

УДК 674.023

ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ ВИБРАЦИЙ И КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ДРЕВЕСИНЫ

© С.А. Черепанов, асп.

Д.А. Лужанский, асп.

Г.Ф. Прокофьев, д-р техн. наук

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: serg-edu@yandex.ru;
agov-dm@mail.ru;

Качество обработанной поверхности при фрезеровании древесины определяется целым рядом факторов: режимы резания, конструктивно-геометрические характеристики инструмента, свойства обрабатываемой древесины. Известно, что с повышением скорости резания до определенного предела происходит повышение качества поверхности древесины. Однако при обработке концевыми фрезами для достижения высоких скоростей резания требуется увеличивать частоту вращения шпинделя до 10 тыс. об/мин и более, что влечет за собой существенный рост уровня вибраций. В статье рассматриваются результаты экспериментального исследования зависимости уровня вибраций инструмента и шероховатости поверхности от режимов резания, числа зубьев фрезы, породы древесины и направления подачи относительно волокон. Эксперименты проводили на современном обрабатывающем центре с числовым программным управлением по плану дробного факторного эксперимента типа 2^{5-1} для двух пород древесины (сосна, дуб). В качестве измерительной аппаратуры использовали пьезоэлектрический датчик, закрепленный на заготовке. Датчик подключали через предусилитель к анализатору. В процессе резания записывали сигналы с датчика. После обработки записи получены спектры колебаний и общий уровень виброускорения. Для измерения шероховатости использовали профилометр. Проведено измерение собственных резонансных частот инструмента. На основании экспериментальных данных получены уравнения регрессии, анализ которых показал, что с увеличением частоты вращения шпинделя и глубины резания уровень вибраций возрастает для обеих пород древесины, однако при обработке дуба уровень вибраций снижается с увеличением числа зубьев фрезы. Шероховатость поверхности при обработке дуба ухудшается с увеличением числа зубьев фрезы и подачи на зуб и улучшается при переходе от подачи вдоль волокон к подаче поперек волокон. Анализ спектров колебаний показал, что в спектрах доминируют гармоники частоты вращения шпинделя и частоты врезания зубьев.

Ключевые слова: фрезерование древесины, вибрации, шероховатость поверхности, резонансная частота, спектр колебаний, концевая фреза.

Качество обработанной поверхности, являющееся одной из важнейших характеристик процесса фрезерования, определяется целым рядом факторов, среди которых основное место занимают режимы резания и конструктивно-геометрические характеристики инструмента. Известно, что с повышением

скорости резания качество поверхности древесины улучшается [3]. Вместе с тем, для достижения высоких скоростей резания при обработке концевыми фрезами требуется повышение частоты вращения шпинделя до 10...20 тыс. об/мин и более. При столь высоких частотах вращения резко увеличивается уровень вибраций, вызванных, в частности, дисбалансом инструмента. В работе [2] указывается на наличие взаимосвязи между уровнем вибрации и качеством обработанной поверхности. Таким образом, при исследовании процесса высокоскоростного фрезерования, помимо шероховатости поверхности необходимо исследовать и зависимость уровня вибрации инструмента от различных факторов.

Рассмотрим основные факторы, оказывающие влияние на качество обработанной поверхности и уровень вибрации инструмента при фрезеровании. Их условно можно разделить на несколько подгрупп: режимы резания, порода и направление волокон древесины, конструктивно-геометрические характеристики инструмента.

Среди режимов резания при высокоскоростном фрезеровании наибольший интерес представляет скорость резания, зависящая от частоты вращения шпинделя. С одной стороны, повышение скорости резания должно улучшать качество поверхности, с другой – увеличивать уровень вибраций. Так, центробежная сила, вызванная дисбалансом инструмента, увеличивается пропорционально квадрату частоты вращения шпинделя. На динамические характеристики процесса фрезерования большое влияние также оказывают глубина резания и подача на зуб, поскольку эти параметры определяют размеры срезаемого слоя материала и, соответственно, силу резания. Помимо этого, подача на зуб определяет высоту кинематических неровностей.

Древесина является анизотропным материалом, поэтому большой интерес представляет влияние направления волокон относительно направления подачи. При этом в процессе фрезерования всегда имеют место различные переходные виды резания – продольно-поперечное, продольно-торцовое и т. д. Порода древесины оказывает существенное влияние на уровень вибрации инструмента [4]. В связи с разнообразием пород древесины и их свойств было принято решение провести эксперимент на двух породах. В качестве типичной мягкой породы выбрана сосна, в качестве твердой – дуб. Влажность заготовок из древесины составила 6...8 %.

Конструктивные параметры инструмента также оказывают значительное влияние на динамику процесса фрезерования. Наибольшее распространение среди концевых фрез получили двузубые фрезы. Однако представляет интерес исследование возможностей фрез с большим количеством зубьев. Так, в работе [1] были показаны преимущества многозубых цилиндрических фрез перед фрезами традиционной конструкции. Поэтому были спроектированы и изготовлены экспериментальные фрезы из стали 9ХС с числом зубьев 2, 4, 6. Исходя из возможностей технологического оборудования, выбрано:

диаметр фрез – 30 мм, диаметр хвостовика – 12 мм. Геометрические параметры соответствовали используемым в деревообработке: передний угол $\gamma = 30^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$. Экспериментальные фрезы представлены на рис. 1.

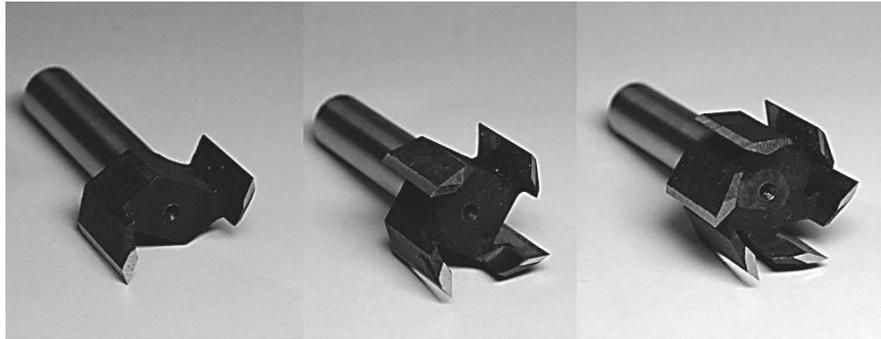


Рис. 1. Экспериментальные фрезы

Ввиду того, что другие конструктивные параметры фрез (угол наклона лезвия, переменный шаг зубьев, наличие стружкоделительных канавок) оказывают меньшее влияние на процесс резания [4], а также для снижения трудоемкости экспериментов, изучение их влияния на процесс высокоскоростного фрезерования древесины не проводилось.

В целях построения интерполяционных математических моделей и сокращения числа опытов был разработан план многофакторного эксперимента [5]. В качестве плана выбран дробный факторный эксперимент типа 2^{5-1} , поскольку использование плана полного факторного эксперимента для пяти факторов связано с высокой трудоемкостью из-за большого числа опытов. По этой же причине опыты не дублировали, а для статистической обработки результатов дополнительно проведено по два опыта при основном уровне варьирования технологических факторов на каждой породе древесины. Для получения наибольшей разрешающей способности плана эксперимента в качестве генерирующего соотношения для фактора X_5 было выбрано следующее:

$$X_5 = X_1X_2X_3X_4.$$

Уровни технологических факторов и интервалы варьирования представлены в табл. 1. В качестве выходных параметров приняты шероховатость обработанной поверхности и виброускорение.

Экспериментальные исследования проведены на обрабатывающем центре BIESSE ROVER 20 (Италия), оснащенном вакуумным столом. Мощность электрошпинделя обрабатывающего центра – 6,6 кВт, частота вращения шпинделя – 1...24 тыс. об/мин.

Таблица 1

**Уровни технологических факторов и интервалы варьирования
при высокоскоростном фрезеровании древесины**

Уровень факторов и интервал варьирования	Код	Число зубьев фрезы z (X_1)	Угол между направлением волокон и направлением подачи φ , град (X_2)	Подача на зуб S_z , мм (X_3)	Частота вращения шпинделя n , об/мин (X_4)	Глубина резания t , мм (X_5)
Основной	0	4	45	0,12	10 000	4
Верхний	+1	6	90	0,18	15 000	6
Нижний	-1	2	0	0,06	5 000	2
Интервал варьирования	ΔX_i	2	45	0,06	5 000	2

Суть эксперимента заключалась в следующем. На вакуумный стол устанавливали заготовку, на которой крепили с помощью шурупа трехкомпонентный датчик для измерения виброускорения. Затем в заготовке производили фрезерование уступа шириной 20 мм. Схема установки датчика на заготовке приведена на рис. 2, схема измерительного тракта – на рис. 3. Для измерений использовали аппаратуру фирмы «Брюль и Кьер». Сигнал с трехкомпонентного датчика (мод. 4321) через преусилители (мод. 2647А) поступал на анализатор



Рис. 2. Схема установки датчика на заготовке

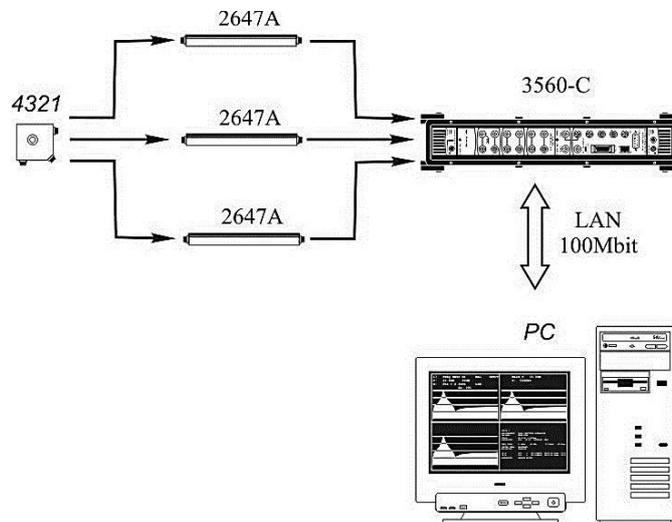


Рис. 3. Схема измерительного тракта

(мод. 3560-С) и далее записывался в память ПК. Для оценки шероховатости (R_a) обработанной поверхности использовали профилометр Surtronic 3. В соответствии с ГОСТ 15612–85 для измерения параметра шероховатости необходимо произвести измерение на пяти равномерно расположенных участках и рассчитать среднее значение. В данной работе для повышения точности измерений количество участков для измерений было увеличено до десяти, после чего также определялось среднее значение. Базовая длина для измерения шероховатости была принята 2,5 мм.

Перед выполнением основной серии опытов было проведено исследование собственных резонансных частот фрез (рис. 4). Для этого на фрезу устанавливался датчик (мод. 8309), который через предусилитель (мод. 2647А)



Рис. 4. Схема установки датчика на фрезу

подключался к анализатору (мод. 3560-С). По фрезе наносились удары измерительным молотком (мод. 8202), который через предусилитель (мод. 2647А) подключался к анализатору. Производилась запись амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фрез. Пример АЧХ шестизубой фрезы представлен на рис. 5. Анализ АЧХ фрез показал, что их собственная резонансная частота находится в диапазоне 801...823 Гц.

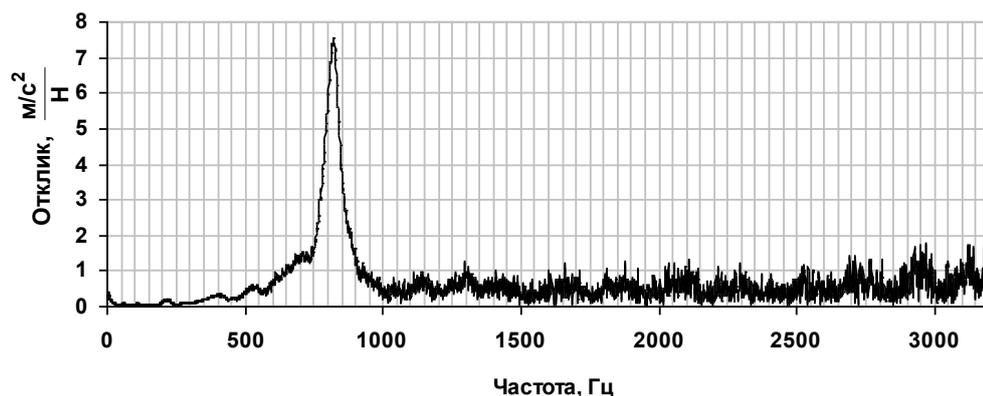


Рис. 5. АЧХ шестизубой фрезы

Результаты основной серии опытов приведены в табл. 2. Кроме того, для оценки дисперсии воспроизводимости и последующей оценки значимости коэффициентов регрессии и адекватности модели была поставлена серия дополнительных опытов. Их результаты представлены в табл. 3. Уровень виброускорения в табл. 2, 3 указан для оси X.

Таблица 2

Результаты эксперимента

Номер точки плана	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Порода древесины	Уровень виброускорения D , m/s^2	Шероховатость Ra
1	-1	-1	-1	-1	+1	Сосна	3,636	7,62
2	+1	-1	-1	-1	-1		5,000	3,94
3	-1	+1	-1	-1	-1		2,447	5,75
4	+1	+1	-1	-1	+1		5,650	2,22
5	-1	-1	+1	-1	-1		2,649	9,86
6	+1	-1	+1	-1	+1		17,572	5,63
7	-1	+1	+1	-1	+1		4,436	3,39
8	+1	+1	+1	-1	-1		3,469	4,19
9	-1	-1	-1	+1	-1		3,758	6,00
10	+1	-1	-1	+1	+1		7,838	3,92
11	-1	+1	-1	+1	+1		14,967	6,48
12	+1	+1	-1	+1	-1		18,353	5,69
13	-1	-1	+1	+1	+1		13,425	9,18
14	+1	-1	+1	+1	-1		3,224	8,51
15	-1	+1	+1	+1	-1		5,777	4,05
16	+1	+1	+1	+1	+1		4,387	8,23

Окончание табл. 2

Номер точки плана	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Порода древесины	Уровень виброускорения D, м/с ²	Шероховатость Ra
17	-1	-1	-1	-1	+1	Дуб	5,210	14,69
18	+1	-1	-1	-1	-1		3,964	15,23
19	-1	+1	-1	-1	-1		4,950	5,87
20	+1	+1	-1	-1	+1		5,273	6,20
21	-1	-1	+1	-1	-1		5,699	14,69
22	+1	-1	+1	-1	+1		6,479	10,78
23	-1	+1	+1	-1	+1		8,346	8,40
24	+1	+1	+1	-1	-1		4,354	9,76
25	-1	-1	-1	+1	-1		10,103	5,30
26	+1	-1	-1	+1	+1		3,258	11,14
27	-1	+1	-1	+1	+1		19,305	6,75
28	+1	+1	-1	+1	-1		3,843	7,76
29	-1	-1	+1	+1	+1		16,831	7,96
30	+1	-1	+1	+1	-1		3,820	24,14
31	-1	+1	+1	+1	-1		12,687	8,40
32	+1	+1	+1	+1	+1		5,216	9,87

Таблица 3

Результаты дополнительных опытов

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Порода древесины	Уровень виброускорения D, м/с ²			Шероховатость Ra		
						Опыт 1	Опыт 2	Среднее значение	Опыт 1	Опыт 2	Среднее значение
0	0	0	0	0	Сосна	8,19	7,54	7,86	7,99	6,03	7,01
0	0	0	0	0	Дуб	7,32	6,92	7,12	10,51	11,08	10,79

Анализ спектров колебаний показал, что спектры колебаний по осям X, Y, Z в целом повторяют друг друга. В них преобладают гармоники частоты вращения шпинделя и частоты врезания зубьев. Следует отметить, что на многих режимах наибольшая амплитуда колебаний наблюдается на частоте 500 Гц. Причем наибольшие значения виброускорения в серии опытов отмечены в случаях, когда частота врезания зубьев совпадала с этой частотой. Наиболее вероятно, что эта частота является одной из собственных резонансных частот шпиндельного узла. Пример спектров колебаний приведен на рис. 6.

По результатам обработки данных табл. 2, 3 и в соответствии с методикой, изложенной в [5], получены уравнения регрессии:

для фрезерования сосны

$$D = 7,29 + 0,94X_1 + 0,16X_2 - 0,37X_3 + 1,69X_4 + 1,7X_5;$$

$$Ra = 5,91 - 0,63X_1 - 0,92X_2 + 0,71X_3 + 0,59X_4 - 0,08X_5;$$

для фрезерования дуба

$$D = 7,43 - 2,9X_1 + 0,57X_2 + 0,44X_3 + 1,9X_4 + 1,25X_5;$$

$$Ra = 10,43 + 1,43X_1 - 2,56X_2 + 1,32X_3 - 0,27X_4 - 0,96X_5.$$

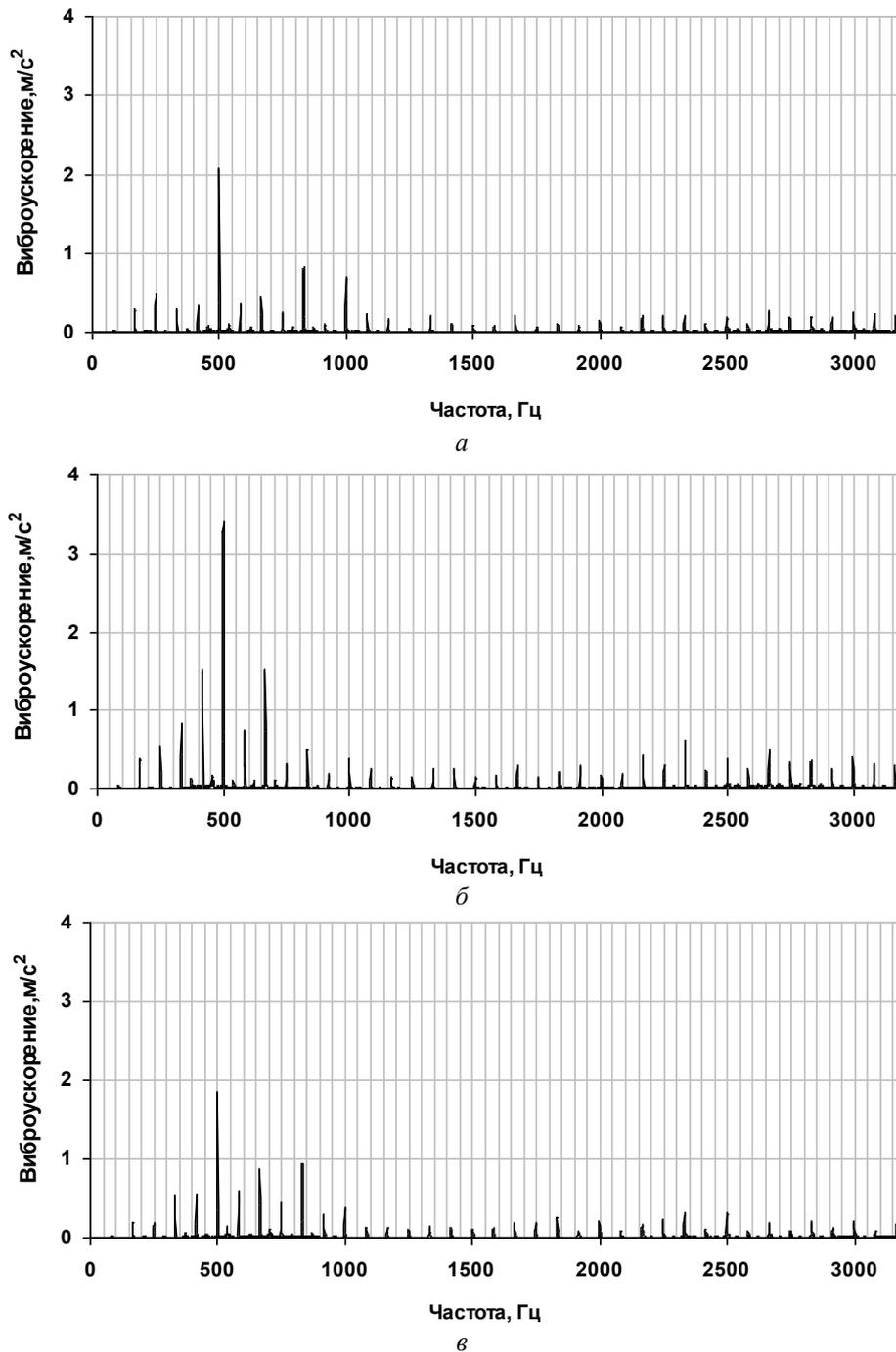


Рис. 6. Спектры колебаний по осям X (а), Y (б), Z (в) ($n = 5000$ об/мин; $z = 2$; $S_z = 0,06$ мм/об; $t = 6$ мм; подача вдоль волокон; материал – дуб)

Значимость коэффициентов регрессии проверена по критерию Стьюдента. Незначимые факторы выделены подчеркиванием. Как видно, для уравнения шероховатости при фрезеровании сосны все факторы являются незначимыми, т. е. находятся в пределах погрешности опытов. Проверка адекватности моделей проводилась по критерию Фишера и показала их адекватность.

Отбросив незначимые факторы и перейдя от нормализованных к натуральным значениям факторов, получим следующие уравнения:

для фрезерования сосны

$$D = 0,51 + 0,00034n + 0,85t;$$

для фрезерования дуба

$$D = 6,93 - 1,45z + 0,00038n + 0,625t;$$

$$Ra = 7,49 + 0,715z - 0,056\phi + 22S_z.$$

Выводы

1. Анализ уравнений регрессии показал следующее:
при фрезеровании сосны и дуба уровень вибраций возрастает с увеличением частоты вращения шпинделя и глубины резания;
при фрезеровании дуба уровень вибрации снижается с увеличением числа зубьев фрезы; по-видимому, это связано с тем, что в резании участвуют одновременно несколько зубьев;
при фрезеровании дуба шероховатость поверхности ухудшается с увеличением числа зубьев фрезы и подачи на зуб и улучшается при переходе от подачи вдоль волокон к подаче поперек волокон.
2. Анализ спектров колебаний показал, что в спектрах доминируют гармоники частоты вращения шпинделя и частоты врезания зубьев.
3. Как следует из результатов проведенных экспериментов один и тот же технологический фактор может по-разному влиять на уровень вибрации и качество обработанной поверхности. Так, при фрезеровании дуба с увеличением числа зубьев фрезы уровень вибраций снижается, а шероховатость поверхности возрастает. Таким образом, можно говорить, что само по себе снижение уровня вибрации инструмента при высокоскоростном фрезеровании древесины не является достаточным условием для улучшения качества обработки. При назначении режимов обработки и выборе инструмента необходимо исходить из поставленных задач и комплексно рассматривать влияние различных факторов.
4. На основании полученных результатов можно дать следующие рекомендации. При необходимости получить высокое качество поверхности следует производить обработку двузубой фрезой с высокими частотами вращения и малой подачей на зуб. Для высокопроизводительной обработки при некотором ухудшении качества обработанной поверхности перспективно использование шестизубых фрез с высокими частотами вращения и подачей на зуб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков И.М. Совершенствование многоножевых фрез и режимов их эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук. М., 1984. 168 с.
2. Воробьев А.А. Улучшение качества фрезерованных деталей мебели на основе снижения вибрации технологического оборудования: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2010. 186 с.
3. Глебов И.Т. Резание древесины: учеб. пособие. Екатеринбург: УГЛТУ, 2007. 228 с.
4. Кремлева Л.В. Повышение эффективности процесса механической обработки сложнопровильных поверхностей литейных моделей из древесно-композитных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Северодвинск, 2010. 299 с.
5. Пижурин А.А., Пижурин А.А. Основы научных исследований в деревообработке: учеб. для вузов. М.: МГУЛ, 2005. 305 с.

Поступила 18.03.15

UDC 674.023

Research of the Vibration Level and Surface Quality at High-Speed Moulding

S.A. Cherepanov, Postgraduate Student

D.A. Luzhanskiy, Postgraduate Student

G.F. Prokof'ev, Doctor of Engineering Sciences

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: serg-edu@yandex.ru; arov-dm@mail.ru

Surface quality at moulding is determined by a number of factors: cutting conditions, constructive and geometrical adjectives of a tool, processed wood property. It is known that with an increase of cutting speed up to a certain limit there is an increase of surface quality. However, to achieve high-speed cutting it is required to increase spindle speed up to more than 10000 rpm at the end mill processing that entails a significant increase in the vibration level. The article deals with the experimental investigation of the dependence of vibration level of a tool and surface roughness on the cutting conditions, the number of cutter teeth, timber species and feed direction with respect to the fibers. The study was conducted in the modern work center with CNC and according to the plan of fractional factorial experiment of the 2^{5-1} type for two timber species of pine and oak. The piezoelectric sensor fixed on a workpiece was used as measuring equipment. The sensor was connected through a preamplifier to the analyzer. A sensor signal was taped during the cutting process. The records demonstrated the spectrum of oscillations and the total level of vibration acceleration. The profilometer was used to measure the roughness. A resonant frequencies measurement of the tool was performed. On the basis of the experimental data the regression equations were obtained. The analysis of the equations of regression showed that with increase of spindle speed and the cutting depth the vibration level increased for both timber species. The vibration level at processing of oak decreased with increase in the number of cutter teeth. The surface roughness at processing of oak deteriorated with increasing the number of cutter teeth and bite per tooth and improved in the transition from along-the-grain feeding to the

cross-grain feeding. The analysis of vibrational spectra showed that the spectrum was dominated by harmonics of spindle rotation frequency and frequency of teeth incision.

Keywords: moulding, vibration, surface roughness, resonant frequency, vibrational spectra, end mill.

REFERENCES

1. Volkov I.M. *Sovershenstvovanie mnogozhevykh frez i rezhimov ikh ekspluatatsii*: dis... kand. tehn. nauk [Improvement of Multiknife Mills and Modes of Their Operation: Cand. Eng. Sci. Diss.]. Moscow, 1984. 168 p.
2. Vorob'ev A.A. *Uluchshenie kachestva frezerovannykh detaley mebeli na osnove snizheniya vibratsii tekhnologicheskogo oborudovaniya*: dis... kand. tehn. nauk [Improvement of Quality of the Milled Furniture Details on the Basis of Vibration Decrease of Processing Equipment: Cand. Eng. Sci. Diss.]. Krasnoyarsk, 2010. 186 p.
3. Glebov I.T. *Rezanie drevesiny* [Wood Cutting. Manual]. Yekaterinburg, 2007. 228 p.
4. Kremleva L.V. *Povyshenie effektivnosti protsessa mekhanicheskoy obrabotki slozhnoprofil'nykh poverkhnostey liteynykh modeley iz drevesno-kompozitnykh materialov*: dis... dok. tehn. nauk [Improving the Efficiency of the Process of Mechanical Operation of Figurine Surfaces of Casting Patterns from Wood and Composite Materials: Doc. Eng. Sci. Diss.]. Severodvinsk, 2010. 299 p.
5. Pizhurin A.A., Pizhurin A.A. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke* [Basic Research in a Woodworking]. Moscow, 2005. 305 p.

Received on March 18, 2015

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.6.96
