

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

БЕЛОРУССКИЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени С. М. КИРОВА

---

(На правах рукописи)

*Аспирант КОЗЕЛ М. М.*

**СИЛА РЕЗАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СКОРОСТИ  
РЕЗАНИЯ И ДИНАМИЧЕСКИХ УГЛОВ ВСТРЕЧИ  
ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ДРЕВЕСИНЫ (СОСНЫ)**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

*Научный руководитель, доктор  
технических наук, профессор  
А. Л. БЕРШАДСКИЙ*

МИНСК — 1956

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

БЕЛОРУССКИЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени С. М. КИРОВА

---

(На правах рукописи)

*Аспирант КОЗЕЛ М. М.*

**Сила резания в зависимости от скорости  
резания и динамических углов встречи  
при фрезеровании древесины (сосны)**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

*Научный руководитель, доктор  
технич. наук, профессор  
А. Л. БЕРШАДСКИЙ*

МИНСК — 1956

549-ар.

Работа выполнена на кафедре механической технологии древесины Белорусского лесотехнического института имени С. М. Кирова.

Экспериментальная часть работы была выполнена в лаборатории «Станки и инструменты».

## В В Е Д Е Н И Е

Поставленная Советским правительством и Коммунистической партией задача по ликвидации отставания лесной промышленности от растущих потребностей народного хозяйства успешно решается.

Стремление к повышению производительности труда привело к широкому распространению как скоростного резания металлов, так и скоростного пиления древесины.

Особо важное значение скорость резания имеет для древесины, где этот фактор является не только средством увеличения производительности, но и средством для достижения лучшего качества обработки.

Успехи машиностроения в последние годы, стремление повысить производительность и улучшить качество, механизация и автоматизация производственных процессов — все это в значительной степени способствовало распространению высокооборотных станков. Увеличение числа оборотов режущего инструмента дало возможность повысить скорости резания сначала до 30—50 м/сек., затем до 70—80 м/сек., наконец, в отдельных случаях до 100 м/сек. и выше.

Фрезерование является одним из наиболее распространенных видов обработки древесины.

Однако научным исследованиям данного вопроса посвящена очень незначительная часть работ, большинство из которых проводилось при малых скоростях (до 3 м/сек.), и ни одной работы нам неизвестно, которая была бы проведена при скоростях фрезерования выше 50 м/сек., несмотря на то, что такие скорости имеют место на производстве.

Такое отставание исследований в области фрезерования древесины при высоких скоростях можно объяснить значительными трудностями исследований при больших скоростях и отсутствием соответствующей аппаратуры, способной точно отражать все изменения в процессе резания. Теоретические же работы не в состоянии надлежащим образом отразить все изменения, которые происходят в процессе фрезерования древесины при больших скоростях.

Известные нам работы не дают ответа на вопрос, при каких скоростях резания процессы фрезерования будут протекать наиболее рационально с энергетической стороны.

Ввиду важности этих вопросов в работе ставится цель исследовать влияние скорости резания, толщины стружки и динамических углов встречи на величину сил резания при скоростях, близких к 50 м/сек. и значительно превышающих их. Проведенная работа дает возможность ответить на вопрос — при каких скоростях процессы фрезерования протекают с наименьшей затратой энергии, что не давала ни одна из известных нам работ по фрезерованию. Учитывая дополнительно качественную сторону, данная работа устанавливает те скоростные параметры, к которым необходимо стремиться при продольно-торцевом фрезеровании сосны.

Стремление производственников к увеличению скоростей фрезерования не обосновано достаточными теоретическими и экспериментальными положениями. Оно направлено в основном к увеличению производительности и улучшению качества обрабатываемой поверхности. Однако последнее не всегда оправдывается, что выявлено в опытах Н. А. Кряжева (МЛТИ) по исследованию качества фрезеруемой поверхности.

В работе также ставятся вопросы поперечного фрезерования при высоких скоростях (до 50 м/сек. и выше).



Диссертация содержит семь глав.

В главе I дается краткое историческое развитие теории резания древесины.

В главе II даются общие положения и принятая терминология, которые необходимы для понимания работы.

В главе III приводится анализ основных теоретических исследований процесса фрезерования древесины.

В главе IV освещаются основные экспериментальные вопросы исследования процесса фрезерования и влияние основных факторов на эффективность процесса резания с соответствующими комментариями.

В выводах по приведенному обзорному материалу излагается необходимость исследования не развитых в этих работах вопросов, основные из которых: влияние скорости резания выше 50 м/сек., а также динамических углов встречи при разных толщинах стружки при высоких скоростях резания.

В главе V приводится методика исследования. Здесь даются: краткое описание установки, обоснование принятых к исследованию численных значений факторов процесса, принципиальные схемы и описание применяемых в опытах специфических приспособлений, а также излагается теоретическое и эк-



спериментальное исследование инерционности саморегистрирующего киловаттметра и всей установки.

В главе VI приводятся результаты опытов по продольно-торцевому и поперечному фрезерованию и их краткая математическая и корреляционная обработка. В этой же главе приводятся данные по сравнительному качественному исследованию получаемой поверхности и исследование величины контакта задней грани с обрабатываемой древесиной. Последнее явилось необходимым для уяснения причин, которые привели к различному характеру изменения зависимости удельной работы резания от динамического угла встречи с волокнами при фрезеровании по волокнам ( $\psi = 0-90^\circ$ ) и при фрезеровании против волокон ( $\psi = 90-180^\circ$ ). Здесь же приводятся установленные уравнения связи удельной работы резания с факторами, принятыми к исследованию.

Глава VII посвящена выводам по проведенным исследованиям и литературным данным. Здесь же дается физическое обоснование некоторых основных положений полученных результатов опытов.

Объем диссертации — машинописного текста и таблиц 232 стр., графиков и фотографий 65.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные работы проводились на специально оборудованной установке, построенной на базе фрезерного станка по дереву. Подача материала осуществлялась посредством механизма подачи с тянущим троссом, наматываемым на барабан.

Данная установка, соответствующим образом оборудованная, позволила получить четыре скорости резания (38, 45, 65 и 89 м/сек.) и четыре величины подачи (0,48, 1,40, 1,90 и 2,82 мм) на нож для каждой скорости резания (для каждого числа оборотов шпинделя). Всего 16 скоростей подачи.

В качестве режущего инструмента были взяты ножи с прямолинейным лезвием. Ножи крепились в специально изготовленном диске. Участвовал в резании только один нож, второй — служил для балансировки.

Так как диск мог обеспечить только один угол резания ( $60^\circ$ ), то для получения больших углов резания применялась заточка ножа по передней грани.

Для контроля остроты резцов в процессе опытов применялось приспособление, рекомендованное доц. Сурodeйкиным, с измерением силы прокола лезвием киноплетки.

Все опыты проводились при 6-ти динамических углах встречи с волокнами и двух толщинах (2 мм и 7 мм) снимаемого слоя. Получение соответствующих динамических углов встречи достигалось за счет изготовления опытных образцов, вырезан-

ных под углом к волокнам, и закрепления их в специальных захватах.

Образцы для поперечного фрезерования собирались из соответствующих отрезков в тех же захватах.

Подбор составных образцов осуществлялся по внешним признакам и по механическим свойствам.

В опытах применялась одна порода — сосна.

Измерение мощности резания фиксировалось посредством саморегистрирующего киловаттметра, включенного в цепь электродвигателя, диаграммная лента которого была связана с ходом образца-захвата. Длина диаграммы записи мощности могла быть получена 130 мм, 250 мм и 400 мм. На диаграммной ленте имелись отметки реле времени.

Изменение скорости фрезерования осуществлялось сменой шкивов на валу электродвигателя.

Установка предварительно тарировалась.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

### 1. Продольно-торцевое фрезерование.

Влияние средней толщины стружки на удельную работу резания.

Условия опытов: средняя толщина стружки  $e = 0,042, 0,124, 0,167$  и  $0,248$  мм при глубине фрезерования  $H = 2$  мм и  $e = 0,079, 0,232, 0,313$  и  $0,465$  мм — при  $H = 7$  мм.

Приведенные толщины стружек исследовались при 6 динамических углах встречи и 4-х скоростях резания для  $H = 2$  мм и 3-х скоростях резания для  $H = 7$  мм. Полученные результаты опытов, обработанные методами вариационной статистики, позволили установить зависимости удельной работы резания  $K$  от толщины стружки вида:

$$K = \frac{K_{e=1}}{e^m}, \quad (1)$$

где:  $K_{e=1}$  — удельная работа резания при толщине стружки  $e = 1$  мм,  $m$  — показатель степени.

Величина  $K_{e=1}$  меняется в зависимости от скорости резания и динамического угла встречи в пределах от 1,10 до 5,60. Зависимость  $K_{e=1}$  от угла встречи с волокнами с достаточной степенью точности выражена посредством уравнения вида.

$$K_{e=1} = K_{\parallel e=1} + (K_{\perp e=1} - K_{\parallel e=1}) \sin^{\alpha} \phi, \quad (2)$$

где:  $K_{\parallel e=1}$  удельная работа резания вдоль волокон при данной скорости и толщине стружки  $e = 1$  мм.

$K_{\perp e=1}$  — удельная работа резания в торец при данной скорости и толщине стружки  $e = 1$  мм.

$\alpha$  — степенной показатель.

Степенной показатель  $\alpha$  по нашим опытным данным принят:

а) для фрезерования по волокнам  $\alpha$  зависит только от скорости резания  $v$  и выражается уравнением прямой

$$\alpha = 1,552 - 0,0795 V \quad (3)$$

б) для фрезерования против волокон ( $\psi = 90-180^\circ$ ) степенной показатель  $\alpha$  независимая величина, равная, по нашим опытным данным, 1,5.

Математическая зависимость степенного показателя  $m$  (характеризующего интенсивность изменения удельной работы резания от толщины стружки) от скорости резания и динамического угла встречи, имеет следующий вид:

а) для фрезерования по волокнам ( $\psi = 0-90^\circ$ )

$$m = 0,40 - 0,00112 V + 0,1 \cos \psi; \quad (4)$$

б) для фрезерования против волокон ( $\psi = 90-180^\circ$ )

$$m = 0,40 - 0,00111 V + 0,00111 (\psi - 90) \quad (5)$$

$K_{\parallel e=1}$  и  $K_{\perp e=1}$  от скорости резания  $V$  выражаются следующими зависимостями:

$$K_{\parallel e=1} = \frac{411}{V + 33,5} + 0,0687(V + 33,5) - 9,54 \quad (5)$$

и  $K_{\perp e=1} = \frac{7140}{V + 119,5} + 0,269(V + 119,5) - 84,72 \quad (7)$

Общее уравнение связи удельной работы резания от принятых к исследованию факторов, установленное в работе, имеет вид:

$$K = \frac{K_{\parallel e=1} + (K_{\perp e=1} - K_{\parallel e=1}) \sin^\alpha \psi}{e^m}, \quad (8)$$

откуда мощность на резание  $N_p$  и окружное усилие резания  $P_p$  выразились следующими уравнениями связи:

$$N_p = \frac{[K_{\parallel e=1} + (K_{\perp e=1} - K_{\parallel e=1}) \sin^\alpha \psi] b \cdot H \cdot U}{60 \cdot 102 e^m} \text{ кВт.} \quad (9)$$

$$\text{и } P_p = \frac{60 [K_{\parallel e=1} + (K_{\perp e=1} - K_{\parallel e=1}) \sin^\alpha \psi] b H U}{V \cdot e^m} \text{ кг.} \quad (10)$$

Расхождение средне-арифметических опытных значений с рассчитанными по установленным уравнениям связи не превышает 13% (только в двух случаях) и в основном ниже 10%.

2. Поперечное фрезерование.

Исследованию подверглись следующие факторы:



а) толщины стружки—8, 4—толщины стружки при  $H=2$  мм ( $e=0,042, 0,124, 0,161$  и  $0,248$  мм) и 4—при  $H=7$  мм ( $e=0,079, 0,232, 0,313, 0,465$  мм).

б) 4 скорости резания —  $V = 38, 45, 65$  и  $89$  м/сек.

Зависимость удельной работы резания  $K_{\#}$  от толщины стружки  $e$  с достаточной степенью точности выражается уравнениями связи вида:

$$K_{\#} = \frac{K_{\#e=1}}{e^{m_{\#}}}, \quad (11)$$

где:  $K_{\#e=1}$  — удельная работа резания поперек волокон при  $e = 1$  мм.,

$m_{\#}$  — показатель степени.

Величина  $K_{\#e=1}$  меняется в зависимости от скорости резания и глубины фрезерования.

Зависимость  $K_{\#e=1}$  от скорости резания выражается уравнением параболы второго порядка, которое имеет вид:

$$K_{\#e=1} = K_{\text{он}} + BV + AV^2 \quad (12)$$

Зависимость степенного показателя  $m_{\#}$  от скорости резания выражена в виде уравнения прямой:

$$m_{\#} = m_{\#o} + b_1V. \quad (13)$$

Общая математическая зависимость удельной работы резания имеет следующее выражение:

$$K_{\#} = \frac{K_{\text{он}} + BV + AV^2}{e^{m_{\#o} + b_1V}}. \quad (13)$$

Значения коэффициентов в формуле (13) приведены в таблице:

Глубина фрезерования в мм	Коэффициенты	$K_{\text{он}}$	$B$	$A$	$m_{\#o}$	$b_1$
2		0,492	-0,00075	0,0000960	0,539	-0,00144
7		0,227	0,00160	0,0000933	0,543	-0,00116

3. Влияние угла резания:

Условия проведения опытов:  $\delta = 55,5^\circ, 60,0^\circ, 75,5^\circ, 84,0^\circ, 95,5^\circ, V = 89$  м/сек.,  $e = 0,232$  мм,  $\psi = 170,5^\circ, H = 7$  мм.

Обработка полученных опытных данных позволила установить зависимость удельной работы резания от угла резания для вышеприведенных условий, которая имеет вид:

$$K = 0,001391 \delta^{1,92}. \quad (15)$$

Данные исследования позволили установить следующее:  
а) Увеличение  $\delta$  с  $55,5^\circ$  до  $95,5^\circ$  ведет к увеличению удельной работы резания.

б) Влияние угла  $\delta$  на качество получаемой поверхности не обнаружено. Качество фрезеруемой поверхности для принятых условий оставалось почти одинаковым.

Попутные исследования величины контакта задней грани с древесиной позволили установить причину различного характера изменения кривой  $K = f(\psi)$  при фрезеровании по волокнам ( $\psi = 0-90^\circ$ ) и против волокон ( $\psi = 90-180^\circ$ ).

## В Ы В О Д Ы

а) Продольно-торцевое фрезерование.

1. Увеличение толщины стружки во всех случаях ведет к уменьшению удельной работы резания. Интенсивность изменения  $K$  от  $\psi$  отражает степенной показатель  $m$ , который является функцией скорости резания  $V$  и динамического угла встречи  $\psi$ .

2. Удельная работа резания растет с увеличением угла встречи от  $0$  до  $90^\circ$  и падает с увеличением от  $90$  до  $180^\circ$ . Скорость резания и толщина стружки сказывается на перегибе кривой  $K = f(\psi)$ . Закон изменения кривой  $K = f(\psi)$  при фрезеровании по волокнам ( $\psi = 0-90^\circ$ ) отличен от изменения кривой  $K = f(\psi)$  при фрезеровании против волокон ( $\psi = 90-180^\circ$ ).

3) Скорость резания различным образом оказывает влияние на изменение удельной работы резания до  $40-55$  м/сек. и выше этого предела. До  $40-55$  м/сек. удельная работа падает, что соответствует выводам А. К. Петруша (ЛТА); выше этого предела удельная работа растет, что соответствует опытным данным по пиленю круглыми пилами для этого диапазона скоростей (опыты Н. К. Якунина и др.).

При этом оптимальная скорость незначительно зависит от динамического угла встречи с волокнами и более от толщины стружки и находится в пределах  $40-55$  м/сек. для принятых данных.

4. Глубина фрезерования в пределах  $H = 2-7$  мм на удельную работу резания влияния не оказывает. Кривые  $K_{e=1} = f(\psi)$  при  $H = 2$  мм и  $H = 7$  мм, приведенные в результате обработки к одинаковым толщинам стружки  $e = 1$  мм почти накладываются. Имеющиеся расхождения находятся в пределах точности постановки опытов и принятой обработки.

5) Установлена возможность распространения приведенной общей зависимости (8) на скорости порядка 38—20 м/сек. (опыты А. К. Петруша, ЛТА, 1953 гг). Таким образом установленные в работе зависимости для мощности резания (формула 9) и окружного усилия резания (формула 10) могут быть рекомендованы для расчета в пределах скоростей 20—90 м/сек., что дается для таких скоростей впервые.

6) На основании литературных данных и проведенных исследований установлены основные причины, которые привели к различному влиянию скорости резания на удельную работу резания до 40—55 м/сек. и выше этого предела. К основным причинам можно отнести:

а) упругие и остаточные деформации;

б) силы трения;

в) изменение свойств древесины под воздействием быстро нарастающей нагрузки (увеличение временного сопротивления древесины при увеличении скорости разрушения — данные докторов с/х наук М. Л. Леонтьева и Е. М. Знаменского);

г) инерционное сопротивление стружки;

д) различную затупляемость резцов при различных скоростях.

Удельный вес приведенных факторов в общей работе на резание при различных скоростях и различных других параметрах различен, что приводит к тому или другому значению удельной работы резания до скорости 40—55 м/сек. и выше этого предела. Сравнительно малая зависимость деформации (пластической и упругой) от скорости резания при более высоких скоростях (40—90 м/сек.) и увеличение напряженности у лезвия в момент разрушения с ростом скорости резания оказывает решающее влияние на перегиб кривой  $K = f(V)$  при скоростях 40—55 м/сек.

7) Влияние скорости на качество поверхности при фрезеровании вдоль волокон в пределах 38—89 м/сек. не обнаружено. Последняя оказывает влияние при динамических углах встречи  $\varepsilon = 90^\circ$  и близким к ним. Для этих же динамических углов встречи средняя толщина стружки  $s$  в пределах 0,042—0,248 мм и 0,079—0,465 сказывается незначительно. Увеличение скорости резания и уменьшение толщины стружки ведет к улучшению качества фрезеруемой поверхности.

Оптимальные скорости фрезерования (скорости, при которых процесс резания происходит наиболее рационально), незначительно зависят от динамического угла встречи с волокнами и более от толщины стружки. Для продольного фрезерования сосны оптимальной скоростью, исходя из качественных и силовых факторов, для толщин стружек 0,04—0,5 мм можно рекомендовать 45—53 м/сек. (нижний предел для более тол-

стых стружек, верхний—для более тонких). Выше этого предела нет надобности скорость увеличивать, если это не вызвано необходимостью увеличения производительности, так как увеличение скорости фрезерования выше оптимальной приведет к дополнительному расходу энергии.

Для фрезерования с углом встречи  $\psi = 90^\circ$  и близким к ним с целью получения лучшего качества обработки является целесообразным применять более высокие скорости.

#### б) Поперечное фрезерование:

На основании полученных данных по поперечному фрезерованию и их корреляционно-математической обработки можно сделать следующие основные выводы:

1) С увеличением средней толщины стружки удельная работа резания падает во всех случаях. Интенсивность падения  $K_{\#}$ —зависит от скорости и глубины фрезерования, на что указывает степенной показатель  $m_{\#}$  (формула 13).

2) Увеличение скорости от 38 до 89 м/сек. ведет к увеличению удельной работы резания. Основная причина такого явления—значительное увеличение временного сопротивления древесины любым видам нагрузки с ростом  $V$ , а также увеличение инерционного сопротивления стружки при увеличении скорости резания.

3) Глубина фрезерования различным образом сказывается на удельной работе резания при открытом поперечном фрезеровании. При скорости резания 89 м/сек. глубина фрезерования на удельную работу резания в пределах  $H=2-7$  мм влияния не оказывает. При более низких скоростях с увеличением глубины фрезерования удельная работа резания падает. Причина такого явления—наличие сколов и отщепов при таких скоростях; при скорости 89 м/сек. последние устраняются за счет наличия значительного инерционного подпора.

5) С увеличением скорости качество фрезеруемой поверхности улучшается. Уменьшение толщины стружки ведет к улучшению качества. При скорости 89 м/сек. во всех случаях получена удовлетворительная поверхность по чистоте (качеству).

### Условные обозначения

$K$  — Удельная работа резания в  $\frac{\text{кГм}}{\text{см}^3}$

$P_p$  — Касательная сила резания в кГ.

$N_p$  — Мощность на резание в квт.

$\psi$  — Динамический угол встречи с волокнами (угол между направлением касательной, проведенной к

середине дуги врезания и направлением волокон)  
в град.

$\delta$  — Угол резания в град.

$e$  — Средняя толщина стружки в мм,

$V$  — Скорость резания в м/сек.

$U$  — Скорость подачи в м/мин,

$b$  — Ширина фрезерования в мм.

$H$  — Глубина фрезерования в мм.