

УДК 621.914.2

Лещенко А.И.\*

### **АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОГРЕШНОСТИ НАСТРОЙКИ ИНСТРУМЕНТОВ НА ПРОГРАММНУЮ ОПЕРАЦИЮ**

*Определены аналитические зависимости отклонений взаимного расположения поверхностей от точности настройки токарного станка на операцию программной обработки. Полученные зависимости позволяют при заданной погрешности сопряжения поверхностей с радиусными образующими, получить числовые значения границ допустимой ошибки размерной привязки инструментов.*

Погрешность формы обрабатываемой на станке детали представляет собой сумму погрешностей, связанных со статической и кинематической точностью станка, размерной привязкой инструментов на этапе технологической наладки, а также погрешностей, зависящих от упругих деформаций системы под воздействием усилий резания.

Основным элементом наладки станка на программную операцию является размерная привязка инструментов, которая в единичном и серийном производстве проводится методом пробных проходов и промеров. Этот метод позволяет получить размеры детали с высокой точностью, однако, он не решает задачи учета погрешности взаимного расположения инструментов.

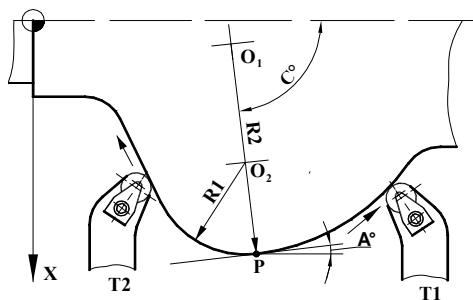


Рис. 1 – Обработка фасонной поверхности резцами T1 и T2.

точностью, однако, он не решает задачи учета погрешности взаимного расположения инструментов.

Например, для токарной обработки деталей с образующей, имеющей выпуклые и вогнутые участки, технологически оптимальным является построение траектории формообразования перемещением левого и правого контурных резцов (рис. 1). При наладке на программную операцию станков с ЧПУ в значениях размерной привязки системы координат инструмента (СКИ) к системам координат станка (СКС) и системе координат детали (СКД) для каждого из резцов присутствует некоторая ошибка, связанная с точностью измерительных устройств и квалификацией наладчика. Вследствие этого поверхность детали в области пересечения левой и правой траекторий инструментов (точка P) может иметь погрешность сопряжения. Если цилиндрические поверхности, как правило, обрабатываются одним резцом, то обработка тороидальных поверхностей радиусами R1, R2, с центрами в точках O1, O2, может выполняться резцами правым T1 и левым T2.

Вопросу исследования точности обработки на станках с ЧПУ уделяли внимание многие авторы. Понятие коэффициента точности наладки /1/ оценивает в большей степени совокупность приемов при размерной настройке инструмента. Классификация погрешности обработки на станках с ЧПУ /2/ характеризует источники их возникновения, а приведенное уравнение точности связывает его аргументы с положением базовой точки суппорта в СКС. Эти работы в полной мере характеризуют зависимость точности номинальных значений обрабатываемой поверхности от настройки формообразующего инструмента.

В данной работе приводится исследование точности взаимного расположения сопрягаемых поверхностей с радиусной образующей, в зависимости от значения погрешности размерной настройки резцов станка с ЧПУ, левого и правого, на операцию программной обработки.

Теоретически точное сопряжение радиусных образующих имеет следующие геометрические свойства:

\*ПГТУ, ст. преподаватель

- для дуг R1, R2 в точке касания P есть общая касательная под углом  $A^0$ ;
- сопрягаемые дуги R1, R2 имеют одинаковый конечный угол  $C^0$ ;
- центры  $O_1, O_2$  и точка касания P, лежат на одной прямой.

Перемещение по дуге окружности радиуса R (рис. 2) программируется проекциями радиуса-вектора I, K на координатные оси X и Z соответственно, проведенного из начальной точки (start point) в направлении центра O и координатой конечной точки (end point)  $X_{end}, Z_{end}$ .

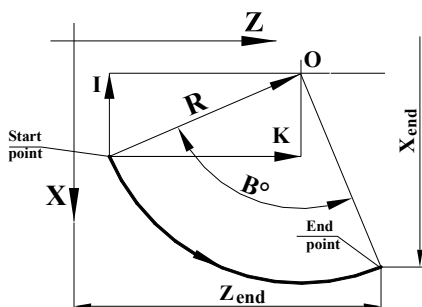


Рис. 2 – Программирование перемещения по дуге окружности

Фактически в программе дуга определяется центральным углом  $B^0$ , радиусом R и координатой центра O. Точность отработки приводами станка заданных  $B^0$  и R не зависит от размерной привязки. Координаты центра дуги в СКС зависят от точности размерной настройки инструмента, следовательно, при формировании дуги двумя резами может возникнуть погрешность взаимного расположения поверхностей с радиусной образующей.

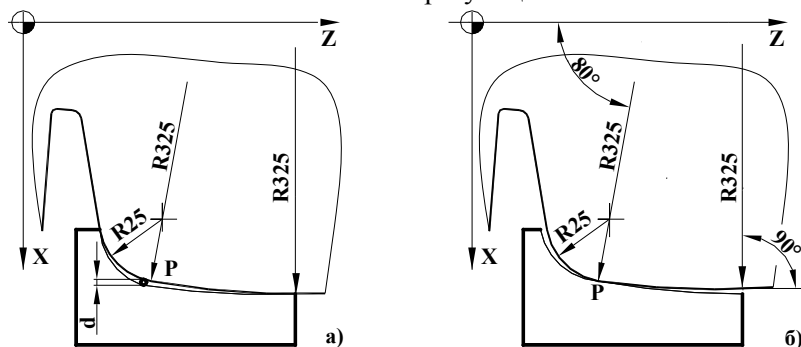


Рис. 3 – Контроль в продольном сечении фасонной поверхности прокатного валка шаблонами: а) профиль «полнее»; б) профиль «прослаблен».

Контроль в продольном сечении фасонной поверхности валка осуществляется шаблонами или на контрольно-измерительной машине (КИМ). Последний способ более точный. Однако, для крупногабаритных деталей, например, валков рельсового проката, погрешность формы, согласно ТИ 232-35-97, контролируется шаблонами на прилегание к образующей ручьев валка (рис. 3). Визуально погрешность формы отражает характер прилегания шаблона к образующей детали. Если профиль детали «полнее» (рис. 3а), то зазор d можно контролировать микрометрическим щупом или проволочкой (ГОСТ 2475-88). Если профиль детали «прослаблен» (рис. 3б), то при ее контроле однозначно оценить погрешность весьма затруднительно. Технологически погрешность «деталь полнее» легче исправить дополнительной обработкой, поэтому значение измерений в ходе размерной привязки стремятся округлить в сторону, где большая вероятность получить профиль с такой погрешностью. В этом случае, чтобы не получить «ступеньку» в области сопряжения фасонных поверхностей, дуга траектории перемещения реза программируется с выходом за точку сопряжения по касательной за материал припуска.

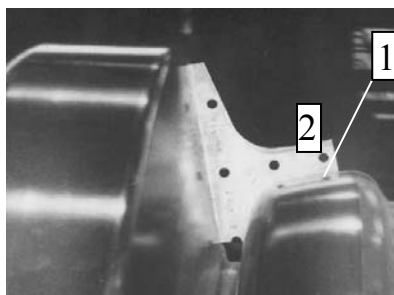


Рис. 4 – Контроль шаблоном 1 профиля ручья прокатного валка 2

Технологическая инструкция контроля профиля валков шаблонами на прилегание (рис. 4), ставит условием наличие зазора «не более 0.005 мм». В данной работе не анализируется технология измерения зазора, а ставится задача, определить: в каких пределах может изменяться погрешность размерной привязки чтобы, по крайней мере, теоретически, зазор не превысил значение, оговоренное в инструкции контроля.

Строить общую математическую модель образования зазора при контроле шаблонами, для всего спектра многовариантных конструкций сопряжений поверхностей с радиусными образующими, задача весьма затруднительная. Поэтому выбраны два угловых параметра ошибки сопряжения численные значения, которых позволяют рассчитать для конкретной фасонной поверхности погрешность размерной привязки и зазор при контроле шаблонами на прилегание.

Две дуги (рис. 5)  $R$  и  $r$  с центрами в точках  $O_1$ , и  $O_2$  соответственно определяют их теоретическую точку сопряжения  $N$ . Вследствие погрешности размерной настройки резца получен радиус детали  $r' = r$  с центром в точке  $O'_2$  и реальной точкой сопряжения  $P$  с угловой координатой  $C^0 - Dq^0$ .

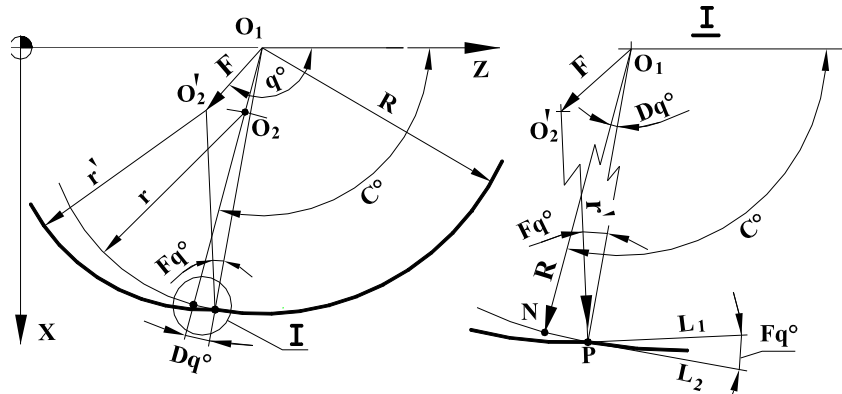


Рис. 5 – Геометрические соотношения сопряжения дуг радиусов  $R$  и  $r$ .

Значение погрешности сопряжения определим двумя величинами: угловым отклонением положения точки сопряжения  $Dq^0$  и угловой разностью касательных  $Fq^0$  в данной точке.

*Угловое отклонение положения точки сопряжения  $Dq^0$*  это угол отклонения от теоретического угла сопряжения  $C^0$ , т.е. угол между радиусом-вектором проведенным с центра окружности  $O_2$  в теоретическую точку сопряжения  $N$  и радиусом-вектором, проведенным в реальную точку пересечения  $P$  радиусных образующих поверхности.

*Угловая разность касательных в точке сопряжения  $Fq^0$*  – это разность углов наклона касательных  $L_1$  и  $L_2$  (рис. 4б), проведенных к каждой из радиусных образующих  $R$  и  $r'$  в точке их реального пересечения  $P$ .

Данное определение параметров погрешности сопряжения позволяет получить аналитическое выражение для вектора положения  $\bar{F}$ , определяющего реальный, с учетом ошибки размерной привязки инструмента, центр окружности сопряжения  $O'_2$  – его модуль  $|\bar{F}|$  и угловую координату  $q^0$ . Из геометрических соотношений получаем следующие функциональные зависимости:

$$|\bar{F}(Fq)| = \sqrt{R^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos(Fq) + r^2} \quad (1)$$

$$q(Fq, Dq) = \arctg \left[ \frac{\operatorname{tg}(C - Dq) - \frac{r \cdot \sin(Fq)}{R - r \cdot \cos(Fq)}}{1 - \tan(C - Dq) \cdot \frac{r \cdot \sin(Fq)}{R - r \cdot \cos(Fq)}} \right] \quad (2)$$

где  $\bar{F}$  – вектор положения центра окружности  $O'_2$ ;

$q^0$  – угловая координата вектора;

$C^0$  – теоретический угол сопряжения;

$Dq^0$  – угловое отклонение сопряжения;

$R, r$  – радиусы сопрягаемых окружностей;

$Fq^0$  – угловая разность касательных.

При угловых отклонениях  $Fq^0 = 0$  и  $Dq^0 = 0$  вектор положения имеет параметры  $|\bar{F}| = R - r$ ,  $q^0 = C^0$ , что исходя из свойств сопряжения, соответствует нулевой ошибке размерной привязки.

Анализ полученных аналитических зависимостей позволяет констатировать следующее:

1. Вектор положения  $\bar{F}$  не зависит от номинальных значений радиусов сопрягаемых поверхностей, а зависят от их соотношения  $r/(R - r)$ .

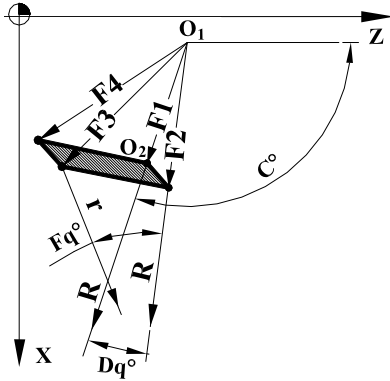


Рис. 6 – Границы поля допуска, для центра сопрягаемой дуги

2. При изменении углового положения в пределах  $0 \leq Dq^0 \leq Dq^0_{Lim}$  и угловой разности касательных  $0 \leq Fq^0 \leq Fq^0_{Lim}$  (где  $Dq^0_{Lim}$  и  $Fq^0_{Lim}$  – предельные значения рассматриваемых величин) вектор  $\bar{F}$  определит поле допуска, в границах которого находятся центры сопрягаемых дуг  $O'_2$  с требуемым свойством. С некоторым приближением поле допуска можно представить в форме параллелограмма (рис 6), вершины которого определяют значения векторов, рассчитанные по формулам (1) (2):

–  $\bar{F1}$  при  $Dq^0 = 0$  и  $Fq^0 = 0$ , указывает на точку центра дуги  $O_2$ . В случае если ошибки привязки нет;

–  $\bar{F2}$  при  $Dq^0 = Dq^0_{Lim}$  и  $Fq^0 = 0$ , в этом случае  $|\bar{F2}| = R - r$ , а  $q^0 = C^0 - Dq^0$ ;

–  $\bar{F3}$  при  $Dq^0 = 0$  и  $Fq^0 = Fq^0_{Lim}$ ;

–  $\bar{F4}$  при  $Dq^0 = Dq^0_{Lim}$  и  $Fq^0 = Fq^0_{Lim}$ .

3. Числовые границы поля допуска, в котором должны лежать точки с координатами центров сопрягаемых дуг  $O'_2$  при заданном интервале изменения  $Fq^0$ ,  $Dq^0$ , можно определить путем операций с проекциями векторов на координатные оси.

Границы поля допуска, который определяет допустимую погрешность размерной привязки в направлении осей Z и X, подчинены функциональным зависимостям  $F_z(Fq, Dq)$   $F_x(Fq, Dq)$  соответственно:

$$F_z(Fq, Dq) = |F2_z(Fq, Dq)| - |F4_z(Fq, Dq)| = |F2(Fq, Dq)| \cdot \cos(C - Dq) - |F4(Fq, Dq)| \cdot \cos(q) =$$

$$= (R - r) \cdot \cos(C - Dq) - \sqrt{R^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos(Fq) + r^2} \cdot \cos \left[ \arctg \left[ \frac{\operatorname{tg}(C - Dq) - \frac{r \cdot \sin(Fq)}{R - r \cdot \cos(Fq)}}{1 - \tan(C - Dq) \cdot \frac{r \cdot \sin(Fq)}{R - r \cdot \cos(Fq)}} \right] \right] \quad (3)$$

$$F_x(Fq, Dq) = |F2_x(Fq, Dq)| - |F4_x(Fq, Dq)| = |F2(Fq, Dq)| \cdot \sin(C - Dq) - |F4(Fq, Dq)| \cdot \sin(q) =$$

$$= (R - r) \cdot \sin(C - Dq) - \sqrt{R^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos(Fq) + r^2} \cdot \sin \left[ \arctg \left[ \frac{\operatorname{tg}(C - Dq) - \frac{r \cdot \sin(Fq)}{R - r \cdot \cos(Fq)}}{1 - \tan(C - Dq) \cdot \frac{r \cdot \sin(Fq)}{R - r \cdot \cos(Fq)}} \right] \right] \quad (4)$$

Данное теоретическое исследование может иметь практическое применение для технологической наладки станка на программную операцию. При известных значениях углового отклонения положения точки сопряжения  $Dq^0$  и угловой разности касательных  $Fq^0$  по формулам [3] [4] можно рассчитать параметры погрешности размерной привязки резцов. И напротив, если известна погрешность средств измерения и приспособлений для размерной привязки, т. е. возможная ширина поля допуска размерной настройки резцов вдоль оси X и Z, то можно получить предельные значения углового отклонения положения  $Dq^0$  и угловой разности  $Fq^0$ .

Например, для профиля валков рельсового проката (рис. 3) при сопряжении R365 и R25, средствами пакета Mathcad графики (рис. 7) функций двух переменных (3) и (4), отражающие изменение границ области погрешности размерной привязки в направлении осей X и Z, и их проекции на координатную плоскость в виде линий уровня (Control Plot).

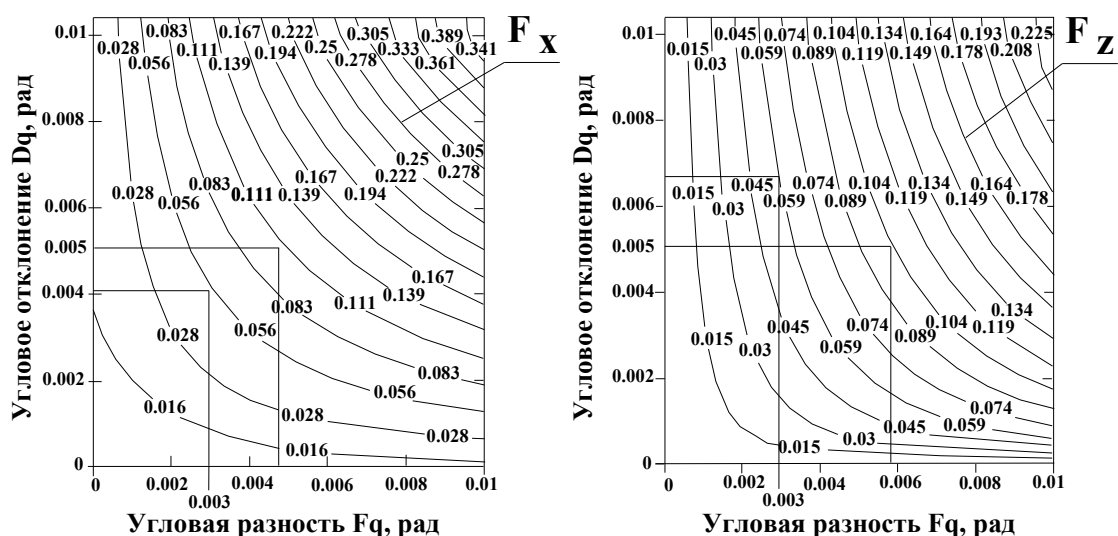


Рис. 7 – Графики линий уровня функций границ поля допуска  $F_Z(Fq, Dq)$   $F_X(Fq, Dq)$

Если поле допуска размерной привязки для каждого координатного направления 0,005, а предельное значение угловой разности  $Fq = 0,003$  рад (0,17 град), то угловое отклонение должно быть менее  $Dq < 0,004$  рад (0,23 град), т.к. лимитирующим значением для  $Dq$  будет  $Fz$ . Если поле допуска размерной привязки 0,01 и предельное значение углового отклонения  $Dq = 0,005$  рад (0,29 град), то угловая разность должна быть менее  $Fq < 0,005$  рад (0,25 град), т.к. лимитирующее значение для  $Fq$  будет  $Fx$ . Следовательно, полученные графики можно применять, как номограмму, позволяющую связать поле допуска размерной привязки и погрешность взаимного расположения радиусных поверхностей.

#### Выводы

1. Основные виды отклонений расположения поверхностей регламентирует ГОСТ 24642-81, в котором количественное отклонение формы оценивается, как наибольшее расстояние от точек реального профиля до прилегающей поверхности. Данная формулировка не позволяет получить аналитическое выражение для определения указанного расстояния, т.к. такие понятия как «реальный профиль» и «прилегающая поверхность» не имеют строгой математической формализации.
2. На основании геометрических соотношений и полученных в данной работе формул, такое понятие, как «погрешность сопряжения поверхностей с радиусными образующими» получает числовую оценку. Это открывает возможность для погрешностей этого типа, построения функций корреляции в зависимости от параметров процесса механической обработки.

#### Перечень ссылок

1. Гжиров Р. И. Программирование обработки на станках с ЧПУ / Р. И. Гжиров, П. П. Серебренецкий. – Л.: Машиностроение, 1990. – 489 с.
2. Дерябин А. Л. Программирование технологических процессов для станков с ЧПУ / А.Л. Дерябин. – М.: Машиностроение, 1984. – 51 с.
3. Основы технологии машиностроения / Под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 426 с.

Рецензент: А. А. Андилахай  
канд. техн. наук, доц., ПГТУ

Статья поступила 14.12.2007