

УЧЕТ КОНТАКТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ОПРАВКИ В ШПИНДЕЛЕ СТАНКА

© 2011 А.Ф. Денисенко, В.И. Петрунин, О.Ю. Казакова

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 10.11.2011

В статье рассмотрен процесс формирования инструментальной погрешности, влияющей на точность обработки.

Ключевые слова: станок, точность обработки, погрешность, инструмент, смена инструмента, базирование, закрепление

Требование повышения точности обработки сложных деталей машиностроения, обеспечиваемое обработкой с одного установка, и ограниченная емкость различных конструкций поворотных револьверных головок привела к широкому использованию систем автоматической СИ с применением инструментальных магазинов, которые, располагаясь в несущей системе станка или вне ее, но в непосредственной близости от рабочей зоны и шпинделя, осуществляют хранение запаса режущего инструмента, необходимого для полной обработки детали.

Основные достоинства системы автоматической СИ, заключающиеся в замене инструмента в шпинделе в надлежащей последовательности, в отсутствии необходимости в перерывах для отдыха и постоянного внимания оператора, сопровождаются тем, что оператор утрачивает возможность влияния на обеспечение эксплуатационных характеристик инструментальной системы, связанных с возможностью регулирования положения инструмента в отверстии шпинделя, регулирования силы затяжки и др., имеющих место в станках с ручной СИ.

Для крепления инструмента в шпинделе станка применяется коническое [1-3] или цилиндрическое соединение. Преимущественно используются конические соединения в связи с тем, что обеспечивают точное центрирование и жесткое сопряжение.

Оправки с конусностью 7:24 (с контактом по одной базировочной поверхности) остаются востребованными, несмотря на имеющиеся альтернативные варианты, так как имеют ряд преимуществ: меньшую стоимость (по сравнению с другими видами оправок), так как единственным ответственным, с точки зрения изготовления, элементом является сам конус; большинство

станкостроительных предприятий выпускают оборудование, в качестве инструментальной оснастки использующее оправки с конусностью 7:24; возможность размещения внутри самого конуса механизма зажима режущего инструмента в оправке, что существенно сокращает вылеты инструмента.

Наряду с достоинствами инструментальные конусы имеют ряд недостатков, приводящих к снижению их точностных и жесткостных характеристик [4]. Это связано с тем, что наличие контакта только по образующей конуса приводит к микроскопическим перемещениям вспомогательного инструмента под действием усилий резания в зоне большого диаметра оправки. Эти перемещения вызывают повышенный износ шпинделя в этой зоне (так называемый «эффект колокола»). Отсутствие однозначного базирования в осевом направлении приводит к неопределенности осевого положения инструмента. Жесткость соединения шпиндель-инструмент зависит от усилия тянущего механизма. Однако при увеличении усилия увеличиваются и деформации шпинделя, приводящие к снижению параметрической надежности.

Таким образом, точность обработки Δ на станке будет зависеть не только от погрешностей, возникающих в технологической системе станка $\Delta_{\text{станка}}$, но и от дополнительных погрешностей, связанных с работой механизма СИ $\Delta_{\text{СИ}}$:

$$\Delta = \Delta_{\text{станка}} + \Delta_{\text{СИ}}$$

Анализ баланса точности [5;6] показывает, что наибольшие погрешности при обработке возникают из-за недостаточной жесткости системы станок-инструмент-заготовка (СИЗ) и точности изготовления инструментальных наладок, от которых общие потери точности могут составлять до 80% всех погрешностей обработки.

Рассмотрению механизмов формирования погрешностей, возникающих в технологической системе станка $\Delta_{\text{станка}}$ и разработке методик их оценки за последние годы посвящено значительное число исследований и достигнуты существенные результаты [7-9].

Денисенко Александр Федорович, доктор технических наук, профессор, кафедры автоматизация производств и управление транспортными системами

Петрунин Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и станочных комплексов
Казакова Ольга Юрьевна, старший преподаватель кафедры автомобилей и станочных комплексов. E-mail: ask@samgtu.ru

Значительно меньше работ связано исследованием погрешностей $\Delta_{си}$, обусловленных работой механизма СИ. Смена инструмента с использованием инструментальных магазинов (при свободном гнезде шпинделя) предполагает выполнение нескольких этапов: выбор требуемого инструмента; перенос его к баззирующему конусу гнезда шпинделя; базирование оправки в конус гнезда шпинделя; закрепление оправки в конус шпинделя.

Основными характеристиками подсистемы шпиндель-инструмент при использовании систем СИ являются: точность положения инструмента после смены и закрепления; упругие и диссипативные характеристики при эксплуатации.

Таким образом, осевые погрешности оправки при смене инструмента ξ формируются при базировании (ξ_{Γ}) и затяжке (ξ_3):

$\xi = \xi_{\Gamma} - \xi_3$, где $\xi > 0$ и $\xi_{\Gamma} > 0$, если оправка не доходит до требуемого положения.

Указанные погрешности применительно к конкретному станку имеют как постоянную, так и случайную составляющую. Постоянная составляющая связана в первую очередь с погрешностями формы баззирующего конуса шпинделя и проявляется в одинаковой мере при смене всех инструментов магазина. Случайная же составляющая будет иметь привязку к каждому используемому инструменту и для ее учета требуются дополнительное оснащение станка измерительными устройствами и потери времени на ее контроль.

Таким образом, значительным резервом повышения точности обработки является определение путей минимизации случайной составляющей, что требует рассмотрения условий ее формирования.

В связи с этим рассмотрим задачу определения точности осевого расположения инструментальной оправки, имеющей погрешности формы баззирующего конуса, в идеальный конус шпинделя.

Погрешности формы баззирующего конуса инструментальной оправки учтем путем представления его в виде усеченного конуса высотой L , основания которого представляют из себя эллипсы с осями A и B для большего основания и a и b – для меньшего основания. В общем случае $A \neq B \neq D$ и $a \neq b \neq d$, где D и d – соответственно больший и меньший диаметры гнезда шпинделя. Будем считать в дальнейших выкладках, что $A > B$ и $a > b$. Извернутостью конуса оправки в продольном направлении пренебрегаем, то есть, считаем, что оси A и a лежат в одной плоскости. Угол конуса оправки в плоскости, проходящей через большие оси, обозначим через 2β . Причем, $\beta \neq \alpha$, где 2α – угол конуса гнезда шпинделя, определяемый стандартом.

Указанные отклонения, приведут к тому, что базирование оправки в гнездо шпинделя в любом сечении, проходящем через ось, будет происходить не по образующей конуса, а в некоторой точке. При этом в зависимости от соотношения размеров $A; D$ и $a; d$ и углов α и β возможны следующие случаи (рис. 1).

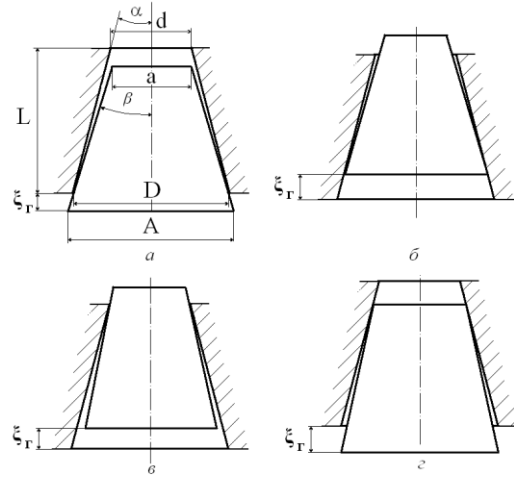


Рис. 1. Формирование осевой погрешности оправки при базировании.

1. $\alpha < \beta$. В этом случае осевое положение оправки будет определяться соотношением размеров больших торцов конусов:

$$a - \alpha < \beta; A > D; б - \alpha < \beta; A < D; в - \alpha > \beta; a < d; г - \alpha > \beta; a > d$$

$A > D$ (рис.1, а). В этом случае базирование происходит по точкам, расположенным на диаметре D гнезда шпинделя, и на образующей конуса оправки. В связи с этим оправка не дойдет до нулевого положения (соединения идеального конуса оправки с идеальным конусом гнезда) на величину $\xi_{\Gamma} = 0,5(A - D) \overline{\text{ctg}} \beta$ (рис.1, а);

$A < D$ (рис. 1, б). В этом случае базирование происходит по точкам, расположенным на оси A оправки и на образующей конуса гнезда шпинделя. Величина ξ_{Γ} будет отрицательной и составит $\xi_{\Gamma} = 0,5(A - D) \overline{\text{ctg}} \alpha$ (рис. 1, б).

2. $\alpha > \beta$. В этом случае осевое положение оправки будет определяться соотношением размеров малых торцов конусов:

$$a < d \text{ или } \frac{A - D}{2L} < \text{tg} \beta - \text{tg} \alpha \text{ (рис.1, в).}$$

В этом случае базирование происходит по точкам, расположенным на диаметре d гнезда шпинделя, и на образующей конуса оправки. Значение $\xi_{\Gamma} < 0$ и определяется выражением (рис. 1, в): $\xi_{\Gamma} = 0,5(A - D) \overline{\text{ctg}} \beta + L \overline{\text{ctg}} \alpha \cdot \text{tg} \beta - 1$;

$a > d$ или $\frac{A-D}{2L} > \operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha$ (рис.1,г). В этом

случае базирование происходит по точкам, расположенным на оси a оправки и на образующей конуса гнезда. Значение $\xi_{\Gamma} > 0$ и равно (рис. 1,з):

$$\xi_{\Gamma} = 0,5(A - D) \operatorname{ctg} \alpha \beta + L(-\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta).$$

Следующим этапом подготовки инструмента к работе после базирования является закрепление инструментальной оправки в гнезде шпинделя усилием затяжки. При приложении усилия затяжки произойдет упругая деформация поверхностных слоев соединения оправки и гнезда шпинделя.

Учитывая высокое качество поверхностей контакта и значительные удельные давления в зоне контакта в соответствии с [10] можно считать, что возникающие в зоне контакта упругие силы пропорциональны упруго деформированному объему, то есть

$$k \cdot \Delta V \cdot \sin \alpha = P_{3AT}, \quad (1)$$

где k - коэффициент контактной податливости; ΔV - упруго деформированный объем; P_{3AT} - усилие закрепления оправки.

Для каждого из рассмотренных выше случаев возможны два варианта контакта: упругий контакт наблюдается по всей поверхности соединения (полный контакт); упругий контакт происходит по части поверхности соединения (неполный контакт).

Промежуточное состояние между этими вариантами назовем предельным контактом.

Рассмотрим определение ΔV .

1. $\alpha < \beta$; полный контакт (рис. 2, а, б).

Упруго деформированный объем может быть определен по формуле

$$\Delta V = \int_h^H S(x) dx, \quad H = 0,5D \operatorname{ctg} \alpha; \quad h = H - L. \quad \text{где}$$

$S(x)$ - площадь упруго деформированной области в сечении, перпендикулярном оси на расстоянии x от центра координат O (рис. 2);

Площадь $S(x)$ найдем, заменяя дуги окружности и участки эллипса прямыми линиями (пунктирные линии на рис. 2, з).

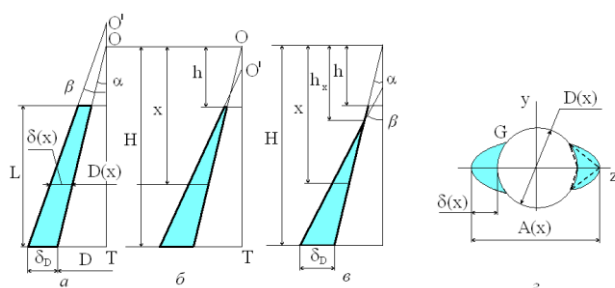


Рис. 2. Формирование упруго деформированного объема при $\alpha < \beta$:

a - полный контакт; $OT > H$; b - полный контакт; $OT < H$; $в$ - неполный контакт;

z - формирование площади $S(x)$.

Для этого предварительно определим координаты точки G (рис. 2, з) пересечения эллипса и окружности в сечении X :

$$\begin{cases} \frac{4z^2}{A^2(x)} + \frac{4y^2}{B^2(x)} = 1; \\ z^2 + y^2 = 0,25D^2(x), \end{cases}$$

где $A(x); B(x)$ - значения, определяющие размеры оправки в сечении x ; $D(x)$ - значение, определяющее диаметр гнезда шпинделя в сечении x .

Из приведенной системы уравнений получим:

$$y_G = \frac{B(x)}{2} \sqrt{\frac{A^2(x) - D^2(x)}{A^2(x) - B^2(x)}}. \quad \text{Тогда}$$

$$S(x) = 2\delta(x)y_G = \delta(x)B(x) \sqrt{\frac{A^2(x) - D^2(x)}{A^2(x) - B^2(x)}}. \quad (2)$$

Значения $A(x); B(x); D(x)$ и $\delta(x)$ (рис. 2) определяются по следующим зависимостям:

$$A(x) = A - D \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta + 2x \operatorname{tg} \beta;$$

$$B(x) = B \left[\frac{x - H}{0,5D + \delta_D \operatorname{ctg} \beta} + 1 \right]; \quad (3)$$

$$D(x) = 2x \operatorname{tg} \alpha;$$



где δ_D - см. рис. 2.

2. $\alpha > \beta$; неполный контакт (рис. 2, в).

В этом случае упруго деформированный объем

определяется по формуле $\Delta V = \int_{h_x}^H S(x) dx$,

где $h_x = 0,5D \operatorname{ctg} \alpha - \frac{\delta_D}{\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha}$.

3. $\alpha > \beta$; полный контакт (рис. 3, а).

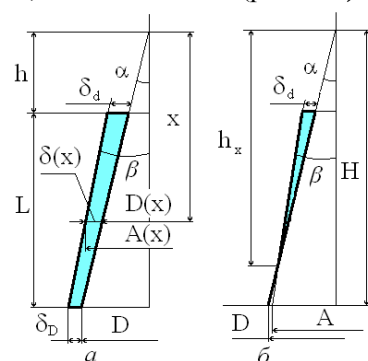


Рис. 3. Формирование упруго деформированного объема при $\alpha > \beta$: а - полный контакт; б - неполный контакт.

Для этого случая можно воспользоваться формулами, приведенными выше для случая $\alpha < \beta$ и условии полного контакта, учитывая зависимость между δ_D и δ_d (рис. 3,а):

$$\delta_D = \delta_d - L \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta;$$

4. $\alpha > \beta$; неполный контакт (рис. 3,б).

Параметры, необходимы для нахождения S_1 и S_2 , в этом случае могут быть определены по формулам

$$\begin{aligned} A \operatorname{ctg} \beta &= D - 2L \operatorname{tg} \alpha + 2\delta_d + \delta_d - 0,5D \operatorname{ctg} \alpha + L \operatorname{tg} \beta; \\ B \operatorname{ctg} \beta &= \frac{B}{L + 0,5d + \delta_d} \operatorname{ctg} \beta; \end{aligned} \quad (3)$$

$$D \operatorname{ctg} \beta = 2x \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\delta \operatorname{ctg} \beta = \delta_d + \delta_d - 0,5D \operatorname{ctg} \alpha + L \operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha;$$

где $d = D - 2L \operatorname{tg} \alpha$ (рис. 2,а).

Указанные выше зависимости для определения ΔV можно упростить, если пренебречь криволинейностью ребер, ограничивающих упруго деформированные объемы вдоль образующих конусов. Тогда эти объемы можно рассматривать, как пирамиды, и для полного контакта

$$\Delta V = \frac{1}{3} S_1 \sqrt{S_2 S_3};$$

где S_1 и S_2 - площади упруго деформированных областей по диаметрам D и d соответственно.

Для определения S_1 и S_2 можно воспользоваться следующими зависимостями:

- для $\alpha < \beta$ и $A > D$:

$$S_1 = \delta_D \cdot B \sqrt{\frac{D^2 + 2\delta_D^2 - D^2}{D^2 + 2\delta_D^2 - B^2}}.$$

Значение S_2 рассчитывается по формулам (2) и (3) при $x = 0,5D \operatorname{ctg} \alpha - L$ и $A = D + 2\delta_D$;

- для $\alpha < \beta$ и $A < D$:

$$S_1 = \delta_D \cdot B \sqrt{\frac{A^2 - (A - 2\delta_D)^2}{A^2 - B^2}}.$$

Значение S_2 рассчитывается по формулам (2) и (3) при $x = 0,5D \operatorname{ctg} \alpha - L$ и $D = A - 2\delta_D$;

- для $\alpha > \beta$ и $a > d$ значение S_1 рассчитывается по формуле (2) при

$$A \operatorname{ctg} \beta = D + 2\delta_d - 2L \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta;$$

$$B \operatorname{ctg} \beta = B; D \operatorname{ctg} \beta = D;$$

$$\delta \operatorname{ctg} \beta = \delta_d + L \operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha.$$

Для определения S_2 используется формула (2)

$$\text{при } A \operatorname{ctg} \beta = A - 2L \operatorname{tg} \beta; B \operatorname{ctg} \beta = B \left(1 - \frac{2L}{A \operatorname{ctg} \beta} \right);$$

$$D \operatorname{ctg} \beta = A - 2L \operatorname{tg} \beta - 2\delta_d; \delta \operatorname{ctg} \beta = \delta_d.$$

- для $\alpha > \beta$ и $a < d$.

Значение S_1 рассчитывается по формуле (2) при

$$A \operatorname{ctg} \beta = A; B \operatorname{ctg} \beta = B;$$

$$D \operatorname{ctg} \beta = A - 2\delta_d + 2L \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta;$$

$$\delta \operatorname{ctg} \beta = \delta_d + L \operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha.$$

Для определения S_2 используется формула (2)

$$\text{при } A \operatorname{ctg} \beta = D - 2L \operatorname{tg} \alpha + 2\delta_d;$$

$$B \operatorname{ctg} \beta = B \left(1 - \frac{2L}{A \operatorname{ctg} \beta} \right); D \operatorname{ctg} \beta = D - 2L \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\delta \operatorname{ctg} \beta = \delta_d.$$

Для неполного контакта

$$\text{- при } \alpha < \beta \quad \Delta V = \frac{S_1}{3} \cdot \frac{\delta_D}{\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha};$$

$$\text{- при } \alpha > \beta \quad \Delta V = \frac{S_2}{3} \cdot \frac{\delta_d}{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta},$$

где значения S_1 и S_2 рассчитываются по тем же формулам, что и для полного контакта.

Используя полученные выше зависимости для ΔV в уравнении (1) можно найти неизвестное значение δ_D (или δ_d) и искомую величину ξ_3 :

$$\xi_3 = \delta_D \operatorname{ctg} \alpha \text{ или } \xi_3 = \delta_d \operatorname{ctg} \alpha.$$

Таким образом, полученные аналитические зависимости позволяют раскрыть механизм формирования погрешностей, возникающих при смене инструмента, и обоснованно сформулировать конструкторско-технологические требования к их изготовлению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляковский В.П., Селигей А.М., Гольдрайх Г.М. Исследование инструментальных конических соединений с малыми углами уклона/ Станки и инструмент №6, 1979 с. 15-17.
2. Конические соединения. Справочное пособие / сост. Журавлев А.Н. и др., М., Машиностроение, 2968 г. - 144с.
3. Кузнецов Ю.И. Маслов А.Р., Байков А.Н. Оснастка для станков с ЧПУ: Справочник. 2-е изд., перераб. И доп. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
4. Маслов А.Р., Балков В.П. Применение хвостовиков с конусностью 7:24 и возможные альтернативы. Журнал по металлообработке «Стружка» №1, 2004, с.30-32
5. Украженко К.А. Методика оценки и выбора типа инструментальной системы для многоцелевых станков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. - 2003.-№4.-С. 96-105.
6. Украженко К.А. Повышение жесткости инструментальных систем для многоцелевых станков//Авиационная и ракетно-космическая техника с использованием новых

- технических решений: Сб. научных трудов межд. конф. – Рыбинск. - 2006. - часть 2, С.170–173.
7. Юркевич В.В. Определение точности обработки на токарном станке СТИН 1999 №4 - с. 15.
8. Лизогуб В.А. Влияние параметров шпиндельного узла станка на точность обработки деталей СТИН 2003 №3 - с. 16.
9. Юрин В.Н. Представление термоупругих физико-технических эффектов, обеспечивающих точность обработки СТИН 2001 №10 - с. 8.

RECORDKEEPING OF CONTACT PROCESSES IN ASSESSING THE ACCURACY OF FIXING THE MANDREL IN THE MACHINE SPINDLE

© 2011 A.F. Denisenko, V.I. Petrunin, O.Yu. Kazakova

Samara State Technical University

Forming process of instrumental error, influencing on the working accuracy, is considered.

Key words: tool, fixing, machine tool, basing, working accuracy

Denisenko Alexander Fedorovich, Dr.Sci.Tech. the professor, chairs automation of manufactures and management of transport systems
Petrinin Vladimir Ivanovich, Cand.Tech.Sci. The senior lecturer of chair of cars and станочных complexes. E-mail:ask@samgtu.ru
Kazakova Olga. Юрьевна., the senior teacher of chair of cars and станочных complexes