

УДК 674.053

В. Т. Лукаш, ассистент (БГТУ); С. А. Гриневич, канд. техн. наук (БГТУ)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ И НАЧАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛАМИНИРОВАННЫХ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ (ДСтП) ПИЛАМИ С ПЛОСКО-ТРАПЕЦИЕВИДНЫМ ПРОФИЛЕМ ЗУБЬЕВ

Пиление дисковыми пилами относится к наиболее распространенным и производительным процессам обработки ламинированных древесностружечных плит. Основной задачей при обработке таких древесных материалов является обеспечение высокого качества получаемой продукции при минимуме потребляемой мощности.

В статье приведены результаты исследований влияния основных технологических факторов на качество обработки, технологическую стойкость режущего инструмента и мощность, потребляемую при раскрое ламинированных древесностружечных плит твердосплавными дисковыми пилами с плоско-трапециевидным профилем зубьев. Впервые получены математические модели, позволяющие устанавливать величины переменных технологических факторов, обеспечивающих максимальную технологическую стойкость твердосплавных пил с плоско-трапециевидным профилем зубьев.

Sawing by circular saws concerns to one of the most widespread and high-efficiency processes of machining laminated chipboard plates. The important problem at a processing such materials is achieving of high quality receivable commodity.

In paper results of experimental researches of basic technology factors such as feed on tooth, out of saw and speed of cutting influence on quality of processing and power capacity are considered at machining laminated chipboard plates by hard-face alloy circular saws. For the first time mathematical models in the form of the second order equation are received, allowing to establish value of main technological parameters at sawing laminated chipboards and cutting power consumption. The analysis of the received mathematical dependences is made.

Введение. Основным видом механической обработки ламинированных ДСтП является раскрой дисковыми пилами на заданные размеры. Выбор режущего инструмента и технологических режимов процесса пиления, обеспечивающих высокое качество продукции без ущерба производительности труда, является одной из первостепенных задач для производителя.

Решение данной проблемы может быть получено только путем проведения соответствующих экспериментальных исследований.

Основная часть. Производители круглых пил рекомендуют использовать для раскроя ламинированных древесностружечных плит следующие профили зубьев: попеременно косой, плоско-трапециевидный; плоско-треугольный с вогнутой передней гранью [1–4].

На данный момент наибольшее распространение в отечественной промышленности для раскроя облицованных древесностружечных плит получили пилы с плоско-трапециевидным зубом (рис. 1).

В пилах с таким профилем основную нагрузку несет трапециевидный зуб, а прямой подчищает. Поскольку на резах с «трапецией» отсутствуют острые углы, стойкость таких пил будет выше, чем на пилах с «косой» заточкой.

На рис. 2, а показан зуб с заточкой в 45° , прорезающий паз в обрабатываемом материале. Он сопровождается плоским зубом, выпол-

няющим легкий финишный рез по бокам пропила (рис. 2, б). Зуб с заточкой в 45° формирует пропила, а обычные зубья выравнивают его. Ширина фаски – 0,25–0,33 ширины зуба. Высота зуба «лидера» больше на 0,2–0,3 мм, что позволяет ему резать глубже, чем подчищающие зубья, и тем самым предохраняет их острые углы и увеличивает срок службы пилы между переточками. Благодаря такому резанию не только увеличивается срок службы пилы, но и улучшается качество обработки [5].

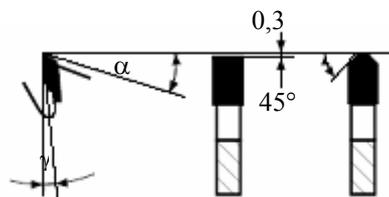


Рис. 1. Плоско-трапециевидный профиль зубьев FZ/TR

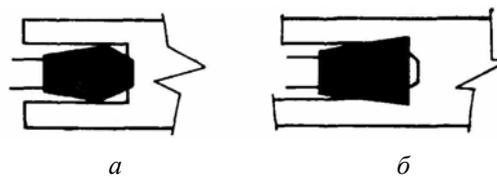


Рис. 2. Схема формирования пропила трапециевидным (а) и плоским (б) зубьями

Однако, несмотря на специфику формирования пропила, производители не дают отдельных рекомендаций по эксплуатации инструмента с плоско-трапециевидным профилем зубьев. В то же время, как указывалось выше, пилы с плоско-трапециевидным профилем зубьев обеспечивают большую стойкость режущего инструмента и высокое качество формируемой поверхности.

Поэтому актуальным представляется проведение исследовательских работ по изучению влияния режимов раскроя ламинированных древесностружечных плит на технологическую стойкость твердосплавных дисковых пил с плоско-трапециевидным профилем зубьев.

Выбор постоянных и переменных факторов выполнен аналогично с работой [6]. Перечень факторов и их значение представлены в табл. 1.

Таблица 1

Перечень технологических факторов, принятых при проведении эксперимента

Наименование фактора	Значение
обрабатываемый материал	ламинированная трехслойная ДСтП («Kronos-pan», Польша)
Постоянные факторы	
Толщина материала, мм	25
Средняя плотность, кг/м ³	640
Диаметр пилы, мм	350
Толщина полотна, мм	2,2
Ширина пропила мм	3,2
Число зубьев, шт	36
Передний угол, град	10
Задний угол, град	15
Профиль зубьев	FZ/TR
Переменные факторы	
Подача на зуб U_z , мм	0,02–0,06
Скорость резания V , м/с	60–80
Выход пилы из пропила a , мм	10–40

Для получения математического описания влияния переменных технологических факторов на стойкость инструмента использован В-план второго порядка. Реализация В-плана позволяет описать зависимость выходной величины от каждого фактора в виде квадратного уравнения.

В общем случае, когда число варьируемых факторов $k = 3$, модель имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2 + b_{33} \cdot X_3^2 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3, \quad (1)$$

где Y – выходная величина; $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ – коэффициенты регрессии; X_1, X_2, X_3 – нормализованные обозначения переменных факторов.

Уровни варьирования переменных факторов и соответствующие им значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Уровни и диапазоны варьирования

Переменные факторы	Нижний уровень (-1)	Нулевой уровень (0)	Верхний уровень (+1)
$X_1 (U_z)$	0,02	0,04	0,06
$X_2 (V)$	60	70	80
$X_3 (a)$	10	25	40

Поскольку необходимо обеспечить чистовой раскрой ламинированных древесных материалов, то в качестве одного из выходных показателей был принят фактический путь резания до появления сколов величиной более 0,3 мм на поверхности ламината $Y_1 (L, м)$. Данный дефект, согласно ГОСТ 9769-79, определяется как невыполнение требований к качеству распиловки и является критерием затупления пил.

Для исследования энергопотребления при пилении ламинированных ДСтП необходимо фиксировать величину потребляемой мощности. Чтобы выявить степень и характер влияния каждого из переменных факторов на мощность резания, целесообразно получить математическую модель при остром инструменте $Y_2 (P_0, Вт)$. Это позволит сопоставить значения потребляемой мощности без учета затупления зубьев пилы, т. к. при одном и том же пути резания величина затупления и ее влияние на энергопотребление при разных режимах могут быть различными.

Методическая сетка опытов, а также средние арифметические по результатам проведенных серий дублированных опытов представлены в табл. 3.

Исследования проводились на экспериментальной установке, созданной на базе промышленного станка ФСА, позволяющей регистрировать силовые показатели процесса пиления [6, 7].

Для различных режимов фиксировались потребляемая мощность в начальный момент времени и фактический путь резания до появления сколов на поверхности ламината.

Полезная мощность на резание рассчитывалась через крутящий момент на шпинделе станка, который определялся по величине разбаланса тензомоста. Методика определения крутящего момента основывается на принципе измерения сопротивления металлов и полупроводников под действием деформаций [7, 8].

Таблица 3
Методическая сетка опытов

№ опыта	X_1	X_2	X_3	$Y_1 (L)$, м	$Y_2 (P_0)$, Вт
ПФП	1	-1	-1	4277,5	261,4
	2	+1	-1	5507,0	600,0
	3	-1	+1	4720,0	365,7
	4	+1	+1	5900,4	822,9
	5	-1	-1	13467,1	214,3
	6	+1	-1	8790,4	488,6
	7	-1	+1	14745,0	308,6
	8	+1	+1	9512,0	754,3
Звездные точки	9	-1	0	12950,4	260,0
	10	+1	0	10982,3	720,0
	11	0	-1	14938,4	394,3
	12	0	+1	16358,4	525,7
	13	0	0	8044,2	535,0
	14	0	0	14218,8	485,0

По результатам статистической обработки результатов эксперимента получены следующие модели:

– технологическая стойкость (путь резания до появления сколов), Y_1 (м):

$$Y_1(L) = 2567,481 + 752052,7 \cdot X_1 - 609,411 \cdot X_2 + 1254,392 \cdot X_3 - 8057175 \cdot X_1^2 + 4,592 \cdot X_2^2 - 18,034 \cdot X_3^2 - 378,4 \cdot X_1 \cdot X_2 - 5133,2 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,9697 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (2)$$

– начальная мощность резания (мощность при остром резце), Y_2 (Вт):

$$Y_2(P_0) = -1392,315 - 1730,139 \cdot X_1 + 44,282 \cdot X_2 - 7,005 \cdot X_3 - 3626,25 \cdot X_1^2 - 0,315 \cdot X_2^2 + 0,082 \cdot X_3^2 + 181,25 \cdot X_1 \cdot X_2 - 31,548 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,027 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (3)$$

После исключения незначимых коэффициентов и уточнения оставшихся модели были приведены к явному виду. Нормализованные значения переменных факторов X_1, X_2, X_3 преобразованы следующим образом:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{(U_z - 0,04)}{0,02}; \\ X_2 &= \frac{(V - 70)}{10}; \\ X_3 &= \frac{(a - 25)}{15}. \end{aligned} \quad (4)$$

В результате уравнения регрессии приняли следующий вид:

$$Y_1(L) = 1854,553 + 725818,333 \cdot U_z - 598,465 \cdot V + 1322,588 \cdot a - 8060312,5 \cdot U_z^2 + 4,579 \cdot V^2 - 18,041 \cdot a^2 - 5133,333 \cdot U_z \cdot a; \quad (5)$$

$$Y_2(P_0) = -1479,211 - 2015,833 \cdot U_z + 46,205 \cdot V - 4,994 \cdot a - 0,323 \cdot V^2 + 0,081 \cdot a^2 + 181,25 \cdot U_z \cdot V - 31,667 \cdot U_z \cdot a. \quad (6)$$

Адекватность полученных математических моделей подтверждена проверкой по F-критерию Фишера. По полученным моделям были построены графические зависимости на нижнем, нулевом и верхнем уровнях варьирования переменных факторов.

На рис. 3 представлена зависимость фактического пути резания от подачи на зуб.

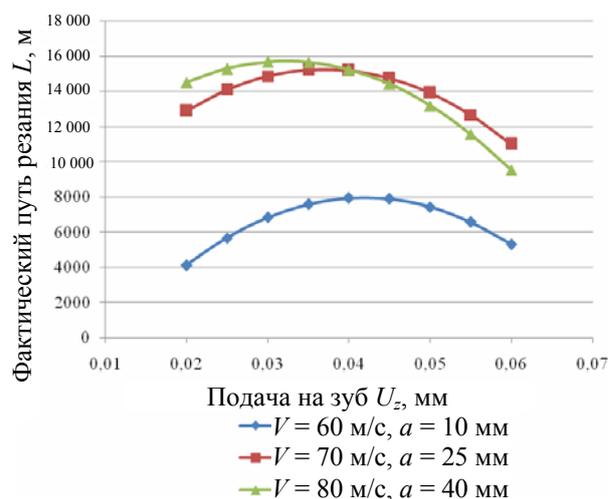


Рис. 3. Зависимости пути резания от подачи на зуб

Из графика следует, что с увеличением подачи на резец от 0,02 до 0,032–0,042 мм путь резания увеличивается. Меньшее значение пути резания при малых подачах на зуб, вероятно, связано с ухудшением условий работы режущего элемента [9]. С дальнейшим ростом подачи на резец до 0,06 мм фактический путь резания, соответствующий одному уровню качества, уменьшается. Это связано с ростом сил резания при увеличении толщины стружки. По мере затупления инструмента зуб пилы не режет материал, а скалывает его из-за больших усилий резания.

На рис. 4 представлена зависимость фактического пути резания от скорости резания.

Скорость резания является фактором, положительно влияющим на стойкость режущего инструмента, и с ее увеличением от 60 до 80 м/с

фактический путь резания на разных уровнях варьирования растет на 6–20%. Положительное влияние скорости резания может быть связано с возникновением инерционного подпора [10].

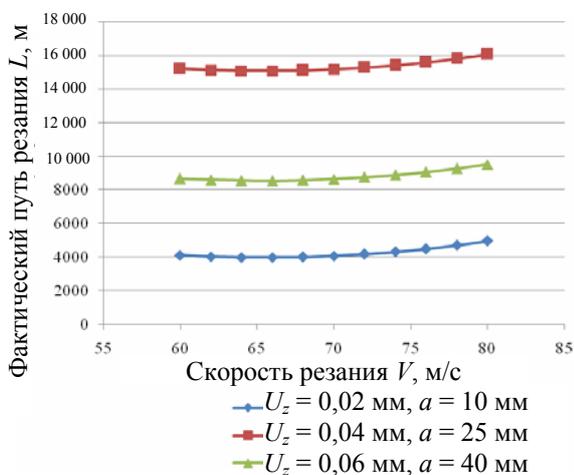


Рис. 4. Зависимости пути резания от скорости резания

На рис. 5 представлена зависимость технологической стойкости от величины выхода пилы из пропила

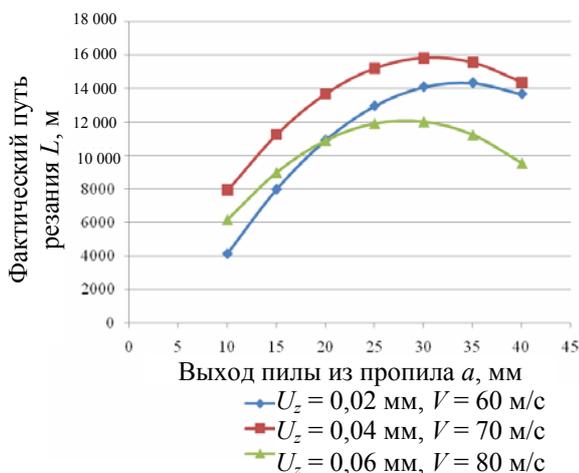


Рис. 5. Зависимости пути резания от величины выхода пилы из пропила

Все зависимости носят одинаковый характер и позволяют утверждать, что с ростом величины вылета пилы из пропила от 10 до ~28–35 мм наблюдается рост пути резания по критерию качества. Увеличение пути может быть связано с увеличением вертикальной составляющей силы резания, которая прижимает ламинат к основе. При дальнейшем увеличении выхода пилы путь резания уменьшается. Возможно, это связано с увеличением ударной нагрузки при входе зуба пилы в обрабатываемый материал.

На рис. 6 представлены графические зависимости, отражающие влияние подачи на зуб на начальную мощность резания.

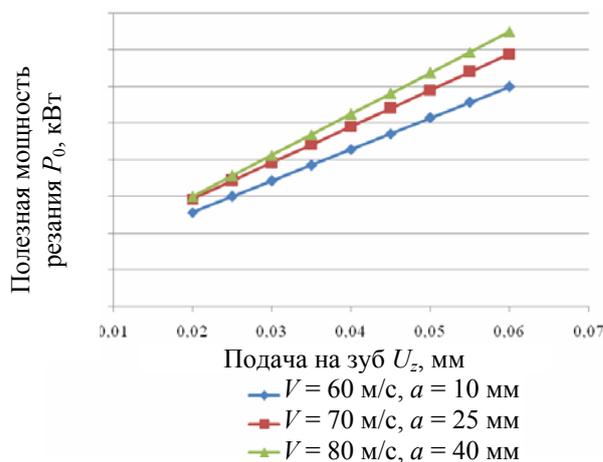


Рис. 6. Зависимости начальной мощности резания от подачи на зуб

Очевидно, что с увеличением подачи на зуб мощность растет по линейной зависимости. С ростом подачи на резец от 0,02 мм до 0,06 мм начальная мощность увеличивается в 2,3–2,5 раза. Увеличение мощности связано с увеличением толщины срезаемого слоя.

На рис. 7 приведены зависимости начальной мощности от скорости резания. На всех уровнях варьирования наблюдается увеличение потребляемой мощности с ростом скорости резания. Предположительно это связано с ростом мощности, потребляемой на отвод стружки. Так, по данным [10], при резании древесины мощность, потребляемая на отвод стружки, превышает 20% от общей мощности резания при скорости 55,5 м/с, и с увеличением скорости резания эта мощность возрастает.

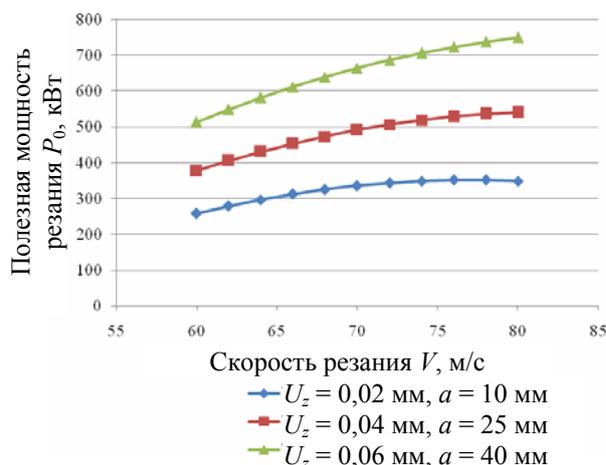


Рис. 7. Зависимости начальной мощности резания от скорости резания

На графиках (рис. 8) отражено влияние величины выхода пилы из пропила на начальную мощность резания.

С увеличением выхода пилы из пропила от 10 до 40 мм мощность резания уменьшается

в 1,11–1,23 раза. Это может быть объяснено уменьшением длины дуги контакта режущего элемента с обрабатываемым материалом и, соответственно, числа зубьев, находящихся в пропиле, что математически выражается известной зависимостью:

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

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

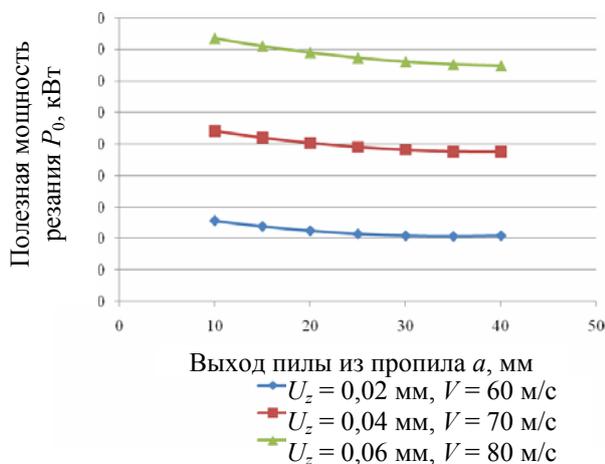


Рис. 8. Зависимости начальной мощности резания от величины выхода пилы из пропила

С увеличением выхода пилы из пропила длина дуги контакта уменьшается, что, согласно формуле (7), должно привести к уменьшению мощности резания.

Снижение интенсивности падения мощности с увеличением выхода пилы из пропила можно объяснить ростом среднего кинематического угла встречи и, соответственно, толщины снимаемой стружки.

$$e = U_z \cdot \sin\theta, \text{ мм.} \quad (8)$$

Это приводит к увеличению силы, приходящейся на один зуб пилы, средней касательной за оборот и мощности резания.

Для нужд производства требуется подобрать режим, который бы обеспечил наибольший срок службы дереворежущего инструмента при высоком качестве обработки. Проведенные исследования позволяют получить и проанализировать зависимость пути резания L до появления сколов на поверхности обрабатываемого материала от переменных технологических факторов. Однако для оценки эффективности применения для раскроя ламинированных ДСтП того или иного режима технологическую стойкость удобнее выражать не через путь резания L , а через

количество обработанного материала S (м п.). Количество обработанного материала может быть найдено по формуле

$$S = \frac{L \cdot U_z \cdot z}{l}. \quad (9)$$

Формула (9) позволяет оценить влияние рассматриваемых технологических факторов на количество обработанного материала.

Так, на рис. 9 приведены зависимости количества обработанного материала S от подачи на зуб U_z .

Очевидно, что с ростом подачи на зуб от 0,02 до 0,05 мм количество обработанного материала с обеспечением требуемого уровня качества увеличивается. Дальнейшее увеличение подачи на резец приводит к уменьшению S , что связано с противоречивым влиянием величины U_z на фактический путь резания L (рис. 3).

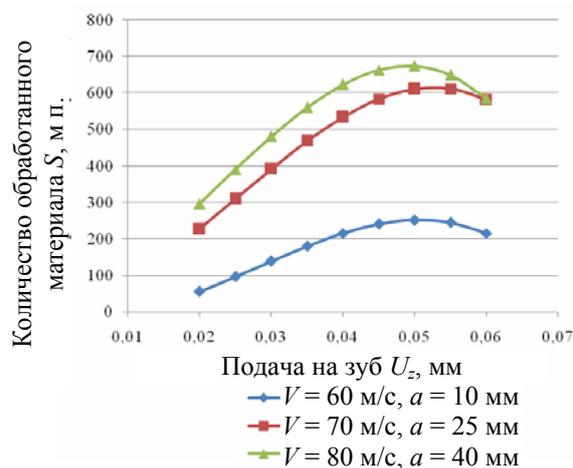


Рис. 9. Зависимости количества обработанного материала от подачи на зуб

Ниже представлены зависимости количества обработанного материала S от скорости резания V (рис. 10) и от величины выхода пилы из пропила a (рис. 11).

Поскольку данные факторы в явном виде не входят в формулу (9), то их влияние аналогично представленным ранее графическим зависимостям (рис. 4, 5).

Для определения режима пиления ламинированных древесностружечных плит, обеспечивающего наибольшую технологическую стойкость дереворежущего инструмента, была проведена оптимизация зависимости (9) с помощью математического пакета MathCad. Проведенная оптимизация позволила установить, что максимум функции $S(U_z, V, a)$ равен 720 м п. при $U_z = 0,052$ мм, $V = 80$ м/с, $a = 33,2$ мм

Максимальное значение S , а также графики получены для экспериментальной пилы с числом зубьев $z = 36$. Так как количество обработанного

материала пропорционально количеству зубьев инструмента (формула (10)), то можно утверждать, что величина S для другого числа режущих элементов может быть получена простым пересчетом, а полученные значения переменных факторов для установленного оптимального режима будут справедливы для любого числа зубьев.

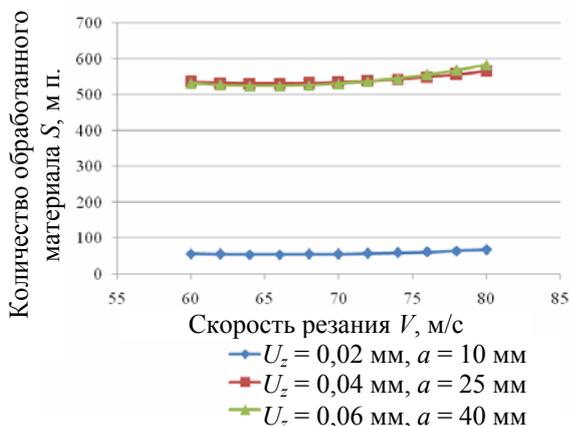


Рис. 10 Зависимости количества обработанного материала от скорости резания

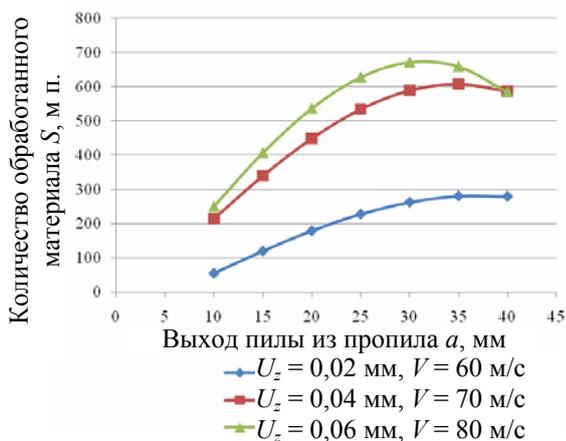


Рис. 11. Зависимости количества обработанного материала от величины выхода пилы из пропила

Заключение. Получены математические модели в виде уравнений второго порядка, описывающие влияние основных переменных факторов на начальную мощность и путь резания до появления сколов облицовочного материала на поверхности обрабатываемой плиты при их распиловке твердосплавными дисковыми пилами с плоско-трапециевидным профилем зубьев.

В результате анализа полученных математических моделей установлено:

- с увеличением подачи на резец от 0,02 мм до 0,06 мм начальная мощность увеличивается в 2,3–2,5 раза. Ее рост происходит по линейной зависимости;

- с увеличением подачи на резец от 0,02 до 0,032–0,042 мм фактический путь резания, со-

ответствующий одному уровню качества, увеличивается, с дальнейшим ростом подачи на резец до 0,06 мм – уменьшается;

- с увеличением скорости резания от 60 до 80 м/с начальная мощность растет в 1,35–1,46 раза;

- с увеличением скорости резания от 60 до 80 м/с фактический путь резания растет в 1,06–1,2 раза;

- с увеличением выхода пилы из пропила начальная мощность резания уменьшается в 1,11–1,23;

- путь резания с увеличением выхода пилы из пропила от 10 до ~ 28–35 мм увеличивается, при дальнейшем увеличении – падает.

Максимальное количество обработанного материала достигается при следующих значениях переменных факторов: $U_z = 0,052$ мм, $V = 80$ м/с, $a = 33,2$ мм.

Литература

1. The Leitz Lexicon / Handbook for Woodworking machine tools. Edition 4. Leitz GmbH & Co. – KG, Bundesrepublik Deutschland, 2007.

2. Leuco-Handbuch: каталог инструмента для обработки древесины и пластмасс. – 2007.

3. FaBa: каталог инструмента для обработки древесины. – 2007.

4. Freud: каталог инструмента для обработки древесины. – 2007.

5. Мелони, Т. Современное производство древесностружечных и древесноволокнистых плит: пер. с англ. В. В. Амалицкого и Е. И. Карасева / Т. Мелони. – М.: Лесная пром-сть, 1982. – 416 с.

6. Лукаш, В. Т. Технологическая стойкость и начальная мощность при обработке ламинированных ДСтП пилами с попеременно-косым профилем зубьев / В. Т. Лукаш, С. А. Гриневич // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 317–321.

7. Кравченко, А. С. Применение силоизмерительного телеметрического устройства для исследования процессов пиления древесных материалов / А. С. Кравченко, В. Т. Лукаш // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2006. – Вып. XIV. – С. 172–174.

8. Макаров, Р. А. Тензометрия в машиностроении: справ. пособие / Р. А. Макаров. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.

9. Амалицкий, Вит. В. Пиление твердосплавными круглыми пилами и их заточка / Вит. В. Амалицкий // Деревообраб. пром-сть. – 2005. – № 5.

10. Любченко, В. И. Резание древесины и древесных материалов: учеб. пособие для вузов / В. И. Любченко. – М.: Лесная пром-сть, 1986. – 296 с.

Поступила 01.04.2010