

Лукаш В.Т., Гриневич С.А., Гришкевич А.А.
(БГТУ, г. Минск, РБ) valeri-tad@rambler.ru

МОЩНОСТЬ ПИЛЕНИЯ ЛАМИНИРОВАННЫХ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ ДИСКОВЫМИ ПИЛАМИ С ПЛОСКО-ТРЕУГОЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ ЗУБЬЕВ И ВОГНУТОЙ ПЕРЕДНЕЙ ГРАНЬЮ

Получены математические модели в виде уравнений второго порядка, описывающие влияние основных переменных факторов на начальную и конечную мощности резания при обработке ламинированных ДСтП дисковыми твердосплавными пилами с плоско-треугольным профилем зубьев с вогнутой передней гранью.

Введение. Деревообрабатывающая промышленность относится к числу отраслей, требующих непрерывного совершенствования и модернизации с целью повышения эффективности производства и соответствия производимой продукции растущим требованиям потребителей.

Поэтому немаловажный интерес для деревообработки представляет тема энергосбережения. Все больше внимания производители уделяют внедрению энергосберегающих технологий, энергосберегающего оборудования и материалов, научно-технической обоснованности реализуемых мероприятий. Особый интерес теме внедрения энергоэффективных технологий в деревообрабатывающей промышленности добавляет тот факт, что доля энергозатрат в себестоимости отечественной продукции в данной отрасли экономики достигает 15–17% [1].

Наиболее действенная мера снижения доли энергозатрат в себестоимости продукции – переоснащение и модернизация энергоемких производств, проведение мероприятий, направленных на сбережение энергии, в том числе разработка и внедрение энергоэффективных режимов обработки древесины и материалов на ее основе.

В мебельной промышленности сегодня широко используются различные древесные композиционные материалы, и в частности ламинированные древесностружечные плиты. На кафедре деревообрабатывающих станков и инструментов Белорусского государственного технологического университета была реализована серия работ по исследованию процесса раскроя ламинированных ДСтП дисковыми пилами, оснащенными пластинами твердого сплава.

Основная часть. В рамках исследований были использованы пилы с тремя различными профилями зубьев, которые наиболее распространены на производстве: попеременно-косой, плоско-трапециевидный и плоско-треугольный с вогнутой передней гранью. Каждый профиль имеет свои конструктивные особенности и геометрические характеристики, которые определяют не только стойкость инструмента и качество обработки, но и энергетические показатели процесса резания.

Результаты исследований затрат мощности на резание ламинированных древесностружечных плит при использовании дисковых пил с попеременно-косым и плоско-трапециевидным профилями зубьев были опубликованы ранее в работах [2, 3, 4].

В то же время производители [5] активно рекламируют плоско-треугольный профиль зубьев с вогнутой передней гранью, акцентируя внимание на высоком качестве обработки ламинированных плит, даже при отсутствии подрезного агрегата.

Комбинация зубьев плоско-треугольного профиля, представленная на рис. 1, позволяет обеспечить «постепенную» обработку материала. Зуб треугольной формы осуществляет рассечение поверхностного слоя. Его заостренная форма облегчает удаление материала, позволяет избегать сдавливания и образования сколов. Вогнутая поверх-

ность передней грани обеспечивает плавную обработку материала, начиная с боковых сторон зуба к центру. В результате пропил получается ровным и без сколов.

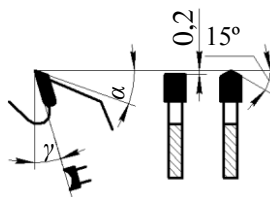


Рис. 1. Плоско-треугольный профиль зубьев с вогнутой передней гранью

Исследования плоско-треугольного профиля проводились при тех же постоянных и переменных факторах, что и для попеременно-косого и плоско-трапециевидного [2, 3].

Одними из выходных показателей, фиксируемых в ходе эксперимента, являлись начальная мощность P_0 – мощность, потребляемая на резание при остром инструменте и конечная мощность $P_{\text{кон}}$ – мощность в конце опыта.

В качестве критерия остановки эксперимента был принят факт появления сколов на поверхности лицевого облицовочного слоя величиной более 0,3 мм. Данный дефект, согласно ГОСТ 9769–79 [6], определяется как невыполнение требований к качеству распиловки и является технологическим критерием затупления пил.

Знание величины мощности, потребляемой в начале резания P_0 для разных профилей, позволяет корректно сопоставить последние и проанализировать их без учета влияния затупления режущего элемента.

Величина мощности, потребляемой на резание при потере качества обработки, в совокупности со знанием технологической стойкости может являться критерием оптимизации процесса пиления ламинированных ДСтП.

В обоих случаях под величиной потребляемой мощности подразумевается полезная мощность на резание, как разность между мощностью рабочего хода (потребляемой при пилении) и мощностью холостого хода (потребляемой при отсутствии полезной работы)

$$P_{\text{пол}} = P_{\text{р.х.}} - P_{\text{х.х.}} \quad (1)$$

Значения $P_{\text{р.х.}}$ и $P_{\text{х.х.}}$ рассчитывались через величину крутящего момента на шпинделе экспериментальной установки [7], определенную по формуле

$$M_{\text{кр}} = 2\varepsilon_i \cdot G \cdot W_{\text{кр}} = 2\varepsilon_i \cdot G \cdot (0,208 \cdot b^3) \quad (2)$$

где ε_i – относительная деформация датчика крутящего момента, Еод; G – модуль сдвига стали ($G = 80\,000$ Н/мм); $W_{\text{кр}}$ – момент сопротивления сечения, мм³; b – размер стороны квадрата силоизмерительной оправки в месте расположения тензорезисторов ($b = 25$ мм).

Величина относительной деформации определялась по формуле (3)

$$\varepsilon_i = \beta_{ui} / S_T \quad (3)$$

где β_{ui} – показания цифрового индикатора модуля индикации, мкВ/В; S_T – коэффициент тензочувствительности тензорезисторов ($S_T = 2,08$).

Методика определения крутящего момента основывается на принципе измерения сопротивления металлов и полупроводников под действием деформаций [8].

Зная $M_{\text{кр}}$, определяли мощность, потребляемую на резание

$$P = M_{\text{кр}} \cdot \omega, \quad (4)$$

где ω – угловая скорость пильного вала, с⁻¹.

Методическая сетка опытов, а также средние арифметические по результатам проведенных серий дублированных опытов значения выходных показателей представлены в таблице.

Таблица 1– Методическая сетка и результаты эксперимента

№ опыта	X_1	X_2	X_3	$Y_1 (P_o, Вт)$	$Y_2(P_{кон}, Вт)$	
ПФП	1	-1	-1	-1	244,29	304,29
	2	+1	-1	-1	621,43	741,43
	3	-1	+1	-1	342,86	422,86
	4	+1	+1	-1	834,29	1000,00
	5	-1	-1	+1	214,29	257,14
	6	+1	-1	+1	591,43	698,57
	7	-1	+1	+1	302,86	348,57
	8	+1	+1	+1	742,86	908,57
Звездные точки	9	-1	0	0	290,00	340,00
	10	+1	0	0	715,00	820,00
	11	0	-1	0	420,00	510,00
	12	0	+1	0	571,43	702,86
	13	0	0	-1	515,00	610,00
	14	0	0	+1	465,00	565,00

Однородность дисперсий опытов проверена по G-критерию Кохрена.

Для получения уравнений регрессии, описывающих выходные характеристики процесса пиления, использован В-план второго порядка.

По итогам статистической обработки экспериментальных данных получены математические модели, отражающие влияние подачи на зуб S_z (мм), скорости резания V (м/с) и величины выхода пилы из пропила a (мм) на значение потребляемой мощности при обработке ламинированных древесностружечных плит.

Оценка значимости коэффициентов регрессии произведена по t-критерию Стьюдента. После отбрасывания малозначимых коэффициентов и уточнения оставшихся уравнения регрессии приобрели следующих вид

$$Y_1(P_o) = -177,294 + 2803,15 \cdot S_z + 4,088 \cdot V + 2,557 \cdot a + 110,72 \cdot S_z \cdot V - 0,060 \cdot V \cdot a; \quad (5)$$

$$Y_1(P_{кон}) = -146,520 + 1361,2 \cdot S_z + 4,051 \cdot V + 2,672 \cdot a + 159,105 \cdot S_z \cdot V - 0,066 \cdot V \cdot a. \quad (6)$$

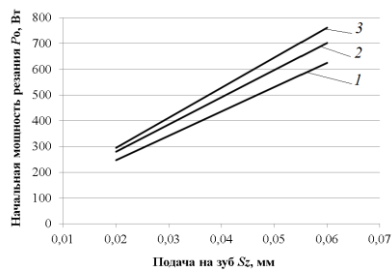
Адекватность уточненных моделей подтверждена проверкой по F-критерию Фишера.

По полученным моделям построены графические зависимости на нижнем, нулевом и верхнем уровнях варьирования переменных факторов.

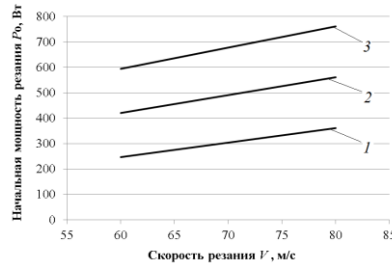
На рис. 2, а, г представлены графические зависимости, отражающие влияние подачи на зуб на начальную и конечную мощности резания, соответственно. Очевидно, с увеличением подачи на зуб потребляемая мощность растет по линейной зависимости. Это объясняется увеличением сил резания с ростом толщины стружки e , зависящей от S_z ($e = S_z \cdot \sin \theta$). Более интенсивный рост мощности при больших скоростях, по нашему мнению, связан с действием сил инерции удаляемого объема стружки [9].

На рис. 2, б, д приведены зависимости начальной и конечной мощности от скорости резания соответственно. На всех уровнях варьирования с ростом скорости резания потребляемая мощность также увеличивается по линейной зависимости. Это логично, так как мощность прямо пропорциональна скорости резания. Кроме того, существенное влияние с ростом скорости оказывают силы инерции. Так, при резании древесины мощность, потребляемая на ускорение отвода стружки, превышает 20% от общей мощности резания при скорости 55,5 м/с и с увеличением скорости резания эта мощность возрастает [9].

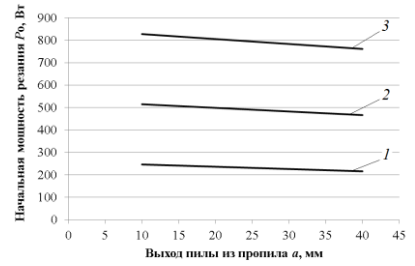
На графиках (рис. 2, в, е) отражено влияние величины выхода пилы из пропила на начальную и конечную мощности резания соответственно. Как видно, с увеличением выхода пилы из пропила мощность резания уменьшается, что связано с уменьшением длины дуги контакта режущего элемента с обрабатываемым материалом.



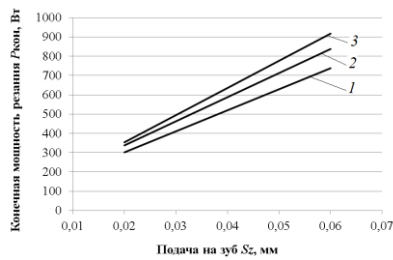
1 – $V = 60$ м/с, $a = 10$ мм
 2 – $V = 70$ м/с, $a = 25$ мм
 3 – $V = 80$ м/с, $a = 40$ мм



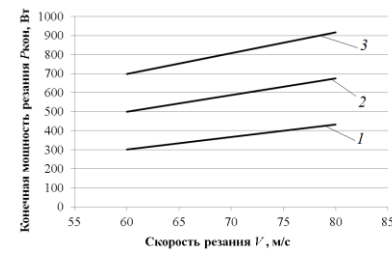
1 – $S_z = 0,02$ мм, $a = 10$ мм
 2 – $S_z = 0,04$ мм, $a = 25$ мм
 3 – $S_z = 0,06$ мм, $a = 40$ мм



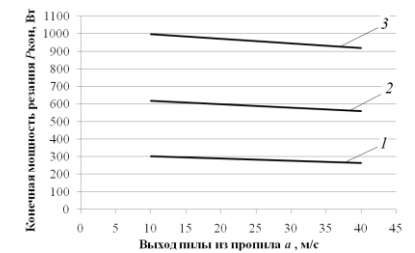
1 – $S_z = 0,02$ мм, $V = 60$ м/с
 2 – $S_z = 0,04$ мм, $V = 70$ м/с
 3 – $S_z = 0,06$ мм, $V = 80$ м/с



1 – $V = 60$ м/с, $a = 10$ мм
 2 – $V = 70$ м/с, $a = 25$ мм
 3 – $V = 80$ м/с, $a = 40$ мм



1 – $S_z = 0,02$ мм, $a = 10$ мм
 2 – $S_z = 0,04$ мм, $a = 25$ мм
 3 – $S_z = 0,06$ мм, $a = 40$ мм



1 – $S_z = 0,02$ мм, $V = 60$ м/с
 2 – $S_z = 0,04$ мм, $V = 70$ м/с
 3 – $S_z = 0,06$ мм, $V = 80$ м/с

Рис. 2. Зависимости начальной (а, б, в) и конечной (г, д, е) полезной мощности резания от переменных технологических факторов (S_z , V , a) при обработке ЛДСтП дисковыми твердосплавными пилами с плоско-треугольным профилем зубьев с вогнутой передней гранью

Это может быть объяснено на основании известной зависимости

$$F_k = F_{\text{зуб}} \cdot \frac{l}{t}, \quad (7)$$

где F_k – средняя касательная сила резания за оборот, Н; $F_{\text{зуб}}$ – средняя сила, приходящаяся на один зуб, Н; l – длина дуги контакта зуба с обрабатываемым материалом, мм; t – шаг зуба пилы, мм.

С увеличением выхода пилы из пропила длина дуги контакта уменьшается, что, согласно формуле (7), должно привести к уменьшению средней касательной силы резания за оборот, а значит, и мощности резания.

В то же время с увеличением выхода пилы из пропила растет средний кинематический угол встречи и, соответственно, толщина снимаемой стружки. Это приводит к увеличению силы, приходящейся на один зуб пилы, средней касательной за оборот и мощности резания.

Таким образом, влияние выхода пилы из пропила противоречиво. Согласно полученным данным можно предположить, что при увеличении выхода пилы из пропила падение мощности за счет уменьшения длины дуги контакта более существенно, чем ее повышение за счет увеличения толщины стружки.

Заключение. Получены математические модели в виде уравнений второго порядка, описывающие влияние основных переменных факторов на начальную и конечную мощности резания при обработке ламинированных ДСтП дисковыми твердосплавными пилами с плоско-треугольным профилем зубьев с вогнутой передней гранью.

В результате анализа полученных моделей установлено:

- с увеличением подачи на резец от 0,02 мм до 0,06 мм начальная и конечная мощности резания увеличиваются в 2,5–2,6 раза;
- с увеличением скорости резания от 60 м/с до 80 м/с начальная мощность возрастает в 1,30–1,45 раза;
- с увеличением выхода пилы из пропила от 10 мм до 40 мм начальная и конечная мощности резания уменьшаются в 1,08–1,15 раза.

Падение и рост значений происходит по линейной зависимости.

Что касается качества обработки, то в ходе эксперимента было отмечено, что при использовании для раскроя ламинированных ДСтП дисковых пил с плоско-треугольным профилем зубьев с вогнутой передней гранью полностью исключить сколы облицовочного слоя на кромках пропила невозможно, но их размеры и количество меньше.

Кроме того, следует подчеркнуть, что использование пил с плоско-треугольным профилем зубьев с вогнутой передней гранью ограничено трудностями, связанными с их подготовкой, и в частности заточкой, т. к. необходимо более дорогостоящее заточное оборудование, которым оснащены далеко не все наши предприятия и специализированные организации.

Литература

1. Киевякис О. Секреты энергосбережения // Наука и инновации.- 2013. - № 8 (126). - С. 8–10.
2. Лукаш В. Т., Гриневич С. А. Технологическая стойкость и начальная мощность при обработке ламинированных ДСтП пилами с попеременно-косым профилем зубьев // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. - 2009. - Вып. XVII. - С. 317–321.
3. Лукаш В. Т., Гриневич С. А. Технологическая стойкость и начальная мощность при обработке ламинированных ДСтП пилами с плоско-трапециевидным профилем зубьев // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. - 2010. - Вып. XVIII. - С. 234–239.
4. Лукаш В. Т., Гриневич С. А. Влияние профиля зубьев дисковых пил с пластинами твердого сплава на технологическую стойкость и потребляемую мощность при обработке ламинированных древесностружечных плит (ЛДСтП) // Труды БГТУ. - 2011. - № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. - С. 256–262.
5. Каталоги дереворежущего инструмента фирм Leitz, Leuco, АКЕ, Kanefusa. - 2013.
6. Пилы дисковые с твердосплавными пластинами для обработки древесных материалов. Технические условия: ГОСТ 9769–79. - Введ. 01.01.81. – М.: Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности: Государственный комитет СССР по стандартам, 1979. - 15 с.
7. Кравченко А. С., Лукаш В. Т. Применение силоизмерительного телеметрического устройства для исследования процессов пиления древесных материалов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. - 2006. - Вып. XIV. - С. 172–174.
8. Макаров Р. А. Тензометрия в машиностроении: справ. пособие. - М.: Машиностроение, 1975. - 288 с.
9. Любченко В. И. Резание древесины и древесных материалов: учеб. пособие для вузов. – М.: Лесная пром-сть, 1986. – 296 с.