

Министерство образования и науки Российской Федерации
«Южно-Уральский государственный университет»
Кафедра «Технология машиностроения»

621.92(07)
Г937

В.И. Гузеев, В.А. Батуев, В.В. Батуев

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
НА МНОГОКООРДИНАТНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ**

Учебное пособие

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2013

УДК 621.92.06-529(075.8)
Г937

*Одобрено
учебно-методической комиссией
механико-технологического факультета*

Рецензенты:

*директор ЗАО НИИИТ Опытный завод, заслуженный машиностроитель
России В.С. Гуревич, докт. техн. наук, проф. П.П. Переверзев.*

Гузеев, В.И.

Г937 Технология изготовления деталей на многокоординатных станках с ЧПУ: учебное пособие / В.И. Гузеев, В.А. Батуев, В.В. Батуев. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 31 с.

Учебное пособие предназначено для использования студентами специальности 151900.68 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». В учебном пособии дана методика изготовления фасонных деталей на станках с ЧПУ. Рассмотрены вопросы управления точностью обработки пространственно-сложных поверхностей на токарных и фрезерных станках с ЧПУ.

УДК 621.92.06-529(075.8)

ВВЕДЕНИЕ

Для современного машиностроения характерна частая смена номенклатуры изделий. Это связано с необходимостью развития предприятия в рыночных условиях, поскольку существует необходимость расширения ассортимента продукции для удовлетворения запросов все большего количества потребителей. Расширение ассортимента продукции, в свою очередь, приводит к снижению серийности (количества деталей в серии) и увеличению затрат на подготовку производства.

Наиболее эффективно в условиях частой смены номенклатуры изделий может работать гибкое автоматизированное производство, основу которого составляют станки с ЧПУ. Применение станков с ЧПУ позволяет быстро переходить на выпуск новой продукции с минимальными затратами, обеспечивая при этом высокую производительность и качество.

Одной из наиболее современных групп станков с ЧПУ являются многокоординатные станки, позволяющие вести обработку высокотехнологичных деталей сложной формы (импеллеры, формообразующая оснастка, лопатки турбин и т.д.). Технологические возможности станков данной группы позволяют эффективно управлять процессом резания, повышая качество и точность, производимой продукции, путем изменения геометрических параметров зоны резания, применения высокопроизводительного режущего инструмента, возможностью обработки детали со всех сторон за один установ.

Работа с высокотехнологичным оборудованием требует квалифицированных инженерных кадров, которые досконально знают технологические возможности многокоординатных станков с ЧПУ, профессионально разрабатывают эффективные технологические процессы и являются опытными пользователями специализированных CAD/CAM систем, являющихся незаменимым инструментом для создания управляющих программ, в современном производстве.

Данное методическое пособие предназначено для студентов специальности 151900.68 при изучении курса «Технология обработки деталей на многокоординатных станках с ЧПУ».

1. ОБРАБОТКА ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

1.1. Геометрическая систематизация фасонных поверхностей

Геометрическая форма является наиболее характерной особенностью деталей, влияющей на технологическую схему формообразования.

На (рис. 1.1) представлена геометрическая систематизация объемных элементов деталей машиностроения. Под объемным элементом обрабатываемой поверхности детали понимают часть ее поверхности с единым законом (алгоритмом) геометрического формообразования. Объемные элементы обрабатываемых поверхностей детали различаются по виду образующей (линейчатые и двойной кривизны), направляющей и закону (алгоритму) построения.

Анализ приведенной схемы показывает, что часть поверхностей может быть задана аналитически в виде уравнений $F(x, y, z) = 0$ (конус, сфера, поверхность второго порядка, винтовые, торовые и т.д.). Особое место занимает класс дискретно-определенных поверхностей (заданные системой дискретных точек, системой дискретных ориентированных сечений и т.д.), так как такие поверхности широко распространены в машиностроении (лопатки турбин и гребных винтов, штампы для кузовов автомобилей и т.д.).

В (табл. 1.1) приведены стандартные параметры поверхностей, которые формируют подавляющее большинство машиностроительных деталей. При выборе стандартных параметров стремятся использовать такие величины, которые, с одной стороны, имели бы ясный геометрический смысл и в большинстве случаев могли быть получены непосредственно из чертежа детали, а с другой – были удобны для выполнения геометрических вычислений.

У плоскости такими параметрами являются единичный вектор \bar{n} (орт) нормали, компоненты которого представляют собой направляющие косинусы, и кратчайшее расстояние E от начала системы координат до плоскости, равное скалярному произведению радиус-вектора \bar{M} произвольной точки, принадлежащей плоскости, на орт нормали (см. табл. 1.1). В наиболее типичных случаях, когда плоскость перпендикулярна одной из координатных осей, стандартные параметры ее определяются элементарно: из числа компонент орта нормали единице равна та, которая соответствует упомянутой оси (остальные две равны нулю), а кратчайшее расстояние равно соответствующему размеру, определяющему расположение плоскости. Например, горизонтальная плоскость, расположенная на высоте 20 мм, описывается такой последовательностью стандартных параметров:

$$\bar{n} = \{0; 0; 1\}; E=20.$$

Чтобы описать прямой круговой цилиндр, необходимо задать его ось и радиус (см. табл. 1.1). Ось в пространстве определяется радиус-вектором \bar{A} произвольной точки, принадлежащей этой оси, и ортом $\bar{\alpha}$, задающим направление оси. Для наиболее типичного случая цилиндра,

перпендикулярного плоскости XOY , первые два компонента вектора \bar{A} определяют центр соответствующей окружности (третья обычно приравнивается нулю), а орт оси:

$$\bar{\alpha} = \{0; 0; 1\}.$$

Таблица 1.1

Стандартные параметры составляющих поверхностей

Тип	Наименование поверхности	Эскиз	Стандартные параметры
1	Плоскость		$\bar{n} = \{n_x, n_y, n_z\};$ $E = \bar{M} \cdot \bar{n}.$
2	Цилиндр		$\bar{A} = \{A_x, A_y, A_z\};$ $\bar{\alpha} = \{\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z\};$ $R.$
3	Конус		$\bar{B} = \{B_x, B_y, B_z\};$ $\bar{\alpha} = \{\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z\};$ $\varphi.$
4	Сфера		$\bar{C} = \{C_x, C_y, C_z\};$ $R.$

Тип	Наименование поверхности	Эскиз	Стандартные параметры
5	Тор		$\bar{A} = \{A_x, A_y, A_z\};$ $\bar{\alpha} = \{\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z\};$ $R;$ $r.$
6	Линейчатая		$\bar{P}_1 = \{x_1, y_1, z_1\};$ $l_1 = \{\alpha_1; \beta_1; \gamma_1\};$ <p style="text-align: center;">...</p> $\bar{P}_n = \{x_n, y_n, z_n\};$ $l_n = \{\alpha_n; \beta_n; \gamma_n\}.$
7	Каналовая		$\bar{P}_1 = \{x_1, y_1, z_1\}; R_1;$ $\bar{P}_2 = \{x_2, y_2, z_2\}; R_2;$ <p style="text-align: center;">...</p> $\bar{P}_n = \{x_n, y_n, z_n\}; R_n.$
8	Таблично-заданная		$\bar{P}_{11} = \{x_{11}, y_{11}, z_{11}\};$ $\bar{P}_{12} = \{x_{12}, y_{12}, z_{12}\};$ <p style="text-align: center;">...</p> $\bar{P}_{33} = \{x_{33}, y_{33}, z_{33}\}.$

Прямой круговой конус имеет стандартные параметры, аналогичные параметрам цилиндра. Отличия заключаются в следующем (см. табл. 1.1).

В качестве точки на оси задается вершина конуса \bar{B} . Поскольку конус имеет две половины, разделяемые вершиной, то орты оси $\bar{\alpha}$ направляют в сторону той половины, которая описывается. Вместо радиуса задается величина половины угла при вершине.

Естественными стандартными параметрами, описывающими сферу, являются радиус-вектор \bar{C} центральной точки и радиус сферы. Чтобы задать тор, используют стандартные параметры, определяющие его ось, а также два радиуса – большого и малого круга (см. табл. 1.1).

Все перечисленные выше поверхности описываются одним аналитическим выражением, которое может быть построено на основе приведенных стандартных параметров. Отличительной особенностью этих поверхностей являются фиксированный для каждого типа набор таких параметров.

Поверхности, не имеющие простого аналитического выражения в инженерной практике, задают с помощью таблиц. Для поверхности каждого типа применяется стандартная структура таблицы, однако объем ее от случая к случаю может изменяться.

Из числа поверхностей этого класса в технике чаще всего встречаются линейчатые. Линейчатые поверхности формируются путем движения прямолинейной образующей, скользящей по произвольной направляющей линии. В зависимости от закона движения и метода задания линейчатые поверхности разделяют на цилиндрические и, конусоидные, косые цилиндрические (типа переменной малки), с пропорциональной разбивкой, цилиндрические с произвольной направляющей, конические с произвольной направляющей. В стандартной форме линейчатые поверхности общего вида задаются последовательностью радиус-вектора \bar{P}_i точек, лежащих на направляющей, и единичными векторами l_i , определяющими направление образующей в каждой из этих точек (см. табл. 1.1).

Когда все орты l_i равны, линейчатая поверхность общего вида превращается в цилиндрическую. В простейшем случае направляющая лежит в одной из координатных плоскостей, а образующие перпендикулярны к ней. Чтобы определить такую поверхность, достаточно задать последовательность координат точек направляющей, которую в этом случае обычно называют таблично заданной кривой.

Другой частный случай линейчатых поверхностей получается, когда направляющая представляет собой прямую линию. К числу таких поверхностей принадлежат, в частности винтовые переменного шага.

С помощью таблиц в машиностроительных чертежах задают также каналовые поверхности (см. табл. 1.1). Они образуются движением окружности переменного радиуса, происходящим так, что центр окружности перемещается по заданной кривой, которая называется осевой линией, а плоскость окружности остается перпендикулярной к этой кривой. Если радиус движущейся окружности является постоянным, то поверхность носит название

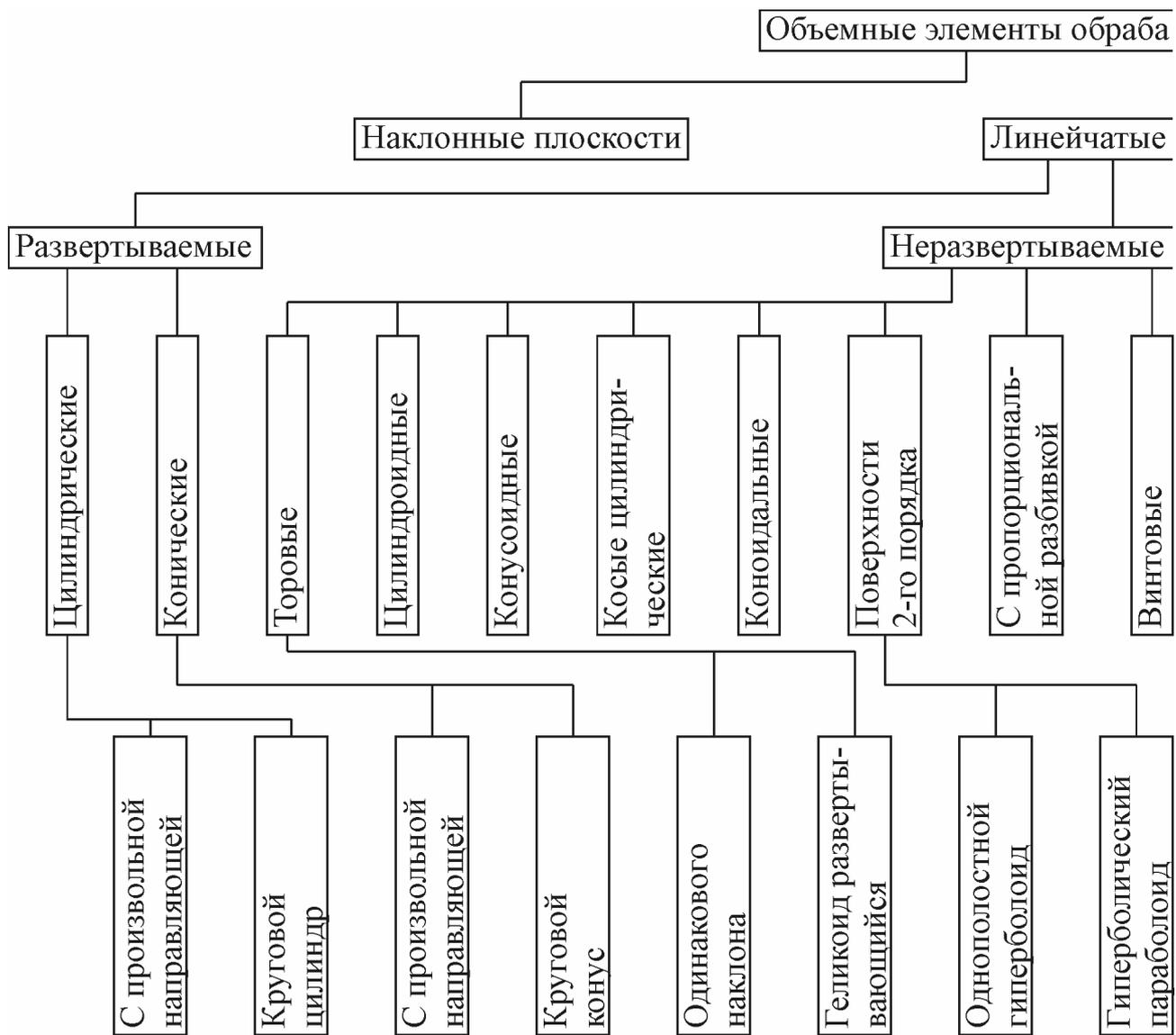
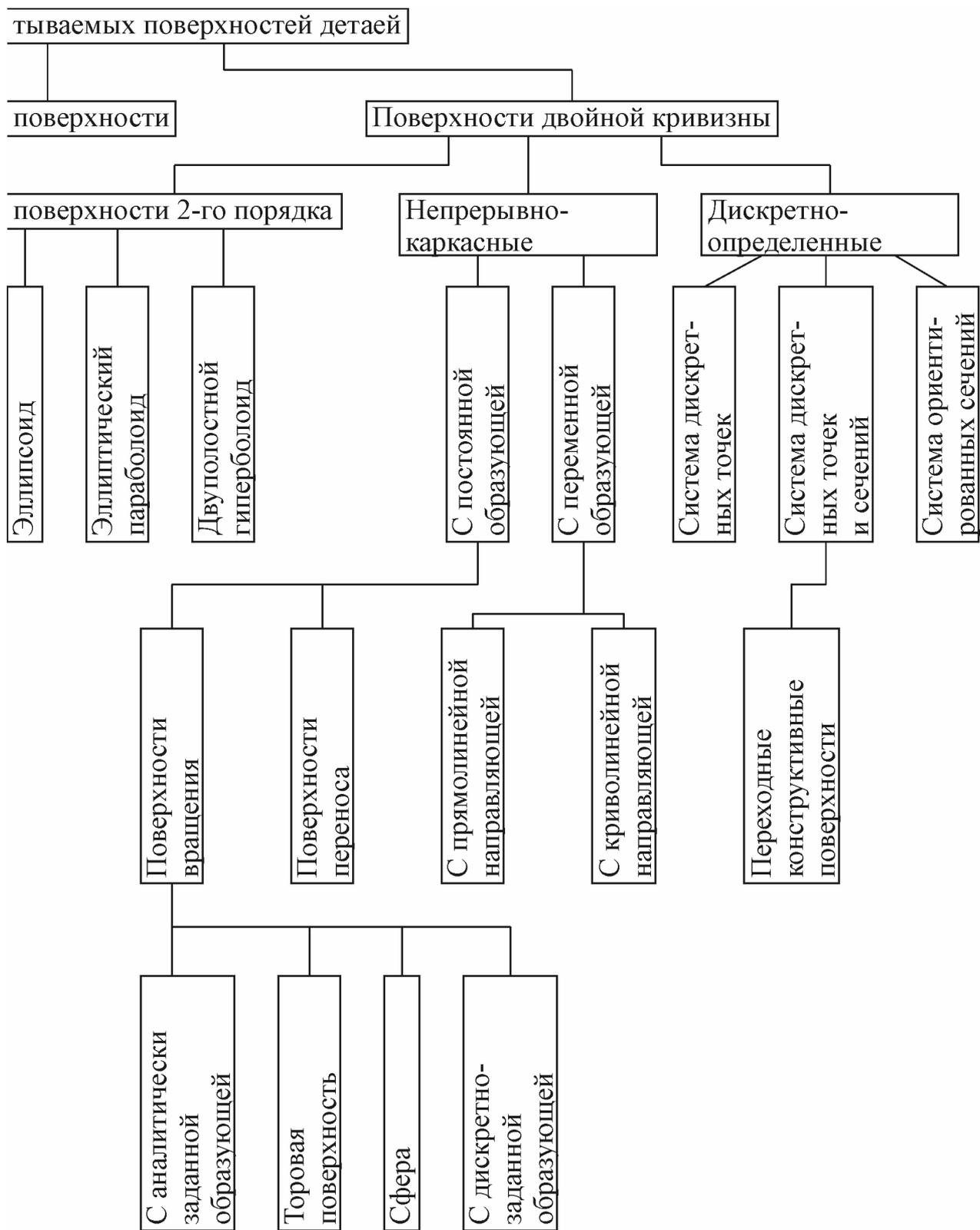


Рис. 1.1. Геометрическая систематизация объемных



элементов обрабатываемых фасонных поверхностей деталей

трубчатой. Каналовые и трубчатые поверхности в машиностроении чаще всего встречаются в качестве сопрягающих поверхностей.

Метод задания каналовых поверхностей общего вида во многом напоминает рассмотренный выше метод для линейчатых поверхностей. Осевая линия задается также, как и направляющая линейчатая поверхность. Различие заключается в том, что в опорных точках этой линии в данном случае задаются не единичные векторы образующих, а скалярные величины радиусов окружностей. Заметим, что тор представляет собой частный случай трубчатой поверхности, у которой осевой линией является окружность.

Поверхности, аналитическое выражение которых либо неизвестно, либо является слишком сложным, в технике обычно задают таблицей координат точек, принадлежащих этим поверхностям. Точки чаще всего располагаются в узлах сетки, близкой к прямоугольной (см. табл. 1.1).

Таким методом, в частности, задают поверхности свободных форм, именуемые также скульптурными, которые используются при художественном конструировании.

1.2. Расчет управляющей информации для обработки кинематических поверхностей двойной кривизны

Систему координат, в которой описывающая кривая при кинематическом образовании поверхности все время находится в плоскости, параллельной одной из координатных, называют основной.

Направление перемещения инструмента выбирают таким образом, чтобы на детали оставался след, лежащий в плоскости при постоянной координате X , параллельной плоскости ZOY .

На рис. 1.2, а показана часть кинематической поверхности, образованной при движении двух дуг кривых второго порядка. Участок поверхности, подлежащей обработке, ограничен плоскостью $X'O'Y'$ и плоскостью $A_1B_1B_2A_2$ параллельной ZOX .

Алгоритм расчета управляющей информации при данной технологической схеме обработки предусматривает решение следующих задач: определить параметры кривых в сечениях $x_i - \Delta x$, x_i и $x_i + \Delta x$ (см. рис. 1.2, а); проверить текущий участок кривой на прямолинейность; найти нормаль в начальной точке сечения x_i ; найти точки пересечения нормали к кривой в сечении x_i с кривыми в сечениях $x_i - \Delta x$ и $x_i + \Delta x$ (см. рис. 1.2, б); определить направляющие косинусы единичного вектора \bar{A} , касательного в точке A_i сечения x_i (см. рис. 1.2, в); определить направляющие косинусы единичного вектора \bar{B} , проходящего через точки A_j' и A_j (см. рис. 1.2, в); определить направляющие косинусы вектора $\bar{C} = \bar{A} \times \bar{B}$ или $\bar{C} = \bar{B} \times \bar{A}$ в зависимости от формы поверхности – выпуклая или вогнутая (см. рис. 1.2, в); определить координаты центра инструмента в точке A_j (см. рис. 1.2, г); найти

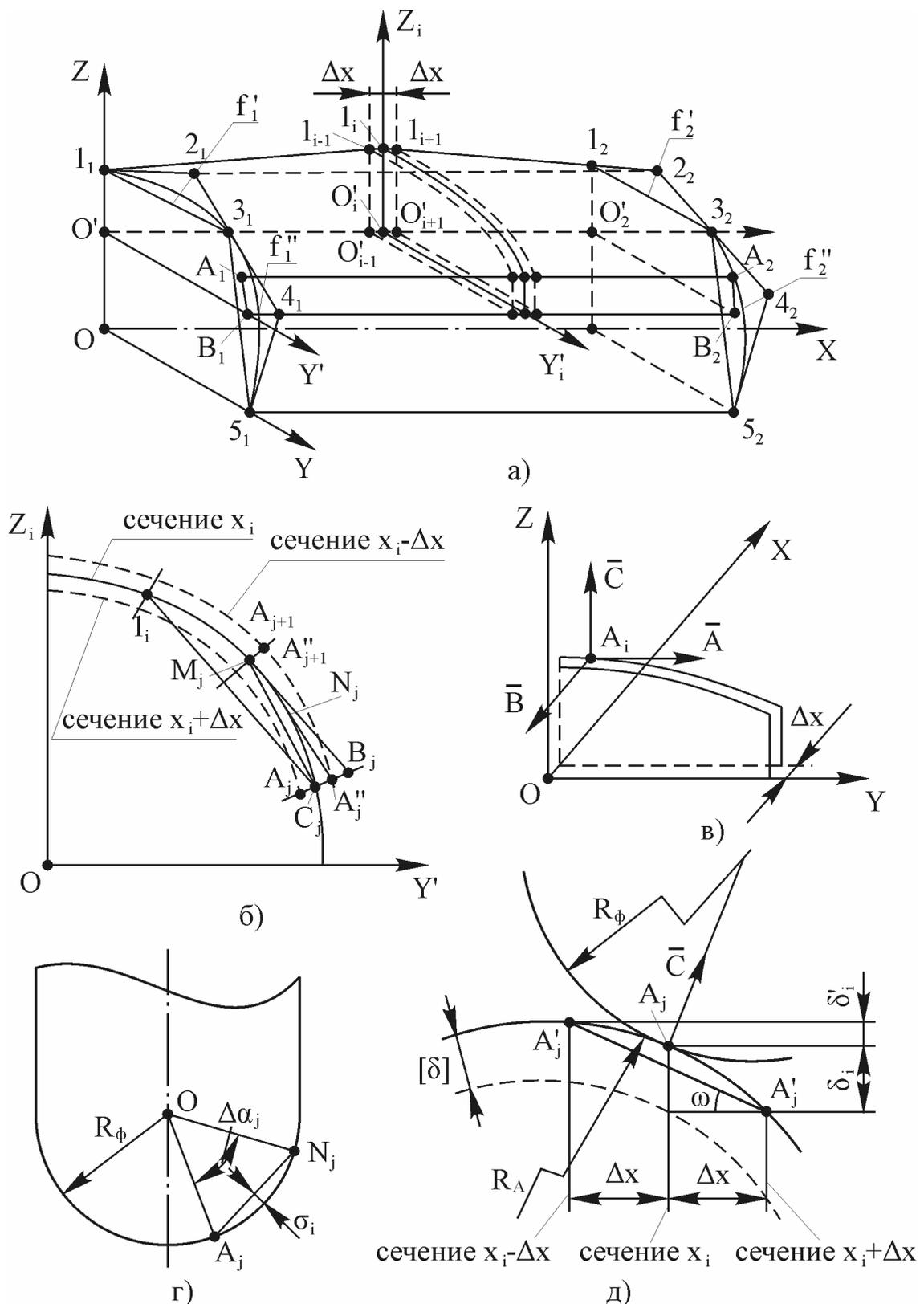


Рис. 1.2. Расчет управляющей информации для обработки кинематической поверхности двойной кривизны: а — часть кинематической поверхности; б — определение точек пересечения нормали к кривой с кривыми соседних сечений; в — нахождение направляющих косинусов вектора \bar{A} ; г — определение координат центра инструмента; д — вычисление погрешности обработки от формы инструмента

расстояние от точки A_j до A_j'' и A в проекции на плоскость x_i (см. рис. 1.2, б); определить радиус кривизны поверхности в продольном направлении (см. рис. 1.2, г); определить допустимое расстояние по хорде между соседними строчками (см. рис. 1.2, г); найти угол ω между хордой, соединяющей участок продольной кривой между двумя соседними сечениями (см. рис. 1.2, г); определить допустимую величину шага обработки в продольном направлении (см. рис. 1.2, г); установить величину линейной аппроксимации в направлении строки обработки в зависимости от допуска на обработку поверхности (см. рис. 1.2, г); определить отрезок $A_i B_i = \delta_i$ (см. рис. 1.2, б); провести касательную $B_j M_j$ из точки B_j к кривой в сечении x_i (см. рис. 1.2, б); из точки A_j провести прямую $A_j N_j$, параллельную $B_j M_j$, и найти точку пересечения этой прямой с кривой в сечении x_i (см. рис. 1.2, б); найти для точки N_j допустимую стрелку аппроксимации δ_{j0} кривой в сечении x_i (см. рис. 1.2, б); усреднить среднюю стрелку аппроксимации; определить поправку σ_j к системе аппроксимации δ_{jcp} за счет изменения направления нормали (см. рис. 1.2, д); отложить отрезок $A_j C_j = \delta_{jcp} - \delta_j$ из точки A_j в сторону выпуклости кривой по нормали к ней (см. рис. 1.2, б); провести касательную $C_j K_j$ из точки C_j к кривой в сечении x_i (см. рис. 1.2, б); провести прямую $A_j A_j = 1$ из точки A_j , параллельную $C_j K_j$ (см. рис. 1.2, б); определить следующую опорную точку A_{j+1} (см. рис. 1.2, б); определить угол между нормалью в точках A_j , N_j ; определить стрелку прогиба σ_j между точками A_j и N_j на фрезе (см. рис. 1.2, д); сравнить σ_j с $[\delta]$; определить количество участков, на которые необходимо разбить отрезок $A_j N_j$, чтобы погрешность не превосходила допустимую; разделить отрезок $A_j N_j$ на равные части; определить в точках деления координаты центра инструмента.

Используя аффинные преобразования, кривые второго порядка приводятся к виду:

$$Ay^2 + 2Bxy + Cz^2 + 2Dy + 2Ez + F = 0. \quad (1)$$

При проверке кривой сечения на прямолинейность проверяют, равны ли нулю одновременно три коэффициента A , B и C . Если это условие выполнено, то расчет координат точек центра инструмента осуществляют по формулам для плоского участка поверхности. Если хотя бы один коэффициент A , B или C отличается от нуля, то расчет координат точек центра инструмента производят по формулам для криволинейного участка поверхности.

Угловым коэффициентом нормали к обводу в сечении x_i в начальной точке A_j с координатами z_{A_j} , y_{A_j} определяется как:

$$K_H = \frac{1}{-z'_{A_j}} \frac{By_{A_j} + Cz_{A_j} + E}{Ay_{A_j} + Bz_{A_j} + D}. \quad (2)$$

Прямую, проходящую через точку A_j , с угловым коэффициентом K_H можно записать в виде:

$$z = K_H y + (z_{A_j} - K_H y_{A_j}).$$

Для определения точек пересечения нормали в сечении с кривыми в сечениях $x_i - \Delta x$, x_i и $x_i + \Delta x$ (см. рис. 1.2, б) решают совместные уравнения (1) и (2). В результате получаю:

$$y_{A_j}'(A_j'') = \frac{-\left(Bb_H + C_{K_H}b_H + K_H + D\right) + \sqrt{\left(Bb_H + C_{K_H}b_H + K_H + D\right)^2}}{A + 2B_{K_H} + C_{K_H}^2} - \frac{\left(A + 2B_{K_H} + C_{K_H}^2\right)\left(C_{b_H}^2 + 2b_H E + E\right)}{2\left(Bb_H + C_{K_H}b_H + K_H + D\right)};$$

$$z_{A_j}'(A_j'') = K_H \cdot y_{A_j}'(A_j'') + b_H.$$

Направляющие косинусы вектора A в точке A_j (см. рис. 1.2, в) вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned} \cos(g, x) &= \cos \alpha_g = 0; \\ \cos(g, y) &= \cos \beta_g = \frac{1}{\sqrt{1 + t_{A_j}^2}}; \\ \cos(g, z) &= \cos \nu_g = \frac{z'_{A_j}}{\sqrt{1 + z'_{A_j}^2}}. \end{aligned}$$

Направляющие косинусы вектора B , проходящего через точки A_j и A_j' (см. рис. 1.2, в), находят по формулам:

$$\begin{aligned} \cos(\rho, x) &= \cos \alpha_\rho = \frac{\Delta x}{A_j A_j'}; \\ \cos(\rho, y) &= \cos \beta_\rho = \frac{y_{A_j}' - z_{A_j}}{A_j A_j'}; \\ \cos(\rho, z) &= \cos \nu_\rho = \frac{z_{A_j}' - z_{A_j}}{A_j A_j'}. \end{aligned}$$

Направляющие косинусы вектора \bar{C} вычисляют как векторное произведение $\bar{C} = \bar{A} \times \bar{B}$ или $\bar{C} = \bar{B} \times \bar{A}$ в зависимости от того, выпуклая или вогнутая поверхность.

Центр фрезы в точке контура A_j для инструмента с радиусным профилем исходной инструментальной поверхности (фрез с полусферическим режущим торцом) определится вектором \bar{N} (см. рис. 1.2, г), причем:

$$\bar{N} = R \cdot C.$$

Для фасонных фрез с другими исходными инструментальными поверхностями при обработке на трехкоординатных станках координаты центра инструмента необходимо находить из условия, что инструмент касается в точке A_j плоскости с направляющими косинусами вектора C .

Расстояния d_j' и d_j'' между точками соответственно A_j, A_j' и A_j, A_j'' в проекции на плоскость $x_i = \text{const}$ определяют по формулам:

$$d_j' = \sqrt{(z_{A_j'} - z_{A_j})^2 + (y_{A_j'} - y_{A_j})^2};$$

$$d_j'' = \sqrt{(z_{A_j''} - z_{A_j})^2 + (y_{A_j''} - y_{A_j})^2}$$

Радиус кривизны поверхности в продольном направлении:

$$R_{D_j} = \sqrt{\frac{\left(\frac{d_j''}{2} + \frac{d_j'}{2} + \frac{\Delta x^2}{2d_j'} + \frac{\Delta x^2}{2d_j''}\right)}{\left(\frac{\Delta x}{d_j'} + \frac{\Delta x}{d_j''}\right)^2} + \left[\frac{d_j''}{2} + \frac{\Delta x}{d_j''} \cdot \frac{\frac{d_j''}{2} + \frac{d_j'}{2} + \frac{\Delta x^2}{2d_j''} + \frac{\Delta x^2}{2d_j'}}{\left(\frac{\Delta x}{d_j'} - \frac{\Delta x}{d_j''}\right)^2}\right]}.$$

При $R_{D_j} \rightarrow \infty$ поверхность двойной кривизны приближается к плоскости.

Шаг вдоль хорды дуги контура между соседними строчками вычисляют по формуле:

$$\Delta l = \frac{2R_D}{(R_A \pm R_\phi)(2R_D + 2H)} \times \sqrt{(R_D \pm R_\phi)^2 (2R_D \pm H)^2 - [(R_D \pm H)^2 + R_D^2 \pm 2R_D R_\phi]^2}.$$

Для определения допустимого шага обработки вдоль оси находят $\cos \omega_j$ (см. рис. 1.2, г) по формуле:

$$\cos \omega_j = \cos \arctg \frac{d_j' + d_j''}{2\Delta x}.$$

Допустимый шаг между соседними строчками обработки в направлении оси X :

$$\Delta l_{xj} = \Delta l_i \cos \omega_j.$$

Допустимую стрелку линейной аппроксимации в направлении строки обработки в зависимости от допуска на обработку поверхности в этом направлении вычисляют по формуле:

$$\delta_j = \frac{[\delta]}{\cos \arctg \frac{d_j}{\Delta x}},$$

где $[\delta]$ — допуск на обработку; d_j — расстояние в плоскости сечения между опорными точками; Δx — расстояние между соседними сечениями.

Следующую опорную точку A_{j+1} определяют в такой последовательности: из точки C_j проводят касательную C_jK_j к кривой в сечении $x_i = \text{const}$; находят точку пересечения прямой, проходящей через точку A_j параллельно C_jK_j (см. рис. 1.2, б). Найденная точка пересечения является следующей опорной точкой A_{j+1} .

Определение координат центра инструмента A'_{j+1} в опорной точке A_{j+1} производят так же, как и в точке A_j .

Технологические возможности оборудования с ЧПУ не всегда позволяют производить обработку крупногабаритных деталей в основной системе координат. Кроме того, для наиболее рационального размещения заготовок на столе станка возникает необходимость в переходе к системе координат, отличающейся от основной.

Заготовка может быть ориентирована относительно основной системы задания поверхности с возможностью параллельного переноса вдоль осей XYZ, поворота относительно оси задания переменных параметров (поворот вокруг оси X), произвольно ориентирована.

Для первых двух видов ориентации заготовки относительно основной системы координат целесообразно поступать следующим образом: рассчитать опорные точки на траектории движения центра инструмента в основной системе координат, а затем по формулам преобразования координат осуществить пересчет в нужную систему координат, т.е. строка обработки при этом остается параллельной плоскости ZOY.

При свободной ориентации заготовки относительно основной системы координат порядок расчета координат центра инструмента следующий: в системе координат ZYX определяют уравнение плоскостей при $x'_i = \text{const}$, $x'_i + \Delta x = \text{const}$, $x'_i - \Delta x = \text{const}$, определяют линии пересечения этих поверхностей с произвольными плоскостями $x'_i = \text{const}$ в районе обработки; находят точки пересечения этих линий с аналитически определенными кривыми в сечениях $x'_i = \text{const}$; переводят координаты точек пересечения в систему $X'Y'Z'$ и получают точно-заданные контуры в сечениях

$x_i - \Delta x'_i = \text{const}$ и $x'_i - \Delta x = \text{const}$, заменяют точечно-заданные контуры в сечениях $x'_i = \text{const}$, $x'_i + \Delta x' = \text{const}$ и $x'_i - \Delta x = \text{const}$ участками сопряженных кривых второго порядка.

Все дальнейшие этапы расчета полностью совпадают с изложенными выше для основной системы.

1.3. Технологические схемы обработки фасонных поверхностей

1.3.1. Систематизация технологических схем обработки

Признаками систематизации схем формообразования фасонных поверхностей на станках с ЧПУ (табл. 1.2) являются: ориентация заготовки на станке; контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью; форма исходной инструментальной поверхности; возможность поворота режущей кромки в процессе обработки за счет конструкции инструмента; количество координат для реализации.

При рациональной ориентации заготовки на станке уменьшается необходимое число координат, следовательно, упрощается оборудование и подготовка геометрической управляющей информации. Однако инструмент в этом случае усложняется. Например, при параллельном расположении заготовки по отношению к плоскости стола станка и цилиндрическом инструменте для обработки поверхности типа переменной малки необходимо не менее пяти управляемых координат. При наклонном расположении заготовки в двух взаимно перпендикулярных плоскостях обработку поверхности типа переменной малки этим же инструментом можно осуществить на двухкоординатном оборудовании.

От вида контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью (точечный, линейный, поверхностный, объемный) зависит в конечном счете скорость съема металла. Производительность стружкообразования при различных способах фрезерования может отличаться в несколько раз. Например:

- обработка сферическим торцом инструмента строчками – 100 %;
- обработка углом дисковой фрезы строчками – 150 %;
- обработка периферией цилиндрической фрезы строчками – 260 %;
- обработка периферией фасонной фрезы – 400 %.

Образующая профиля исходной инструментальной поверхности может быть прямолинейной или фасонной. При усложнении формы образующей уменьшается необходимое количество управляемых координат. Например, при использовании фрез с радиусным профилем исходной инструментальной поверхности обработку поверхностей типа переменной малки можно осуществить при помощи трех управляемых координат вместо пяти, необходимых в случае прямолинейного профиля исходной инструментальной поверхности. Благодаря возможности поворота режущей кромки под углом к оси вращения в процессе обработки за счет конструкции инструмента достигается уменьшение необходимого количества управляемых координат.

Таблица 1.2

Технические схемы формообразования фасонных поверхностей
на станках с ЧПУ

Вид обрабатываемой поверхности	Ориентация заготовки на станке	Контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью	Форма исходной инструментальной поверхности	Возможность поворота режущей кромки в процессе обработки за счет конструкции инструмента	Необходимое количество координат для реализации
Переменная малка	Свободная	Линейный	Цилиндрическая	Не имеется	5 (x; y; z; α ; β)
-"	Заготовка параллельна столу станка	-"	Фасонная	-"	3 (x; y; z)
-"	-"	-"	Тор, цилиндр, конус	-"	3 (x; y; z)
-"	-"	-"	Конус, цилиндр	Имеется	3 (x; y; z)
-"	Заготовка наклонна столу станка	-"	Фасонная	Не имеется	2 (x; y)
Линейчатая	Свободная	Точечный	Полусфера, цилиндр, тор	-"	3 (x; y; z)
-"	-"	Линейный	Плоскость	-"	5 (x; y; z; α ; β)
-"	-"	Точечный	Тор	-"	3 (x; y; z)
-"	-"	-"	Тор, цилиндр	-"	3 (x; y; z)
-"	-"	Линейный	Тор, цилиндр, конус	-"	3 (x; y; z)
-"	Направляющие поверхности параллельны	-"	Цилиндр	-"	4 (x; y; z'; y')
-"	Точка пересечения образующих должна быть в пределах стола станка	-"	-"	-"	2 (x; y)

Применение фрез с изменяемой конусностью в процессе обработки также позволяет осуществить обработку поверхностей типа переменной малки на трехкоординатном оборудовании с ЧПУ вместо пятикоординатного при обработке жестким цилиндрическим или коническим инструментом.

1.3.2. Формообразование на многокоординатных станках с ЧПУ

Применение многокоординатных станков с ЧПУ позволяет наиболее эффективно использовать преимущества программного управления при обработке сложных поверхностей.

Обработка осуществляется торцом и периферией концевой инструмента. Применение простого инструмента для обработки сложных фасонных поверхностей становится возможным благодаря большому разнообразию движений рабочих органов многокоординатных станков.

Наиболее распространен случай, когда исполнительные органы многокоординатного станка имеют пять направлений перемещения: вдоль осей X, Y, Z и повороты вокруг осей Z, X или Y.

Весь цикл расчета программ обработки от исходных данных (форма, размеры и технология обработки детали и характеристики станка) до получения информации вводимой в систему ЧПУ можно разбить на три этапа: расчет локальных параметров поверхностей в опорных точках траектории их обработки; расчет закона движения инструмента; кодирование информации для системы ЧПУ.

На первом этапе производится разбивка траектории движения на ряд элементарных участков, ограниченных опорными точками, расчет их координат и определение в этих точках направления нормалей к обрабатываемой поверхности (рис. 1.3). Порядок расчетов зависит от типа и вида задания обрабатываемых поверхностей.

Расчет закона движения инструмента означает расчет последовательности координатных перемещений исполнительных органов станка, соответствующих последовательности опорных точек траектории обработки. Способ расчета на этом этапе зависит от координатной схемы станка, а способ кодирования информации – от типа и математической структуры системы ЧПУ. Система ЧПУ для многокоординатного станка обеспечивает: формирование управляющих сигналов по пяти независимым координатам; интерполирование по закону прямой линии одновременно по всем координатам или по закону окружности для любой пары координат с заданием по программе плоскости обработки; плавный разгон или торможение инструмента по линейному закону; формирование сигналов технологических команд.

1.3.3. Формообразование на трехкоординатных станках с ЧПУ

Многокоординатные фрезерные станки с ЧПУ имеют высокую стоимость. Подготовка управляющих программ требует специальных дорогостоящих САПР. Поэтому доля их в парке оборудования с ЧПУ составляет не более 15%.

Такие станки целесообразно использовать для обработки особо сложных и универсальных деталей.

Минимальное необходимое число управляемых координат оборудования с ЧПУ при обработке сложных фасонных поверхностей в процессе обработки можно определить по формуле:

$$m=n+c,$$

где n — минимально необходимое число управляемых координат для перемещения образующей поверхности из одного положения в другое (или число степеней свободы); c — число дополнительных связей, накладываемых на образующую. Например, при обработке поверхности типа переменной малки цилиндрической концевой фрезой необходимо не менее двух поворотов оси вращения фрезы для перемещения образующей исходной инструментальной поверхности в положение, совпадающее с образующей обрабатываемой поверхности (рис. 1.4).

Поворот оси вращения фрезы на угол α необходим для перемещения образующей исходной инструментальной поверхности в нормальную плоскость к обрабатываемой поверхности, а второй поворот на угол β — для совпадения углов наклона образующих исходной инструментальной поверхности и поверхности типа переменной малки. Причем это совпадение приближенное, так как нормальная плоскость, в которой находится образующая поверхности типа переменной малки, проходит только через нормаль к одной из направляющих, а в точке пересечения ее с другой направляющей она имеет угол рассогласования, величина которого зависит от градиента изменения малки вдоль контура.

Таким образом, в соответствии с расчетом минимальное число управляемых координат оборудования с ЧПУ для обработки прямолинейной образующей поверхности типа переменной малки равно 5 (перемещение вдоль осей X , Y , Z и повороты вокруг осей Z , X или Y). Число дополнительных связей (накладываемых ограничений) в данном случае равно нулю. Следовательно, для обработки этой поверхности концевой цилиндрической фрезой, образующая исходной инструментальной поверхности которой является прямой линией, нужен пятикоординатный станок с ЧПУ.

Если образующая исходной инструментальной поверхности — прямая линия с изменяющимся углом наклона к оси вращения, то инструмент должен быть с изменяемой конусностью в процессе обработки; если образующая — кривая линия, то инструмент должен быть фасонным.

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ТОЧНОСТЬЮ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Особенностью большинства деталей со сложной формой являются высокие технические требования по точности и шероховатости, и как следствие, большая трудоемкость изготовления, достигающая сотни нормо-часов. В связи с большим удельным весом основного (машинного) времени в общем объеме штучного времени при использовании станков с программным управлением особое внимание должно уделяться назначению рациональных режимов резания для каждого перехода.

Обработка сложных фасонных деталей показывает, что процесс резания связан с изменяющимися параметрами. В значительной мере изменяется геометрия зоны резания, в частности, при токарной обработке – главный и вспомогательный углы в плане, при объемном фрезеровании – положение и длина активной части режущей кромки.

Для обеспечения технологической надежности режимов резания при их расчете необходимо учитывать достаточное количество факторов процесса резания, адекватно отражающих особенности конкретных условий обработки.

2.1. Управление точностью обработки на токарных станках с ЧПУ

При обработке фасонных поверхностей на станках с ЧПУ изменение действительного угла в плане происходит за счет изменения направления подачи, расположение режущей кромки резца при этом остается неизменным.

При несвободном резании уменьшение главного угла в плане приводит к увеличению активной длины главной режущей кромки, а увеличение при этом вспомогательного угла в плане соответственно – к уменьшению длины активной части вспомогательной режущей кромки. Следовательно, при обработке фасонной поверхности происходит постоянное перераспределение значимости главной и вспомогательной режущих кромок в процессе резания.

Величина и направление горизонтальной составляющей усилия, возникающие при несвободном резании, зависят от сил на передней и задней поверхностях как главной, так и вспомогательной режущих кромок. Результирующая сила, действующая в горизонтальной плоскости, может быть найдена как векторная сумма сил, возникающих на главной и вспомогательной режущих кромках:

$$\bar{P}_{xy} = \bar{P}_{xy(\text{рез})}^{\text{гл}} + \bar{P}_{xy(\text{тр})}^{\text{гл}} + \bar{P}_{xy(\text{рез})}^{\text{всп}} + \bar{P}_{xy(\text{тр})}^{\text{всп}},$$

где $\bar{P}_{xy(\text{рез})}^{\text{гл}}$, $\bar{P}_{xy(\text{рез})}^{\text{всп}}$ — силы, возникающие на передней поверхности главной и вспомогательной режущих кромок; $\bar{P}_{xy(\text{тр})}^{\text{гл}}$, $\bar{P}_{xy(\text{тр})}^{\text{всп}}$ — силы, возникающие на задней поверхности главной и вспомогательной режущих кромок.

С учетом взаимного влияния сил на главной и вспомогательной режущих кромок горизонтальные составляющие усилия резания определяются по формулам:

$$P_x = \frac{1,15S \cdot t \cdot \sigma_i \cdot \sin \beta}{\sin \beta_1} \sin(\varphi - \eta) + \frac{0,252\sigma_i \cdot l_3 \cdot t \cdot \sin \varphi}{\sin(\varphi \pm \omega)} - \frac{0,252\sigma_i \cdot l'_3 \cdot S \cdot \sin(\varphi \pm \omega) \sin \varphi_1}{\sin \varepsilon};$$

$$P_y = \frac{1,15S \cdot t \cdot \sigma_i \cdot \sin \beta}{\sin \beta_1} \cos(\varphi - \eta) + \frac{0,252\sigma_i \cdot l_3 \cdot t \cdot \cos \varphi}{\sin(\varphi \pm \omega)} - \frac{0,252\sigma_i \cdot l'_3 \cdot S \cdot \sin(\varphi \pm \omega) \cos \varphi_1}{\sin \varepsilon},$$

где S — подача; t — глубина резания; σ_i — интенсивность напряжений в движущемся объеме деформируемого металла; $\sigma_i \approx 1,35\sigma_B$ — для нормализованных и улучшенных углеродистых и легированных сталей, $\sigma_i \approx 1,20\sigma_B$ — для закаленных сталей; β_1 — угол наклона условной плоскости

сдвига; $\beta = \operatorname{tg} \frac{P_y}{P_z}$ — угол действия; φ — главный угол в плане; η — угол

отклонения стружки от нормали к главной режущей кромке; l_3 — длина фаски затупления резца на главной режущей кромке; ω — угол наклона образующей обрабатываемой поверхности. Знак (+) принимают в случае обработки при увеличивающемся диаметре детали, (-) — при уменьшающемся; φ_1 — вспомогательный угол в плане; ε — угол при вершине резца; l'_3 — длина фаски затупления резца на вспомогательной режущей кромке.

Изменения составляющих усилия резания в процессе обработки фасонных деталей вызывают дополнительные деформации технологической системы, что, как известно, оказывает непосредственное влияние на точность обработки. Во многих случаях погрешности обработки, возникающие вследствие деформаций технологической системы и ее элементов, являются доминирующими в суммарной погрешности обработки. На современных токарных станках погрешности размера динамической настройки в 5-10 раз больше, чем погрешность статической настройки. Особенно велика роль переменных во времени деформаций, которые часто весьма трудно компенсировать соответствующей размерной наладкой или подналадкой технологической системы.

Изменение составляющих силы резания вызывает в технологической системе появление отклонений величины упругого перемещения A'_d , создаваемого в системе в результате натяга. Размер динамической настройки получает некоторое приращение $\Delta A'_d$:

$$A'_d \pm \Delta A'_d = \frac{P - \Delta P}{j_c}.$$

$$\Delta R_i = h_p - h_\phi = y'(x)\delta_x + \delta_y.$$

или

$$\Delta R_i = \frac{P_{xy(рез)}^{гл} [y'(x)j_y \sin(\varphi - \eta) + j_x \cos(\varphi - \eta)] + j_x \cdot j_y \sqrt{1 + [y'(x)]^2} - \frac{P_{xy(рез)}^{гл}}{h_p} [y'(x)j_y \sin(\varphi - \eta) + j_x \cos(\varphi - \eta)] + P_{xy(рез)}^{гл} [y'(x)j_y \sin \varphi + j_x \cos \varphi] + P_{xy(тр)}^{всп} [j_x \cos \varphi_1 - y'(x)j_y \sin \varphi_1]}{+ \frac{P_{xy(тр)}^{гл}}{h_p} [y'(x)j_y \sin \varphi + j_x \cos \varphi]}, \quad (2.1)$$

где j_x — жесткость системы СПИД вдоль оси X; j_y — жесткость системы СПИД вдоль оси Y; $P_{xy(рез)}^{гл}$ — горизонтальная составляющая силы резания; $P_{xy(тр)}^{гл}$ — горизонтальная составляющая силы трения по задней грани главной режущей кромки; $P_{xy(тр)}^{всп}$ — горизонтальная составляющая силы трения по задней грани вспомогательной режущей кромки.

Уменьшая погрешности размера динамической настройки $\Delta A'_d$ в каждом сечении детали, возникающие от нестационарности действующих усилий резания, можно существенно повысить точность размеров и формы обрабатываемой фасонной поверхности.

Эта задача в настоящее время решается двумя способами. Первый заключается во внесении поправки на величину ΔA_c с обратным знаком в размер статической настройки размерной или кинематической цепи технологической системы, равную возникающему отклонению $\Delta A'_d$ размера динамической настройки A'_d . Этот способ малоприменим при использовании современных систем ЧПУ с круговой интерполяцией, так как при обработке фасонной поверхности необходимо было бы вносить на отдельных участках поверхности различные поправки. Это требует аппроксимации криволинейного контура обработки, что сводит на нет преимущества круговой интерполяции. Кроме того, усложняется процесс подготовки управляющей программы, так как возникает необходимость расчета предискажений траектории для каждого отдельного участка фасонной поверхности.

Второй способ заключается во внесении поправок на величину ΔA_d с обратным знаком в размер динамической настройки A_d , что сводится к стабилизации самого размера A'_d , т.е. к сохранению его величины, заданной дискретно или по программе.

При использовании станков с ЧПУ наиболее целесообразным является комплексное использование обоих способов для уменьшения погрешности обработки. В этом случае стабилизированная величина погрешности размера динамической настройки компенсируется поправкой размера статической настройки. Такая поправка может быть легко введена перед первым кадром управляющей программы и остается постоянной при обработке всей криволинейной поверхности. Управление величиной динамических погрешностей, как правило, осуществляется за счет регулирования силой резания. Последняя, в свою очередь, легко управляется путем изменения подачи. Подачу необходимо увеличить, если сила резания уменьшается, и, наоборот, уменьшить с увеличением силы резания. Учитывая то, что изменение силы резания на величину ΔR происходит только при переходе с одного участка обработки фасонной поверхности к другому, и подачу S необходимо изменять дискретно при переходе от участка к участку. При обработке на станках с ЧПУ это условие может быть легко реализовано путем задания в каждом кадре управляющей программы, задающем движение инструмента по соответствующему участку обработки, конкретной величины подачи.

На станках с ЧПУ третьего поколения, управляемых непосредственно от ЭВМ, имеется возможность непрерывного изменения подачи по заданному закону, что позволяет осуществить непрерывное управление точностью обработки любых фасонных поверхностей. Закон изменения подачи определяется по формуле:

$$S = \frac{0,252\sigma_i \cdot l_3 \sqrt{1 + [y'(x)]}}{\sin \varphi - y(x) \cdot \cos \varphi} (j_x \cdot \cos \varphi + y'(x) \cdot j_y \cdot \sin \varphi) (h_p - \Delta R) - \frac{1,15\sigma_i \cdot \sin \beta}{\sin \beta_1} (j_x \cdot \cos(\varphi - \eta) + y'(x) \cdot j_y \cdot \sin(\varphi - \eta)) (\Delta R - h) + \frac{-\Delta R \cdot j_x \cdot j_y \sqrt{[1 + y'(x)]^2}}{0,252\sigma_i \cdot l_3 (\sin \varphi - y'(x) \cos \varphi)}, \quad (2.2)$$

$$+ \frac{\sin \varepsilon \sqrt{1 + [y'(x)]^2} (j_x \cos \varphi_1 - y'(x) \cdot j_y \sin \varphi_1)}{\sin \varepsilon \sqrt{1 + [y'(x)]^2} (j_x \cos \varphi_1 - y'(x) \cdot j_y \sin \varphi_1)}$$

где ΔR — заданная точность обработки.

В настоящее время накоплен достаточный производственный опыт по назначению режимов обработки цилиндрических деталей. Как правило, детали, обрабатываемые на станках с ЧПУ, имеют сочетания цилиндрических и фасонных поверхностей. В связи с этим представляется целесообразным определение закона изменения подачи на фасонной поверхности с учетом уже заданной ее величины для цилиндра. В этом случае закон изменения подачи должен обеспечивать одинаковую погрешность обработки на всех участках детали. Методика определения такого закона сводится к следующему:

— на основе существующих рекомендаций назначается подача для цилиндрической поверхности;

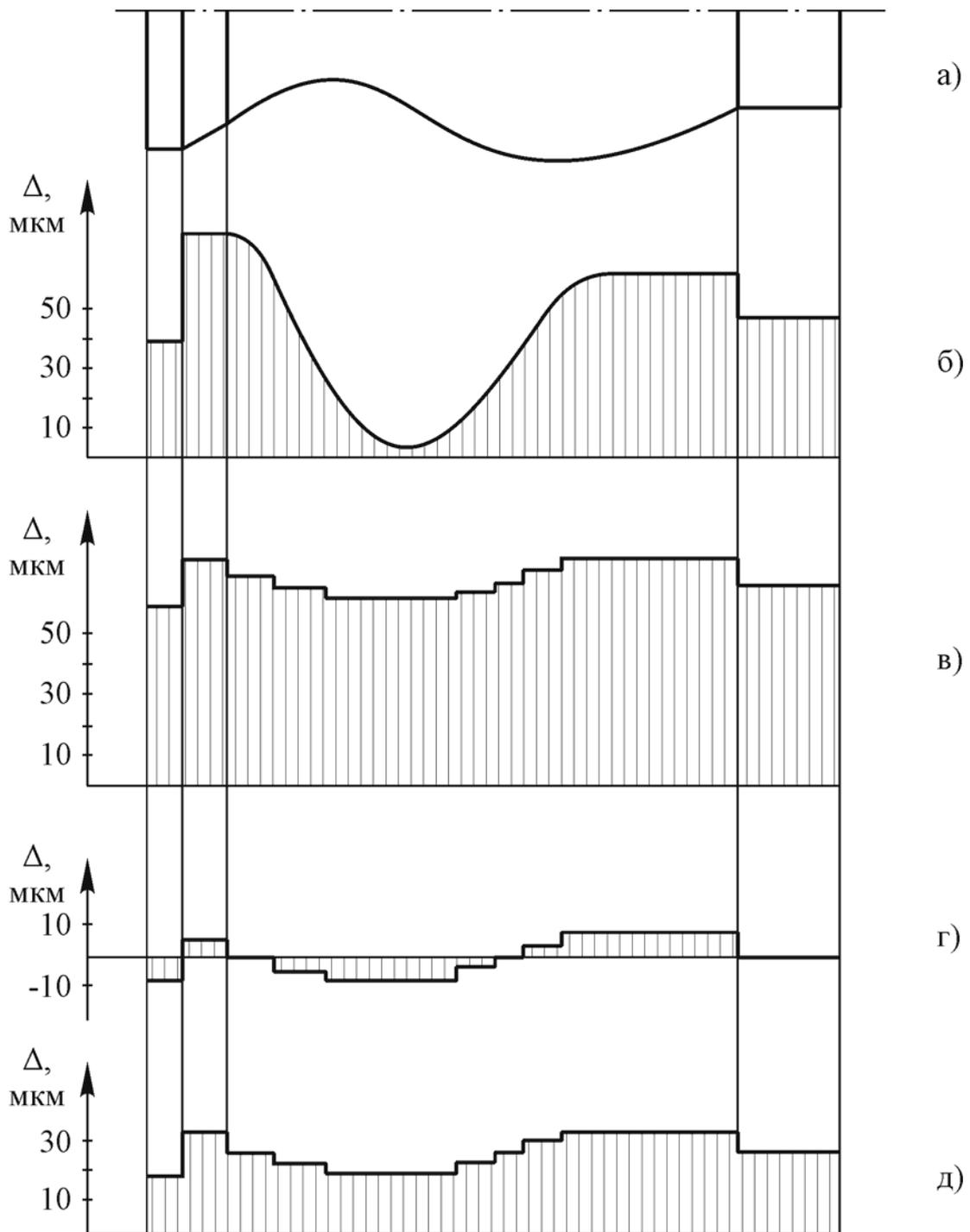


Рис. 2.2. Профиль обрабатываемой заготовки (а) и погрешность обработки: б — при постоянной подаче; в — при переменной подаче; г, д — теоретическая и экспериментальная при переменной подаче и коррекции статической настройки

– по назначенной подаче с помощью зависимости (2.1) определяется ожидаемая погрешность размера динамической настройки на цилиндрической поверхности;

– значение динамической погрешности на цилиндре подставляется в формулу (2.2) для определения закона изменения подачи в зависимости от формы обрабатываемой фасонной поверхности.

На рис. 2.2 показаны профиль обрабатываемой детали (а) и погрешность обработки в случае, когда все поверхности детали обрабатываются с постоянной подачей (б), при работе с переменной подачей (в), теоретическая погрешность при переменной подаче и коррекции размера статической настройки (г) и практически получаемая погрешность при обработке с переменной подачей и коррекцией.

Отличие практически получаемой погрешности от теоретически ожидаемой указывает на то, что кроме динамических имеют место другие виды погрешностей (погрешность статической настройки, погрешности, связанные с износом инструмента, и др.).

2.2. Управление точностью обработки на фрезерных станках с ЧПУ

При объемном фрезеровании концевой радиусной фрезой изменение конфигурации и угла наклона обрабатываемой поверхности вызывает изменение активной длины режущей кромки и ее положения. В результате этого в работу включаются различные участки криволинейной режущей кромки, имеющие неодинаковую режущую способность и снимающие различный объем металла. Указанная способность обработки деталей сложного профиля вызывает значительное изменение величины и направления результирующей усилия резания, что, в свою очередь, порождает переменную величину погрешности профиля фасонной поверхности.

Полученные для объемного фрезерования аналитические зависимости, позволяющие установить взаимосвязь сил резания с конфигурацией обрабатываемой поверхности, имеют вид:

$$P_z = 1,15\sigma_i \cdot S_z \int_{\varphi_H}^{\varphi_B} K \cdot \cos \beta \cdot R d\varphi + 0,252\mu \cdot \sigma_i \int_{\varphi_H}^{\varphi_B} l_3 \cdot R d\varphi;$$

$$P_x = 1,15\sigma_i \cdot S_z \int_{\varphi_H}^{\varphi_B} K \cdot \sin \beta \cdot \cos \varphi \cdot R d\varphi + 0,252\sigma_i \int_{\varphi_H}^{\varphi_B} l_3 \cdot \cos \varphi \cdot R d\varphi;$$

$$P_y = 1,15\sigma_i \cdot S_z \int_{\varphi_H}^{\varphi_B} K \cdot \sin \beta \cdot \sin \varphi \cdot R d\varphi + 0,252\sigma_i \int_{\varphi_H}^{\varphi_B} l_3 \cdot \sin \varphi \cdot R d\varphi;$$

$$\text{при } K = \frac{\sqrt{1 - (\sin \varphi \cdot \sin \psi \cdot \sin \omega + \cos \varphi \cdot \cos \omega)^2 - \sin^2 \varphi \cdot \cos^2 \psi}}{\sin \beta_1},$$

где P_z, P_x, P_y — окружная, осевая и радиальная силы соответственно; S_z — подача на зуб; φ_n, φ_v — углы, характеризующие нижнюю и верхнюю границы «пятна контакта» фрезы с припуском; ψ — угол поворота зуба; ω — угол наклона обрабатываемой поверхности в направлении подачи; R — радиус сферической части фрезы; μ — коэффициент трения.

Стабилизацию размера динамической настройки целесообразно производить введением направленного изменения подачи, кусочно назначаемой на участках контура обработки.

Для реализации управления режимами резания с целью повышения точности обработки необходима математическая модель, адекватно отражающая влияние подачи на погрешность динамической настройки ΔA_d . Такая модель может быть представлена в виде функциональной зависимости $S = f(P_x, P_y, P_z, \Delta A_d)$. С учетом аналитических формул для расчета сил резания закон управления подачей в зависимости от профиля обрабатываемой поверхности имеет вид:

$$S_z = \frac{\Delta_N \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} + 1 - \sum_{n=1}^z \sum_{j=1}^k \left(\frac{\varphi_{впj}}{\varphi_{нпj}} \int 0,252 \sigma_1 \cdot l_3}{\int 1,15 \sigma_1 \frac{a}{\sin \beta_1}} \right)}{\left[\frac{l^3}{3E \cdot J_{пр}} \cdot \left(\mu \left(\cos \psi \frac{\partial z}{\partial y} + \sin \psi \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \sin \varphi \left(\sin \psi \frac{\partial z}{\partial y} - \cos \psi \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right) + \frac{\cos \varphi}{j_{zc}} \right] R d\varphi} \cdot \left(\sin \psi \frac{\partial z}{\partial y} - \cos \psi \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \frac{\sin \beta \cdot \cos \varphi}{j_{zc}} \right] R d\varphi}, \quad (2.3)$$

где Δ_N — величина допустимых упругих деформаций в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности; $\frac{\partial z}{\partial x}$, $\frac{\partial z}{\partial y}$ — тангенсы углов наклона касательных к обрабатываемой поверхности в соответствующих координатах; z — количество зубьев фрезы; $\frac{1}{j_\phi}$ — податливость фрезы в плоскости XY; $\frac{1}{j_z}$ — податливость технологической системы в осевом направлении.

Разработанная математическая модель управления подачей (2.3), обладающая гибкостью и возможностью адаптации к различным условиям объемного фрезерования, позволяет назначать подачу для любого участка детали пространственно-сложной формы с учетом допустимой погрешности обработки.

На рис. 2.3 показаны графики изменения погрешности обработки на разных участках детали цилиндрической формы. График изменения погрешности обработки при стационарном режиме (2) наглядно показывает необходимость закономерного изменения подачи на разных участках поверхности пространственно-сложной формы. При обработке детали с переменной подачей, рассчитанной по зависимости (2.3), диапазон изменения погрешности обработки в пределах одной фасонной поверхности существенно сокращается (см. рис. 2.3, график 3).

Таким образом, применение методики назначения подачи с учетом аналитического силового моделирования процесса фрезерования пространственно-сложных поверхностей позволяет повысить точность обработки в 2–3 раза.

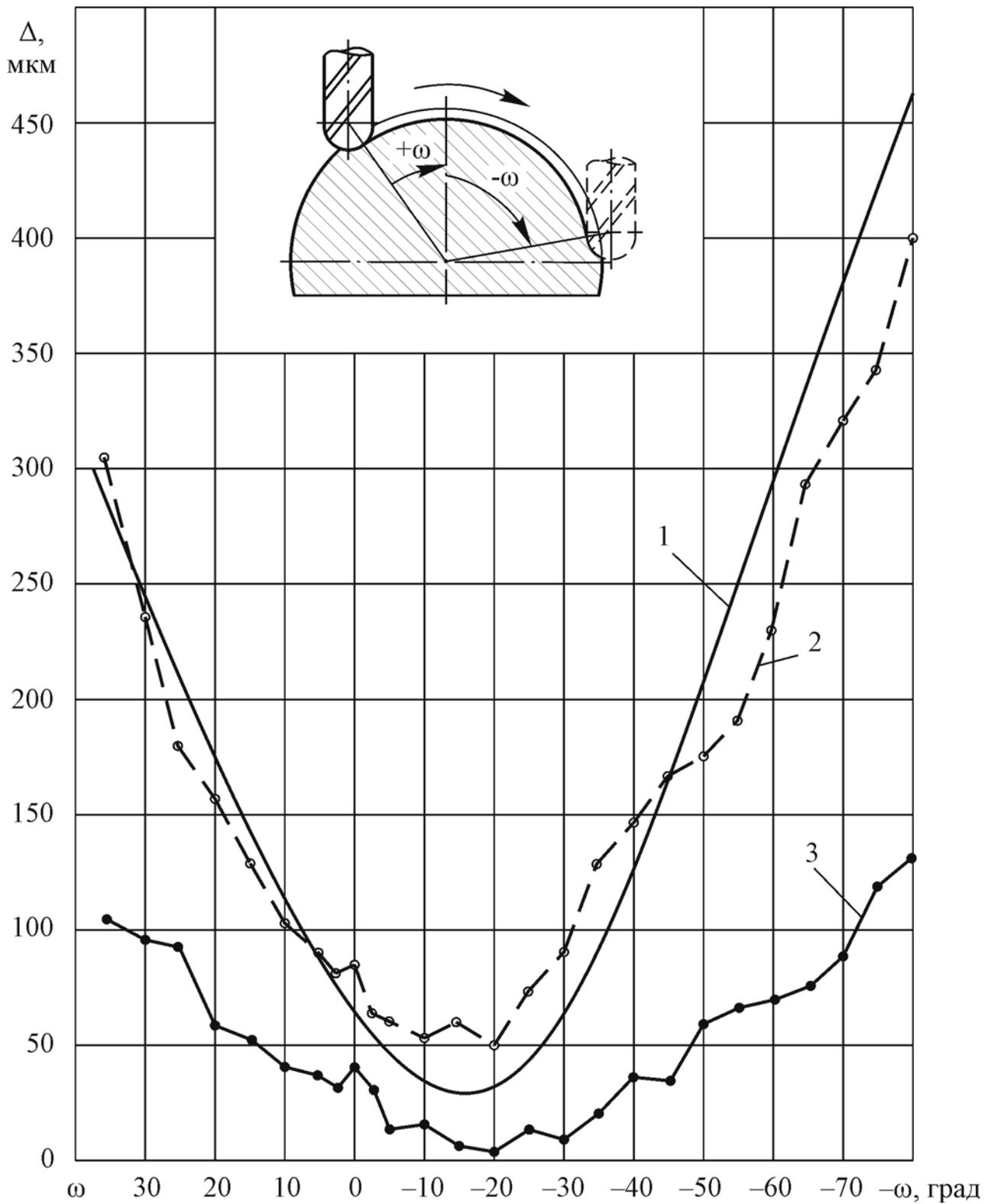


Рис. 2.3. Графики изменения погрешности обработки на разных участках детали: 1 — расчетная погрешность обработки при $S_z = \text{const} = 0,1$ мм/зуб; 2 — фактическая погрешность обработки при $S_z = \text{const} = 0,1$ мм/зуб; 3 — фактическая погрешность обработки при $S_z = \text{var}$

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБРАБОТКА ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ	
1.1. Геометрическая систематизация фасонных поверхностей.....	4
1.2. Расчет управляющей информации для обработки кинематических поверхностей двойной кривизны.....	10
1.3. Технологические схемы обработки фасонных поверхностей	
1.3.1 Систематизация технологических схем обработки.....	16
1.3.2. Формообразование на многокоординатных станках с ЧПУ.....	18
1.3.3. Формообразование на трехкоординатных станках с ЧПУ.....	18
2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ТОЧНОСТЬЮ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	20
2.1. Управление точностью обработки на токарных станках с ЧПУ.....	20
2.2. Управление точностью обработки на фрезерных станках с ЧПУ.....	26

Гузеев Виктор Иванович
Батуев Виктор Анатольевич
Батуев Виктор Викторович

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
НА МНОГОКООРДИНАТНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ**

Техн. редактор А.В. Миних

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать . . . 2013. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Заказ / .

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск,
пр. им. В.И. Ленина, 76.