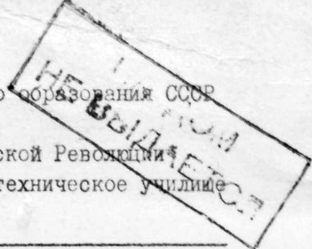


М472390

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
им. Н.Э.Баумана



На правах рукописи

Пашинцев Аркадий Иванович

УДК 621.914.1

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
СО СЛОЖНЫМИ КРИВОЛИНЕЙНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ
НА ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

05.02.08 - Технология машиностроения

05.03.01 - Процессы механической и физико-
химической обработки и инструменты

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва - 1987

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - к.т.н., доцент Мельников Г.Н.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор Султан-Заде Н.М.,
к.т.н., доцент Стародубов В.С.

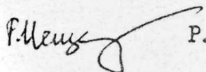
Ведущее предприятие - ПО АВТОЗИЛ

Защита диссертации состоится "18" Завары 1988 г.
в 14³⁰ на заседании специализированного Совета К 053.15.15 в
Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им.
Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью, просьба
выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ
им. Н.Э. Баумана.

Автореферат диссертации " _____ " 1987 г.

 Р.К. Мещеряков

26.II.1987г. Тираж 100 экз.

И типография МВТУ им. Н.Э. Баумана

M472390

Актуальность. Одной из характерных черт современного производства является увеличение выпуска изделий, имеющих сложную объемную форму. К ним относятся изделия самолето-, судостроения, энергомашиностроения, и др., а также формообразующая оснастка (штампы, пресс-формы, металлические модели для точного литья и т.п.). Процессам изготовления деталей с криволинейной формой свойственна высокая трудоемкость при значительной доле ручного труда.

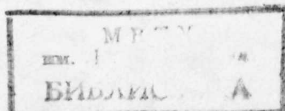
Перспективным методом изготовления таких деталей является обработка на станках с ЧПУ концевыми радиусными фрезами при автоматизированной подготовке управляющих программ. Использование станков с ЧПУ позволило автоматизировать значительную часть работ, однако трудоемкость доводочных операций остается еще большой. Во многом это объясняется недостаточной точностью фрезерования. Кроме того, высока трудоемкость обработки на самих станках с ЧПУ.

Современные системы автоматизированной подготовки управляющих программ оставляют за технологом обязанность выбора параметров режима резания, в частности подачи на зуб. Она назначается, как правило, постоянной для всей поверхности. Изменение в широких пределах условий обработки приводит к тому, что на отдельных участках криволинейной поверхности не выполняются требования по точности, а на других остается резерв повышения производительности. Фрезерование с переменной подачей повышает эффективность станков с ЧПУ.

В настоящее время при фрезеровании криволинейных поверхностей произвольной формы не используются возможности станков с ЧПУ выполнять обработку по скорректированной траектории. Введение предсказания позволяет значительно повысить точность и производительность фрезерования.

На трудоемкость обработки большое влияние оказывает подача на строку. Необоснованное назначение ее величины приводит либо к чрезмерному увеличению трудоемкости фрезерования за счет увеличения количества строк обработки, либо к повышению трудоемкости доводочных работ за счет увеличения гребешков на поверхности после фрезерования.

Объем доводочных работ по повышению точности криволинейной



поверхности может быть сокращен путем изменения технологического процесса изготовления детали. Точность может быть повышена в результате дополнительной обработки базовых поверхностей.

Необходимость производства постоянно растущего числа изделий со сложными криволинейными поверхностями и сокращения сроков изготовления требует решения поставленных задач.

Цель работы. Сокращение трудоемкости изготовления сложно-профильных деталей путем совершенствования технологического процесса и более полного использования технологических возможностей фрезерных станков с ЧПУ.

Методы исследования. Применялись следующие методы исследования: расчетно-статистический метод определения точности обработки, методы теории резания металлов, теории вероятностей и математической статистики, аналитической геометрии в пространстве, векторной алгебры, вариационного исчисления, матричного исчисления. Достоверность результатов теоретических исследований проверялась экспериментально в лабораторных условиях. Обработка экспериментальных данных проводилась методами математической статистики.

Научная новизна. 1. Установлена зависимость величины погрешности, возникающей в результате упругих деформаций элементов технологической системы при фрезеровании участка криволинейной поверхности, от величины подачи на зуб, учитывающая стохастический характер сил резания.

2. Установлена зависимость толщины срезаемого слоя и величин составляющих силы резания от направления относительного движения концевой радиусной фрезы и заготовки.

3. Установлено влияние подач на зуб и на строку на суммарное время обработки криволинейной поверхности на станке с ЧПУ и последующих доводочных работ.

4. Получены зависимости, позволяющие определять составляющие суммарного отклонения обработанной поверхности произвольной формы от номинальной: отклонения формы, размера и расположения.

Практическая ценность. Разработан пакет прикладных программ расчета величин подач на зуб и на строку, а также величины коррекции траектории при обработке сложных криволинейных поверхностей концевыми радиусными фрезами на станках с ЧПУ. Разработана программа расчета на ЭВМ величин составляющих суммарного

отклонения обработанной поверхности от номинальной.

Реализация работы. Разработанные программы и методики переданы на машиностроительное предприятие для использования при создании системы автоматизированной подготовки управляющих программ. Ожидаемый экономический эффект от сокращения трудоемкости обработки деталей со сложными криволинейными поверхностями составляет 15 тыс. рублей в год.

Апробация работы. Основные разделы диссертации доложены на научных семинарах кафедры "Технология механо-сборочного производства" МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1983-1987 годах.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация, изложенная на 123 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 глав и общих выводов. Содержит 69 рисунков, список литературы из 95 наименований и 7 приложений. Общий объем работы 217 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Состояние вопроса и задачи исследования.

Повышение эффективности станков с ЧПУ при изготовлении сложнопрофильных деталей связано с повышением точности обработки, что приводит к снижению трудоемкости последующих доводочных работ, и с повышением производительности фрезерования. Анализ показывает, что при использовании концевой инструмента до 80% в общем балансе приходится на погрешности от упругих деформаций, возникающих под действием сил резания. Деформации в значительной степени определяются величиной подачи на зуб S_z . Вопросами определения погрешностей от упругих деформаций элементов технологической системы и влияния их допустимой величины на выбор подачи S_z при фрезеровании криволинейных поверхностей концевыми радиусными фрезами занимались Травин А.И., Егоров С.Н., Батуев В.А. и др. Анализ работ показал возможность совершенствования существующих методик. В них рассмотрены случаи обработки только простых по форме и ориентации в пространстве криволинейных поверхностей, что сильно сужает область их применения. Методики основываются на детерминированных моделях возникновения погрешностей, что уменьшает достоверность получаемых решений.

В них не рассмотрен вопрос введения предсказания в траекторию относительного движения инструмента и заготовки с целью повышения точности (за счет компенсации части погрешностей) и производительности обработки, не рассмотрен вопрос кинематики образования поверхности детали. Существующие методики расчета сил резания не учитывают всех возможных направлений относительного движения инструмента и заготовки или используют в расчетах параметры, экспериментальное определение которых затруднительно.

Анализ баланса погрешностей также показывает, что ряд погрешностей, возникающих при обработке на станке с ЧПУ, может приводить к смещению обработанной поверхности относительно номинального положения и к выходу за пределы допуска даже в случае достаточно высокой точности формы. Повысить точность криволинейной поверхности, а следовательно, уменьшить объем доводочных работ, можно устранив возникшее смещение путем менее трудоемкой обработки базовых поверхностей детали. Однако существующие методики оценки точности криволинейных поверхностей произвольной формы не позволяют определить величину необходимой доработки.

На трудоемкость фрезерования и доводочных работ большое влияние оказывает подача на строку S_x . По существующим методикам подача S_x определяется исходя из высоты гребешков $\delta_{ор}$, оставляемых радиусной фрезой на поверхности детали, но выбор $\delta_{ор}$ не обосновывается.

На основе проведенного анализа и в соответствии с целью работы определены следующие задачи исследования:

1. Создать модель силового взаимодействия концевой радиусной фрезы с заготовкой произвольной формы, учитывающую все возможные варианты их относительного движения.
2. Разработать алгоритм и программу расчета на ЭВМ параметров сечения срезаемого слоя для случаев обработки участков криволинейной поверхности в виде произвольно ориентированных в пространстве плоскости, сферы, цилиндра или тора.
3. Разработать методику расчета погрешностей, возникающих в результате упругих деформаций элементов технологической системы под действием сил резания, при объемном фрезеровании.
4. Разработать методику коррекции траектории и методику расчета подачи на зуб при работе с коррекцией и без коррекции относительного движения инструмента и заготовки, учитывающую стохастический характер возникающих погрешностей.

5. Разработать методику выбора величины подачи на строку, учитывающую трудоемкость доводочных работ.

6. Разработать методику оценки точности криволинейных поверхностей произвольной формы, позволяющую определять составляющие суммарного отклонения реальной поверхности от номинальной, с целью использования для повышения точности реальной поверхности путем дополнительной обработки базовых поверхностей.

Глава 2. Теоретическое и экспериментальное исследование силового взаимодействия концевой радиусной фрезы и заготовки.

В процессе обработки на зуб фрезы действует сила резания, величина которой зависит от параметров срезаемого слоя. Толщина среза "а" является переменной как по углу поворота зуба вокруг оси фрезы, так и по длине криволинейного лезвия. Кроме того, величина "а" зависит от угла φ , характеризующего наклон обрабатываемой поверхности относительно плоскости, перпендикулярной оси фрезы. Получена формула, позволяющая определять толщину среза, приходящуюся на элементарный участок криволинейного лезвия при его угловом положении θ , в зависимости от угла φ :

$$a = S_z (\sin \varphi \sin \theta \cos \varphi - \cos \varphi \sin \varphi), \quad (I)$$

где φ - угол в плане элементарного участка лезвия. Угол $\varphi \geq 0$ при работе фрезы на подъем, $\angle 0$ при спуске.

При вращении фрезы зубья находятся в контакте с заготовкой в пределах "активной зоны" резания, размеры и форма которой определяются формами заготовки и детали, величиной подачи на строку, направлением движения инструмента. Длина среза, равная длине участка лезвия, участвующего в процессе резания, меняется в пределах "активной зоны". Для определения длины среза разработан единый алгоритм определения размеров, формы и положения "активной зоны" при обработке заготовок в виде произвольно ориентированных в пространстве плоскости, сферы, цилиндра или тора, а также алгоритм расчета координат точек пересечения режущего лезвия с кривыми, ограничивающими "активную зону". Разработанная на основе данного алгоритма программа реализована на ЭВМ ЕС 1022. Знание толщины и длины сечения среза позволяет определить величины составляющих силы резания, действующей на зуб фрезы:

$$P_r = C_r R \int_{\varphi_n}^{\varphi_k} a^{n_1} e^{n_2 \omega R \sin \varphi} d\varphi, \quad (2)$$

$$P_z = C_n R \cdot \int_{\varphi_n}^{\varphi_k} a^{M_1} e^{M_2 \omega R \sin \varphi} \sin \varphi d\varphi, \quad P_o = C_n R \cdot \int_{\varphi_n}^{\varphi_k} a^{M_1} e^{M_2 \omega R \sin \varphi} \cos \varphi d\varphi,$$

где P_z, P_r, P_o - касательная, радиальная и осевая составляющие силы резания; C_r, C_n - коэффициенты, учитывающие свойства материалов заготовки и инструмента, геометрические параметры режущего лезвия; M_1, M_2 - коэффициенты, учитывающие различное влияние толщины среза на касательную и нормальную составляющие силы резания; M_3 - коэффициент, учитывающий влияние скорости резания на силы резания; ω - угловая скорость точек лезвия; R - радиус фрезы; φ_n, φ_k - угловые параметры, определяющие длину и положение рабочего участка режущего лезвия.

Поскольку на режущем лезвии есть точки с нулевой и близкой к ней скоростью резания, то вместо обычно используемой степенной функции для отражения влияния скорости резания на силы использована показательная функция.

Коэффициенты, входящие в формулы (2), определялись экспериментально, используя метод линейной регрессии. К линейному виду уравнения приводились путем логарифмирования. Предварительно интегралы заменялись выражениями вида $A_0 \cdot A_1^{M_1} \cdot A_2^{M_2} \cdot A_3^{M_3}$. Коэффициенты A_i определялись путем аппроксимации значений интегралов в области предполагаемых значений коэффициентов M_1, M_2, M_3 зависимостями данного вида для каждой из используемых в экспериментах схемы обработки. Эксперименты проводились для схем: подъем, спуск, горизонтальная обработка с различным сочетанием углов φ_n, φ_k . Установлено, что силы резания приблизительно пропорциональны $\sqrt{S_z}$, скорость резания оказывает на них слабое влияние. Модель признана адекватной.

Глава 3. Технологическое обеспечение точности и производительности обработки сложных криволинейных поверхностей.

Так как погрешности от упругих деформаций элементов технологической системы являются доминирующими в общем балансе погрешностей, путем их уменьшения можно добиться значительного повышения точности концевое фрезерования. Для оценки влияния на их величину различных параметров режима резания разработана математическая модель их возникновения.

За величину погрешностей от упругих деформаций δ_n принята проекция вектора суммарной деформации $\bar{\delta}_z$ элементов техноло-

гической системы (ТС) на вектор нормали к номинальной поверхности детали в точке обработки. С учетом анизотропии жесткостных свойств ТС:

$$\delta_n = n \rho_n \bar{\delta}_z = \sum_{i=1}^3 (\cos \alpha_x W_{zi1} + \cos \alpha_y W_{zi2} + \cos \alpha_z W_{zi3}) \rho_i, \quad (3)$$

где $\cos \alpha_x, \cos \alpha_y, \cos \alpha_z$ — направляющие косинусы нормали к номинальной поверхности; W_{zji} — элементы матрицы суммарной податливости элементов ТС; ρ_i — проекции силы резания на координатные оси станка.

Сила резания зависит от углового положения фрезы и меняется при ее вращении. В соответствии с этим меняется и величина деформации элементов ТС. В качестве расчетного необходимо принимать значение силы резания, соответствующее угловому положению, при котором вектор нормали к номинальной поверхности в точке обработки лежит в плоскости зуба фрезы. Получена формула для определения указанного угла исходя из расположения обрабатываемого участка поверхности и направления движения фрезы.

Величина погрешности от упругих деформаций является случайной. Многочисленными исследованиями установлено, что вследствие воздействия большого числа разнообразных случайных факторов, распределение величины δ_n подчиняется нормальному закону. Основной причиной, вызывающей разброс значений δ_n от среднего, является стохастическая природа силы резания. Дисперсия σ_{δ}^2 определяется из выражения:

$$\sigma_{\delta}^2 = \sum_{i=1}^3 (\cos \alpha_x W_{zi1} + \cos \alpha_y W_{zi2} + \cos \alpha_z W_{zi3})^2 \sigma_{\rho_i}^2, \quad (4)$$

где $\sigma_{\rho_i}^2$ — дисперсия i -той составляющей силы резания.

Расчет значений σ_{ρ_i} производится по формулам, учитывающим непостоянство механических свойств обрабатываемого материала, непостоянство геометрических параметров и материала режущего инструмента, непостоянство припуска, стохастический характер изменения сил резания в процессе износа фрезы.

Для проверки разработанной модели были проведены экспериментальные исследования. Производилась обработка цилиндрических образцов вдоль криволинейной образующей с последующим измерением на координатно-измерительной машине УМС 850 фирмы Opton (ФРГ). Для различных радиальных сечений цилиндрической поверхности оценивались математические ожидания и дисперсии погрешностей δ_n . С целью выделения δ_n из суммарной погрешности обработки измерение производилось относительно поверхности, получен-

ной при фрезеровании пластины из оргстекла, жестко прикрепленной к образцу.

Эксперименты показали, что на погрешности δ_n и их разброс большое влияние оказывает расположение обрабатываемого участка поверхности. При обработке цилиндрического образца с постоянными параметрами режима резания их значения изменялись до 15 и более раз, возрастая с увеличением угла наклона участка.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало их достаточно хорошую сходимость. Для всех рассматриваемых сечений расчетные значения погрешности δ_n и ее дисперсии находились в доверительных интервалах, построенных по экспериментальным данным. Максимальное отклонение расчетного $\delta_{расч}$ от соответствующего среднего значения $\bar{\delta}_n$ равнялось 23%, расхождения значений $\sigma_{расч}$ от экспериментальных в среднем составляли 30%.

Из анализа разработанной и проверенной экспериментально модели следует, что при заданном припуске погрешность δ_n , а следовательно, и трудоемкость доводочных работ t_d в значительной степени определяются величиной подачи на зуб S_z (через влияние на силу резания), а также зависят от подачи на строку S_x (через влияние на суммарную силу резания, действующую на зубья фрезы). Кроме того от S_x зависит трудоемкость работ по удалению металла, оставляемого радиусной фрезой в виде гребешков на поверхности. Таким образом S_z и S_x являются технологическими параметрами, с помощью которых можно эффективно воздействовать на точность фрезерования и на суммарную трудоемкость обработки криволинейных поверхностей на станке и последующих доводочных работ.

Увеличение подачи S_z вызывает возрастание погрешностей δ_n и увеличивает вероятность превышения ими допустимого значения $[\delta_n]$. Величина подачи, при которой практически исключается возможность выхода δ_n за допустимые пределы, определяется из условия $\delta_{max} = \bar{\delta}_{ср} + 3\sigma_{\delta}$. Однако, при обработке поверхностей с высокими требованиями по точности нежестким инструментом и особенно тех ее участков, где деформация фрезы сильно сказывается на возникающих погрешностях (участки с относительно большим наклоном), данное условие может потребовать проводить фрезерование с очень малыми подачами, значительно снижая этим производительность. Допустив некоторый процент брака, исправимого при последующих доводочных работах, можно увеличить произво-

дительность обработки на станке. Оптимальное значение подачи в этом случае определяется из условия минимума средней суммарной трудоемкости обработки на станке и последующих доводочных работ, приведенной к единице площади обрабатываемого участка поверхности:

$$\bar{t} = \frac{t}{S_z z n S_x} + \frac{\bar{\delta}(s) - [\delta_n]}{v_r} = \min, \quad (5)$$

где v_r — производительность доводочных работ по повышению точности; $\bar{\delta}(s)$ — среднее из значений случайной величины δ_n , превышающих допустимое $[\delta_n]$, определяемое по формуле:

$$\bar{\delta}(s) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \int_{[\delta_n]}^{\delta_{n\max}} \delta_n \rho^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\delta_n - \delta_{ncp}}{\sigma_s} \right)^2} d\delta_n \quad (6)$$

Расчет $S_{зонт}$ производится численными методами на ЭВМ с учетом ограничений, накладываемых прочностью зуба и тела фрезы, максимальным усилием в направлении подачи, моментом на шпинделе, мощностью станка.

При обработке участков поверхности, кривизна которых меньше кривизны инструмента, возможно производить обработку по скорректированной траектории. Во избежании зарезов предсказание должно осуществляться на величину минимально возможных деформаций. Целевая функция в этом случае имеет вид:

$$\bar{t} = \frac{1}{S_z z n S_x} + \frac{\bar{\delta}(s) - [\delta_n] - \delta_{nmin}}{v_r}, \quad (7)$$

где $\delta_{nmin} = \delta_{ncp} - 3\sigma_s$.

Величина $\bar{\delta}(s)$ определяется по формуле (6) при изменении нижнего предела на $[\delta_n] + \delta_{nmin}$. Введение предсказания допускает возникновение больших по сравнению с работой без него деформаций ТС, а следовательно, позволяет производить обработку с большей подачей.

Разработаны алгоритмы и программа на фортране IV для определения величины подачи на зуб при работе без предсказания и с предсказанием траектории.

Для проверки возможности управления точностью фрезерования путем изменения величины S_z , а также путем предсказания траектории проведены экспериментальные исследования. Фрезерование цилиндрических образцов с переменной S_z позволила добиться более равномерного распределения δ_n по длине обработки. При работе без предсказания максимальное значение δ_n уменьшилось

более, чем в 2 раза (с $0,3+0,4$ мм при $S_z = const = 0,05$ мм/зуб до $0,12+0,15$ мм при $S_z = var$), с предскажением - до 5 раз. По сравнению с обработкой без коррекции траектории введение предскажения позволило на участках с большим углом наклона в среднем в 2 раза увеличить подачу на зуб при обеспечении той же точности. В целом для поверхности, с учетом ограничений на максимальное значение S_z , трудоемкость фрезерования снизилась на 25%.

Выбор величины подачи на строку S_x необходимо производить также с учетом трудоемкости доводочных работ. Увеличение S_x , сокращая трудоемкость фрезерования, ведет к повышению трудоемкости доводочных работ по удалению с поверхности детали следов фрезы в виде гребешков. Стремление в максимальной степени уменьшить объем доводки приводит к увеличению количества строк, а следовательно, времени фрезерования. При определении оптимального значения подачи на строку используется целевая функция вида:

$$t = \frac{1}{S_z z n S_x} + \frac{F_{op}}{S_x U_{op}}, \quad (8)$$

где U_{op} - производительность доводочных работ по удалению гребешков; F_{op} - площадь поперечного сечения гребешков, определяемая из геометрических расчетов в зависимости от S_x и радиусов кривизны инструмента и детали.

Функция t имеет экстремальный характер. Оптимальное значение S_x обеспечивает ее минимум. Максимальное S_x ограничено значением, определяемым из максимальной высоты гребешков, равной величине припуска h , минимальное - из величины R_z или другого заведомо малого значения.

Однопараметрическая оптимизация (5), (7), (8) позволяет определить оптимальные значения одного из параметров (S_z или S_x) при неизменном значении другого, не учитывая их взаимовлияния. С помощью машинных экспериментов проведен анализ влияния подачи на строку на оптимальное значение S_z . Установлено, что это влияние зависит от многих параметров: формы и расположения обрабатываемого участка криволинейной поверхности, количества зубьев фрезы, величины припуска, соотношения направлений вращения фрезы и подачи S_x . Вывести аналитическую зависимость S_z от S_x не представляется возможным.

Для определения оптимальных значений S_z и S_x с учетом их

взаимовлияния в качестве целевой функции используется:

$$\bar{t} = \frac{1}{S_z z n S_x} + \frac{\bar{\delta}(s) - [\delta_n]}{v_r} + \frac{F_{cp}}{S_x v_{op}} \quad (9)$$

(при работе с коррекцией траектории второй член в правой части меняется в соответствии с (7)). Разработан алгоритм и программа расчета на ЭВМ оптимальных значений S_z и S_x с учетом их взаимного влияния, включающая в виде отдельных подпрограмм процедуры расчета одного параметра при постоянном значении другого.

Глава 4. Оценка точности обработки сложных криволинейных поверхностей.

В ряде случаев точность сложной криволинейной поверхности, достигнутая при фрезеровании на станке, может быть повышена не путем дополнительной обработки криволинейной поверхности, а путем менее трудоемкой обработки базовых поверхностей. Для определения величины необходимой доработки разработана методика оценки точности криволинейных поверхностей произвольной формы, позволяющая определять составляющие суммарного отклонения реальной поверхности (П) от номинальной (НП): отклонения формы, размера и расположения. Исходной информацией для определения отклонений являются координаты точек НП и координаты точек П, полученные в результате измерения детали (после ее обработки на станке и удаления следов фрезы) на координатно-измерительной машине.

Отклонение формы оценивается относительно средней поверхности (что допускается ГОСТом). Зависимость, связывающая координаты К-той точки НП и соответствующей ей точки К' П, имеет вид:

$$\begin{bmatrix} X_{K'} \\ Y_{K'} \\ Z_{K'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_K \\ Y_K \\ Z_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $[a_{ij}]$ — ортогональная матрица, описывающая разворот в пространстве средней поверхности относительно НП; $[\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^T$ — матрица смещения средней поверхности относительно НП вдоль осей координат; $[\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z]^T$ — матрица отклонений точек П от средней.

Значение элементов матрицы $[a_{ij}]$ и матрицы смещения определяются из условия минимума суммы квадратов отклонений точек П от средней при ограничениях:

$$a_{i1}^2 + a_{i2}^2 + a_{i3}^2 = K^2, \quad a_{i1}a_{j1} + a_{i2}a_{j2} + a_{i3}a_{j3} = 0 \quad (i \neq j),$$

где K — коэффициент растяжения-сжатия средней поверхности.

Используя методы классического анализа и матричного исчисления, получены формулы для определения элементов искомым матриц и коэффициента K , обеспечивающих минимальное отклонение формы Π (наилучшее совпадение Π и Π_1).

Элементы матрицы $[a_{ij}]$ могут быть выражены через углы поворота вокруг осей системы координат, связанной с базовыми поверхностями детали. Предложена схема приспособления для установки детали под нужными углами для дополнительной обработки базовых поверхностей. Эффективность данного метода повышается с увеличением размеров деталей, а также при изготовлении парных деталей типа "матрица-пуансон". В этом случае по результатам замеров обеих половин определяется их относительное смещение и доработка базовых поверхностей производится у одной из них.

Глава 5. Техничко-экономическое обоснование эффективности использования разработанных методик.

Эффективность использования разработанных методик определялась на примере изготовления пресс-форм. Обработка с оптимальными значениями подач позволила снизить трудоемкость фрезерования в среднем на 25%, трудоемкость доводочных работ — на 30%. Ожидаемая годовая экономия составляет 15 тыс. рублей на годовую программу 530 шт. изделий.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. При обработке криволинейных поверхностей концевыми радиусными фрезами доминирующими, являются погрешности от упругих деформаций δ_n . Разработана математическая модель, позволяющая определять величину δ_n при различных условиях обработки поверхностей, имеющих форму произвольно ориентированных плоскостей, цилиндра, сферы или тора.

2. При обработке криволинейных поверхностей условия силового взаимодействия инструмента и заготовки меняются в широких пределах. Погрешности от упругих деформаций на различных участках могут отличаться до 15 раз. Обработка с переменной подачей на зуб позволяет до 2 и более раз уменьшить максимальную величину погрешности и добиться более равномерного распределения δ_n по поверхности.

3. Введение предсказания траектории движения инструмента

позволяет: 1) в 1,5-2,5 раза уменьшить величину погрешности от упругих деформаций при той же подаче на зуб; 2) до 2-х раз увеличить подачу на зуб при обеспечении той же точности и в ряде случаев снять ограничение по точности при расчете величины S_z .

4. Существуют оптимальные значения подач на зуб и на строку, обеспечивающие минимум суммарной трудоемкости обработки криволинейной поверхности на станке с ЧПУ и последующих доводочных работ. Разработана методика расчета S_{zopt} и S_{xopt} , учитывающая стохастический характер возникающих погрешностей δ_n .

5. Объем доводочных работ по повышению точности криволинейной поверхности может быть уменьшен в результате дополнительной обработки базовых поверхностей детали. Разработана методика расчета составляющих суммарного отклонения реальной поверхности произвольной формы от номинальной, позволяющая определять величину необходимой доработки.

6. Ожидаемый экономический эффект от сокращения трудоемкости изготовления деталей со сложными криволинейными поверхностями, достигаемый за счет использования разработанных методик, составляет 15 тыс. рублей в год из расчета на три станка с числовым программным управлением.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Кондаков А.И., Курбатов А.П., Пашинцев А.И. Податливость технологической системы при контурном фрезеровании на станках с ЧПУ // Изв. вузов. Машиностроение. - 1980. - № 10. - С. 155-157.

2. Мельников Г.Н., Кондаков А.И., Пашинцев А.И. К вопросу определения сил резания при контурном фрезеровании // Изв. вузов. Машиностроение. - 1981. - № 1. - С. 126-129.

3. Загоруйко Е.А., Пашинцев А.И. Оценка точности обработки объемных поверхностей // Изв. вузов. Машиностроение. - 1985. - № 5. - С. 101-105.

4. Кондаков А.И., Пашинцев А.И. Крутильная податливость и упругие деформации технологической системы // Изв. вузов. Машиностроение. - 1985. - № 11. - С. 127-131.

5. Пашинцев А.И. Расчет составляющих силы резания при фрезеровании сложных криволинейных поверхностей // Изв. вузов. Машиностроение. - 1986. - № 10. - С. 144-148.

6. Пашинцев А.И. Определение величины подачи при чистовом фрезеровании сложных криволинейных поверхностей // Изв. вузов. Машиностроение. - 1987. - № 1. - С. 148-154.

Пашинцев