

Резание как технологический процесс при продольной распиловке и строжке

„Пусть гипотезы, сейчас существующие, или те, которые предлагаются, окажутся недостаточными, — все же роль их существенна как возбудителей пылкости и как стимул дальнейшего изучения и более совершенных попыток мыслей“.

„Обобщение стоит здесь на первом месте, а ведь свойство науки состоит главным образом в обобщении“.

Менделеев.

Проблема теории резания и ее целеустановки

Теория резания должна:

1. Выявить наиболее выгодные условия работы режущего инструмента с точки зрения количества и качества обработки.

2. Выявить основные формулы и коэффициенты для конструкторских и эксплуатационных расчетов. Построение технологического процесса на базе технормирования и паспортизации немыслимо без умения технически рассчитать процесс.

3. Найти наиболее выгодные соотношения между всеми элементами рабочего места — от мотора до режущего инструмента включительно.

Экономическая сущность вопроса вскрывается хотя бы следующими примерами:

1. Зарплата станочников по Наркомлесу в 1932 году составляла около 30 млн. руб. Если еще взять зарплату по сельхозмашиностроению, вагоностроению, авиастроению и т. д., то в сумме получим около 60 млн. руб. зарплаты по станочным цехам. Цеховые расходы составляют около 300%, так что стоимость цехового производства выражается примерно в 250 млн. руб. Если учесть, что в себестоимости фабриката стоимость производства составляет около 30%, то можно полагать общий расход по выпускаемой продукции в один миллиард рублей. В разрезе плана второй пятилетки эта цифра вырастет вдвое. Естественно, что каждый процент экономии сулит десятки миллионов рублей. Чтобы представить себе яснее перспективы возможных сбережений, остановимся только на следующих примерах.

2. На одном из наших номерных заводов при тщательном исследовании с точной аппаратурой станков выявилась возможность повысить подачу механизированных станков до 40%.

3. Обследование Красносельской фабрики в Москве показало, что неучтенные потери, связанные с излишним расходом энергии при затупленном инструменте, с недоданной продукцией вследствие потерь времени на его точку и правку, с излишними потерями древесины на припуски и т. д. — составляют 1 500 000 руб. в год или 10% от выпуска фабрики в 15 млн. рублей.

4. На заводе имени Молотова в Архангельске установочная мощность на пару рам составляет 120 квт. Однако оказывается, что 80 — 90 квт вполне легко справляются с работой. В результате — возможность снять 500 лошадиных сил установочной мощности с рам, не считая прочих цехов, где бесспорно имеется ненужный лишний запас установочной мощности.

5. На лесозаводе № 3 в Архангельске многосторонний строгальный станок работает до сих пор с тридцатипроцентной возможной подачей, при чем по качеству, несмотря на снижение подачи на 70%, он ничем не отличается от обычных строгальных станков.

Таких примеров можно было бы привести сотни и в результате прийти к выводу, что вопрос экономии сводится не к одному, а к многим процентам, т. е. к многим десяткам миллионов рублей в год. Следовательно, проблема резания такова, что ею стоит заниматься. Между тем в разработке теории резания сделано еще очень мало.

Старые положения теории резания жизнью не оправдываются. Разрыв между практикой и теоретическими результатами достигает 100 — 300 процентов. В итоге — неверие в теорию, не удовлетворяющую практике, не освещающую ему путь в работе, и процветание технической интуиции.

Мощность резания как один из основных факторов изучения

Почти все экспериментальные работы уделяют значительную долю внимания мощности, затрачиваемой на резание. Попутно возникает вопрос, почему мощность резания, почему эта энергетическая часть вопроса, составляющая чрезвычайно малую долю в стоимости продукции, занимает столь большое место в исследовательской работе.

Ответ ясен. Мощность потенциально предопределяет производительность, предопределяет конструкцию обрабатывающего станка, предопределяет энергетические установки, мощность есть фактор, в сильнейшей степени влияющий на весь ход процесса. С этой точки зрения, как потенциальный фактор производительности, мощность играет существенную роль.

Существующие расчетные формулы и результаты подсчетов по ним

Основной формулой для расчета мощности служит формула Фишера, которая приведена в курсах механической технологии дерева проф. Денфера, проф. Дешевого и др.

Эта формула дает:

$$N_{рез} = \frac{KSHU}{75},$$

где S — толщина пилы и H — высота пропила в мм, U — скорость подачи в м/сек, K — коэффициент резания в кг/мм².

Например, для ели $K = 10-11$, для сосны $K = 10-12$, для березы $K = \sim 15$, для твердых пород $K = \sim 15-25$.

Таковы коэффициенты, приводимые в означенных выше материалах. Лишь в труде проф. Шапиро — Профилировка зубьев для распиловки дуба¹ дается для сосны $K = 9$ и для дуба $K = 15$.

В известной работе инж. Бендера — Паспортизация станков по деревообработке — даются те же коэффициенты, что и в трудах проф. Дешевого и Денфера, но расчетная формула для мощности резания имеет следующий вид:

$$N_{рез} = \frac{KbHU}{75},$$

где b — ширина пропила в мм

Если, не вдаваясь в сущность коэффициентов резания K , сравнить три расчета по приведенным выше данным, то получим, например, для сосны при $S = 2$ мм, $b = 3$ мм, $H = 75$ мм и $U = 1$ м/сек:

$$N \text{ по Бендеру} = \frac{KbHU}{75} = \frac{12 \cdot 3 \cdot 75 \cdot 1}{75} = 36 \text{ л. с.}$$

$$N \text{ по Дешевому} = \frac{KSHU}{75} = \frac{12 \cdot 2 \cdot 75 \cdot 1}{75} = 24 \text{ л. с.}$$

$$N \text{ по Шапиро} = \frac{KSHU}{75} = \frac{9 \cdot 2 \cdot 75 \cdot 1}{75} = 18 \text{ л. с.}$$

Таким образом, различие в расчетах получается в 150% — 200%.

Происхождение коэффициентов $K = 10 - 25$

Прежде чем проанализировать приведенные выше расчеты, выясним происхождение коэффициентов $K = 10 - 25$, которые приписывают Фишеру.

В 1869—1871 гг., т.е. в течение трех лет, в Хемнице на заводах Гартмана и Циммермана проф. Гартиг проводил при участии студентов Дрезденского института ряд опытов. Результаты исследования описаны Гартигом в книге „Versuche über Leistung und Arbeitsverbrauch der Werkzeugmaschinen“. В итоге для расчета мощности при распиловке он дал формулу:

$$N_{рез} = 0,0285 b \cdot F \text{ — для мягких пород,}$$

$$N_{рез} = 0,0700 b \cdot F \text{ — для твердых пород,}$$

где b — ширина пропила в мм, а F — поверхность пропила в м² в 1 час.

¹ «Известия Лесотехнической академии» 1934 г., № 1.

Опыты проводились при 30% разводе, т.е. $b = 1,3 S$.

$$\text{Так как } T = \frac{H}{1000} \cdot U \cdot 3600,$$

где H — высота пропила в мм и U — скорость подачи в м/сек,

то, умножая правую часть формулы Гартига на $\frac{75 \cdot 1,3 S}{75 \cdot b} = 1$, получим:

$$\text{для мягких пород } N_{рез} = (0,0285 \cdot 75 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 3,6) \cdot \frac{SHU}{75}$$

$$\text{для твердых пород } N_{рез} = (0,07 \cdot 75 \cdot 1,3 \cdot 3,6) \cdot \frac{SHU}{75}$$

Содержание скобок и даст в результате $K = \sim 10 - 25$.

Понятно, что эти коэффициенты распространительно толковать нельзя, — они справедливы только для условий опыта Гартига при разводе 1,3 S (см. множитель 1,3 в скобках). Если взять другой развод, то и K будет другим. Следовательно значение K не может быть включено в стабильные границы 10—25, даже только исходя из этого соображения.

Кроме того, SHU — не реальный объем пропила, а условный. Следовательно и K — условный коэффициент, и распространять его на реальный объем пропила bHU нельзя. Реальный коэффициент, отнесенный к реальному пропилу по опытам Гартига, будет в 1,3 раза меньше, т.е., например, для сосны

$$K = \frac{12}{1,3} = 9 \text{ (см. коэффициент проф. Шапиро).}$$

В результате получаем, что ни один из приведенных выше расчетов не верен. Ни один из них не учитывает величины развода, и кроме того в одних случаях условный коэффициент относится к реальному объему — и наоборот.

Сущность „коэффициента“ K

Но не только с этой точки зрения расчеты не верны. K — не есть коэффициент. K — не стабильное число. K — отражает в себе всю многогранность процесса резания и есть не что иное, как удельная работа резания, затрачиваемая в кгм на разрыхление 1 см³ древесины.

В самом деле: если обозначить через K кгм/см³ работу на разрыхление 1 см³ древесины, то bHU , где b в мм, H в мм и U в м/сек, есть не что иное, как секундный объем разрыхляемой древесины в см³, а $KbHU$ — не что иное, как мощность в кгм/сек, а деленная на 75 — мощность резания:

$$N_{рез} = \frac{KbHU}{75}$$

Может ли быть удельная работа постоянной величиной? Понятно, нет. Она будет зависеть от многогранности процесса резания — от породы и состояния древесины, от направления реза в отношении волокон, а в связи с этим — от диаметра пильных дисков, от высоты пропила, от положения бруска в отношении центра пилы, от углов резания, заточки и наклона, от крупности получаемых опилок, а в связи с этим — от подачи на зубец, от уплотнения опилок в пазухе и т. д.

Следовательно, $K = 10 - 25$ есть абсолютно частное значение опытов Гартига, и никакого распространительного толкования давать этому значению удельной работы нельзя.

Теоретические выводы проф. Гавриленко-Тимме

Многогранность процесса резания не была учтена теоретическими выводами прошлого. В прошлом само резание как таковое не учитывалось в процессе выводов основных формул. Проф. Гавриленко рассматривает резание в торец и обозначает через γ глубину проникновения резца в древесину до момента отделения одного элемента стружки (рис. 1).

Сила $P_{сжс}$ — нормальная в груди резца — разлагается на вертикальную и горизонтальную составляющие. Первая производит скол элемента в плоскости волокон (P_{\parallel}), а вторая продвигает резец и есть сила резания (P_{\perp}).

Называя через $K_{сж\perp}$ напряжение резания, через $K_{сж\parallel}$ — напряжение скалывания вдоль волокон и через $K_{сж}$ — напряжение сжатия по груди резца, обозначая угол резания $\angle \beta$, получим основные расчетные формулы для торцевого реза:

$$1) K_{\perp} = K_{сж} \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad 2) \frac{K_{сж}}{K_{сж\parallel}} = \frac{\delta}{\gamma}, \quad \text{где } \delta \text{ — подача на зубец,}$$

$$3) N_{рез} = \frac{Kb\delta v}{75}, \quad \text{где } 4) K^1 = \frac{K_{сж\perp}}{2} = \frac{K_{сж\parallel}}{2} \operatorname{tg} \beta.$$

График изменения силы резания представляется по Гавриленко и по Тимме в виде зубчатой диаграммы со спадом давления до нуля в момент отде-

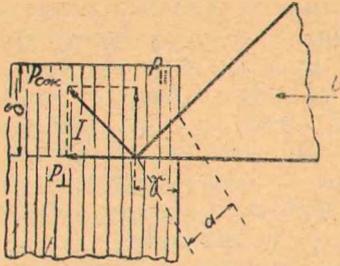


Рис. 1

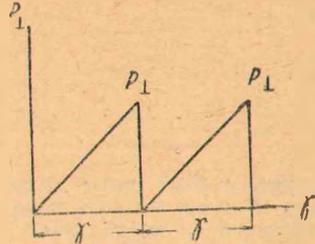


Рис. 2

ления элемента стружки (рис. 2). Подробное изложение этого вопроса можно найти в курсе технологии дерева Малышева и Гавриленко и в курсе проф. М. А. Дешевого по механической технологии дерева, изд. 1931 года. Согласно выводам, отношение

$$\frac{K_{сж}}{K_{сж\parallel}} = \frac{\delta}{\gamma},$$

от угла резания β не зависит.

Из $\triangle I$ (см. рис. 1) получаем при ширине реза, равной единице,

$$P_{\perp} = P_{сж} \cdot \operatorname{Sn} \beta = K_{сж} a \operatorname{Sn} \beta,$$

где a — соприкосновение груди резца с древесиной.

Помимо того $P_{\perp} = K_{сж\perp} \cdot \operatorname{tg} \beta \delta$, согласно предыдущим данным.

При $\angle \beta = 90$ имеем: 1) $P_{\perp} = Ka$, или 2) $P_{\perp} = \infty$

Уже это противоречие говорит о неверности и неполноте рассуждений.

Случай $P_{\perp} = Ka$ соответствует сжатию образца перпендикулярно к волокнам (рис. 3). Если смятие образца не происходит при достаточной опорной площади, то произойдет срез перпендикулярно волокнам (рис. 4). Однако при

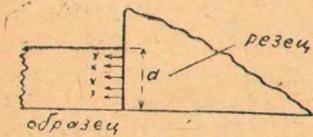


Рис. 3

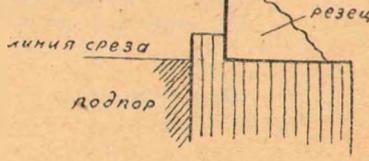


Рис. 4

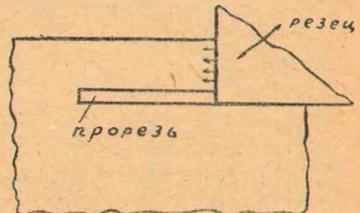


Рис. 5

резании ни того, ни другого случаев в чистом виде не бывает. Можно было бы говорить о сжатии перпендикулярно к волокнам, если бы была заранее сделана прорезь по линии раздела (рис. 5).

Однако при процессе резания перерезание и сжатие идут одновременно, и одного сжатия без перерезания не бывает. Вместе с тем фактор перерезания аналитически не охвачен, и в рассуждениях Гавриленко фигурирует только давление на древесину в виде горизонтальной составляющей $P_{сж\parallel}$ и скалывающая сила, равная вертикальной составляющей $P_{сж\perp}$. Это одна из коренных ошибок старой теории.

Помимо того, полагая, что $\frac{K_{сж}}{K_{ск}} = \frac{\delta}{\gamma}$ не зависит от $\angle \beta$, старая теория

резания допускала другую серьезную ошибку, не учитывая изменения угла действия между направлением волокна и действующей силы. Последнее обстоятельство устанавливается опытами Баумана, Флаксермана и другими исследованиями, при чем изменение угла β влияет как на сами напряжения, так и на характер образования стружки, о чем будет сказано ниже. Также неверно представление графика изменения силы резания в виде зубчатой диаграммы со спадом давления до нуля в момент отделения элемента стружки.

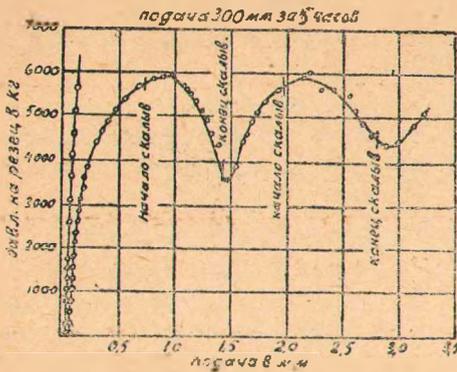


Рис. 6. Диаграмма колебаний давления резания по Никольсону при весьма медленном резании (1,13 мм/мин); подача $\frac{1}{4}$ ''; глубина резания $\frac{3}{8}$ ''; угол резания 60° ; угол в плане 45° ; мягкая сталь

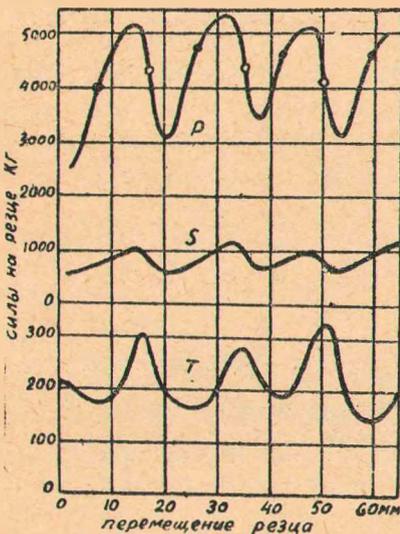


Рис. 7. Колебание трех составляющих сил давления на резец по опытам Д. Смита

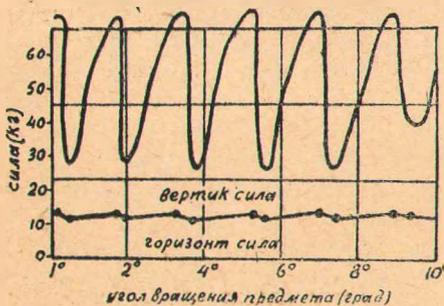


Рис. 8. Колебание давления при обработке латуни (по Стентону и Гейду)

Опыты Никольсона (рис. 6), опыты Д. Смита (рис. 7), опыты Стентона и Гейду (рис. 8) дают при тех же скоростях, как и у Тимме, колебание кривой изменения давления резания, но практически до нуля эти колебания не падают. Это объясняется тем, что осаживание второго элемента стружки начинается несколько раньше, чем заканчивается скальвание первого элемента.

Непрерывность ленты стружки, состоящей из связанных и смято-сколотых элементов, объясняется тем, что время образования каждого элемента стружки стало очень мало. Вследствие этого, в то время как начинается скальвание одного элемента стружки, начинается осаживание другого элемента, давление на который со стороны резца передается через предыдущий, не успевший еще сколоться элемент. В силу этого первый элемент не успевает полностью отделиться от последующего и остается в некотором соединении с ним. Таким образом с учетом динамики явления полагать спад давления до нуля нельзя.

Необходимо учесть, что скорости резания при опытах проф. Тимме были в 3-4 миллиона раз медленнее существующих рабочих скоростей (60 мм/час против 30—50 м/сек). В результате получается разрыв между теорией и практикой, в силу неполноты и несоответствия принятых положений природе явлений.

Новые теоретические положения проф. М. А. Дешевого

Каждая индуктивная наука проходит в своем развитии один и тот же путь: от накопленных экспериментальных данных и фактов — через обобщение — к высшему знанию, к синтезу, к рабочим гипотезам. Теория резания здесь, конечно, не составляет исключения. Теории, неразрывно связанной с ведущей практикой, столь же ценно накопление фактического мате-

риала, как и его всесторонняя синтетическая обработка, его обобщение. К сожалению, приходится констатировать, что „новая теория резания“, опубликованная проф. М. А. Дешевым, построена на рабочих гипотезах, оторванных от современного экспериментального материала.

Рассмотрим рабочие гипотезы, лежащие в основу „новой теории резания“ проф. М. А. Дешевого, а также методику всего расчета силы резания P_0 , и определим, насколько прочен тот фундамент, на котором высится математическая надстройка излагаемой теории.

1. Прежде всего остановимся на первом положении — на распределении давления между передней гранью резца и соприкасающейся с ней стружкой (рис. 9).

Проф. Дешевой пишет: „...ясно, что давление между передней гранью (резца) ak и материалом не может быть распределено равномерно по грани“.

Давление в точке k в момент подхода резца к древесине проф. М. А. Дешевой принимает равным нулю: „... оно могло бы быть больше нуля только в движении, если бы грань ak резца при своем движении увлекала за собой находящуюся над ней древесину, т.е. если бы имели, как говорят, усадку стружки. Но это свойство в дереве... развито слабо, в виду чего проф. Тимме...

считал усадку стружки равной нулю. Будем и мы принимать то же самое“. Далее: „Закон изменения давлений нам неизвестен. Простейшим же изменением будет пропорциональное величине внедрения резца в древесину, что мы в дальнейшем и будем принимать... закон изменения давлений выразится прямой pk “. Затем:

„Каждое из давлений p , а также ее равнодействующее давление P можно разложить на два составляющих p_1, p_2 и P_1, P_2 , идущих первое — в направлении резания по стрелке l , и второе — в направлении, перпендикулярном к первому. Прямые p_1k и p_2k дают законы изменения давлений p_1 и p_2 “.

Таковы первые положения, приводящие проф. М. А. Дешевого к ряду треугольников, позволяющих в дальнейшем геометрически оформить вывод основных формул.

2. Второе основное положение заключается в установлении „закономерности явления“, при котором „не должно быть разрыва между усилием среза на длине δ и горизонтальной составляющей p_1 , давления p по груди резца“ в общем для них элементе a на лезвии резца“ (рис. 9). В силу чего $P_1 = K_{ск} \delta$,

где $K_{ск}$ в $кг/мм^2$ есть коэффициент крепости древесины на скалывание в плоскости na обработки. Признание закономерности явления, при котором не должно быть разрыва между указанными усилиями, с учетом первого положения, приводят к дальнейшей геометризации явления, при котором получаются значения для равнодействующей горизонтальной силы P (рис. 10 и 11), пропорциональные площадям nak (рис. 10) при $\delta \cdot \operatorname{tg} \beta < h$, или $anik$ (рис. 11), при $\delta \cdot \operatorname{tg} \beta > h$.

3. Учитывая в дальнейшем трение элемента стружки о грудь зубца и влияние сжатия стружки на отделение ее элементов, проф. М. А. Дешевой дает основную группу уравнений, долженствующих разрешить проблему определения усилий при резании:

$$1) P_1 = K_{ск} \frac{\delta^2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{2}, \text{ при } \delta \cdot \operatorname{tg} \beta < h, \quad 2) P_1 = K_{ск} h \left(\delta - \frac{h}{2 \operatorname{tg} \beta} \right), \text{ при } \delta \cdot \operatorname{tg} \beta > h,$$

$$3) P_2 = K_{ск} \frac{\delta^2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{2} \left(\frac{1 - f \cdot \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta + f} + 0,35 \right), \text{ при } \delta \cdot \operatorname{tg} \beta < h,$$

$$4) P_2 = K_{ск} h \left(\delta - \frac{h}{2 \operatorname{tg} \beta} \right) \cdot \left(\frac{1 - f \cdot \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta + f} + 0,35 \right), \text{ при } \delta \cdot \operatorname{tg} \beta > h,$$

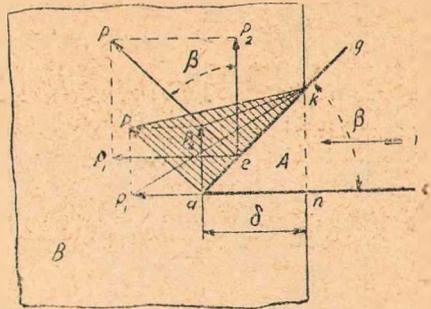


Рис. 9

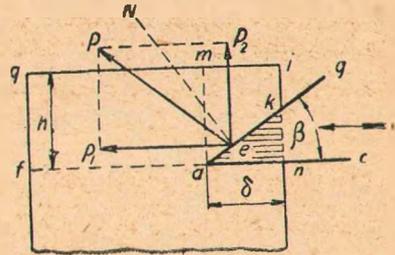


Рис. 10

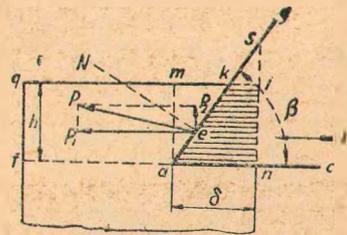


Рис. 11

и, обозначая через P_0 усилие резания:

$$5) P_0 = K_{ск} \delta + K_{ск} \frac{\delta^2 \operatorname{tg} \beta}{2}, \text{ при } \delta \cdot \operatorname{tg} \beta < h,$$

$$6) P_0 = K_{ск} \delta + K_{ск} h^2 \left(\delta - \frac{h}{2 \operatorname{tg} \beta} \right), \text{ при } \delta \cdot \operatorname{tg} \beta > h.$$

Приводимая проф. М. А. Дешевым диаграмма изменения усилия резания P_0 представляется в виде, очень схожем с известными диаграммами проф. Тимме. Основное в них—это спад давления до нуля при образовании элемента стружки (рис. 12).

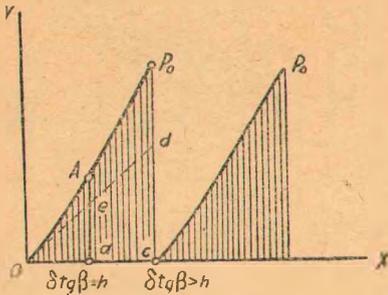


Рис. 12

деформации древесины под влиянием сжатия ее грудью резца.

При этом получают два новых уравнения:

$$l = \delta \cdot \operatorname{tg} \beta, \text{ при } \delta \cdot \operatorname{tg} \beta < h, \text{ и } l = 2 \left(h - \frac{h^2}{2 \delta \operatorname{tg} \beta} \right), \text{ при } \delta \cdot \operatorname{tg} \beta > h.$$

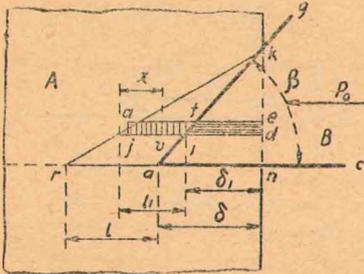


Рис. 13

4. Однако этих положений и формул еще не достаточно для расчета, и проф. М. А. Дешевой рассматривает явление «локализации в толще древесины деформаций, вызываемых давлением передней грани резца на стружку» (рис. 13). В связи с принятыми положениями 1 и 2, изложенными выше, проф. Дешевой доказывает, что затухание деформации пойдет также по закону прямой K , при чем также получается треугольник *пка*, в пределах которого происходят

5. Далее, проф. М. А. Дешевой составляет для каждого случая резания ряд дополнительных уравнений, исходя из условий возможных разрушений (рис. 14): а) скалыванием в плоскости *ad*, или б) отрывом стружки *уа* в плоскости резания *fn* или, наконец, в) путем изгиба элемента стружки силой P_2 , доставляющей момент относительно плоскости *ad*. Получаются шесть сложных громоздких уравнений.¹ Решая их по совокупности с предыдущими формулами, и определяя для каждого случая «величину δ ,

пужно остановиться на наименьшем значении. Оно определит тот характер разрушения стружки, который наступает раньше других. По этому значению δ можно определить и соответствующую величину усилия резания».

Таков в общих чертах подход к расчету силы резания P_0 . Решение вопроса еще более усложняется при наличии боковых стенок пропила и учете затупления резца. Однако вся эта сложность могла бы быть оправдана верностью решения вопроса, правильностью основных положений, из которых вытекают пронизывающие все расчеты формулы. К сожалению, этого нет. Основные положения не вытекают из практики, вымышлены и те треугольники, из которых проф. М. А. Дешевой стремится решить вопросы реального резания материальной древесиной. Остановимся детальнее на этих вопросах.

1. Проф. М. А. Дешевой отрицает усадку стружки. Только при этом положении он получает в точке *K* (рис. 9) давление, равное нулю.

Возьмем определение усадки стружки в ряде трудов по теории резания металлов. Проф. В. А. Кривоухов — Обработка металлов резанием: «Стружка

обычно сильно „садится“, т.е. укорачивается по своей длине. Так, например, если мы обозначим длину пути, пройденного резцом, через L , а длину стружки через L_1 , то для стали $\frac{L_1}{L}$ почти $= 0,5$ “. Это соотношение и называется усадкой стружки.

Проф. А. Н. Челюсткин — Теория резания: „При стружках скалывания Тимме всегда замечал, что длина стружки значительно меньше длины пути, проходимого резцом. Это явление он назвал усадкой стружки. Коэффициент усадки, т.е. отношение длины стружки к длине пройденного резцом пути, оказывается около $0,5 - 0,6$ “.

Проф. С. Ф. Глебов — Теория наивыгоднейшего резания металлов: „Длина снимаемой стружки, как замечено еще Тимме, оказывается значительно меньше длины пути, проделанного резцом по поверхности обрабатываемого предмета, т.е. $L < L_0$ (рис. 15). Отношение $\frac{L}{L_0} = K$ называется коэффициентом усадки. Взяв вместо длины всей стружки длину одного ее элемента l , а вместо длины пути резца — длину хода резца δ на один элемент стружки l , найдем:

$$K = \frac{L}{L_0} = \frac{l}{\delta} = 0,5 + 0,7$$

Остановимся теперь на рассуждениях проф. М. А. Дешевого на стр. 171 его курса „Механическая технология дерева“ и вспомним, что первое положение, принятое проф. Дешевым, исходит из отрицания усадки стружки. Проф. М. А. Дешевой пишет: „Что касается длины l выжимаемого элемента, то здесь нужно отметить, что при сжатии древесины поперек волокон разрушение начинается, когда образец уплотняется на $50-70\%$ его начальной длины δ . Если принять эту норму, то можно приблизительно считать длину отделяемого элемента стружки $l = 0,66\delta$ “, т.е., короче говоря, $\frac{l}{\delta} = 0,5 - 0,7$.

Сопоставляя это рассуждение и цифровой результат с изложенным выше, мы видим, что $\frac{l}{\delta}$ и по понятию и по величине ничем не отличается у проф. Дешевого от коэффициента усадки у проф. Кривоухова, Тимме, Челюсткина, Глебова и др. На 51 стр. у проф. Дешевого усадки нет, а на стр. 171 появляется четкий коэффициент усадки стружки и по понятию и по величине, принятой у металлургов.

К чему приводит в дальнейшем это противоречие, это неверное отрицание усадки стружки? Так как давление у точки K равно нулю, и закон изменения давлений начертан произвольно проф. Дешевым по закону прямой, то получается, что и локализационная линия будет идти по прямой, отклоняющейся от точки K по чертежу влево. В результате получаем треугольник rka (рис. 13) с основанием на линии реза и с вершиной на груди резца в точке соприкосновения груди с древесиной. Рассмотрим, что говорит проф. Тимме, возражая проф. Треска.

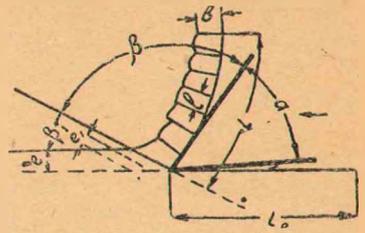


Рис. 15



Рис. 16

Рис. 17

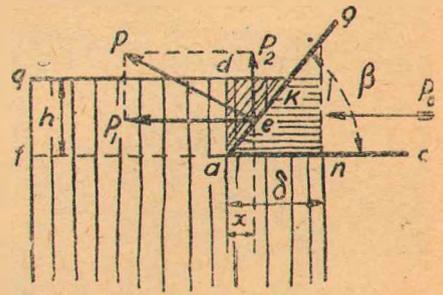


Рис. 18

Треска, рассматривая проникновение резца в металл (рис. 17 и 18) и оставившись на сжатии металла грудью резца, указывал, что оно распространится не на все частицы обрабатываемого предмета, а только на ближайшие к месту касания, ограничивая свое действие определенной длиной x . Треска при этом предполагал, что указанная длина x имеет силу для всей глубины e снимаемого слоя. „Тимме указывает, что это было бы правильно, если бы снимаемый слой имел внизу надрез $a > x$. Поскольку же такого надреза нет, сжатие

будет распространяться только в пределах угла β (рис. 16), следовательно, от величины x на поверхности слоя до нуля у основания его" (проф. Глебов). Это положение проф. Тимме доказал экспериментально постановкой специаль-

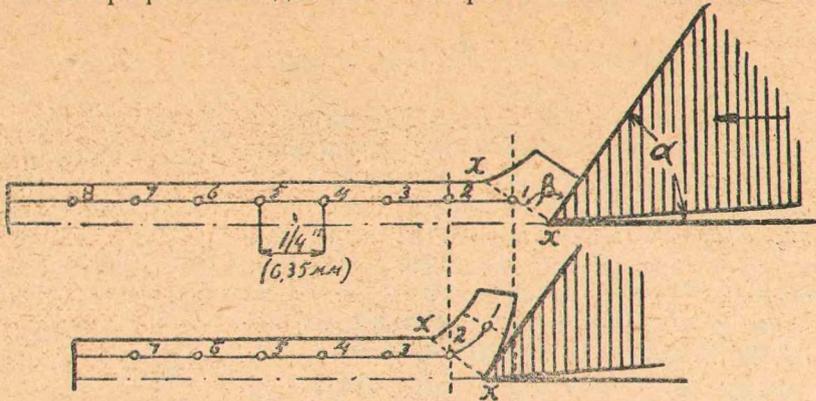


Рис. 19. Образование стружки при обработке свинца

ных опытов: „Посредине толщины снимаемого слоя на отполированной блестящей поверхности куска свинца была начерчена прямая линия и разделена на равные части 1—2, 2—3, 3—4 и т.д.— каждая в 6,35 мм. Затем были установ-

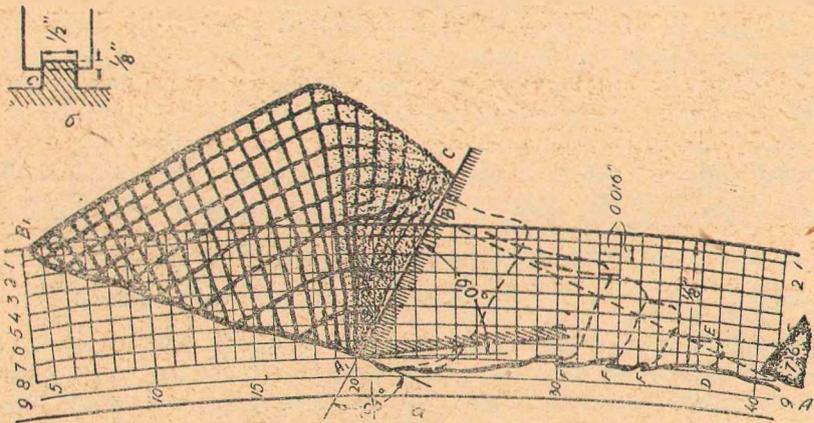


Рис. 20 Схема образования стружки по Никольсону

лены резцы, сначала с углом резания $\alpha = 45^\circ$; а потом $\alpha = 90^\circ$. Резцам сообщалось самое медленное движение. Под влиянием давления резца вся боковая поверхность свинца в пределах угла действия β представлялась морщинистой, тусклою вследствие сжатия частиц.. расстояние 2—3 осталось „неизменным“ (рис. 19) (проф. Челюсткин).



Рис. 21

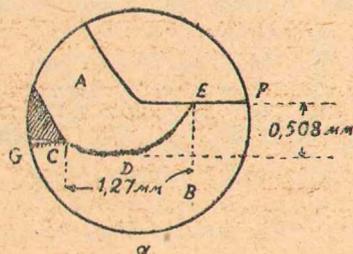


Рис. 22

Если мы теперь сравним зону затухания, как то дают практика и проф. М. А. Дешевой, то мы убедимся что треугольник проф. М. А. Дешевского стоит вверх ногами по сравнению с тем, что дают опыты проф. Тимме, проф. Никольсона (рис. 20), микрфотографии Усачева (рис. 21), Коккера (рис. 22) и т. д. Если мы обратимся к экспериментальному материалу ЦНИИМОД'а, то согласно

опытам инж. Ф. М. Манжоса (см. „Лесопиление и деревообработка“, № 7—8 за 1933 г.) наблюдаем из рассмотрения полученных стружек при строгании „явление осаживания стружки“.

Если просто снять стружку вдоль волокон ручным фуганком, проведя предварительно две риски на определенном расстоянии одна от другой, то можно убедиться что $K \approx 5\%$. Это легко проделать каждому и удостовериться, что усадка существует.

Проделанные в АЛТИ опыты на прессе Амслера показали, что при внедрении реза в древесину (рис. 23) получаем глубоко распространяющуюся деформацию растяжения и изгиба за линией реза по лезвию и деформацию сжатия под резцом, при чем граница затухания деформаций имеет общий характер с аналогичным явлением в металле (см. опыты Коккера). Снимки (рис. 24 и 25) подтверждают то же явление, что видно по искаженной сетке, нанесенной на древесину, в которую врезался резец. Площадка действия грудки реза ясно видна на рис. 23, 24 и 25.

Усадку нельзя отрицать. А если так, то, учтя противоречия в самой работе проф. Дешевого, надо прийти к выводу о том, что основное первое положение его не верно.

Оно не верно также и потому, что нет никакого основания полагать распределение давления по закону прямой. С целью изучения деформаций, происходящих при резании как в обрабатываемом предмете, так и резце, Коккер (1922 г.) исследовал в поляризованном свете процесс резания прозрачного целлюлоидного диска стеклянными и стальными резцами. Подобный метод применяется при изучении деформаций оптическим путем в прозрачных моделях различных конструкций (тоннели, мостовые фермы и т. п.).

Опыты Коккера показали, что точка приложения силы при действии последней на поверхность АВ (рис. 26) есть касательная к эллипсам деформаций сжатия (вправо от точки приложений силы) и эллипсам деформации растяжения (влево от точки приложения силы).

На рис. 27 показано распределение напряжений на поверхности обрабатываемого материала при работе строгального реза. Как видим, ничего общего с прямой распределение напряжений не имеет. Об этом же говорят опыты Никольсона и ряд других. Если учесть анизотропное волокнистое строение древесины, то станет понятной невозможность изменения давлений по закону прямой. Подогнутые волокна создают максимум наслаения одного волокна на другое не при

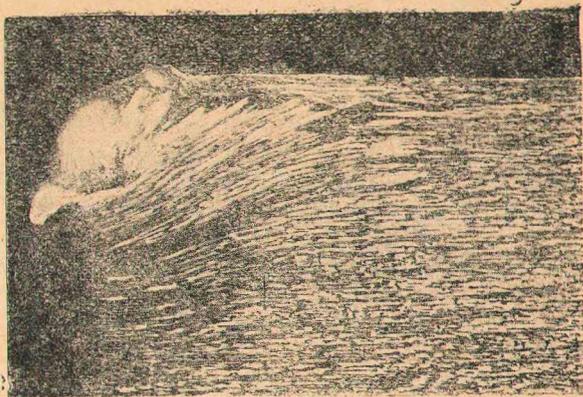


Рис. 23

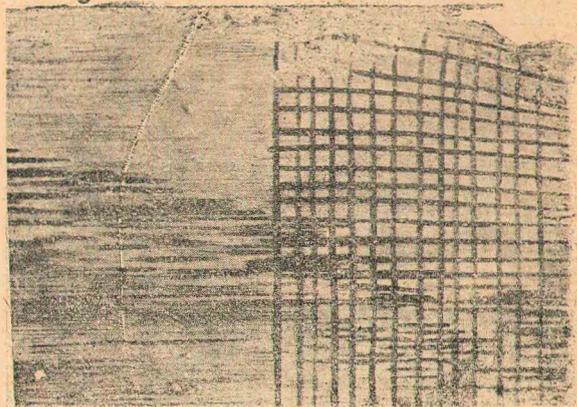


Рис. 24

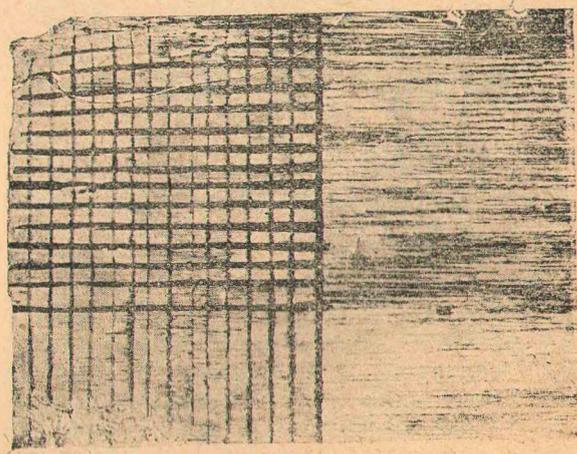


Рис. 25

лезвии реза, не в начале стружки, а где-то в средней части грудки. Здесь естественно и будет максимальное давление, спадающее в обе стороны по некоторой кривой. Законы прямой — закон пропорциональности — закон Гука. Явление же резания происходит в условиях разрушения древесины, появляющаяся усадка говорит об остающихся деформациях, следовательно закон Гука перестает здесь действовать, и, следовательно, распределение давления не идет по закону прямой.

2. Переходим ко второму положению проф. Дешевого, построенному на началах закономерности явления, при котором „не должно быть раз-

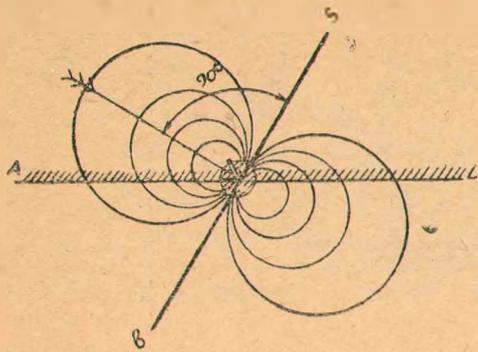


Рис. 26

четы проф. Зворыкина, есть функция от остальных действующих сил. Здесь необходимо оговориться, что формула для вертикальной силы P_2 , учитывающая трение по груди реза:

$$P_2 = \frac{1 - f \cdot \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta + f} P$$

(см. Дешевой, стр. 54) — формула не новая. Она принадлежит проф. Зворыкину.¹

Останавливаясь на работе срезания и на работе деформации стружки, проф. С. Ф. Глебов говорит: „Каждая из этих двух составных частей управляется собственными законами и изменяется в разных масштабах, а иногда и разных направлениях под действием одной и той же общей причины“... „Заслуга разделения

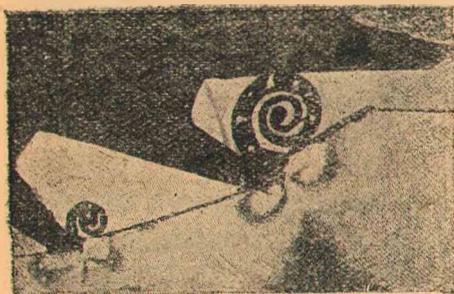


Рис. 27. Работа фрезы по Коккеру

величины давления на две части, резко различные по своему характеру, принадлежит стокгольмскому профессору Селлегрену (1896 г.)... „Дальнейшее широкое развитие эта точка зрения получила в работах немецкого проф. Фридриха (1909, 1914 и 1928 гг.), которому принадлежит очень ценная и в основе правильная идея, что одна из указанных двух составных частей давления на резец является функцией объема снятой стружки, тогда как вторая есть функция ее поверхности“.

„Наша точка зрения, которую мы логически проводим в настоящей книге (проф. С. Ф. Глебов — Теория невыгоднейшего резания металлов, А. Б.), представляет собою дальнейшее развитие и переработку идей Селлегрена и Фридриха“.

В капитальной работе проф. С. Ф. Глебова в дальнейшем развивается динамическая тепловая теория стойкости реза, построенная на развитии начал Селлегрена и Фридриха.

Разделение работы резания и работы деформации проводится мною в изданном Дреухимто конспекте лекций по теории резания, куда я направляю интересующихся этим вопросом. Здесь же отмечу лишь следующее. Опыты ЦНИИМОД (т. Манфос и Калинин) показали по замерам, произведенным микрооптическим способом, что радиус закругления остроотточенного реза, правленного оселком, равен 0,003 мм. После пропуска 500 пог. м стружки дуба мощность возросла на 25%, при увеличении радиуса затупления до 0,035 мм.

Совершенно понятно, что увеличение расхода мощности за счет изменения работы деформации стружки произойти не могло, так как грудь зуба какой была, такой осталась, а также не изменялись толщина стружки и угол, под которым сила сжатия действовала на волокно. Не изменилось и распределение давлений по груди зубца. Что же изменилось? Изменилось трение от упругоподнятых закругленным лезвием волокон по стенке лезвия, и увеличилась сила перерезания волокон в плоскости раздела. Эта увеличившаяся горизонтальная сила в плоскости раздела ничего общего не может иметь с горизонтальной составляющей максимального давления, даже если полагать закон изменения этого давления по прямой, как то делает проф. М. А. Дешевой, чего, конечно, также быть не может, о чем говорилось выше.

Приводимая проф. Дешевым зубчатая диаграмма изменения силы резания (рис. 12) находится в полном противоречии с экспериментальными материалами проф. Никольсона, Д. Смита, Стенсона и Гейду, о которых говорилось выше.

Этот разрыв с практикой виден также по тем примерам, которые приводит проф. М. А. Дешевой, иллюстрируя расчет по своим формулам.

Опыты М. Мейера при изменении углов резания показали, что на 1° изменения угла резания удельная работа меняется на $0,055 - 0,075 \text{ кгм/см}^3$ разрыхляемой древесины. Этот же результат дают опыты ЦНИИМОД. Вместе с тем, если взять примеры резания в торец, приводимые проф. Дешевым, то имеем:

при $\angle\beta = 90^\circ$ $K = 2,52$; при $\angle\beta = 75^\circ$ $K = 2,38$; при $\angle\beta = 45^\circ$ $K = 2,02$.

Это дает на 1° изменения угла резания изменение удельной работы примерно на $0,0093$, т.-е. в $6-8$ раз меньше практических показателей.

Отмечуеще совершенно невероятный метод сравнения получаемых результатов для K с коэффициентами Данфера $K = 10 - 25$ или, что вернее, с коэффициентами Гартига.

Коэффициенты $10 - 25$ справедливы только для частных случаев опытов Гартига. Гартиг исходил из принципа пропорциональности между давлением и подачей на резец, проф. Дешевой доказывает противное положение, что правильно, и дает расчетные формулы для каждого конкретного случая резания. А в результате „переменная удельная работа“ сравнивается в порядке подкрепления вывода со „стабильным коэффициентом K “. Вместе с тем современные опыты ЦНИИМОД, лаборатории проф. Заксенберга, Буэса и др. дают колебания в значениях K для одной и той же породы и состояния от 3 до 18 и выше — в зависимости от конкретных условий распиловки. Разрыв основных рабочих гипотез проф. М. А. Дешевого с практикой, расхождение в результатах расчетов с экспериментальными данными требуют коренного пересмотра вопроса в целом.

Основные положения моих аналитических оформлений удельной работы K

1. Влияние на напряжение сжатия изменения угла, составляемого силой резания с направлением волокон, учитывается графиком Флаксермана.

2. Этот же график используется и для определения напряжения среза под углом к волокнам, но так как напряжение среза меняется в обратном отношении, чем напряжение сжатия, то пользование графиком идет не по углу, составленному силой с направлением волокон, а по дополнительному углу до 90° .

3. Для первичных выводов угол резания принимается в 90° , а в дальнейшем вводятся экспериментальные поправки по опытам М. Майера, ЦНИИМОД и др. Эти поправки дают уменьшение K на каждый градус уменьшения угла резания против 90° на $0,06$ для мягких пород и $0,07$ — для твердых пород.

4. Угол наклона принимается для основного вывода в 14° на основе тех же опытов (см. п. 3). При этом угле мощность имеет наименьшую величину. Здесь при остроотточенном резце можно полагать отсутствие поджима со стороны волокон на спинку резца. При углах наклона, отличных от 14° , вносится поправка в сторону увеличения K на $0,09$ для мягких пород и $0,11$ — для твердых пород на каждый градус различия фактического угла наклона от 14° .

5. Глубину проникновения резца по линии врезания, при которой происходит отделение элемента стружки, принимаю, в соответствии с опытами Файхта (а также и Тимме), равной корню квадратному из глубины слоя, т.-е. $\gamma = \sqrt{\delta}$.

6. Учитывая процесс резания, происходящий при рабочих скоростях, считая переход волнистой линии давлений Никольсона в линию, почти параллельную оси абсцисс. В силу этого принимаю при расчетах полные напряжения разрушения по данным Файхта.

7. Учет затупления производится по экспериментальным данным Фишера, Файхта, ЦНИИМОД.

8. Вывод формул получается из составления уравнений работы и мощности для четырех основных элементов процесса:

- а) работы деформации при смятии поперечного сечения стружки грудью реза,
- б) работы перерезания волокон узкой кромкой реза,
- в) работы перерезания древесины боковыми кромками реза,
- д) работы при преодолении трения опилок о стенки пропила.

9. При круговом резе учитывается средняя толщина стружки, угол поворота реза, при котором эта толщина получается, и напряжение среза и сжатия, под этим углом происходящие.

Подробный вывод имеется в изданном Оргбюро Вдrevнито конспекте лекций „Резание как технологический процесс“, читанных в АЛТИ.

Ниже привожу методику расчета по моим формулам применительно к современным опытам К. Буэса, М. Мейера, Ф. М. Манжоса и другим материалам ЦНИИМОД.

Правильность опытов будет стоять в связи со степенью сходства результатов, доставляемых построениями теории, и непосредственными данными опыта.

Основные обозначения

$K_{сж \perp}$ — напряжение сжатия нормально к направлению волокон;

$K_{ср \perp}$ — напряжение скалывания нормально к направлению волокон;

$K_{ср \parallel}$ — напряжение скалывания тангентально к направлению волокон;

β — угол резания;

i — угол наклона или задней заточки;

m — поправочный коэффициент, учитывающий влажность древесины по Файхту.

(Значения $K_{сж \perp}$, $K_{ср \perp}$, $K_{ср \parallel}$ и m см. Nutte, Производственный том II под редакцией ломоносовского института: коэффициенты Файхта).

γ — угол поворота ножа, считая от вертикальной оси, соответствующий получению средней толщины стружки $h_{ср}$;

$K_{ср \gamma}$ и $K_{сж \gamma}$ — напряжения скалывания и сжатия, соответствующие положению, при котором получается средняя толщина стружки;

K — удельная работа или динамическое давление;

S — толщина пилы или ножа в мм;

b — ширина пропила в мм;

H — высота пропила или снимаемость слоя в мм;

$$\alpha = \frac{K_{сж \gamma}}{K_{сж \parallel}}; \alpha_1 = \frac{K_{ср \gamma}}{K_{ср \perp}}$$

b_1 — поправочный коэффициент на 1° изменения β против 90° ;

$b_1 = 0,055 \div 0,065$ для мягких пород;

$b_1 = 0,065 \div 0,075$ для твердых пород;

c — поправочный коэффициент на 1° изменения i против 14° ;

$c = 0,09$ для мягких пород и

$c = 0,1 - 0,11$ для твердых пород;

δ — подача на 1 рез в мм;

a — расстояния от центра вала до нижней пласти обрабатываемого бруска (высота подъема стола над центром).

При спущенном столе

$$a = 2,5 \sqrt{D} + 0,05 D,$$

где D — диаметр пилы в мм.

Значения α , α_1 по углу γ и $90 - \gamma$ определяются по графику Флаксермана, где по оси абсцисс отложены углы γ , а по оси ординат в процентах α и α_1 (см. А. Н. Флаксерман, ЦАГИ, вып. 78, 1931 г. «Влияние наклона волокон на механические свойства древесины сосны»).

1. Рамные пилы (прямой рез)

Формула для удельной работы

$$K = m \left[K_{сж \perp} = \frac{3K_{ср \parallel} \sqrt{\delta}}{b} + \frac{K_{ср \perp}}{\sqrt{\delta}} \cdot \frac{S}{b} + \frac{0,06 K_{сж \perp} H}{b} \right] - (90 - \beta) b_1 + (i - 14) c.$$

Пример расчета

Данные по опытам К. Буэса.

Сосна возд.-сухая; $b = 3,1$ мм; $S = 1,6$ мм, шаг $t = 22$ мм, ход рамы $H' = 550$ мм; скорость подачи $U = 2,44$ м/мин; число оборотов $n = 296$ в 1 мин.; число пил $m_1 = 7$, высота бруска $H = 150$ мм; $N_{рез} = 8,78$ квт; $\angle \beta = 83$, $\angle i = 44^\circ$.

Определяем значение K непосредственно из опытов:

$$K = \frac{75 \cdot N_{рез} \cdot 1,36 \cdot 60}{b \cdot H \cdot U \cdot m_1} \cong 6,4.$$

Проверяем теоретическую формулу. Для этого определяем

$$\delta = \frac{2440}{550 \cdot 296} = 0,33 \text{ мм}; \quad \sqrt{\delta} = \sqrt{0,33} = 0,57 \text{ мм}.$$

По таблицам Файхта

$$K_{сж \perp} = 0,5; \quad K_{ср \#} = 0,63; \quad K_{ср \perp} = 2,1; \quad m = 1.$$

Откуда

$$K = 0,5 + \frac{1,89 \cdot 0,57}{3,1} + \frac{21}{0,57} + \frac{1,6}{3,1} + \frac{0,03 \cdot 0,5 \cdot 150}{3,1} -$$

$$-(90 - 83) \cdot 0,06 + (44 - 14) \cdot 0,09 = 6,53 \text{ против } 6,4 \text{ по опыту}.$$

Ниже приводятся номера опытов и сравнения теоретических результатов с опытными (таблица 1).

Таблица 1

№ опытов	Данные К. Бузса	Данные моего расчета
324	9,4	8,8
327	7,4	7,3
328	7,8	7,6
334	6,7	6,7
340	6,1	6,3
343	6,9	6,5
345	7,8	6,4
352	11,2	11,0
353	11,0	10,0
358	8,7	8,3
359	9,0	8,5
361	9,2	9,0
109	9,0	8,5
115	9,4	9,8
824	7,7	7,6
882	9,1	8,7
884	8,5	7,6
892	8,1	7,8
963	9,8	8,6
968	10,5	9,1
977	14,0	12,7
979	12,1	11,6
980	11,0	11,3
983	11,8	11,9
984	10,8	10,9
986	10,3	10,6
1019	9,1	10,3
Итого опытов 27	252,4	243,4

$$K_{ср} = \frac{252,4}{27} = 9,3 \rightarrow \frac{243,4}{27} = 9.$$

Расхождение в 3%.

(Расчеты проведены студентами Архангельского Лесотехнического института).

Как видим, значения теоретического расчета близко подходят к экспериментальным результатам. При наличии приведенных первоисточных материалов читатели смогут провести на производстве самостоятельную проверку, при чем надо лишь помнить, что при ненормальных разводах в ту или иную сторону и углах $i < 14^\circ$, что в практике почти не наблюдается, расхождения будут получаться до 20—30% от воздействия неучтенных вторичных факторов резания. Эти факторы, как, например, отжим развода, не учтены теоретически. Экспериментально же установлен наилучший развод 0,5—0,6 мм на сторону для мягких пород и 0,4— для твердых пород.

II. Круглые пилы (криволинейный рез)

Формула для удельной работы

$$K = m \left[K_{сж \gamma} + \frac{3 K_{ср \#} \sqrt{h_{ср}}}{b} + \frac{K_{ср \gamma}}{\sqrt{h_{ср}}} \cdot \frac{S}{b} + \frac{0,06 K_{сж \perp} H}{b} \right] - (90 - \beta) b_1 + (i - 14) c.$$

Порядок расчета

1. Определяют $h_{ср} = \frac{57 \cdot H \delta}{K \left(\arcsin \frac{H+a}{K} - \arcsin \frac{a}{R} \right)}$.
2. Определяют $\sin \gamma = \frac{h_{ср}}{\delta}$, откуда находим $\angle \gamma$.
3. По углу γ по графику Флаксермана находим α , а затем и $K_{сж \gamma} = \alpha K_{сж \#}$.
4. По углу $90 - \gamma$ по графику Флаксермана находим α_1 и $K_{ср \gamma} = \alpha_1 K_{ср \perp}$.
5. Затем определяется K по приведенной выше формуле.

Пример по М. Майеру

Дана сухая ель, $m = 1,1$, $D = 500$ мм, $Z = 48$, $i = 32$ мм; $\beta = 60^\circ$, $\angle i = 22^\circ$.
 $S = 2,5$ мм, $b = 3,5$ мм, $U = 3,18$ м/мин, $n = 1260$, $H = 50$ мм, $K = 1,8$ по опыту.

Проверка теоретической формулы:

$$1) \delta = \frac{1000 U}{Z \cdot n} = 0,052 \text{ мм}; \quad 2) a = 2,5\sqrt{D} + 0,05 D = 80 \text{ мм.}$$

$$3) h_{cp} = \frac{57 \cdot 50 \cdot 0,052}{250 (\arcsin \frac{50+80}{250} - \arcsin \frac{80}{250})} = 0,0468; \quad 4) \sin \gamma = \frac{0,0468}{0,052}, \text{ откуда } \gamma = 64^\circ.$$

5) По графику находим $\alpha = 0,18$ и $K_{сж,\gamma} = 3,9^\circ \cdot 0,18 = 0,7$.

6) По графику находим $\alpha_1 = 0,52$, соответственно

$$90 - \gamma = 90 - 64 = 26^\circ \text{ и } K_{ср,\gamma} = 2,73 \cdot 0,52 = 1,42.$$

$$7) \sqrt{h_{ср}} = 0,23.$$

$$8) K = \left(0,7 + \frac{3 \cdot 0,63 \cdot 0,23}{3,5} + \frac{1,42}{0,23} \cdot \frac{2,5}{3,5} + \frac{0,06 \cdot 0,36 \cdot 50}{3,5} \right) \cdot 1,1 - (90 - 60) \cdot 0,06 + (22 - 14) \cdot 0,09 = 4,99 \text{ вместо } 4,8 \text{ по опыту.}$$

Ниже приводится таблица 2, дающая результаты подсчета и основные данные опыта. Необходимо оговориться при этом, что пользование графиком Флаксермана для всех пород должно дать некоторые расхождения в расчете, так как график составлен только для сосны. Практически необходимо ЦНИИМОД проработать такие графики для всех пород.

Таблица 2

Породы	D	S	b	H	β	δ	$K_{расч}$	$K_{опыт}$
Ель	500	2,5	3,5	60	60	0,52	4,64	4,8
Дуб	—	—	—	—	—	—	7,00	6,8
Ель	—	—	—	40	—	0,071	5,40	5,2
»	—	—	—	—	—	0,045	6,00	5,5
»	—	—	—	—	—	0,036	0,02	6,1
»	—	—	—	—	—	0,027	6,72	6,9
Дуб	—	—	—	—	—	0,071	6,80	7,3
»	—	—	—	—	—	0,045	7,22	7,9
»	—	—	—	—	—	0,036	8,20	8,1
»	—	—	—	—	—	0,027	8,60	8,7
Ель	—	—	—	10	—	0,037	7,00	7,3
»	—	—	—	40	—	—	6,34	6,3
»	—	—	—	80	—	—	6,26	6,2
Угол $i = 22^\circ$ для всех опытов								
Ель	400	1,8	2,8	47	77	0,03	8,73	9,0
»	—	—	—	—	68	—	8,20	8,4
»	—	—	—	—	60	—	7,71	8,1
Угол $i = 15^\circ$ для всех опытов								
Ель	—	—	—	52	—	7,28	7,6	—

Таким образом усматриваем, что расхождение опыта с теоретическим материалом незначительно. Во всяком случае надо считать, что сравнение результатов „новой теории“ проф. Дешевого с коэффициентами Денфера, Гартига, где $K = 10-12$ для хвойных пород и $K = 15-25$ для твердых пород, не выдерживает критики ни по величине коэффициентов, ни по их характеру.

III. Примеры и формулы для строгальных станков

$$K = m \left(K_{ср,\gamma} + \frac{K_{ср,\gamma}}{\sqrt{h_{ср}}} \right) - (90 - \beta_1) \cdot b_1 + (i - 14)$$

Порядок расчета тот же, но при малых углах расчет $K_{ср,\gamma}$ вести надо

$$K_{ср,\gamma} = K_{ср,\parallel} + \frac{K_{ср,\perp} - K_{ср,\parallel}}{90} \cdot \gamma.$$

Пример по опытам инж. Манжоса (ЦНИИМОД)
 Сухая сосна, $H=2$ мм, $\delta=1,55$ мм, $D=120$ мм, $b=100$ мм, $n=10$ м/мин,
 $v=20,7$ м/сек, $\angle\beta=55^\circ$, сила резания $P=3,00$, $\angle i=15^\circ$.

Проверка формулы

$$1) h_{ср} = \frac{57 \cdot 2 \cdot 1,55}{60 (90 - \arcsin \frac{60-2}{60})} \cong 0,2; \quad 2) \sin \gamma = \frac{0,2}{1,55}$$

откуда $\gamma=7,5^\circ$.

3) По графику Флаксермана $\alpha=0,95$ и $K_{сж\gamma}=2,8 \cdot 0,95=2,65$.

$$4) K_{ср\gamma} = 0,37 + \frac{2,1 - 0,37}{90} \cdot 7,5 = 0,51.$$

$$5) K = 1,1 (2,65 + \frac{0,51}{0,45}) - 0,065 (90 - 55) = 1,98,$$

$$\text{откуда } P = \frac{KbNU}{v} = \frac{1,98 \cdot 100 \cdot 2,10}{20 \cdot 7 \cdot 60} = 3,2 \text{ кг,}$$

а по опыту 3,0 кг, т.-е. расхождение с расчетом около 7%. Тот же результат дают и другие пересчеты. Например, опыты инж. Бондаренко (Киевское отделение ЦНИИМОД) дают:

$b=200$ мм; $H=2$ мм; $n=2200$, $Z=2$; $D=90$ мм; $U=10,3$ м/мин;

$N_{рез}=0,663$ квт, $\angle\beta=50^\circ$, $\angle i=15^\circ$, $K=1,2$, сосна сухая.

Проверка по теоретической формуле:

$$\delta = \frac{10300}{2200,2} \cong 2,34 \text{ мм; } h_{ср} = 0,35 \text{ мм; } \sin \gamma = \frac{0,35}{2,34} = 0,15, \text{ откуда } \gamma \cong 9^\circ,$$

после чего находим $K_{сж\gamma}$ и $K_{ср\gamma}$: $K_{сж\gamma}=2,75$; $K_{ср\gamma}=0,47$;

$$K = 1,1 \cdot (2,75 + \frac{0,47}{0,59}) - 40 \cdot 0,065 = 1,3 \text{ вместо } 1,2 \text{ по опыту.}$$