

На правах рукописи

КИСЕЛЕВ ИГОРЬ АЛЕКСЕЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ  
ТОНКОСТЕННЫХ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Специальность

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО  
Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Воронов Сергей Александрович**

Официальные оппоненты: **Пановко Григорий Яковлевич**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБУН Институт машиноведения им.  
А.А. Благонравова РАН,  
зав. лабораторией вибромеханики.

**Крахин Олег Иванович**  
доктор технических наук, профессор  
Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский  
университет), каф. «Конструирование  
антенно-фидерных систем радиотехнических  
информационных комплексов», профессор.

Ведущая организация: Филиал «Научно-исследовательский институт  
технологии и организации производства двигателей»  
ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют».

Защита диссертации состоится 19 июня 2013 г. в 14 часов 00 мин.  
на заседании Диссертационного совета Д 212.125.05 при Московском  
авиационном институте (национальном исследовательском университете) по  
адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского  
авиационного института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2013 г.

Учёный секретарь  
Диссертационного совета

Г.В. Федотенков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы.

В современном машиностроении при производстве деталей со сложным профилем поверхности и высокими требованиями к ее точности в течение последнего десятилетия все чаще применяют технологию многокоординатного фрезерования при помощи специализированных металлообрабатывающих центров с программным управлением. Такой подход позволяет получить сложный профиль поверхности детали за один установ с высокой точностью и хорошей повторяемостью. Однако при обработке тонкостенных сложнопрофильных деталей, таких как лопатки газотурбинных двигателей, из-за прерывистого характера процесса фрезерования в системе *инструмент-деталь* неизбежно возбуждаются вибрации, которые могут оказывать негативное влияние на качество поверхности и точность обработанной детали. Возникающие вибрации, как правило, имеют вынужденный или автоколебательный характер, вызванный возбуждением при резании поверхности, образованной во время предыдущего прохода режущей кромки инструмента (регенеративный *механизм возбуждения*). Второй тип вибраций является наиболее опасным с точки зрения ухудшения качества обработанной детали. Характер динамического поведения системы зависит от режимов обработки, таких как скорость подачи, скорость вращения инструмента, глубина фрезерования, кинематические параметры инструмента, и существенно влияет на качество обработки. Поэтому выбор режимов 5-координатного фрезерования сложнопрофильных податливых деталей требует особого, тщательного подхода, учитывающего динамическое поведение системы фрез-деталь и ее комплексный, нелинейный характер, в том числе механизм запаздывания. Все вышесказанное определяет необходимость разработки математической модели динамики процесса фрезерования.

Описание характерных особенностей динамики процесса обработки резанием и существующих подходов к его моделированию связаны в первую очередь с именами таких ученых как: И.С. Амосов, Н.А. Дроздов, А.И. Каширин, В.А. Кудинов, А.П. Соколовский, И. Глустый, Y. Altintas, E. Budak, G. Stepan, T. Insperger, S.A. Tobias. В этих исследованиях были выявлены основные механизмы возбуждения автоколебаний при резании, получены дифференциальные уравнения, включающие функции с запаздывающим аргументом, и исследована устойчивость движения системы. Обобщение этих подходов на случай пространственной (5-координатной) обработки выполнено с применением алгоритмов геометрического моделирования в работах следующих авторов: В.К. Fussel, I. Lazoglu, E. Budak, K. Weinert, T. Surmann, P. Kersting. Несмотря на то, что описанные подходы позволяют моделировать динамику процесса фрезерования, каждый из них имеет недостатки: либо не учитывается изменение динамических характеристик заготовки по мере снятия материала, либо алгоритм геометрического моделирования содержит в себе возможность возникновения существенных погрешностей, или непригоден для моделирования обработки сложнопрофильных деталей, либо исследуется

только устойчивость процесса обработки и при этом не может быть рассчитана амплитуда вибраций и величина сил резания из-за нелинейности системы.

Таким образом, в настоящее время отсутствуют методики и соответствующие программные средства, позволяющие выполнять комплексное имитационное моделирование динамики процесса 5-ти координатного фрезерования податливых тонкостенных деталей и выбирать рациональные режимы обработки на основе результатов моделирования. Эти обстоятельства определили актуальность исследования динамики 5-координатного фрезерования сложнопрофильных податливых деталей с учетом перечисленных недостатков существующих моделей.

Целью работы является:

разработка математической модели, алгоритма и программы для анализа динамики процесса пространственного фрезерования сложнопрофильных податливых деталей, позволяющей повысить качество поверхности и производительность обработки.

Основные результаты, представляющие научную новизну и выносимые на защиту:

– разработана математическая модель динамики процесса пространственного фрезерования сложнопрофильных податливых деталей, учитывающая нелинейность динамической системы, эффект запаздывания и изменение динамических характеристик заготовки в процессе обработки на основе метода конечных элементов;

– разработан алгоритм и программное обеспечение для анализа динамики процесса пространственного фрезерования сложнопрофильных податливых деталей, которое позволяет выбирать рациональные режимы обработки по критерию качества поверхности и производительности технологического процесса за счет проведения многовариантных расчетов при изменении технологических параметров;

– разработана новая расчетно-экспериментальная методика определения коэффициентов модели сил резания, применимая для моделирования динамики обработки различными типами режущих инструментов со сложной геометрией режущей кромки;

– разработана методика перестроения конечно-элементной модели заготовки по мере снятия материала, позволяющая учитывать изменение ее динамических характеристик в процессе обработки;

– разработана новая универсальная методика геометрического моделирования процессов обработки резанием, применимая для 5-координатного фрезерования и других процессов обработки резанием при использовании различных типов инструментов с пространственной криволинейной геометрией режущей кромки;

Практическая значимость работы.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные методики и программное обеспечение позволяют на стадии проектирования технологического процесса 5-координатного фрезерования назначать режимы с учётом динамики процесса обработки податливых сложнопрофильных деталей.

Использование разработанных расчетных методик позволяет за счет выбора рационального режима обработки снизить уровень вибраций и добиться высокой производительности при заданном качестве обработанной детали.

Реализация результатов работы.

- Материалы исследований, содержащиеся в работе, используются для подготовки инженеров по специальности «Динамика и прочность машин» при выполнении курсовых и дипломных проектов.

- Разработанная методика выбора рациональных режимов обработки на основе численного моделирования динамики 5-координатного фрезерования внедрена в филиале НИИД ФГУП «НПЦ газотурбостроения «САЛЮТ».

- Разработанный алгоритм расчета собственных частот в сочетании с методом суперэлементов внедрен в виде составной части программного комплекса UZOR 1.0 в ИРМТ НИЦ «Курчатовский институт»

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Достоверность научных положений и выводов, сформулированных автором, вытекает из обоснованности используемых теоретических подходов, подтверждается решением тестовых примеров и их сравнением с результатами экспериментальных исследований.

Апробация работы. В ходе выполнения диссертационной работы результаты исследования докладывались и обсуждались:

- на научных семинарах кафедры прикладной механики МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2010-2013 гг.;

- на научно-технической конференции, посвященной 25-летию факультета «Робототехника и комплексная автоматизация» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2012 г.;

- на XXIII Международной инновационно-ориентированной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, ИМАШ РАН, Москва, 2011 г.;

- на 5-ой международной научно-технической конференции «Проблемы механики современных машин», Улан-Удэ, 2012 г.;

- на международной научно-технической конференции: 1<sup>st</sup> Joint International Conference on Multibody System Dynamics, Finland, 2010 г.;

- на международной научно-технической конференции: ASME 2011 International Design Engineering Technical Conference & Computer and Information in Engineering Conference IDETC/CIE, USA, 2011 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 5 в печатных изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из четырех глав, введения, заключения и списка литературы и содержит 243 страницы основного текста, 129 рисунков, 11 таблиц, библиографию из 114 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследования, научная новизна и практическая ценность работы, приведено краткое содержание работы по главам.

**В первой главе** систематизированы известные исследования, посвященные моделированию динамики процесса фрезерования.

Процесс фрезерования сопровождается периодическим действием сил резания при проходе режущих кромок через тело детали, что неизбежно приводит к возбуждению вибраций инструмента и обрабатываемой детали. При этом, как было установлено, силы резания пропорциональны мгновенным значениям толщины срезаемого слоя. В тоже время, вибрации инструмента и детали оказывают влияние на формирование обработанной поверхности и, следовательно, влияют на толщину срезаемого слоя и величину сил резания, действующих при проходе следующей режущей кромки. Таким образом, силы резания зависят от истории формирования обрабатываемой поверхности, что вносит в динамическую систему эффект запаздывания [И.С. Амосов, J. Plusty]. При определенных параметрах движение такой системы может стать неустойчивым, что приведет к существенному повышению уровня вибраций и снижению качества обработки. Для исследования данного эффекта были построены различные модели динамики процесса фрезерования. Наиболее простыми являются одноточечные модели, которые применимы к прямозубым цилиндрическим фрезам. В данном случае режущая кромка вырождается в точку и задачу можно рассматривать в двумерной постановке. В большом количестве статей принимается упрощенная схема динамической модели, имеющая по 2 степени свободы для детали и инструмента в плоскости перпендикулярной оси фрезы [В. Капшунов, Y. Altintas, E. Budak]. С учетом ряда допущений такая модель позволяет сформулировать аналитическое выражение для толщины срезаемого слоя с учетом запаздывания. Далее, с использованием модели сил резания, удастся записать систему дифференциальных уравнений движения системы с запаздыванием. При помощи методов теории устойчивости для такой системы можно построить зоны неустойчивых режимов в зависимости от технологических параметров в линейной постановке. В ряде работ предложены усовершенствования, позволяющие учесть часть нелинейных эффектов [S. Tobias, F. Ismail, S. Merdol], в том числе при помощи использования алгоритмов геометрического моделирования для сохранения истории формирования обрабатываемой поверхности [А. Гуськов, С. Воронов, M. Campomanes, Y. Altintas]. Для фрез с более сложной геометрией режущих кромок применяют многоточечные модели, идея которых заключается в разбиении фрез на диски малой толщины, для каждого из которых моделирование проводится при помощи одноточечных моделей [Y. Altintas, B. Balachandran, P. Lee].

Как показывает обзор литературных источников, в общем случае при 5-координатном фрезеровании не удастся сформулировать аналитическое выражение для определения толщины срезаемого слоя. Геометрические модели, построенные

на основе совокупности моделей одноточечного резания, также сталкиваются с непреодолимыми трудностями из-за того, что направление подачи ориентировано произвольным образом по отношению к оси инструмента и нормали к обрабатываемой поверхности. Поэтому в литературе для моделирования процесса пространственного фрезерования в основном используется три подхода к геометрическому моделированию: метод Z-буфера [R. Anderson, B. Fussel], метод октарного дерева [D. Meagher] и метод конструктивной твердотельной геометрии [H. Voelcker, A. Spence, K. Weinert]. У каждого метода есть свои преимущества и недостатки, в данной работе будет предложена модификация метода Z-буфера.

Для моделирования поведения обрабатываемой детали в литературе применяются различные подходы, связанные с методом конечных элементов (МКЭ). В первом варианте МКЭ используют для определения передаточных функций детали в отдельных точках, а анализ динамики фрезерования в их окрестности проводят традиционными методами, на базе одноточечных моделей [Y. Altintas, U. Bravo, D. Montgomery]. Во втором варианте при помощи МКЭ определяют статическое отжатие детали при помощи итерационного алгоритма, без учета динамики процесса обработки [S. Ratchev, S. Liu]. Третий подход является наиболее современным и позволяет моделировать динамику 5-координатной обработки за счет одновременного совместного использования трехмерной геометрической модели процесса резания и модели динамики детали, построенной на базе МКЭ [K. Weinert, P. Kersting, T. Surmann, Ph. Lorong].

В заключительной части 1 главы рассмотрена существующая методика подготовки технологического процесса обработки сложнопрофильных податливых деталей (например, лопаток газотурбинных двигателей). Предложены варианты использования математического моделирования динамики фрезерования для коррекции режимов обработки с целью повышения производительности и качества детали, а также уменьшения числа отладочных операций, связанных с изготовлением пробных деталей.

Анализ опубликованных работ показал, что отсутствуют комплексные подходы к исследованию динамики фрезерования, объединяющие в себе все необходимые составляющие для обеспечения выбора рациональных режимов на основе моделирования динамики обработки и свободные от перечисленных недостатков.

В связи с изложенным выше, в работе сформулированы следующие задачи исследования:

(а) разработать модель динамики обрабатываемой детали на основе метода конечных элементов. При этом является целесообразной разработка алгоритма, пригодного для коррекции КЭ моделей обрабатываемой детали сложной формы по мере снятия припуска.

(б) разработать модель инструмента с учетом пространственной геометрии режущих кромок;

(в) разработать геометрическую модель формирования поверхности детали в процессе резания, позволяющей вычислять размеры срезаемого слоя для случая пространственного фрезерования;

(г) разработать эффективное программное обеспечение, реализующее общий цикл интегрирования уравнений движения системы по времени и объединяющее в себе модели (а)-(в);

(д) разработать расчетно-экспериментальную методику определения коэффициентов модели сил резания;

(е) провести экспериментальную проверку моделирования динамики процесса фрезерования при помощи предлагаемой методики;

(ж) разработать методику выбора рациональных режимов обработки на основе результатов многовариантного моделирования динамики фрезерования в заданном диапазоне изменения технологических параметров.

Для обеспечения решения поставленных задач, наряду с программированием расчетных алгоритмов на языке Си, автор использует систему MATLAB для вывода графической информации, программное обеспечение ParaView для отображения результатов геометрического моделирования, Ansys 12 – для верификации разработанного блока моделирования динамики обрабатываемой детали и для генерации первоначальной конечно-элементной сетки. При проведении экспериментальных исследований применялось оборудование National Instruments, Kistler, Global Test и авторские программы для обработки результатов измерений в среде LabView 8.2.

Во второй главе представлена структура комплексной модели динамики процесса фрезерования тонкостенных податливых деталей, состоящей из следующих основных блоков: конечно-элементной модели заготовки, трехмерного алгоритма геометрического моделирования процесса резания, феноменологической модели сил резания и модели режущего инструмента. Блок-схема модели приведена в тексте диссертации. Движение фрезы и детали описывает система неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{M}_{mc} \ddot{\mathbf{V}}(t) + \mathbf{C}_{mc} \dot{\mathbf{V}}(t) + \mathbf{K}_{mc} \mathbf{V}(t) = \\ \quad = \mathbf{F}[P_m, H_{mc}, G, \mathbf{V}(t), \mathbf{W}(t), \mathbf{V}(t-T), \mathbf{W}(t-T)] \\ \mathbf{M}_d \ddot{\mathbf{W}}(t) + \mathbf{C}_d \dot{\mathbf{W}}(t) + \mathbf{K}_d \mathbf{W}(t) = \\ \quad = -\mathbf{F}[P_m, H_{mc}, G, \mathbf{V}(t), \mathbf{W}(t), \mathbf{V}(t-T), \mathbf{W}(t-T)] \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $\mathbf{V}(t)$  - вектор перемещений по степеням свободы фрезы в системе координат, ось которой совпадает с осью инструмент. Вращение инструмента происходит относительно выбранной системы координат, которая осуществляет перемещения и повороты в соответствии с движением подачи инструмента, включающим как линейные перемещения его центра, так и повороты оси.

$\mathbf{W}(t)$  - вектор перемещений по степеням свободы детали в системе координат, связанной с деталью;

$\mathbf{M}_{mc}$ ,  $\mathbf{C}_{mc}$ ,  $\mathbf{K}_{mc}$  - матрицы масс, демпфирования и жесткости, описывающие модель фрезы;

$\mathbf{M}_d$ ,  $\mathbf{C}_d$ ,  $\mathbf{K}_d$  - матрицы масс, демпфирования и жесткости, описывающие модель детали;

$\mathbf{F}[P_m, H_{mc}, G, \mathbf{V}(t), \mathbf{W}(t), \mathbf{V}(t-T), \mathbf{W}(t-T)]$  - вектор сил резания, действующий на фрезу со стороны детали и зависящий от параметров обрабатываемого материала ( $P_m$ ), маршрута, режима обработки и движения подачи ( $H_m$ ), геометрии фрезы и поверхности ( $G$ ), а также перемещений фрезы и детали в текущий момент времени ( $\mathbf{V}(t), \mathbf{W}(t)$ ) и в момент времени с запаздыванием ( $\mathbf{V}(t-T), \mathbf{W}(t-T)$ ). Величина запаздывания  $T$  переменная.

На шаге по времени блоки модели осуществляют взаимодействие по схеме, представленной на рисунке 1. При этом из-за нелинейного характера задачи на каждом шаге по времени применяется итерационной процедура уточнения сил резания, описание которой приводится в тексте диссертации.

Модель фрезы (геометрическая модель фрезы) представляет собой дискретную модель криволинейных режущих кромок (рисунок 2). При этом в точках дискретизации при помощи алгоритма геометрического моделирования вычисляется толщина срезаемого слоя, а для элементов режущих кромок определяются усилия резания. Равнодействующие сил резания приводятся к системе координат фрезы и обрабатываемой детали. С точки зрения динамики в данной работе модель фрезы рассматривается в упрощенной постановке: принимается, что фреза может совершать движение по двум взаимно перпендикулярным направлениям в плоскости, перпендикулярной оси фрезы.

Для моделирования динамики обрабатываемой детали применяется метод конечных элементов: определяются собственные частоты и формы колебаний детали, которые затем используются для моделирования движения обрабатываемой детали методом разложения по собственным формам, что позволяет существенно сократить вычислительные затраты. В ряде случаев модель детали должна быть настроена при помощи экспериментального модального анализа. Особенностью математической модели динамики детали в данной работе является алгоритм (представлен в тексте диссертации) коррекции конечно-элементной сетки по мере снятия материала. Коррекция сетки и повторный расчет динамических характеристик детали проводится периодически, по мере движения инструмента вдоль маршрута обработки.

Описание поверхности в алгоритме геометрического моделирования осуществляется на основе модифицированного метода буфера глубины (Z-буфера). Традиционная технология многоуровневого Z-буфера заключается в следующем: выбирается направление проецирования, перпендикулярно направлению проецирования выбирается плоскость проецирования, на нее наносят регулярную сетку ячеек проецирования, из центров которых проводят лучи параллельно направлению проецирования и ищут их пересечения с поверхностью детали. В рамках каждой ячейки уровень поверхности задается найденной точкой пересечения и считается постоянным.

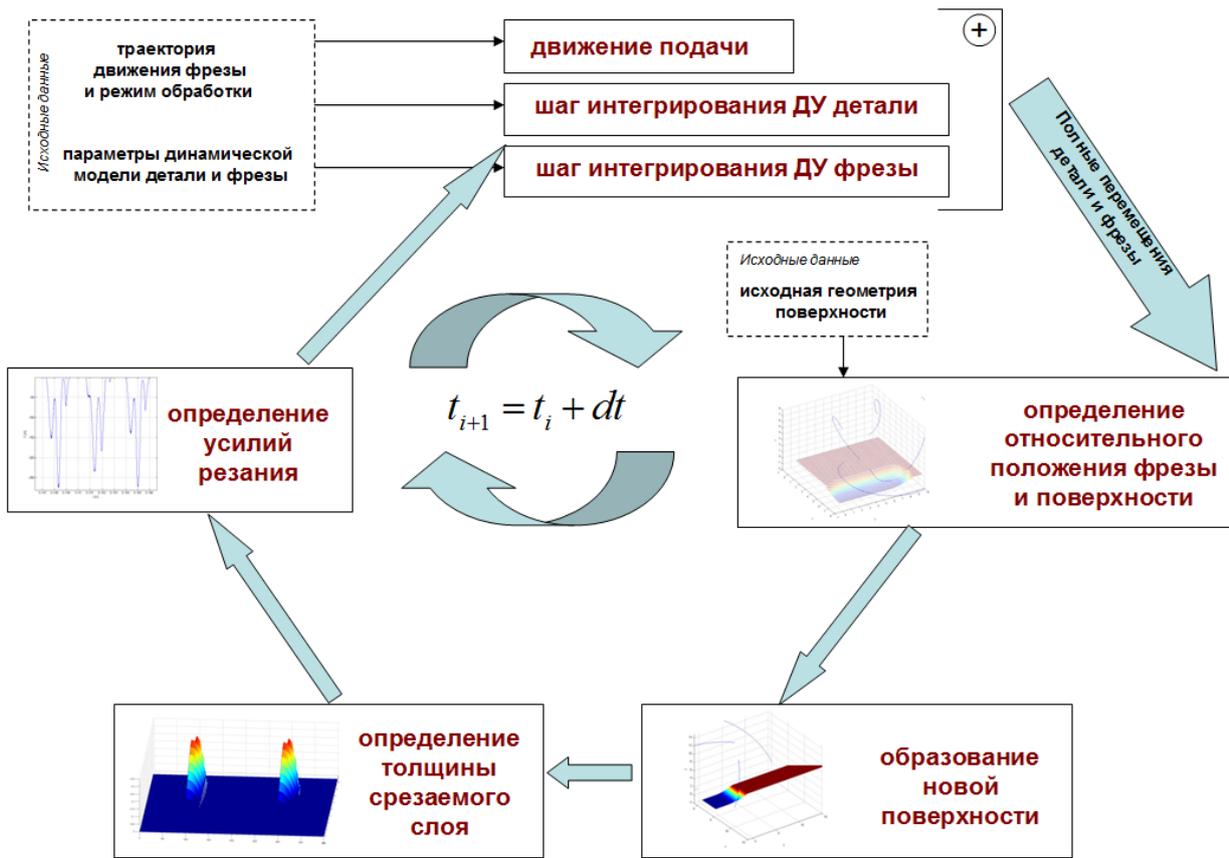


Рис. 1. Взаимодействие блоков модели на шаге по времени

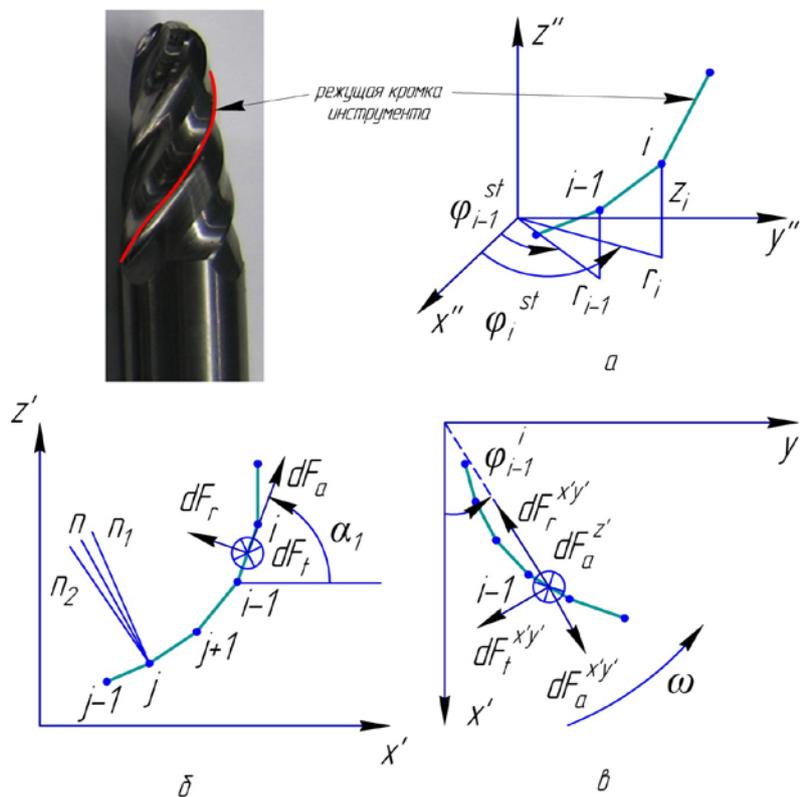


Рис. 2. Модель инструмента

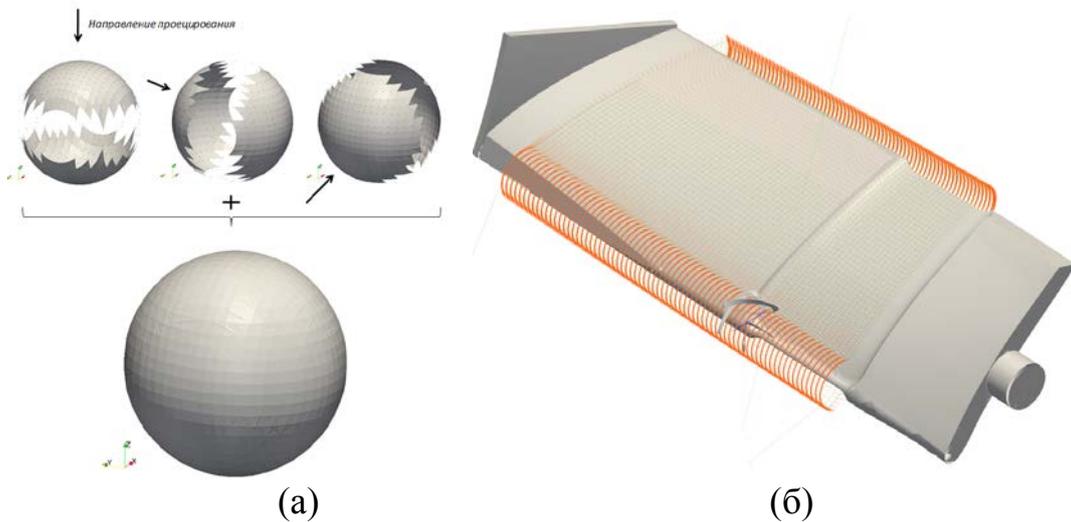


Рис. 3. Модель поверхности: *а* – сфера (тестовый пример), *б* – поверхность лопатки ГТД в процессе моделирования обработки

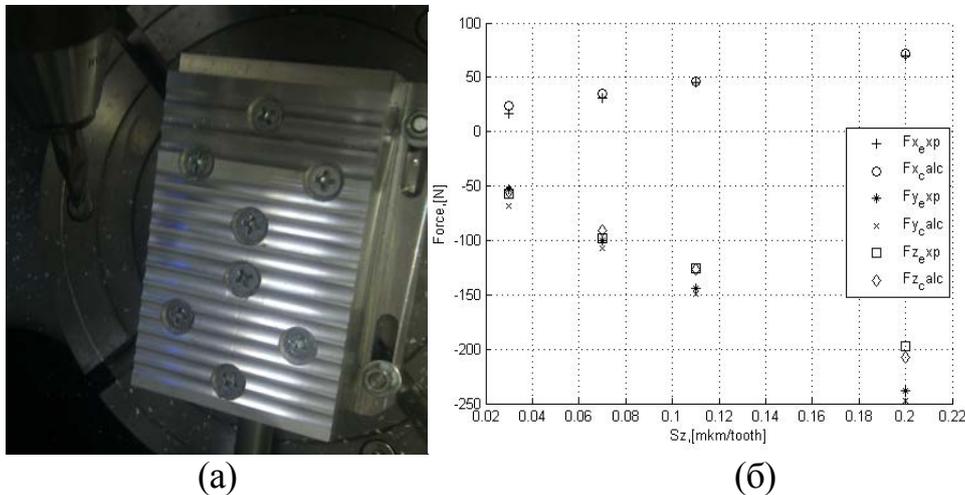


Рис. 4. Фотография эксперимента по определению коэффициентов модели сил резания (*а*) и сопоставление рассчитанных компонент сил резания с экспериментом при радиальной глубине канавки 1 мм (*б*)

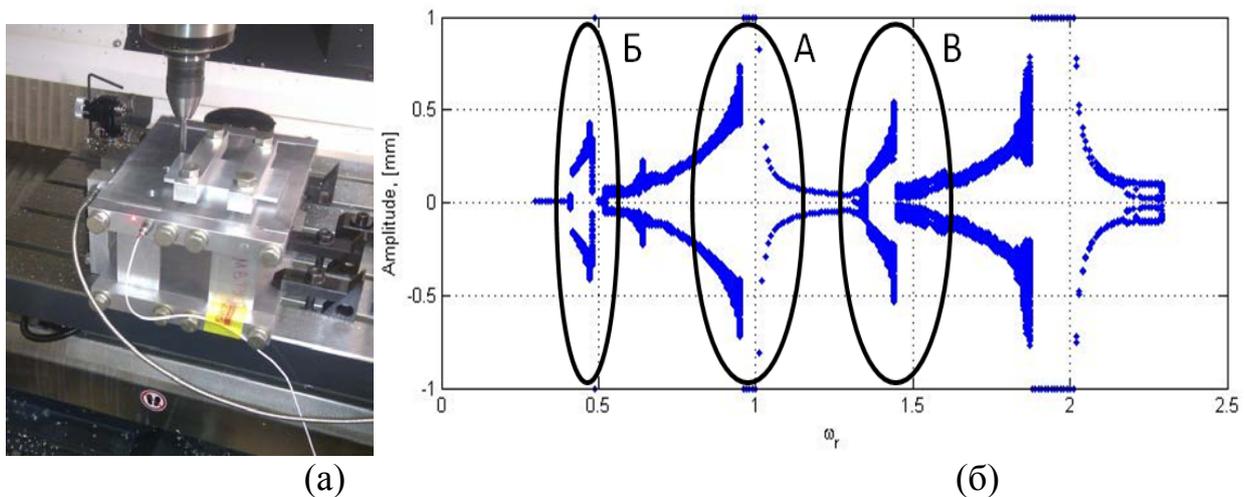


Рис. 5. Фотография экспериментальной установки (*а*) и отображение Пуанкаре, полученное в результате моделирования (*б*)

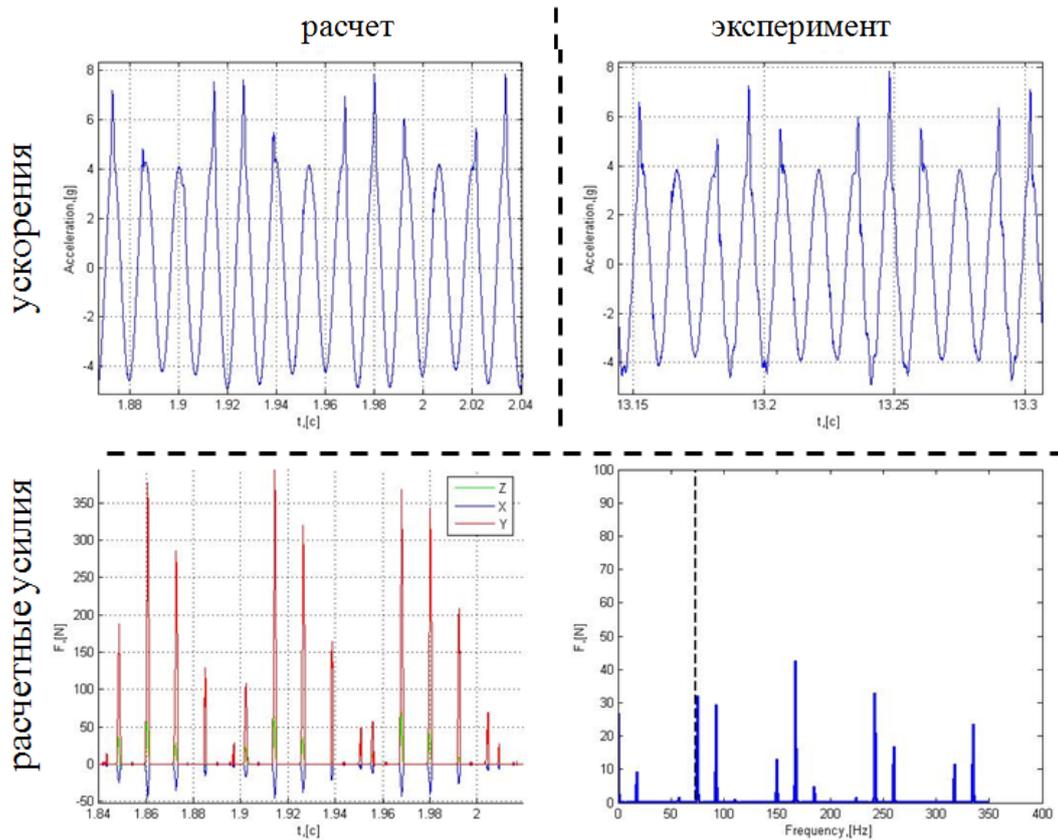


Рис. 6. Сравнение расчетной и экспериментальной зависимости от времени ускорения стола экспериментальной установки, силы резания и их спектр для режима обработки, сопровождающегося автоколебаниями. Скорость вращения фрезы  $\omega_r = 0.44$

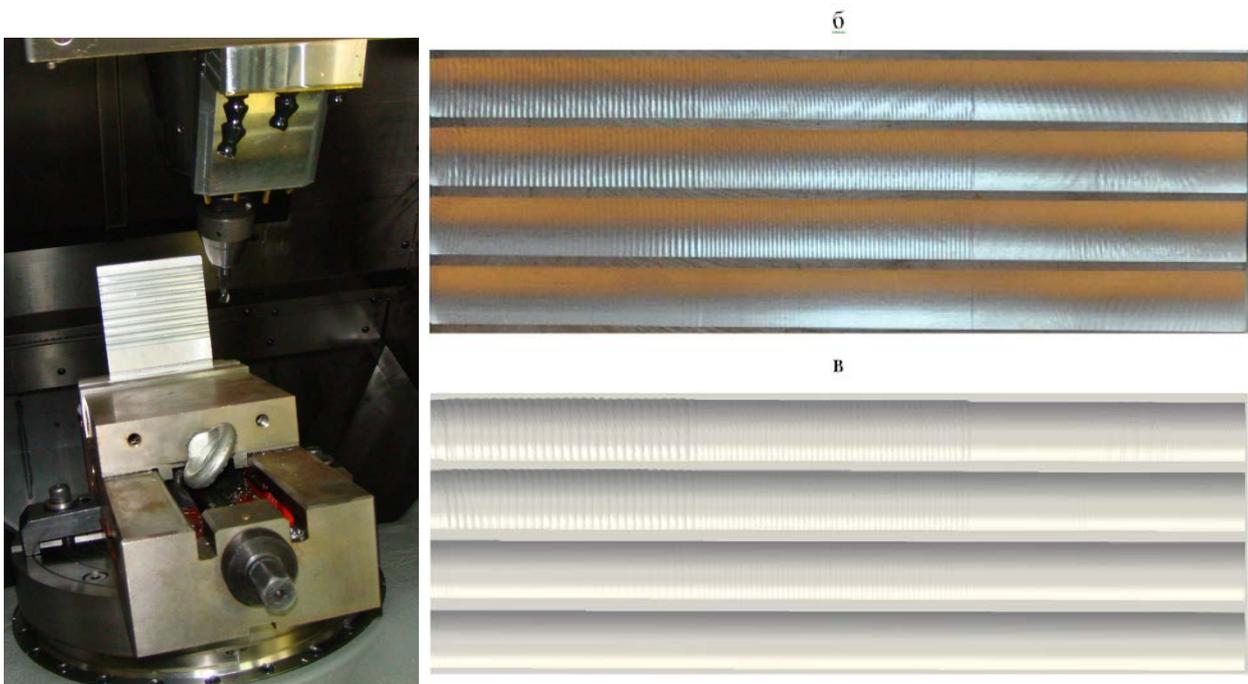
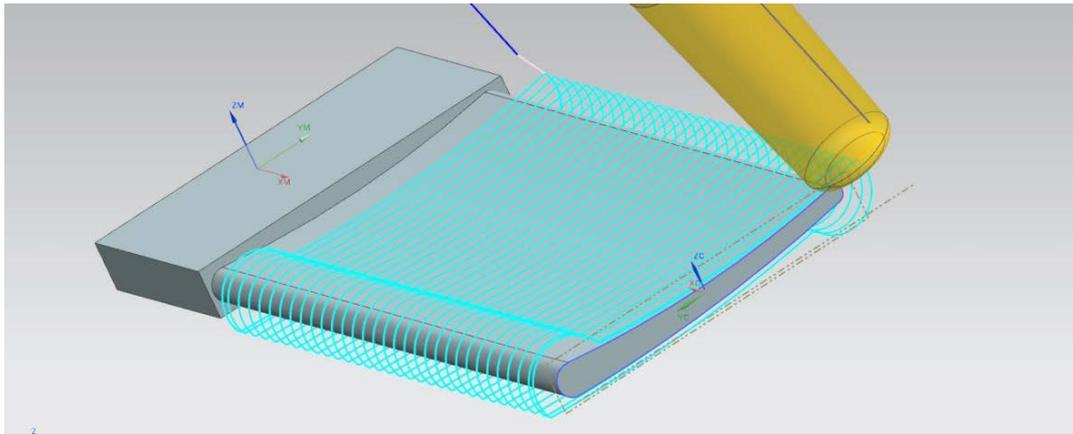
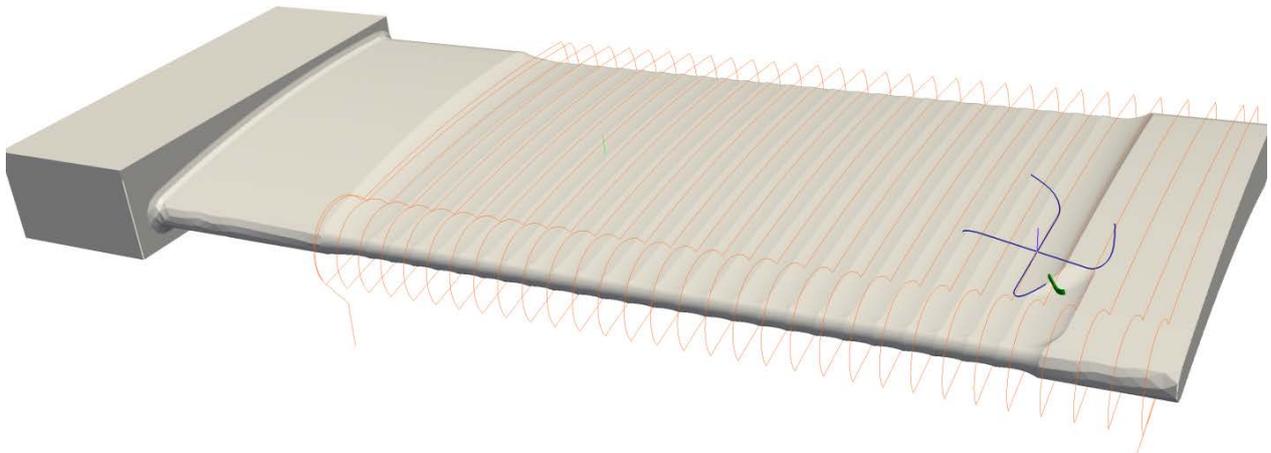


Рис. 7. Фотография эксперимента по обработке консольно закрепленной пластины (а), изображение неровностей поверхности, полученных в эксперименте (б) и при моделировании (в)

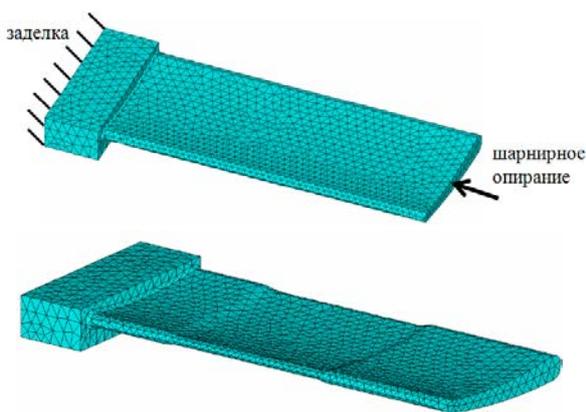


(а)

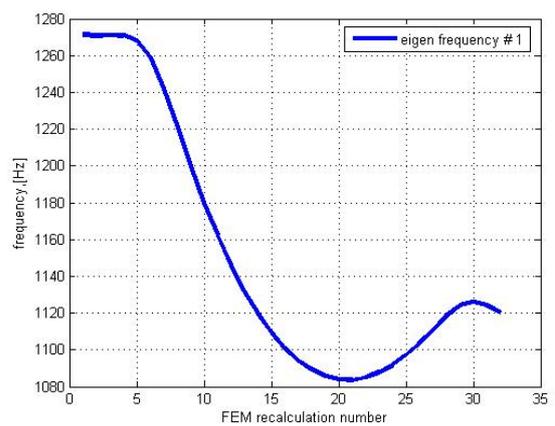


(б)

Рис. 8. Твёрдотельная модель заготовки, траектория обработки в системе Unigraphics (а) и изображение процесса моделирования обработки при помощи программного обеспечения, разработанного в рамках настоящего исследования (б)



(а)



(б)

Рис. 9. Конечно элементная модель и ее изменение по мере обработки (а); изменение ее первой собственной частоты в процессе обработки (б)

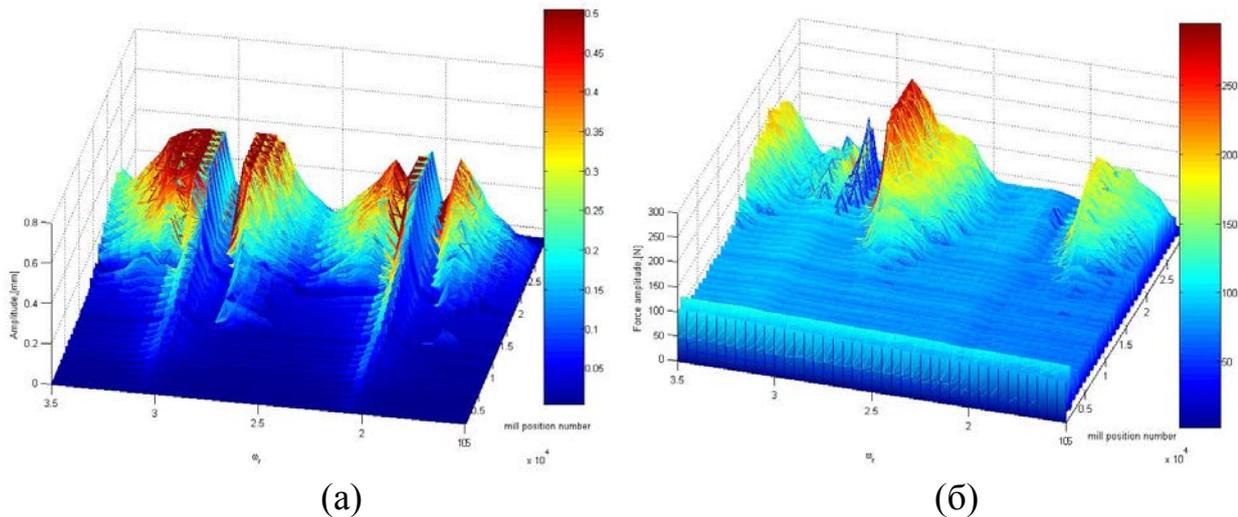


Рис. 10. Диаграмма амплитуды вибраций (а) и сил резания (б) при учете 1 собственной частоты и ее изменения по мере снятия материала

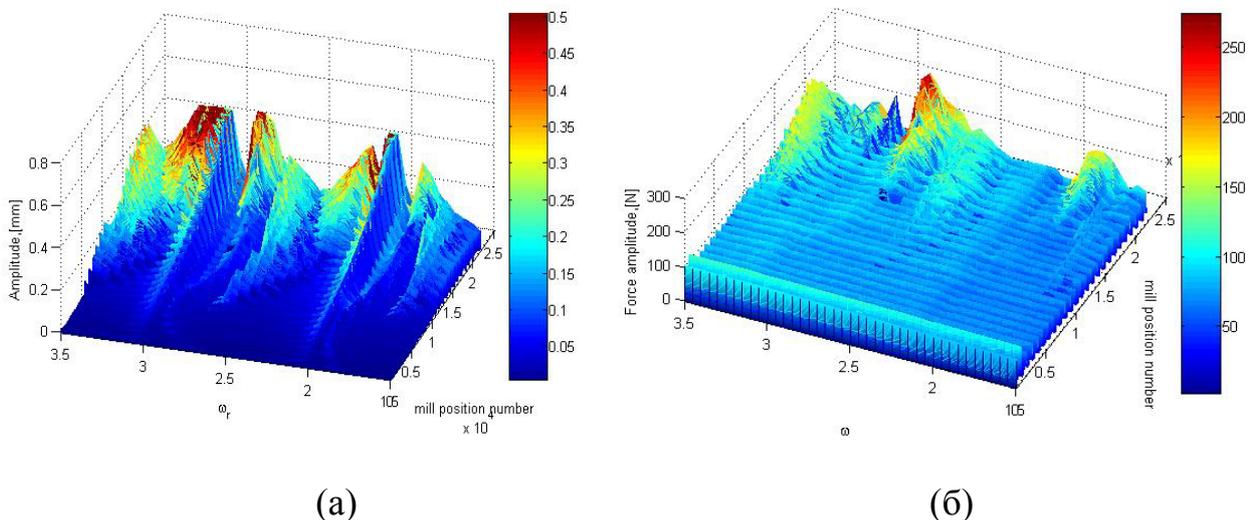


Рис. 11. Диаграмма амплитуды вибраций (а) и сил резания (б) при учете 5 собственных частоты и их изменения по мере снятия материала

В настоящей работе предлагаются следующие модификации метода Z-буфера: 1) применение билинейной аппроксимации поверхности в рамках ячейки сетки проецирования с целью устранения ступенчатого характера описания поверхности и повышения порядка аппроксимации, а также 2) одновременное использование нескольких направлений проецирования для устранения зон с низким разрешением аппроксимации, в которых направление проецирования близко к нормали к обрабатываемой поверхности. Первое усовершенствование приводит к существенному усложнению алгоритма, за счет необходимости устранения неоднозначности описания поверхности. Блок схемы алгоритма и примеры применения приведены в тексте диссертации. Изменение поверхности при прохождении режущих кромок осуществляется при помощи вычитания из модели поверхности удаляемых объемов, образующихся при прохождении режущих кромок. Определение толщины срезаемого слоя сводится к определению точки пересечения луча-направления

толщины срезаемого слоя, проведенного из каждой точки дискретизации режущей кромки, с моделью поверхности. Для определения толщины срезаемого слоя также предложен специальный алгоритм с учетом модификации технологии Z-буфера, приведенный в тексте диссертации.

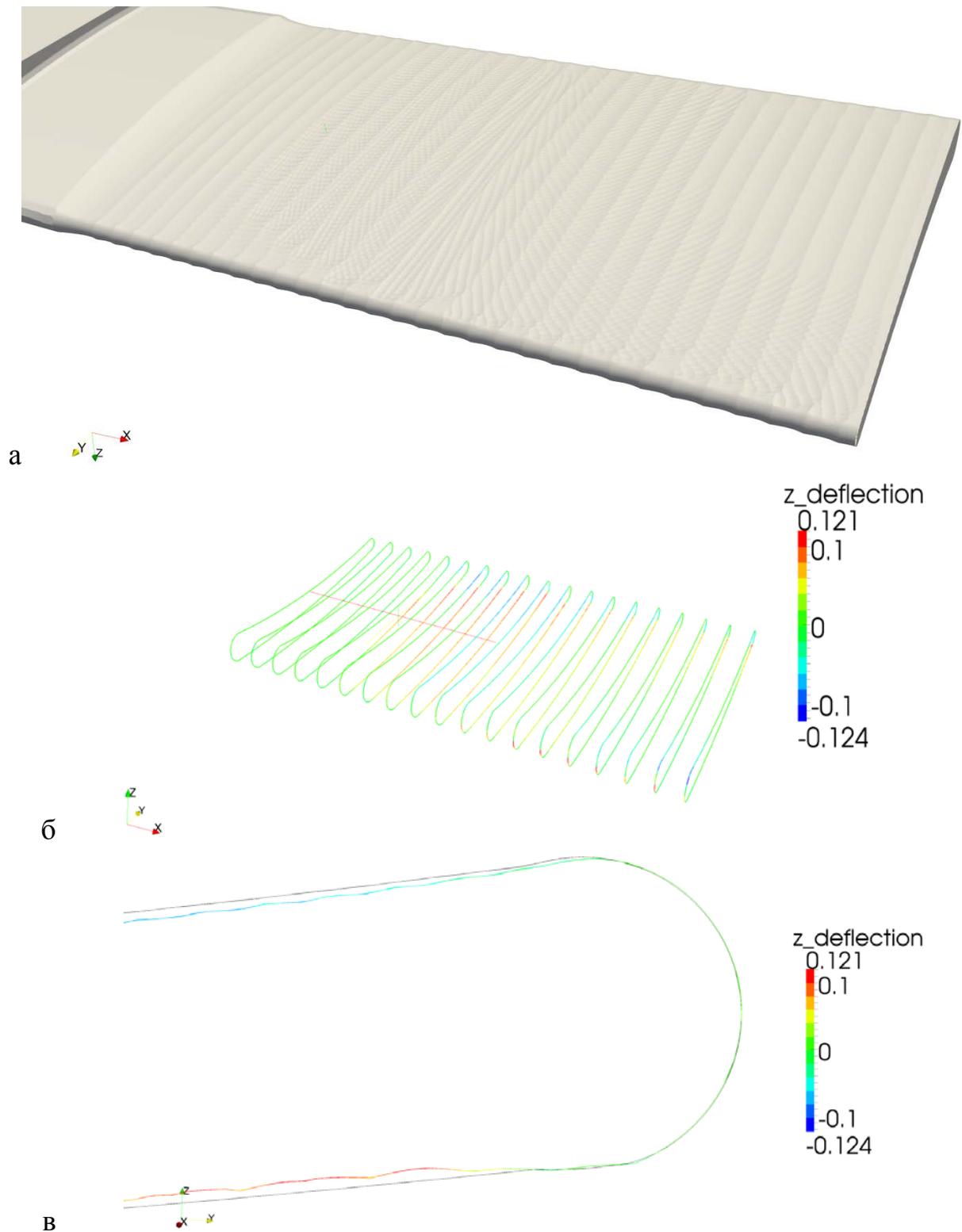


Рис. 12. Поверхность детали при неблагоприятном режиме обработки (а), отклонения профиля пера лопатки по сечениям (б) и увеличенное изображения 1 сечения (в)

Толщина срезаемого слоя используется в рамках комплексной модели для расчета сил резания при помощи феноменологических моделей. Для цилиндрических фрез может быть использована широко распространенная линейная модель (Y. Altintas). Для концевых фрез со сложной геометрией в настоящей работе предложена модель сил резания (2), описывающая их зависимость от скорости резания и от координаты точки режущей кромки вдоль оси фрезы, что позволяет учесть локальное изменение угла режущего клина.

$$F_{qj} = K_{qc} a_j h_j(t) \left( \frac{z_j}{z_{bq}} \right)^{m_{zq}} \left( \frac{V_{bq}}{V_c^j} \right)^{m_{Vq}} + K_{qe} dS_j, \quad q = r, t, a \quad (2)$$

где  $z_j$  - средняя осевая координата  $j$ -ого участка режущей кромки;

$z_{br}, z_{bt}, z_{ba}$  - базовое значение Z-координаты, необходимое для приведения к безразмерному виду соответствующего степенного множителя при расчете радиальной, окружной и осевой компонент усилия соответственно;

$m_{zt}, m_{zr}, m_{za}$  - показатели степени зависимости коэффициентов сил резания от осевой координаты;

$V_{br}, V_{bt}, V_{ba}$  - базовые значения скорости резания, необходимые для приведения соответствующего степенного множителя к безразмерному виду;

$V_c^j$  - текущее значение скорости резания для  $j$ -ого участка режущей кромки;

$m_{Vt}, m_{Vr}, m_{Va}$  - показатели степени зависимости коэффициентов сил резания от скорости резания.

Для определения коэффициентов моделей сил резания разработана расчетно-экспериментальная методика на базе алгоритма Нелдера-Мида, которая позволяет подобрать значения коэффициентов, в соответствии с измеренными значениями сил резания при разных технологических условиях: разных глубинах резания, разных подачах и уровнях скорости. При этом используется функция невязки на основе экстремальных значений компонент сил резания, измеренных на тестовой заготовке при помощи трехкомпонентной силоизмерительной платформы Kistler.

**Третья глава** посвящена описанию экспериментальных исследований и верификации методики моделирования.

В первом разделе приводится описание экспериментов по определению коэффициентов модели сил резания при помощи разработанной расчетно-экспериментальной методики. При этом для цилиндрической фрезы Sandvik CoroMill Plura R216.32-12030-AC22A использовалась линейная модель сил резания (Y. Altintas), для установления коэффициентов которой проводились эксперименты по фрезерованию торца пластины, закрепленной на силоизмерительной платформе. Для сферической фрезы Sandvik CoroMill Plura R216.42-12030-AK22A использовалась модель сил резания (2), для которой

коэффициенты определялись из экспериментов по фрезерованию канавок на поверхности пластины, закрепленной на датчике силы, как показано на рисунке 4а. В процессе эксперимента силы резания были измерены при различных подачах, глубинах фрезерования и скоростях вращения инструмента. В результате применения разработанной методики были определены коэффициенты модели сил резания (2), сопоставление экспериментальных и расчетных сил резания после определения коэффициентов представлено на рисунке 4б.

Для проверки моделирования динамики был сконструирован экспериментальный стенд, являющийся моделью динамической системы с одной степенью свободы. Конструкция стенда (рисунок 5а) представляет собой стол на упругих опорах, который имеет жесткость в одном направлении существенно меньше, чем в других направлениях. В процессе эксперимента торец пластины, закрепленной на упругом приспособлении, обрабатывается цилиндрической фрезой так, чтобы направление подачи совпадало с направлением наименьшей жесткости стола. Для анализа поведения системы при помощи моделирования построено отображение Пуанкаре в зависимости от скорости вращения инструмента. Для его построения при каждом значении относительной скорости вращения инструмента откладывались экстремальные значения перемещений стола за выбранный промежуток времени. Относительная скорость вращения представляет собой отношение резонансной частоты системы к частоте прохождения зубьев фрезы. Отображение Пуанкаре для рассматриваемой системы представлено на рисунке 5б. Увеличение амплитуды колебаний в правой части области «А» на отображении Пуанкаре имеет резонансный характер из-за того, что частота прохождения зубьев фрезы приближается к резонансной частоте системы. В левой части зоны «А» и в зонах «Б», «В» наблюдаются автоколебания за счет регенеративного механизма возбуждения. Было проведено экспериментальное подтверждение отдельных режимов, которое позволило установить границы различных зон на отображении Пуанкаре и показало достаточно хорошее качественное и количественное соответствие между расчетом и экспериментом. Сопоставление расчетной и экспериментальной зависимости ускорения подвижного стола приспособления, а также зависимость сил резания и их спектр показан на рисунке 6 для режима обработки с относительной скоростью вращения фрезы  $\omega_r = 0.44$ , сопровождающегося автоколебаниями. Для оценки качества режимов в настоящей работе предлагается построить диаграмму коэффициента увеличения сил резания с учетом динамики по отношению к силам в абсолютно жесткой технологической системе. Повышение сил резания в основном соответствует нежелательным, автоколебательным режимам, и является важным критерием выбора режимов обработки.

Дополнительно были проведены численные исследования для случая, когда подача перпендикулярна направлению вибраций, построены диаграммы отжаты и высоты неровностей обработанной поверхности в зависимости от скорости вращения, которые также могут служить критериями выбора режимов

обработки. Подробное описание расчета и эксперимента можно найти в тексте диссертации.

Проверка моделирования динамики 5-координатного фрезерования проводилась на примере обработки консольно закрепленной пластины. В ходе эксперимента проводилась обработка поперечных канавок сферической концевой фрезой на 5-координатном станке, как показано на рисунке 7а. Для моделирования динамики обрабатываемой детали была разработана ее конечно-элементная модель, для которой затем была выполнена настройка по результатам экспериментального модального анализа. На рисунке 7б представлена фотография четырех канавок на поверхности пластины (снизу-вверх по мере удаления от места закрепления), показывающая развитие вибрационных отметин, вызванных автоколебательным процессом в системе. На рисунке 7в представлено изображение обработанной поверхности, полученное моделированием при помощи методики, разработанной в рамках данного исследования. Сопоставление изображений поверхности на рисунках 7а, 7б говорит о том, что моделирование процесса фрезерования позволяет правильно отразить характер вибрационных отметин. Дополнительно проводилось сопоставление расчетного и экспериментального ускорения одной из точек пластины. По спектру и амплитуде ускорения получено приемлемое соответствие. Моделирование позволяет предсказать переход автоколебательного процесса с одной резонансной частоты системы на другую в соответствии с собственными формами колебаний заготовки.

**В четвертой главе** рассмотрен пример моделирования динамики 5-координатного фрезерования тонкостенной профилированной детали и предложена стратегия выбора рациональных режимов на основе результатов моделирования.

При поддержке НИИД ФГУП «НПЦ газотурбостроения «САЛЮТ» был разработана геометрическая модель тонкостенной детали типа лопатки, и в системе Unigraphics для нее была построена траектория движения инструмента при обработке (рисунок 8а). Моделирование обработки в разработанной автором программе показано на рисунке 8б. Для моделирования динамики обрабатываемой детали была разработана ее конечно-элементная модель, которая подвергалась периодическому перестроению (рисунок 9а) по мере снятия материала, что позволило учесть изменение динамических характеристик заготовки в процессе обработки (рисунок 9б). Изменение собственных частот колебаний в выбранном примере достигало 20%. При моделировании инструмент считался существенно более жестким, чем обрабатываемая деталь и его динамика не учитывалась.

Для того, чтобы иметь в дальнейшем возможность выбрать рациональные режимы обработки предлагается построить диаграммы амплитуд колебаний и сил резания в зависимости от номера точки маршрута обработки и от относительной скорости вращения инструмента. Для этого необходимо провести моделирование обработки при изменении технологических параметров, т.е. выполнить многовариантное моделирование.

Для выполнения многовариантного моделирования была разработана параллельная сетевая версия программы с целью уменьшения времени вычисления. Для получения результатов приведенных ниже, расчет проводился с использованием 60 процессорных ядер.

В работе проведен анализ влияния демпфирования и учета изменения динамических характеристик заготовки на диаграммы зависимости амплитуды колебаний и сил резания от скорости вращения инструмента в зависимости от номера точки маршрута обработки. Пример таких диаграмм в случае учета только первой собственной частоты заготовки и снятия материала в динамической модели представлен на рисунке 10. На рисунке 11 представлены аналогичные диаграммы в случае учета первых 5-ти собственных частот.

Если по диаграммам (рисунок 11) выбрать для обработки режим, проходящий через области с повышенным уровнем сил резания и амплитуды вибраций, то можно получить обработанную поверхность, которая имеет разный характер вибрационных отметин (рисунок 12а) в разных зонах обрабатываемой детали, что, по-видимому, объясняется разным вкладом отдельных форм колебаний при движении системы. Таким образом, можно сделать вывод, что для корректного моделирования динамики процесса обработки требуется учитывать несколько собственных форм колебаний, количество которых зависит от рассматриваемой задачи.

На основе комплекса полученных результатов моделирования предлагается стратегия выбора рациональных режимов, которая предполагает следующие шаги:

а) построение траектории обработки в САМ системе традиционными методами;

б) определение коэффициентов модели сил резания (для выбранной фрезы и материала детали) путем реализации разработанного расчетно-экспериментального подхода;

в) построение модели динамики обрабатываемой детали и инструмента, уточнение их динамических характеристик и определение модальных коэффициентов демпфирования при помощи экспериментального модального анализа;

г) проведение многовариантного моделирования динамики обработки для выбранных диапазонов изменения технологических параметров при помощи предложенной в настоящей работе методики;

д) построение диаграммы амплитуды сил резания и исключение режимов с повышенными значениями сил резания, т.к. эти режимы, скорее всего, имеют автоколебательный характер;

е) построение диаграммы амплитуды вибраций и исключение режимов, сопровождающихся повышенными вибрациями;

ж) назначение режимов обработки вдоль траектории инструмента из оставшихся областей благоприятных режимов;

з) проведение непрерывного моделирования процесса обработки при выбранных режимах, с целью подтверждения отсутствия автоколебаний, либо

их минимальной величины. При необходимости требуется скорректировать режимы, руководствуясь диаграммами амплитуд вибраций и сил резания;

и) на основе отклонений формы поверхности (рисунок 12б,в), полученной в результате моделирования, провести коррекцию координат точек маршрута обработки с целью компенсации отжати (может потребоваться несколько итераций).

Таким образом, за счет коррекции режимов и траектории предлагаемая методика моделирования и выбора режимов позволяет учесть отжати и избежать появления автоколебательных режимов, которые могут существенно ухудшить качество обработанной поверхности. С минимальными изменениями предложенный подход может быть применен к моделированию других процессов обработки резанием и абразивной обработки: точения, сверления, шлифования.

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1) Разработана математическая модель динамики процесса пространственного фрезерования сложнопрофильных податливых деталей, учитывающая нелинейность динамической системы, эффект запаздывания и изменение динамических характеристик заготовки в процессе обработки на основе метода конечных элементов.

2) Разработан алгоритм и программа для анализа динамики процесса пространственного фрезерования сложнопрофильных податливых деталей, позволяющая выбирать рациональные режимы обработки по критерию качества поверхности и производительности технологического процесса за счет проведения многовариантных расчетов при изменении технологических параметров.

3) Разработана новая расчетно-экспериментальная методика определения коэффициентов модели сил резания, применимая для моделирования динамики обработки различными типами фрез со сложной геометрией режущей кромки.

4) Проведенная экспериментальная верификация разработанной математической модели динамики 5-координатного фрезерования показала качественное и количественное соответствие результатов расчета и эксперимента.

5) Введены новые способы оценки качества процесса обработки фрезерованием на основании рассчитываемых в процессе моделирования диаграмм амплитуд вибраций, сил резания и их спектра.

6) Разработанные программные средства обеспечивают высокую производительность моделирования за счет предложенных в настоящей работе модификаций алгоритма геометрического моделирования и за счет введения параллельного сетевого алгоритма для многовариантного моделирования.

7) Разработанная методика выбора рациональных режимов обработки на основе численного моделирования динамики 5-координатного фрезерования внедрена в филиале НИИД ФГУП «НПЦ газотурбостроения «САЛЮТ».

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**1.** Воронов С.А., Непочатов А.В., Киселев И.А. Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежестких деталей // Известия высших учебных заведений, серия «Машиностроение», МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. №1. С. 50-62.

**2.** Киселев И.А. Моделирование динамики пространственного фрезерования податливых сложнопрофильных деталей с учетом изменения их динамических характеристик // XXIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов: Тез. докл. международной конф. Москва. ИМАШ РАН. 2011. С. 171.

**3.** Voronov S., Kiselev I. Dynamics of flexible detail milling // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics. 2011. V 225. № 4. P. 299-309.

**4.** Voronov S., Kiselev I. Stability criteria of flexible details milling // Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conference and Computer and Information in Engineering Conference IDETC/CIE, USA. 2011. V 4. P. 511-520.

**5.** Voronov S., Kiselev I. Identification of the cutting forces coefficients via milling process simulation // Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conference and Computer and Information in Engineering Conference IDETC/CIE, USA. 2011. V 1. P. 127-133.

**6.** . Воронов С.А., Киселев И.А. Комплексная математическая модель динамики пространственного фрезерования податливых сложнопрофильных деталей // 5-ая международная конференция «Проблемы механики современных машин»: Тез. докл. международной конф. Улан-Удэ. ВСГУТУ. 2012. С. 89-92.

**7.** Воронов С.А., Николаев С.М., Киселев И.А. Расчетно-экспериментальная методика идентификации параметров модели механической системы с помощью модального анализа // 5-ая международная конференция «Проблемы механики современных машин»: Тез. докл. международной НТК. Улан-Удэ: ВСГУТУ, 2012. С. 96-100.

**8.** Воронов С.А., Киселев И.А., Аршинов С.В. Методика применения численного моделирования динамики многокоординатного фрезерования сложнопрофильных деталей при проектировании технологического процесса // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, серия Машиностроение. 2012. № 6. С. 50-69.

**9.** Киселев И.А. Геометрический алгоритм 3MZBL для моделирования процессов обработки резанием. Методика описания поверхности заготовки // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, серия Машиностроение. 2012. № 6. С. 158-175.

**10.** Воронов С.А., Киселев И.А. Геометрический алгоритм 3MZBL для моделирования процессов обработки резанием. Алгоритм изменения поверхности и определения толщины срезаемого слоя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, серия Машиностроение. 2012. № 6. С. 70-83.

## ДЛЯ ЗАМЕТОК



