

На правах рукописи

ПЛАВНИК Светлана Леонидовна

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ДЕТАЛЕЙ ФАСОННЫМ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ**

Специальность 05.02.08 – технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2004

**Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном
политехническом университете**

Научный руководитель: к.т.н., проф. Соловейчик А. М.

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. Васильков Д. В.

к.т.н., доц. Чижевский А. Б.

Ведущая организация: ЗАО "Станкостроительный завод
"Свердлов", г. Санкт-Петербург

Защита состоится 27 января 2004 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.26 Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 195251, СПб, ул Политехническая д.29, в ауд. 41, I учебного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГПУ.

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью, просим направлять в диссертационный совет в двух экземплярах.

Автореферат разослан 26 декабря 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.229.26, д.т.н., проф.

Тисенко В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Механическая обработка резанием является основным методом изготовления деталей в машиностроении. При этом фрезерование является одним из самых производительных и распространенных методов. В настоящее время на фрезерных станках выполняется свыше 20 % всего объема обработки металлов резанием, причем значительную долю этой обработки производится с помощью фасонных фрез. Они используются при изготовлении деталей различных классов. При механической обработке резанием одной из доминирующих причин, снижающих надёжность и стабильность процесса резания, а следовательно, и качество деталей, являются колебания в технологической системе (ТС).

Вопросы виброустойчивости приобретают особое значение для станков, на которых реализуется прерывистое резание, в частности, станков фрезерной группы. В таких ТС, наряду с возможным возбуждением автоколебаний, обусловленных нелинейностью силы резания, имеют место вынужденные колебания вследствие переменной силы резания.

Следует также учитывать, что основной тенденцией современного машиностроения является повышение точности изготовления деталей. Точность деталей является одним из основных показателей их качества, а условия ее обеспечения – важнейшим условием надежности любых технологических систем.

Обеспечение надежности предполагает выполнение двух условий: как максимум – исключение возможности возникновения колебаний, как минимум – уменьшение их амплитуды до приемлемого уровня. Поэтому повышение эффективности процесса фасонного фрезерования по качеству и точности за счет увеличения виброустойчивости системы станка является актуальной задачей и представляет значительный практический интерес.

Цель работы. Разработка мероприятий по обеспечению устойчивости движения ТС при изготовлении деталей различных классов с фасонными поверхностями на операциях фрезерования.

Методика исследований. Параметры расчетных математических моделей исследуемой ТС определялись с использованием общепринятых методов исследования динамики станков.

Исследование нелинейных колебаний выполнялось аналитическим методом, а также графическим методом с использованием фазовой плоскости. Устойчивость движения колебательных контуров определялась по типу особых точек. Для построения режимных областей использовался метод, основанный на теории бифуркаций.

Анализ вынужденных колебаний ТС проводился на основании расчета и исследования амплитудно- и фазово-частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) системы в процессе резания. Экспериментальная проверка полученных результатов и расчетных данных проводилась в лабораторных и цеховых условиях.

Научную новизну работы составляют:

1. Математические модели автономной и неавтономной ТС при фасонном фрезеровании.
2. Методика определения областей устойчивости ТС с использованием теории бифуркаций.
3. Методика, позволившая рассчитывать составляющие силы резания при фрезеровании фасонными фрезами, имеющими произвольное очертание профиля режущих зубьев.
4. Теоретические и экспериментальные зависимости для определения гармонических составляющих периодических сил резания при фасонном фрезеровании и влияния на них режимных параметров.
5. Расчетные модели для определения АЧХ и ФЧХ ТС от воздействия полигармонической силы.

Практическая ценность работы состоит в том, что:

1. На основе использования бифуркационных критериев определены границы областей устойчивого движения ТС при мягком и жестком возбуждении автоколебаний.

2. Получены эмпирические формулы для расчета составляющих силы резания при фрезеровании стали 40ХФА и сплава ВТ22 фасонными фрезами.

3. Устранена вероятность получения брака и обеспечен коэффициент запаса точности больше единицы. Обеспечено повышение точности размеров на 1.2 квалитета. Погрешности формы и взаимного расположения уменьшены на 0,5...1 степень точности. Волнистость снижена на 50...60 % и шероховатость на 35...55.%.

Промышленная реализация работы. Использование определяемых по предложенной методике режимных параметров на ОАО "Ленполиграфмаш" и других предприятиях Санкт-Петербурга позволило значительно повысить качество и надежность процессов фасонного фрезерования.

Апробация работы. Основные разделы докладывались на международной электронной научно-технической конференции "Автоматизация и информатизация в машиностроении (АИМ 2002)", Тула – 2002 г., на VI и VII Всероссийских конференциях по проблемам науки и высшей школы "Фундаментальные исследования в технических университетах" Санкт-Петербург – 2002 и 2003 гг., на научно-технических советах ОАО "Ленполиграфмаш", на научных семинарах кафедры "Технология машиностроения" СПбГПУ.

Публикации. Основные результаты работы изложены в семи печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, общих выводов и заключения, изложена на 173 страницах, включая: 7 таблиц, 72 рисунок, список литературы из 102 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована необходимость проведения исследований, направленных на повышение точности и надежности процессов изготовления деталей различных классов с использованием фасонного фрезерования.

В первом разделе проведен анализ проблем производства деталей, содержащих фасонные поверхности, а также анализ методов и средств повышения надежности и виброустойчивости технологических систем при механической обработке резанием.

Отмечается, что в процессе механической обработки образуются отклонения от заданных рабочим чертежом размеров, формы и взаимного расположения поверхностей. Величина возникающих отклонений является функцией многих переменных, в том числе колебаний различных типов. Кроме погрешностей размеров и формы колебания могут вызывать появление волнистости поверхности.

Волнистость оказывает значительное влияние на формирование сопряжения поверхностей, пар трения и т.п. В некоторых случаях высота волн может оказывать большее влияние на работу детали, чем высота микронеровностей. Площадь фактического контакта при наличии волнистости намного меньше, чем в случае плоскоотно-шероховатой поверхности.

Частью суммарной погрешности обработки является погрешность формы. Как и волнистость отклонения формы оказывают существенное влияние на работоспособность деталей, влекут за собой неравномерность зазоров или натягов в соединениях. Эксперименты показывают, что рассеивание погрешности формы составляют значительную часть суммарной погрешности обработки. Так при фрезеровании отношения величин среднего квадратичного отклонения погрешностей формы к погрешностям размеров составляют: предельные – 0,15...1,55; среднее – 0,7. Немалое влияние на эти погрешности оказывает интенсивность возможных колебаний.

В работе рассмотрены различные способы измерения и контроля качества обработки деталей с фасонными поверхностями.

лебания, обусловленные переменностью сечения стружки, и автоколебания.

Автоколебания возникают в широком диапазоне режимов резания и возбуждаются в отсутствие внешнего периодического воздействия, причем источник энергии является неотделимой частью системы. Исследованию автоколебаний, имеющих место при обработке металлов резанием, посвящены работы А.П. Соколовского, Л.С. Мурашкина, А.И. Каширина, И.С. Амосова, В.А. Кудинова, И. Тлустого. и др. Проведенный анализ этих работ позволил сделать вывод о том, причиной возбуждения автоколебаний является статическая двузначность, вытекающая из нелинейной характеристики силы резания.

При фрезеровании, наряду с возможным возбуждением автоколебаний, имеют место вынужденные колебания вследствие переменной силы резания. Исследованию колебаний, возникающих в процессе фрезерования, посвящены работы И.Г. Жаркова Л.С Мурашкина, А.Н. Волкова, В.М. Свинина, Ю.В. Пузанова, Л.Н. Бердникова, С.Л Мурашкина, А.М. Соловейчика и др.

Анализ приведенных работ показал, что существуют определенные сложности исследования колебаний при фрезеровании вызываемые трудностями определения сил резания. Особенно это актуально для фасонного фрезерования, при котором, кроме свойственных самому процессу колебаний сил, сопутствуют проблемы, связанные с криволинейным профилем инструмента.. Разработкой методик, позволяющих рассчитывать силы резания в зависимости от технологических параметров обработки, занимались Бобров В.Ф., Вульф А.М., Грановский Г.И., Зорев Н.Н., Розенберг А.М. Жарков И.Г. Пузанов Ю.В. и др.

Проведенный анализ показывает, что для уточнения расчета сил резания при фасонном фрезеровании в настоящее время необходима методика, позволяющая учитывать нелинейность сил от подачи и скорости при криволинейном очертании режущего лезвия.

Реализация с высокой надежностью проектных технологических решений возможна только в случае обеспечения устойчивости движения технологической системы, для исследования которой в настоящее время необходимы

ются различные аналитические и графические методы. Их анализ показал, что наиболее рациональными являются метод исследования на фазовой плоскости и метод, основанный на теории бифуркаций.

Проведенный анализ работ, посвященных надежному обеспечению показателей качества деталей, гипотезам возникновения автоколебаний на металлорежущих станках, расчету сил резания при фасонном фрезеровании и методам определения устойчивости движения технологических систем станков, позволил определить задачи исследования.

1. Установить влияние технологических параметров обработки на нелинейную характеристику силы резания при фрезеровании выбранных материалов твердосплавными фасонными фрезами.

2. Разработать методику расчета сил резания при фрезеровании фрезами, имеющими сложный фасонный профиль режущих зубьев.

3. Определить режимную область устойчивого стационарного положения равновесия технологической системы станка в случае мягкого и жесткого возбуждения автоколебаний.

4. Произвести анализ вынужденных колебаний технологической системы станка, определить режимы обработки, соответствующие резонансным явлениям.

5. На основании анализа условий возникновения колебаний определить рациональные условия выполнения фрезерных операций с целью повышения их технологической надежности.

Во втором разделе описана методика проведения исследований. Для проведения исследований выбран типовой представитель консольно-фрезерных станков - горизонтально-фрезерный станок 6Н82. Исходя из конструкции станка и в соответствии с принятой системой координат, технологическая система станка была априорно представлена в виде совокупности взаимосвязанных подсистем. Трехмассовая подсистема шпиндель-оправка с фрезой-хобот и трехмассовая подсистема стол-салазки-консоль. Кроме изгибных под-

систем рассматривалась также и крутильная. Она априорно может быть представлена как одномассовая с крутильной жесткостью и моментом инерции.

Параметрами подсистем являются приведенная масса m , коэффициент пропорциональности между силой сопротивления и скоростью h , коэффициент жесткости j . Для крутильной системы соответственно: приведенный момент инерции I , коэффициент пропорциональности h_φ и коэффициент крутильной жесткости j_φ .

Коэффициенты жесткости определялись по известной методике статическим методом, собственные частоты и логарифмические декременты – по осциллограммам затухающих колебаний, вызванных импульсным воздействием. Приведенные массы, момент инерции, коэффициенты сил и моментов сопротивления, пропорциональных скорости рассчитывались по соответствующим зависимостям.

Использованная методика определения составляющих силы резания при фасонном фрезеровании основывается на определении текущих значений площади среза и удельных сил резания.

Для определения текущих значений площади среза однозубая фасонная фреза представлялась в виде пакета элементарных фрез шириной Δx , имеющих прямолинейную режущую кромку.

Исследованиями Л.С. Мурашкина и др. установлена возможность использования значений удельных составляющих силы резания, полученных при свободном течении и для других видов обработки, в частности, для фрезерования. Экспериментальное определение силовых зависимостей при свободном течении производилось с использованием образцов, изготовленных в виде втулок, которые изготавливались из труднообрабатываемых материалов: стали 40ХФА и титанового сплава ВТ22.

По результатам однофакторных экспериментов строились зависимости составляющих силы резания P_z и P_x от технологических параметров об-

работки - скорости резания V и подачи S , а также зависимости сил резания от величины переднего угла. Эти исследования позволили определить частные зависимости, а следовательно, и вид аппроксимирующих кривых при многофакторном определении зависимости составляющих сил резания от технологических параметров обработки. При этом использовались аппроксимационные выражения вида: $P = C_p \cdot s_z^{ns} \cdot V^{nv} \cdot t_\phi^{nt} \cdot B \cdot k_\gamma$, где P - среднее значение окружной силы за оборот инструмента; C_p - коэффициент; k_γ - коэффициент, учитывающий влияние величины переднего угла на составляющие силы резания.

При определенных условиях обработки в технологической системе станка может возникнуть устойчивое колебательное положение равновесия, т.е. автоколебания. Исследование вопроса об условиях возникновения автоколебаний, удобно вести с помощью анализа движения системы на фазовой плоскости. При этом построение интегральных кривых производится методом Льенара.

Определение областей устойчивого движения систем станка производится с помощью теории бифуркаций. Условие устойчивости для случая мягкого возбуждения автоколебаний формулируется следующим образом: система сохраняет стационарное положение равновесия, если выполняется неравенство: $h > |H_1|$, где H_1 - крутизна характеристики силы резания. При этом требуются следующие исходные данные: коэффициенты сил сопротивления, пропорциональных скорости и эмпирические зависимости сил резания от технологических параметров обработки. Например, крутизна характеристики силы резания H_x определяется по формуле

$$H_x = \frac{\partial}{\partial V_x} \left[\frac{C_{px} a_{0x}}{2P_{kx}} (\cos \theta + K_a \sin \theta)^{nv_x} t_\phi^{nt_x} s_z^{ns_x} V^{nv_x} B \right]$$

Определение областей устойчивого движения системы в случае жесткого возбуждения автоколебаний ведется с помощью нечетной обобщенной характеристики. Для построения нечетной части обобщенной характеристики производится графическое сложение обобщенной характеристики $P_x(\dot{x})$ и симметричной ей относительно выбранной точки характеристики $-P_x(-\dot{x})$

Определение режимных областей устойчивого движения полностью не отражает колебательные процессы, происходящие в технологической системе станка при фасонном фрезеровании. Наличие периодической силы резания обуславливает возникновение вынужденных колебаний. При исследовании вынужденных колебаний, периодические силы резания раскладываются в тригонометрический ряд Фурье. Движение линейной системы с одной степенью свободы, находящейся под действием внешней периодической силы, описывается следующим дифференциальным уравнением второго порядка.

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + jx = C_p \cdot t_{\phi}^{nt_x} s_z^{ns_x} V^{nv_x} B \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\tau + b_k \sin k\tau)$$

При отсутствии автоколебаний анализ колебательного движения линейной системы, находящейся под действием полигармонической силы, описываемого уравнением, значительно упрощается благодаря принципу суперпозиции, заключающемся в том, что колебания, вызванные разными причинами, не зависят друг от друга и при определении результирующего движения складываются. В соответствии с этим, реакция системы на периодическую возмущающую силу есть сумма реакций на отдельные гармонические составляющие возмущения. Установившаяся реакция системы бу-

$$x = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k \cos(k\tau - \varphi_k) + b_k \sin(k\tau - \varphi_k)}{j\sqrt{(1 - k^2 r^2)^2 + (2\xi nr)^2}},$$

где $\varphi_k = \arctg \frac{2\xi kr}{1 - k^2 r^2}$. Параметр ξ есть безразмерный коэффициент

ент затухания, он определяется как $\xi = \frac{h}{2\sqrt{jm}}$.

Приведенные уравнения определяют соответственно зависимость амплитуд и фаз колебаний системы, находящейся под действием периодической силы, т.е. амплитудно- и фазово-частотные характеристики АФЧХ.

Третий раздел посвящен определению параметров подсистем и составляющих сил резания. Анализ полученных динамических параметров подсистем показал, что большим положительным сопротивлением обладают системы стола, салазок, консоли и хобота в направлениях $X - X$ и $Z - Z$. Значительно меньшим сопротивлением обладают системы шпинделя и оправки с фрезой, как в направлении $X - X$, так и в направлении $Z - Z$.

Лимитирующим элементом в рассматриваемой подсистеме является оправка с фрезой. Об этом свидетельствуют низкий декремент затуханий $\Delta = 0,21...0,28$ и низкий коэффициент силы сопротивления, пропорциональной скорости $h = 3962$ Нс/м. Таким образом, расчетная модель подсистемы шпиндель-оправка с фрезой может быть представлена как одномассовая система оправки с фрезой в направлении $X - X$ (рис. 1,а). Анализ собственных частот и логарифмических декрементов элементов изгибной подсистемы стол-салазки-консоль позволяет сделать следующие выводы. В направлении $X - X$ стол и салазки обладают пониженной жесткостью, что является причиной низких коэффициентов силы сопротивления h (соответственно 14725 и 17031 Нс/м) по сравнению с консолью (62423 Нс/м). В направлении $Z - Z$ большой демпфирующей способностью обладают салазки и консоль, сохраняя при этом высокое положительное сопротивление (соответственно 68318 и 91190 Нс/м). Исходя из этого, расчетная модель изгибной подсистемы стол-салазки-консоль может быть представлена как одномассовая система стола в направлении $Z - Z$ и двухмассовая система стол-салазки в направлении $X - X$ (рис. 1,б и в).

Высокие логарифмические декременты и большое положительное сопротивление крутильной системы при высокой жесткости, позволяют сделать вывод о том, что этой системой можно пренебречь при составлении расчетных моделей.

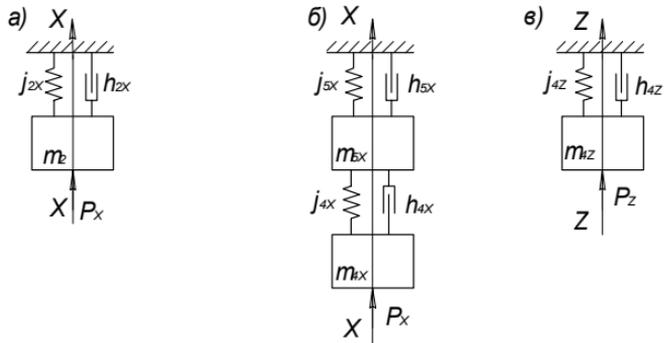


Рис. 1

В результате проведения однофакторного эксперимента было установлено, что характеристики сил резания при фрезеровании стали 40ХФА относятся к характеристикам второго вида, т.е. имеют два падающих участка. Поэтому при проведении многофакторного эксперимента применялось разбиение диапазона варьирования скорости резания на два участка. Первый $V \leq 1,333$ м/с и второй $V \geq 1,333$ м/с. В результате обработки экспериментальных данных были получены следующие эмпирические зависимости:

$$\text{Для сплава ВТ22: } \begin{cases} P_x = 0,137B(1 - 0,0165\gamma)t_\phi^{0,35} s_z^{0,72} V^{-0,22} \\ P_z = 0,388B(1 - 0,0165\gamma)t_\phi^{3,2} s_z^{0,64} V^{-0,22} \cdot 10^{-2} \end{cases}$$

Для стали 40ХФА:

$$V \leq 1,333 \text{ м/с: } \begin{cases} P_x = 0,125B(1 - 0,015\gamma)t_\phi^{0,39} s_z^{0,69} V^{-0,19} \\ P_z = 0,619B(1 - 0,015\gamma)t_\phi^{3,26} s_z^{0,9} V^{-0,19} \cdot 10^{-2} \end{cases}$$

$$V \geq 1,333 \text{ м/с: } \begin{cases} P_x = 0,538B(1 - 0,015\gamma)t_\phi^{0,39} s_z^{0,69} V^{-0,23} \\ P_z = 0,0582B(1 - 0,015\gamma)t_\phi^{3,26} s_z^{0,9} V^{-0,23} \cdot 10^{-2} \end{cases}$$

Таким образом, были получены все необходимые данные для исследования устойчивости движения технологической системы.

В четвертом разделе рассмотрены вопросы устойчивости движения технологической системы. Как отмечалось выше, исследование вопроса об условиях возникновения автоколебаний производилось с помощью анализа движения системы на фазовой плоскости. Анализ был проведен для различных участков обобщенных характеристик. На рис.2 в качестве примера приведен характерный фазовый портрет для первого падающего участка обобщенной характеристики при обработке стали 40ХФА.

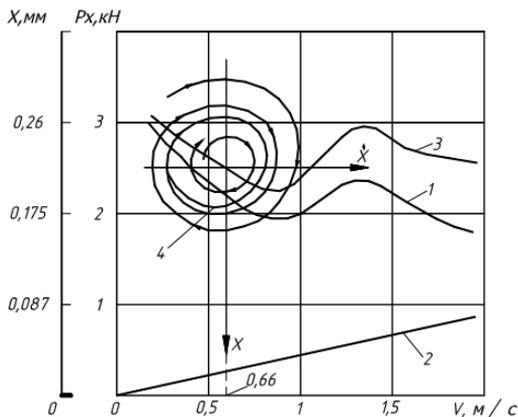


Рис. 2

Как видно из рисунка, интегральная кривая в данном случае при любом внешнем воздействии стремится к устойчивому предельному циклу (4). Это свидетельствует о возможности установления в системе стационарного автоколебательного движения с амплитудой $A = 0,08$ мм. Полученная интегральная кривая соответствует мягкому возбуждению автоколебаний.

В итоге, проведенный анализ движения систем станка позволил выявить наименее затененную систему: оправка с фрезой. Для этой системы определялись границы области устойчивого движения с помощью теории бифуркаций. Для случая мягкого возбуждения были построены поверхности бифуркаций с помощью определения линий бифуркаций в плоскости. Для

этого один из параметров обработки фиксируется, что позволило сократить число параметров варьирования до двух, а оставшиеся два выразить один через другой. Обозначив фиксированные значения параметров обработки как $t_{\phi i}$, s_{zi} , V_i , получим следующие формулы, определяющие линии бифуркаций в плоскостях, проходящих через фиксированные значения параметров.

Для фиксированного значения скорости V_i :

$$s_z = \left[h_{2x} / \left(\frac{C_{Px} a_{0x} n v_x}{2P_{kx}} B t_{\phi}^{n t_x} V_i^{n v_x - 1} (\cos \theta + K_a^{-1} \sin \theta)^{n v_x} \right) \right]^{\frac{1}{n s_x}}$$

Для фиксированного значения глубины фрезерования $t_{\phi i}$:

$$V = \left[h_{2x} / \left(\frac{C_{Px} a_{0x} n v_x}{2P_{kx}} B t_{\phi}^{n t_x} s_z^{n s_x} (\cos \theta + K_a^{-1} \sin \theta)^{n v_x} \right) \right]^{\frac{1}{n v_x - 1}}$$

Для фиксированного значения подачи на зуб s_{zi} :

$$t_{\phi} = \left[h_{2x} / \left(\frac{C_{Px} a_{0x} n v_x}{2P_{kx}} B V_i^{n v_x - 1} s_{zi}^{n s_x} (\cos \theta + K_a^{-1} \sin \theta)^{n v_x} \right) \right]^{\frac{1}{n t_x}}$$

По таким формулам строились бифуркационные кривые, определяющие область устойчивого движения системы оправки с фрезой.

Используя такие кривые были построены режимные области устойчивого движения системы оправки с фрезой для случаев обработки заготовок из различных материалов. В качестве примера на рис. 3. представлена режимная область устойчивого движения системы оправки с фрезой ($l = 350$ мм) в направлении действия составляющей силы резания P_x в случае мягкого возбуждения автоколебаний при фрезеровании стали 40ХФА на первом падающем участке характеристики силы. Область, расположенная внутри поверхности бифуркаций есть область неустойчивого движения системы.

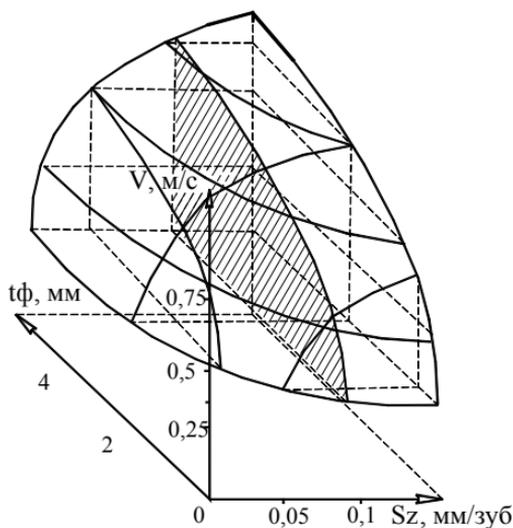


Рис. 3

В пятом разделе приведены анализ колебательного движения линейной системы, находящейся под действием полигармонической силы и результаты сравнительных экспериментальных исследований точности обработки.

Определение режимных областей устойчивого движения автоколебательной системы оправки с фрезой полностью не отражает колебательные процессы, происходящие в технологической системе станка при фасонном фрезеровании. Наличие периодической силы резания обуславливает возникновение вынужденных колебаний. При исследовании вынужденных колебаний, периодические силы резания раскладывались в тригонометрический ряд Фурье.

Принимая во внимание зависимости для составляющих силы резания и выражения для описания периодических возмущений в процессе фасонного фрезерования, были получены дифференциальные уравнения вынужденных колебаний системы, находящейся под действием периодической силы. В частности, при фрезеровании стали 40ХФА. со скоростью резания до 1,333 м/с

дифференциальные уравнения для системы стол-салазки в направлении $X - X$:

$$\begin{cases} m_{4x}\ddot{x} + h_{4x}(\dot{x}_4 - \dot{x}_5) + j_{4x}(x_4 - x_5) = 0,125Bt_{\phi}^{0,39}s_z^{0,69}V^{-0,19} \cdot \\ \cdot (-0,17 \cos \tau - 0,22 \sin \tau - 0,10 \cos 2\tau - 0,033 \sin 2\tau - 0,047 \cos 3\tau) \\ m_{5x}\ddot{x}_5 + (h_{5x} + h_{4x})\dot{x}_5 + (j_{5x} + j_{4x})x_5 - h_{4x}\dot{x}_4 - j_{4x}x_4 = 0 \end{cases}$$

Для системы стола в направлении $Z - Z$:

$$m_{4z}\ddot{z} + h_{4z}\dot{z} + j_{4z} = 0,619Bt_{\phi}^{3,26}s_z^{0,9}V^{-0,19} \cdot 10^{-2}(-0,31 \cos \tau - 0,39 \sin \tau - 0,17 \cos 2\tau - 0,06 \sin 2\tau - 0,08 \cos 3\tau)$$

$$m_{4x}\ddot{z} + h_{4z}\dot{z} + j_{4z} = 0,619Bt_{\phi}^{3,26}s_z^{0,9}V^{-0,19} \cdot 10^{-2}(-0,31 \cos \tau - 0,39 \sin \tau - 0,17 \cos 2\tau - 0,06 \sin 2\tau - 0,08 \cos 3\tau)$$

Аналогичные уравнения были получены для случаев обработки стали 40ХФА при скорости резания больше 1,33 м/с и для обработки сплава ВТ22.

Для решения уравнений, была составлена программа расчета на ЭВМ амплитудно- и фазово-частотных характеристик систем в зависимости от технологических параметров обработки. В качестве примера на рис. 4 представлены результаты для случая обработки сплава ВТ22 со следующими режимами: ширина фрезерования $B = 34,4$ мм; глубина фрезерования $t_{\phi} = 3$ мм; подача на зуб $s_z = 0,097$ мм/зуб; скорость резания $V = 0,565...3,39$ м/с. Сплошными линиями представлены теоретические, а прерывистыми - экспериментальные амплитудно-частотные характеристики системы стол-салазки в направлении $X-X$ (а) и стола в направлении $Z-Z$ (б).

Как видно из рисунка, колебательное движение системы стол-салазки определяется в основном первой гармонической составляющей силы резания. Явно выраженные максимумы амплитуд колебаний соответствуют резонансным значениям частот. При назначении режимов резания следует принимать

во внимание область динамического гашения колебаний в направлениях $X-X$ и $Z-Z$.

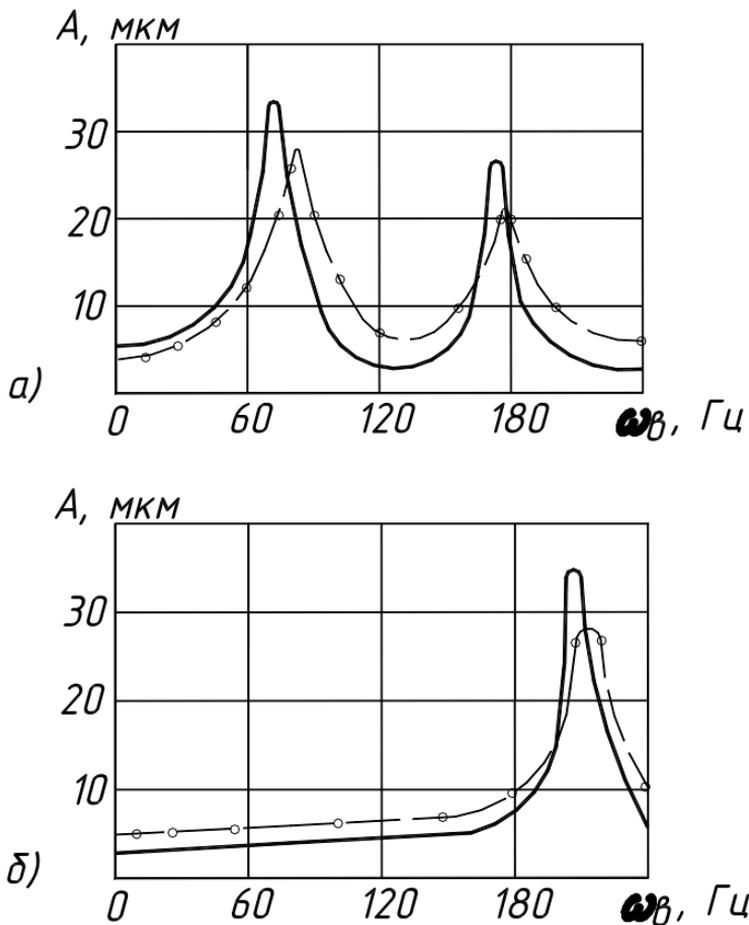
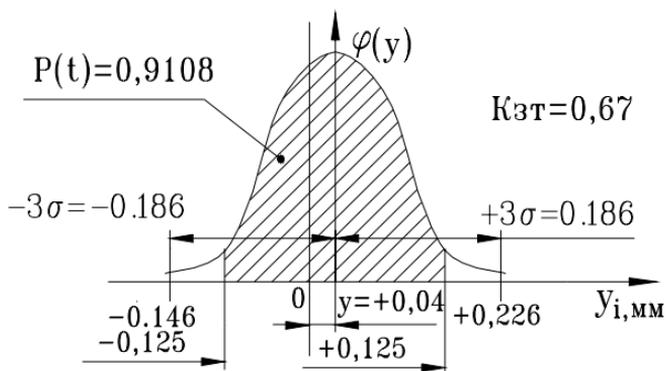


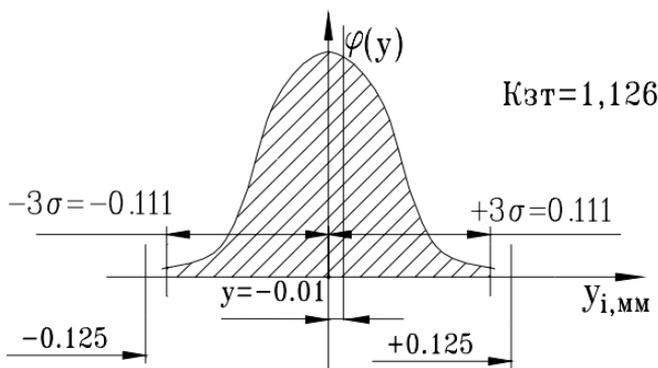
Рис. 4

Проектирование технологических процессов производится при допущении, что в используемых технологических системах обеспечивается устойчивое резание. Колебания влияют на все геометрические параметры поверхности. В работе проведено сравнение точности обработки существовав-

на уровень вынужденных колебаний. На рис. 5, в качестве примера представлены результаты исследования точности размеров глубины одного из пазов: а) для деталей существовавшего технологического процесса; б) для деталей модернизированного технологического процесса.



а)



б)

Рис. 5

Как видно из приведенного рисунка, в результате применения предложенных мероприятий была устранена вероятность получения брака и обеспечен коэффициент запаса точности больше единицы. В отдельных случаях обеспечивалось повышение точности размеров на 1..2 качества. Погрешно-

сти формы и взаимного расположения уменьшались на 0,5...1 степень точности. Волнистость снижалась на 50...60 % и шероховатость на 35...55%.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов, полученных в работе, можно сделать следующие выводы.

1. Экспериментальным путем установлено влияние технологических параметров обработки на нелинейную характеристику силы резания. Разработана методика, позволившая рассчитывать составляющие силы резания при фрезеровании фасонными фрезами, имеющими произвольное очертание профиля режущих зубьев. Получены эмпирические формулы для расчета составляющих силы резания при фрезеровании стали 40ХФА и сплава ВТ22 исследуемыми фрезами.

2. Параметры периодических возмущений, амплитуды и фазы составляющих гармоник, определялись с помощью гармонического анализа. Установлено, что для достаточно полного описания периодических возмущений можно ограничиться гармоническим рядом, состоящим из пяти гармоник, причем наибольшее значение имеют первые гармонические составляющие, периоды которых равны угловому шагу зубьев инструмента.

3. Экспериментальными методами были определены параметры технологической системы горизонтально-фрезерного станка 6Н82. Анализ параметров технологической системы показал, что для исследования колебательных процессов, происходящих при резании металлов, необходимо рассмотреть расчетные математические модели, включающие в себя массы стола и салазок в направлении $X - X$, стола в направлении $Z - Z$ и оправки с фрезой в направлениях $X - X$ и $Z - Z$.

4. Анализ движения систем станка на фазовой плоскости показал, что для определения влияния технологических параметров обработки на устойчивость движения необходимо рассмотреть расчетную модель системы оправки с

фрезой в направлениях $X - X$ и $Z - Z$.

5. В результате использования бифуркационных критериев получены аналитические выражения, определяющие в пространстве трех технологических параметров обработки поверхность бифуркации, являющуюся границей режимной области, устойчивой от возбуждения автоколебаний в системе оправки с фрезой при фрезеровании исследуемых материалов. Рассчитаны и графически построены режимные области устойчивого движения системы оправки с фрезой для случаев мягкого и жесткого возбуждения автоколебаний.

6. Вынужденные колебания систем стол-сазакки в направлении $X - X$ и стола в направлении $Z - Z$ рассмотрены от действия полигармонического возмущения. Используя принцип суперпозиции, реакция систем на периодическое возмущение определялась как сумма реакций от воздействия каждой из гармоник. В результате проведенного исследования установлено, что рабочие частоты периодических возмущений при фасонном фрезеровании не достигает резонансных областей, соответствующих собственным частотам рассмотренных систем. Экспериментальная проверка показала правильность выбранных моделей. Результаты работы могут быть использованы при определении режимных областей устойчивости применительно к другим видам обработки, а также применительно к автоматизированному производству.

6. В результате применения предложенных мероприятий была устранена вероятность получения брака и обеспечен коэффициент запаса точности больше единицы. В отдельных случаях обеспечивалось повышение точности размеров на 1..2 квалитета. Погрешности формы и взаимного расположения уменьшались на 0,5...1 степень точности. Волнистость снижалась на 50...60 % и шероховатость на 35...55.%.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Плавник С.Л. Расчет сил резания при фасонном фрезеровании. В кн.: Современное машиностроение: Сборник трудов молодых ученых. Вып.4.-СПб.:Изд. СПИМАШ, 2002. с.77...80.

2. Плавник С.Л. Устойчивость движения ТС при фасонном фрезеровании. В кн.: Автоматизация и информатизация в машиностроении (АИМ 2002). Тезисы докл. междуна. электрон. научн.-техн. конф., Тула. ТулГУ, 2002. с.283...285.

3. Плавник С.Л и др. Устойчивость технологической системы при обработке материалов резанием. В кн.: Формирование технической. политики инновационных технологий. Матер. научн.-практ. конф.Т.І. Спб.: из-дво СПбГПУ, 2002. с. 114...116.

4. Соловейчик А.М., Плавник С.Л., Жуков Э.Л. Исследование вынужденных колебаний и автоколебаний при фасонном фрезеровании. В кн.: Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы VI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. СПб, СПбГПУ, 2002. с 197...198.

5. Мурашкин С.Л., Жуков Э.Л., Плавник С.Л. Математическая модель технологической системы станка при фасонном фрезеровании. В кн.: Научно-технические ведомости СПбГТУ № 1, 2002. с 60...63.

6. Мурашкин С.Л., Соловейчик А.М., Плавник С.Л. Исследование колебаний при фасонном фрезеровании. В кн.: Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы VII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. СПб, СПбГПУ, 2003. с 206...207.

7. Плавник С.Л. и др. Точность обработки при фасонном фрезеровании. В кн.: Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы VII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. СПб, СПбГПУ, 2003. с 211...212.

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Сдано в набор

Подписано к печати

Формат 60 84/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,3. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Издательство СПбГУ, член Издательско-полиграфической ассоциации вузов
Санкт-Петербурга

Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая 29