траектории резания



При угловой частоте ω во времени T можно записать в виде:

$$\begin{cases} x_1 = R \sin \varphi_A = R \sin \omega T, \\ y_1 = R \cos \varphi_A = R \cos \omega. \end{cases} \quad (64)$$

Параметрические уравнения движения подачи:

$$x_2 = V_s T, \quad y_2 = 0. \quad (65)$$

Параметрические уравнения результирующего движения:

$$\begin{cases} x = x_1 + x_2 = R \sin \omega T + V_s T; \\ y = y_1 + y_2 = R \cos \omega T. \end{cases} \quad (66)$$

Это уравнение циклоиды. Математическое описание траектории резания:

$$x = \sqrt{R^2 + y^2} + \frac{S_z z}{2\pi} \arccos(y/R). \quad (67)$$

Скорости движений. Скорость главного движения V , м/с:

$$V = \pi D n / 60000, \quad (68)$$

где D – диаметр пилы, мм;

n – частота вращения пильного вала, мин^{-1} .

Скорость подачи V_s , м/мин:

$$V_s = S_z z n / 1000, \quad (69)$$

где z – количество зубьев пилы;

S_z – подача на зуб, мм.

Скорость резания V_e вычисляют как геометрическую сумму скоростей V и V_s :

$$V_e = \sqrt{V^2 + V_s^2 + 2V V_s \cos \mu},$$

где μ – угол подачи, град.

Геометрия срезаемого слоя. Границы контакта пилы с заготовкой можно выразить углом входа $\varphi_{\text{вх}}$ зубьев в заготовку и углом выхода $\varphi_{\text{вых}}$ (см. рис. 25, а, б). Расчетные формулы для определения этих углов приведены в табл. 5.

Угол контакта зуба пилы с заготовкой

$$\varphi_k = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}}. \quad (70)$$

Средний угол на дуге контакта $\varphi_{\text{ср}}$, равный углу подачи μ :

$$\varphi_{\text{ср}} = \mu = (\varphi_{\text{вх}} + \varphi_{\text{вых}}) / 2. \quad (71)$$

Длина срезаемого слоя l вычисляется как длина дуги контакта.

Выражая φ_k в радианах или в градусах, получим соответственно

$$l = R \varphi_k \quad \text{или} \quad l = \pi D \varphi_k / 360^\circ. \quad (72)$$

Таблица 5

Значения углов $\varphi_{\text{вх}}$ и $\varphi_{\text{вых}}$ при встречной и попутной подачах

Положение пилы	Подача встречная		Подача попутная	
	$\varphi_{\text{вх}}$	$\varphi_{\text{вых}}$	$\varphi_{\text{вх}}$	$\varphi_{\text{вых}}$
Верхнее	$\arccos \frac{h}{R}$	$\arccos \frac{h-t}{R}$	$\arccos \frac{h-t}{R}$	$\arccos \frac{h}{R}$
Нижнее	$\arccos \frac{h+t}{R}$	$\arccos \frac{h}{R}$	$\arccos \frac{h}{R}$	$\arccos \frac{h+t}{R}$

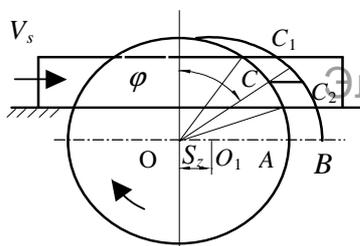


Рис. 29. Размеры срезаемого слоя

Толщина срезаемого слоя. При пилении предыдущий зуб (рис. 29) движется в заготовке по траектории CA , а соседний зуб – по траектории C_1B . Вторая траектория отодвинута от первой в направлении подачи на величину S_z , ее центр находится в точке O_1 . Отрезок $AB = CC_2 = S_z$. Толщина среза на дуге контакта при встречной подаче постоянно увеличивается и достигает максимального значения на выходе зуба из древесины. Толщина срезаемого слоя есть наименьшее расстояние между смежными траекториями. Приняв фигуру CC_1C_2 за прямоугольный треугольник, получим, что толщина среза $a = CC_1 = S_z \sin \varphi$, где φ – угол положения зуба на дуге контакта.

Среднее значение толщины среза a_c , мм, на дуге контакта для плюсовых и разведенных зубьев:

$$a_c = S_z \sin \mu \frac{b}{b_n}. \quad (73)$$

3.3. Динамика продольного пиления

Удельную силу резания при продольном пилении определяют по следующим формулам:

при $a_c \geq 0,1$ мм

$$F_{y\partial} = a_n a_w a_g \left[\frac{\alpha_\rho P}{a_c} + k + \frac{\alpha t}{b} \right], \quad (74)$$

при $a_c < 0,1$ мм

$$F_{y\partial} = a_n a_w a_g \frac{F_{x1}}{a_c}, \quad (75)$$

где a_n – коэффициент учета породы древесины;

a_w – коэффициент учета влажности;

a_g – коэффициент вида пиления (встречное $a_g = 1$, попутное $a_g = 1,1$);

F_{x1} – единичная касательная составляющая силы резания,

Н;

α_ρ – коэффициент затупления

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_{\rho}}{\rho_0 + 50}.$$

Фиктивная сила резания при пилении сосны p , Н/мм:

$$p = 3,924 + 0,0353 \varphi_6.$$

Касательное давление стружки на переднюю поверхность зуба для продольно-торцового резания древесины сосны, МПа:

$$k = (0,196 + 0,00392 \varphi_6) \delta + (0,0686 + 0,00147 \varphi_6) V' - (5,39 + 0,147 \varphi_6),$$

где φ_6 – угол встречи режущей кромки с волокнами, град, при продольном пилении принимают $\varphi_6 = \varphi_{cp} = \mu$;

δ – угол резания зуба, град;

V' – условная скорость резания, м/с, причем если $V < 50$ м/с, то $V' = (90 - V)$, иначе $V' = V$, где V – скорость главного движения.

Касательная сила резания при пилении одним зубом $F_{x \text{ зуб}}$, Н:

$$F_{x \text{ зуб}} = F_{y\delta} a_c b_{\lambda}, \quad (76)$$

для макрослоев ($a \geq 0,1$ мм)

$$F_{x \text{ зуб}} = a_n a_w a_6 [\alpha_{\rho} p + (k + \frac{\alpha t}{b}) a_c] b_{\lambda}, \quad (77)$$

для микрослоев ($a \leq 0,1$ мм)

$$F_{x \text{ зуб } m} = a_n a_w a_6 [\alpha_{\rho} p + 0,1(k + \frac{\alpha t}{b})] (-\frac{1}{\lambda} a_c^2 + \frac{0,2}{\lambda} a_c + 1 - \frac{0,01}{\lambda}) b_{\lambda}, \quad (78)$$

где λ – коэффициент: $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$; здесь радиус закругления режущих кромок лезвий подставляется в мм; $\rho = \rho_0 + \Delta\rho$.

В пропиле находится несколько зубьев, поэтому средняя касательная сила резания за оборот пилы (окружная сила резания) будет

$$F_x = F_{x \text{ зуб}} \frac{l}{t_3}.$$

(79)

Мощность пиления P , кВт:

$$P = \frac{F_x V}{1000} \quad (80)$$

При решении обратных задач из формул (77), (78) находят значение средней толщины срезаемого слоя:

При $a_c \geq 0,1$ мм

$$a_c = \frac{\left(\frac{F_{xzy\bar{b}}}{a_n a_w a_b b_l} - \alpha_\rho p\right) b}{(kb + \alpha t)} \quad (81)$$

Обозначим

$$m = \frac{F_{xzy\bar{b}}}{a_n a_w a_b b_l d},$$

где $d = \left[\alpha_\rho p + 0,1\left(k + \frac{\alpha t}{b}\right)\right]$.

Выражение (78) приводим к полному квадратному уравнению, после решения которого получим: если $m \leq 1$, то толщина срезаемого слоя a_{cm} для микрослоев ($a_c \leq 0,1$ мм) равна

$$a_{cm} = \frac{1}{2} \left[\left(0,2 + \frac{\alpha t \lambda}{bd}\right) - \sqrt{\left(0,2 + \frac{\alpha t \lambda}{bd}\right)^2 - 4[0,01 + \lambda(m-1)]} \right], \quad (82)$$

где $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$; $\rho = \rho_o + \Delta_\rho$; ρ – в мм.

Радиальная составляющая силы резания F_z , Н:

при $a_c \geq 0,1$ мм

$$F_z = \left[0,5\alpha_\rho^2 \left(\alpha_\rho p + 0,1\left(k + \frac{\alpha t}{b}\right)\right) \frac{\rho}{\rho + 50} - (a_c - 0,1)\left(k + \frac{\alpha t}{b}\right) \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi)\right] a_n a_w a_b b_l \frac{l}{t_3}, \quad (83)$$

при $a_c < 0,1$ мм

$$F_z = a_n a_w a_b b_l \frac{l}{t_3} 0,5\alpha_\rho^2 \left[\alpha_\rho p + 0,1\left(k + \frac{\alpha t}{b}\right)\right] \frac{\rho}{\rho + 50}.$$

(84)

3.4. Выбор параметров режима
дольного пиления

про-

При выборе параметров режима пиления круглой пилой следует учитывать, что чрезмерное увеличение частоты вращения, а также уменьшение толщины диска негативно сказывается на работе пилы. Допустимые их значения берутся по справочной таблице или рассчитываются. Скорость главного движения пилы принимают 40...80 м/с.

С увеличением скорости главного движения мощность на пиление возрастает.

С увеличением скорости подачи удельная сила резания убывает, а касательная сила и мощность резания возрастают.

С увеличением шага зубьев мощность на пиление убывает, так как в пропиле находится меньшее количество зубьев. Для снижения мощности можно использовать пилы с укороченными зубьями. Для этого у пилы зубья 2 и 3, 5 и 6, 8 и 9 и т.д. по отношению к зубьям 1, 4, 7 и т.д. делают короче на 1,5...2,0 мм. Выступающие зубья срезают толстые слои, что приводит к уменьшению удельной силы и мощности резания. Укороченные зубья подчищают стенки пропила. Уширение пропила для всех зубьев делается одинаково.

Применение пил с укороченными зубьями позволяет, по данным А.Л. Бершадского, сократить потребление энергии на 25...35 %.

3.5. Поперечное пиление дисковыми пилами

При поперечном пилении древесины основную работу по перерезанию волокон выполняют боковые режущие кромки и вершины зубьев. Передние грани зубьев отжимают перерезанные волокна от стенки пропила и скалывают их. Для этого зубья делают с боковой косой заточкой.

Передний угол косой заточки принимается 25...30° для пиления мягкой древесины и 10...15° – для твердой древесины.

Расчет минимально возможного диаметра пилы D_{min} , мм, ведут по формулам:

для станков с прямолинейным движением подачи

$$D_{min} = 2(t + r_{\phi} + a_1 + a_2); \quad (85)$$

для балансирно-педальных станков

$$D_{min} = 2(\sqrt{(B - C)^2 + (r_{\phi} + a_1 + t)^2} + a_2); \quad (86)$$

для маятниковых станков

$$D_{\min} = 2(\sqrt{(B - C)^2 + (r_{\phi} + a_1 + t)^2} - L_m + a_2), \quad (87)$$

где t – высота пропила, мм;

r_{ϕ} – радиус зажимных фланцев, мм;

a_1 – зазор между зажимным фланцем и заготовкой, мм;

a_2 – выступ пилы из пропила, мм;

B – ширина распиливаемого материала, мм;

C – расстояние от опорной линейки до вертикали, проходящей через центр пилы (при крайнем верхнем положении пилы для балансирно-педальных станков или при вертикальном положении маятника для маятниковых станков), мм;

L_m – длина маятника, мм.

Величина припуска на переточку пилы, а также размеры зажимных фланцев принимаются такими же, как для пил продольного пиления.

Кинематические соотношения. Кинематические соотношения при поперечном пилении круглыми пилами аналогичны соотношениям при продольном пилении.

Скорость главного движения рекомендуется назначать 40...75 м/с, если при этом частота вращения пильного вала не превышает максимально допустимой величины.

Силы и мощность резания. Удельную силу резания $F_{y\partial}$, МПа, определяют по формуле

$$F_{y\partial} = k + \frac{\alpha_{\rho} p}{S_z}.$$

Значения p и k , МПа, в зависимости от породы древесины приведены ниже:

сосна – $p = 1$ Н/мм; береза – $p = 1,2$ Н/мм;

дуб – $p = 1,5$ Н/мм;

сосна $k = 60,76 - 13,72b + (0,41 - 0,0059\gamma)\beta_1$;

береза $k = 78,4 - 17,64b + (0,568 - 0,0078\gamma)\beta_1$;

дуб $k = 98,1 - 21,58b + (0,687 - 0,0098\gamma)\beta_1$,

где b – ширина пропила, мм;

γ – передний угол, град;

β_1 – угол заточки боковой кромки.

Средние силы резания, Н, при поперечном пилении древесины:

касательная

$$F_x = F_{y0} b t V_s / (60V); \quad (88)$$

радиальная

$$F_z = (0,2 \dots 2,7) F_x. \quad (89)$$

Меньшее значение F_z соответствует пиленю острыми зубьями, большее – затупленными зубьями.

Контрольные вопросы и задания

1. Пиление классифицируют по виду главного движения резания, типу пилы и ориентации пилы относительно волокон древесины. Назовите виды пиления.
2. Поясните, какие сопротивления возникают при удалении опилок из пропила. Напишите уравнение, учитывающее это сопротивление.
3. У пилы выделяют две зоны – периферийную и центральную. Поясните условия срезания стружек в этих зонах.
4. Как находится диаметр пилы для работы периферийной и центральной зонами пилы?
5. Дайте определение понятия "период стойкости". Зависит ли величина периода стойкости от работы периферийной или центральной зон пилы?
6. Как выбирается диаметр пилы?
7. Изобразите принципиальные кинематические схемы пиления круглыми пилами. Перечислите возможные схемы пиления.
8. Напишите формулы для расчета скоростей главного движения и подачи.
9. Напишите уравнение для средней толщины срезаемого слоя.
10. Напишите формулы для определения главной составляющей силы резания при пилении одним зубом.
11. Напишите уравнение для определения окружной касательной силы резания и мощности на пиле.
12. Дайте общую характеристику процесса поперечного пиления древесины.

Лекция 4

Расчет режимов резания

План лекции. Определение режима резания древесины. Параметры режима резания. Критерии, критериальные ограничения. Рациональный режим резания. Методология решения обратных задач. Примеры решения задач по пилению и цилиндрическому фрезерованию древесины. Графики скоростей подач.

4.1. Режимы резания

4.1.1. Понятие о режиме резания

Режимом резания называется состояние технологической системы, которое характеризуется совокупностью числовых значений параметров процесса резания, относящихся к древесине, режущему инструменту и станку, от которых зависят технико-экономические показатели.

Технологическая система резания древесины состоит из трех подсистем: заготовки, режущего инструмента и станка. Каждая подсистема характеризуется своим набором параметров (см. лекцию 2). Совокупность числовых значений необходимых параметров всех подсистем характеризует некоторый режим резания, например, порода древесины сосна, древесина мерзлая ($t = -10^{\circ}\text{C}$), влажность 9%, лезвие выполнено из стали 85ХФ, радиус закругления режущей кромки 15 мкм, угол заострения 50° , угол резания 65° , скорость главного движения 50 м/с, скорость подачи 20 м/мин.

Из параметров подсистем можно сформировать множество режимов резания. Изменение численного значения хотя бы одного из параметров делает режим резания другим. Таким образом, для обработки деталей с заданной формой, размерами и гладкостью можно подобрать много разнообразных режимов резания. Все они обеспечат

обработку деталей. Но для производства важно не просто обработать детали, а обработать их с наименьшими затратами материалов, электроэнергии, труда.

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

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

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

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

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

4.1.2. Оптимальные режимы резания

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

Другие главные параметры - шероховатость обработанной поверхности, мощность электродвигателя механизма главного движения, производительность по вместимости междузубных впадин пил, устойчивость пилы и др. – рассматривают как ограничивающие параметры, или ограничения критериев качества.

Критерии качества служат показателями совершенства, прогрессивности режима резания. Они позволяют выбрать наилучший вариант режима резания из альтернативных. За критерий качества можно принять любой параметр процесса резания, по которому можно судить о достоинствах режима резания. К критериям предъявляется лишь одно требование: монотонная связь с качеством. Это значит, чем

меньше (больше) критерий, тем лучше. Например, чем больше производительность, меньше энергоемкость процесса, меньше шероховатость и себестоимость, тем лучше режим резания.

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

$$(90) \quad a \leq \Phi_1, \quad P \leq \Phi_2, \quad \Pi \leq \Phi_3, \quad R_m \leq \Phi_4,$$

где a – толщина срезаемого слоя;

P – мощность механизма резания;

Π – производительность;

R_m – шероховатость обработанной поверхности;

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

Каждое критериальное ограничение назначается по условию – это худшее значение критерия, на которое согласен расчетчик.

Наилучшим набором параметров процесса резания будем считать тот набор, для которого все критерии одновременно принимали бы наименьшие значения в пределах их ограничений. Режим резания при таком наборе параметров называется рациональным.

Рациональным является тот вариант режима резания, при котором рассчитанные или выбранные значения режимных параметров удовлетворяют следующим условиям: а) практически могут быть реализованы на деревообрабатывающих станках; б) удовлетворяют требованиям всех критериальных ограничений; в) наиболее полно позволяют достичь максимальных или минимальных значений оптимизируемых параметров.

4.1.3. Общие рекомендации к расчету рациональных режимов резания

Для расчета рациональных режимов резания предпочтительнее решать обратную задачу с построением графика скоростей подач. Методику расчета обратной задачи можно использовать как при эксплуатации действующих станков, так и при проектировании новых станков.

Главным исходным параметром в задаче является мощность двигателя механизма главного движения. Для действующего станка мощность двигателя известна. Для проектируемого станка мощность электродвигателя назначается с учетом мощности двигателей аналогов. Если расчетные значения скоростей подач получаются выше допустимых, то мощность двигателя уменьшается и делается перерасчет скоростей подач.

4.2. Расчет режимов резания ленточнопильного станка

Дано. На ленточнопильном станке с механической подачей распиливаются сосновые заготовки влажностью $W > 30\%$ и толщиной 32; 40; 50; 60 мм. Диаметр шкивов $D = 800$ мм, расстояние между их центрами $L = 1250$ мм, частота вращения шкивов $n = 1000$ мин⁻¹. Время работы пилы $T = 120$ мин, касательное давление стружки от трения в пропиле $\alpha_\lambda = 0,25$ МПа. Установленная мощность механизма главного движения $P = 3$ кВт, КПД привода $\eta = 0,92$. Шероховатость поверхности пиломатериалов не более $R_{m\ max} = 400$ мкм по ГОСТ 7016-82.

Определить скорости подач, построить график скоростей подач.

Решение. 1. Выбираем критерии оценки режима резания и их ограничения:

– шероховатость распиленных поверхностей

$$R_{m\ max} \leq 400 \text{ мкм};$$

– подача на зуб по производительности пиления

$$S_{z2} \leq t_3^2 / (6t);$$

– мощность двигателя главного движения не более 3 кВт;

– допускаемая касательная сила резания одним зубом

$$F_{хдзуб} \leq 0,9F_{кр}t_3 / t,$$

где $F_{кр}$ – критическая сила растяжения пилы, Н;

– допустимая нормальная сила резания

$$F_{з\partial з\ddot{y}б} \leq 0,9 F_{зкк} t_3 / t;$$

– точность размеров должна соответствовать 17-му качеству.

2. Выбираем пилу ленточную столярную 3405-0025 по ГОСТ 6532-77 (прил. табл. 1): ширина пилы $B = 40$ мм; толщина полотна $S = 0,8$ мм; шаг зубьев $t_3 = 10$ мм; передний угол лезвия $\gamma = 5^\circ$, $\beta = 5^\circ$.

Ширина пропила с разведенными зубьями

$$b = S + 2S' = 0,8 + 2 \cdot 0,5 = 1,8 \text{ мм.}$$

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

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

Результаты расчетов сведены в табл. 6.

3. Подача на зуб по производительности пиления

$$S_{z2} = t_3^2 / (6t) = 10^2 / (6 \cdot 32) = 0,52 \text{ мм.}$$

4. Скорость главного движения

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

5. Касательная сила резания одним зубом

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

Таблица 6

Результаты расчетов режимов пиления

Рассчитываемый параметр	Обозначение	Размерность	Высота пропила t , мм			
			40	50	60	100
Ширина пропила	b	мм	1,8	1,8	1,8	1,8
Подача на зуб:						
по шероховатости	S_{z1}	мм	0,64	0,64	0,64	0,64
по производительности	S_{z2}	мм	0,52	0,42	0,33	0,28

Скорость резания	V	м/с	41,87	41,87	41,87	41,87
Сила резания одним зубом	$F_{хзуб}$	Н	20,6	16,5	13,2	11,0
Фиктивная сила резания	p	Н/мм	7,06	7,06	7,06	7,06
Касательное давление	k	МПа	36,58	36,58	36,58	36,58
Величина затупления лезвий	$\Delta\rho$	мкм	1,56	1,95	2,38	2,92
Коэффициент затупления	$\alpha\rho$	—	1,04	1,05	1,06	1,07
Подача на зуб по мощности привода	S_{z3}	мм	0,3	0,23	0,17	0,12
Допускаемая касательная сила на одном зубе	$F_{хдзуб}$	Н	101,6	81,3	65,0	54,2
Подача на зуб по устойчивости пилы от $F_{хдзуб}$	S_{z4}	мм	1,87	1,53	1,26	1,08
Допускаемая нормальная сила на одном зубе	$F_{здзуб}$	Н	10,3	8,3	6,6	5,5
Подача на зуб по устойчивости пилы от $F_{здзуб}$	S_{z5}	мм	1,31	1,02	0,78	0,62
Подача на зуб по точности пиления	S_{z6}	мм	0,84	0,80	0,76	0,72
Подача на зуб расчетная (минимальная)	S_{zp}	мм	0,30	0,23	0,17	0,12
Оптимальная скорость подачи	V_s	м/мин	75,0	56,6	41,6	31,0

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

7. Касательное давление стружки на переднюю грань зуба
 $k = 0,55\delta + 0,196V_1 - 19,6 = 0,549 \cdot 85 + 0,196(90 - 41,87) - 19,6$
 $= 36,58$ МПа.

8. Величина затупления режущих кромок зубьев, мкм

$$\Delta\rho = \gamma_{\Delta} \frac{tnTk_n k_u}{1000(1 + 2L/\pi D)} = \frac{0,001 \cdot 32 \cdot 1000 \cdot 120 \cdot 0,9 \cdot 0,9}{1000(1 + 2 \cdot 1250 / (3,14 \cdot 800))} = 1,56.$$

9. Коэффициент затупления

$$\alpha\rho = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta\rho}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{36,58}{7,06}) \frac{1,56}{10 + 50} = 1,04.$$

10. Подача на зуб по мощности привода при длине режущей кромки лезвия $b_l = S = 0,8$ мм, коэффициентах на породу и влажность соответственно $a_n = 1$, $a_w = 0,89$

$$S_{z3} = \frac{\left(\frac{F_{хзз\text{у}}}{a_n a_w b_l} - \alpha_{\rho p}\right) b_l}{(kb + \alpha)} = \frac{\left(\frac{34,3}{1 \cdot 0,89 \cdot 0,8} - 1,04 \cdot 7,06\right) 0,8}{(36,58 \cdot 1,8 + 0,25 \cdot 32)} = 0,57 \text{ мм.}$$

11. При критической касательной силе резания пила начинает вибрировать и теряет устойчивость. Поэтому расчетная сила резания должна быть меньше критической.

Критическая касательная сила резания, по данным А.Е. Феоктистова (ЦНИИМОД), при ширине пилы $B_1 = 40$ мм, толщине полотна пилы $S = 0,8$ мм, допуске напряжении в пиле 30 МПа и расстоянии между шкивами $L = 1250$ мм вычисляется по формуле

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

$$= 10^6 \cdot 0,8^3 (0,82 + 0,002 \cdot 40) (0,95 + 0,001 \cdot 30) / 1250 = 361 \text{ Н.}$$

12. Допускаемая касательная сила резания одним зубом

$$F_{хдзуб} = 0,9 F_{кр} t_z / t = 0,9 \cdot 361,3 \cdot 10 / 32 = 101,6 \text{ Н.}$$

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

$$S_{z4} = \frac{\left(\frac{F_{хдзуб}}{a_n a_w b_l} - \alpha_{\rho p}\right) b_l}{(kb + \alpha)} = \frac{\left(\frac{101,6}{1 \cdot 0,89 \cdot 0,8} - 1,04 \cdot 7,06\right) 0,8}{(36,58 \cdot 1,8 + 0,25 \cdot 32)} = 1,87 \text{ мм.}$$

14. При критическом значении радиальной силы резания величина прогиба полотна пилы в плоскости наибольшей жесткости достигает значения выпуклости задней кромки m , полученного при вальцевании пилы. По данным Э.В. Трухина, нормальная критическая сила резания при $m = 0,2 \dots 0,35$ мм, модуле продольной упругости для стали 9ХФ $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, моменте инерции $I = SB_1^3 / 12$ и напряжении натяжения полотна столярной пилы $\sigma = 30 \dots 50$ МПа

$$F_{зкр} = 9,72m(39,5EI + \sigma SB_1 L^2) / L^3 =$$

$$= 9,72 \cdot 0,2(39,5 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,8 \cdot 40^3 / 12 + 30 \cdot 0,8 \cdot 40 \cdot 1250^2) / 1250^3 = 36,7$$

Н.

15. Допустимая нормальная сила резания

$$F_{z\partial z y \delta} = 0,9 F_{z k k} t_3 / t = 0,9 \cdot 36,7 \cdot 10 / 32 = 10,3 \text{ Н.}$$

16. Подача на зуб по критической нормальной силе

$$S_{z5} = 0,1 + \frac{0,5 \alpha_p^2 [\alpha_p p + 0,1(k + \frac{\alpha t}{b})] \frac{\rho}{\rho + 50} - F_{z\partial z y \delta} / b_d a_n a_w}{(k + \alpha t / b) \text{tg}(\gamma - \varphi)} = 0,1 +$$

$$+ \frac{0,5 \cdot 1,04^2 [1,04 \cdot 7,06 + 0,1 \cdot (36,58 + \frac{0,25 \cdot 32}{1,8})] \frac{1,56 + 10}{1,56 + 10 + 50} - 10,3 / (0,8 \cdot 1 \cdot 0,89)}{(36,58 + 0,25 \cdot 32 / 1,8) \text{tg}(5^\circ - 20^\circ)} =$$

$$= 1,31 \text{ мм.}$$

17. Подача на зуб по точности пиления. Подача на зуб S_{z6} , мм, при пилении твердой древесины может быть рассчитана по эмпирической формуле

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

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

Пиление древесины производят на станках средней C и низкой H точности. Станки средней точности обеспечивают рассеивание размеров по 15-му и 16-му квалитетам, а станки низкой точности – по 17-му и 18-му квалитетам. Допуски квалитетов приведены в прил. табл. 3.

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

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

Подача на зуб по точности пиления

$$S_{z6} = \frac{\omega}{6 + 0,018(t - 200)} = \frac{2,5}{6 + 0,018(32 - 200)} = 0,84 \text{ мм.}$$

18. За расчетное значение подачи на зуб принимается наименьшее из шести найденных значений подач (табл. 7):

Таблица 7

Расчетные значения подач на зуб

бозна	азмер- чение	Высота пропила t , мм			
		32	40	50	60
z_1	M	0,64	0,64	0,64	0,64
z_2	M	0,52	0,42	0,33	0,28
z_3	M	0,30	0,23	0,17	0,12
z_4	M	1,87	1,53	1,26	1,08
z_5	M	1,31	1,02	0,78	0,62
S_{z_6}	M	0,84	0,8	0,76	0,72
z_p	M	0,30	0,23	0,17	0,12

19. Скорость подачи

$$V_s = S_{z_p} n \pi D / (1000 t_3) = 0,30 \cdot 1000 \cdot 3,14 \cdot 800 / (1000 \cdot 10) = 75,0 \text{ м/мин.}$$

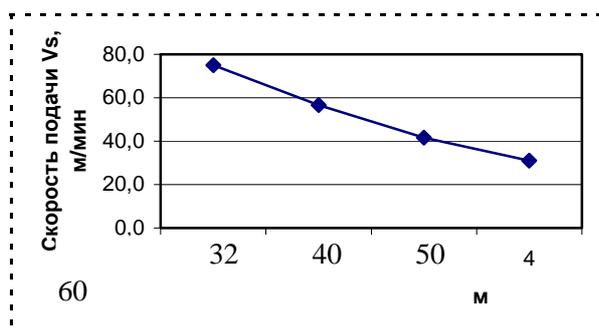


Рис. 30. График скоростей подач

По результатам расчетов построен график скоростей подач (рис. 30), по которому находится оптимальная скорость подачи и получаемая шероховатость распиленной поверхности.

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

4.3. Расчет режимов резания круглопильного
станка

Дано. На круглопильном станке с нижним расположением пильного вала и механической подачей продольно распиливаются березовые доски толщиной $t = 25; 32; 40; 50$ мм. Влажность досок $W = 20\%$.

Мощность электродвигателя механизма главного движения $P = 4$ кВт, КПД привода $\eta = 0,94$, частота вращения пильного вала $n = 2500$ мин⁻¹. Шероховатость распиленных поверхностей $R_m = 320$ мкм. Угол резания зуба пилы $\delta = 55^\circ$. Расстояние от центра пилы до заготовки $h = 90$ мм.

Требуется определить скорости подач и построить график скоростей подач.

Решение. Для наглядности решаемой задачи строится расчетная схема (рис. 31). Расчет выполняется в следующем порядке.

1. Минимальный диаметр пилы, необходимой для пиления доски центральной зоной

$$D > \frac{2(h+t)}{\cos \delta} = \frac{2(90+60)}{\cos 55^\circ} = 401 \text{ мм.}$$

Для работы выбираем пилу 3240-0226 по ГОСТ 980-80. С учетом переточки принимаем диаметр пилы $D = 500$ мм. Толщина диска $S = 2,5$ мм, число зубьев $z = 48$ шт., передний угол лезвия $\gamma = 35^\circ$, зубья разведены, величина уширения зубьев $S' = 0,5$ мм (прил. табл. 4). Принимаем период стойкости $T = 4$ ч или $T = 240$ мин.

Окружной шаг зубьев

$$t_3 = \pi D / z = 3,14 \cdot 500 / 48 = 32,7 \text{ мм.}$$

$$\varphi_{\text{вых}} = \arccos \frac{h}{R} = \arccos \frac{90}{250} = 1,2 \text{ рад.} = 68,9^\circ;$$

$$\varphi_{\kappa} = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}} = 1,2 - 1,09 = 0,1097;$$

$$\varphi_{\text{ср}} = \mu = (\varphi_{\text{вх}} + \varphi_{\text{вых}}) / 2 = (1,09 + 1,2) / 2 = 1,1477.$$

Длина дуги контакта пилы с доской

$$l = \varphi_{\kappa} \cdot D / 2 = 0,1097 \cdot 500 / 2 = 27,4 \text{ мм.}$$

3. Ширина пропила

$$b = S + 2S' = 2,5 + 2 \cdot 0,5 = 3,5 \text{ мм,}$$

длина режущей кромки $b_{\text{л}} = 2,5 \text{ мм.}$

4. Максимально допустимая подача на зуб S_{z1} , мм, ограниченная требованием к шероховатости распиленных поверхностей, находится по прил. табл. 5. При $\varphi_{\text{вых}} = 68,9^\circ$ и $R_m = 320 \text{ мкм}$ $S_{z1} = 0,15 \text{ мм.}$

5. Максимально допустимая подача на зуб S_{z2} , мм, ограниченная вместимостью впадин зубьев:

$$S_{z2} = \theta t_3^2 / (\sigma) = t_3^2 / (4 \dots 5),$$

где θ – коэффициент формы зуба;

σ – коэффициент напряженности впадины зуба ($\sigma = 1$ для разведенных и $\sigma = 0,8$ для плющенных зубьев).

$$S_{z2} = 32,7^2 / (5 \cdot 25) = 8,6 \text{ мм.}$$

6. Максимально допустимая подача на зуб S_{z3} , ограниченная мощностью привода.

6.1. Скорость главного движения

$$V = \pi D n / 60000 = 3,14 \cdot 500 \cdot 2500 / 60000 = 65,4 \text{ м/с.}$$

6.2. Фиктивная сила резания древесины сосны

$$p = 3,924 + 0,0353 \varphi_6 = 3,924 + 0,0353 \cdot 65,8 = 6,25 \text{ Н/мм.}$$

6.3. Касательное давление стружки на переднюю поверхность зуба

$$k = (0,196 + 0,00392\varphi_6)\delta + (0,0686 + 0,00147\varphi_6)V_1 - (5,39 + 0,147\varphi_6) = (0,196 + 0,00392 \cdot 65,8)55 + (0,0686 + 0,00147 \cdot 65,8)65,4 - (5,39 + 0,147 \cdot 65,8) = 20,72 \text{ МПа.}$$

6.4. Величина затупления режущей кромки зуба

$$\Delta\rho = \gamma_{\Delta} \ln TK_n K_u / 1000 = 0,0013 \cdot 27,4 \cdot 2500 \cdot 240 \cdot 0,9 \cdot 0,9 / 1000 = 17,3 \text{ мкм.}$$

6.5. Коэффициент затупления при $\rho_o = 10$ мкм

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta\rho}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{20,72}{6,25}) \frac{17,3}{10 + 50} = 1,38.$$

6.6. Касательная сила резания одним зубом

$$F_{x \text{ зуб}} = \frac{1000 P \eta t_3}{V l i} = \frac{1000 \cdot 4 \cdot 0,94 \cdot 32,7}{65,4 \cdot 27,4} = 68,5 \text{ Н.}$$

6.7. Коэффициенты

$$d = [\alpha_{\rho} p + 0,1(k + \frac{\alpha t}{b})] = [1,38 \cdot 6,25 + 0,1(20,72 + \frac{0,7 \cdot 25}{3,5})] = 11,22;$$

$$m_1 = \frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w a_g b_l d} = \frac{68,5}{1,25 \cdot 0,93 \cdot 1 \cdot 2,5 \cdot 11,25} = 2,1;$$

для $t = 50$ мм $m = 0,82$.

Если $m_1 > 1$, то толщина срезаемого слоя a_c определяется по формуле для макрослоев; при $m_1 \leq 1 - a_{cm}$ – для микрослоев ($a_{cm} \leq 0,1$ мм).

6.8. Средняя толщина срезаемого слоя для макрослоя

$$a_c = \frac{(\frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w a_g b_l} - \alpha_{\rho} p) b}{(k b + \alpha t)} = \frac{(\frac{68,5}{1,25 \cdot 0,93 \cdot 1 \cdot 2,5} - 1,38 \cdot 6,25) 3,5}{(20,72 \cdot 3,5 + 0,7 \cdot 25)} = 0,58 \text{ мм.}$$

Для $t = 50$ мм $a_c < 0,1$ мм. Выполним расчет по формулам:

$$\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01; \rho = \rho_o + \Delta\rho; \rho - \text{ в мм.}$$

$$\lambda = (0,010 + 0,017,3)^2 + 0,2(0,010 + 0,017,3) + 0,01 = 0,016;$$

$$a_{cm} = \frac{1}{2} \left[\left(0,2 + \frac{\alpha t \lambda}{bd} \right) - \sqrt{\left(0,2 + \frac{\alpha t \lambda}{bd} \right)^2 - 4[0,01 + \lambda(m_1 - 1)]} \right];$$

$$\text{Обозначим } y = \left(0,2 + \frac{\alpha t \lambda}{bd} \right) = \left(0,2 + \frac{0,7 \cdot 50 \cdot 0,021}{3,5 \cdot 14} \right) = 0,215;$$

$$a_{cm} = \frac{1}{2} \left[(0,215) - \sqrt{(0,215)^2 - 4[0,01 + 0,021 \cdot (0,82 - 1)]} \right] = 0,03 \text{ мм}$$

6.9. Подача на зуб S_{z3} , ограниченная мощностью привода мм:

$$S_{z3} = \frac{a_c l b_l}{tb} = \frac{0,58 \cdot 27,4 \cdot 2,5}{25 \cdot 3,5} = 0,46 \text{ мм.}$$

7. Максимальная подача на зуб по динамической устойчивости пилы [6]. При продольном пилении периферийная зона пилы нагревается сильнее центральной. При достижении разности температур на линии окружности впадин и в зоне зажимных фланцев некоторого критического значения $\Delta T_{ду}$ пила начинает терять динамическую устойчивость. Значения $\Delta T_{ду}$ приведены в прил. табл. 6.

Способ охлаждения пил на станках учитывают коэффициентом m , который принимают равным:

$$\text{при пилении без охлаждения} \quad m = 0,85/A,$$

$$\text{при охлаждении водовоздушной смесью} \quad m = 0,85 Q_{жс}^{0,17} / B,$$

$$\text{при охлаждении пилы водой} \quad m = 0,85 Q_{жс}^{0,24} / B.$$

Значения коэффициентов А, В рассчитывают по следующим формулам:

$$A = 12,3 \cdot 10^6 \frac{K_m}{D^{1,3} n^{0,4} S^{0,5}},$$

$$B = 5,85 \cdot 10^4 K_m D^{-0,8} n^{-0,15} S^{-0,5} Q_{жс}^{-0,17},$$

$$B = 1,85 \cdot 10^4 K_m D^{-0,65} n^{-0,075} S^{-0,5} Q_{жс}^{-0,24},$$

где $Q_{жс}$ – расход жидкости на один диск, кг/ч (прил. табл. 7); K_m – коэффициент, учитывающий долю мощности резания, расходуемую на нагрев диска пилы. Для пил $D \leq 500$ мм без охлаждения $K_m = 0,03$, при охлаждении водовоздушной смесью или водой $K_m = 0,01$. Для пил большего диаметра данных по K_m нет.

7.1. Пила работает без охлаждения. Значение коэффициента A :

$$A = 12,3 \cdot 10^6 \frac{K_T}{D^{1,3} n^{0,4} S^{0,5}} = 12,3 \cdot 10^6 \frac{0,03}{500^{1,3} 2500^{0,4} 2,5^{0,5}} = 3,2.$$

7.2. Значение коэффициента m :

$$m = 0,85/A = 0,85/1654,1 = 0,2687.$$

7.3. Подача на зуб по динамической устойчивости

$$S_{z4} = \frac{6 \cdot 10^7 m \Delta T_{\text{ду}}}{a_n a_w a_g t z n} \frac{\alpha_p p b_l}{\sin \varphi_{\text{ср}}} =$$

$$= \frac{6 \cdot 10^7 \cdot 0,2687 \cdot 49,6}{1,25 \cdot 0,93 \cdot 1 \cdot 25 \cdot 48 \cdot 2500} \frac{1,38 \cdot 6,25 \cdot 2,5}{\sin 65,8^\circ} = 2,28 \text{ мм.}$$

8. Скорости подач

Из четырех значений подач на зуб для каждой высоты пропила выбирается минимальное расчетное значение S_{zp} :

Высота про-	2	3	4	5
пила t , мм	5	2	0	0
S_{zp} , мм	0	0	0	0
	,15	,15	,13	,03

$$V_s = S_{zp} z n / 1000 = 0,15 \cdot 48 \cdot 2500 / 1000 = 45,5 \text{ м/мин.}$$

График скоростей подач приведен на рис. 32.

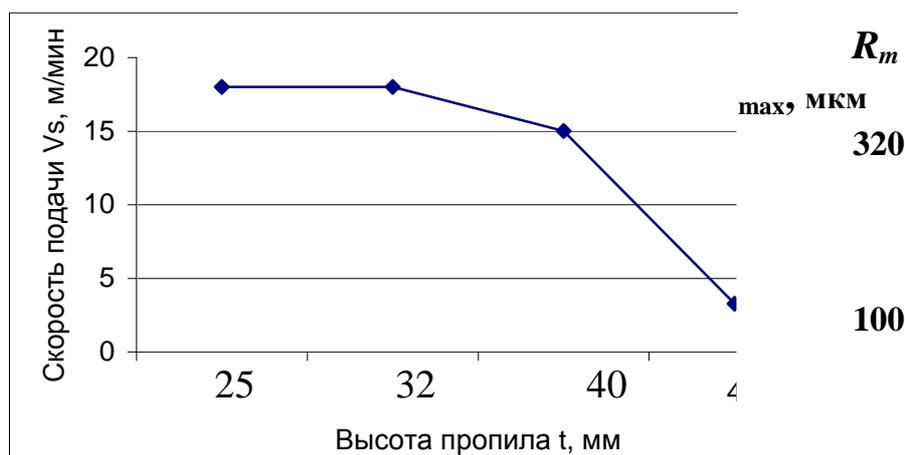


Рис. 32. График скоростей подач при пилении

Изменение параметров режима резания приведет к изменению графика скоростей подачи.

4.4. Расчет режимов резания фрезерного станка

Дано. Проектируется новый рейсмусовый станок для обработки заготовок из древесины сосны шириною $b = 100$ мм и влажностью $W = 10\%$. Диаметр окружности резания ножевого вала $D = 128$ мм, частота вращения вала $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$, число ножей $z = 4$, угол резания ножей $\delta = 65^\circ$. Период стойкости ножей $T = 240$ мин, шероховатость обработанной поверхности $R_m = 100$ мкм, глубина фрезерования $t = (2; 4; 5; 6)$ мм. Ширина стола $b_c = 630$ мм (см. прил. табл. 10-12).

Конструктивная скорость подачи $V_{sk} \leq 36$ м/мин.

С учетом аналогов принята мощность электродвигателя механизма главного движения $P = 7$ кВт, КПД передачи $\eta = 0,94$.

Определить скорости подач и построить график скоростей подач.

Решение. 1. Скорость главного движения

$$V = \pi D n / 60000 = 3,14 \cdot 128 \cdot 5000 / 60000 = 33,51 \text{ м/с.}$$

2. Угол контакта режущей кромки с заготовкой для $t = (2; 4; 5; 6)$ мм:

$$\varphi_k = 115 \sqrt{t/D} = 115 \sqrt{2/128} = 14,375^\circ.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 9.

3. Длина дуги контакта $l_k = \sqrt{tD} = \sqrt{2 \cdot 128} = 16,0$ мм.

4. Подача на зуб с ограничением по шероховатости. Длина волны по заданной шероховатости $l_b = S_z z = 7,3$ мм выбирается по прил. табл. 9. Подача на зуб

$$S_z = l_b / z = 7,3 / 4 = 1,825 \text{ мм.}$$

5. Прирост затупления лезвий за время работы (с использованием данных прил. табл. 8 и 10)

$$\Delta_p = \gamma_{\Delta_k} n T K_n K_u / 1000 = 0,0008 \cdot 16,0 \cdot 5000 \cdot 240 \cdot 0,9 \cdot 0,9 / 1000 = 12,02 \text{ мкм.}$$

6. Фиктивная сила резания

$$p = 1,565 + 0,0353(\varphi_k/2) = 1,565 + 0,0353 \cdot 14,375 / 2 = 1,82 \text{ Н/мм.}$$

7. Касательное давление стружки на переднюю грань

$$k = (0,196 + 0,00392 \varphi_k/2)\delta + (0,0686 + 0,00147 \varphi_k/2)(90-V) - (5,39 + 0,147 \varphi_k/2) = (0,196 + 0,00392 \cdot 14,38/2) 65 + (0,0686 + 0,00147 \cdot 14,38/2)(90 - 33,49) - (5,39 + 0,147 \cdot 14,38/2) = 12,6 \text{ МПа.}$$

8. Коэффициент затупления

$$\alpha_\rho = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_\rho}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{12,6}{1,82}) \frac{12,03}{5 + 50} = 1,37.$$

Таблица 9

Результаты расчетов

Параметры	Обозначение	Размерность	Глубина фрезерования t , мм			
			2	4	5	6
Скорость резания	V	м/с	33,51	33,51	33,51	33,51
Угол контакта	φ_k	град	14,38	20,33	22,73	24,90
Длина дуги контакта	l_k	мм	16,0	22,6	25,3	27,7
Подача на зуб по шероховатости	S_{z1}	мм	1,8	1,8	1,8	1,8
Прирост затупления	Δ_ρ	мкм	12,03	17,01	19,02	20,83
Фиктивная сила резания	p	Н/мм	1,82	1,92	1,97	2,0
Касательное давление	k	МПа	12,6	13,2	13,4	13,6
Коэффициент затупления	α_ρ	–	1,37	1,52	1,58	1,64
Окружная сила резания	F_{xo}	Н	196,4	196,4	196,4	196,4
Средняя сила резания на дуге контакта	$F_{хзуб}$	Н	1233,8	872,4	780,3	712,3
Средняя толщина среза при						
$b = 100 \text{ мм}$	a_c	мм	0,78	0,44	0,35	0,28
$b = 200 \text{ мм}$	a_c	мм	0,29	0,11	0,06	0,04

$b = 300$ мм	a_c	мм	0,13	0,03	0,02	0,01
Подача на зуб по мощности при						
$b = 100$ мм	S_{z2}	мм	6,25	2,49	1,77	1,31
$b = 200$ мм	S_{z2}	мм	2,34	0,62	0,29	0,18
$b = 300$ мм	S_{z2}	мм	1,03	0,18	0,10	0,06
Расчетная подача на зуб при						
$b = 100$ мм	S_{zp}	мм	1,80	1,80	1,77	1,31
$b = 200$ мм	S_{zp}	мм	1,80	0,62	0,29	0,18
$b = 300$ мм	S_{zp}	мм	1,03	0,18	0,10	0,06
Скорость подачи при						
$b = 100$ мм	V_s	м/мин	36,0	36,0	35,4	26,2
$b = 200$ мм	V_s	м/мин	36,0	12,4	5,8	3,6
$b = 300$ мм	V_s	м/мин	20,6	3,6	2,0	1,1

9. Окружная касательная сила резания

$$F_{xo} = 1000P\eta/V = 1000 \cdot 7 \cdot 0,94 / 33,51 = 196,4 \text{ Н.}$$

10. Средняя сила резания на дуге контакта

$$F_{xзуб} = F_{xo}\pi D / (l_{кz}) = 196,4 \cdot 3,14 \cdot 128 / (16 \cdot 4) = 1233,8 \text{ Н.}$$

11. Средняя толщина срезаемого слоя при подаче по одной заготовке ($b = 100$ мм).

Коэффициенты

$$\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01; \rho = \rho_o + \Delta\rho; \rho - \text{в мм.}$$

$$\lambda = (0,005 + 0,0123)^2 + 0,2(0,005 + 0,0123) + 0,01 = 0,01369;$$

$$d = \alpha_{\rho} p + 0,1k = 1,37 \cdot 1,82 + 0,1 \cdot 12,6 = 3,75;$$

$$m_1 = \frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b d} = \frac{1233,8}{1 \cdot 1 \cdot 100 \cdot 3,75} = 3,3.$$

Если $m_1 > 1$, то толщина срезаемого слоя a_c определяется по формуле для макро-слоев; при $m_1 \leq 1 - a_{cm}$ для микрослоев ($a_{cm} \leq 0,1$ мм).

$$a_c = \frac{\frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b} - \alpha_{\rho} p}{k} = \frac{\frac{1233,8}{1 \cdot 1 \cdot 100} - 1,37 \cdot 1,82}{12,6} = 0,78 \text{ мм.}$$

При срезании микрослоев толщина срезаемого слоя находится по формуле (для $b = 200$ мм и $t = 6$ мм)

$$a_{cm} = 0,1 - 0,5 \sqrt{4\lambda(1 - m_1)} = 0,1 - 0,5 \sqrt{4 \cdot 0,0158(1 - 0,77)} = 0,04 \text{ мм.}$$

12. Подача на зуб, ограниченная мощностью привода:

$$S_{z2} = a_c / \sqrt{t/D} = 0,78 / \sqrt{2/128} = 6,25 \text{ мм.}$$

За расчетную подачу на зуб принимается наименьшее значение из подач с ограничениями по шероховатости и мощности привода.

13. Скорость подачи

$$V_s = S_{zp} z n / 1000 = 6,25 \cdot 4 \cdot 5000 / 1000 = 36,5 \text{ м/мин.}$$

График скоростей подач приведен на рис. 33.

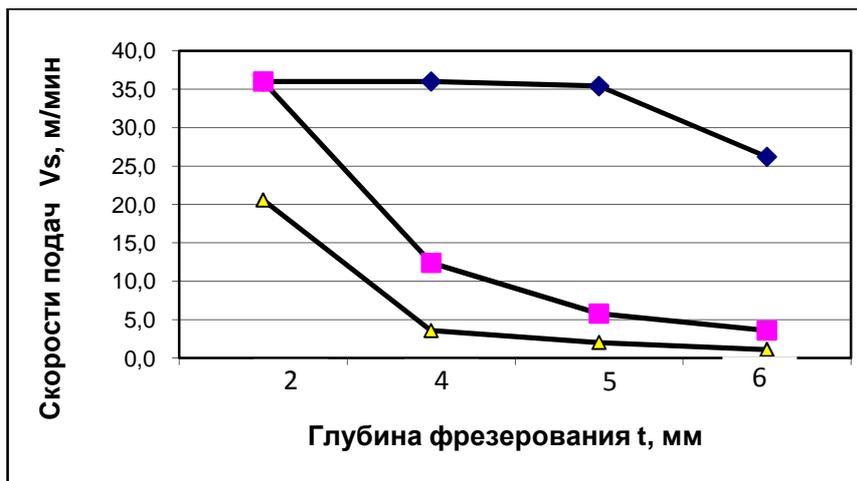


Рис. 33. График скоростей подачи

продольно-фрезерного станка

Библиографический список

1. **Панченко К.П.** Русские ученые – основоположники науки о резании металлов. Жизнь, деятельность и избранные труды И.А. Тиме, К.А. Зворыкина, Я.Г. Усачева, А.Н. Челюскина. – М., 1952. – 220 с.
2. **Бершадский А.Л.** Расчет режимов резания древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1967. – 175 с.
3. **Крагельский И.В., Виноградов И.Э.** Коэффициенты трения. – М., 1962. – 220 с.
4. **Бершадский А.Л., Цветкова Н.И.** Резание древесины. – Минск: Вышейш. шк., 1975. – 303 с.
5. **Ивановский Е.Г.** Резание древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1974. – 200 с.
6. **Стахийев Ю.М., Дунаев В.Д., Короткова М.Л. и др.** Руководящие технические материалы по определению режимов пиления древесины круглыми пилами. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1988. – 74 с.

Приложение

Таблица 1

Размеры ленточных пил, мм (ГОСТ 6532-77)

Электронный архив УГЛТУ

Обозначение пил	Длина (в рулоне)*	B	S	t ₃	h	r	γ	β
							град.	
Пилы столярные								
3405-0021	4000	10	0,6	6	2,0-3,0	1,5	5	5
-0022		15						
-0023		20	0,7	8	4,2-4,4		5	
-0024	6000	30	0,8	10	4,8-5,0	2,5	55	550
-0025		40						
-0026		50	0,9	12	6,3-6,5			
3405-0027		60						
Пилы делительные								
3405-0028	7000	85	1,0	30	10	3	20	50
-0029		100						
-0031	8500	125	1,2	50	13	4	30	45
-0032			1,0					
-0033			1,2					
-0034		150	1,4	30	10	3	20	50
-0035				1,2	50	13	4	30
-0036	1,4							
-0037	9000	175	1,2	30	10	3	20	50
-0038			1,4					
-0039			1,2	50	13	4	30	45
-0041			1,4					
-0042	1,2	1,4	50	13	4	30	45	
3405-0043	1,4							
* Допускается по заказу потребителя изготовление ленточных пил длиной, кратной длинам, указанным в таблице								

Таблица 2

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

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

Окончание табл. 2

Ленточные пилы	Твердые лиственные породы	Лиственница
По ГОСТ 6532-77	(0,40...0,45)/(0,30...0,40)	0,45...0,55
(тип 2 и 3)	(0,40...0,50)/(0,35...0,45)	0,55...0,75
	(0,45...0,60)/(0,40...0,55)	0,70...0,90
По ГОСТ 10670-77	(0,55...0,65)/(0,50...0,60)	0,50...0,60
	(0,60...0,70)/(0,55...0,65)	0,60...0,80
	(0,65...0,80)/(0,60...0,70)	0,80...1,00

Примечания: 1. В числителе данные для свежесрубленной древесины влажностью свыше 30%, в знаменателе – для сухой и мерзлой. 2. Величина уширения зубьев для распиловки лиственницы дана для случая охлаждения пилы водовоздушной смесью. При отсутствии охлаждения уширение увеличивается на 0,1...0,15 мм. 3. Допуск уширения зубьев на одну сторону для пилы $\pm 0,05$ мм.

Таблица 3

Значения полей допусков линейных размеров, мм,

по ГОСТ 6449.1-82

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

Таблица 4

Уширение зубьев круглых пил на сторону S'

Диаметр пил, мм	S', мм, при продольном и поперечном пилении древесины		
	хвойных пород влажностью W		твердых лиственных пород
	W≤30% или древесина мерзлая	W>30%	
125...315	0,40(0,20)	0,45 (0,30)	0,30 (0,20)
360...500	0,60 (0,30)	0,70 (0,40)	0,50 (0,30)
560...630	0,70 (0,40)	0,80 (0,50)	0,60 (0,40)
710...900	0,80 (0,50)	0,90 (0,60)	0,70 (0,50)
1000...1250	1,00 (0,70)	1,10 (0,80)	0,90 (0,60)
1500	1,20 (0,80)	1,30 (0,90)	1,10 (0,70)

Примечания: 1. Значения без скобок соответствуют продольной, в скобках – поперечной распиловке.
 2. При продольной распиловке бревен и брусьев без охлаждения пил допускается увеличить уширение на 0,1...0,15 мм.
 3. Пилы диаметром 1250...1500 мм шпалорезных станков, слешерных установок, раскряжевочных линий допускается подготавливать с уширением зубьев 1,5...2,0 мм.

Таблица 5

Шероховатость поверхности пропила при различной подаче на зуб при продольном пилении древесины круглыми пилами

Высота неровностей, мм	Максимальная подача на зуб, мм, при углах выхода зубьев из пропила, град					
	20	30	40	50	60	70
1200	1,8/1,2	1,8/1,2	1,8/1,2	1,8/1,2	1,5/1,2	1,5/1,2
800	1,5/1,0	1,5/1,0	1,5/1,0	1,5/1,0	1,2/0,8	1,2/0,8
500	1,2/0,8	1,2/0,8	1,2/0,8	1,2/0,8	0,75/0,5	0,75/0,5
320	0,45/0,3	0,45/0,3	0,45/0,3	0,45/0,3	0,15/0,1	0,15/0,1
200	0,15/0,1	0,15/0,1	0,15/0,1	0,15/0,1	0,15/0,1	0,15/0,1
100	0,15/0,1	0,15/0,1	0,15/0,1	0,15/0,1	–	–

Таблица 6

Разница температур по радиусу диска пилы, соответствующая началу потери динамической устойчивости диска

Диаметр		Значения $\Delta T_{\text{дв}}^{\text{min}}$, °С, при $V = 50$ м/с и S , мм							
пилы, мм	фланцев, мм	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8
250	100	81,6	116,8	157,3	–	–	–	–	–
315	100	–	–	59,5	79,0	100,8	124,9	–	–
360	100	–	–	–	50,7	65,8	82,4	110,3	–
400	125	–	–	–	43,0	56,3	71,0	95,7	–
450	125	–	–	–	–	37,2	47,9	65,8	86,0
500	125	–	–	–	–	–	35,2	49,6	65,7
560	160	–	–	–	–	–	28,7	41,4	55,6

Окончание табл. 6

Диаметр	Значения $\Delta T_{ду}^{\min}$, °С, при $V = 50$ м/с и S , мм										
пи-фла лы, нце мм в, мм	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,6	4,0	4,5	5,0	5,5	
630160	17,	26,	36,	44,	-	-	-	-	-	-	
	4	5	9	4							
710160	7,9	14,	21,	26,	32,	-	-	-	-	-	
	2	3	5	0							
800160	-	-	7,7	10,	14,	21,	-	-	-	-	
			8	1	5						
900200	-	-	-	-	11,	17,	25,	-	-	-	
					1	7	0				
100200	-	-	-	-	-	9,0	14,	21,	-	-	
	0					2	5				
125240	-	-	-	-	-	-	3,6	8,0	13,	-	
	0							0			

150300 - - - - - 7,7 11, 15,
0 3 3

Таблица 7

Расход жидкости на охлаждение пильных дисков

Параметр	Значение параметра при $Q_{ж}, \text{ кг/ч}$						
	3	5	10	20	30	60	90
$Q_c^{0,17}$	1,21	1,31	1,48	1,66	1,78	2,01	2,15
$Q_c^{0,24}$	2,26	2,67	2,94	3,16	3,33	3,48	3,61

Таблица 8

Усредненные значения коэффициентов производительности

K_n и использования K_u для некоторых типов станков

Наименование станков	K_n	K_u
Ленточнопильные ребровые и столярные		
.	0,9	0,9
Круглопильные:		
торцовочные, концеванители . . .	0,9	0,95
продольного раскроя	0,9	0,9
Фуговальные:		
с ручной подачей при длине		
заготовки, м:	0,5 ... 0,7	0,8 ... 0,93
0,5		

Электронный архив УГЛТУ

1,0	0,7 ... 0,8	0,8 ... 0,93
2,0	0,8 ... 0,9	0,8 ... 0,93
	K_n	$K_{\text{и}}$
с механической подачей	0,8 ... 0,9	0,85 ... 0,9
Рейсмусовые	0,8 ... 0,9	0,88 ... 0,99
Четырехсторонние продольно-фрезерные	0,8 ... 0,9	0,8 ... 0,9
.		
Шипорезные:		
рамные односторонние и фрезерные с шипорезной головкой	0,5 ... 0,6	0,9 ... 0,95
рамные двусторонние	0,7 ... 0,75	0,7 ... 0,8
ящичные	0,5 ... 0,6	0,9

Таблица 9

Предельно допустимая длина волн на обработанной поверхности при продольном цилиндрическом фрезеровании

Высота неровностей $R_{\text{т max}}$, мкм	Длины волн λ , мм, при диаметре окружности резания D , мм							
	60	80	100	120	140	160	180	200
12,5	2,0	2,4	2,7	2,9	3,2	3,4	3,6	3,8
25	2,8	3,3	3,7	4,0	4,3	4,7	4,9	5,2
50	4,0	4,7	5,2	5,6	6,2	6,6	7,0	7,4
100	5,2	6,0	6,7	7,3	7,9	8,5	9,0	9,5
200	7,2	8,5	9,5	10,3	11,0	12,0	12,6	13,6

Таблица 10

Предельно допустимая частота вращения фрез n , мин⁻¹

Диаметры фрез, мм	До 100	125	140	160	180
Предельно допустимая частота вращения фрез n , мин ⁻¹ :					
цельных	12000	10000	9000	8000	6200
сборных	12000	9000	8000	6200	5000

Таблица 11

Период стойкости в часах дереворежущих фрез

Период стойкости, ч, при материале лезвий:	Порода древесины	
	Хвойная	Твердолиственная
Х6ВФ, 8Х6НФТ	2,0...2,7	1,0...1,5
8Х6ВМФ	3,0...4,0	1,8...2,7
Р6М5	3,4...4,6	2,0...3,0
ВК15	до 40	до 30

Таблица 12

Угловые параметры фрез

Вид резания и обрабатываемый	Нормальные углы, град:	
	Передний угол γ для фрез	

материал	стальных	твердосплавных	Задний α
Фрезерование древесины:			
продольное	(20...25)/(10...15)	(20...30)/(10...25)	15/10
поперечное	(35...40)/(30...35)	30/30	10/10
торцовое	(30...35)/(25...30)	30/25	20/15
Фрезерование кромок ДСтП и ДВП	20...25	15...20	15...20
Примечание. В числителе - для хвойных пород, в знаменателе – для твердолиственных.			

Оглавление

Предисловие	3
Введение	5
Лекция 1. Силы резания при взаимодействии лезвия с древесиной	12
1.1. Основные понятия и определения.....	12
1.1.1. Составляющие силы резания.....	12
1.1.2. Удельная сила, удельная работа, единичная сила резания.....	13
1.1.3. Контактные зоны лезвия.....	14

Электронный архив УГЛТУ

1.1.4. Эпюры нормальных давлений по зонам лезвия.....	15
1.2. Определение составляющих силы резания	17
1.2.1. Силы резания по контактным площадкам лезвия.....	17
1.2.2. Зависимость главной составляющей силы резания от толщины срезаемого слоя.....	20
1.2.3. Изменение силы резания в диапазоне микрослоев.....	22
1.3. Коэффициент трения.....	25
Лекция 2. Влияние различных факторов на силы резания и качество обработки.....	27
2.1. Анализ и синтез процесса резания древесины	27
2.2. Учет затупления лезвий.....	29
2.3. Учет при резании породы, влажности и температуры древесины.....	34
2.3.1. Влияние породы древесины.....	34
2.3.2. Влияние влажности.....	36
2.3.3. Влияние температуры.....	37
2.4. Влияние видов резания.....	38
2.5. Влияние режущего инструмента.....	41
2.5.1. Влияние угла резания.....	41
2.5.2. Влияние заднего угла.....	41
2.5.3. Влияние положения лезвия при резании.....	43
	97

2.6. Влияние скорости резания.....	45
2.7. Влияние размеров среза.....	46
Лекция 3. Пиление круглыми пилами.....	50
3.1. Общие сведения о технологической операции пиления.....	50
3.1.1. Назначение и виды пиления.....	50
3.1.2. Удельная сила трения опилок в пропиле.....	51
3.1.3. Условия работы круглой пилы.....	54
3.1.4. Период стойкости пилы.....	57
3.1.5. Выбор диаметра пилы.....	58
3.1.6. Моделирование процесса пиления.....	60
3.2. Кинематика пиления.....	62
3.3. Динамика продольного пиления.....	65
3.4. Выбор параметров режима продольного пиле- ния.....	67
3.5. Поперечное пиление дисковыми пилами.....	68
Лекция 4. Расчет режимов резания.....	71
4.1. Режимы резания.....	71
4.1.1. Понятие о режиме резания.....	71
4.1.2. Оптимальные режимы резания.....	72
4.1.3. Общие рекомендации к расчету рациональных режимов резания.....	74

4.2. Расчет режимов резания ленточнопильного станка.....	74
4.3. Расчет режимов резания круглопильного станка.....	80
4.4. Расчет режимов резания фрезерного станка	86
Библиографический список	89
Приложение	90