

УДК 674.023

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.146

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ

В.И. Мелехов¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: Q-1051-2019, ORCID: 0000-0002-2583-3012

Л.В. Кремлева¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: T-5916-2018, ORCID: 0000-0002-8982-2603

Т.В. Тюрикова¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: P-8991-2019, ORCID: 0000-0002-3592-310X

Е.В. Сазанова¹, канд. экон. наук, доц.; ResearcherID: G-8650-2019, ORCID: 0000-0001-5731-7517

Д.А. Лужанский², инж.; ResearcherID: P-9154-2019, ORCID: 0000-0001-9347-3306

В.А. Слуцков², инж.; ResearcherID: P-7597-2019, ORCID: 0000-0003-4032-4635

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: v.melechov@narfu.ru, l.kremleva@narfu.ru

²АО «Производственное объединение «Севмаш», ш. Архангельское, д. 58, г. Северодвинск, Архангельская область, Россия, 164500; e-mail: arov-dm@mail.ru

Эффективная эксплуатация современных многофункциональных деревообрабатывающих центров с числовым программным управлением связана с созданием рациональных конструкций концевых фрез для многокоординатной обработки. Цель работы – экспериментальное исследование динамических параметров процесса обработки древесины концевыми фрезами и их влияния на шероховатость поверхности в зависимости от конструктивных элементов инструмента. Варьируемыми конструктивными элементами фрез являются: угол наклона режущих кромок, число зубьев, неравномерность окружного шага и наличие стружкоделительных канавок на режущих кромках. В процессе исследования использовался комплект экспериментальных фрез с различными конструктивными элементами. Эксперименты с резанием выполнены в производственных условиях на виброизмерительном комплексе (фирма «Брюль и Кьер»). Приведены факторные планы исследований, методики виброизмерений и обработки виброакустических сигналов. Представлены качественные оценки степени влияния различных конструктивных элементов концевых фрез на виброактивность обработки древесины сосны и дуба. В среднем уровень вибраций при обработке заготовок из древесины дуба на 55...75 % выше, чем из сосны, при этом шероховатость обработанной поверхности различалась всего на 10...20 %. Установлена устойчивая корреляция между уровнем вибраций и шероховатостью обработанной поверхности. Увеличение угла наклона режущих кромок, числа зубьев, а также наличие стружкоделительных канавок снижает вибрации и способствует повышению качества обработанной поверхности для рассматриваемых пород древесины. Влияние неравномерного окружного шага зубьев на исследуемые показатели неоднозначно.

Для цитирования: Мелехов В.И., Кремлева Л.В., Тюрикова Т.В., Сазанова Е.В., Лужанский Д.А., Слуцков В.А. Экспериментальное исследование динамики процесса обработки древесины концевыми фрезами // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 146–158. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.146

Ключевые слова: фрезы с винтовыми стружечными канавками, виброактивность обработки, спектральные характеристики, среднеквадратичные значения виброускорений, качество поверхности.

Введение

Для обеспечения технологической гибкости, повышения точности и производительности обработки современные деревообрабатывающие производства активно оснащаются многофункциональными обрабатывающими центрами с числовым программным управлением (ЧПУ). Номенклатура фрез, выпускаемых отечественными и зарубежными фирмами-производителями режущего инструмента для станков с ЧПУ, довольно широка. Концевые фрезы, используемые для обработки на станках с ЧПУ, имеют много конструктивных особенностей: значительные углы наклона винтовых стружечных канавок, торцовые кромки, стружкоделительные канавки, различное число зубьев, фасонный профиль. Известно, что силы резания при фрезеровании носят переменный во времени характер [8, 13]. Это приводит к вибрациям элементов технологической системы и в целом отрицательно сказывается на качестве обработанной поверхности, стойкости инструмента, точности обработки [2, 6, 12]. Несмотря на то, что современные системы ЧПУ имеют программно-аппаратные средства управления динамикой фрезерования, развитые средства интерполяции криволинейных траекторий [10, 14], вопрос о выборе рациональной конструкции дереворежущего инструмента, позволяющей снизить уровень вибраций при обработке, исследован недостаточно.

Фрезерование – процесс обработки материала вращающимися лезвиями, в результате которого припуск снимается путем последовательного срезания отдельных стружек [1]. Современную технологическую машину принято рассматривать как технологическую систему взаимосвязанных элементов «станок–приспособление–инструмент–деталь» (СПИД). Циклические силы резания, действуя на элементы технологической системы, вызывают переменные во времени их виброперемещения. Анализ работ в области динамики станков показал [6, 9, 12], что все колебательные процессы, возникающие в технологической системе, можно разделить на две основные группы: не связанные с процессом резания и вызванные непосредственно процессом резания. К первой группе относят вынужденные колебания низкой частоты от неуравновешенности механизмов технологической системы и дисбаланса инструмента, ко второй – вынужденные колебания, обусловленные прерывистостью процесса резания и особенностями стружкообразования. При прерывистом резании преобладающими являются вибрации второй группы. Процесс резания при фрезеровании характеризуется прерывистым контактом взаимодействия режущих лезвий и заготовки, различным количеством лезвий, находящихся в контакте, наличием повторяющихся ударных нагрузок при входе и выходе резцов из контакта с заготовкой.

Нестационарность процесса фрезерования в теории механической обработки материалов принято оценивать степенью его неравномерности [1]. При проектировании технологической операции можно подобрать такие условия, при которых неравномерность фрезерования будет наименьшей. Однако при обработке древесины подобрать такие условия крайне сложно

из-за анизотропии ее физико-механических свойств. Одним из путей снижения вынужденной вибрации является повышение жесткостных и демпфирующих свойств элементов станочной системы [7]. Наряду с этим используются методы снижения вибраций за счет применения специального фрезерного инструмента и оптимизации режимов резания. К основным конструктивным особенностям таких фрез следует отнести: использование винтовых режущих кромок, «шахматное» расположение резцов на образующей поверхности инструмента и др. [8, 14, 15]. Значительный угол наклона режущих кромок в конструкции дереворежущих фрез для станков с ЧПУ предлагается различными фирмами-производителями. Например, в работе [6] приведены конструкции спиральных ножевых головок с винтовыми разнонаправленными зубьями. Для получения рациональной схемы срезания припуска при фрезеровании древесины применяются фрезы с шахматным расположением резцов, имеющие много модификаций. Фрезы используются для черновой обработки широких поверхностей и устранения возможности возникновения вибраций. Разделение длинных режущих кромок по ширине осуществляется с помощью нанесения на них стружкоделительных канавок в шахматном порядке или сдвига относительно друг друга режущих пластин [5].

Таковыми параметрами дереворежущего инструмента, как количество зубьев z , угол наклона режущих кромок ω , наличие стружкоделительных канавок при заданной глубине и ширине фрезерования, определяются длина, направление и расположение режущих кромок. От них зависит кинематическая схема срезания припуска и, следовательно, динамическая нестационарность процесса. Поэтому целью работы являлось установление зависимости влияния угла наклона режущих кромок, числа и схемы расположения лезвий на образующей поверхности инструмента на уровень вибраций и шероховатость обработанной поверхности. Это позволяет обоснованно принимать технологические решения при проектировании режущего инструмента еще на этапе создания операционных технологий обработки древесины фрезерованием.

Объекты и методы исследования

Эксперименты по определению уровня вибраций и шероховатости поверхности проводили на деревообрабатывающем центре с ЧПУ «BIESSE ROVER 20» (мощность главного привода $P = 6,6$ кВт) в условиях действующего производственного цеха. Использовали заготовки из древесины сосны и дуба размером $40 \times 140 \times 450$ мм с шероховатостью поверхности не более $Ra = 3,6$ мкм. Заготовки закрепляли на вакуумном столе станка, что обеспечивало стабильность усилия зажима. Для исследований была изготовлена партия инструмента, состоящая из 7 экспериментальных концевых фрез из стали Р6М5 с твердостью рабочей части 61...63 HRCэ по ГОСТ 8994–80. Они соответствовали одному типоразмеру, имели одинаковую рабочую геометрию, но отличались отдельными конструктивно-геометрическими элементами. Параметры экспериментальных фрез и их общий вид приведены на рис. 1.

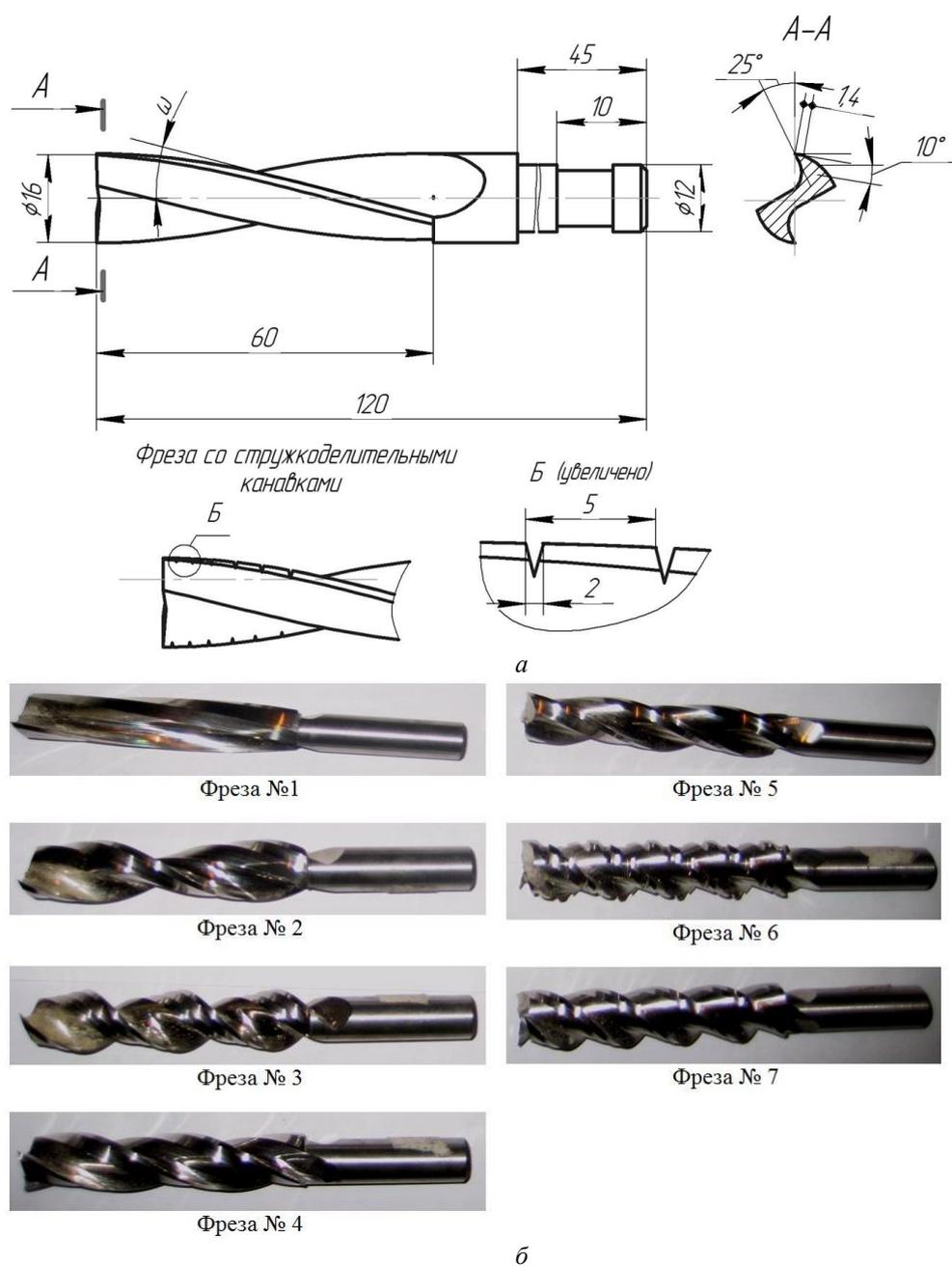


Рис. 1. Базовые размеры (а) и общий вид (б) экспериментальных фрез (размеры в миллиметрах)

Fig. 1. Basic dimensions (a) and general view (b) of experimental milling cutters (dimensions in mm)

В ходе экспериментов варьировались угол наклона режущей кромки ω ; наличие или отсутствие стружкоделительных канавок; количество зубьев z ; равномерность углового шага зубьев. Для фрезы с неравномерным окружным шагом углы между зубьями составляли 110, 120 и 130°.

Для удобства планирования экспериментов всем фрезам был присвоен код. Присвоенные числовые коды фрез и их варьируемые параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Переменные параметры экспериментальных фрез

Код (номер) фрезы	Число зубьев	Угол наклона режущей кромки, ...°	Шаг зубьев
1	2	12	Равномерный
2	2	30	«
3	2	45	«
4	3	30	«
5	3	30	Неравномерный
6	3	45	Равномерный
7	3	45	«

Примечание. Стружкоделительные канавки есть только у фрезы под кодовым номером 6.

Режимы резания во всех экспериментах оставались постоянными: скорость резания $v = 10$ м/с; подача $u = 2,4$ м/мин; глубина резания $t = 10$ мм. Для воспроизведения условий контурного фрезерования, при котором непрерывно происходит изменение угла перерезания волокон из-за анизотропии древесины, выполняли проходы вдоль и поперек волокон.

В качестве выходных показателей оценивали уровень возникающих вибраций и шероховатость обработанной поверхности. Измерение шероховатости поверхности осуществляли профилометром модели Surtronic 3 (фирма «Taylor-Hobson»). Для исследования виброакустических характеристик процесса фрезерования использовали оборудование фирмы «Брюль и Кьер» (Дания), в качестве первичных преобразователей вибрации – трехкомпонентные акселерометры модели 4321. Сигнал с первичных преобразователей подавался на усилитель модели 2647A, затем на многоканальный анализатор Pulse 3560-C, в состав которого входили измерительный модуль модели 3039 и интерфейсный модуль модели 7539.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2, а.

Фрезерованию подвергали закрытые прямоугольные пазы на полный проход фрезы (рис. 2, б). Выполняли 3 прохода фрезы на одной заготовке. После записи сигнала с акселерометров № 1 и 2 на жесткий диск осуществляли узкополосный спектральный анализ в диапазоне от 10 до 12 000 Гц. Указанный диапазон полностью перекрывал диапазон частот вращения шпинделя, частот врезания зубьев фрезы в заготовку и низшие собственные частоты шпиндельной группы.

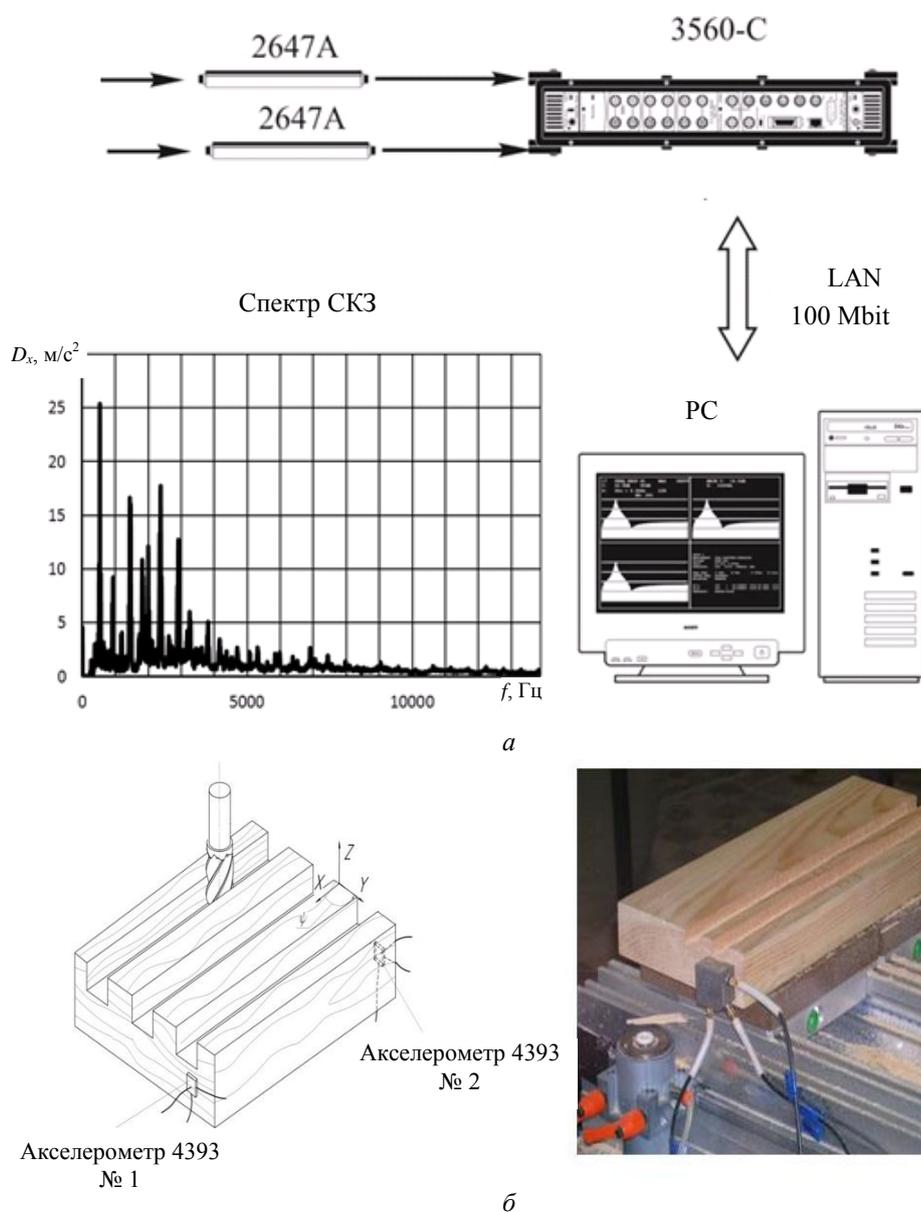


Рис. 2. Измерительный тракт при виброакустических измерениях: *a* – схема измерения вибраций; *б* – схема установки вибропреобразователей на заготовке (СКЗ – среднеквадратичные значения виброускорений, м/с^2 ; PC – персональный компьютер)

Fig. 2. Measuring track of vibroacoustic measurements: *a* – scheme for measuring vibrations; *б* – installation diagram of vibration inverter on a blank (СКЗ – mean square values of vibration acceleration, m/s^2 ; PC – personal computer)

Анализ выходного сигнала выполняли в следующем порядке:
 построение мгновенных спектров СКЗ с помощью быстрого преобразования Фурье [4];
 нахождение среднего значения спектра в рамках одного прохода фрезы;
 осреднение спектров по трем проходам и двум акселерометрам:

$$D_{x,y} = 1/6 \left(\sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^3 D_{i,k} \right),$$

где $D_{x,y}$ – среднее значение СКЗ по осям OX и OY ; $D_{i,k}$ – среднее значение СКЗ i -го прохода фрезы для k -го датчика;

нахождение дисперсии опытов в каждой точке планов;
определение однородности дисперсии.

Акселерометры, как первичные датчики регистрации сигнала, фиксируют шум от многих источников, имеющих в технологической системе станка (компрессорное оборудование, приводы основных движений и др.). В целях выявления вклада этих шумов были проведены предварительные эксперименты, суть которых заключалась в записи и анализе временных процессов в режиме холостого хода и при обработке. Поскольку уровень вибраций в режиме холостого хода при отключенном компрессоре не превышал 12...15 % от уровня вибраций при обработке, то был сделан вывод о нецелесообразности формирования опорного сигнала для аддитивного выделения помех.

Все эксперименты разбиты на четыре (I–IV) группы и выполнены для двух пород древесины (сосна и дуб). В группе I исследовали влияние угла наклона режущих кромок ω ($X1$) и направления подачи по отношению к волокнам ($X2$) на уровень вибраций и шероховатость обработанной поверхности по плану $3^1 2^1$. Использовались фрезы 1, 2, 3 (см. рис. 1). Нормированный параметр $X1$ принимал три значения (–1; 0,1; +1), что соответствовало фактическим параметрам фрез 1, 2, 3 и углам наклона режущих кромок: 12, 30, 45°. Нормированный параметр $X2$ принимал два значения (–1 и +1), что соответствовало фрезерованию вдоль ($\psi = 0^\circ$) и поперек ($\psi = 90^\circ$) волокон (ψ – угол между направлениями подачи фрезы и волокнами заготовки).

Группы экспериментов II–IV были проведены по планам 2^3 и 2^2 . В качестве варьируемых факторов для группы II использовали угол наклона кромки ω ($X3$), число режущих кромок z ($X4$) и направление подачи – фрезерования ($X2$). При выполнении экспериментов группы III исследовали влияние стружкоделительных канавок ($X5$) и направления подачи ($X2$) на виброактивность обработки и шероховатость поверхности. Цель экспериментов группы IV – определение влияния неравномерного окружного шага зубьев ($X6$) и направления подачи ($X2$) на исследуемые показатели. Нормированные значения параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2

Интервалы варьирования независимых параметров экспериментов II–IV групп

Уровень фактора	Кромка	$X2$ (направление фрезерования)	$X3$ (ω)	$X4$ (z)	$X5$ (наличие канавок)	$X6$ (неравномерный шаг)
Верхний	+1	90° (поперек волокон)	45	3	+1 (есть)	+1 (есть)
Нижний	–1	0° (вдоль волокон)	30	2	–1 (нет)	–1 (нет)

При статистической обработке экспериментальных данных определяли средние значения спектра СКЗ в виброускорениях по двум осям ($X(D_x)$ и $Y(D_y)$) по формуле (см. выше), среднее значение шероховатости (Ra_{cp}) на дне фрезерованных канавок – по 5 точкам. Коэффициенты линейных регрессион-

ных моделей вычислены в нормированных параметрах, что связано с наличием переменных нечислового характера. Значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивали с помощью критерия Стьюдента. Адекватность модели определяли с использованием критерия Фишера при уровне значимости $p \leq 0,05$, частные коэффициенты корреляции между средним уровнем вибрации и средним значением показателя шероховатости поверхности – по всем группам экспериментов для двух направлений (r_x и r_y соответственно).

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты экспериментов группы I представлены в табл. 3.

Таблица 3

Композиционный план и результаты экспериментов группы I

Код фрезы	X1(z)	X2(ψ)	$D_x, \text{м/с}^2$	$D_y, \text{м/с}^2$	$Ra_{\text{ср}}, \text{мкм}$
1	-1	+1	<u>24,0</u>	<u>15,6</u>	<u>25,7</u>
			42,0	23,4	30,8
2	0,1	+1	<u>20,5</u>	<u>18,5</u>	<u>21,3</u>
			35,9	27,8	25,6
3	+1	+1	<u>18,5</u>	<u>17,0</u>	<u>18,8</u>
			32,4	25,5	22,6
1	-1	-1	<u>15,3</u>	<u>25,6</u>	<u>21,7</u>
			26,8	38,4	26,0
2	0,1	-1	<u>13,8</u>	<u>15,1</u>	<u>16,3</u>
			24,2	22,7	19,6
3	+1	-1	<u>11,1</u>	<u>9,9</u>	<u>14,8</u>
			19,4	14,9	17,8

Примечание. В числителе приведены значения для древесины сосны, в знаменателе – для древесины дуба.

Композиционный план для экспериментов групп II–IV иллюстрирует табл. 4.

Таблица 4

Композиционный план и результаты экспериментов групп II–IV

Группа экспериментов	Код фрезы	X2(ψ)	X3(ω)	X4(z)	X5 (наличие канавок)	X6 (неравномерный шаг)	$D_{x_2}, \text{м/с}^2$	$D_{y_2}, \text{м/с}^2$	$Ra_{\text{ср}}, \text{мкм}$
II	2	+1	-1	-1	-1	-1	<u>20,5</u>	<u>18,5</u>	<u>21,3</u>
							32,4	26,5	23,0
III	3	+1	+1	-1	-1	-1	<u>18,5</u>	<u>17,0</u>	<u>18,8</u>
							29,2	24,3	20,3
II, III	4	+1	-1	+1	-1	-1	<u>18,0</u>	<u>19,5</u>	<u>19,6</u>
							28,4	27,9	21,2
IV	5	+1	-1	+1	-1	+1	<u>11,5</u>	<u>8,8</u>	<u>20,7</u>
							19,0	13,5	22,8
II, III	6	+1	+1	+1	-1	-1	<u>13,7</u>	<u>12,4</u>	<u>18,9</u>
							21,6	17,7	20,4

Окончание табл. 4

Группа экспериментов	Код фрезы	X2(ψ)	X3(ω)	X4(z)	X5 (наличие канавок)	X6 (неравномерный шаг)	D_X м/с ²	D_Y м/с ²	Ra_{cp} мкм
III	7	+1	-1	+1	+1	-1	<u>11,6</u>	<u>8,9</u>	<u>17,9</u>
							19,1	13,6	19,7
II	2	-1	-1	-1	-1	-1	<u>13,8</u>	<u>15,1</u>	<u>16,3</u>
							21,8	21,6	17,6
II	3	-1	+1	-1	-1	-1	<u>11,1</u>	<u>9,9</u>	<u>14,8</u>
							17,5	14,2	16,0
II, IV	4	-1	-1	+1	-1	-1	<u>11,0</u>	<u>12,3</u>	<u>15,1</u>
							17,4	17,6	16,3
IV	5	-1	-1	+1	-	+1	<u>11,4</u>	<u>9,0</u>	<u>16,8</u>
							18,8	13,8	18,5
II, III	6	-1	+1	+1	-1	-1	<u>11,3</u>	<u>8,5</u>	<u>13,7</u>
							17,9	12,2	14,8
III	7	-1	-1	+1	+1	-1	<u>11,6</u>	<u>8,9</u>	<u>13,7</u>
							19,1	13,6	15,1

Примечание. В числителе приведены значения для древесины сосны, в знаменателе – для древесины дуба.

Результаты регрессионного и корреляционного анализа зависимостей между уровнем вибраций и шероховатостью поверхности приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Результаты регрессионного анализа и коэффициенты корреляции
между уровнем вибраций и шероховатостью поверхности
по группам экспериментов**

Группа экспериментов	Регрессионные модели		r_X	r_Y
	Древесина сосны	Древесина дуба		
I	$D_X = 17,2 + 3,8 X_2 - 2,4 X_1$ $D_Y = 16,9 + 0,1 X_2 - 3,6 X_1$ $Ra_{cp} = 19,8 + 2,2 X_2 - 3,4 X_1$	$D_X = 28,6 - 3,8 X_1 + 6,2 X_2$ $D_Y = 25,6 - 5,4 X_1 + 0,13 X_2$ $Ra_{cp} = 23,7 - 3,4 X_1 + 2,7 X_2$	<u>0,88</u> 0,92	<u>0,52</u> 0,61
II	$D_X = 14,7 + 2,9 X_2 - 1,1 X_3 - 1,2 X_4$ $D_Y = 14,2 - 1,1 X_3 - 2,2 X_4 + 2,7 X_2$ $Ra_{cp} = 17,7 - 0,7 X_3 - 0,5 X_4 + 2,3 X_2$	$D_X = 23,4 + 4,5 X_2 - 1,6 X_3 - 1,8 X_4$ $D_Y = 20,3 + 3,9 X_2 - 3,1 X_3 - 1,5 X_4$ $Ra_{cp} = 18,5 + 2,4 X_2 - 0,74 X_3 - 0,35 X_4$	<u>0,92</u> 0,83	<u>0,86</u> 0,81
III	$D_X = 12,1 + 0,72 X_2 - 0,6 X_5$ $D_Y = 9,7 + 0,97 X_2 - 0,77 X_5$ $Ra_{cp} = 16,1 + 2,4 X_2 - 0,3 X_5$	$D_X = 19,8 + 0,9 X_2 - 0,7 X_5$ $D_Y = 14,8 + 1,48 X_2 - 1,1 X_5$ $Ra_{cp} = 17,6 + 2,5 X_2 - 0,3 X_5$	<u>0,72</u> 0,89	<u>0,71</u> 0,76
IV	$D_X = 13,1 + 1,8 X_2 - 1,5 X_6$ $D_Y = 12,4 + 1,8 X_2 - 3,5 X_6$	$D_X = 21,4 + 3,8 X_2 - 2,6 X_6$ $D_Y = 15,3 + 2,9 X_2 - 4,3 X_6$	Не знач.	Не знач.

Примечание. В числителе приведены значения для древесины сосны, в знаменателе – для древесины дуба.

Результаты обработки экспериментальных данных подтверждают, что увеличение угла наклона режущих кромок приводит к снижению уровня вибраций $D_{x,y}$ и шероховатости поверхности Ra_{cp} для рассматриваемых пород древесины. Это объясняется тем, что при увеличении угла наклона режущей кромки вход и выход зуба фрезы из контакта с заготовкой происходят более плавно, ударные нагрузки уменьшаются и, как следствие, сокращается уровень вибраций. Несмотря на то, что в настоящее время производители режущего инструмента предлагают в основном фрезы с углом наклона до 30° , увеличение угла до 45° благоприятно сказывается на снижении уровня вибраций и шероховатости поверхности. Рост числа зубьев при сохранении минутной подачи приводит к уменьшению подачи на зуб и сопровождается снижением уровня вибраций и шероховатости поверхности. Связано это с уменьшением степени неравномерности фрезерования. Стружкоделительные канавки на фрезе также способствуют снижению уровня вибраций и шероховатости поверхности. Значимые коэффициенты корреляции между величиной шероховатости поверхности и уровнем вибраций позволяют сделать вывод о том, что использование стружкоделительных канавок на фрезе вполне обоснованно. Наиболее рациональные области применения таких фрез необходимо уточнять при исследовании обработки древесины в зависимости от режимных параметров [11].

Следует отметить, что полученные коэффициенты корреляции между уровнем вибрации и шероховатостью поверхности являются значимыми и составляют от 0,52 до 0,91. Это хорошо согласуется с работами [3, 12], где предлагается проводить виброакустическую диагностику процесса резания для прогнозирования некоторых параметра обработки, например износа инструмента и шероховатости поверхности. Анализ коэффициентов в полученных регрессионных зависимостях для древесины сосны и дуба показал, что уровень вибраций при фрезеровании заготовок из дуба на 55...75 % выше. При этом шероховатость различается всего на 15...20 %. Влияние неравномерного окружного шага зубьев неоднозначно. При определении коэффициентов корреляции в этой группе экспериментов получены статистически не значимые величины. Следует также отметить, что во всех экспериментах уровень вибраций при фрезеровании заготовок из древесины поперек волокон был выше, чем вдоль волокон.

Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о том, что увеличение угла наклона режущих кромок, оснащение стружкоделительными канавками и рост числа зубьев концевых фрез благоприятно сказывается на общей виброактивности процесса резания и способствуют снижению шероховатости обрабатываемой поверхности.

Целесообразно продолжить исследования для уточнения области рационального применения таких фрез с учетом анизотропии, физико-механических свойств древесины, древесно-композитных материалов и режимных параметров процесса обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.Н. Совершенствование режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1993. 240 с.

2. Воробьев А.А., Спицын И.Н., Филиппов Ю.А. Моделирование качества обработки и динамики работы дереворежущих станков // Справочник. Инж. журн. 2012. № 3. С. 37–41.
3. Воробьев А.А., Филиппов Ю.А. Установление зависимости шероховатости поверхности древесины от показателей вибрации станка // Деревообраб. пром-сть. 2010. № 2. С. 6–7.
4. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
5. Глебов И.Т. Резание древесины: учеб. пособие. Екатеринбург: УГЛТУ, 2007. 228 с.
6. Глебов И.Т. Зависимость высоты микронеровностей обработанной поверхности от некоторых факторов цилиндрического фрезерования // Лесн. журн. 2010. № 1. С. 99–104. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Ивановский Е.Г., Василевская П.В., Лаутнер Э.М. Фрезерование и пиление древесины и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 96 с.
8. Кряжев Н.А. Фрезерование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 200 с.
9. Манжос Ф.М. Дереворежущие станки: учеб. для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 454 с.
10. Iskra P., Hernández R.E. Toward a Process Monitoring and Control of a CNC Wood Router: Development of an Adaptive Control System for Routing White Birch // Wood and Fiber Science. 2010. Vol. 42, no. 4. Pp. 523–535.
11. Iskra P., Tanaka C. The Influence of Wood Fiber Direction, Feed Rate, and Cutting Width on Sound Intensity during Routing // Holz als Roh- und Werkstoff [European Journal of Wood and Wood Products]. 2005. Vol. 63, iss. 3. Pp. 167–172. DOI: 10.1007/s00107-004-0541-7
12. Li Z.Z., Zhang Z.H., Zheng L. Feedrate Optimization for Variant Milling Process Based on Cutting Force Prediction // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2004. Vol. 24, iss. 7-8. Pp. 541–552. DOI: 10.1007/s00170-003-1700-4
13. Palmqvist J., Lenner M., Gustafsson S.-I. Cutting-Forces When Up-Milling in Beech // Wood Science and Technology. 2005. Vol. 39, iss. 8. Pp. 674–684. DOI: 10.1007/s00226-005-0010-4
14. Raju K.V.M.K., Janardhana G.R., Kumar P.N., Rao V.D.P. Optimization of Cutting Conditions for Surface Roughness in CNC End Milling // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2011. Vol. 12, iss. 3. Pp. 383–391. DOI: 10.1007/s12541-011-0050-7
15. Sun Y., Li D., Ren F., Guo D. Predictive Force Model Based Variable Feedrate Scheduling for High-Efficiency NC Machining // Proceedings of the ICIRA: International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Wuhan, China, October 15–17, 2008. Berlin: Springer, 2008. Pp. 1076–1085. DOI: 10.1007/978-3-540-88518-4_115

Поступила 28.09.18

UDC 674.023

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.146

Experimental Study of the Woodworking Dynamics with End Milling Cutters

V.I. Melekhov¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](#),
ORCID: [0000-0002-2583-3012](#)

L.V. Kremleva¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [T-5916-2018](#),
ORCID: [0000-0002-8982-2603](#)

T.V. Tyurikova¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [P-8991-2019](#),
ORCID: [0000-0002-3592-310X](#)

*E.V. Sazanova*¹, Candidate of Economics, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-8650-2019](#), ORCID: [0000-0001-5731-7517](#)

*D.A. Luzhansky*², Engineer; ResearcherID: [P-9154-2019](#), ORCID: [0000-0001-9347-3306](#)

*V.A. Slutskov*², Engineer; ResearcherID: [P-7597-2019](#), ORCID: [0000-0003-4032-4635](#)

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: v.melechov@narfu.ru, l.kremleva@narfu.ru

²JSC PO Sevmash, sh. Arkhangel'skoe, 58, Severodvinsk, Arkhangelsk region, 164500, Russian Federation; e-mail: arov-dm@mail.ru

Efficient operation of modern multifunctional woodworking centers with computer numerical control (CNC) is associated with the creation of rational designs of end milling cutters for multi-axis processing. The research purpose is an experimental study of the dynamic parameters of wood processing with end milling cutters and their influence on the surface roughness depending on the structural elements of the tool. The varying structural elements of the cutters are the cutting edge inclination, the teeth number, the circular pitch irregularity and the presence of chip separation grooves on the cutting edges. A set of experimental milling cutters with various structural elements was used in the research. Cutting experiments were performed under the production conditions with the use of vibration-measuring complex (Brüel & Kjær). Factorial designs of studies, methods of vibration measurements and processing of vibroacoustic signals are given. The article presents the qualitative assessment of the degree of influence of various structural elements of end milling cutters on the vibractivity of processing pine and oak wood. On average, the vibration level during the processing of oak blanks is higher by 60–75 % in comparison with pine blanks; while the roughness of the treated surface differs only by 10–20 %. A steady correlation between the level of vibrations and the roughness of the treated surface was found. Increasing the cutting edge inclination, the teeth number, as well as the presence of chip separation grooves reduces vibrations and helps to improve the condition of the treated surface for both wood species. The influence of circular tooth pitch irregularity on the studied parameters is ambiguous.

For citation: Melekhov V.I., Kremleva L.V., Tyurikova T.V., Sazanova E.V., Luzhansky D.V., Slutskov V.A. Experimental Study of the Woodworking Dynamics with End Milling Cutters. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 146–158. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.4.146](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.146)

Keywords: milling cutters with spiral leads, processing vibroactivity, spectral characteristics, mean square values of vibration acceleration, surface condition.

REFERENCES

1. Andreev V.N. *Cutting Tool Improvement*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 240 p.
2. Vorobjev A.A., Spitsyn I.N., Filippov J.A. Modeling of Quality of Processing and Dynamics of Work Woodcutting of Machine Tools. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal], 2012, no. 3, pp. 37–41.
3. Vorobjev A.A., Filippov J.A. Dependence Determination of the Wood Surface Roughness on the Machine Vibration Parameters. *Derevoobrabatativaushaya promishlennost'* [Woodworking industry], 2010, no. 2, pp. 6–7.
4. Genkin M.D., Sokolova A.G. *Vibroacoustic Diagnostics of Vehicles and Machinery*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 288 p.
5. Glebov I.T. *Wood Cutting*: Educational Textbook. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2007. 228 p.

6. Glebov I.T. Dependencies of Micro-Roughness Height of Processed Surface on Some Factors of Cylinder Milling. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2010, no. 1, pp. 99–104.
7. Ivanovskiy E.G., Vasilevskaya P.V., Lautner E.M. *Milling and Sawing of Wood and Wood-Based Materials*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 96 p.
8. Kryazhev N.A. *Wood Milling*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 200 p.
9. Manzhos F.M. *Wood Cutting Machines: Textbook for Universities*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1974. 454 p.
10. Iskra P., Hernández R.E. Toward a Process Monitoring and Control of a CNC Wood Router: Development of an Adaptive Control System for Routing White Birch. *Wood and Fiber Science*, 2010, vol. 42, no. 4, pp. 523–535.
11. Iskra P., Tanaka C. The Influence of Wood Fiber Direction, Feed Rate, and Cutting Width on Sound Intensity during Routing. *Holz als Roh- und Werkstoff* [European Journal of Wood and Wood Products], 2005, vol. 63, iss. 3, pp. 167–172. DOI: 10.1007/s00107-004-0541-7
12. Li Z.Z., Zhang Z.H., Zheng L. Feedrate Optimization for Variant Milling Process Based on Cutting Force Prediction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, vol. 24, iss. 7-8, pp. 541–552. DOI: 10.1007/s00170-003-1700-4
13. Palmqvist J., Lenner M., Gustafsson S.-I. Cutting-Forces When Up-Milling in Beech. *Wood Science and Technology*, 2005, vol. 39, iss. 8, pp. 674–684. DOI: 10.1007/s00226-005-0010-4
14. Raju K.V.M.K., Janardhana G.R., Kumar P.N., Rao V.D.P. Optimization of Cutting Conditions for Surface Roughness in CNC End Milling. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, vol. 12, iss. 3, pp. 383–391. DOI: 10.1007/s12541-011-0050-7
15. Sun Y., Li D., Ren F., Guo D. Predictive Force Model Based Variable Feedrate Scheduling for High-Efficiency NC Machining. *Proceedings of the ICIRA: International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Wuhan, China, October 15–17, 2008*. Berlin, Springer, 2008, pp. 1076–1085. DOI: 10.1007/978-3-540-88518-4_115

Received on September 28, 2018
