

На правах рукописи

КРЕМЛЕВА ЛЮДМИЛА ВИКТРОВНА

**РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
И ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ПРИ ТОРЦОВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ**

Специальность 05.03.01

Процессы механической и физико-технической
обработки, станки и инструмент.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 1998

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана на кафедре МТ-2 и на кафедре "Проектирование подъемно-транспортного и технологического оборудования" Северодвинского филиала СПбГМТУ.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
А.Е. Древаль.

Научный консультант - доктор технических наук, профессор
В.И. Малыгин.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
В.А. Гречишников;
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Г.В. Боровский.

Ведущая организация - ПО «СЕВМАШПРЕДПРИЯТИЕ»

Защита диссертации

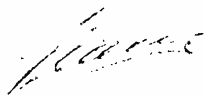
на 26 ноября 1998 г. на заседании
15.15 в Московском Государственном
Университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва,

для ознакомления в библиотеке МГТУ им.

в одном экземпляре, заверенный печатью
по указанному адресу.

октябрь 1998 г.

1560402



Васильев А.С.

98 г.

Заказ № 1111

типострофия МГТУ им. Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1360402

Актуальность работы. Торцовое фрезерование является широко распространенной технологической операцией обработки деталей машин, которая сопровождается нестационарными динамическими нагрузками. Эти нагрузки вызывают вибрации технологической системы (ТС), влияющие на качество продукции, точность обработки, стойкость инструмента. Особенности кинематики торцового фрезерования являются основной причиной его нестационарности. Динамические параметры при этом зависят от большого количества одновременно варьируемых факторов, среди которых важными являются параметры режима резачия, геометрические и конструктивные особенности режущего инструмента, схема обработки. В отечественной практике выполнены значительные и глубокие исследования динамических процессов, возникающих в металлорежущих станках, большей частью касающиеся токарной обработки. Работ по динамике процесса торцового фрезерования выполнено меньше, при этом преобладает экспериментальный подход, который дает большое количество частных решений и не позволяет на стадии проектирования технологической операции, станко-инструментальной оснастки и станков, сформулировать требования и ограничения на принимаемые конструктивные и технологические решения и целевым образом управлять параметрами режима обработки и построения технологической операции. Это определяет необходимость создания расчетных моделей динамических показателей процесса. Научная работа, направленная на создание математической модели динамики процесса торцового фрезерования, является актуальной, так как расчетные модели позволяют сформировать требования к конструкции режущего инструмента и к проектированию технологической операции, что обеспечит повышение производительности обработки при принятых технологических ограничениях.

Цель и задачи работы. Целью работы является создание динамической модели торцового фрезерования, как нестационарного процесса резания, для управления вибрациями при формировании исходных требований к конструкции режущего инструмента и к технологическим параметрам обработки

В соответствии с целью были определены следующие задачи исследования:

1. Выполнить схематизацию процесса торцового фрезерования.

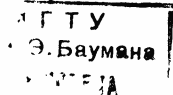
НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1560702

Кремлева Л.В. Разработка

1



2 Разработать алгоритм расчета и программы вычисления составляющих сил резания при торцовом фрезеровании, действующих на инструмент в процессе обработки в зависимости от схемы резания, режимных параметров и конструктивных особенностей инструмента.

3 Разработать алгоритм расчета и программы вычисления параметров вибраций при торцовом фрезеровании, позволяющие осуществлять анализ вибраций во временной и частотной областях.

4 Создать базу исходных математических зависимостей для расчета зависимости удельных сил резания от параметров режима обработки.

5 Проверить достоверность разработанной модели экспериментальным путем.

6 Разработать рекомендации по управлению амплитудно-частотными характеристиками процесса торцового фрезерования.

7. Апробировать разработанную расчетную модель при создании конструкций инструментов для конкретных деталей.

Методы исследования. Разработаны методики экспериментальных исследований процесса торцового фрезерования. Установлен состав экспериментальной и контрольно-измерительной техники для проведения исследований. Выбрана и обоснована среда программного и технического обеспечения разработанной расчетной модели. В исследовании использовались основные положения теорий обработки материалов резанием, колебаний, динамики станков, векторного анализа, численных методов расчета. Экспериментальный раздел работы выполнялся в лаборатории кафедры "Проектирование подъемно-транспортного и технологического оборудования" Севмашвуза. Проведение экспериментов и регистрация результатов исследования производились с использованием динамометра УДН1200, осциллографа С1-55, а также серийно выпускаемых комплектов виброизмерительной аппаратуры фирмы "Брюль и Кьер" на станке модели 6С12. Достоверность полученной модели установлена в ходе сравнения экспериментальных и расчетных данных.

Научная новизна заключается в обосновании и разработке комплексной математической модели, позволяющей оценивать силы резания и параметры вибраций при торцовом фрезеровании на стадии проектирования режущего инструмента и технологической операции для конкретных условий обработки.

Практическая ценность заключается в разработке программного обеспечения расчета сил резания и динамических параметров процесса торцового фрезерования, расчетной методике, позволяющей на этапе проектирования режущего инструмента и технологической операции формировать основные требования к конструкции инструмента и параметрам технологической операции, прогнозировать АЧХ процесса обработки.

Реализация результатов работы. С использованием методики расчета динамических параметров обработки сконструированы, изготовлены и внедрены в производство специальные инструменты для обработки торцов плавниковых труб. Результаты работы в виде программного комплекса и рекомендаций по работе с ним приняты для использования АО "Томский инструмент". Разработанный программный комплекс и измерительная аппаратура используются в учебном процессе на кафедре "Технология машиностроения" Северодвинского филиала Санкт-Петербургского Государственного Морского Технического Университета.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на заседаниях кафедры "Инструментальная техника и технологии" МГТУ им. Н.Э. Баумана и кафедры "Технология машиностроения" Северодвинского филиала СПбГМТУ, на II Всесоюзной НТК "Вибрации и вибродиагностика, проблемы стандартизации" (г. Горький, 1988), на межобластной НТК "Совершенствование конструкций и процессов изготовления режущего и измерительного инструментов и технологической оснастки" (г. Киров, 1988), IX, X НТК НТО им. А.Н. Крылова (г. Северодвинск 1987, 1989 гг.), научной конференции «Автоматизация в проектировании и производстве» (г. Северодвинск, 1998 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в пяти печатных работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 132 страницах текста и содержит 101 рисунок, 22 таблицы, список литературы из 70 наименований.

Автор выражает благодарность специалистам отдела главного акустика ПО "Севмашпредприятие" - к.т.н., доц. Горину С.И., инженеру Ашурову А.Е. за помощь при проведении экспериментов и анализе экспериментальных данных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен обзор и анализ научных работ в области динамики процессов резания, станков и режущего инструмента. В отечественной школе (работы Кудинова В.А., Бармина, Каширина А.И., Кучмы Л.К., Решетова Д.Н., Левиной З.М., Дроздова Н.А., Соколовского А.П., Эльясберга М.Е., Жаркова, Малкина Н.Я. и др.) выполнены обширные исследования, связанные с изучением условий возникновения вибраций ТС и методами борьбы с ними. Направление исследований носит разнообразный характер. Эти работы сформулировали основные подходы к изучению динамики станков при резании. Результаты анализа показывают, что реальный процесс резания, как совокупность процессов деформации, трения и разрушения, характеризуется наличием колебательных явлений. Эти явления проявляются в колебательном движении режущего инструмента и заготовки, в циклическом изменении силовой и тепловой нагрузок на режущую кромку, в формировании периодического профиля обработанной поверхности. Частоты и амплитуды этих колебаний зависят от конкретных условий резания и не всегда заметны по их внешнему проявлению. Тем не менее, колебания в процессе механической обработки существуют всегда. Принято различать низко- и среднечастотные колебания, близкие по частоте к значениям собственных частот парциальных систем станка и высокочастотные колебания. Выполнен анализ работ (Бармин Б.П., Жарков И.Г., Хагг Г.А. и др.) посвященных влиянию вибраций на стойкость и прочность режущего инструмента, на точность и качество обработанных поверхностей. Влияние это неоднозначно, но, в основном, отрицательно. Работы показывают, что знание природы вибраций при резании, их взаимосвязи с основными технологическими параметрами процесса резания в конечном итоге позволяют повысить выходные характеристики процесса обработки -производительность, точность, качество изделий.

Рассмотрены основные источники колебаний при резании. Все колебательные процессы, возникающие в ТС, можно разделить на две основные группы: не связанные с процессом резания и вызванные непосредственно процессом резания. К первой группе обычно относят вынужденные колебания, передаваемые станку через фундамент от соседних машин или станков, вызванные неуравновешенностью вращающихся частей станка, погрешностями зубчатых передач и др. Ко

второй группе относятся вынужденные колебания, вызываемые переменным сечением стружки, прерывистостью процесса резания, особенностями процесса стружкообразования, и автоколебания. Основными причинами автоколебаний принято считать ряд причин, среди которых следует отметить запаздывание сил по отношению к изменению сечения срезаемого слоя, влияние «следа», падающую характеристику силы резания от скорости и некоторые другие. Гипотезы, выявляющие основные причины возникновения автоколебаний при резании, подтверждены, в основном, для операции точения. При нестационарных видах обработки, каким является торцовое фрезерование, одним из важнейших источников возбуждения колебаний, обусловленных процессом резания, является его прерывистый характер, определяемый кинематикой формообразования. Анализ работ, посвященных процессу торцового фрезерования, показал, что при выработке рекомендаций к конструкции режущего инструмента и условиям его эксплуатации преобладает экспериментальный подход, основанный на эмпирических зависимостях показателей стойкости инструмента от его конструктивных особенностей и режимов резания. Данные часто противоречивы. Немногочисленные работы (Шустиков А.Д., Андреев В.Н., Малыгин В.И., Громаков Г.К. и др.), посвященные изучению связи конструктивных особенностей инструмента, схемы обработки и режимов резания с возникающими при торцовом фрезеровании вибрациями, носят также эмпирический характер, что сдерживает развитие исследований в этой области в связи с многофакторностью процесса. Следует отметить практическое отсутствие работ, посвященных исследованию динамики торцового фрезерования фрезами с неравномерным окружным шагом зубьев и ступенчатыми фрезами. Поэтому, с учетом влияния вибраций на стойкость инструмента и технологические показатели обработки, возникает необходимость создания обобщенной математической модели, которая учитывала бы схему резания, конструктивные особенности инструмента, параметры режима обработки при известных показателях эквивалентной упругой системы станка, позволяла рассчитывать параметры вибраций во временной и частотной областях. Исходя из результатов анализа сформулирована цель работы и поставлены основные задачи для ее достижения, представленные выше.

Вторая глава посвящена разработке динамической модели процесса торцового фрезерования. При построении модели сил резания

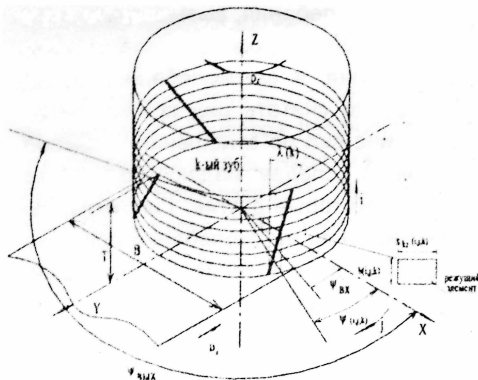


Рис. 1. Схема разбиения рабочих лезвий фрезы на дискретные элементы.

было произведено разбиение рабочих лезвий инструмента на дискретные режущие элементы (рис.1). Мгновенное положение элемента на дуге контакта определяется углом $\psi(i,j,k)$ относительно оси ОХ принятой системы координат, где i - номер положения элемента вдоль оси фрезы, j - номер углового положения элемента, k - номер зуба,

которому принадлежит дискретный элемент):

$$\psi(i,j,k) = [Q(j) - \sum_{m=1}^N Q(m)] - \{[(i-1) \times b(i,j,k) + b(i,j,k)/2] \times \operatorname{tg} \lambda(k)/R\}, \quad (1)$$

где: $Q(j) = j \times \Delta$ - текущее угловое положение элемента при $i=1, k=1$, Δ - дискретность расчета, N - количество зубьев фрезы, $b(i,j,k)$ - ширина элемента, R - радиус фрезы, $\lambda(k)$ - угол наклона режущей кромки k -го зуба. В выражении (1) первый член определяет положение торца k -го зуба в j -ом угловом положении, а второй характеризует угол поворота элемента вдоль режущей кромки k -го зуба, связанный с углом $\lambda(k)$. Угол $\psi(i,j,k)$ определялся в пределах угла контакта фрезы с заготовкой, зависящим от схемы обработки. Толщина среза на i,j,k -ом элементе с учетом величины подачи на зуб S_{zk} и величины радиального биения $\delta(k)$ на k -ом зубе определяется выражением:

$$a(i,j,k) = S_{za} \times \sin \psi(i,j,k) + \delta(k). \quad (2)$$

Для каждого значения угла $\psi(i,j,k)$ определялись элементарные толщина и ширина сечения среза, окружная $F_t(i,j,k)$, радиальная $F_r(i,j,k)$, и осевая $F_o(i,j,k)$ силы резания, действующие на дискретном элементе. Элементарные составляющие силу резания $F_t(i,j,k)$, $F_r(i,j,k)$, $F_o(i,j,k)$ приводились к ортогональной неподвижной системе координат XYZ, затем производилось суммирование всех элементарных сил в подвижной и неподвижной системах координат по всем элементам и всем

зубьям, в результате чего определялись полные мгновенные силы $F_x(j)$, $F_y(j)$, $F_z(j)$, $F_{x0}(j)$, $F_{y0}(j)$, $F_{z0}(j)$ в j -ом угловом положении. Рассчитанные значения ширины и толщины срезаемого слоя использовались в дальнейшем при расчете динамических характеристик процесса.

Динамическая модель процесса резания основана на предположении, что системы, непосредственно примыкающие к зоне резания, участвуют в общем относительном колебательном движении и представлена как эквивалентная двухмассовая система. Зона резания заменена действием сил резания. Автор исходит из положения, обоснованного проф. Кудиновым В.А., о замкнутости технологической системы при резании и наличии "следов" обработки вибраций от прохода зубьев. Основным источником возбуждения колебаний являются ударные нагрузки, возникающие от вхождения и выхода зубьев фрезы из зоны резания. Учтено влияние входа-выхода зуба на изменение площади сечения срезаемого слоя на зубьях, находящихся в резании. Принято, что перемещения в плоскости ОХУ изменяют толщину сечения срезаемого слоя, а в направлении ОZ - ширину. При построении модели приняты следующие допущения: линейность составляющих ТС к коэффициентам жесткости и демпфирования; система "режущий элемент - корпус" является абсолютно жесткой и фреза совершает движение в процессе колебания как единое целое. Модель описана системой уравнений:

$$\begin{cases}
 m_{X3} \cdot X1'' + \lambda_{X3} \cdot X1' + k_{X3} \cdot X1 = - \sum_{k=1}^N F_{Xk}; \\
 m_{Xu} \cdot X2'' + \lambda_{Xu} \cdot X2' + k_{Xu} \cdot X2 = \sum_{k=1}^N F_{Xk}; \\
 m_{Y3} \cdot Y1'' + \lambda_{Y3} \cdot Y1' + k_{Y3} \cdot Y1 = - \sum_{k=1}^N F_{Yk}; \\
 m_{Yu} \cdot Y2'' + \lambda_{Yu} \cdot Y2' + k_{Yu} \cdot Y2 = \sum_{k=1}^N F_{Yk}; \\
 m_{Z3} \cdot Z1'' + \lambda_{Z3} \cdot Z1' + k_{Z3} \cdot Z1 = \sum_{k=1}^N F_{Zk}; \\
 m_{Zu} \cdot Z2'' + \lambda_{Zu} \cdot Z2' + k_{Zu} \cdot Z2 = - \sum_{k=1}^N F_{Zk}; \\
 F_{Xk} = F_{ik}(t) \cdot \sin \psi_k(t) - F_{rk} \cdot \cos \psi_k(t); \\
 F_{Yk} = F_{ik}(t) \cdot \cos \psi_k(t) + F_{rk} \cdot \sin \psi_k(t); \\
 F_{ik} = k_i \cdot \bar{a}_k(t) \cdot \bar{b}_k(t); \\
 F_{rk} = k_r \cdot F_{ik}; \\
 F_{Zk} = k_O \cdot F_{ik}; \\
 \bar{a}_k(t) = a_k(t) + (X1 - X2)_{t-\tau_{k-1}} \cdot \cos \psi_k(t) + (Y1 - Y2)_{t-\tau_{k-1}} \cdot \sin \psi_k(t) - \\
 - (X1 - X2)_{t-\tau_{k-1}} \cdot \cos \psi_k(t) - (Y1 - Y2)_{t-\tau_{k-1}} \cdot \sin \psi_k(t); \\
 \bar{b}_k(t) = b(t) + (Z1 - Z2)_t.
 \end{cases} \quad (3)$$

где: $m_{x,y,z}$, $m_{x,y,z}$ - приведенные к зоне резания массы систем заготовки и инструмента в направлении соответствующих осей; $\lambda_{x,y,z}$, $\lambda_{x,y,z}$ - коэффициенты демпфирования систем заготовки и инструмента в направлении соответствующих осей; $k_{x,y,z}$, $k_{x,y,z}$ - коэффициенты жесткости систем заготовки и инструмента в направлении соответствующих осей; $X1, Y1, Z1$ - абсолютные виброперемещения системы заготовки; $X2, Y2, Z2$ - абсолютные виброперемещения системы инструмента; F_{xk}, F_{yk}, F_{zk} - составляющие силу резания по соответствующим направлениям на k -ом зубе; $F_{\tau k}, F_{rk}$ - тангенциальная и радиальная составляющие силу резания на k -ом зубе $a_k(t), b_k(t)$ - закон изменения толщины и ширины сечения срезаемого слоя на k -ом зубе, обусловленные настройкой технологической системы; k_n, k_r, k_o - эмпирические коэффициенты, характеризующие обрабатываемый материал; $\bar{a}_k(t), \bar{b}_k(t)$ - истинный закон изменения толщины и ширины сечения срезаемого слоя на k -ом зубе, обусловленный динамическим взаимодействием элементов технологической системы, $\psi_k(t)$ - текущее угловое положение k -го зуба на дуге резания. Индексы t и $t-\tau_{k-1}$ соответствуют тому, что координаты X, Y и Z для рассматриваемых систем берутся соответственно либо в текущий момент времени t , либо в момент $t-\tau_{k-1}$ (τ_k - время запаздывания k -го зуба, зависящее от углового шага и угловой скорости вращения фрезы). В каждый момент времени производился перерасчет изменения площади сечения срезаемого слоя в результате взаимных деформаций взаимодействующих подсистем. Данные, определяющие закон изменения толщины и ширины сечения срезаемого слоя на k -ом зубе $a_k(t), b_k(t)$, обусловленные настройкой технологической системы, рассчитывались по методике определения составляющих силу резания. Решение системы уравнений (3) осуществлено методом Рунге-Кутты. Выходными данными являлись: относительные и абсолютные виброперемещения, виброскорости систем заготовки и инструмента, составляющие силу резания, вычисленные в предположении, что система является абсолютно жесткой и с учетом деформаций, прирост длины траектории относительного движения в результате вибрационного процесса ΔL :

$$\Delta L = \sum_{i=1}^M \sqrt{(X1_i - X2_i)^2 + (Y1_i - Y2_i)^2 + (Z1_i - Z2_i)^2},$$

где M - количество рассчитанных значений координат за заданный период времени. С целью качественного сравнения различных схем об

работки предусмотрен анализ во временной (в функции угла поворота фрезы) и в частотной областях. Для анализа колебательного процесса в частотной области была реализована стандартная процедура дискретного преобразования Фурье на основе быстрых алгоритмов (БПФ). На основе построенных моделей были разработаны алгоритмы расчета и программы, реализующие эти алгоритмы.

В третьей главе экспериментальным путем определены коэффициенты статической жесткости, демпфирования и приведенные массы систем для станка модели 6С12. Определение коэффициентов жесткости осуществлялось путем линеаризации участка ветви нагрузочной ветви графиков нагрузка-разгрузка для соответствующих систем. Приведенные массы и коэффициенты сопротивления определялись расчетным путем по экспериментально определенным частотам собственных колебаний систем, логарифмическим декрементам, коэффициентам жесткости. Собственные частоты систем и логарифмические декременты определялись с помощью виброизмерительной аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер». Результаты определения характеристик системы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Напр.	$k, \text{Н/мм}$	$f, \text{Гц}$	$m_{np}, \text{Нс}^2/\text{м}$	δ	$\lambda \cdot 10^3 \text{ Нс/м}$
ОХ инст.	$3,48 \cdot 10^7$	210	20	0,34	2,856
ОZ инст.	$5,28 \cdot 10^7$	190	37,1	0,36	5,075
ОХ загот.	$12,7 \cdot 10^7$	95	356	0,43	27,8
ОZ загот.	$13,4 \cdot 10^7$	85	470	0,52	40,73

Эмпирические коэффициенты сил резания k_t , k_r , k_o определялись при торцовом фрезеровании фрезой по ТУ 2-035-618-78, оснащенной твердым сплавом КНТ-16SNEA-150410R($\varphi=85^\circ$, $\lambda=-8^\circ$, $\gamma_o=-11^\circ$, $\gamma_R=-8^\circ$, $\alpha=12^\circ$, $z=8$, $D=125\text{мм}$) по планам однофакторных экспериментов с помощью УДМ1200 в режиме однозубого фрезерования. Коэффициенты определялись для трех сталей: 20, 20Х13, 12Х18Н10Т. В качестве варьируемых параметров использовалась глубина резания t и подача на зуб S_z . Коэффициент удельной силы резания k_t для торцового фрезерования принят в виде:

$$k_t = \frac{C}{a^\alpha \times b^\beta},$$

где: C, α, β -коэффициенты, определяемые экспериментально, a, b -толщина и ширина сечения срезаемого слоя. Коэффициенты, опреде-

ляющие радиальную F_r и осевую F_o , составляющие, приняты пропорциональными окружной составляющей. Обработка экспериментальных данных производилась с помощью методов математической статистики.

Численный эксперимент был направлен на выявление различных особенностей процесса торцового фрезерования в зависимости от режимных параметров t , S_z , ширины фрезерования B , величины смещения заготовки относительно фрезы e , числа зубьев z , угла наклона режущей кромки λ , величины радиальных биений на зубьях δ , влияния неравномерного шага зубьев на параметры вибраций. Анализ производился во временной и частотной областях. Примеры полученных расчетных зависимостей представлены на рис.2, 3.

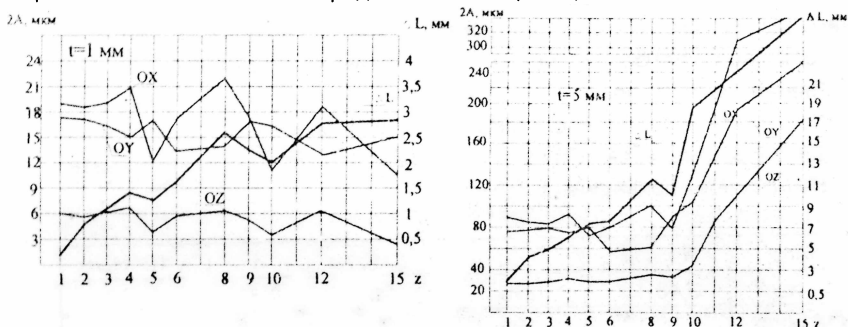


Рис.2. Влияние числа зубьев на размах колебаний (система инструмента) и прирост длины траектории движения ΔL , сталь 20, $D=200$ мм, $B=120$ мм, $S_z=0,2$ мм/зуб, $\lambda = 8^\circ$, $\varphi=90^\circ$, симметричное фрезерование, радиальные биения на режущих кромках равны 0.

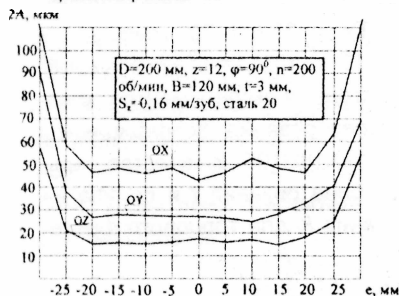


Рис.3. Влияние величины смещения e заготовки относительно фрезы на размах колебаний (система инструмента): $e<0$ — смещение в сторону входа зуба в заготовку, $e>0$ — смещение в сторону выхода, $e=0$ — симметричное фрезерование.

Численный эксперимент позволил установить наличие устойчивых и неустойчивых режимов при торцовом фрезеровании. Устойчивые режимы характеризуются преобладанием в спектре частот вреза-

ния зубьев в заготовку. Неустойчивые режимы характеризуются достаточно большими амплитудами и преимущественным преобладанием в частотном спектре частот, близких к собственной частоте системы инструмента. Увеличение глубины резания для просчитанных вариантов ведет практически к пропорциональному росту размаха колебаний. Увеличение подачи для стали 20 ведет к росту амплитуды колебаний, но в меньшей степени, чем изменение глубины резания. Для сталей 20Х13 и 12Х18Н10Т в случае подачи 0,05 мм/зуб при $t=2$ мм поведение ТС неустойчиво. Получена немонотонная зависимость величины размаха колебаний от подачи для стали 12Х18Н10Т. Характер динамического поведения ТС при увеличении числа зубьев и отношения B/D определяется прежде всего глубиной резания. Зависимости при этом немонотонны, что объясняется изменением коэффициента неравномерности фрезерования с изменением этих параметров. Смещение заготовки относительно фрезы также немонотонно влияет на размах колебаний. Для конкретных режимов обработки (t , S_z) будет существовать определенный предел величины смещения, при превышении которого поведение ТС может стать неустойчивым. Проведено моделирование процесса торцового фрезерования фрезами с неравномерным окружным шагом зубьев для различных вариантов расположения зубьев по торцу фрезы для двух сталей (20 и 20Х13). Установлено, что неравномерный окружной шаг оказывает значительное влияние на снижение размаха колебаний при неустойчивых режимах (сталь 20Х13) из-за уменьшения влияния «следа» от прохода зубьев. Величина снижения определяется характером распределения углового зубьев. Для стали 20 снижения уровня вибраций при варьировании величины окружного шага зубьев не происходило.

В четвертой главе проведена экспериментальная проверка достоверности расчетной динамической модели опытами с резанием. Разработана методика проведения испытаний, подобрана экспериментальная аппаратура и оборудование. Установлены методы обработки результатов эксперимента. Исследовалось влияние глубины, подачи, числа зубьев и схемы установки заготовки относительно фрезы на виброперемещение систем заготовки и инструмента. Выполнены однофакторные эксперименты. Проверка результатов численного моделирования осуществлялась на вертикально-фрезерном станке модели 6С12, соответствующем нормам точности и жесткости в соответствии требованиям ГОСТ 17734-88Е. В экспериментах использованы фрезы в

соответствии с ТУ 2-035-618-78, оснащенные твердым сплавом КНТ-16 SNEA-150410R ($\varphi=85^\circ$, $\lambda=-6^\circ$, $\gamma_0=-11^\circ$, $\gamma_R=-8^\circ$, $\alpha=12^\circ$, $z=8$, $D=125\text{мм}$). Измерения осуществлялись отдельно для заготовки и инструмента по контактной и бесконтактной схемам измерения. Измерительный тракт при контактной схеме измерения состоял из регистрирующей и измерительной аппаратуры фирмы "Брюль и Кьер", составляющих стандартный комплект виброизмерительной аппаратуры (акселерометры модели 4370, измерительный магнитофон модели 7005, анализатор спектра модели 2034, графический цифровой регистратор модели 2313). При установившемся процессе фрезерования производилась запись сигнала в направлении осей ОХ и ОZ. Записанный сигнал в виброускорениях подвергался частотному анализу с помощью цифрового анализатора модели 2034, осуществляющему частотный анализ в цифровой форме на основе БПФ. В результате строился усредненный по линейному закону спектр колебаний в ускорениях. Сравнивались максимальные составляющие реальных спектров в диапазоне 60-300 Гц с максимальными составляющими расчетных спектров.

В качестве первичного преобразователя при определении колебаний вращающегося шпинделя использовалась оптоэлектронная пара. Специально изготовленный оптодатчик был предварительно тарирован. Для качественной оценки влияния изменяемых параметров процесса резания на размах колебаний в случае изменения глубины резания $2A_r$ и подачи $2A_s$, полученные по результатам однофакторных экспериментов выходные данные процесса представлялись в виде степенных зависимостей:

$$2A_s = C_s S_z^k \text{ и } 2A_r = C_r f^f,$$

Значения коэффициентов и показателей степени представлены в табл.5.

Таблица 5

Обрабатываемый материал		C_r	f	C_s	k
Сталь 20	Расчет.	18.089	0.915	128,163	0,72
	Экспер.	22.985	0,879	129,092	0,639
20X13	Расчет	39,175	1,052	173,913	0,512
	Экспер.	55,411	1,018	272,8	0,59
12X18H10T	Расчет	44,501	1,347	-	-
	Экспер.	65,802	1,089	302,983	0,636

Количественная оценка достоверности разработанной модели производилась путем нахождения относительной погрешности размаха колебаний для системы инструмента. Средняя величина составила 13,3-37%. Просматривается тенденция увеличения относительной погрешности с ростом вязкости стали. Проведено численное сравнение спектров колебаний заготовки, полученных расчетным и экспериментальным путем. При этом сравнивались значения частот и амплитуд вибраций заготовки в зависимости от режимных параметров числа зубьев, и способа установки заготовки относительно фрезы. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало наличие корреляции спектральных характеристик при резании с расчетными результатами. Коэффициент корреляции при этом составил 0,79-0,99. Это позволило сделать вывод о том, что разработанная динамическая модель вполне приемлема для описания динамических процессов, происходящих при торцовом фрезеровании. В качестве примера на рис. 4 представлены в сравнении расчетные и экспериментальные

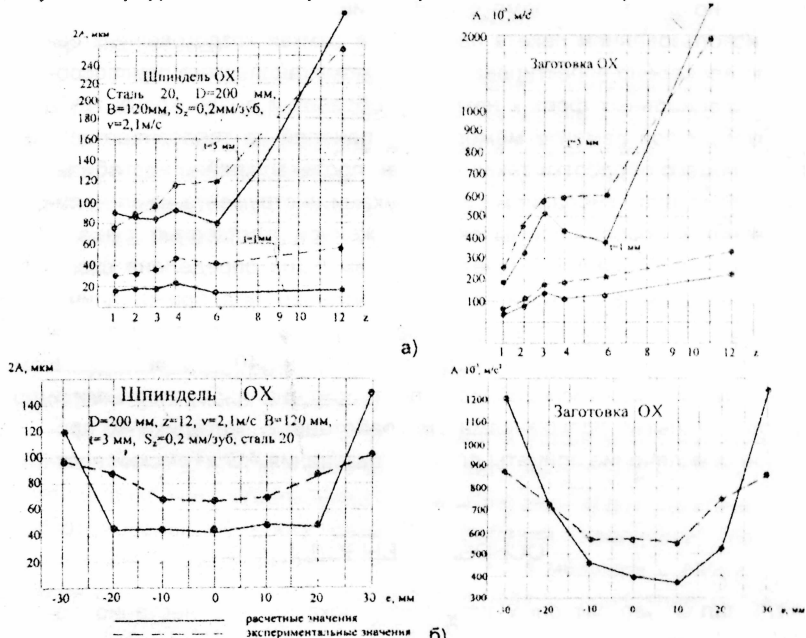


Рис.4. Сравнение расчетных и экспериментальных данных: а) влияние числа зубьев; б) влияние величины смещения e на динамические параметры: $2A$ -размах колебаний шпинделя, A -максимальная составляющая спектра колебаний (заготовка, направление ОХ).

данные.

Пятая глава В данном разделе описан разработанный программный комплекс MASH@CUT, включающий в себя основные расчетные модули, файлы аппаратной поддержки, обработки расчетных данных и др. Программный комплекс имеет развитый графический интерфейс, справочную систему. Разработано руководство пользователя с общими рекомендациями по обработке и анализу рассчитанных параметров. Ориентированный на рядовых пользователей, программный комплекс позволяет выполнять расчет режущей части торцовых фрез, позволяющий рассчитывать составляющие сил резания для конкретных условий обработки, минимизировать амплитуды вибраций в рассматриваемом частотном диапазоне путем варьирования количества и расположения числа зубьев по торцу фрезы, выбора углов λ , подбора необходимого числа ступеней и распределения припуска между ними, введения ограничения на величины биений режущих кромок, а также оценить влияние параметров режима резания, расположения заготовки относительно фрезы на параметры вибраций.

С использованием пакета программ в рамках хозяйственных работ было проведено проектирование пневмомеханического приспособления и специальных фрез к нему для обработки плавниковых труб, используемых при ремонте мембранных панелей на теплоэнергоцентралях. Процесс обработки таких деталей протекал крайне нестабильно, сопровождался вибрациями и поломками инструмента из-за наличия плавников (ребер-перемычек), пониженной жесткостью существующего приспособления. Расчетным путем была определена схема резания, ожидаемые нагрузки на приспособление, подобрано количество зубьев, угол наклона режущих лезвий, что позволило снизить уровень вибраций в процессе обработки примерно на 40 %. Фрезы были изготовлены, их работоспособность подтверждена лабораторными и производственными испытаниями. Разработанные методики и программное обеспечение приняты для использования АО «Томский инструмент».

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ литературных источников показал, что нестационарность торцового фрезерования, обусловленная его кинематикой, является важным источником возбуждения вибраций ТС, которые оказыва-

ют влияние на стойкость инструмента и технологические показатели обработки. Создание расчетной динамической модели торцового фрезерования с учетом его многофакторности является актуальным.

2. Обоснована и разработана динамическая модель торцового фрезерования, базирующаяся на кинематике процесса резания в предположении абсолютной жесткости элементов ТС и полученная посредством схематизации, заключающейся в следующем: режущие лезвия инструмента разбиваются на дискретные элементы, положение которых определяется тремя координатами в пространстве, машинным способом имитируется вращение фрезы с заданной дискретностью, в принятые интервалы времени для каждого элемента устанавливаются параметры срезаемого слоя и соответствующие составляющие силу резания, в автоматизированном режиме производится их суммирование относительно принятой системы координат.

3. Общая динамическая модель торцового фрезерования основана на корректировке мгновенных значений параметров срезаемого слоя, обусловленных податливостью элементов ТС с учетом «следа» от прохода зубьев.

4. Разработан математический аппарат, описывающий процесс колебаний при торцовом фрезеровании, на основе которого построены алгоритмы расчета параметров вибраций и создан комплекс программ, реализующих эти алгоритмы. Особенностью разработанной модели является возможность расчета динамических параметров обработки фрезами с неравномерным окружным шагом зубьев и ступенчатыми фрезами.

5. Для исследования процесса торцового фрезерования методами численного эксперимента были определены эмпирические зависимости удельных сил резания для сталей 20, 20Х13, 12Х18Н10Т в зависимости от режимных параметров.

6. Методами численного эксперимента установлено наличие устойчивых и неустойчивых режимов, амплитудный спектр которых качественно различен. Увеличение глубины резания ведет практически к пропорциональному росту размаха колебаний. Увеличение подачи также ведет к росту размаха колебаний, но в меньшей степени. Для сталей 20Х13 и 12Х18Н10Т при «малой» подаче поведение ТС неустойчиво. Путем варьирования числа зубьев, отношения B/D , величины смещения заготовки относительно фрезы, получены немонотонные зависимости размаха колебаний от этих параметров. Характер этого

2

влияния определяется глубиной резания. Теоретически установлено, что неравномерный окружной шаг зубьев приводит к снижению вибраций при неустойчивых режимах.

7. Экспериментальная проверка расчетной модели выполнена при различных режимах и схемах фрезерования. Показано наличие устойчивой корреляции спектральных характеристик при резании с расчетными значениями.

8. На базе расчетных программ разработан программный комплекс и руководство пользователя с рекомендациями для моделирования технологической операции торцового фрезерования, позволяющий путем варьирования различных параметров обработки и конструктивных особенностей инструмента минимизировать амплитуды сил резания и параметры вибраций.

9. С использованием программного комплекса выполнено проектирование специального инструмента для обработки плавниковых труб. Проведенные лабораторные и производственные испытания выявили стабильную работоспособность инструмента.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Малыгин В.И., Кремлева Л.В., Мюллер О.Д. Динамическая модель сборных фрез // Вибрация и вибродиагностика, проблемы стандартизации: Тез. докл. II Всесоюзной научн.-техн. конф. - Горький, 1988. - С.94-95.

2. Малыгин В.И., Кремлева Л.В. Оптимизация конструкций сборных фрез // Вибрация и вибродиагностика: Тез. докл. научн.-техн. конф. - Киров, 1988. - С.20-21.

3. Малыгин В.И., Кремлева Л.В. Динамическая модель процесса фрезерования // Вопросы технологии, эффективности производства и надежности: Научн.-техн. сб. - Северодвинск, 1995, - №13. - С. 55-60.

4. Подураев В.Н., Малыгин В.И., Кремлева Л.В. Динамическая модель элементов технологической системы с учетом кинематической неустойчивости процесса резания // Вестник машиностроения. - 1996. - №6. - С. 18-23.

5. Кремлева Л.В. Разработка динамической модели торцового фрезерования // Информационные технологии в проектировании и производстве: Тез. докл. научн.-техн. конф. - Северодвинск, 1998. - С.36-41.