

А. А. Фомин, В. Г. Гусев, Р. Г. Сафин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ ПРИ ПРОФИЛЬНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ДРЕВЕСНЫХ ЗАГОТОВОК, НЕ ИМЕЮЩИХ СБЕЖИСТОСТИ

Ключевые слова: профильное фрезерование, древесина, математическая модель, заготовка, режущий инструмент, обработанная поверхность, толщина срезаемого слоя, глубина резания, скорость подачи, скорость резания.

Разработана строгая математическая модель максимальной толщины и площади срезаемого слоя для процесса профильного фрезерования древесины, не имеющей сбежистости. Установлены аналитические зависимости, связывающие геометрию срезаемого слоя древесины с элементами режима фрезерования и конструктивными параметрами фрезы. Полученная модель необходима для расчета мощности резания при фрезеровании древесины различных пород.

Keywords: profile milling, wood, mathematical model, slab, cutting tool, processed surface, cut off layer thickness, cutting depth, giving speed, cutting speed.

The strict mathematical model of a cut off layer and area are developed for profile milling of the wood which do not have cutting depth increasing. The analytical dependences connecting a thickness, the area of a cut off layer with a profile milling cutting mode elements and constructive cutting tool parameters are established. The received model is necessary for power calculation at wood milling various breeds.

Введение

Моделирование процессов является важнейшей составляющей разработок новых технологий переработки древесных материалов [1,2]

Спецификой профильного фрезерования периферийных сегментов фасонной фрезой является также то, что процесс обработки осуществляется режущим контуром (профилем), элементарные режущие участки которого, расположены на различных расстояниях от центра вращения фрезы. По краям заготовки точка 4, принадлежащая режущему профилю фрезы, расположена на максимальном радиусе R_{\max} , а в поперечной плоскости симметрии фрезы – на минимальном радиусе R_{\min} . Указанные особенности являются причиной изменения элементов срезаемого слоя заготовки по сравнению с известным цилиндрическим и угловым фрезерованием древесины. При профильном фрезеровании заготовки, не имеющей сбежистости, изменение припуска по длине заготовки происходит стохастически в незначительной степени и без закономерного его приращения. Для каждой заготовки припуск колеблется относительно центра группирования – среднего арифметического размера заготовки.

Основными параметрами срезаемого слоя при фрезеровании любых пород древесины являются максимальная толщина a_{\max} , площадь $F_{\text{ср}}$ срезаемого слоя и объем материала $V_{\text{ср}}$, снимаемый одним зубом (единичным резом). На основании строгих математических зависимостей a_{\max} , $F_{\text{ср}}$ и $V_{\text{ср}}$ можно проводить точные расчеты составляющих силы резания, крутящих моментов, мощности фасонного и цилиндрического фрезерования различных пород древесины, а также ожидаемой геометрической точности обработанных поверхностей готовых изделий. Важно располагать моделями параметров a_{\max} , $F_{\text{ср}}$ и $V_{\text{ср}}$ в функции элементов режима резания, текущего времени

обработки и геометрических характеристик режущего инструмента. В такой постановке процесс фрезерования древесины в научно-технической литературе не рассматривался.

Текущее значение a_z толщины срезаемого слоя, соответствующего текущему углу контакта φ_z инструмента и заготовки, при движении режущего клина по дуге окружности изменяется от нуля до a_{\max} , при этом максимальная толщина срезаемого слоя a_{\max} при цилиндрическом фрезеровании по высоте B фрезы не изменяется и является постоянной величиной, то есть $a_{\max} = \text{const}$ для любого поперечного сечения цилиндрической фрезы.

Для фасонного фрезерования максимальная толщина срезаемого слоя изменяется по высоте B фрезы, то есть $a_{\max} = \text{var}$: Наименьшее ее значение соответствует точкам режущего профиля фрезы, лежащим в плоскостях обоих торцев, а наибольшее – в поперечной плоскости симметрии фрезы, в которой текущий радиус фрезы принимает минимальное значение R_{\min} . Таким образом, максимальная толщина срезаемого слоя для профильного фрезерования подлежит определению.

Разработка модели толщины срезаемого слоя и ее анализ

Прежде чем установить математическую модель толщины срезаемого слоя необходимо знать закономерность изменения текущего радиуса $R = R_z$ по высоте фасонной фрезы. Наиболее просто профильную обработку можно выполнить при заточке режущего лезвия фрезы по дуге окружности KLM (рис. 1) радиусом $R_{\text{фр}}$.

Для этого составим расчетную схему, представляющую собой фасонную фрезу и заготовку, находящиеся в процессе контактного взаимодействия. Расстояние от центра O дуги окружности KLM до оси I–I вращения фрезы I

$$C = R_{\min} + OL = R_{\min} + R_{\text{фр}} \quad (1)$$

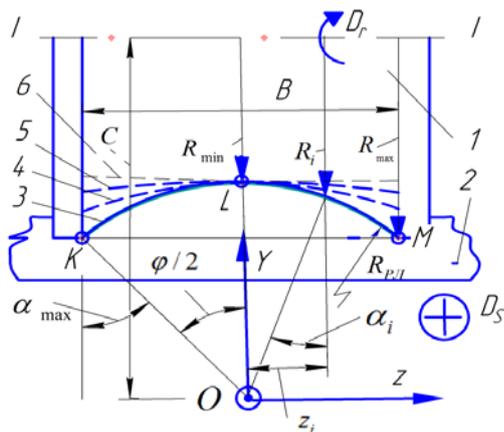


Рис. 1 - Зона контакта фасонной фрезы и обрабатываемой заготовки (а): 1 – фасонная фреза, 2 – заготовка, 3 – криволинейный контур режущего лезвия; 4, 5, 6 – контуры лезвия при изменении радиуса заточки $R_{ПК}$; D_r , D_s – рабочие движения инструмента и заготовки.

В произвольном i – м поперечном сечении, отстоящем на расстоянии z_i от начала O системы координат YOZ , радиус фрезы равен R_i , а уравнение (1) для этого сечения имеет вид:

$$C = R_i + R_{ПК} \cos \left(\arcsin \left(\frac{z_i}{R_{ПК}} \right) \right). \quad (2)$$

Приравняв правые части выражений (1) и (2) и выполнив преобразования, получим:

$$R_i = R_{ПК} \left(1 - \cos \left(\arcsin \left(\frac{z_i}{R_{ПК}} \right) \right) \right) + R_{мин}. \quad (3)$$

Текущий угол α_i , образованный плоскостью, перпендикулярной оси инструмента, и радиусом $R_{ПК}$ режущего лезвия

$$\alpha_i = \arcsin \left(\frac{z_i}{R_{ПК}} \right). \quad (4)$$

Его численные значения находятся в пределах $\alpha_i = 0$ до $\alpha_{\max} = 0,5\varphi$. При угле $\alpha_i = \arcsin \left(\frac{z_i}{R_{ПК}} \right) = 0$ координата $z_i = 0$, а плоскость, перпендикулярная оси инструмента, проходит через точку L . В соответствии с выражением (3) радиус фрезы равен минимальному значению $R_{мин}$ при $z_i = 0$. При $\alpha_i = \alpha_{\max} = 0,5\varphi$ имеем два поперечных сечения, одно из которых проходит через точку K , другое – через точку M .

Эти сечения расположены симметрично относительно оси Y . Радиус фрезы в этих сечениях согласно принимает максимальное значение R_{\max} , которое можно определить, если известны минимальный радиус, высота фрезы и радиус профиля режущего лезвия:

$$R_{\max} = R_{ПК} \left(1 - \cos \left(\arcsin \left(\frac{B}{2R_{ПК}} \right) \right) \right) + R_{мин} \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) позволяют определить радиус фрезы в любом ее поперечном сечении при известном минимальном радиусе $R_{мин}$ и радиусе

профиля режущего лезвия $R_{ПК}$. Если $R_{мин}$ не известен, а известны максимальный радиус R_{\max} , радиус профиля режущего лезвия $R_{ПК}$ и высота B , то можно определить $R_{мин}$, то есть решить обратную задачу.

Радиус профиля фрезы задается рабочим чертежом изделия, которое получаем из периферийного сегмента после фасонного фрезерования неокоренной поверхности. Если заданы размеры фасонной фрезы, то можно определить радиус профиля фрезы по формуле:

$$R_{ПК} = \frac{R_{\max} - R_{мин}}{1 - \cos \alpha_{\max}}. \quad (6)$$

Центральный угол, соответствующий дуге окружности профиля фрезы, найдем из уравнения:

$$R_{ПК} \cos \alpha_{\max} = R_{ПК} - (R_{\max} - R_{мин}). \quad (7)$$

Значение центрального угла

$$\varphi = 2 \arccos \left(\frac{B}{2R_{ПК}} \right). \quad (8)$$

Профиль фасонной фрезы, очерченный по дуге окружности KLM , описывается уравнением:

$$Y^2 + Z^2 = \left(\frac{R_{\max} - R_{мин}}{1 - \cos \left(\arcsin \left(\frac{B}{2R_{ПК}} \right) \right)} \right)^2 \text{ при } -\frac{B}{2} \leq Z \leq \frac{B}{2}. \quad (9)$$

Таким образом, по формулам (3) – (9) можно определить конструктивные размеры фасонной фрезы в любом ее поперечном сечении.

Известные модели толщины a_{\max} и площади $F_{ПК}$ срезаемого слоя [3.4] являются приближенными и не учитывают остающиеся на обработанной поверхности гребни 1-2-3-4-1. высотой Δ , (рис. 2, а) обусловленные кинематикой процесса фрезерования. На расстоянии половины подачи на зуб фрезы ($0,5S_z$) в точке пересечения соседних резцов 1-4 и 4-3, лежащей в плоскости 2-4-5 высота Δ остающихся гребней определяется по формуле [5, с. 113]:

$$\Delta = R_i - \sqrt{R_i^2 - \left(\frac{10^3 v_f z}{60 \omega} \right)^2}. \quad (10)$$

где R_i – текущий радиус фасонной фрезы, мм; v_f – скорость рабочей подачи заготовки, м/мин; z , ω – соответственно число зубьев и угловая скорость фрезы, рад/с.

При обычных режимах фрезерования высота Δ незначительна, однако их количество на обработанной поверхности длиной один метр измеряется десятками тысяч, что приводит к погрешностям расчета показателей a_{\max} , $F_{ПК}$ в особенности при высоких режимах резания, характерных для процесса механической обработки периферийных сегментов, образующихся в процессе продольного раскроя бревен.

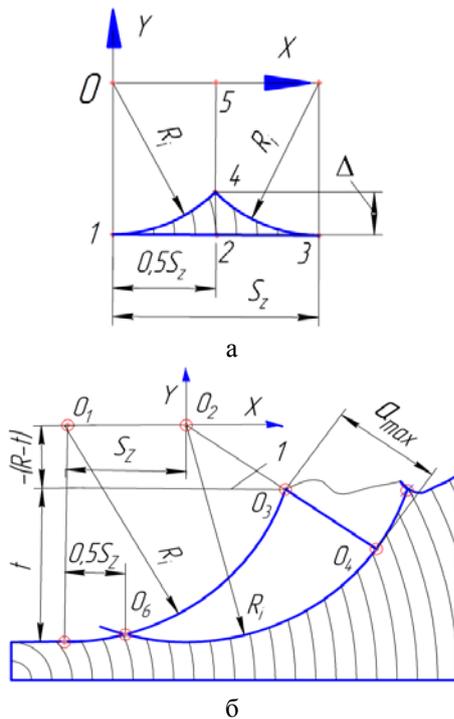


Рис. 2 - Гребень, оставшийся на обработанной поверхности после фрезерования (а) и схема расчета толщины срезаемого слоя (б)

Абсолютное значение максимальной толщины срезаемого слоя (рис. 1, б)

$$a_{\max} = R_t - O_2 O_3. \quad (11)$$

Длина отрезка $O_2 O_3$ будет определена, если найдем координаты точек O_2 и O_3 . Для точки O_2 : $x_2 = 0$, $y_2 = 0$. Координаты точки O_3 найдем совместным решением уравнения прямой 1 (рис. 1, б) с уравнением дуги $O_3 O_4$ окружности с центром в точке O_1 :

$$\begin{cases} y = t - R_t \\ (x + S_z)^2 + y^2 = R_t^2 \end{cases} \quad (12)$$

где t – глубина резания; R_t – текущий радиус фрезы; S_z – подача заготовки на зуб фрезы.

Решив совместно (3), получим

$$x_{O_3} = \sqrt{S_z^2 - \epsilon_1} - S_z, \quad (13)$$

где $\epsilon_1 = S_z^2 - 2R_t t + t^2$.

Таким образом, координаты точек $O_2(0, 0)$ и $O_3(\sqrt{2R_t t - t^2} - S_z, t - R_t)$.

Тогда длина отрезка

$$O_2 O_3 = \sqrt{R_t^2 + S_z^2 - 2S_z \sqrt{2R_t t - t^2}}. \quad (14)$$

С учетом (14) выражение (11) примет вид:

$$a_{\max} = R_t - \sqrt{R_t^2 + S_z^2 - 2S_z \sqrt{2R_t t - t^2}}. \quad (15)$$

В формулу (15) входит текущий радиус R_t фасонной фрезы, который зависит от ее геометрических параметров по (3). Для получения математической модели толщины срезаемого слоя

при фасонном фрезеровании заготовки, не имеющей сбежистости, в функции геометрических параметров фасонной фрезы следует (3) подставить в выражение (15).

Математические формулы (6) и (7) описывают изменение максимальной толщины срезаемого слоя в функции элементов режима фрезерования (t , v_z , ω), размерных параметров и числа зубьев фрезы (R_{\min} , R_{\max} , z и ϵ). Она является наиболее ценной и комплексной, поскольку применима не только для процессов цилиндрического, но и профильного фрезерования фасонными фрезами в широком диапазоне изменяющихся независимых факторов и геометрических параметров режущего инструмента. На ее основе можно выполнять расчеты энергетических показателей процессов фрезерования, не прибегая к выполнению трудоемких экспериментов.

Максимальная толщина срезаемого слоя для режущей точки зуба, вращающейся в поперечной плоскости симметрии фрезы,

$$a_{\max} = R_{\min} - \sqrt{R_{\min}^2 + \left(\frac{v_z}{nZ}\right)^2 - 2\frac{v_z}{nZ} \sqrt{2R_{\min} t - t^2}}. \quad (16)$$

На основании модели (16) построены графики зависимостей a_{\max} от независимых факторов процесса обработки: минимального радиуса профиля фрезы $R_{\min} = 50 \dots 80$ мм, скорости подачи заготовки $v_z = (3 \dots 50) \cdot 10^3$ мм/мин, частоты вращения инструмента $n = 4000 \dots 6000$ мин^{-1} , числа зубьев фрезы $Z = 2 \dots 6$, глубины резания $t = 3 \dots 25$ мм. Расчеты выполнены в программной среде Advanced Grapher, а уравнения кривых зависимостей a_{\max} от t , v_z , S_z , R_{\min} , ω и z представлены в виде, адаптированном к Advanced Grapher, что упрощает использование полученных результатов при расчетах для значений факторов, отличающихся от вышеприведенных.

Влияние глубины резания t на толщину срезаемого слоя a_{\max} описывается кривыми 1–3 второго порядка (рис. 3).

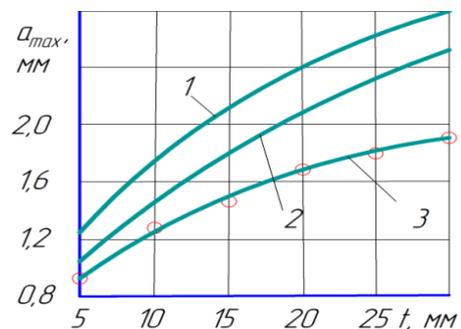


Рис. 3 – Влияние глубины резания на толщину срезаемого слоя при обработке древесины, не имеющей сбежистости

$$a_{\max} = 50 - (2500 + (2.05)^{(4/2)} - 2 \cdot 2.05 \cdot ((100t - (t^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)}))^{(2/4)},$$

при $R_{\min} = 50$ мм; $v_z = 20^3$ мм/мин; $n = 4880$ мин^{-1} , $z = 4$. (17)

$$a_{\max} = 50 - (2500 + (3.07)^{(4/2)} - 2 \cdot 3.07 \cdot ((100t - (t)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $R_{\min} = 50$ мм; $v_s = 30^4$ мм/мин; $n = 4880$ мин⁻¹, $z = 2$; (18)

$$a_{\max} = 65 - (4225 + (3.07)^{(4/2)} - 2 \cdot 3.07 \cdot ((130t - (t)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $R_{\min} = 65$ мм; $v_s = 30^4$ мм/мин; $n = 4880$ мин⁻¹, $z = 2$. (19)

Увеличение скорости рабочей подачи заготовки v_s вызывает линейное возрастание толщины a_{\max} в соответствии с нижеследующими уравнениями:

$$a_{\max} = 50 - (2500 + (v_s/4880 \cdot 2)^{(4/2)} - 2 \cdot (v_s/4880 \cdot 2) \cdot ((100 \cdot 15 - (15)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $R_{\min} = 50$ мм; $n = 4880$ мин⁻¹, $z = 2$; $t = 15$ мм. (20)

$$a_{\max} = 65 - (4225 + (v_s/4880 \cdot 4)^{(4/2)} - 2 \cdot (v_s/4880 \cdot 4) \cdot ((130 \cdot 15 - (15)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $R_{\min} = 65$ мм; $n = 4880$ мин⁻¹, $z = 2$; $t = 15$ мм; (21)

$$a_{\max} = 65 - (4225 + (v_s/4880 \cdot 2)^{(4/2)} - 2 \cdot (v_s/4880 \cdot 2) \cdot ((130 \cdot 10 - (10)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $R_{\min} = 65$ мм; $n = 4880$ мин⁻¹, $z = 2$; $t = 10$ мм. (22)

Подача заготовки на зуб фрезы S_z вызывает увеличение толщины срезаемого слоя a_{\max} в соответствии с уравнениями:

$$a_{\max} = 50 - (2500 + (S_z)^{(4/2)} - 2 \cdot (S_z) \cdot ((100 \cdot 15 - (15)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $R_{\min} = 50$ мм; $t = 15$ мм. (23)

$$a_{\max} = 50 - (2500 + (S_z)^{(4/2)} - 2 \cdot (S_z) \cdot ((100 \cdot 25 - (25)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $R_{\min} = 50$ мм; $t = 25$ мм. (24)

$$a_{\max} = 40 - (1600 + (S_z)^{(4/2)} - 2 \cdot (S_z) \cdot ((80 \cdot 30 - (30)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $R_{\min} = 40$ мм; $t = 30$ мм. (25)

Увеличение минимального радиуса фрезы R_{\min} , числа зубьев z и угловой скорости ω фрезы вызывают уменьшение толщины срезаемого слоя a_{\max} , описываются уравнениями:

$$a_{\max} = R_{\min} - ((R_{\min})^{(4/2)} + (30000/4880 \cdot 2)^{(4/2)} - 2 \cdot (30000/4880 \cdot 2) \cdot ((30 \cdot R_{\min} - (15)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $v_s = 30^4$ мм/мин; $n = 4880$ мин⁻¹, $z = 2$; $t = 15$ мм; (26)

$$a_{\max} = R_{\min} - ((R_{\min})^{(4/2)} + (20000/4880 \cdot 2)^{(4/2)} - 2 \cdot (20000/4880 \cdot 2) \cdot ((30 \cdot R_{\min} - (15)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $v_s = 30^4$ мм/мин; $n = 4880$ мин⁻¹, $z = 2$; $t = 15$ мм (27)

$$3. a_{\max} = R_{\min} - ((R_{\min})^{(4/2)} + (10000/4880 \cdot 2)^{(4/2)} - 2 \cdot (10000/4880 \cdot 2) \cdot ((30 \cdot R_{\min} - (15)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

$$\text{при } v_s = 10^4 \text{ мм/мин; } n = 4880 \text{ мин}^{-1}, z = 2; t = 15 \text{ мм} \quad (28)$$

Подача заготовки на зуб фрезы S_z вызывает увеличение толщины срезаемого слоя a_{\max} в соответствии с уравнениями:

$$a_{\max} = 50 - (2500 + (S_z)^{(4/2)} - 2 \cdot (S_z) \cdot ((100 \cdot 15 - (15)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $R_{\min} = 50$ мм; $t = 15$ мм. (29)

Увеличение минимального радиуса фрезы R_{\min} , числа зубьев z и угловой скорости ω фрезы приводит к уменьшению толщины срезаемого слоя a_{\max} , что подтверждается уравнениями:

$$a_{\max} = R_{\min} - ((R_{\min})^{(4/2)} + (30000/4880 \cdot 2)^{(4/2)} - 2 \cdot (30000/4880 \cdot 2) \cdot ((30 \cdot R_{\min} - (15)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $v_s = 30^4$ мм/мин; $n = 4880$ мин⁻¹, $z = 2$; $t = 15$ мм. (30)

Увеличение числа зубьев z фрезы приводит к уменьшению максимальной толщины срезаемого слоя a_{\max} в соответствии с нижеследующими уравнениями:

$$a_{\max} = 50 - (2500 + (6.28 \cdot 500 / (511 \cdot z))^{(4/2)} - 2 \cdot (6.28 \cdot 500 / (511 \cdot z)) \cdot ((100 \cdot 20 - (20)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $v_s = 10^4$ мм/мин; $n = 4880$ мин⁻¹, $z = 2$; $t = 15$ мм; (31)

Возрастание угловой скорости ω фрезы приводит к снижению значения a_{\max} , что объясняется более частым нанесением резов на обрабатываемую поверхность древесной заготовки. Эти зависимости описываются уравнениями:

$$a_{\max} = 65 - (4225 + (6.28 \cdot 333.3 / (4 \cdot \omega))^{(4/2)} - 2 \cdot (6.28 \cdot 333.3 / (4 \cdot \omega)) \cdot ((130 \cdot 15 - (15)^{(4/2)})^{(2/4)})^{(2/4)},$$

при $R_{\min} = 65$ мм; $v_s = 333,3$ мм/с; $z = 4$; $t = 15$ мм; (32)

Разработка модели площади срезаемого слоя и ее анализ

Площадь срезаемого слоя в продольном сечении заготовки, не имеющей сбежистости, определена путем вычисления определенных интегралов функций, ограничивающих криволинейную фигуру $O_3 O_4 O_5 O_2$ (рис. 2.6),

$$F_{O_3 O_4 O_5 O_2} = F_{O_4 O_2 O_5 O_3} - F_{O_4 O_2 O_3 O_5} = \int_{R_t - t}^{R_t - \Delta} \left(\sqrt{(R_t^2 - x^2) + 0,5S_z} \right) dx - \int_{R_t - t}^{R_t - \Delta} \left(\sqrt{(R_t^2 - x^2) - 0,5S_z} \right) dx = S_z \cdot x \Big|_{R_t - t}^{R_t - \Delta} = S_z (t - \Delta), \quad (33)$$

где выражения под знаком интегралов представляют собой функции, описывающие окружности с центром в точке O_1 и O_2 соответственно.

По данным проф. В. В. Амалицкого [1, с. 209], проф. Любченко В. И. [2, с. 35] площадь срезаемого слоя в продольном сечении заготовки

$$F_{cp} \approx S_z t \quad (34)$$

Формула (33) является точным выражением площади срезаемого слоя при фрезеровании как цилиндрическими, так и фасонными фрезами, а формула (34), как отмечалось ранее, является приближенной. Площадь срезаемого слоя в продольном сечении заготовки, не имеющей сбежистости, при аппликате $z_1 = 0$ (для поперечной плоскости симметрии фрезы)

$$F_{cp} = S_z \left(t - R_{min} + \sqrt{R_{min}^2 - \left(\frac{10^3 \pi R_z}{60 \omega} \right)^2} \right) \quad (35)$$

Для получения математической модели площади срезаемого слоя при фасонном фрезеровании заготовки, не имеющей сбежистости, следует (3) подставить в выражение (35) вместо R_{min} . Формулы (3) и (35) представляют собой строгие математические зависимости площади срезаемого слоя F_{cp} от элементов режима фрезерования заготовки, не имеющей сбежистости, а также размерных параметров режущего инструмента. На основании (3), (35) можно установить степень влияния на площадь F_{cp} конкретного фактора процесса резания и режущего инструмента.

При возрастании подачи S_z на зуб площадь срезаемого слоя заготовки, не имеющей сбежистости, увеличивается по линейной зависимости, что объясняется ростом протяженности отрезка $O_3 O_4$ (рис. 2, б). Влияние подачи на зуб фрезы S_z описывается уравнениями прямых, преобразованных к виду, адаптированному к программной среде Advanced Grapher:

$$F_{cp} = S_z * (15 - 40 + (1600 - ((1000 * 6.28 * 20) / (60 * 2 * 511))^{(4/2)})^{(2/4)}),$$

при $t=15$ мм; $R_{min} = 40$ мм; $v_s = 20$ м/мин; $z=2$;
 $\omega = 511$ рад/с. (36)

С увеличением глубины резания t площадь срезаемого слоя возрастает линейно:

$$F_{cp} = (t - 40 + (1600 - ((1000 * 6.28 * 20) / (60 * 2 * 511))^{(4/2)})^{(2/4)}),$$

при $S_z = 1,0$ мм; $R_{min} = 40$ мм; $v_s = 20$ м/мин; $z=2$;
 $\omega = 511$ рад/с. (37)

Минимальный радиус фрезы R_{min} , скорость рабочей подачи v_s , число зубьев z и угловая скорость ω фрезы оказывают слабое влияние (менее 0,5%) на площадь срезаемого слоя F_{cp} , поэтому можно принять их влияние незначимым.

Объем срезаемого слоя единичным зубом

$$V_{cp} = F_{cp} \cdot l_{кин} = 2 F_{cp} R_{фр} \arccos \left(\frac{R}{2R_{фр}} \right) \quad (38)$$

где $l_{кин}$ – длина режущего профиля фрезы; B – высота фрезы.

Проверка адекватности моделей параметров срезаемого слоя

Достоверность разработанных моделей подтверждается использованием строгих математических методов интегрального исчисления, сходимостью результатов расчета геометрических параметров срезаемого слоя по известным и предложенным моделям (табл. 1 и 2).

Таблица 1 – Расчетные значения толщины срезаемого слоя

Автор	Расчетная формула толщины срезаемого слоя a_{max}	Расчетные значения a_{max}^* , мм	Расхождение значений a_{max} , мм
В.В.А малицкий, В.В.А малицкий, В.И.Л юбченко	$a_{max} \approx S_z \sin(\arccos[1, \text{с. 209}], a_{max} \approx S_z \sin \varphi_{max}[2, \text{с. 114}]$	1. 0,242 2. 1,070 3. 1,970	1.0,002 (0,8%) 2.0,010 (0,9%) 3. 0,020 (1%)
Р.Г.Сафин, А.А.Фомин, В.Г.Гусев	$a_{max} = R - \sqrt{R^2 + S_z^2 - 2S_z/2Rz - t^2}$	1. 0,240 2. 1,080 3. 1,950	

*Режимы фрезерования: 1. $R=40$ мм, $t=5$ мм, $S_z = 0,5$ мм/зуб. 2. $R=50$ мм, $t=15$ мм, $S_z = 1,5$ мм/зуб. 3. $R=65$ мм, $t=25$ мм, $S_z = 2,5$ мм/зуб.

Таблица 2 – Расчетные значения площади срезаемого слоя F_{cp}

Автор	Расчетная формула площади срезаемого слоя F_{cp} , мм ²	Расчетные значения F_{cp} , мм ²	Расхождение значений F_{cp} в мм ² и в %
В.В.Амалицкий, В.В.Амалицкий, В.И.Л юбченко	$F_{cp} \approx S_z t$ [1, с. 209], [2, с. 114]	1. 2,5 2. 22,5 3. 62,5	1.1,6 $0 \cdot 10^{-3}$ (0,06%) 2.2,28 $\cdot 10^{-2}$ (0,10%) 3.1,20 $\cdot 10^{-1}$ (0,20%)
Р.Г.Сафин, А.А.Фомин, В.Г.Гусев	$F_{cp} = S_z(t - R) = S_z(-R + \sqrt{R^2 - \left(\frac{10^3 \pi R_z}{60 \omega} \right)^2})$	1. 2,4984 2. 22,4662 3. 62,3798	0%)

Достоверность моделей проверена также измерением $\alpha_{\text{зад}}$, $F_{\text{ср}}$ в программной среде PRO ENGINEER для различных режимных факторов процесса и размерных параметров режущего инструмента. Расхождение значений, рассчитанных по разработанным моделям и измеренных в PRO ENGINEER, составило не более 0,5%. При увеличении масштаба графического построения срезаемого слоя в расхождении теории и практики уменьшается до 0,1%.

Таким образом, на основании приведенных данных можно констатировать, что разработанные теоретические модели геометрических параметров срезаемого слоя являются адекватными и их можно использовать для расчета энергетических показателей процессов фрезерования древесины цилиндрическими и фасонными фрезами.

Литература

1. Сафин Р.Р. Сафин Р.Г. Перспективы развития лесопромышленного комплекса Республики Татарстан

на базе научных разработок кафедр лесотехнического профиля КНИТУ / Р.Г. Сафин, Р.Р. Сафин // Деревообрабатывающая промышленность. – 2012. – №3. – С. 22-27.

2. Сафин Р.Р. Анализ современного состояния лесопромышленного комплекса и перспективы его развития на базе кафедр лесотехнического профиля КГТУ / Р.Г. Сафин, Р.Р. Сафин // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2010. – №4. – С. 120-130.
3. Амалицкий, В. В. Деревообрабатывающие станки и инструменты: учебник / В. В. Амалицкий, В. В. Амалицкий. – М.: ИППО, Издательский центр «Академия», 2002. – 400с. – ISBN 5-8222-0173-3
4. Любченко, В. И. Резание древесины и древесных материалов: учебник для вузов. 3-е изд. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2004. – 310 с.
5. Фомин, А. А. Механическая обработка отходов древесины – Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий / А. А. Фомин, В. Г. Гусев. – М.: РАН. – 2011. – 128 с. – ISBN 978-5-904197-19-3.

© А. А. Фомин – канд. техн. наук, докторант каф. переработки древесных материалов КНИТУ, fomin1@mail.ru; В. Г. Гусев - д-р техн. наук, проф. каф. технологии машиностроения Владимирского госуд. ун-та, prof_gusev@mail.ru; Р. Г. Сафин - д-р техн. наук, проф., зав. каф. переработки древесных материалов КНИТУ, safin_rg@kstu.ru.