

## Повышение точности обработки на станках с числовым программным управлением

© В.В. Додонов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*В статье рассмотрены вопросы формирования погрешностей обработки на металлорежущих станках с числовым программным управлением (ЧПУ), приведены расчетные и экспериментальные данные о реальной точности обработки. Проанализированы причины возникновения типовых погрешностей в узлах, механизмах и устройствах металлорежущих станков с ЧПУ, а также их влияние на точность обработки. Представлены применяемые в механосборочном производстве методики измерения точности обрабатываемых на станках с ЧПУ заготовок и требования к точности обработки в зависимости от условий эксплуатации. Приведены соотношения элементарных составляющих суммарной погрешности при позиционной и контурной обработке. Рассмотрены вопросы формирования технологической надежности как свойства сохранять во времени первоначальную точность оборудования и точность обработки. Проанализированы возможности повышения точности обработки с помощью коррекции управляющих программ и частичной компенсации элементарных погрешностей. Описаны существующие методы повышения точности обработки, используемые отечественными и зарубежными станкостроительными фирмами.*

**Ключевые слова:** металлорежущие станки, станки с ЧПУ, точность обработки, коррекция управляющих программ, компенсация погрешностей обработки.

**Введение.** Разработка и изготовление новых изделий, машин, оборудования, оснастки требуют применения новых конструкций, материалов, методов обработки и сборки. При этом требования к качеству изделий и точности их изготовления неуклонно возрастают. Возникают проблемы, связанные с повышением точности обработки прецизионных деталей машин, приборов, оснастки, в том числе и на станках с ЧПУ, что, в свою очередь, затрагивает вопросы метрологического обеспечения точности измерений заготовок, полуфабрикатов, обработанных деталей, измерений состояния самой технологической системы, включающей станок, приспособления, инструмент и деталь.

**Точность и стоимость обработки.** Точность обработки  $T$  деталей на станках с ЧПУ характеризуется величиной, обратной модулю относительной погрешности  $\Delta X/X_n$  [1]:

$$T = \left| \frac{\Delta X}{X_n} \right|^{-1} = \left| \frac{X_n}{\Delta X} \right|,$$

где  $\Delta X$  — абсолютная погрешность обработки, мкм;  $X_n$  — номинальный размер (например, линейный), мм.

При оценке точности обработки различают следующие основные виды погрешностей (отклонений) геометрических параметров обработанной детали: отклонения размера, расположения, формы, волнистость и шероховатость поверхности.

Таблица

№ интервала	Интервалы номинальных размеров, мм	Допуск, мкм, для квалитетов					
		6	7	8	9	10	11
6	30–50	16	24	39	62	100	160
7	50–80	19	30	46	74	120	190
⋮	⋮						
10	180–250	29	46	72	115	185	290
⋮	⋮						
12	315–400	36	57	89	140	230	360
13	400–500	40	63	97	155	250	400

В таблице представлены пять интервалов номинальных размеров с указанием соответствующих допусков для квалитетов с 6-го по 11-й. Большая часть (60...70 %) корпусных и ротационных деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ, имеют размер 180...500 мм. Фрагменты этих деталей содержат и меньшие размеры, расположенные в интервалах 30...50, 50...80 мм. Поскольку реальные размеры деталей должны иметь меньшие или равные погрешности, включая не только допуски на размеры, но и допуски на взаимное расположение, допуски формы и другие, требования к точности возрастают. В таблице указано верхнее ограничение на допустимую точность деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ. Анализ таблицы показывает, что детали, изготавливаемые по квалитетам 9–11, имеют большие допуски, поэтому их обработка на станках с ЧПУ не представляет каких-либо технологических трудностей. Обработка же деталей по 7-му, 8-му и тем более по 6-му квалитету требует дополнительной технологической проработки, более точных станков, приспособлений, инструмента, оснастки.

Погрешность измерения детали  $\Delta_n$  может быть представлена двумя составляющими — систематической  $\Delta_{\text{сист}}$  и случайной  $\Delta_{\text{сл}}$ :

$$\Delta_n = \Delta_{\text{сист}} + \Delta_{\text{сл}}$$

Систематическую погрешность  $\Delta_{\text{сист}}$  исключают, вычитая ее из результата измерения детали  $\bar{L}_{\text{дет}}$ . Случайная погрешность измерения детали оценивается доверительным интервалом математического ожидания:

$$\Delta_{\text{сл}} \bar{L} = \pm t \cdot S_{\bar{L}}.$$

Здесь  $\bar{L}$  — среднее арифметическое результатов измерения;  $t$  — коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности  $P$  и числа степеней свободы  $\nu$ , где  $\nu = n - 1$  ( $n$  — число измерений);

$S_{\bar{L}}$  — среднее квадратическое отклонение  $\bar{L}$ ,  $S_{\bar{L}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$ , где  $S$  — среднее квадратическое отклонение при измерениях детали,

$$S = \sqrt{\sum_{j=1}^n (L_j - \bar{L})^2 / n - 1}.$$

Для оценки точности обработки геометрических форм деталей, таких как прямолинейность, плоскостность, перпендикулярность, параллельность, извернутость поверхностей, соосность отверстий, используют специальные контрольно-измерительные приспособления.

Контрольно-измерительные поверочные приспособления — устройства, расширяющие возможности использования измерительных приборов, — позволяют осуществлять замеры величин отклонений поверхностей контролируемых деталей.

Поверочные приспособления собирают из отдельных элементов, которые входят в специальный комплект — УСКИП (универсально-сборные контрольно-измерительные приспособления): стержни, валики, элементы крепления стержней, базовые опоры, элементы крепления измерительных средств и др. Комплект УСКИП позволяет собрать универсальные мостики, угловые мостики, приспособления для проверки параллельности, перпендикулярности, соосности отверстий в корпусных деталях и т. д. При оценке точности обработки применяют также оптические средства.

Обрабатываемая деталь за период своего жизненного цикла последовательно проходит через процессы разработки, изготовления, промежуточного и окончательного контроля, эксплуатации. Между этими процессами существует преемственность, заключающаяся в изменении роли и места обрабатываемой детали, и возможен переход погрешностей проектирования, изготовления и измерения на погрешность функционирования детали в механизме, устройстве, узле. Такое изменение роли и места детали и переход погрешностей изготовления на погрешность функционирования детали в конкретном механизме, устройстве, узле называют принципом инверсии.

Точность обработки деталей в большинстве случаев влияет на функциональную и параметрическую надежность изделий, собранных из отдельных, обработанных с той или иной точностью деталей.

Параметры точности обработки, влияющие на эксплуатационные показатели работы изделия, называются функциональными, так как они определяют служебные функции деталей узлов, машин, приборов. Например, соосность расточки основных отверстий в корпусе редуктора будет определять точность зацепления зубчатых колес, надежность и долговечность редуктора, коэффициент полезного действия, шум в работе, нагрев, вибрацию и т. д. Допуски на обработку корпусных деталей, например коробок скоростей, редукторов, содержат: допуск на непараллельность осей  $\delta_x$ , допуск на перекося осей  $\delta_y$ , допуск на межцентровое расстояние  $\Delta A$ . Так, для цилиндрических зубчатых колес, выполненных по 7-й степени точности, вышеуказанные параметры должны быть ограничены значениями, мкм:

$$\delta_x \leq 0,045B + 15,$$

$$\delta_y \leq 0,045B + 15,$$

$$\Delta A \leq (8...32)\sqrt[3]{A},$$

где  $B$  — ширина зубчатого колеса, мм;  $\Delta A$  — допуск на межцентровое расстояние, мкм [2].

Аналогичные функциональные ограничения по точности изготовления корпусных деталей существуют и у других изделий — конических и червячных редукторов, коробок перемены передач, изделий приборостроения и авионики.

Взаимозаменяемость изделий по оптимальным эксплуатационным показателям называют функциональной. Эксплуатационные показатели — это характеристики, определяющие качество выполнения изделием заданных функций.

Рассмотрим модель оценки необходимой обработки исходя из анализа ее роста и соответствующего повышения стоимости обработки. В каждом конкретном случае обработки существует значение точности  $T_i$ , выше и ниже которого обрабатывать деталь нецелесообразно.

Точность обработки  $T$ , параметры точности обработки, влияющие на эксплуатационные показатели работы изделия, — функциональная точность  $\Phi_j$  — и стоимость обработки  $C_i$  взаимосвязаны (рис. 1).

На рис. 1 точками 1, 2, 3 отмечены значения функциональных параметров, ограничивающих целесообразность дальнейшего повышения точности функционального параметра. Соответствующая точность обработки обозначена как  $T_1, T_2, T_3$ .

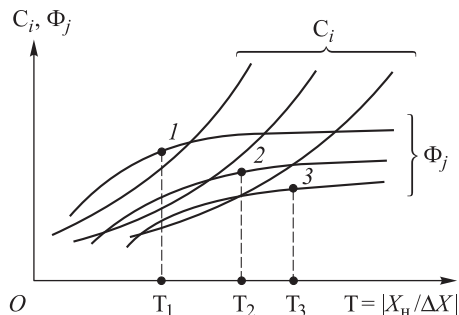


Рис. 1. Оценка целесообразности повышения точности обработки

Отклонения формы и расположения поверхностей деталей характеризуют отклонение формы реальной поверхности (реального профиля) от формы номинальной поверхности (номинального профиля).

При нормировании отклонений формы и расположения поверхностей деталей используют буквенные обозначения:  $\Delta$  — отклонение формы или расположения поверхностей;  $T$  — допуск формы или расположения;  $L$  — длина нормируемого участка. В качестве типовых можно отметить следующие отклонения расположения поверхностей обработанных деталей:

- от параллельности плоскостей;
- от параллельности осей (прямых);
- перекос осей (прямых);
- от перпендикулярности плоскостей;
- от соосности относительно общей оси и др.

Числовые значения допусков формы и расположения поверхностей устанавливают в зависимости от уровня относительной геометрической точности (А, В, С). Допуски формы или расположения составляют при этом соответственно 60, 40, 25 % допуска на размер. В некоторых случаях допуски формы и расположения ограничивают полем допуска номинального размера [3].

**Оценка элементарных погрешностей обработки.** Формообразование поверхностей и нагружение станка силами резания происходят в некоторой области пространства, которая называется рабочей зоной или рабочим полем станка. Под словом «поле» здесь подразумевают область пространства, каждой точке которого можно поставить в соответствие значения определенных скалярных и векторных функций, например жесткости, точности, температуры, частоты и амплитуды колебаний и т. д. [4].

Силовые характеристики — силы резания и крутящие моменты, соответствующие точкам рабочего поля, — образуют силовое поле. Это поле — векторное, поскольку в общем случае сила резания является трехмерным вектором:

$$P = P_x i + P_y j + P_z k,$$

где  $i, j, k$  — орты направления осей  $x, y, z$  соответственно.

Рабочее поле станка характеризуется жесткостью упругой механической системы, запасом устойчивости, уровнем частот собственных колебаний, передаточными отношениями между колебаниями узлов станка и смещениями инструмента и заготовки и т. д.

Формообразование поверхностей на станке происходит в результате взаимного перемещения заготовки и режущего инструмента, поэтому рабочее поле (РП) станка образуется в результате взаимодействия поля детали (ПД) и поля инструмента (ПИ), при этом РП определяется как область пересечения ПД и ПИ:

$$\text{РП} = \text{ПД} \cap \text{ПИ}.$$

Если истинное направление равнодействующей силы резания известно, расчет упругих перемещений оказывается близким к действительным смещениям в станке. При обработке на станке сила резания действует одновременно на силовые узлы крепления инструмента и заготовки. Поэтому жесткость станка должна исчисляться по суммарному упругому перемещению стола и шпиндельного узла [5].

С точки зрения точности обработки на станке важно знать вероятностную картину значений характеристик жесткости, тепловых деформаций, точности и других параметров внутри РП, желательно также знать статистику использования РП при обработке конкретной номенклатуры деталей. В станках с ЧПУ расположение силового поля от действия сил резания  $P_x, P_y, P_z$  и моментов определяется типовой технологией обработки и видом используемых инструментов, режимами обработки и т. д.

С изменением координат точек поверхности обрабатываемой детали меняются следующие характеристики: вылеты точек приложения сил резания относительно направляющих и несущих корпусных деталей; положение центров тяжести узлов станка и обрабатываемой заготовки; нагрузки и упругие деформации; частоты собственных колебаний; другие показатели, непосредственно или косвенно связанные с точностью обработки на станке.

При изготовлении детали формируется поле погрешностей обработки конкретной детали на конкретном станке. Если представить поле погрешностей в виде непрерывной функции  $f(x, y, z)$  РП, значения погрешностей можно определить путем расчета и анализа этой функции с подстановкой соответствующих координат РП.

При обработке на фрезерном или многоцелевом станке с ЧПУ суммарную погрешность  $\Delta_{\Sigma}$ , или поле рассеивания, выполняемого размера можно выразить функциональной зависимостью

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + 3\Delta_4^2 + 3\Delta_5^2 + \Delta_6},$$

где  $\Delta_1$  — погрешность из-за упругих отжатий в системе СПИД (станок–приспособление–инструмент–деталь) и нестабильности сил резания;  $\Delta_2$  — погрешность базирования;  $\Delta_3$  — погрешность настройки станка;  $\Delta_4$  — погрешность из-за тепловых деформаций системы СПИД;  $\Delta_5$  — погрешность из-за размеренного износа режущего инструмента;  $\Delta_6$  — погрешность из-за геометрических неточностей станка и других факторов, например погрешностей следящих приводов подачи [6].

При оценке точности обработки на станках с ЧПУ различают экономически обоснованную и предельно допустимую точность обработки. Экономически обоснованная точность достигается при обработке на станках нормальной точности (класс точности станков Н) с применением традиционной оснастки, инструмента и приспособлений. Предельно допустимая точность обработки реализуется при использовании прецизионного станочного оборудования (класс точности станков А или В), специальной технологической оснастки и инструмента и при большей норме времени на обработку. В результате стоимость обработки деталей резко (в несколько раз) возрастает, снижается процент выхода годных деталей. Таким образом, для применения повышенного уровня точности обработки требуется технико-экономическое обоснование.

Существуют различные методы расчета и оценки точности механической обработки; к наиболее распространенным относятся: вероятностно-статистический, расчетно-аналитический, экспертный, экспериментально-расчетный и др.

При оценке возможной точности обработки на станке с ЧПУ целесообразно использовать статистические данные по удельному влиянию каждой элементарной погрешности  $\Delta_i$  в общем балансе формирования суммарной погрешности обработки  $\Delta_{\Sigma}$ . В работе [7] приведены данные об удельном влиянии элементарных погрешностей (в % от  $\Delta_{\Sigma}$ ):

- позиционирование станка — 5...10;
- жесткость станка, приспособления, инструмента — 15...20;
- размерный износ инструмента — 5...10;
- установка заготовки — 20...25;
- тепловые деформации — 15...20;
- наладка, настройка станка — 10...15.

При позиционной обработке заготовок на фрезерном станке средних размеров 654РФ3 расчетное значение точности размера  $\Delta_p$  составляет 70...90 мкм, экспериментальные измерения  $\Delta_3$  дают результат 70 мкм. При контурной обработке на том же станке  $\Delta_p = 95...110$  мкм,  $\Delta_3 = 120$  мкм [8].

Одной из составных частей геометрической погрешности станка, влияющей на точность обработки, является погрешность позиционирования стола или суппорта станка с ЧПУ.

При двустороннем позиционировании она рассчитывается по формуле:

$$\Delta_{\text{поз}} = (\bar{x} - x_{\text{прог}}) \pm \left( 3\sigma + \frac{f}{2} \right).$$

Здесь  $\bar{x} = \frac{\bar{x}_{\text{пр}} + \bar{x}_{\text{л}}}{2}$ , где  $\bar{x}_{\text{пр}}$  и  $\bar{x}_{\text{л}}$  — среднее арифметическое действительного положения рабочего органа станка при многократном подходе

слева направо и справа налево соответственно,  $\bar{x}_{\text{пр}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_{i \text{ пр}}$ ,

$\bar{x}_{\text{л}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_{i \text{ л}}$  ( $N$  — количество повторных перемещений при позиционировании, принимают  $N = 7$ ;  $\bar{x}_{i \text{ пр}}$  и  $\bar{x}_{i \text{ л}}$  — действительные положения рабочего органа станка при двустороннем позиционировании);

$x_{\text{прог}}$  — заданное по программе управления положение рабочего органа станка;

$3\sigma$  — зона рассеивания, характеризующая случайные процессы при многократном двустороннем позиционировании,

$3\sigma = \frac{3\sigma_{\text{л}} + 3\sigma_{\text{пр}}}{2}$ , где  $\sigma_{\text{л}}$  и  $\sigma_{\text{пр}}$  — среднее квадратическое отклонение при подходе к заданной точке слева и справа соответственно.

Если считать, что закон распределения действительного положения рабочего органа станка — нормальный, то  $\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\sum (x_{i \text{ пр}} - \bar{x}_{\text{пр}})^2}{N-1}}$ ,

$\sigma_{\text{л}} = \sqrt{\frac{\sum (x_{i \text{ л}} - \bar{x}_{\text{л}})^2}{N-1}}$ ;  $f$  — зона нечувствительности, появляющаяся при

реверсе перемещения рабочего органа,  $f = |\bar{x}_{\text{пр}} - \bar{x}_{\text{л}}|$ .

На рис. 2 показан график погрешности позиционирования для фрезерного станка с ЧПУ при двустороннем позиционировании стола по координате  $y$ .

Результаты эксперимента позволяют определить текущую погрешность позиционирования  $\Delta_{\text{поз}}^{\text{тек}}$  и ее максимальное значение  $\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$  на всей длине хода рабочего органа станка с ЧПУ.



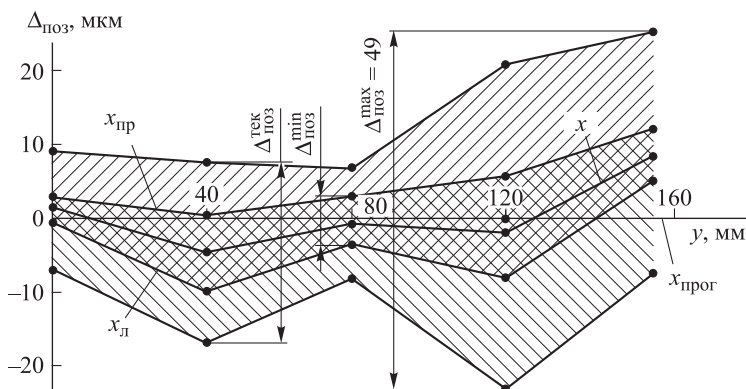


Рис. 2. Погрешность позиционирования стола фрезерного станка с ЧПУ

Точность обработки деталей на станках с ЧПУ определяется точностью: станка, применяемых приспособлений и оснастки, инструментальной системы станка, системы ЧПУ и т. д., а также режимами обработки.

Результирующая, действительная погрешность обработки на станках с ЧПУ определяется совокупностью погрешностей и ошибок  $\Delta_i$ , возникающих в корпусных деталях станка, приводах подачи и главного движения, в системе управления, инструменте, заготовке, системе контроля и измерения. Все составляющие элементарные погрешности обработки неодинаково влияют на суммарную погрешность обработки  $\Delta_\Sigma$  и по-разному проявляются при различных видах обработки. Так, при контурной обработке значительное воздействие оказывают погрешности шариковинтовых пар приводов подачи, ошибки датчиков обратной связи по положению и скорости, геометрическая погрешность станка. При позиционной обработке основными являются погрешности датчиков обратной связи, ошибки шариковинтовых передач, размерная ошибка установки инструмента, размерные деформации станка и приспособления.

Для оценки таких характеристик точности обработки деталей, как прямолинейность и плоскостность, перпендикулярность и параллельность поверхностей, извернутость, соосность отверстий, используют специальные контрольно-измерительные поверочные приспособления, оптические и электронные измерительные устройства, координатно-измерительные машины, специальные измерительные приспособления.

Точностные параметры в деталях машиностроения и приборостроения с типовыми размерами от  $250 \times 250 \times 250$  до  $400 \times 400 \times 400$  мм характеризуются отклонениями: от соосности поверхностей —  $20 \dots 30$  мкм, от симметричности поверхностей —  $20 \dots 50$  мкм, от плоскостности —  $30 \dots 50$  мкм, а также допуском на угловое отклонение поверхности  $\pm 15'' \dots \pm 30''$  и допуском на межосевое расстояние  $2 \dots 5$  мкм [9].

Допуски размеров обработанных деталей задают по ГОСТ 25346–82, допуски формы и расположения — по ГОСТ 24643–81. Нормы точности и жесткости фрезерных станков — вертикальных с крестовым столом и консольных — представлены в ГОСТ 9726–83Е и ГОСТ 17734–81Е.

Рассмотренные элементарные погрешности и динамика их изменения во времени позволяют судить об изменении точности обработки во времени и о технологической надежности станков с ЧПУ как свойстве сохранять первоначальную точность оборудования и точность обработки. Термины и определения в области погрешностей обработки установлены ГОСТ 15895–77.

Суммарная погрешность обработки  $\Delta_{\Sigma}$  выражается зависимостью:

$$\Delta_{\Sigma} = f\left(\Sigma\Delta_i^{\text{п}}; \Sigma\Delta_k^{\text{пер}}; \Sigma\Delta_m^{\text{с}}\right),$$

где  $\Delta_i^{\text{п}}$  —  $i$ -я постоянная погрешность;  $\Delta_k^{\text{пер}}$  —  $k$ -я переменная систематическая погрешность;  $\Delta_m^{\text{с}}$  —  $m$ -я случайная погрешность.

В состав этих погрешностей входят погрешности размеров и формы.

Распределение действительных размеров в партии обрабатываемых деталей подчиняется в большинстве случаев закону нормального распределения

$$y = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma} \exp\left[-x^2 / 2\sigma^2\right],$$

где  $y$  — частота появления погрешности;  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение аргумента;  $x$  — отклонение действительных размеров от среднего значения.

Кривые нормального распределения поля рассеивания размеров при обработке на станке позволяют оценить пригодность данного станка для обработки конкретной детали с допуском  $\delta$ . Для устранения брака при обработке необходимо соблюдение условия  $6\sigma \leq \delta$ , при этом центр поля рассеивания размеров должен быть таким, чтобы вероятные размеры деталей лежали в пределах допуска.

Основные причины, определяющие технологическую надежность станка, связаны со случайными явлениями, которые описываются с использованием математического аппарата теории вероятностей. Поэтому технологический отказ (например, возникновение брака по одному из размеров детали) — это случайное событие, наработка станка до возникновения технологического отказа — случайная величина, процесс, приводящий к потере точности обработки, — случайная функция.

Технологическую надежность можно оценить запасом надежности  $K_n$ :

$$K_n = \frac{x_{\max}}{x_{\text{эк}}} > 1,$$

где  $x_{\max}$  — значение одного из параметров, при котором возникает технологический отказ системы СПИД;  $x_{\text{эк}}$  — экстремальное значение параметра  $x$  для текущего времени обработки [9].

Как показывает практика эксплуатации станков, значение  $x_{\text{эк}}$  с течением времени  $t$  возрастает, а значение  $K_n$  уменьшается. При  $K_n = 1$  ( $x_{\max} = x_{\text{эк}}$ ) возникает вероятность  $P(t)$  отказа технологической системы, что вызывает появление брака по данному значению параметра.

Объемная точность станка является оценкой измеренной расчетной суммарной погрешности при обработке трехмерных поверхностей. Оценка объемной точности показывает степень приближения действительной, обработанной на станке, поверхности к поверхности, заданной программой.

В качестве критерия близости этих двух поверхностей предлагается использовать объем пространства  $J$  между этими поверхностями [10]:

$$J = \frac{1}{N} \iint_F |\delta(x, y)| dx dy,$$

где  $N$  — нормирующий коэффициент;  $F$  — обрабатываемая поверхность;  $\delta(x, y)$  — погрешность обработки детали в точке с координатами  $(x, y)$ .

В отклонения (погрешности) обработанной поверхности  $(x, y)$  на основе принципа суперпозиции входят погрешности станка, приспособления, инструмента и детали.

Объемная точность станка может быть определена на основании измерения отклонений реального перемещения от расчетного при холостом ходе станка. При этом измерение может производиться с применением специальных калиброванных механизмов или образцовой детали. Третий метод оценки точности основан на измерении отклонения обработанной поверхности — «следа» — от его расчетного значения [11].

Обеспечение малых приведенных силовых деформаций несущей системы станка непосредственно зависит от его статической и динамической жесткости. В настоящее время для некоторых моделей многоцелевых станков с ЧПУ фрезерно-расточной группы, например для станка DHP50 фирмы MoriSeiki, жесткость несущей системы со-

ставляет 120 Н/мкм. При испытаниях станков, как правило, исследуют их жесткость по координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , а также измеряют крутильную жесткость планшайбы. Для многоцелевых станков с ЧПУ средних размеров допустимой считается жесткость 60...80 Н/мкм. Для станка MC-300 экспериментальные значения жесткости по координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$ :  $j_x = 12,5$  Н/мкм,  $j_y = 25$  Н/мкм,  $j_z = 75$  Н/мкм; крутильная жесткость планшайбы  $j_c = 153$  Н/мкм [12].

**Компенсация погрешностей обработки.** Автоматизация сбора, использования информации об элементарных погрешностях при обработке заготовок и последующего управления станком с целью компенсации этих погрешностей осуществляется специальными измерительными каналами. Как правило, они содержат датчики, фильтры, усилители, согласующие устройства, аналого-цифровые преобразователи и т. д.

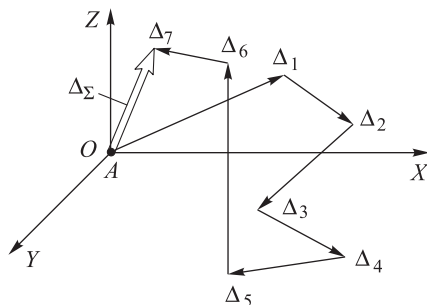
Система ЧПУ управляет рабочим циклом станков в соответствии с управляющей программой (УП). УП содержит измерительные циклы с использованием измерительных головок и других датчиков, расположенных на станке. В результате выполнения измерительных циклов и опроса других датчиков формируются корректирующие воздействия, необходимые для компенсации возможных погрешностей в настройке технологического процесса обработки заготовки на станке.

Например, система ЧПУ станка DMG ULTASONIC10 (фирма DMG MORI) позволяет измерять в автоматическом режиме размерный износ инструмента и корректировать программу обработки. С помощью системы ЧПУ можно также осуществлять автоматический контроль погрешности базирования детали с автоматическим вводом коррекции в программу обработки заготовки.

Инжиниринговый центр фирмы ФИНВАЛ разработал программу и комплект устанавливаемых на станок с ЧПУ датчиков для автоматического контроля положения шпиндельного узла и ввода коррекции в программу обработки для компенсации погрешностей из-за тепловых деформаций шпиндельного узла.

Благодаря адаптивным возможностям системы ЧПУ FlexNC происходит поддержка заданной нагрузки на инструменте в автоматическом режиме, что значительно повышает стойкость инструмента, уменьшает брак при обработке, позволяет вести обработку сложных заготовок с переменным припуском. С помощью системы управления можно оптимизировать технологический процесс обработки по параметрам точности обработки, времени обработки, стойкости инструмента и др.

Рассмотрим модель векторного суммирования элементарных погрешностей обработки. Она позволяет оценить погрешность обработки на основании измерений элементарных погрешностей.



**Рис. 3.** Схема формирования суммарной погрешности обработки  $\Delta_{\Sigma}$

Схема формирования суммарной погрешности обработки  $\Delta_{\Sigma}$  представлена на рис. 3. На рисунке показана возможная интерпретация расположения суммарной погрешности обработки  $\Delta_{\Sigma}$  в зависимости от значения и направления элементарных погрешностей  $\Delta_i$ , возникающих в технологической системе при обработке заготовки.

Как видно из рисунка, все точки, находящиеся в рабочей зоне станка, например точка  $A$ , имеют свой замыкающий вектор  $\Delta_{\Sigma}$ , являющийся векторной суммой элементарных погрешностей  $\Delta_i$ . Проекции замыкающего вектора на нормали плоскостей  $ZOX$ ,  $ZOY$ ,  $XOY$  и на любых других имеют разные значения, т. е. погрешности обработки, характеризуемые проекцией замыкающего вектора на нормаль к обрабатываемой поверхности, во всех плоскостях обработки будут различными. Векторы  $\Delta_i$  имеют разные значения и направления в зависимости от состояния технологической системы, режимов обработки и других параметров. Элементарные погрешности могут порождаться процессами быстро протекающими, медленно протекающими, процессами средней скорости. В процессе обработки  $\Delta_{\Sigma}$  изменяется по значению, по направлению или по значению и направлению. В связи с этим проекции замыкающего вектора  $\Delta_{\Sigma}$  на нормаль к обрабатываемой поверхности будут разными, в зависимости от расположения обрабатываемой поверхности в рабочем пространстве станка.

Некоторые погрешности  $\Delta_i$  имеют скорости изменения  $\Delta_i/dt$ , поэтому погрешность  $\Delta_{\Sigma}$  будет зависеть от длительности обработки детали. Для оценки погрешности обработанной детали  $\Delta_{\Sigma N}$  нужно обеспечить достоверное измерение погрешности обработки. Рабочая зона станка должна быть сертифицирована по точности позиционирования, жесткости (податливости), тепловым деформациям в каждой точке.

Системы ЧПУ, программы обработки деталей на станках с ЧПУ принципиально не могут предусмотреть всех факторов и особенностей, возникающих в процессе фактического изготовления конкретной детали. К таким факторам и особенностям можно отнести непредсказуемые изменения физико-механических свойств заготовок и инструментов, колебания припусков на заготовке, специфику работы приводов подачи станка и т. д. Эти скрытые факторы, которые не учитываются в программах управления станком, могут достаточно сильно влиять на точность обработки. Поэтому целесообразно в станках с ЧПУ использовать специальные системы самонастройки, алгоритмы и программы адаптивного управления и контроля. Например, на станки с ЧПУ фирмы Hermle (Германия) устанавливаются специальные датчики и дополнительные контуры управления, компенсирующие погрешности из-за тепловых деформаций шпиндельного узла и погрешности из-за отклонений в траектории движения детали относительно инструмента (датчики фирмы Heidenhain), а также выполняющие контроль износа инструмента, контроль точности обработки.

### **Выводы**

1. Повышение точности обработки на станках с ЧПУ является достаточно сложной технической задачей, включающей в себя решение конструкторских, технологических, метрологических вопросов, проведение дополнительных исследований, разработку специфического аппаратного и программного обеспечения.

2. Повышение точности обработки в большинстве случаев сдерживается из-за роста стоимости обработки, из-за необходимости учета функциональной, максимально допустимой погрешности обработки данных конкретных деталей.

3. Точность обработки на станках с ЧПУ в достаточной мере определяется конструктивным совершенством станка, его жесткостью, точностью позиционирования, тепловыми деформациями, точностью базирования, устойчивостью процесса резания и другими факторами.

4. Важнейшим фактором, обеспечивающим возможность получения заданной точности обработки на станке с ЧПУ, является достоверное измерение точности промежуточных и окончательных размеров обрабатываемой детали.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслов А.Г., ред. *Справочник технолога-машиностроителя*. В 2 т. Т. 1. 5-е изд., перераб. и доп. Москва, Машиностроение-1, 2001.
- [2] Дунаев П.Ф., Леликов О.П. *Расчет допусков размеров*. Москва, Машиностроение, 2006.

- [3] Решетов Д.Н., Портман В.Т. *Точность металлорежущих станков*. Москва, Машиностроение, 1986.
- [4] Гжиров Р.И., Серебрянический П.П. *Программирование обработки на станках с ЧПУ: справочник*. Ленинград, Машиностроение, 1990.
- [5] Федотов А.В., Лазаренко И.В. Особенности активного контроля в гибких производственных системах для механической обработки. *Измерительная техника*, 2011, № 7, с. 21–24.
- [6] Лазаренко И.В., Федотов А.В. Система активного контроля для обрабатывающего центра. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 12, с. 21–35.
- [7] Додонов В.В. Точность следящих приводов подачи станков с ЧПУ. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2004, № 8, с. 45–55.
- [8] Додонов В.В. Вероятностные модели расчета производительности автоматизированных станочных систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 11. DOI: 10.18698/2308-6033-2014-11-1334
- [9] Проников А.С. *Программный метод испытания металлорежущих станков*. Москва, Машиностроение, 1985.
- [10] Серков Н.А. Методы и средства измерений объемной точности многокоординатных станков с ЧПУ. *Вестник научно-технического развития*, 2012, № 3 (55), с. 26–46.
- [11] Серков Н.А., Шлесберг И.С., Никуличев И.В., Мерзляков А.А. Экспериментальное исследование статической жесткости 5-координатного станка с последовательной структурой несущей системы. *Вестник научно-технического развития*, 2014, № 2 (78), с. 51–59.
- [12] Рыбалко А.П., Рыбалко С.А. Адаптивные, диагностические и программные возможности универсальной системы ЧПУ FlexNC. *Автоматизация в промышленности*, 2010, № 5, с. 21–26.

Статья поступила в редакцию 16.05.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Додонов В.В. Повышение точности обработки на станках с числовым программным управлением. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-06-1506>

**Додонов Владимир Владимирович** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1965 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: автоматизация производственных процессов в машиностроении. e-mail: [baumanec1975@mail.ru](mailto:baumanec1975@mail.ru)

# Working accuracy enhancement for machine tools with digital programming control

© V.V. Dodonov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article is concerned with the problems of working error appearance on metal-cutting machine tools with digital programming control. First, we demonstrate the calculated and experimental data about a working accuracy, examine the causes of typical errors in assemblies, gears and devices of the metal-cutting machine tools with digital programming control and analyze their influence on the working accuracy. Then, we look at the accuracy measurement production methods of the blanks machined with digital programming control. These methods are used in mechanical assembly. Moreover, we discuss the working accuracy requirements depending on the accuracy requirements for the operation of the products using these blanks. Next, we present data about the ratio of the resultant error ultimate constituents in point-to-point and contour-cutting work. We also give careful consideration to the problems of forming of technological reliability as the feature which allows preserving the initial equipment precision and the working accuracy during the time. In addition, the article touches upon the possibilities of working accuracy improvement at the expense of control program correction and elementary errors partial compensation use. Finally, we provide data about existed working accuracy enhancement methods used by domestic and foreign machine tool companies.*

**Keywords:** cutting machine tool with digital programming control, working accuracy, control program correction, working errors compensation.

## REFERENCES

- [1] Dalskiy A.M., Kosilova A.G., Mescheryakov R.K., Suslov A.G. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya* [Manual of technologist and industrial engineer]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2001, vol. 1, 912 p.
- [2] Dunayev P.F., Lelikov O.P. *Raschyot dopuskov razmerov* [Dimension tolerance calculation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006.
- [3] Reshetov D.N., Portman V.T. *Tochnost metallorezhuschikh stankov* [Metal cutting machine tools accuracy]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 336 p.
- [4] Gzhirov R.I., Serebrenitskiy P.P. *Programmirovaniye obrabotki na stankakh s CHPU: spravochnik* [Working programming on the machine tool with digital programming control]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1990, 558 p.
- [5] Fedotov A.V., Lazrenko I.V. *Izmeritelnaya tekhnika — Measuring technology*, 2011, no. 7, pp. 21–24.
- [6] Lazrenko I.V., Fedotov A.V. *Izvestiya visshikh uchebnikh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2012, no. 12, pp. 21–35.
- [7] Dodonov V.V. *Izvestiya visshikh huchebnikh zavedeniy. Mashinostroyeniye — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2004, no. 8, pp. 45–55.
- [8] Dodonov V.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2014, no. 11.  
DOI 10.18698/2308-6033-2014-11-1334
- [9] Pronikov A.S. *Programmnyy metod ispytaniya metallorezhuschikh stankov* [Programmed method of metal cutting machine tools testing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 336 p.



- [10] Serkov N.A. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya — Herald of Scientific and Technical Development*, 2012, no. 3(55), pp. 26-46.
- [11] Serkov N.A., Shlesberg I.S., Nikulichev I.V., Merzlyakov A.A. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya—Herald of Scientific and Technical Development*, 2014, no. 2 (78), pp. 51–59.
- [12] Rybalko A.P., Rybalko S.A. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti — Automation in Industry*, 2010, no. 5, pp. 21–26.

**Dodonov V.V.** (b. 1942) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1965. Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of the Department of Metal Cutting Machines, Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests include production process automation in mechanical engineering. e-mail: baumanec1975@mail.ru