

На правах рукописи

Пепельшев Александр Владимирович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ГЛУБОКИХ ПАЗОВ МЕТОДОМ РАСТРОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ
НА СТАНКАХ С ЧПУ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рыбинск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель:

Макаров Владимир Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Официальные оппоненты:

Грубый Сергей Витальевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Инструментальная техника и технологии» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана».

Рябов Альберт Николаевич, кандидат технических наук, декан заочного факультета ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа

Защита диссертации состоится «30» ноября 2016 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.210.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва» по адресу: 152934, г.Рыбинск, ул.Пушкина, д.53, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва», <http://www.rsatu.ru/>

Автореферат разослан «27» сентября 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,

Надеждин Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Детали с точными глубокими пазами входят в состав многих запорно-регулирующих устройств трубопроводов, высоконапорных систем охлаждения, а также узлов специзделий. При этом наибольшие проблемы возникают при технологическом обеспечении требуемых параметров точности формы и шероховатости плоских поверхностей глубоких пазов. В частности, при изготовлении прямоугольного глубокого паза в корпусной детали, входящей в состав специзделия возникают трудности с обеспечением таких требований конструкторской документации, как отклонение от плоскостности и параметр шероховатости поверхности Ra .

От точности изготовления сопрягаемых поверхностей во многом зависит надёжность и безотказность работы ответственного узла, поскольку при работе изделия в рассматриваемый паз входит клиновидная деталь, упирающаяся в поддон, который запирает выход пороховым газам. Условия работы узла в значительной степени определяют повышенные требования к характеристикам сопрягаемых плоских поверхностей.

В условиях единичного и мелкосерийного производства обработка подобных глубоких пазов корпусных деталей, как правило, включает операции сверления, фрезерования, долбления, шлифования и ручного шабрения. Требуемые параметры формы (отклонение от плоскостности 0,05 мм) и шероховатости поверхности $Ra \leq 0,8$ мкм обеспечиваются методом ручного шабрения. Доля финишной обработки в общей трудоемкости изготовления детали может составлять до 90%. Попытки автоматизации процесса доводки поверхностей глубоких пазов корпусных деталей, предпринимаемые на многих предприятиях, не увенчались успехом ввиду недостаточной жёсткости технологической системы и большого вылета обрабатываемого инструмента.

Решение данной технологической проблемы возможно посредством применения метода растрового фрезерования на станках с ЧПУ. На текущий момент времени в области исследования процесса растрового фрезерования плоских поверхностей практически отсутствуют научные работы по установлению основных закономерностей и взаимосвязей между технологическими параметрами процесса обработки и параметрами качества обработанной поверхности.

Поэтому автоматизация финишной обработки плоских поверхностей глубоких пазов деталей специзделий в целях стабильного обеспечения требований конструкторской документации является **актуальной научной и производственной задачей**.

Цель работы заключается в технологическом обеспечении параметров точности и шероховатости плоских поверхностей глубоких пазов корпусных деталей методом растрового фрезерования на станках с ЧПУ.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих **задач**:

- 1) разработать математический аппарат для управления кинематикой процесса растрового фрезерования;

2) разработать математическую модель процесса растрового фрезерования плоских поверхностей глубоких пазов корпусных деталей, устанавливающую взаимосвязь между режимами резания, параметрами растровой траектории и отклонением от плоскостности, параметром шероховатости поверхности Ra ;

3) разработать методику проведения экспериментальных исследований процесса растрового фрезерования;

4) выполнить экспериментальное исследование влияния режимов резания и параметров растровой траектории на формируемое отклонение от плоскостности и параметр шероховатости поверхности Ra ;

5) решить оптимизационную задачу по выбору параметров обработки, обеспечивающих заданные значения отклонения от плоскостности и параметра шероховатости поверхности Ra с максимальной производительностью;

б) разработать технологические рекомендации для практического применения в производстве метода растрового фрезерования глубоких пазов корпусных деталей на станках с ЧПУ.

Научная новизна

- Разработан математический аппарат, позволяющий обеспечить постоянство мгновенных скоростей и ускорений инструмента вдоль растровой траектории движения инструмента.

- Установлены закономерности формообразования плоской поверхности в процессе растрового фрезерования в виде математической модели, устанавливающей взаимосвязь между плотностью и углом наклона сетки растровой траектории, режимами резания, геометрией инструмента, исходными характеристиками обрабатываемой поверхности и отклонением от плоскостности и параметром шероховатости поверхности Ra .

- Разработан алгоритм оптимизации режимов растрового фрезерования для обеспечения требуемых значений отклонения от плоскостности и параметра шероховатости поверхности Ra плоских поверхностей глубоких пазов корпусных деталей.

Практическая ценность работы

- Разработан программный продукт на языке $C\#$ в среде *Microsoft Visual Studio* на платформе *.NET Framework*, предназначенный для расчёта производственных параметров процесса растрового фрезерования в условиях механического цеха на этапе технологической подготовки производства.

- Разработаны технологические рекомендации по повышению производительности и точности финишной обработки плоских поверхностей пазов деталей специзделий за счёт внедрения растрового фрезерования, обеспечивающие стабильные шероховатость $Ra \leq 0,8$ мкм и отклонение от плоскостности $\Delta < 0,05$ мм.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Математический аппарат управления кинематикой растрового фрезерования, обеспечивающий постоянство абсолютных значений мгновенных скоростей и ускорений инструмента вдоль растровой траектории.

- Математическая модель процесса растрового фрезерования, учитывающая неравномерность съёма металла.

- Закономерности влияния угла наклона и плотности сетки растровой траектории на точность формы и шероховатость обработанной поверхности.
- Алгоритм оптимизации режимов обработки плоских поверхностей глубоких пазов корпусных деталей с применением ЛП_τ-метода.

Методы исследования. Теоретические исследования базируются на основных положениях технологии машиностроения, теоретической механики, теории резания металлов, теории множеств, интегрального и дифференциального исчисления, методов математического и компьютерного моделирования. Компьютерное моделирование проводилось в разработанном автором программном продукте. Экспериментальные исследования проводились в ПАО «Мотовилихинские заводы» с использованием методов математической статистики. Измерения проводились с применением аттестованных средств измерений.

Достоверность результатов достигается за счёт использования апробированных математических зависимостей, известных математических методов и подтверждается согласованием результатов эмпирических и теоретических исследований, а также внедрением результатов исследований в специальном машиностроении при обработке детали типа «Корпус».

Реализация работы. Результаты работы внедрены на ПАО «Мотовилихинские заводы», что позволило сократить трудоёмкость изготовления паза на 50% при обеспечении требуемых параметров качества. Материалы диссертации используются в учебном процессе при изучении дисциплин «Технология машиностроения», «Резание материалов» в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы освещены на конференциях: МНТК «Производительность и надежность технологических систем в машиностроении» посвящен.85-лет со дня рожд. заслуж. работника высш. школы РФ, д.т.н., проф. Волчкевича Л.И., Москва, 2015 г., Промэкспо-2015, Уфа, 2015 г., XV Всероссийская НТК «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации», Пермь, 2014г., Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: VI МНТК, 23 - 26 сентября 2014 г., Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении, Одесса, 2013 г., XX Междунар. НТК «Машиностроение и техносфера XXI века», Севастополь, 2013 г. За разработку метода растрового фрезерования глубоких пазов автор был отмечен дипломом Министра промышленности, предпринимательства и торговли Пермского края на выставках «Металлообработка - сварка», Пермь, 2014, 2015, 2016 гг.

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 11 статьях, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения и пяти глав, заключения, списка использованных источников из 104 наименований и 3 приложения, включает 159 страниц машинописного текста, 91 ил., 29 табл.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационной работы. Сформулированы положения, выносимые на защиту, научная новизна и практи-

ческая значимость работы. Поставлены цель и задачи исследований процесса растрового фрезерования.

В первой главе проводится анализ литературных данных и производственного опыта предприятий по проблеме обработки плоских поверхностей глубоких пазов корпусных деталей.

Одной из наиболее ответственных деталей специзделия является корпусная деталь, которая непосредственно испытывает воздействие от давления газов при работе изделия, поэтому она изготавливается из специальных высоколегированных труднообрабатываемых сталей. Наибольшие технологические проблемы возникают при обеспечении требуемых параметров точности и шероховатости плоских поверхностей прямоугольных пазов.

Технология обработки глубоких пазов корпусных деталей в условиях единичного и мелкосерийного производства включает операции сверления, фрезерования, долбления, шлифования и ручного шабрения. Общая трудоемкость обработки паза с размерами 172x122x330 мм составляет до 30 часов. При этом шлифованием не удастся получить требуемую шероховатость $Ra \leq 0,8$ мкм и значение отклонения от плоскостности менее 0,05 мм. Анализ опыта предприятий оборонно-промышленного комплекса показал, что вместо шлифования может применяться операция протягивания, что сокращает время обработки на 30%, однако, и в этой технологии присутствует трудоёмкая операция шабрения, требующая высокой квалификации работника и не обеспечивающая стабильный результат.

В результате анализа работ отечественных и зарубежных учёных установлено, что вопросами обеспечения качества обработанной поверхности занимались М.М. Аршанский, В.Ф. Безъязычный, В.И. Гузеев, С.В. Грубый, В.А. Данилов, С.Н. Корчак, В.А. Кривоухов, В.А. Прилуцкий, П.Р. Родин, А.Г. Суслов, П.Л. Чебышев, Baek D.K., Benardos P.G., Chen J.C., Ehmman K.F., Lee K.Y., Thomas M. и др.

Обеспечение параметров точности и шероховатости плоских поверхностей возможно различными способами: фрезерованием, шлифованием, хонингованием, растровой доводкой.

Выдвинута гипотеза технологического обеспечения точности и шероховатости поверхности путём растрового фрезерования плоских поверхностей глубоких пазов корпусных деталей. Точность формы обеспечивается за счёт равномерного перераспределения колебаний технологической системы по всей обрабатываемой поверхности, шероховатость – за счёт самопересечения траектории движения инструмента и перерезании следов обработки.

В области абразивной обработки поверхностей изучением фигур Лиссажу (растровой кинематики) занимались А.И. Лурье, В.П. Некрасов; Ю.М. Ермаков предложил метод фрезестрогания.

Во второй главе представлено теоретическое описание процесса растрового фрезерования плоских поверхностей глубоких пазов корпусных деталей и выполнено его математическое моделирование.

При растровом методе фрезерования ось инструмента перемещается по фигуре Лиссажу:

$$\begin{cases} x = A \sin(\omega_1 \cdot T) \\ y = B \sin(\omega_2 \cdot T + \varphi_0) \end{cases}, \quad (1)$$

где A, B – амплитуды колебаний инструмента; ω_1, ω_2 – частоты складываемых колебаний по осям; φ_0 – сдвиг фаз; T – параметр траектории.

На рисунке 1 фреза 1 диаметром D , вращаясь с частотой n , выходит в плоскость обработки шириной Lb и длиной L и начинает своё движение с отрицательного параметра траектории T , подобранного таким образом, чтобы рабочая подача S включалась за пределами заготовки 2. Это позволяет исключить «зарез» в центре раstra (что происходит при нулевом начальном значении параметра T) и вести обработку торцевыми фрезами, т. к. врезание осуществляется с радиальной подачи, а не по центру раstra с осевым врезанием. При вращении фрезы и относительном перемещении инструмента по фигуре Лиссажу 3 с углом сетки γ , размерами $2A \times 2B$, траектория движения вершины режущего лезвия представляет собой гипоциклоиду 4.

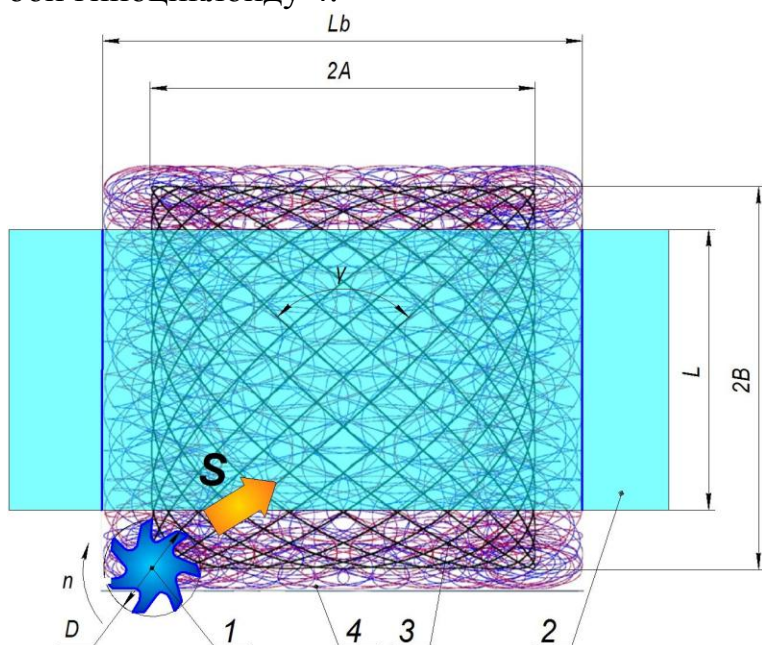


Рисунок 1 – Схема обработки паза

При линейном изменении параметра траектории функции изменения скорости и ускорения перемещения инструмента носят гармонический характер, что приводит к неравномерности подачи, и следовательно к значительным изменениям шероховатости поверхности.

Для получения однородной шероховатости поверхности заменим параметр T функцией от времени, обеспечивающей постоянную скорость движения инструмента. Эта функция определяется из интегрального уравнения:

$$\frac{S_M \cdot t}{60} = \int_0^{T(t)} \sqrt{(A\omega_1 \cos(\omega_1 t_1))^2 + (B\omega_2 \cos(\omega_2 t_1 + \varphi_0))^2} dt_1, \quad (2)$$

где S_M – минутная подача; t – время обработки; t_1 – параметр интегрирования.

В отличие от классических интегральных уравнений неизвестная функция $T(t)$ в уравнении (2) расположена в пределе интегрирования. Автором предложено решить данную задачу численно: разобьём весь исследуемый интервал на K равных частей (узлов), составим в каждом узле интегральное уравнение (2), интегральное выражение заменим конечными суммами по методу Симпсона. Полученное уравнение решаем методом секущих. Таким образом интегральное уравнение (2) решено как система K интегральных уравнений с последующей аппроксимацией функцией:

$$T = a_0 \cdot t + a_1 \cdot \sin(a_2 \cdot t + a_3), \quad (3)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 – коэффициенты.

Для определения отклонения от плоскостности и параметра шероховатости поверхности Ra найдём соотношения, описывающие колебания системы в вертикальной плоскости. Для моделирования вертикальных колебаний технической системы применено уравнение Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial q_i} + \frac{\partial E_{II}}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i, i = \overline{1, n} \quad (4)$$

где E_K – кинетическая энергия системы; q_i – обобщённая координата; \dot{q}_i – обобщённая скорость; E_{II} – потенциальная энергия системы; Φ – диссипативная функция Релея; Q_i – обобщённая сила; n – число степеней свободы системы; t – время; i – номер обобщённой координаты.

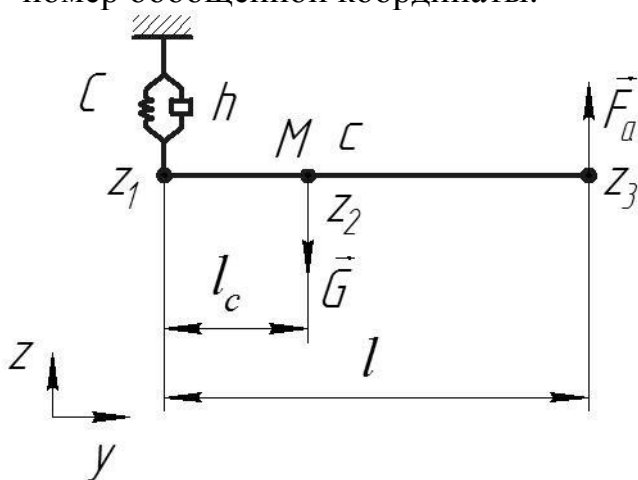


Рисунок 2 – Динамическая модель технологической системы

На рисунке 2 M – масса системы; F_a – осевая составляющая силы резания; G – вес системы; C – жёсткость системы крепления; c – центр масс; h – коэффициент демпфирования системы крепления; z_1 – вертикальное перемещение шпинделя; z_2 – вертикальное перемещение центра масс; z_3 – вертикальное перемещение инструмента; l – длина угловой головки; l_c – расстояние до центра масс. Для нахождения энергий системы, диссипативной функции Релея и обобщённых сил построена

динамическая модель технической системы. Станок представлен как неподвижная заделка, а место крепления – в виде упруго-диссипативного элемента.

Подставив в уравнение (4) выражения, найденные из динамической модели, дифференцировали и получили систему дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} C \cdot z_1 + h \cdot \dot{z}_1 = F_a \left(\frac{l-l_c}{l_c} \right) \\ m \cdot \ddot{z}_2 = F_a \left(\frac{-l}{l_c} \right) - G \end{cases} \quad (5)$$

Под действием силы резания и собственного веса угловая головка изгибается, что отражается на значениях отклонения от плоскостности и параметра шероховатости поверхности Ra . Из-за большого вылета инструмента этим влиянием пренебречь нельзя. Угловая головка условно представлена в виде балки переменного сечения (рисунок 3), а задача определения прогиба решена при помощи интеграла Мора:

$$\delta = \int_0^l M_{xF} \frac{\overline{M_x}}{EI_x} dy \quad (6)$$

где δ – прогиб балки в точке K ; M_{xF} – изгибающий момент в исходной балке; $\overline{M_x}$ – изгибающий момент во вспомогательной балке; E – модуль упругости; I_x – момент инерции.

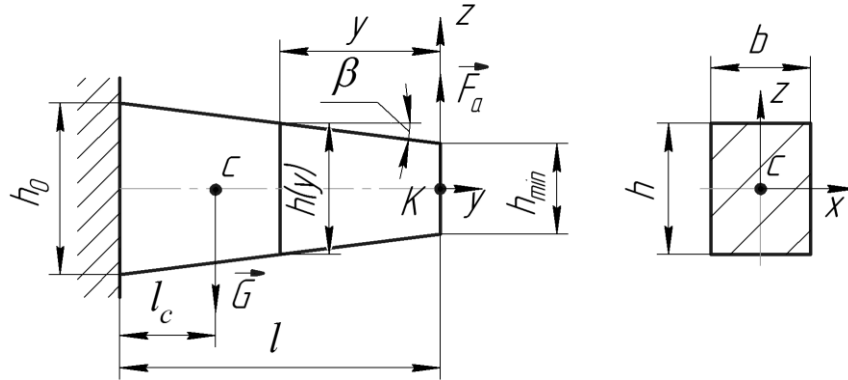


Рисунок 3 – Расчётная схема нагружения фрезерной угловой головки, где $h(y)$ – функция высоты балки; y – координата рассматриваемого сечения; h_{min} – минимальная высота балки; h_0 – высота балки в «заделке»; b, h – размеры сечения балки; β – угол наклона продольного сечения балки; K – точка приложения единичной силы.

После расчёта геометрических характеристик угловой головки и ряда математических преобразований получаем равенство:

$$\delta = \int_0^{l-l_c} \frac{12 \cdot F_a \cdot y^2}{E \cdot b \cdot (h_0 - 2 \cdot y \cdot \operatorname{tg} \beta)^3} dy + \int_0^{l_c} \frac{12 \cdot F_a \cdot (y + (l - l_c))^2 - 12 \cdot G \cdot y \cdot (y + (l - l_c))}{E \cdot b \cdot (h_0 - 2 \cdot y \cdot \operatorname{tg} \beta)^3} dy \quad (7)$$

С учетом прогиба фрезерной угловой головки положение инструмента определяется по формуле:

$$z_3 = z_1 \left(\frac{l - l_c}{l_c} \right) + z_2 \left(\frac{-l}{l_c} \right) + \delta \quad (8)$$

Для расчёта интеграла необходимо найти осевую составляющую силы резания. Определим объём срезаемого материала.

Представим исходную поверхность как совокупность элементарных параллелепипедов (ЭП) (рисунок 4) и определим объём снимаемого материала W за время dt (8).

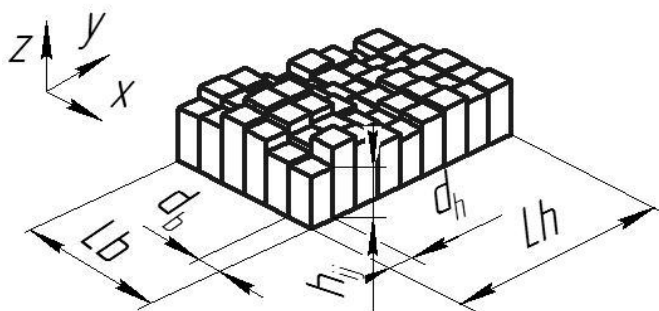


Рисунок 4 – Исходная поверхность заготовки, где: Lh, Lb – размеры паза; d_b, d_h, h_{ij} – размеры ЭП.

$$W = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m d_b \cdot d_h \cdot (h_{ij} - f(z_3)), ij \in U \quad (9)$$

где: n, m – количество разбиений по осям x, y ; $f(z_3)$ – функция описывающая геометрию режущей кромки; U – множество ЭП, находящихся в зоне резания.

Множество ЭП в зоне резания за произвольный промежуток времени описывается соотношением:

$$U = \left((x_{ij} - x_3)^2 + (y_{ij} - y_3)^2 \leq \frac{D^2}{4} \right) \cap (y_{ij} \geq x_3 + (x_{ij} - x_3) \cdot \operatorname{tg} \psi_k) \cap (y_{ij} \leq x_3 + (x_{ij} - x_3) \cdot \operatorname{tg}(\psi_k + d\psi)) \cap (h_{ij} > f(z_3)) \quad (10)$$

где D – диаметр инструмента; ψ_k – угол, определяющий мгновенное положение вершины k -го зуба; $d\psi$ – угол поворота режущей кромки за время dt .

Заменим выражение для площади срезаемого слоя в формуле, предложенной Ю.А. Розенбергом, частным найденного соотношения (9), для условия бесконечно малых элементарных параллелепипедов, и углового перемещения вершины зуба фрезы:

$$F_a = U_{\text{пр}} \cdot \cos \varphi_{\text{пр}} \frac{\iint (h_{ij} - f(z_3)) dx dy}{\pi \cdot D \cdot n \cdot dt} \quad (11)$$

где $U_{\text{пр}}$ – удельная сила резания по передней поверхности; $\varphi_{\text{пр}}$ – угол, определяющий положение плоскости схода стружки по передней поверхности инструмента.

На основе вышеизложенного получена математическая модель процесса растрового фрезерования плоских поверхностей глубоких пазов корпусных деталей (рисунок 5).

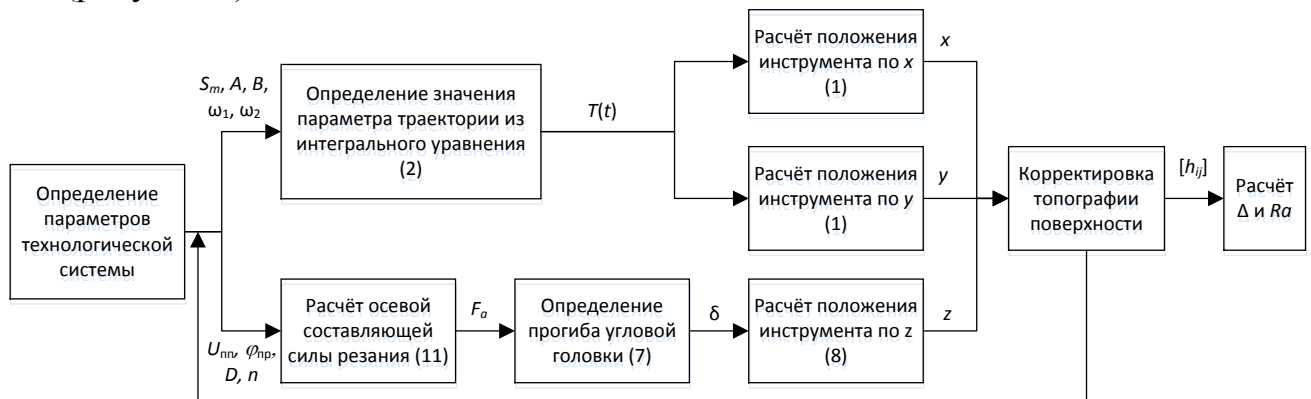


Рисунок 5 – Структура математической модели процесса растрового фрезерования плоских поверхностей глубоких пазов корпусных деталей

При составлении математической модели были приняты следующие допущения: пренебрегаем кинетической энергией вращения инструмента; учитываем колебания системы только в вертикальной плоскости; массу системы считаем сосредоточенной в центре масс; пренебрегаем влиянием обрабатываемого материала на заднюю поверхность; влиянием температуры пренебрегаем; геометрию инструмента в процессе обработки считаем постоянной; аппроксимируем реальную поверхность элементарными параллелепипедами; условием снятия металла считаем ненулевой припуск.

Математическая модель применима для описания концевого и торцевого растрового фрезерования в интервале режимов резания с отсутствием эффекта образования нароста на передней поверхности инструмента, при относительно небольшом припуске на обработку.

Система интегродифференциальных уравнений решается методом Рунге-Кутты 2-го порядка с автоматическим делением шага пополам. На каждой итерации происходит пересчёт параметров системы, геометрии поверхности и решаются интегральные уравнения. По полученной топографии поверхности рассчитывается отклонение от плоскостности и, при более мелкой дискретизации - параметр шероховатости поверхности Ra . Для реализации алгоритма выбрана среда разработки *Visual Studio 2008* и технология *Windows.Forms*.

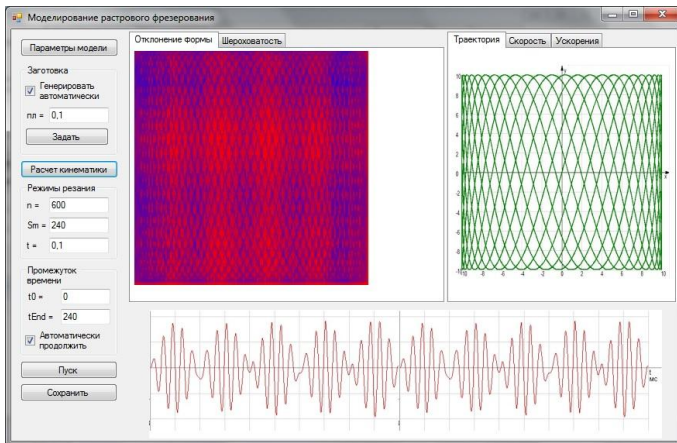


Рисунок 6 – Результаты моделирования

Как видно из результатов моделирования (рисунок 6) происходит «завал краёв» на детали. Этот же эффект наблюдается и при экспериментальном исследовании растрового фрезерования, но его удалось устранить путём вывода данной зоны за пределы обрабатываемой поверхности.

В третьей главе предложена методика проведения экспериментальных исследований режимов резания и параметров растровой траектории на отклонение от плоскостности и параметр шероховатости поверхности Ra . Представлена характеристика исследуемых материалов и образцов, технические характеристики и описание оборудования, методики проведения измерений и план эксперимента.

Материалом корпусной детали является специальная сталь – аналог 38ХНЗМФА. Твёрдость материала после термообработки составляет 35 HRC. Высокая твёрдость накладывает повышенные требования к стойкости режущего инструмента и к жёсткости технологической системы.



Рисунок 7 – Угловая фрезерная головка

Программное обеспечение (рисунок 6) разработано на языке *C#* на платформе *.NET Framework*. Оно позволяет рассчитать отклонение от плоскостности и параметр шероховатости поверхности Ra и применяется для проектирования процесса растрового фрезерования на этапе технологической подготовке производства в цехе. Изображение поверхности показано в плоскости XY , а цветом отображается координата Z (чем больше значение координаты, тем краснее элемент).

Экспериментальное исследование проводилось в лабораторных и производственных условиях. Для реализации ортогонального композиционного плана был выбран фрезерный станок *Emco Concept Mill 155*, а для экспериментов в производственных условиях – пятикоординатный фрезерный обрабатывающий центр *Matec 40HV* с установленной в нём угловой фрезерной головкой *BENZ WWX 07 HSK 100 ER32* (рисунок 7). Обработка проводилась торцевой фрезой фирмы *Seco*

R220.69-0063-09-8AN, оснащённой восемью пластинами XOMX090308TR-ME06 F40M.

Измерения отклонения формы проводились на координатно-измерительной машине Carl Zeiss Accura 2, а для контроля параметра шероховатости поверхности Ra применялся профилограф-профилометр Mitutoyo SJ-210.

При планировании эксперимента выбраны две группы факторов:

- 1) параметры траектории перемещения инструмента - угол γ и плотность сетки q ;
- 2) режимы резания: скорость резания V , подача на зуб S_z , глубина резания t .

В качестве откликов примем: y_1 - отклонение от плоскостности; y_2 - параметр шероховатости поверхности Ra . Использован ортогональный композиционный план эксперимента, позволяющий описать квадратичную зависимость с минимальным количеством экспериментов.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию влияния режимов резания и параметров растровой траектории на отклонение от плоскостности и параметр шероховатости поверхности Ra . Проведён сравнительный анализ результатов обработки по прямолинейной и растровой траектории.

По методике, изложенной в третьей главе проведены экспериментальные исследования влияния режимов резания и параметров траектории на отклонение от плоскостности и параметр шероховатости поверхности Ra .

Установлено, что на параметр шероховатости поверхности Ra наибольшее влияние оказывает плотность сетки, а на отклонение от плоскостности – угол наклона сетки (рисунок 8). Выявлено, что отклонение угла наклона сетки от значения $\gamma = 90^\circ$ приводит к перераспределению локальной плотности вдоль поверхности и возникновению краевых эффектов.

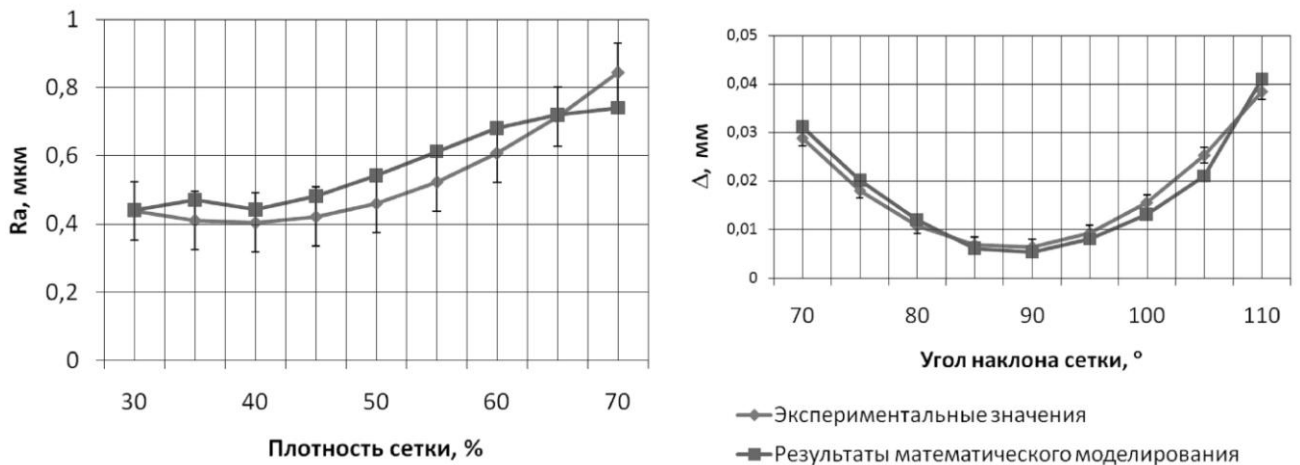


Рисунок 8 – Влияние параметров растровой траектории на параметры точности

По результатам обработки результатов экспериментальных исследований построены регрессионные модели, устанавливающие взаимосвязь между отклонением от плоскостности, параметром шероховатости Ra и параметрами растровой траектории, углом и плотностью сетки:

$$\begin{cases} \Delta = 0,523 - 0,012\gamma + 0,00025q + 0,000068\gamma^2 \\ Ra = 3,617 - 0,0615\gamma - 0,0265q + 0,00037\gamma^2 + 0,00045q^2 - 0,000093 \cdot \gamma \cdot q \end{cases} \quad (12)$$

и режимами резания:

$$\begin{cases} \Delta = -0,099 + 0,001V + 1,735S_z + 0,123t - 0,014VS_z - 0,001Vt \\ -1,875S_z t + 0,023VS_z t \\ Ra = 1,58 - 0,011V - 25,35S_z - 2,688t + 510,0 \cdot S_z^2 + 0,0375V \cdot S_z + 0,027V \cdot t + \\ 53,75S_z \cdot t - 0,5375V \cdot S_z \cdot t \end{cases} \quad (13)$$

Экспериментально доказано получение стабильно лучшего результата при обработке растровым методом фрезерования. Расхождения регрессионной модели и математической составляют не более 18%, что подтверждает адекватность исходной модели в рамках принятых ограничений.

В пятой главе предлагается методика определения оптимальных параметров обработки и описание разработанного автором программного продукта. Разработаны технические предложения для обработки паза детали типа «Корпус».

Для поиска оптимальных режимов обработки применяем ЛПт-метод (рисунок 9). ЛПт-метод широко используется при решении задач оптимизации с несколькими противоречивыми критериями.

Суть метода заключается в «зондировании» n -мерного пространства факторов. При этом в каждой точке сформированного пространства определяются значения целевой функции.



Рисунок 9 – Алгоритм поиска оптимальных значений режимов резания и параметров траектории

При параметрической оптимизации в качестве факторов принимаем режимы резания и параметры траектории. Целевой функцией является производительность обработки, ограничениями – необходимые отклонение от плоскостности и

параметр шероховатости поверхности Ra . Строим ЛПт-последовательность в единичном гиперкубе. Масштабируем n -мерное пространство в реальные величины факторов. Далее зондируем пространство и в каждой точке последовательности рассчитываем значение целевой функции. Из полученного набора выбираем оптимальный результат.

Алгоритм поиска оптимальных значений режимов резания и параметров траектории реализован в виде программного продукта и используется при проектировании процесса растрового фрезерования в производственных условиях в ПАО «Мотовилихинские заводы». В результате оптимизации были найдены режимы обработки, которые позволили увеличить производительность финишной обработки плоских поверхностей паза в 3,2 раза и снизить общую трудоёмкость обработки паза на 50% при обеспечении требуемого отклонения от плоскостности и параметра шероховатости поверхности Ra .

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации решена важная научная и производственная задача технологического обеспечения параметров точности и шероховатости плоских поверхностей глубоких пазов корпусных деталей методом растрового фрезерования на станках с ЧПУ, имеющая важное народно-хозяйственное значение и повышающая обороноспособность РФ. По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1) Разработан математический аппарат для управления кинематикой процесса растрового фрезерования. Он позволил выявить, что точность формы и однородность шероховатости плоской поверхности при растровом фрезеровании достигается применением траектории движения инструмента в виде модификации фигуры Лиссажу, обеспечивающей постоянство абсолютных значений мгновенных скоростей и ускорений инструмента вдоль траектории.

2) Разработанная математическая модель процесса растрового фрезерования плоских поверхностей глубоких пазов корпусных деталей, позволила установить взаимосвязь между режимами резания, геометрическими параметрами инструмента, характеристиками обрабатываемого материала, жесткостью станка, характеристиками жёсткости фрезерной угловой головки, исходной геометрией поверхности, траекторией перемещения инструмента и отклонением от плоскостности и параметром шероховатости поверхности Ra . Это позволяет на этапе проектирования технологического процесса смоделировать полученные в результате обработки параметры точности и шероховатости поверхности.

3) Разработана методика и технологическое обеспечение проведения экспериментальных исследований процесса растрового фрезерования, что позволило эмпирически оценить влияние параметров процесса на отклонение от плоскостности и параметр шероховатости поверхности Ra .

4) В результате экспериментального исследования влияния режимов резания и параметров траектории на отклонение от плоскостности и параметр шероховатости поверхности Ra получены эмпирические математические модели, которые по-

зволили установить, что отклонение теоретических и экспериментальных значений составляет не более 18%.

5) Теоретическими и экспериментальными исследованиями доказано, что на формирование параметров высоты микронеровностей и отклонение от плоскостности, помимо режимов резания и геометрии инструмента, существенное влияние оказывают параметры растровой траектории, такие как плотность и угол наклона сетки.

6) Решение оптимизационной задачи позволило выбрать значения исследуемых параметров обработки, обеспечивающих необходимое качество поверхности при максимальной производительности с учетом номенклатуры обрабатываемых деталей. Разработан алгоритм и программный продукт для поиска оптимальных режимов обработки, которые позволили определить, что для различных типоразмеров плоских поверхностей рекомендуется использовать угол наклона сетки $\gamma = 90^0 \pm 10^0$, плотность сетки $q = 30..50\%$ от диаметра инструмента.

7) Разработаны технологические рекомендации по обработке паза детали типа «Корпус» и внедрены на ПАО «Мотовилихинские заводы». Это позволило снизить трудоёмкость изготовления паза на 50% и повысить производительность финишной обработки в 3,25 раза. Достигнуто отклонение от плоскостности $\Delta = 0,036$ мм и параметр шероховатости поверхности $Ra = 0,8$ мкм, время обработки плоских поверхностей снизилось с 11,55 н.ч. до 3,56 н.ч. Годовой экономический эффект от внедрения составил 2 772 тыс. руб.

В процессе дальнейшей разработки темы исследования планируется изучить процесс растрового фрезерования фасонных поверхностей, усовершенствовать математическую модель, добавив учёт износа инструмента, температурного фактора и угловых колебаний инструмента.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1) **Макаров, В. Ф.** Повышение точности формы при фрезеровании плоских поверхностей в результате оптимизации параметров траектории [Текст] / Макаров В. Ф., Пепельшев А. В. // Справочник. Инженерный журнал. – 2015 г. – № 3 (216) - С. 6-9.

2) **Пепельшев, А. В.** Растровый метод обработки прецизионных поверхностей [Текст] / В. Н. Анциферов, А. М. Ханов, К. Р. Муратов, Р. А. Муратов, А. В. Пепельшев // Известия самарского научного центра Российской академии наук / Издательство Самарского научного центра РАН. – 2011. – № 1(3) – С.512-519.

3) **Пепельшев, А. В.** Моделирование и натурные испытания шпиндельного узла [Текст] / А. М. Ханов, А. В. Шафранов, А. Е. Кобитянский, А. В. Пепельшев // СТИН. – 2009. – №12. – С.2-5

Публикации в прочих изданиях и сборниках трудов:

4) **Макаров, В. Ф.** Растровый метод фрезерования прецизионных плоскостей [Текст] / В. Ф. Макаров, А. В. Пепельшев // Межвуз. научн. сборник «Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий», на базе выставки «Промэкспо-2015». – Уфа: УГАТУ, 2015. – С. 10-13

5) **Макаров, В. Ф.** Автоматизация обработки плоскостей глубоких пазов методом растрового фрезерования на станках с ЧПУ [Текст] / В. Ф. Макаров, А. В. Пепельшев // Сб. научных трудов МНТК «Производительность и надежность технологических систем в машиностроении» посвящен. 85-лет со дня рожд. заслуж. работника высш. школы РФ, д.т.н., проф. Волчкевича Л.И. 23-25 мая 2015. – Москва-Тула ТулГУ, 2015 – С. 200-205

6) **Макаров, В. Ф.** Растровый метод фрезерования на станках с ЧПУ [Текст] / В. Ф. Макаров, А. В. Пепельшев // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., 23-26 сент. 2014 г.: в 2 ч. / М-во образования и науки Рос. Федерации [и др.]. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – Ч. 1. – С. 222-225.

7) **Макаров, В. Ф.** Разработка управляющей программы для растрового фрезерования с применением методов гибкого программирования [Текст] / В. Ф. Макаров, А. В. Пепельшев // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы научно-технической конф., (22-24 мая 2013 г., г. Одесса) / Ассоц. Технологгов-машиностроителей Украины [и др.]. – Киев: АТМ Украины, 2013. – С. 110-113.

8) **Макаров, В. Ф.** Инновационный подход к решению задачи прецизионной обработки на станках с ЧПУ [Текст] / В. Ф. Макаров, А. В. Пепельшев // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XX междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 16-21 сент. 2013 г. / М-во образования и науки, молодежи и спорта Украины [и др.]. – Донецк: Технополис, 2013. – Т.2 – С. 105-108.

9) **Ханов, А. М.** Экспериментальное исследование динамики шпиндельного узла [Текст] / А. М. Ханов, А. Е. Кобитянский, А. В. Шафранов, А. В. Пепельшев // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. – 2011. – Т. 1, №2 – С.15-21.

10) **Пепельшев, А. В.** Моделирование динамики шпиндельного узла на опорах качения [Текст] / А. В. Пепельшев / Научному прогрессу – творчество молодых: сб. материалов науч. студ. конф. по естественнонауч. и техническим дисциплинам, г. Йошкар-Ола, 17-18 апр. 2009 г.: в 3 ч. Ч. 2/М-во образования и науки Рос. Федерации [и др.]. – Йошкар-Ола: Марийск. гос. техн. ун-т, 2009. – С. 70-72.

11) **Ханов, А. М.** Автоматизированный расчет динамических характеристик узлов технологических систем [Текст] / А. М. Ханов, А. Е. Кобитянский, А. В. Шафранов, А.В. Пепельшев / Перспективные технологии и материалы: материалы междунар. науч.-техн. конф., [Пермь, 24 ноября 2008 г.] / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2008. – С.463-471

Зав. РИО М.А. Салкова

Подписано в печать 26.09.2016 г.

Формат 60×84 1/16. Уч.- изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ _____.

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва (РГАТУ имени П.А. Соловьёва)

Адрес редакции: 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53.

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТУ имени П.А. Соловьёва
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53.