

А. А. Фомин, В. Г. Гусев, Р. Г. Сафин

МОЩНОСТЬ РЕЗАНИЯ ПРИ ПРОФИЛЬНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ОТХОДОВ ЛЕСОПИЛЕНИЯ

Ключевые слова: профильное фрезерование, отходы лесопиления, мощность резания, математическая модель, сила резания, удельная работа резания, порода древесины, площадь срезаемого слоя, глубина резания, скорость подачи.

Разработана математическая модель мощности профильного фрезерования периферийных сегментов, на основании которой возможен расчет энергетических показателей процесса. Установлено, что наибольшее влияние на мощность резания при профильном фрезеровании периферийных сегментов оказывает сбежистость заготовки, глубина резания и скорость подачи. Результаты моделирования получили удовлетворительное подтверждение проведенными экспериментами на малых скоростях подачи заготовки. Для профильного фрезерования периферийных сегментов на высоких режимах резания предложено использовать систему управления мощностью фрезерования путем изменения скорости подачи обрабатываемой заготовки.

Keywords: profile milling, wood waste, cutting capacity, mathematical model, cutting force, cutting work, breed of wood, the area of a cut off layer, cutting depth, feed speed.

The mathematical model of profile milling capacity of peripheral segments on which basis the process power indicators calculation is possible is developed. It is established that the greatest influence on a cutting capacity at profile milling of peripheral segments renders the cutting depth, feed speed and slab allowance increasing. Results have received satisfactory acknowledgement by the spent experiments on a small slab feed speeds. For profile milling of peripheral segments on high cutting modes it is offered to use a control system of milling capacity by changing of a feed speed.

Введение

На разработку ресурсоэнергосберегающих технологий переработки древесных материалов направлены научные направления кафедр лесотехнического профиля [1,2].

Достоверная информация об энергетических показателях процессов механической обработки различных материалов, в том числе профильного фрезерования древесины различных пород необходима для качественного проектирования технологического оборудования, эффективного использования установленных электродвигателей по мощности, что снижает себестоимость готового изделия. К таким показателям относится мощность, потребная на процесс резания при различных режимах обработки и геометрии режущего инструмента, а также сила резания. Последнюю представляют в виде трех составляющих: главную, радиальную и осевую, каждая из которых по-своему влияет на протекание процессов обработки.

Главная составляющая F_z силы резания определяет потребляемую мощность, а ее непостоянство вызывает крутильные колебания шпиндельного узла с установленные режущим инструментом; радиальная составляющая F_y оказывает доминирующее влияние на упругие деформации элементов системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка», от уровня и стабильности которых зависит геометрическая точность обработанных поверхностей. В этой связи важно знать не только численные значения энергетических показателей процессов механической обработки, но и их изменение в течение всего времени резания. Располагая этими данными можно эффективно управлять протеканием процесса резания,

обеспечивая оптимальные режимы резания и выпуск качественной продукции.

Сказанное особо актуально для построения эффективных процессов профильного фрезерования специфических древесных заготовок, каковыми являются крупные отходы лесопиления, характеризующиеся разнородностью свойств обрабатываемого материала, значительной нестабильностью формы и размеров. Для такого рода заготовок, например, периферийных сегментов, образующихся в процессе параболического раскря бревен, информация об энергетических показателях позволит прогнозировать не только удельные затраты электрической энергии, но и ожидаемую геометрическую точность обработанных поверхностей.

Разработка математической модели мощности фасонного фрезерования и ее анализ

Результирующая сила резания в процессе механической обработки древесины [3, 4]

$$P = kba, \quad (1)$$

где k – удельная сила резания, Н/мм²; b , a – ширина и толщина срезаемого слоя соответственно, мм.

Формула (1) удобна при выполнении практических расчетов в виду своей простоты, в этом состоит ее неоспоримое достоинство, однако, она не позволяет установить непосредственные математические взаимосвязи режимов профильного фрезерования и конструктивных параметров фасонного режущего инструмента с энергетическими показателями.

Объем древесины, снимаемый в процессе профильного фрезерования заготовки за время реза одним зубом фрезы,

$$V_1 = 2F_{z1} R_{фр} \arcsin\left(\frac{B}{2R_{фр}}\right), \quad (2)$$

где $R_{\text{ср}} = 0,5(F_{\text{макс}} + F_{\text{мин}})$ – среднее арифметическое значение максимальной $F_{\text{макс}}$ и минимальной $F_{\text{мин}}$ площадей срезаемого слоя; $R_{\text{ПК}}$, B – соответственно радиус профиля и высота фасонной фрезы.

Предельные значения площади срезаемого слоя:

$$F_{\text{мин}} = S_z \left(t - R_{\text{мин}} + \sqrt{R_{\text{мин}}^2 - \left(\frac{10^2 \pi v_z}{60 \omega} \right)^2} \right), \quad (3)$$

$$F_{\text{макс}} = S_z \left(t - R_{\text{макс}} + \sqrt{R_{\text{макс}}^2 - \left(\frac{10^2 \pi v_z}{60 \omega} \right)^2} \right), \quad (4)$$

где S_z – подача заготовки на зуб фрезы; t – глубина резания, заданная режимом обработки; $R_{\text{мин}}$ – минимальный радиус фасонной фрезы, характерный для поперечной плоскости симметрии инструмента; $R_{\text{макс}}$ – максимальный радиус фасонной фрезы, характерный для плоскости каждого из торцов инструмента; v_z – скорость рабочей подачи заготовки; z , ω – соответственно число зубьев и угловая скорость фасонной фрезы.

Объем древесины, снимаемый в течение одной секунды,

$$V = \frac{\pi z}{60} R_{\text{ср}} R_{\text{ПК}} \arcsin \left(\frac{B}{2R_{\text{ПК}}} \right), \quad (5)$$

где n – частота вращения фрезы.

Математическая модель, связывающая мощность профильного фрезерования древесины, не имеющей сбежистости, с элементами режима резания и конструктивными параметрами фасонного режущего инструмента, примет вид:

$$P_p = K \cdot \frac{\pi z}{60} \cdot R_{\text{ПК}} \cdot \arcsin \left(\frac{B}{2R_{\text{ПК}}} \right) \left(\frac{2\pi \cdot 10^2 v_z}{60 \omega} \right) (\epsilon_4 + \epsilon_5), \quad (6)$$

где $K = K_T \alpha_{\text{плп}}$ – удельная работа резания при заданных расчетных условиях обработки, Дж/см² [2, с. 278, 279]; n – частота вращения фрезы, мин⁻¹; K_T – табличное значение удельной работы резания; $\alpha_{\text{плп}} = \alpha_n \alpha_w \alpha_p \alpha_g \alpha_v$ – общий поправочный множитель; α_n , α_w , α_p , α_g , α_v – поправочный множитель соответственно на породу, влажность древесины, затупление лезвий фрезы, на угол резания и скорость резания;

$$\epsilon_4 = 2t - R_{\text{мин}} + \sqrt{R_{\text{мин}}^2 - \left(\frac{10^2 \pi v_z}{60 \omega} \right)^2};$$

$$\epsilon_5 = \sqrt{R_{\text{макс}}^2 - \left(\frac{10^2 \pi v_z}{60 \omega} \right)^2} - R_{\text{макс}}. \quad (7)$$

Мощность резания при профильном фрезеровании сбежистой заготовки с положительным приращением припуска

$$P_p = K \cdot \frac{\pi z}{60} \cdot R_{\text{ПК}} \cdot \arcsin \left(\frac{B}{2R_{\text{ПК}}} \right) \left(\frac{2\pi \cdot 10^2 v_z}{60 \omega} \right) (\epsilon_6 + \epsilon_7), \quad (8)$$

где

$$\epsilon_6 = 2(t + v_z \operatorname{tg}(\pi - \beta_{\text{сб}})) - R_{\text{мин}} + \sqrt{R_{\text{макс}}^2 - \left(\frac{10^2 \pi v_z}{60 \omega} \right)^2}; \quad (9)$$

τ – текущее время фрезерования; $\beta_{\text{сб}}$ – средний статистический угол, характеризующий сбежистость заготовки.

При профильном фрезеровании сбежистой заготовки с отрицательным приращением припуска

$$P_p = K \cdot \frac{\pi z}{60} \cdot R_{\text{ПК}} \cdot \arcsin \left(\frac{B}{2R_{\text{ПК}}} \right) \left(\frac{2\pi \cdot 10^2 v_z}{60 \omega} \right) (\epsilon_8 + \epsilon_7), \quad (10)$$

где $\epsilon_7 =$

$$= 2(t + v_z \operatorname{tg}(\pi - \beta_{\text{сб}})) - R_{\text{мин}} + \sqrt{R_{\text{мин}}^2 - \left(\frac{10^2 \pi v_z}{60 \omega} \right)^2}. \quad (11)$$

По моделям (6), (8), (10) можно выполнять расчеты мощности практически для любых режимов профильного фрезерования фасонными фрезами, допускаемых технической характеристикой применяемого оборудования.

Определим с использованием программной среды Advanced Grapher влияние глубины резания на мощность фасонного фрезерования заготовки, не имеющей сбежистости, для трех нижеследующих режимов резания.

Режим № 1: удельная работа резания для березы $K=2,85 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$ [5]; число зубьев фасонной фрезы $z=2$; частота вращения фрезы $n=4880 \text{ мин}^{-1}$; скорость рабочей подачи заготовки $v_z = 15 \text{ м/мин}$; радиус профиля фасонной фрезы $R_{\text{ПК}}=6,25 \text{ см}$; высота фрезы $B=10 \text{ см}$; минимальный и максимальный радиус фрезы соответственно $R_{\text{мин}} = 0,5 \text{ см}$; $R_{\text{макс}} = 9 \text{ см}$. Режим № 2: $K=2,85 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$; $z=4$; $n=4000 \text{ мин}^{-1}$; $v_z = 10 \text{ м/мин}$; $R_{\text{ПК}}=6,25 \text{ см}$; $B=10 \text{ см}$; $R_{\text{мин}} = 8 \text{ см}$; $R_{\text{макс}} = 9 \text{ см}$; Режим № 3: $K = 2,85 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$; $z=2$; $n=4880 \text{ мин}^{-1}$; $v_z = 20 \text{ м/мин}$; $R_{\text{ПК}}=6,25 \text{ см}$; $B=10 \text{ см}$; $R_{\text{мин}} = 6,5 \text{ см}$; $R_{\text{макс}} = 9 \text{ см}$.

Результаты расчетов мощности фрезерования березы на трех режимах резания приведены в табл. 1, а уравнения связи мощности P_p с глубиной резания t , адаптированные к программной среде Advanced Grapher, имеют вид:

$$1. P_p = (2.85 \cdot 2 \cdot 4880 / 60) \cdot 6.25 \cdot (\operatorname{asin}(10 / (2 \cdot 6.25))) \cdot ((100 \cdot 15) / (2 \cdot 4880)) \cdot (2 \cdot (t - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 15 / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 - ((50 \cdot 15) / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)})) \quad (12)$$

$$2. P_p = (2.85 \cdot 4 \cdot 4000 / 60) \cdot 8 \cdot (\operatorname{asin}(10 / (2 \cdot 8))) \cdot ((100 \cdot 10) / (4 \cdot 4000)) \cdot (2 \cdot (t - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 10 / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 - ((50 \cdot 10) / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)})) \quad (13)$$

$$3. P_p = (2.85 \cdot 2 \cdot 4880 / 60) \cdot 6.25 \cdot (\operatorname{asin}(10 / (2 \cdot 6.25))) \cdot ((100 \cdot 20) / (3 \cdot 4880)) \cdot (2 \cdot (t - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 20 / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 - ((50 \cdot 20) / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)})) \quad (14)$$

По модели (6) определена мощность резания не только для древесины из березы, но и сосны и дуба, для которых удельная работа K , затрачиваемая на снятие одного кубического

сантиметра древесины, соответственно равна 1,75 и 3,15 Джоуля [5]. На основании моделирования построены графики зависимостей глубины резания на мощность фрезерования древесины из сосны, березы и дуба, не имеющей сбежистости (рис. 1, а).

Таблица 1 – Изменение мощности фрезерования в функции глубины резания древесины без сбежистости

t, мм	5	10	15	20	25	30
Режим профильного фрезерования № 1						
P_p , Вт	412	8258	123	165	20646	247
Вт	9		87	17		76
Режим профильного фрезерования № 2						
P_p , Вт	256	5131	769	102	1282	15393
Вт	5		6	62	7	
Режим профильного фрезерования № 3						
P_p , Вт	335	6715	100	134	16791	201
Вт	7		74	32		50

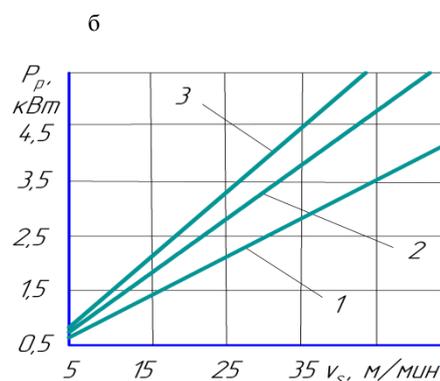
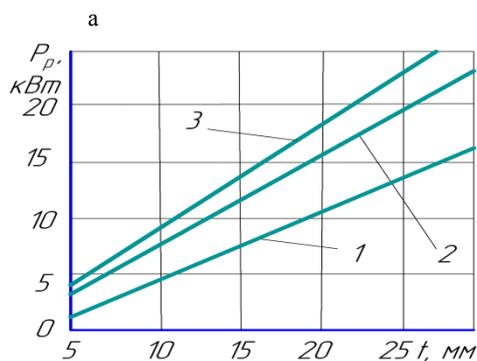


Рис. 1 – Влияние глубины резания (а), скорости подачи (б) на мощность фрезерования древесины, не имеющей сбежистости: 1 – сосны; 2 – березы; 3 – дуба

Мощность профильного фрезерования древесины из сосны имеет минимальные значения, затем по степени ее возрастания следует береза, а самые большие численные значения мощности характерны для древесины из дуба, что объясняется значениями удельной работы для указанных пород древесины (для сосны $K=1,75$; для березы $K=2,85$ и для дуба $K=3,15$ Дж/см³).

Влияние скорости подачи на мощность профильного фрезерования заготовки, не имеющей сбежистости, установлено также для трех режимов профильного фрезерования ($K=1,75$ Дж/см³).

- $z=4$; $n=6000$ мин⁻¹; $R_{ПК}=8$ см; $B=10$ см; $t=2$ см; $R_{min}=0,5$ см; $R_{max}=9$ см;
- $z=4$; $n=4000$ мин⁻¹; $R_{ПК}=10$ см; $B=12$ см; $t=1$ см; $R_{min}=0,5$ см; $R_{max}=9$ см;
- $z=6$; $n=4880$ мин⁻¹; $R_{ПК}=6,25$ см; $B=10$ см; $t=2$ см; $R_{min}=0,5$ см; $R_{max}=9$ см.

Уравнения связи мощности резания со скоростью рабочей подачи древесины для указанных режимов резания имеют вид:

$$1. P_p = (1.75 * 4 * 6000 / 60) * 8 * (\sin(10 / (2 * 8))) * ((100 * v_s) / (4 * 6000)) * (2 * (2 - 6.5 + (42.25 - (50 * v_s / (4 * 6000))^{(4/2)}) - 9 + (81 - ((50 * v_s) / (4 * 6000))^{(4/2)})^{(2/4)})); \quad (15)$$

$$2. P_p = (1.75 * 4 * 4000 / 60) * 10 * (\sin(12 / (2 * 10))) * ((100 * v_s) / (4 * 4000)) * (2 * (1 - 6.5 + (42.25 - (50 * v_s / (4 * 4000))^{(4/2)}) - 9 + (81 - ((50 * v_s) / (4 * 4000))^{(4/2)})^{(2/4)})); \quad (16)$$

$$3. P_p = (1.75 * 6 * 4880 / 60) * 6.25 * (\sin(10 / (2 * 6.25))) * ((100 * v_s) / (6 * 4880)) * (2 * (2 - 6.5 + (42.25 - (50 * v_s / (6 * 4880))^{(4/2)}) - 9 + (81 - ((50 * v_s) / (6 * 4880))^{(4/2)})^{(2/4)})). \quad (17)$$

Результаты моделирования мощности профильного фрезерования представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Мощность фрезерования в функции скорости рабочей подачи заготовки, не имеющей сбежистости

v_s , м/мин	5	15	25	35	45	55
Режим профильного фрезерования № 1						
P_p , Вт	31	945	1575	2205	2834	34
Вт	5					63
Режим профильного фрезерования № 2						
P_p , Вт	188	563	938	1312	16	205
Вт					85	6
Режим профильного фрезерования № 3						
P_p , Вт	33	101	1690	2366	3041	37
Вт	8	4				17

Изменение мощности резания при профильном фрезеровании сосны, березы и дуба представлено на рис. 1, б, из которого следует, что в наибольшей степени мощность возрастает при обработке дуба.

Влияние глубины резания на мощность профильного фрезерования сбежистой заготовки из сосны, березы и дуба установлено для нижеследующих режимов ($K=2,85$ Дж/см³):

- $z=2$; $n=4880$ мин⁻¹; $v_s=15$; $R_{ПК}=6,25$ см; $B=10$ см; $\beta_{ПК} = \arctg(0,01)$; $t=10$ с; $R_{min}=0,5$ см; $R_{max}=9$ см; $K=2,85$ Дж/см³.

2. $z=4$; $n=4000 \text{ мин}^{-1}$; $v_s = 10 \text{ м/мин}$; $R_{ПК}=6,25 \text{ см}$; $B=10 \text{ см}$; $t=x$; $+\beta_{сф} = \arctg(0.01)$; $\tau=8 \text{ с}$; $R_{\min} = 6,5 \text{ см}$; $R_{\max} = 9 \text{ см}$.

3. $z=2$; $n=4880 \text{ мин}^{-1}$; $v_s = 2010 \text{ м/мин}$; $R_{ПК}=6,25 \text{ см}$; $B=10 \text{ см}$; $t=x$; $+\beta_{сф} = \arctg(0.01)$; $\tau=8 \text{ с}$; $R_{\min} = 6,5 \text{ см}$; $R_{\max} = 9 \text{ см}$.

Уравнения, описывающие влияние глубины резания на мощность резания, для указанных трех режимов имеют вид:

$$1. P_p = (2.85 \cdot 2 \cdot 4880 / 60) \cdot 6.25 \cdot (\sin(10 / (2 \cdot 6.25))) \cdot ((100 \cdot 15) / (2 \cdot 4880)) \cdot (2 \cdot (t + (15 \cdot 10) \cdot \tan(0.01))) - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 15 / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 - ((50 \cdot 15) / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)}) \quad (17)$$

$$2. P_p = (2.85 \cdot 4 \cdot 4000 / 60) \cdot 6.25 \cdot (\sin(10 / (2 \cdot 6.25))) \cdot ((100 \cdot 10) / (4 \cdot 4000)) \cdot (2 \cdot (t + (10 \cdot 8) \cdot \tan(0.01))) - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 10 / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 - ((50 \cdot 10) / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)}) \quad (18)$$

$$3. P_p = (2.85 \cdot 2 \cdot 4880 / 60) \cdot 6.25 \cdot (\sin(10 / (2 \cdot 6.25))) \cdot ((100 \cdot 20) / (4 \cdot 4000)) \cdot (2 \cdot (t + (20 \cdot 8) \cdot \tan(0.01))) - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 20 / (4 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 - ((50 \cdot 20) / (4 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)}) \quad (19)$$

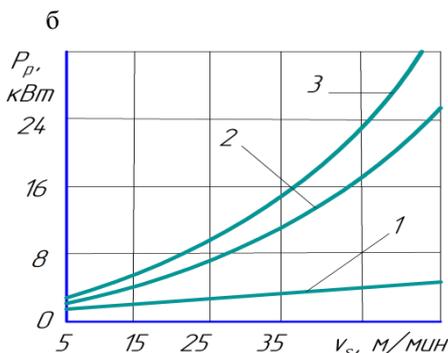
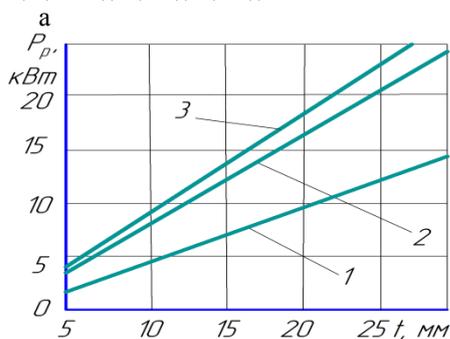


Рис. 2 – Влияние глубины резания (а) и скорости подачи (б) на мощность фрезерования сбежистой заготовки: 1 – сосна; 2 – береза; 3 – дуб

Влияние скорости подачи на мощность резания при фрезеровании сбежистой заготовки установлено на следующих режимах ($K=1,75 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^3}$):

1. $z=4$; $n=6000 \text{ мин}^{-1}$; $R_{ПК}=8 \text{ см}$; $B=10 \text{ см}$; $t=2 \text{ см}$; $+\beta_{сф} = \arctg(0.01)$; $\tau=16 \text{ с}$; $R_{\min} = 6,5 \text{ см}$; $R_{\max} = 9 \text{ см}$;

2. $z=4$; $n=4000 \text{ мин}^{-1}$; $R_{ПК}=10 \text{ см}$; $B=12 \text{ см}$; $t=1 \text{ см}$; $+\beta_{сф} = \arctg(0.01)$; $\tau=16 \text{ с}$; $R_{\min} = 6,5 \text{ см}$; $R_{\max} = 9 \text{ см}$;

3. $z=6$; $n=4880 \text{ мин}^{-1}$; $v_s = x$; $R_{ПК}=6,25 \text{ см}$; $B=10 \text{ см}$; $t=2 \text{ см}$; $+\beta_{сф} = \arctg(0.01)$; $\tau=14 \text{ с}$; $R_{\min} = 6,5 \text{ см}$; $R_{\max} = 9 \text{ см}$.

Уравнения, описывающие влияние скорости подачи сбежистой заготовки на мощность резания, для указанных трех режимов имеют вид (рис. 2а, б):

$$1. P_p = (1.75 \cdot 4 \cdot 6000 / 60) \cdot 8 \cdot (\sin(10 / (2 \cdot 8))) \cdot ((100 \cdot v_s) / (4 \cdot 6000)) \cdot (2 \cdot (2 + (16 \cdot v_s) \cdot \tan(0.01))) - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot v_s / (4 \cdot 6000))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 - ((50 \cdot v_s) / (4 \cdot 6000))^{(4/2)})^{(2/4)}) \quad (20)$$

$$2. P_p = (1.75 \cdot 4 \cdot 4000 / 60) \cdot 10 \cdot (\sin(10 / (2 \cdot 10))) \cdot ((100 \cdot v_s) / (4 \cdot 4000)) \cdot (2 \cdot (1 + (16 \cdot v_s) \cdot \tan(0.01))) - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot v_s / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 - ((50 \cdot v_s) / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)}) \quad (21)$$

$$3. P_p = (1.75 \cdot 6 \cdot 4880 / 60) \cdot 6.25 \cdot (\sin(10 / (2 \cdot 6.25))) \cdot ((100 \cdot v_s) / (6 \cdot 4880)) \cdot (2 \cdot (2 + (14 \cdot v_s) \cdot \tan(0.01))) - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot v_s / (6 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 - ((50 \cdot v_s) / (6 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)}) \quad (22)$$

Сравнение результатов моделирования мощности резания при профильном фрезеровании заготовки, со сбежистостью и без таковой, показало, что в первом случае мощность резания больше, чем во втором. Наибольшее приращение мощности резания наблюдается в самом конце обработки сбежистой заготовки, и оно может превышать в разы мощность, характерную для обработки заготовки, не имеющей сбежистости.

Полученные данные свидетельствуют о том, что без новых технических и технологических решений процесс профильного фрезерования отходов лесопиления реализовать невозможно.

Установлено также влияние радиуса профиля фрезы $R_{ПК}$ на мощность резания при обработке сбежистой заготовки на следующих режимах ($K=1,75 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^3}$):

1. $z=2$; $n=4880 \text{ мин}^{-1}$; $B=10 \text{ см}$; $v_s = 10 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$; $t=1,0 \text{ см}$; $+\beta_{сф} = \arctg(0.01)$; $\tau=10 \text{ с}$; $R_{\min} = 5 \text{ см}$; $R_{\max} = 9 \text{ см}$;

2. $z=4$; $n=5500 \text{ мин}^{-1}$; $B=10 \text{ см}$; $v_s = 15 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$; $t=1,5 \text{ см}$; $+\beta_{сф} = \arctg(0.01)$; $\tau=10 \text{ с}$; $R_{\min} = 6,5 \text{ см}$; $R_{\max} = 9 \text{ см}$;

3. $z=4$; $n=6000 \text{ мин}^{-1}$; $B=10 \text{ см}$; $v_s = 20 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$; $t=2 \text{ см}$; $+\beta_{сф} = \arctg(0.01)$; $\tau=10 \text{ с}$; $R_{\min} = 5 \text{ см}$; $R_{\max} = 9 \text{ см}$.

Уравнения, описывающие влияние радиуса $R_{ПК}$ на мощность резания, для указанных режимов имеют вид:

$$1. P_p = (1.75 \cdot 2 \cdot 4880 / 60) \cdot R_{ПК} \cdot (\sin(10 / (2 \cdot R_{ПК}))) \cdot ((100 \cdot 10) / (2 \cdot 4880)) \cdot (2 \cdot (1 + (10 \cdot 10) \cdot \tan(0.01))) - 5 + (25 - (50 \cdot 10 / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 - ((50 \cdot 10) / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)}) \quad (23)$$

$$2. P_p = (1.75 \cdot 4 \cdot 5500 / 60) \cdot R_{\text{ФК}} \cdot (\sin(10 / (2 \cdot R_{\text{ФК}}))) \cdot ((100 \cdot 15) / (4 \cdot 5500)) \cdot (2 \cdot (1.5 + (15 \cdot 10) \tan(0.01))) - 5 + (25 - (50 \cdot 15 / (4 \cdot 5500))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 - ((50 \cdot 15) / (4 \cdot 5500))^{(4/2)})^{(2/4)}; \quad (24)$$

$$3. P_p = (1.75 \cdot 4 \cdot 6000 / 60) \cdot R_{\text{ФК}} \cdot (\sin(10 / (2 \cdot R_{\text{ФК}}))) \cdot ((100 \cdot 20) / (4 \cdot 6000)) \cdot (2 \cdot (2 + (20 \cdot 10) \tan(0.01))) - 5 + (25 - (50 \cdot 20 / (4 \cdot 6000))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 - ((50 \cdot 20) / (4 \cdot 6000))^{(4/2)})^{(2/4)}. \quad (25)$$

Моделирование мощности резания при профильном фрезеровании древесной заготовки, не имеющей сбежистости, показал, что наибольшее влияние на значение мощности оказывают глубина резания и скорость рабочей подачи заготовки, в меньшей степени влияет радиус профиля фасонной фрезы. Из рассмотренных пород древесины наибольшей мощностью резания характерна для фасонного фрезерования дуба, в меньшей степени – для обработки березы, а самая малая мощность – для сосны.

Сбежистость обрабатываемой заготовки с положительным приращением припуска оказывает наибольшее влияние на уровень потребляемой мощности по сравнению с элементами режима резания и геометрическими показателями фасонной фрезы. Установлено, что сбежистость заготовки, допускаемая стандартом, может вызывать увеличение в разы мощности фрезерования, характерной для обработки заготовки, не имеющей сбежистости. Это свидетельствует о серьезных трудностях профильного фрезерования отходов лесопиления и необходимости разработки новых технических и технологических решений для реализации процесса обработки на высоких режимах резания.

Результаты проведенных теоретических исследований и моделирования мощности резания при профильном фрезеровании древесины проверены экспериментально. Профильное фрезерование древесины выполняли на спроектированном и изготовленном станке ПФП-100 [6, 7]. В качестве заготовок при проведении экспериментов использовали периферийные сегменты хвойных пород естественной влажности. Скорость резания 45 м/с, скорость продольной подачи 2,5; 5,0; 7,5; 10,0 м/мин; припуск на обработку 10...20 мм, сучковатость – один – три сучка на метр длины заготовки. Фрезерование неокоренной поверхности периферийного сегмента проводили при снятых дисковых пилах, предназначенных для обрезки боковых кромок.

Для обработки использовали сборную фрезу с механическим креплением ножей из быстрорежущей стали Р6М5 с углом наклона $\omega = 0$ режущих лезвий к оси вращения инструмента, заточенных по дуге окружности радиусом $R_{\text{ФК}}$. Максимальный диаметр 180 мм, минимальный диаметр 130 мм, высота фрезы 110 мм.

В процессе проведения опытов измеряли абсолютное значение и скорость изменения мощности фрезерования по формуле:

$$\frac{\Delta P_p}{\Delta \tau} = 3U_{\phi} \cdot \cos \varphi \cdot \eta \cdot \frac{\Delta I}{\Delta \tau}, \quad (26)$$

где ΔP_p – изменение мощности фрезерования, кВт; $\Delta \tau$ – время между двумя измерениями, с; U_{ϕ} – фазное напряжение (220 В); $\cos \varphi$ – параметр электродвигателя, отражающий отношение в обмотках активных и реактивных токов; η – к. п. д. электродвигателя привода фрезы; ΔI – изменение силы тока, потребляемого электродвигателем привода главного движения.

Результаты экспериментов показали, что процесс профильного фрезерования периферийных сегментов протекает удовлетворительно при малых скоростях подачи заготовки $v_f \leq 7$ м/мин, а при более высоких подачах наблюдался повышенный уровень вибрации элементов технологической системы и ухудшение качественных показателей обработанных поверхностей. Удовлетворительная сходимость теории и практики наблюдалась при скоростях подачи $v_f \leq 7$ м/мин. Сравнение результатов расчетов и экспериментов для более высоких скоростей подачи заготовок не представилось возможным из-за нестабильного протекания процесса профильного фрезерования периферийных сегментов, что объясняется их неоднородными свойствами, сучковатостью и сбежистостью обрабатываемой неокоренной поверхности.

Эксперименты показали также, что для реализации производительного процесса профильного фрезерования периферийных сегментов, необходима разработка новых технических решений, например, оснащение станка для профильного фрезерования отходов лесопиления системой управления мощностью фрезерования.

Литература

1. Сафин Р.Р. Сфин 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. [Http://bent.ru/modules/Articles/article.php?storyidH2693](http://bent.ru/modules/Articles/article.php?storyidH2693).
6. Пат. № 95589 Российская Федерация, МПК В27С, 1/00. Станок для первичной обработки горбыля / Фомин А.

А., Гусев В. Г.: заявл. 11. 03. 2010; опубл. 10. 07. 2010.
Бюл. № 19.
7. Пат. № 2443547 Российская Федерация, МПК В27С,
1/00. Способ первичной обработки горбыля / Фомин А.

А., Гусев В. Г.: заявл. 11. 03. 2010; опубл. 27. 02. 2012.
Бюл. № 6.

© **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.