

## СИЛОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ПЛИТНЫХ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ КОНЦЕВЫМ ФРЕЗЕРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

In paper the author observes force dates of process of machining wood-base materials the end milling instrument and examines the factors, making the most expressed impact.

The author used modern data-acquisition equipment - measuring system EX-UT10 i. Link by the interface. The given system has ensured determination of the force originating in a cutting zone in three orthogonally related directions (axis  $X$ , a  $Y$ -axis and a  $Z$ -axis), and also rate of the moment in horizontal flat surface  $XY$ .

Interest represents application of an oscillation of the instrument which allows raising efficiency of machining.

Researchers have displayed, that dominant agency on meanings of a tangential component force of cutting is rendered by rates of average width of the shavings, a removed over measure, a cutting speed.

**Введение.** Плитные древесные материалы широко применяются в различных отраслях промышленности.

Особенности состава, структуры, технологии производства конкретного древесного материала определяют его достоинства и недостатки по сравнению с другими материалами [1, 2].

К достоинствам древесностружечных плит (ДСтП) как конструкционного материала следует отнести: доступность сырья, в том числе в виде вторичного сырья лесной и деревообрабатывающей промышленности; возможность реализации производства с высокой степенью автоматизации; возможность получения ДСтП с многими требуемыми физико-механическими и эксплуатационными показателями; однородность свойств ДСтП по плоскости; возможность получения достаточно жестких и формоустойчивых деталей из ДСтП больших площадей; сравнительно малые изменения размеров деталей из ДСтП при их эксплуатации в условиях изменения температуры и влажности; сравнительно невысокая стоимость ДСтП.

В то же время ДСтП обладают и недостатками: прочность при изгибе у ДСтП примерно в 4–6 раз меньше, чем у натуральной древесины. Даже у самых прочных плит марки Р7 (ЕН 312:2003) этот показатель не превышает 20 МПа, тогда как для натуральной древесины прочность в 100 МПа при поперечном изгибе не является предельной. В своем составе ДСтП содержат фенолформальдегид, который выделяется из деталей в процессе эксплуатации (особенно при повреждении слоев отделки). Полимеризованные частицы связующего в составе ДСтП обуславливают повышенный износ режущих элементов инструмента в процессе механической обработки. Неравномерность плотности по толщине у наиболее распространенных ДСтП, полученных методом плоского прессования, обуславливает неравномерный характер затупления режущих элементов.

**Цель работы.** Целью данной работы является исследование факторов, оказывающих

наиболее выраженное влияние на силовые показатели процесса обработки кромок плитных древесных материалов концевым фрезерным инструментом.

**Обзор научных представлений о силовых показателях процесса обработки ДСтП концевым фрезерным инструментом.** Анализ литературно-информационных источников показывает, что проведенные исследования посвящены цилиндрическому фрезерованию ДСтП насадным фрезерным инструментом наиболее простой конструкции – с расположенной параллельно оси вращения инструмента выполненной непрерывной режущей кромкой и диаметром резания более 120 мм.

Исследованию процесса фрезерования ДСтП посвящены работы Ю. А. Цуканова, В. В. Амалицкого, А. А. Клубкова, А. П. Фридриха, А. А. Гришкевича.

Особенности резания концевым фрезерным инструментом не позволяют перенести на его эксплуатацию данные, полученные в результате экспериментальных исследований, осуществленных на насадных фрезах.

Научных работ, посвященных деревообрабатывающему концевому фрезерному инструменту, значительно меньше, и их анализ позволяет выделить основные этапы исследований, касающиеся рассматриваемой проблемы.

До 70–80-х годов XX века наиболее широко использовался концевой фрезерный инструмент, оснащенный режущими элементами, выполненными из легированной инструментальной стали. Подобный инструмент не обладал достаточной стойкостью (для материала Р6М5 при обработке ДСтП – около 5 мин, что соответствует обработке всего 1–2 деталей) и надежностью для обработки ДСтП и применялся для выборки гнезд и пазов различных параметров в заготовках из натуральной древесины.

К данному периоду относятся работы А. Е. Грубе, Ф. М. Манжоса, В. А. Куликова, Н. А. Модина, Е. Г. Ивановского, Г. Харниша, посвященные исследованиям концевой фре-

зерного инструмента, а именно изучению условий работы стальных фрез, в первую очередь на станках с ручной подачей, улучшению конструкций, проблеме жесткости и прочности концевых фрез, установлению влияния параметров инструмента и процесса резания на возникающие усилия, качество и точность получаемого паза при обработке древесины хвойных и твердолиственных пород.

Исследуя процесс фрезерования гнезд в заготовках из древесины березы и ели на станке типа СвП при постоянных боковой подаче на резец и заглублинии, Н. А. Модин получил уравнение для определения удельной работы резания  $K$ , Н·м/см<sup>3</sup>:

$$K = 9,8 \cdot C \cdot U_{oc}^a \cdot U_z^b \cdot z^e \cdot \gamma^f \cdot d^g, \quad (1)$$

где  $C$  – постоянный множитель, зависящий от обрабатываемого материала и подачи на резец;  $U_{oc}$  – осевое заглублиение фрезы в рассматриваемый момент времени, мм;  $U_z$  – боковая подачи на резец концевой фрезы, мм;  $z$  – число режущих элементов концевой фрезы;  $\gamma$  – передний угол на главной режущей кромке, град;  $d$  – диаметр концевой фрезы, мм;  $a, b, e, f, g$  – показатели степени, зависящие от обрабатываемого материала и подачи на резец.

В табл. 1 приведены значения постоянного множителя и показателей степени.

Таблица 1

**Значения постоянного множителя и показателей степени, входящие в уравнение Н. А. Модина, для определения удельной работы резания**

Порода древесины	$C$		$a$	$b$		$e$	$f$	$g$
	$U_z = 0,05 \dots 0,30$ мм	$U_z = 0,3 \dots 0,5$ мм		$U_z = 0,05 \dots 0,30$ мм	$U_z = 0,3 \dots 0,5$ мм			
Береза	26,3	39,4	0,104	-0,535	-0,218	0,231	-0,455	-0,305
Ель	8,19	14,3	0,181	-0,605	-0,31	0,49	-0,239	-0,48

Значение удельной работы резания  $K$ , вычисленное по уравнению (1), дает возможность определить среднюю за один оборот концевой фрезы окружное усилие резания и крутящий момент на фрезе.

Известны уравнения для расчета среднего усилия подачи (боковой составляющей усилия

резания) при фрезеровании концевыми фрезами гнезд в древесине березы:

при  $U_z = 0,15 \dots 0,5$  мм и  $U_{oc} = 4 \dots 12$  мм

$$F_{под} = C_p \cdot U_z^{0,32} \cdot U_{oc}^{0,83} \cdot d^{1,2}, \text{ Н}, \quad (2)$$

при  $U_z = 0,5 \dots 1$  мм и  $U_{oc} = 4 \dots 12$  мм

$$F_{под} = C_{p1} \cdot U_z^{0,32} \cdot U_{oc}^{0,83} \cdot d^{1,2}, \text{ Н}, \quad (3)$$

где  $C_p$  и  $C_{p1}$  – коэффициенты,  $C_p = 8,624$ ,  $C_{p1} = 1,411$ ;  $U_z$  – боковая подачи на резец концевой фрезы, мм;  $U_{oc}$  – осевое заглублиение фрезы в рассматриваемый момент времени, мм;  $d$  – диаметр окружности резания концевой фрезы, мм.

Известна эмпирическая формула профессора Е. Г. Ивановского для расчета мощности  $P$  (кВт), расходуемой при пазовом фрезеровании массивной древесины [3]:

$$P = \frac{A \cdot \Delta^{0,78} \cdot d^{1,2} \cdot h^{1,7} \cdot n}{97550 \cdot \gamma^{0,06}}, \quad (4)$$

где  $A$  – коэффициент, равный 0,083 для сосны при числе зубьев 1; 0,015 – при числе зубьев 2; 0,017 – при числе зубьев 3;  $\Delta$  – подача на оборот фрезы, мм;  $d$  – диаметр фрезы, мм;  $h$  – глубина снимаемого слоя, мм;  $\gamma$  – передний угол резания, град;  $n$  – частота вращения инструмента, мин<sup>-1</sup>.

Данная формула может быть применена для определения величины подачи на резец при полном использовании мощности на резание.

Расчетные формулы, относящиеся к процессу резания массивной древесины, для анализа процесса фрезерования ДСтП следует уточнять. Это связано со значительными отличиями плитного древесного материала от массива древесины по структуре, составу, физическим свойствам и т. д. Отличия физико-механических свойств древесных материалов от физико-механических свойств древесины в значительной мере определяют особенности процесса стружкообразования, силовые и качественные показатели.

Исследования Г. Харниша, Ф. М. Манжоса, В. А. Куликова относятся к фрезерованию гнезд в заготовках из натуральной древесины на станках с ручной подачей, при низких частотах вращения (до 6000 мин<sup>-1</sup>), и поэтому полученные выводы нельзя распространить на процесс фрезерования концевым фрезерным инструментом ДСтП на станках механической подачи (используемая частота вращения концевого фрезерного инструмента не менее 10 000 мин<sup>-1</sup>).

Начиная с 80-х годов, в связи с увеличением объемов использования в промышленности ДСтП, более широким внедрением в производство автоматических линий и обрабатывающих центров с числовым программным

управлением (ЧПУ), использующих в качестве инструментальной оснастки концевые фрезы, значительное практическое значение и выраженную актуальность приобретают исследования, посвященные конструкциям, стойкости и режимам эксплуатации концевой фрезерного инструмента при фрезеровании ДСтП.

Одной из первых работ, касающихся исследований обработки ДСтП твердосплавным концевым фрезерным инструментом, является научная работа, выполненная в Московском лесотехническом институте В. Н. Поздняковой [4]. Эксперименты проводились на ДСтП, облицованной бумажнослоистым пластиком, и ДСтП, фанерованной шпоном.

Были проведены исследования угловых параметров фрез при следующих условиях: диаметр концевой фрезы – 16 мм; ширина фрезерования ДСтП – 20 мм, глубина фрезерования 2 мм; частота вращения 18000 мин<sup>-1</sup>; подача на зуб – 0,6 мм. Контролировались длина сколов отделки на боковой поверхности ДСтП и составляющие силы резания.

Исследования влияния толщины стружки на величину сколов отделки и составляющие силы резания проводились при следующих условиях: диаметр концевых фрез – 8, 16, 20 мм; передний угол  $\gamma = 25^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 15^\circ$ ; ширина фрезерования – 20 мм; глубина фрезерования – 2 мм; частота вращения фрезы 18 000 мин<sup>-1</sup>; средняя толщина стружки – 0,015...0,4 мм.

Согласно исследованиям [4], толщина стружки оказывает значительное влияние на величины составляющих силы резания и качество обработки. С увеличением средней толщины стружки наблюдался рост касательной составляющей силы резания, радиальная составляющая силы резания изменялась незначительно, неровности разрушения на обработанной поверхности увеличивались.

Опытами установлено, что при одних и тех же средних толщинах стружки составляющие силы резания практически мало зависят от диаметра фрез.

Поздняковой В. Н. получены следующие математические зависимости составляющих силы резания от основных угловых параметров концевой фрезы и подачи на зуб при обработке облицованных ДСтП:

$$\begin{aligned} F_k &= 0,332 - 0,005 \cdot \gamma - 0,005 \cdot \alpha + 0,28 \cdot U_z; \\ F_R &= 0,325 - 0,010 \cdot \gamma - 0,011 \cdot \alpha + 0,37 \cdot U_z. \end{aligned} \quad (5)$$

В Ленинградской лесотехнической академии Хуажевым О. З. проведены исследования и разработка рациональных режимов резания и инструментов для обработки кромок облицованных ДСтП [5]. Исследование раскрытия облицованных плит концевыми фрезами показали, что такой способ весьма эффективен. Автор исследований

путем сравнительного анализа пришел к обоснованному выводу о том, что при всех вариациях параметров инструмента и режима резания пиление не обеспечивает обработку без сколов на кромках плит, а концевые фрезы позволяют уменьшить припуски и ликвидировать сколы облицовки на кромках щитов.

Исследованиям фрезерования неотделанных ДСтП посвящена работа Шилько В. К. [6], выполненная в Ленинградской лесотехнической академии.

Для определения рациональной конструкции концевой фрезы установлено изменение касательных составляющих сил резания за период цикла работы различных типов фрез. Максимальные и средние значения касательной составляющей силы резания [6]:

$$\begin{aligned} F_{K_{\max}} &= K_{z_{\max}} \cdot H \cdot U_{\text{п}}^{0,2}, \\ F_{K_{\text{ср}}} &= K_{z_{\text{ср}}} \cdot H \cdot U_{\text{п}}^{0,2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $U_{\text{п}}$  – подача на оборот, мм;  $H$  – глубина фрезерования, мм;  $K_{z_{\max}}$  и  $K_{z_{\text{ср}}}$  – коэффициент влияния числа зубьев на максимальные и средние значения касательной составляющей силы резания:

$$\begin{aligned} \text{при } z = 1 & \quad K_{z_{\max}} = 12,5; \quad K_{z_{\text{ср}}} = 4,5; \\ z = 2 & \quad K_{z_{\max}} = 10,88; \quad K_{z_{\text{ср}}} = 7,8; \\ z = 1-2 & \quad K_{z_{\max}} = 6,25; \quad K_{z_{\text{ср}}} = 4,5. \end{aligned}$$

Фрезы с разделенными режущими кромками в двух плоскостях с перекрытием друг друга обозначены как  $z = 1-2$ .

С помощью вышеуказанных формул можно определить значения касательных составляющих сил резания в начальный период работы фрез при обработке ДСтП средней плотностью 650 кг/м<sup>3</sup>. Для учета затупления фрез и плотности ДСтП необходимо пользоваться поправочными коэффициентами.

Согласно исследованиям Шилько В. К., на силы и мощность фрезерования ДСтП концевыми фрезами наибольшее влияние оказывает величина подачи на зуб, а также плотность плиты.

**Условия проведения экспериментальных исследований.** Основой экспериментальной установки служил часто применяемый на деревообрабатывающих предприятиях обрабатывающий центр с ЧПУ ROVER В 4.35, на рабочем столе которого жестко устанавливалась платформа с универсальным динамометрическим мостом (УДМ-1200). В пределах базы УДМ-1200 закреплялась обрабатываемая заготовка.

Регистрирующий прибор – тензометрическая измерительная система EX-UT10 с i.Link интерфейсом опрашивает тензодатчики УДМ и позволяет определять усилия по трем взаимно перпендикулярным направлениям (оси  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ), возникающие в зоне резания, а также величину момента в горизонтальной плоскости  $XY$  (рис. 1).

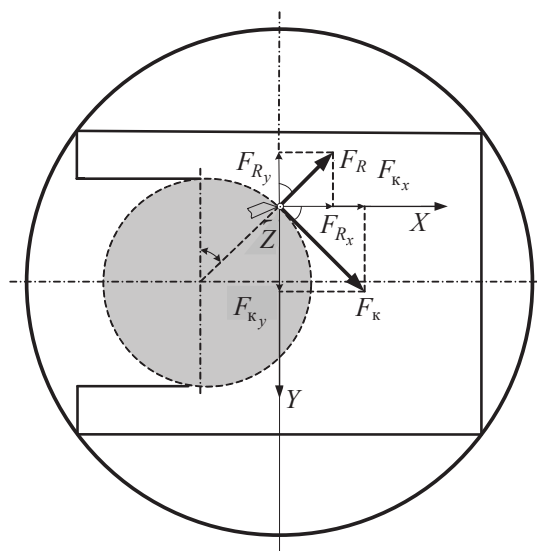


Рис. 1. Заготовка, обрабатываемая в пределах базы УДМ-1200

На рис. 2 показана схема размещения датчиков в УДМ-1200.

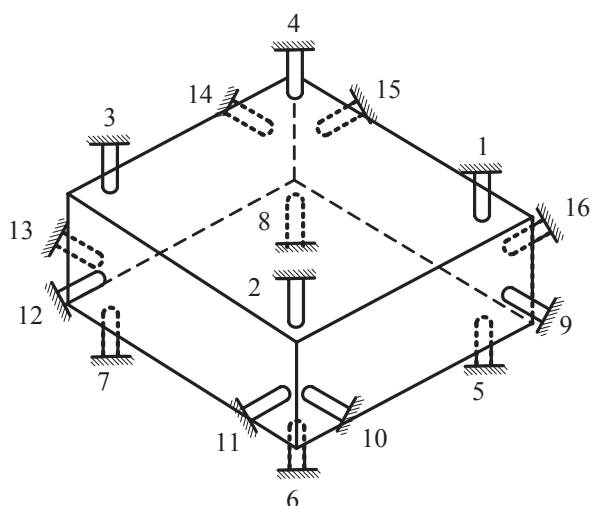


Рис. 2. Схема размещения датчиков в УДМ-1200

Универсальный динамометрический мост УДМ-1200 оттарирован при помощи образцового динамометра, прошедшего поверку в РУП «БелГИМиС».

Экспериментальные исследования проводились с использованием математического планирования (четырёхфакторный В-план второго порядка).

На основе проведенного анализа в качестве переменных факторов приняты:  $X_1$  – средняя толщина стружки, мм;  $X_2$  – снимаемый припуск, мм;  $X_3$  – радиус окружности резания концевой фрезы, мм;  $X_4$  – частота вращения концевой фрезы,  $\text{мин}^{-1}$ .

Интервалы варьирования переменных факторов представлены в табл. 2.

Проводились также экспериментальные исследования силовых показателей процесса об-

работки боковых поверхностей ДСтП осциллирующим концевым фрезерным инструментом [7], [8], [9], [10].

Таблица 2

**Интервалы варьирования переменных факторов**

Переменный фактор	-1	0	+1
$X_1$ , мм	0,1	0,3	0,5
$X_2$ , мм	2	13,5	25
$X_3$ , мм	7	10,5	12,5
$X_4$ , $\text{мин}^{-1}$	10 000	14 000	18 000

При этом дополнительно варьировались параметры: число двойных ходов инструмента в минуту и амплитуда колебаний инструмента в процессе осцилляции (табл. 3).

Таблица 3

**Интервалы варьирования дополнительных переменных факторов при осцилляции концевой фрезы**

Переменный фактор	-1	0	+1
Амплитуда осцилляции $ZO$ , мм	0	14,5	29
Число двойных ходов в минуту $N_{д.х.}$ , д.х./мин	0	48	96

Интервалы варьирования дополнительных переменных факторов соответствуют наиболее распространенным техническим характеристикам обрабатываемых центров с ЧПУ.

При выборе обрабатываемого материала было принято к сведению, что в Республике Беларусь предприятия, занимающиеся производством мебели, элементов отделки помещений, в качестве материала широко используют ДСтП с отделкой: отечественного производства (ОАО «Пинскдрев», ОАО «Ивацевичдрев», ООО «ПлитПром» в соответствии с требованиями ТУ РБ 200100328.002-2001) толщиной 16 мм и ДСтП от ведущих мировых производителей – «Кронопол» (входит в швейцарский концерн «Кроно Холдинг АГ»), «Pfleiderer» с толщиной от 3 до 40 мм (в соответствии с требованиями EN 14322 «Плиты древесные. Плиты, облицованные меламином, для применения внутри помещений»).

Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 15 февраля 2008 г. № 201 данный вид продукции внесен в перечень импортозамещающих товаров, и поэтому доля отечественных ламинированных ДСтП (ЛДСтП) в изделиях белорусского производства будет увеличиваться.

Для исследования процесса цилиндрического фрезерования концевым фрезерным инструментом использовались ДСтП с двусторонней отделкой пленками на основе терморезистивных полимеров производства ОАО «Ива-

цевичдрев» (на основе плиты марки П-Б по ГОСТ 10632-2007) и «Кронопол» (производство РФ по EN 14322).

Толщина обрабатываемого материала принята из условия производства отечественной ЛДСП толщиной 16 мм с предельными отклонениями +0,3 мм, -1,7 мм. Из ЛДСП производства компании «Кронопол» принята плита толщиной 25 мм. Исследовалась также плита толщиной 18 мм производства Pflaenderer Grajewo S.A.

В экспериментальных исследованиях использовались сборные концевые фрезы. Длина режущего элемента 60 мм. Угол заострения главной режущей кромки  $\beta = 55^\circ$ .

Для исключения погрешностей, возможных при неточной установке двух и более резцов, в опытах был принят один режущий элемент. Данное решение соответствует конструкции концевой фрезы, наиболее часто используемой на предприятиях нашей страны для обработки ЛДСП.

**Заключение.** В результате выполнения экспериментальных исследований установлены основные закономерности влияния переменных факторов на касательную и радиальную силы резания.

С ростом средней толщины стружки наблюдается увеличение касательной и уменьшение радиальной составляющих силы резания, что может быть объяснено увеличением силы реакции стружки при неизменных силах, действующих на лезвие и заднюю грань резца.

Касательная составляющая силы резания растет также с увеличением снимаемого припуска, частоты вращения, одновременного увеличения частоты вращения и припуска на обработку, одновременного увеличения частоты вращения и толщины стружки.

С увеличением радиуса резания концевой фрезы на верхнем и основном уровнях варьирования переменных факторов касательная составляющая силы резания уменьшается.

Резание с осцилляцией концевой фрезерного инструмента сокращает энергозатраты на обработку в среднем на 15%.

Указанные закономерности справедливы при обработке всех исследованных ДСП.

### Литература

1. Справочник по производству древесностружечных плит / И. А. Отлев [и др.]. – М.: Лесная пром-сть, 1990. – 384 с.
2. Сленьгис, М.-Э. А. Механическая обработка ламинированных ДСП / М.-Э. А. Сленьгис. – Рига: Лат. НИИНТИ, 1982. – 40 с.
3. Бершадский, А. Л. Резание древесины / А. Л. Бершадский, Н. И. Цветкова. – Минск: Выш. школа, 1975. – 304 с.
4. Позднякова, В. Н. Исследование основных геометрических параметров концевых фрез для обработки труднообрабатываемых древесных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05 / В. Н. Позднякова; Московский лесотехн. ин-т. – М., 1981. – 24 с.
5. Хуажев, О. З. Исследование и разработка рациональных режимов резания и инструментов для обработки кромок облицованных древесностружечных плит: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.06.02 / О. З. Хуажев; Ленинград. лесотехн. академия. – М., 1982. – 22 с.
6. Шилько, В. К. Повышение долговечности концевых фрез при обработке древесностружечных плит в панельном домостроении: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. / В. К. Шилько; Ленинград. лесотехн. академия. – Л., 1985. – 20 с.
7. Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1974.
8. Ящерицын, П. И. Теория резания: учебник / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2005. – 512 с.
9. Кумабэ, Д. Вибрационное резание / Д. Кумабэ; пер. с яп. С. Л. Масленникова; под ред. И. И. Портнова и В. В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
10. Бакиев, Р. Ш. Контактные напряжения на резце и влияние вибраций на процесс резания древесины: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.06.02 / Р. Ш. Бакиев; Московский лесотехн. ин-т. – М., 1972. – 22 с.