

На правах рукописи



ЛУЖАНСКИЙ Дмитрий Анатольевич

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ И ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНЦЕВЫХ
ДЕРЕВОРЕЖУЩИХ ФРЕЗ НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА**

Специальность 05.21.05 – Дровесиноведение, технология и оборудование
деревопереработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Архангельск

2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова»

Научные руководители: доктор технических наук, профессор,
Кремлева Людмила Викторовна
доктор технических наук, профессор
Мелехов Владимир Иванович

Официальные оппоненты: **Памфилов Евгений Анатольевич**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Брянский государственный технический
университет», кафедра триботехнического
материаловедения и технологий материалов,
заведующий кафедрой

Шарапов Евгений Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Поволжский государственный технологический
университет», управление научной и
инновационной деятельности, ведущий научный
сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский
государственный лесотехнический университет
имени С.М. Кирова»

Защита диссертации состоится 9 апреля 2020 года в 13³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.008.01, созданного на базе ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» по адресу: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д.17, ауд. 1220.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» и на сайте www.narfu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



Тюрикова
Татьяна Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Производство изделий с поверхностями сложной формы в специальном машиностроении характеризуется повышенными требованиями к точности форм и размеров, получаемых деталей. Требования к высокой точности обработки таких изделий вызывают необходимость совершенствования технологии их изготовления на всех этапах, начиная с получения литых металлических заготовок с минимальными отклонениями от номинальных размеров изделия. Точность изготовления литой заготовки для изделий со сложнопрофильными поверхностями (СПП) определяется совершенством модельной оснастки, основой которой является литейная модель, изготавливаемая из древесины и древесно-композитных материалов (ДКМ). Механическую обработку литейных моделей из древесины и ДКМ с СПП в современных технологиях осуществляют методом многокоординатного фрезерования концевыми фрезами. Обработку СПП проводят на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) гаммой концевых дереворежущих фрез (КДФ). Процессы многокоординатного фрезерования древесины и ДКМ концевыми фрезами исследовали Малыгин В. И., Кремлева Л. В. и другие ученые, однако следует отметить, что многие вопросы и рекомендации по применению специализированных конструкций КДФ для определенных режимов обработки СПП требуют уточнения. Для совершенствования конструкций КДФ, уточнения конструктивно-геометрических параметров и вибрационных характеристик необходимо провести целенаправленные исследования, что является актуальной задачей.

Цель и задачи работы. Цель исследования – оценка влияния конструктивно-геометрических параметров и вибрационных характеристик концевых дереворежущих фрез на качество обработки материала.

Задачи исследования.

1. Разработать математическую модель силовых полей процесса резания при контурном фрезеровании древесины концевыми фрезами.
2. Разработать трехмерную модель КДФ и рассчитать её собственные резонансные частоты и формы колебаний.
3. Разработать методику экспериментальных исследований параметров вибраций в системе СИД при контурном фрезеровании древесины концевыми фрезами.
4. Установить зависимости уровня вибрации и качества обработанной поверхности ДКМ от конструктивно-геометрических параметров инструмента.
5. Разработать практические рекомендации для проектирования и конструирования КДФ.

Научная новизна работы.

1. Научно обоснована и разработана математическая модель силовых полей процесса контурного фрезерования древесины КДФ, для расчета

составляющих сил резания в зависимости от конструктивно-геометрических параметров инструмента.

2. Предложена новая методика экспериментальных исследований среднеквадратического значения (СКЗ) виброускорения предмета обработки при торцовом фрезеровании древесины, как энергетической характеристики процесса резания.
3. Определены регрессионные зависимости качества обработки древесины и СКЗ виброускорения процесса торцового фрезерования КДФ от конструктивно-геометрических параметров инструмента.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Математическая модель силовых полей процесса контурного фрезерования древесины и алгоритм расчета составляющих сил, действующих на КДФ во время резания.
2. Регрессионные взаимосвязи качества обработки поверхности ДКМ и величин СКЗ виброускорения в процессе фрезерования материала от конструктивно-геометрических параметров инструмента.

Методы исследования.

Теоретические исследования выполнены на основе положений теории резания древесины. В экспериментальных исследованиях применен метод планирования эксперимента, математико-статистические методы обработки экспериментальных данных. Виброакустические измерения, регистрация и анализ результатов проведены с применением методик цифровой обработки данных на экспериментальной установке.

Достоверность результатов подтверждается достаточным количеством теоретических и экспериментальных исследований, применением методов математического моделирования, теории планирования эксперимента и статистической обработки результатов многофакторного эксперимента, применением сертифицированной экспериментальной базы.

Практическая значимость работы.

1. Математическая модель позволяет определить параметры составляющих силового поля процесса контурного фрезерования древесины при различных сочетаниях конструктивно-геометрических параметров инструмента (КДФ).
2. Практические рекомендации по выбору конструктивно-геометрических параметров инструмента позволяют обеспечить повышение качества обработки поверхности и снижение вибрации в системе СИД при обработке древесины и ДКМ.

Апробация работы.

Основные результаты исследования представлены на научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова «Развитие северо-арктического региона: проблемы и решения» (г. Архангельск, 2016), региональной научно-практической конференции «XLVII Ломоносовские чтения» (г. Северодвинск, 2018),

международных конференциях: VII международная научно-техническая конференция «Строительная наука XXI век», посвященная 100-летию со дня рождения ученых СПбГАСУ (ЛИСИ) В.А. Лебедева, В.А. Трулля, Е.И. Светозаровой (г. Архангельск, 2016), XIX научно-практическая конференция «Достижения и проблемы современной науки» (г. Санкт-Петербург, 2017), II Всероссийская научная конференция с международным участием «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения» (г. Тольятти, 2019).

Личный вклад автора.

Личный вклад автора заключается в проведении аналитического обзора работ по теме исследования, определении цели и задач исследования, разработке математических моделей силовых полей при контурном фрезеровании древесины КДФ, создании экспериментальной базы, разработке методики экспериментальных исследований, математической обработке и анализе результатов исследования, формулировании выводов и рекомендаций, подготовке и написании научных статей по теме диссертации.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе в научных изданиях по перечню ВАК (3), в базе Web of Science (4).

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературных источников из 144 наименований. Работа представлена на 120 страницах, включая 43 рисунка и 24 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** приведена структура диссертационной работы, обоснованы актуальность и научная новизна выполненных исследований, их практическая значимость, методы исследования, обозначены цель и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту.

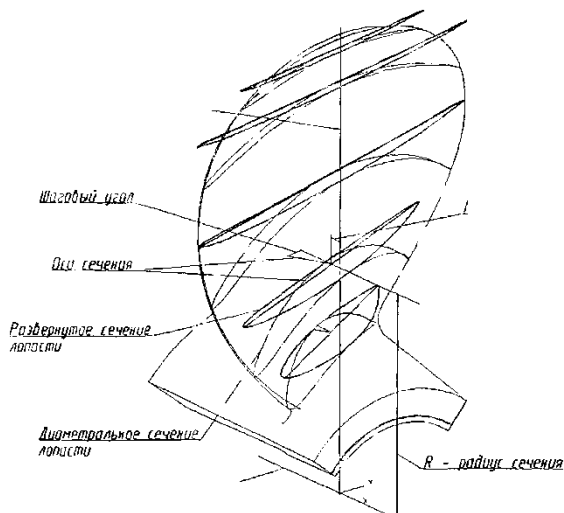
В **первой главе** охарактеризованы особенности фрезерования СПП из древесины и древесных материалов на станках с ЧПУ в условиях производства модельных комплектов для литейного производства, проведен анализ технологического обеспечения процесса фрезерования древесины с учетом анизотропии её свойств. Проведен анализ влияния режима резания, геометрических параметров инструмента и особенностей кинематики обработки материала концевыми фрезами на показатели процесса резания, точность обработки и качество обрабатываемой поверхности.

Многокоординатное фрезерование в процессах обработки изделий из древесины и древесных материалов применяется на предприятиях, имеющих собственные заготовительные производства, в числе которых важное место занимает литейное. Модели из древесины являются основой литейного производства. Модельная оснастка предназначена для формирования внутренних и внешних поверхностей отливки. Точность ее изготовления во многом определяет точность отливки. Важной задачей при производстве деревянных модельных комплектов является получение моделей со

сложнопрофильной поверхностью. Пример изделия с СПП показан на рисунке 1.



а)



б)

Рисунок 1. Общий вид изделия с СПП: а) гребной винт; б) номинальная геометрия лопасти

Номенклатура концевых фрез, выпускаемых производителями режущего инструмента Felisatti, Makita, Tideway, DJTOL и др., широка. Фрезы, используемые для обработки на станках с ЧПУ, имеют много конструктивных особенностей: различные углы наклона винтовых стружкоудалительных канавок, торцовые кромки, стружкоделительные канавки, различное число резцов, фасонный профиль и др.

В результате анализа разнообразных конструкций концевых фрез можно отметить, что практических рекомендаций по целевому применению для выполнения определенных операций и режимов обработки древесины не приводится. Следует обратить внимание, что требования к инструментальным наладкам и особенностям процесса резания древесины: стойкость инструмента, низкий уровень вибрации, сохранение прочности и геометрии лезвий при обеспечении требуемой точности, шероховатости и производительности обработки необходимо учитывать в процессе производства моделей из дерева. Во **второй** главе представлены разработанные математические модели процесса контурного фрезерования древесины и ДКМ КДФ.

Процесс резания древесины является нестационарным, что проявляется в переменности составляющих сил резания и является одним из основных источников колебаний в системе. Для решения задачи оценки силовых полей в процессе резания создана расчетная модель, которая описывает характер изменения составляющих сил резания в зависимости от конструкции инструмента, режимных параметров, вида обработки, схемы расположения зубьев, взаимного расположения заготовки и инструмента.

За основу построения расчетной модели составляющих сил резания принято, что расчет нагрузки на резцы фрезы в любой момент времени проводится путем разбиения ее рабочих режущих лезвий на дискретные

элементы вдоль оси фрезы (рисунок 2). Все режущие кромки инструмента разбивали на тонкие дискретные элементы вдоль оси фрезы. Параметры, характеризующие положение каждого такого элемента, обозначены на рисунках 2, 3: i - номер положения элемента вдоль оси фрезы (осевое положение элемента); j - номер углового положения элемента; k - номер зуба (резца) к которому относится элемент.

Номер осевого положения i может меняться от 1 до N_i , считая от торца фрезы, где N_i - число, на которое разбивается весь снимаемый припуск (ширина фрезерования T). Номер углового положения дискового элемента j меняется от 0 до 360 (соответствует полному обороту режущего элемента). Изменение параметра j в указанных пределах, позволяет имитировать вращение фрезы и отслеживать положение режущего элемента в любой момент времени за один оборот инструмента. Начало отсчета ($j=0$) принято от положительного направления оси OX , когда элемент, расположенный у торца первого резца пересекает ось OX .

Все математические действия по расчету сил резания КДФ, действующих на инструмент представлены в алгоритме расчета.

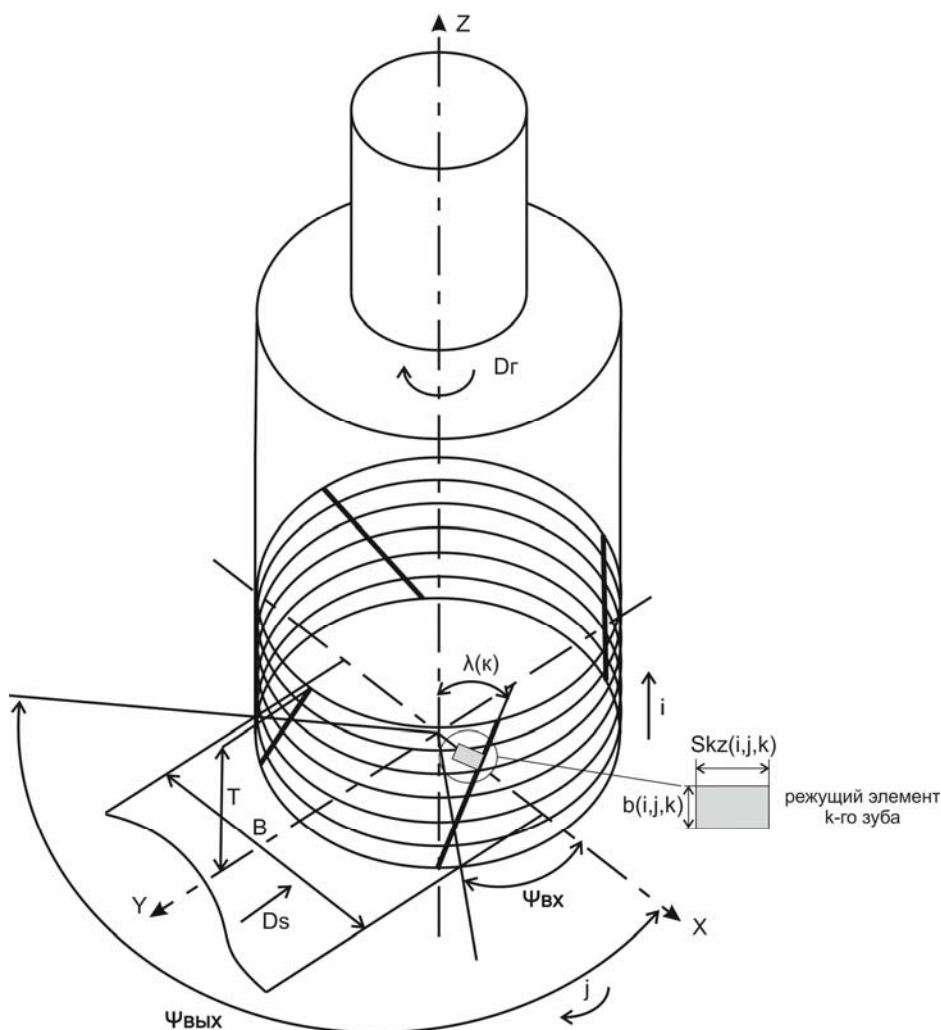


Рисунок 2 – Схема разбиения рабочей части лезвий КДФ на дискретные элементы

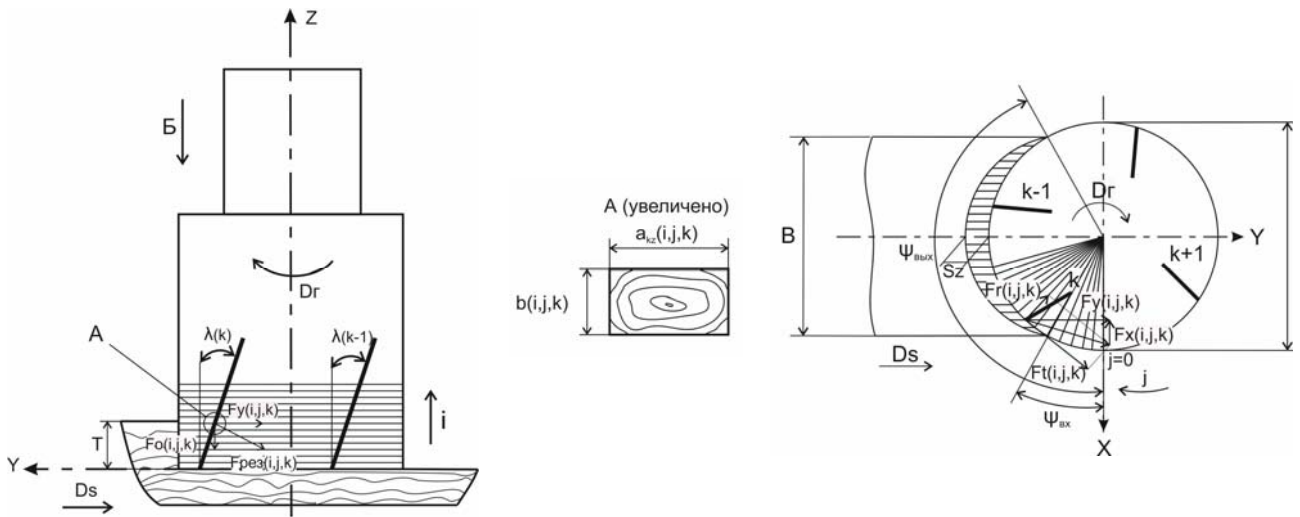


Рисунок 3 – Разбиение торцевой части КДФ (в проекциях)

Основное влияние на точность обработки в процессе резания древесины оказывают относительные колебания инструмента и изделия. От этих колебаний, в конечном счете, зависят стойкость инструмента и качество обработанной поверхности.

Для большинства упругих систем, совершающих интенсивные поперечные колебания, при анализе можно применять единую принципиальную схему, где доминирующая колебательная система представляет собой сплошной вал, нагруженный силами упругости, сопротивления и силами резания. Представим КДФ в виде такого вала и введем обозначения (рисунок 4):

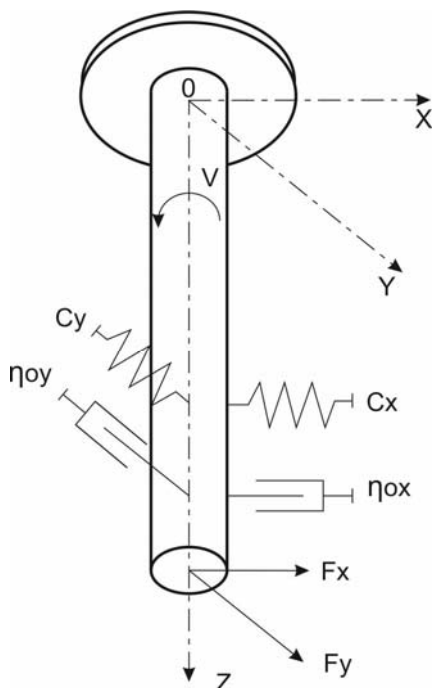


Рисунок 4 Принципиальная схема доминирующей колебательной системы при обработке древесины КДФ

C_x, C_y - коэффициенты жесткости обобщенного (эквивалентного) вала вдоль осей X и Y соответственно;

η_{ox}, η_{oy} - обобщенные коэффициенты сопротивления по соответствующим осям;

F_x, F_y – проекции силы резания на оси X и Y соответственно.

Обобщенным эквивалентным валом называем вал с усредненными геометрическими и упругими параметрами, движение которого характеризует движение реальной упругой системы.

Рассмотрим уравнение движения обобщенного эквивалентного вала, закрепленного консольно, с массой, приведенной к свободному концу, что соответствует принципиальной схеме концевой фрезы.

В общем виде колебания, совершаемые данной системой с учетом сил инерции, упругости, сопротивления и резания,

представлены системой уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} + \eta_{ox} \frac{dx(t)}{dt} + C_x x = F_x \\ m \frac{d^2y}{dt^2} + \eta_{oy} \frac{dy(t)}{dt} + C_y y = F_y \end{cases} \quad (1)$$

При реальной обработке на фрезе действует система сил, представляющая собой сумму проекций силы резания на i -м зубе и центробежной силы на координатные оси. Тогда система уравнений (1) может быть записана в виде:

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} + \eta_{ox} \frac{dx(t)}{dt} + C_x x = \sum_{i=1}^z F_{xi} - F_{цб} \sin(\omega t + \vartheta_0) \\ m \frac{d^2y}{dt^2} + \eta_{oy} \frac{dy(t)}{dt} + C_y y = \sum_{i=1}^z F_{yi} - F_{цб} \cos(\omega t + \vartheta_0) \end{cases} \quad (2)$$

Учитывая выражения для проекций сил F_{xi} , F_{yi} в виде $F_{xi} = F_{ti} \cos \omega t + F_{ri} \sin \omega t$, $F_{yi} = -F_{ti} \sin \omega t + F_{ri} \cos \omega t$ и для центробежной силы в виде, $F_{цб} = m\omega^2$, получим в развернутом виде систему уравнений, описывающих колебания концевой фрезы при фрезеровании древесины:

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} + \eta_{ox} \frac{dx(t)}{dt} + C_x x = \sum_{i=1}^z (F_{ti} \cos \omega t + F_{ri} \sin \omega t) - m\omega^2 \sin(\omega t + \vartheta_0) \\ m \frac{d^2y}{dt^2} + \eta_{oy} \frac{dy(t)}{dt} + C_y y = \sum_{i=1}^z (F_{ri} \cos \omega t - F_{ti} \sin \omega t) + m\omega^2 \cos(\omega t + \vartheta_0) \end{cases} \quad (3)$$

Одной из задач при проектировании и создании дереворежущего инструмента является контроль частот собственных резонансных колебаний. Для исключения влияния собственных колебаний КДФ на результат обработки частоты этих колебаний не должны совпадать или быть близкими к частотам вращения шпинделя, поэтому при подборе инструмента для различных режимов резания необходимо определить эти частоты.



Рисунок 5 Общий вид модели (а), сетка разбиения на конечные элементы (б) и вид закрепления модели (в)

Построение моделей двузубой и трехзубой концевых фрез и частотный анализ проводили в программе Solidworks. Общий вид модели двузубой фрезы, сетка конечных элементов и условие закрепления представлены на рисунке 5.

В результате моделирования определено, что в частотном диапазоне до 20 кГц находятся 8 частот собственных колебаний фрезы. Как показал анализ данных, наибольший вклад в общую энергию колебаний вносят две первые моды колебаний.

В третьей главе представлена методика проведения экспериментальных исследований.

Экспериментальная установка создана на базе обрабатывающего центра с ЧПУ BIESSE ROVER 20 с мощностью электршпинделя 6,6 кВт и частотой

вращения шпинделя до 24000 мин⁻¹.

Изготовлена партия из девяти экспериментальных КДФ одного типоразмера с различными конструктивно-геометрическими параметрами.

Параметры фрез: диаметр $d=16$ мм, длина рабочей части $l_p=60$ мм, материал – сталь Р6М5, твердость рабочей части 61..63 HRCэ, твердость хвостовика – 32..42 HRCэ, передний угол $\gamma=25^\circ$, задний угол $\alpha=10^\circ$, радиус скругления режущих кромок 0,01 мм.

Варьировались конструктивно-геометрические параметры фрез: угол наклона винтовой стружкоудаляющей канавки (0..45°), наличие стружкоделительных канавок, количество режущих элементов (2, 3), равномерность окружного шага режущих элементов. Расстояние между стружкоделительными канавками по оси для всех фрез составляло 5 мм, ширина канавки 2 мм, расположение канавок с чередованием в шахматном порядке. Для фрезы с неравномерным угловым шагом режущих элементов углы между ними составляли 110, 120, 130°. Общий вид экспериментальных фрез приведен на рисунке 6. Для проведения экспериментов все фрезы были закодированы и сведены в таблицу.

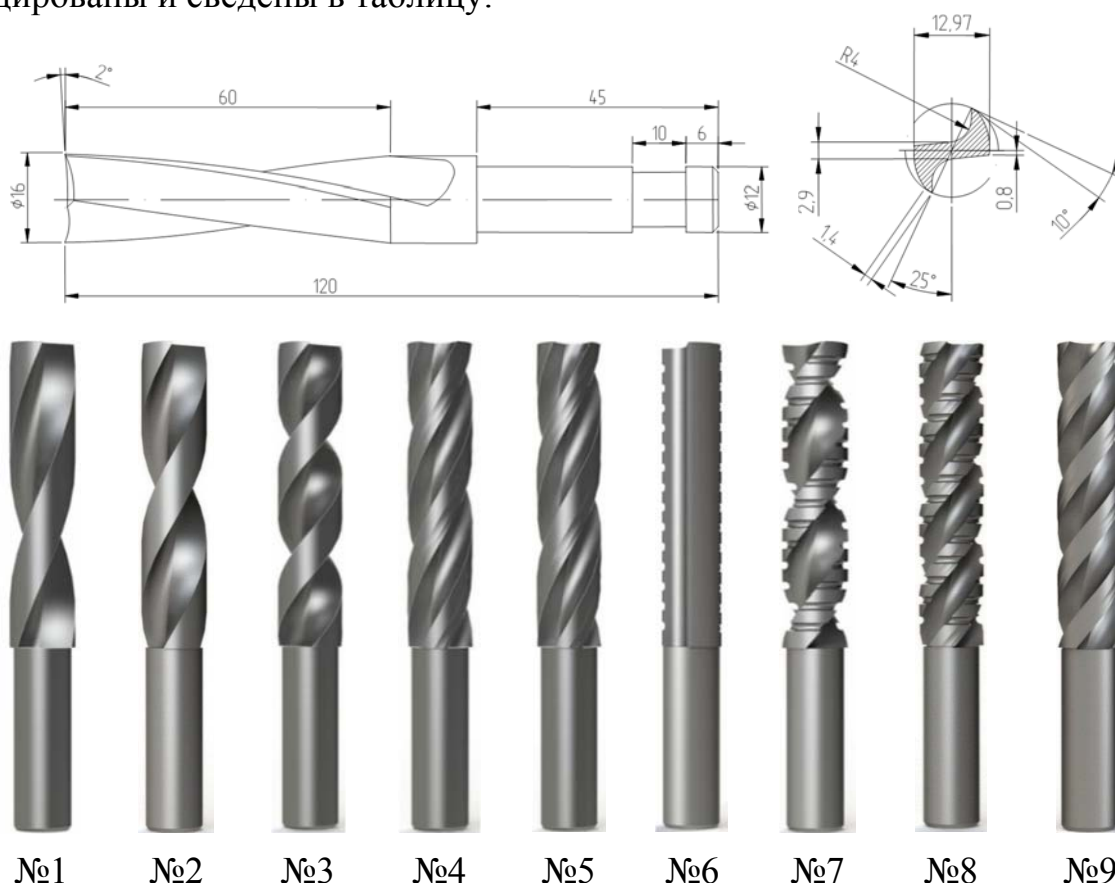


Рисунок 6 – Общий вид и базовые размеры экспериментальных фрез

Для исследования виброакустических характеристик процесса фрезерования применяли приборное обеспечение фирмы «Брюль и Кьер». Для измерения качества обработанной поверхности использовали профилометр Taylor-Hobson Surtronic 3. Все оборудование сертифицировано. Измерительный

тракт для анализа и записи акустических характеристик при фрезеровании древесины экспериментальными фрезами представлен на рисунке 7.

В качестве первичных преобразователей вибрации применяли трехкомпонентные акселерометры типа 4321, для согласования сигнала акселерометров с входами анализатора использовали предварительные усилители типа 2647А, сигнал с которых передавался на многоканальный анализатор сигналов Pulse 3560-С.

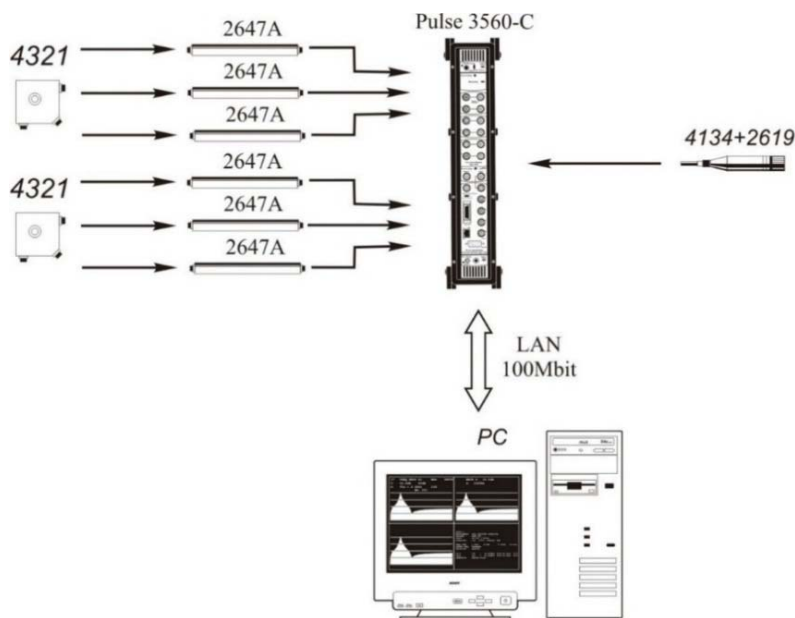


Рисунок 7 – Тракт измерения акустических характеристик

Для измерения, записи и обработки сигналов создали программу в среде программирования Pulse Lab Shop. Программное обеспечение позволяет контролировать временную реализацию сигналов, проводить частотный анализ сигнала в реальном масштабе времени, записывать его для дальнейшей обработки. Проводили узкополосный спектральный анализ уровней виброускорения в трех направлениях.

Частотный диапазон измерения вибрации составил 12000 Гц.

Для фрезерования экспериментальными концевыми фрезами были изготовлены заготовки из древесины сосны размерами 350×140×40 мм, влажность 6-8%.

Для учета анизотропных свойств древесины и исследования влияния направления подачи при фрезеровании относительно волокон древесины были изготовлены заготовки с направлением вдоль волокон и поперек волокон.

Для оценки влияния собственных частот инструмента на частотную характеристику процесса фрезерования провели измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) экспериментальных концевых фрез. Для этого фрезу устанавливали в шпинделе станка, на фрезу устанавливали миниатюрный акселерометр типа 4393, который подключали к анализатору через предварительный усилитель. Колебания концевой фрезы возбуждали ударами измерительным молотком типа 8202, который подключали к анализатору через предварительный усилитель. Схема измерительного тракта для определения АЧХ инструмента представлена на рисунке 8.

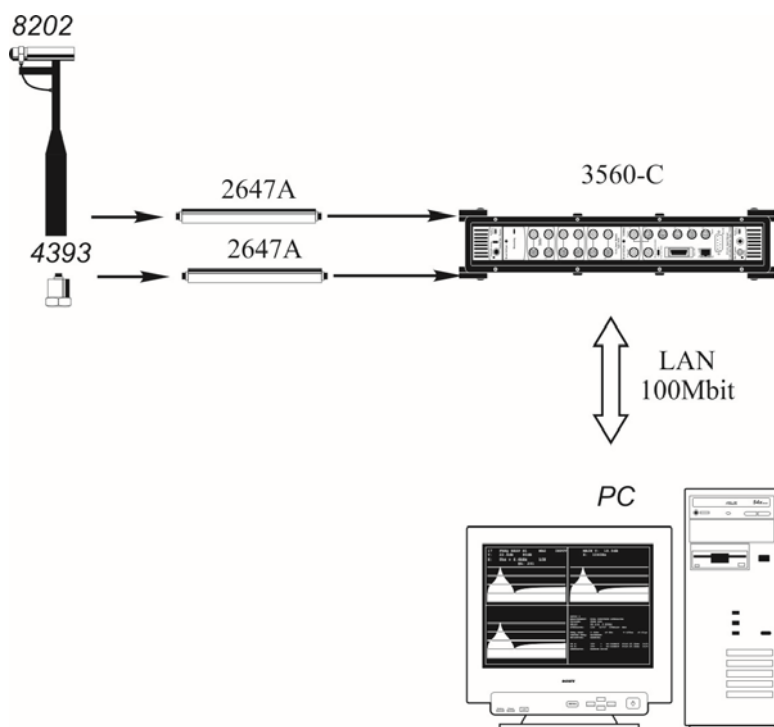


Рисунок 8 – Тракт измерения АЧХ экспериментальных концевых фрез

Для проведения экспериментов по фрезерованию выбран режим резания: подача $u = 1,6$ м/мин для 2-зубых фрез, $u = 2,4$ м/мин для 3-зубых фрез; подача на резец $u_z = 0,05$ мм/зуб; обороты $n = 16\ 000$ об/мин; глубина резания $t = 10$ мм; направление резания – 1) вдоль волокон, 2) поперек волокон

На указанном режиме исследовали влияние следующих факторов: угол наклона винтовых стружкоудаляющих канавок фрезы, количество режущих элементов, наличие стружкоделительных

канавок, неравномерность окружного шага режущих элементов.

В первом эксперименте провели исследование влияния угла наклона винтовых стружкоудаляющих канавок и количества режущих элементов фрезы. Принят план полного факторного эксперимента 2^3 .

Во втором эксперименте исследовали влияние угла наклона винтовых стружкоудаляющих канавок фрезы, были выбраны 3 фрезы с одинаковым количеством режущих элементов (двухзубые), равномерным окружным шагом режущих элементов и без стружкоделительных канавок. Угол наклона винтовых стружкоудаляющих канавок для фрез №№ 1,2,3 составлял $12, 30, 45^\circ$. Принят план однофакторного эксперимента.

В третьем эксперименте исследовали влияние равномерности окружного шага режущих элементов, были выбраны две трехзубые фрезы с углом наклона винтовых стружкоудаляющих канавок 30° , без стружкоделительных канавок. При этом у фрезы №5 шаг составлял 120° (равномерный), а у фрезы № 6 шаг был неравномерным и составлял $110, 120, 130^\circ$. Принят план однофакторного эксперимента.

В четвертом эксперименте исследовали влияние стружкоделительных канавок на процесс фрезерования, были выбраны две трехзубые фрезы с углом наклона винтовых стружкоудаляющих канавок 45° и равномерным окружным шагом режущих элементов. При этом у фрезы № 8 имелись шахматные стружкоделительные канавки, а у фрезы № 9 их не было. Принят план однофакторного эксперимента.

Для оценки значимости коэффициентов уравнений регрессии, проверки адекватности модели, а также для контроля стабильности и повторяемости

результатов измерений каждый эксперимент был повторен дважды для направлений подачи фрезы вдоль волокон и против волокон. Общее количество проведенных экспериментов составило 44.

Проводили фрезерование закрытых прямоугольных пазов глубиной 10 мм по всей длине заготовки, одной фрезой выполняли два прохода, всего на заготовке выполняли 4 прохода.

Измерения АЧХ фрез проводили в следующей последовательности. После сборки измерительного тракта фрезу устанавливали в шпинделе станка. Затем запускали цифровой магнитофон, и по фрезе наносили не менее десяти ударов. Данный алгоритм действий повторяли для каждой экспериментальной концевой фрезы. Для контроля качества полученной характеристики использовалась функция когерентности между сигналами возбуждения и отклика.

В качестве характеристики уровня вибрации при фрезеровании использовали СКЗ виброускорения, его общий уровень. Общий уровень СКЗ не зависит от ширины полосы фильтра при спектральном анализе, а только от частотного диапазона, в котором производили измерения.

В **четвертой** главе приведены результаты экспериментальных исследований. Исследование собственных частот концевых фрез показывает, что первая собственная частота колебаний каждой фрезы находится в диапазоне до 900 Гц. Анализ спектров вибрации показал, что преобладающими являются частоты врезания резцов фрезы, частота вращения шпинделя, их гармоники. При фрезеровании вдоль волокон наибольшая амплитуда колебаний наблюдается по оси Y, а при фрезеровании поперек волокон по оси X. Это связано с анизотропией древесины, а именно, с гораздо большим сопротивлением волокон при их перерезании под углом 90°. Анализ спектра виброускорения при работе инструмента на холостом ходу без врезания в заготовку показал, что уровень вибрации ничтожно мал и им можно пренебречь. В спектрах вибрации также отмечается наличие собственной частоты колебаний фрез, однако её амплитуда невелика и можно сделать вывод о том, что влияние собственной частоты фрез на СКЗ виброускорения не значительно.

Выполнена статистическая обработка результатов и получены уравнения регрессии, описывающие зависимость СКЗ виброускорения от различных конструктивно-геометрических параметров концевых фрез для трех осей колебаний.

$$D_x = 31,01 - 0,22\alpha - 2,22z - 0,063\varphi \quad (6)$$

$$D_y = -3,73 + 0,46\alpha + 11,92z + 0,127\varphi - 0,33\alpha z - 0,03z\varphi \quad (7)$$

$$D_z = 2,33 + 0,14\alpha + 5,28z - 0,12\alpha z \quad (8)$$

Где, α – угол наклона винтовых стружкоудаляющих канавок, z – количество режущих элементов фрезы, φ – угол направления подачи относительно волокон.

На рисунке 10 (а, б, в) представлены зависимости СКЗ виброускорения от конструктивно-геометрических параметров КДФ.

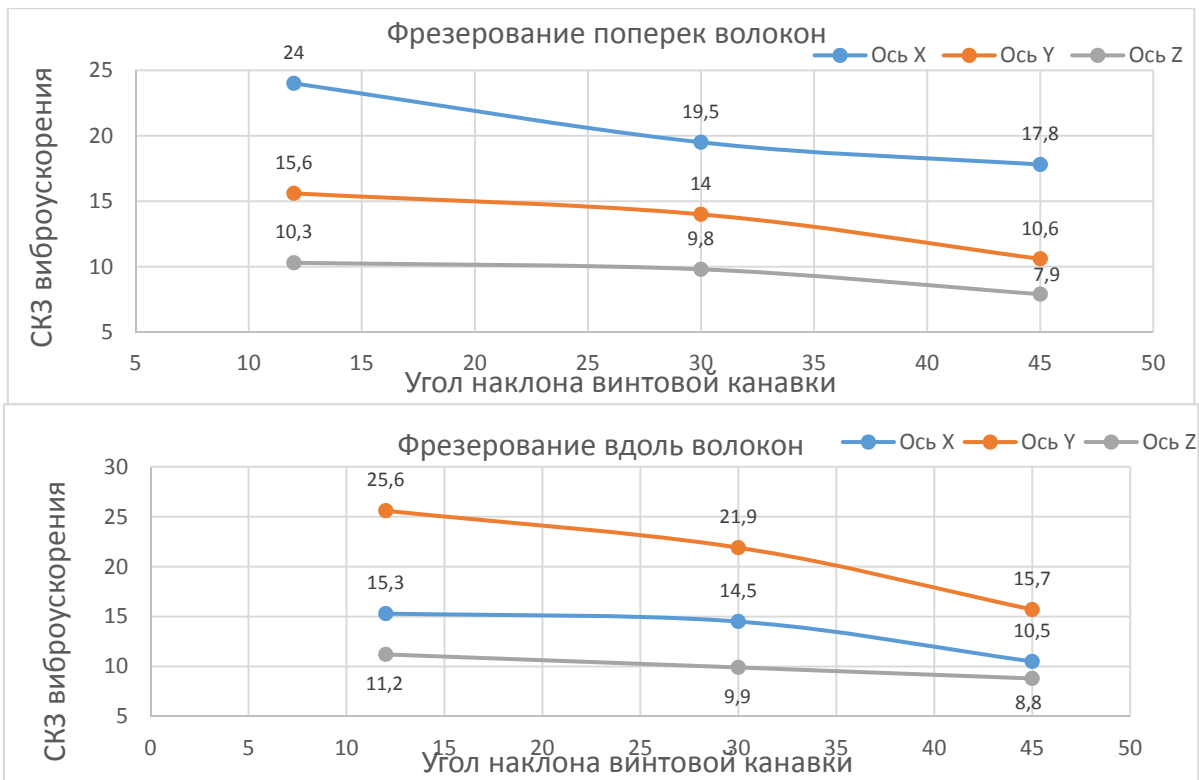


Рисунок 10 а) Графики зависимости СКЗ виброускорения от угла наклона винтовой стружкоудаляющей канавки фрезы.

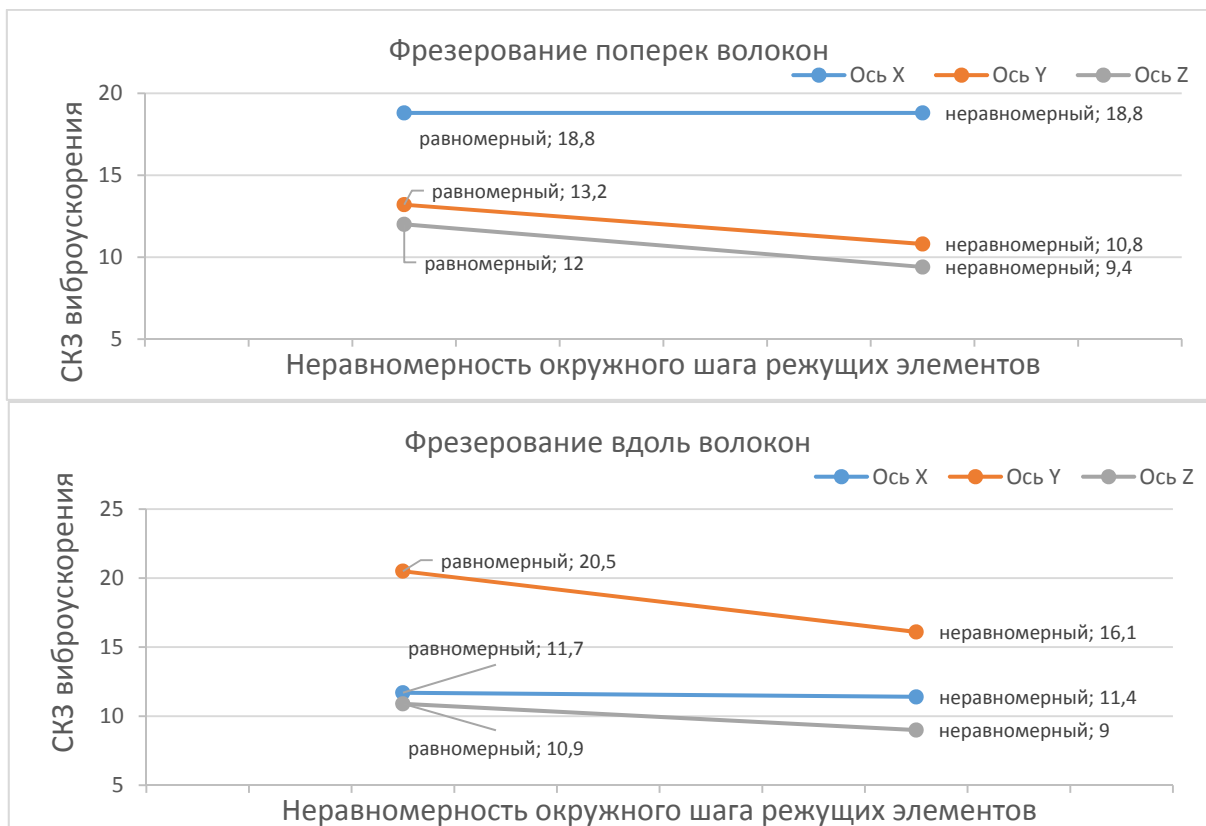


Рисунок 10 б) Результаты измерения СКЗ виброускорения для фрез с регулярным и нерегулярным окружным шагом режущих элементов.

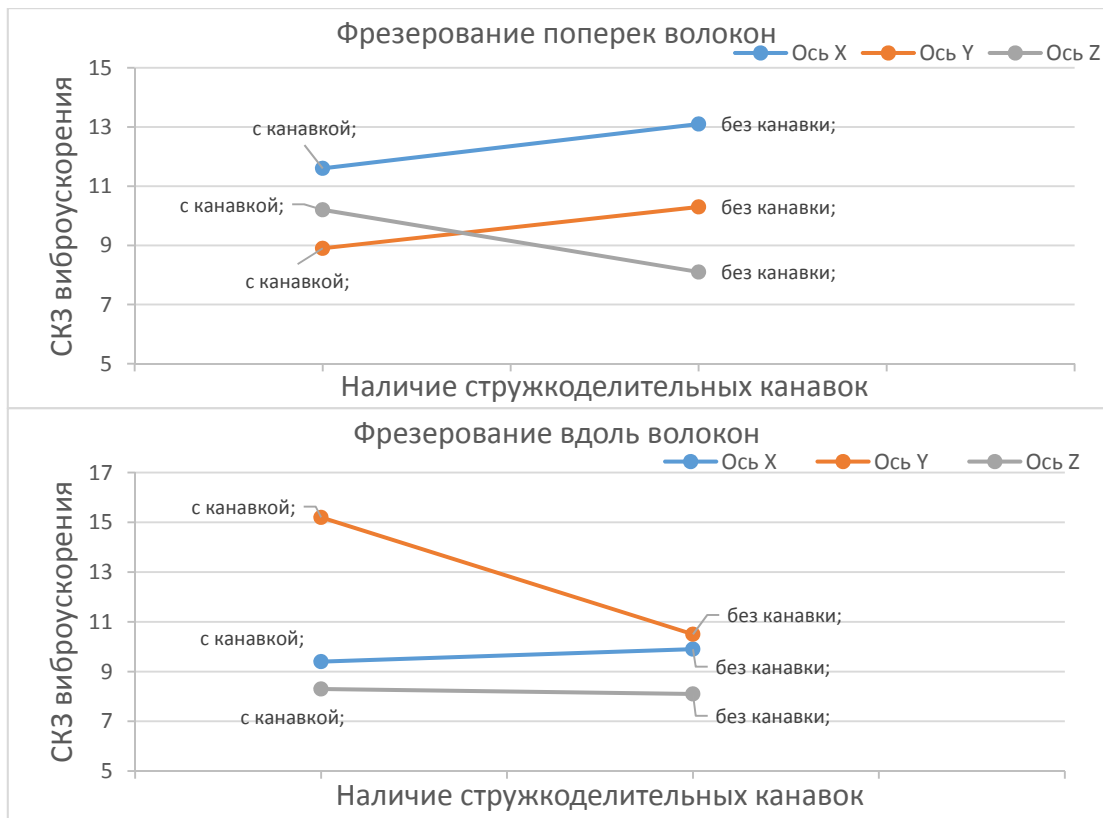


Рисунок 10 в) Результаты измерения СКЗ виброускорения для фрез со стружкоделительными канавками и без канавок.

Проведен анализ результатов измерения шероховатости поверхности и получены регрессионные взаимосвязи шероховатости обработанной поверхности от конструктивно-геометрических параметров инструмента.

$$Ra = 26,1 - 0,1\alpha - z - 0,05\varphi \quad (9)$$

Шероховатость поверхности снижается при увеличении угла наклона винтовой стружкоудаляющей канавки фрезы и увеличении количества режущих элементов. При фрезеровании в направлении поперек волокон древесины шероховатость выше, чем при фрезеровании вдоль волокон. Результаты экспериментов приведены на рисунке 11 (а, б, в)

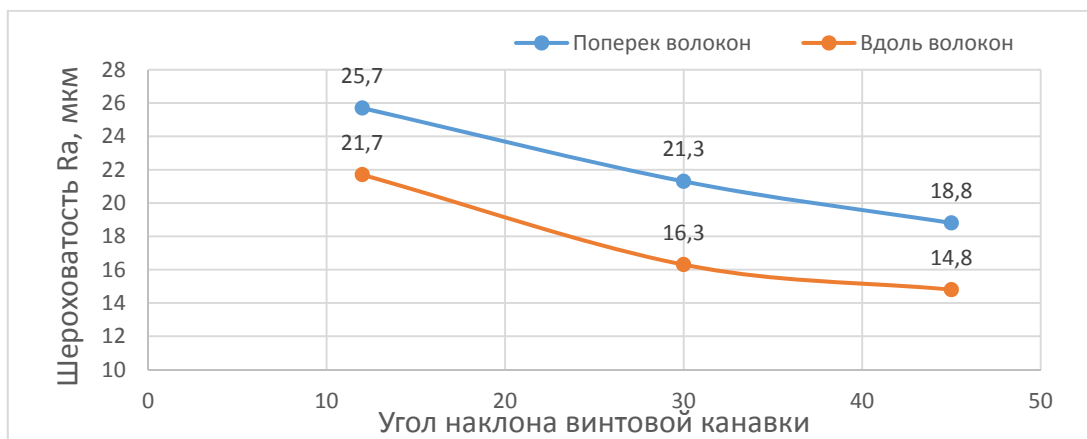


Рисунок 11 а) Зависимость шероховатости обработанной поверхности от угла наклона винтовой стружкоудаляющей канавки фрезы.

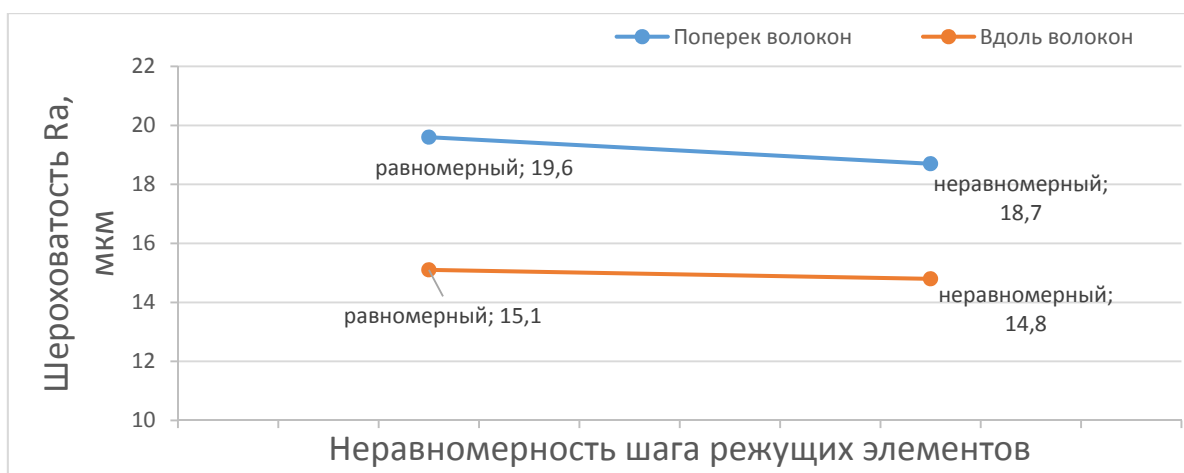


Рисунок 11 б) Зависимость шероховатости обработанной поверхности от неравномерности окружного шага режущих элементов фрезы.

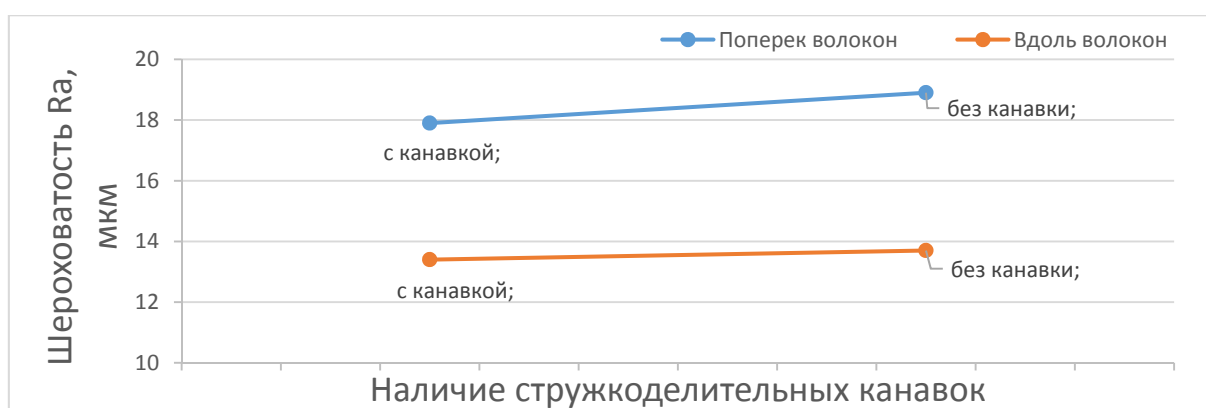


Рисунок 11 в) Зависимость шероховатости обработанной поверхности от стружкоделительных канавок.

В пятой главе представлены практические рекомендации по выбору конструктивно-геометрических параметров инструмента при проектировании и конструировании КДФ, обеспечивающие высокое качество обработанной поверхности и сниженные уровни вибрации в процессе контурного фрезерования древесины и древесно-композитных материалов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В результате выполненных исследований определено влияние конструктивно-геометрических параметров и вибрационных характеристик концевых дереворежущих фрез на качество обработки СПИ из древесины и ДКМ.
2. Разработана и научно обоснована математическая модель контурного фрезерования древесины концевыми фрезами, определяющая зависимость составляющих сил резания от режимных параметров обработки и конструктивно-геометрических параметров инструмента.
3. Разработаны трехмерные математические модели двузубой и трехзубой КДФ и определены собственные резонансные частоты и формы колебаний.
4. Установлено, что направление фрезерования относительно волокон древесины значительно влияет на уровни вибрации инструмента и на

- качество обработанной поверхности. Фрезерование поперек волокон увеличивает уровни вибрации по оси X на 25-40%, а фрезерование вдоль волокон увеличивает уровни вибрации по оси Y на 25-40%, уровни вибрации по оси Z остаются неизменными. Шероховатость обработанной поверхности древесины при фрезеровании вдоль волокон на 22-28% ниже, чем поперек волокон.
5. Доказано, что увеличение угла наклона винтовой канавки с 12° до 45° позволяет снизить уровни СКЗ виброускорения КДФ на 25-35% и уменьшить шероховатость обработанной поверхности на 27-32% независимо от направления фрезерования относительно волокон древесины.
 6. Установлено, что увеличение количества режущих элементов фрезы снижает уровни СКЗ виброускорения по осям X и Y на 5-20% и приводит к уменьшению шероховатости обработанной поверхности 3-8% независимо от направления фрезерования. Уровни вибрации по оси Z увеличиваются на 10-20%.
 7. Доказано, что неравномерность окружного шага режущих элементов инструмента снижает уровни СКЗ виброускорения по осям Y и Z на 20%, не влияет на уровни вибрации по оси X. Шероховатость обработанной поверхности снижается на 2-5% независимо от направления фрезерования.
 8. Выполнение стружкоделительных канавок на режущих элементах фрезы позволяет снизить уровни СКЗ виброускорения по оси X на 5-30%, при этом шероховатость обработанной поверхности снижается на 2-5% независимо от направления фрезерования;
 9. Проектно-конструкторским и производственным организациям рекомендовано:
 - Применять КДФ с тремя режущими элементами;
 - Выполнять винтовые стружкоудаляющие канавки с углами наклона в диапазоне 40-45°;
 - При разработке конструкции КДФ располагать резцы с неравномерным угловым окружным шагом 110,120,130°;
 - Режущие кромки стружкоотводящих каналов КДФ выполнять с чередованными в шахматном порядке стружкоделительными канавками.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

В изданиях по перечню ВАК, международных реферативных базах данных и систем цитирования Web of Science:

1. Черепанов С.А., Лужанский Д.А. Анализ уровня шума при высокоскоростном фрезеровании древесины. ИВУЗ. «Лесной журнал», 2015. №5 - С.146-153.
2. Черепанов С.А., Лужанский Д.А., Прокофьев Г.Ф. Исследование уровня вибраций и качества обработанной поверхности при высокоскоростном фрезеровании древесины. ИВУЗ. «Лесной журнал», 2015. №6. С.96-106.

3. 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. ИВУЗ. «Лесной журнал», 2019. №4 - С.146-158.

в международных реферативных базах данных и систем цитирования Web of Science:

4. Melekhov V.I., Kremleva L.V., Luzhansky D.A., Slutskov V.A., Tyurikova T.V. Influence of end woodcutters design on the vibration level and surface roughness. International Conference «Actual Issues of Mechanical Engineering». 2019. P. 314-318

в прочих изданиях:

5. Кремлева Л.В., Малыгин В.И., Лужанский Д.А. Сравнительный анализ конструкций цельных фрез для контурной обработки легкообрабатываемых материалов на станках с ЧПУ. Развитие северо-арктического региона: проблемы и решения: материалы научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова (21-25 марта 2016 г.). – Архангельск: САФУ, 2016. С. 1342-1345

6. Кремлева Л.В., Лужанский Д.А. Анализ уровня вибраций и качества обработанной поверхности при контурном фрезеровании древесины. Строительная наука XXI век: Сборник трудов VII международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения ученых СПбГАСУ (ЛИСИ) В.А. Лебедева, В.А. Трулля, Е.И. Светозаровой (28-30 июня 2016 г.). – Архангельск: ООО «Агентство рекламы РАД», 2016. – 387 с. С. 136-143

7. Лужанский Д.А., Кремлева Л.В. Особенности измерения виброакустических параметров высокоскоростного фрезерования древесины. Достижения и проблемы современной науки: материалы XIX международной научно-практической конференции (4 мая 2017 г.). – С-П: Научный журнал «Globus», 2017. – 112 с. С. 79-85

8. Кремлева Л.В., Слуцков В.А., Лужанский Д.А. Математическое моделирование силового поля при контурном фрезеровании конструкционных материалов на станках с ЧПУ. Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: Сборник научных статей II Всероссийской научной конференции с международным участием. В 2 ч. – Тольятти: 2019. С. 247-252

9. Слуцков В.А., Лужанский Д.А. Математическая модель сил резания при контурном фрезеровании конструкционных материалов. XLVII Ломоносовские чтения «Наследие М.В. Ломоносова и достижения современной науки» [Электронный ресурс]: сборник материалов региональной научно-практической конференции преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов, специалистов организаций и предприятий. 2019. С. 283-289. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_41269133_67381265.pdf.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с указанием фамилии, имени, отчества, почтового адреса, адреса электронной почты, наименования организации, должности лица, составившего отзыв, подписанные и заверенные печатью, просим направлять по адресу: 163002, Россия, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17, САФУ имени М. В. Ломоносова, диссертационный совет Д212.008.01., ученому секретарю.