

# Машиностроение

УДК 621.81

## УГЛОВАЯ ТОЧНОСТЬ ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

*А.Ф. Денисенко, Д.В. Назаров, И.К. Рыльцев*

Самарский государственный технический университет

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: ask@samgtu.ru

*Рассматривается методика определения угловой точности профильных соединений с зазорами и с переходными посадками. Определены участки профиля, требующие особого контроля точности при изготовлении. Оценено влияние погрешностей профиля на угловую точность соединения.*

**Ключевые слова:** *соединение, профиль, угол поворота, точность изготовления, зона контакта, погрешность профиля.*

В узлах машин одними из наиболее ответственных соединений являются разъемные соединения для передачи крутящего момента. К ним предъявляются высокие требования по усталостной прочности, долговечности и др. В настоящее время в машинах разного функционального назначения для передачи крутящего момента наибольшее применение находят шлицевые и шпоночные соединения. Однако весьма перспективным является использование для таких целей профильных бесшпоночных соединений (ПБС), сопряжение деталей в которых осуществляется по гладким цилиндрическим или конусообразным поверхностям, имеющим в поперечном сечении некруглый профиль.

К основным эксплуатационным преимуществам ПБС перед шлицевыми и шпоночными можно отнести следующие: вес профильных валов может быть сокращен до 40 % и более (особенно при использовании пустотелых валов); длина ступицы может быть сокращена до 10 %; более высокая долговечность (особенно при знакопеременных нагрузках) за счет отсутствия острых углов, канавок и резких переходов профиля; меньшие энергозатраты на совершение работы по передаче крутящего момента и т. д.

Кроме того, трехгранные ПБС автоматически центрируются под нагрузкой, так как зазоры в соединении при приложении момента выбираются равномерно с трех сторон, что приводит к уменьшению шума и вибраций при работе.

В работе [1] убедительно показаны достоинства профильных валов по ряду технико-экономических показателей по сравнению со шпоночными и шлицевыми: по изгибной жесткости, максимальному прогибу вала на единицу длины, по надежно-

---

*Александр Федорович Денисенко (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Автомобили и станочные комплексы».*

*Денис Викторович Назаров, аспирант.*

*Игорь Константинович Рыльцев (д.т.н.), профессор.*

сти, по максимальному действующему изгибающему моменту, показателям прочности, жесткости, веса на единицу длины и площади сечения вала. Там же приведены данные по сравнению ПБС со шлицевыми и шпоночными соединениями по усталостной прочности, износу, весовым характеристикам.

Профильные соединения могут быть выполнены с гарантированным зазором или натягом, а также с переходными посадками. В цилиндрических профильных соединениях с зазором допускаются относительные осевые перемещения деталей как при отсутствии нагрузки от передаваемого крутящего момента, так и под действием нагрузки.

Профильные соединения эффективно используются не только для передачи большого крутящего момента, но и для точной передачи вращательного движения при относительно небольшом крутящем моменте. Кроме того, их можно применять в реверсивных механизмах.

Различают ПБС с четным и нечетным числом граней сопрягаемых деталей. Контуры сечения детали с нечетным числом граней обладает свойством равноосности: постоянством расстояния («диаметра»)  $D$  между двумя параллельными и касательными к контуру прямыми, которое не зависит от угла поворота контура относительно параллельных касательных. Свойством равноосности обладают все контуры с нечетным числом граней, но лишь трехгранный контур самоцентрируется под воздействием нагрузки. Последний называют равноосным контуром (РК), а соответствующее соединение – РК-профилем.

Наибольшее распространение получили трехгранные и четырехгранные профильные соединения.

Трехгранные профильные соединения рекомендуется применять как неподвижные при передаче крутящего момента, четырехгранные – как подвижные, допускающие передачу крутящего момента и осевое перемещение втулки относительно вала.

Возможность расширения использования ПБС в прецизионных узлах и механизмах станков требует обеспечения не только минимальных отклонений от параллельности осей собираемых деталей, то и достижения требуемой угловой точности. Особенно это актуально для прецизионных механизмов, работающих в реверсном режиме.

В соединениях с зазорами и с переходными посадками при изменении направления вращения элементы ПБС имеют возможность дополнительного поворота до момента касания профилей вала и втулки. Сложность определения этого угла определяется его зависимостью от величины диаметрального зазора в соединении, его расположением в поле допуска и криволинейностью контактирующих профилей. Эти обстоятельства делают изначально неопределенными координаты точек профиля, в которых произойдет контакт.

Примем за исходное положение вала и втулки ПБС, когда возможный зазор распределяется симметрично по профилю (рис. 1).

В общем случае угловая точность ПБС будет определяться углом поворота  $\theta$  в пределах имеющегося диаметрального зазора (при приложении минимального крутящего момента) (см. рис. 1).

Однако поскольку углы поворота точек профиля вала до касания с профилем отверстия  $\theta$  при повороте вала вследствие криволинейности контуров будут различными и зависят от текущих координат, то поворот вала будет определяться касанием точек, для которых  $\theta \rightarrow \min$ .

В соответствии с ОСТ 92-4742-86 в полярной системе координат

$$\begin{cases} R = \sqrt{(D/2 - E \cos t)^2 + (NE \sin t)^2}; \\ \varphi = t/N + \operatorname{arctg}(NE \sin t / (D/2 - E \cos t)), \end{cases} \quad (1)$$

где  $D$  – условный диаметр профильного соединения:

$$D = (D_1 + D_2) / 2;$$

$D_1$  и  $D_2$  – диаметры вписанной и описанной окружностей;

$E$  – эксцентриситет кривой (основной параметр некруглого профиля):

$$E = (D_2 - D_1) / 4;$$

$N$  – число граней соединения;

$t$  – независимый параметр, рад ( $0 \leq t \leq 2\pi N$ ).

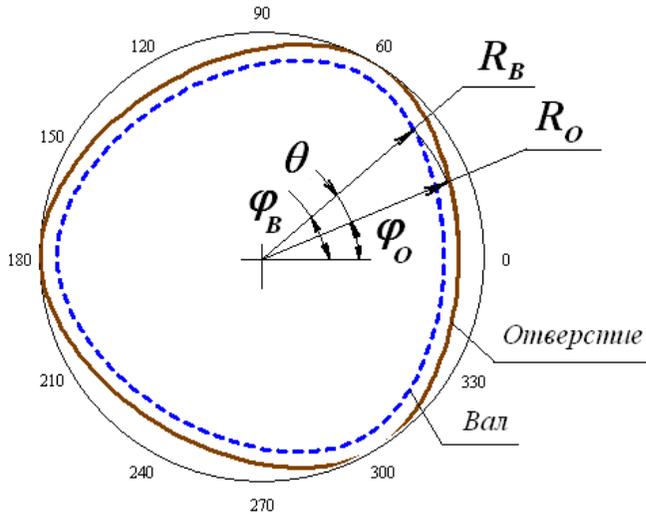


Рис. 1. Исходное положение вала и отверстия в соединении при симметричном распределении зазора по профилю

Для стандарта ОСТ 92-4742-86 величина эксцентриситета  $E$  выбрана из условия возможности обработки профиля отверстия втулки цилиндрическим инструментом с наружным диаметром  $D_H = D/2$ :

– для трехгранного профиля ( $N = 3$ )

$$E = D/32;$$

– для четырехгранного профиля ( $N = 4$ )

$$E = D/60.$$

Диаметры  $D_1$  и  $D_2$  вписанной и описанной окружностей контурной кривой определяются по формулам:

$$D_1 = D - 2E; \quad D_2 = D + 2E.$$

Подставив в уравнения (1) значения  $E = D/32$  и  $N = 3$  для трехгранного профиля РК-3, получим

$$\begin{cases} R = \frac{D}{32} \sqrt{(16 - \cos t)^2 + (3 \sin t)^2}; \\ \varphi = t/3 + \operatorname{arctg}(3 \sin t / (16 - \cos t)). \end{cases} \quad (2)$$

С учетом необходимости обеспечения в соединении требуемых посадок сборка соединения осуществляется из деталей, параметры которых могут меняться в пределах допуска. Таким образом,

– для отверстия:

$$\begin{cases} R_O = \frac{D_O}{32} \sqrt{(16 - \cos t_O)^2 + (3 \sin t_O)^2}; \\ \varphi_O = t_O / 3 + \operatorname{arctg}(3 \sin t_O / (16 - \cos t_O)), \end{cases} \quad (3)$$

– для вала:

$$\begin{cases} R_B = \frac{D_B}{32} \sqrt{(16 - \cos t_B)^2 + (3 \sin t_B)^2}; \\ \varphi_B = t_B / 3 + \operatorname{arctg}(3 \sin t_B / (16 - \cos t_B)), \end{cases} \quad (4)$$

где  $D_O = D + \Delta_O$ ;

$D_B = D - \Delta_B$  (т. к. рассматриваем только соединения с зазором);

$\Delta_O$ ;  $\Delta_B$  – отклонения отверстия и вала соответственно, определяемые допусками на изготовление.

Из равенства  $R_O = R_B$  находим связь параметров  $t_B$  и  $t_O$ :

$$t_B = \arccos(-2 \pm \frac{1}{2} \sqrt{B}), \quad (5)$$

где  $B = 16 + \frac{1}{2} \left[ 265 - \left( \frac{D_O}{D_B} \right)^2 (265 - 32y - 8y^2) \right]$ ;  $y = \cos t_O$ .

Подставив найденное значение  $t_B$  (выражение (5)) в формулу (4), получим зависимость  $\varphi_B = f(t_O)$  и искомый угол поворота:

$$\begin{aligned} \theta = \varphi_B - \varphi_O = \frac{1}{3} \arccos(-2 \pm 0,5\sqrt{B}) + \operatorname{arctg} \frac{3\sqrt{-3 \pm 2\sqrt{B} - 0,25B}}{18 \mp 0,5\sqrt{B}} - \\ - \frac{t_O}{3} - \operatorname{arctg} \frac{3 \sin t_O}{16 - \cos t_O}. \end{aligned} \quad (6)$$

Условие  $\theta \rightarrow \min$  будет выполняться для значения  $t_O$ , находимого из уравнения

$$\frac{d(\theta)}{dt_O} = 0,$$

или

$$\begin{aligned} \frac{1,5(18 \mp 0,5\sqrt{B})}{\sqrt{-3 \pm 2\sqrt{B} - 0,25B}} \left( \pm \frac{1}{\sqrt{B}} - \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{dB}{dt_O} \pm \frac{3}{4\sqrt{B}} \sqrt{-3 \pm 2\sqrt{B} - 0,25B} \cdot \frac{dB}{dt_O} \mp \\ \mp \frac{(18 \mp 0,5\sqrt{B})^2 + 9(-3 \pm 2\sqrt{B} - 0,25B)}{12\sqrt{B - B(-2 \pm 0,5\sqrt{B})^2}} \cdot \frac{dB}{dt_O} - \frac{1}{3} - \frac{3(16 \cos t_O - 1)}{(16 - \cos t_O)^2 + 9(\sin t_O)^2} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Решение полученного уравнения осуществлялось численным методом с использованием пакета Mach Cad.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что величина угла  $\theta$  изменяется пропорционально величине исходного зазора в соединении (рис. 2).

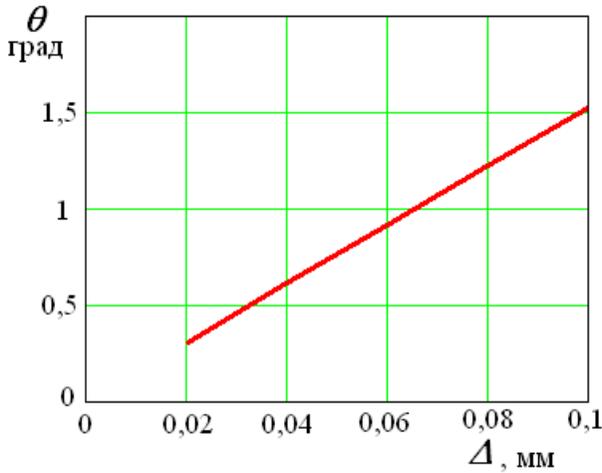


Рис. 2. Зависимость изменения угла  $\theta$  от величины зазора в соединении ( $D = 40$  мм;  $\Delta_O = \Delta_B = \Delta$ )

По рекомендациям [2] точность изготовления элементов соединения с треугольным равноосным контуром поперечного сечения: вал по размеру  $D$  при неподвижном соединении – k6; при подвижном соединении (без нагрузки) – g6 или h6; втулка по размеру  $D$  при любом соединении H7.

Анализ влияния точности изготовления вала и отверстия на угловую точность соединения был выполнен на примере трех РК-3 соединений: соединения  $D = 40$  мм с посадкой H7/h6 ( $\Delta_{O_{\max}} = 0,025$  мм;  $\Delta_{B_{\max}} = 0,016$  мм); соединения  $D = 30$  мм с посадкой H7/h6 ( $\Delta_{O_{\max}} = 0,021$  мм;  $\Delta_{B_{\max}} = 0,013$  мм) и соединения  $D = 20$  мм с посадкой H7/h6 ( $\Delta_{O_{\max}} = 0,021$  мм;  $\Delta_{B_{\max}} = 0,013$  мм). На рис. 3 и 4 приведены графики изменения угла  $\theta$  при сборке соединения при различных размерах вала и отверстия (в пределах допуска) при сохранении постоянства диаметрального зазора  $\Delta_O + \Delta_B = 0,015$  мм.

Из приведенных графиков следует, что смещение зазора в верхнюю часть поля допуска ведет к снижению угла  $\theta$ . Причем интенсивность снижения увеличивается с уменьшением диаметра соединения.

Расчеты показывают, что в зависимости от соотношения действительных размеров  $D_O$  и  $D_B$  (при отклонениях  $\Delta_O$  и  $\Delta_B$  в пределах допуска) зона контакта располагается в следующих диапазонах углов  $\varphi_O$  и  $\varphi_B$  (для первого квадранта):

- для  $D = 20$  мм:  $\varphi_{O_{\text{кас}}} = 39,186612^\circ \dots 39,395944^\circ$ ;  $\varphi_{B_{\text{кас}}} = 39,495078^\circ \dots 39,704991^\circ$ ;
- для  $D = 40$  мм:  $\varphi_{O_{\text{кас}}} = 39,289850^\circ \dots 39,415033^\circ$ ;  $\varphi_{B_{\text{кас}}} = 39,476036^\circ \dots 39,602423^\circ$ .

Полученные результаты свидетельствуют о том, что независимо от диаметра соединения при малых передаваемых крутящих моментах особое внимание при контроле точности изготовления профиля должно уделяться участкам с углами (в полярной системе координат)  $39^\circ \dots 40^\circ$ ;  $159^\circ \dots 160^\circ$  и  $279^\circ \dots 280^\circ$ .

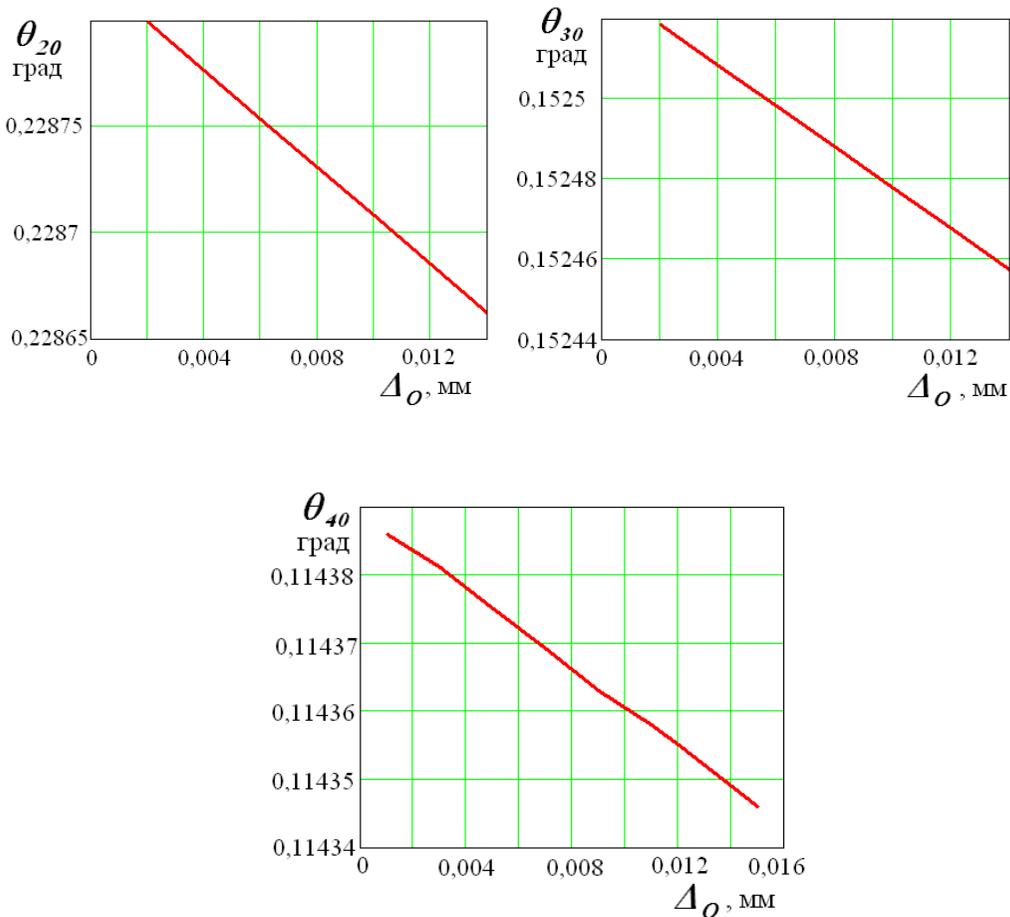


Рис. 3. Изменение угла  $\theta$  соединения ( $\theta_{20}; \theta_{30}; \theta_{40}$  при  $D=20; 30; 40$  мм соответственно) при сохранении постоянства диаметрального зазора  $\Delta_O + \Delta_B = 0,015$  мм

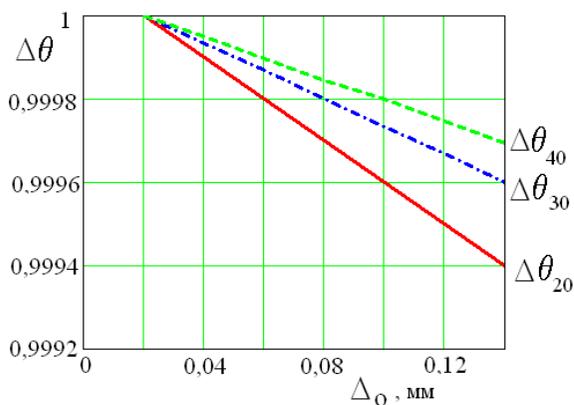


Рис. 4. Сравнение изменения угла  $\theta$  для различных диаметров соединения при сохранении постоянства диаметрального зазора  $\Delta_O + \Delta_B = 0,015$  мм ( $\Delta\theta = \frac{\theta}{\theta_{\Delta_O=0,002}}$ )

В случае, когда диаметральный зазор в соединении неравномерный, то есть зависит от параметра  $t$ , касание вала и отверстия не может произойти одновременно по трем точкам.

Отнесем погрешности формирования зазора к валу. Таким образом,  $\Delta_O = const$ , а  $\Delta_B = f(t)$ .

Рассмотрим два частных случая:

- первоначальный контакт в одной точке, зазоры по двум другим возможным точкам контакта одинаковы и равны  $\delta$  (рис. 5, а);
- первоначальный контакт в двух точках, зазор по третьей возможной точке контакта равен  $\delta$  (рис. 5, б).

Будем также считать, что вал имеет погрешности профиля по диаметрам контакта только в точках касания.

Если пренебречь изменением угла между радиус-векторами точек контакта при достижении одинакового зазора  $\Delta'$  по трем направлениям, то можно считать, что  $\Delta' \approx 0,5\delta$  и угол поворота вала до касания с профилем отверстия увеличится на величину, определяемую по приведенной выше методике, за счет уменьшения расчетного диаметра вала.

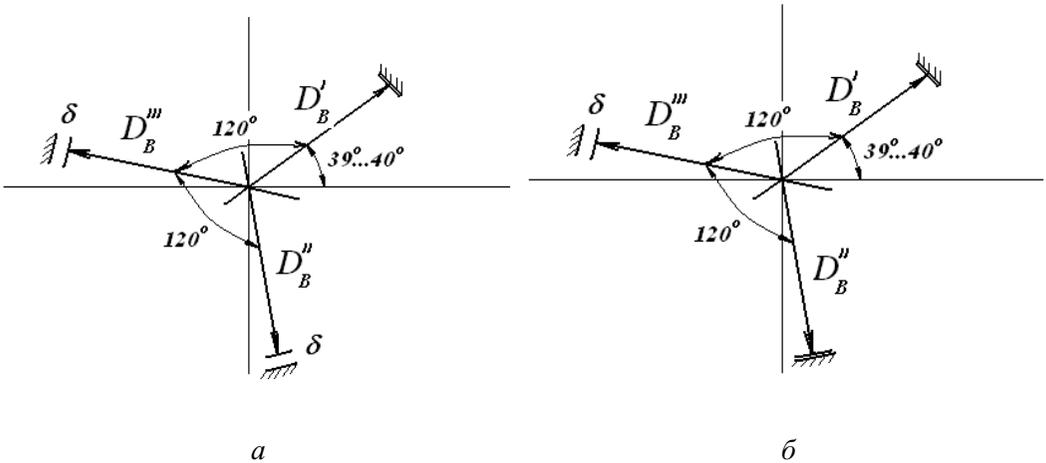


Рис. 5. Частные случаи неравномерного диаметрального зазора

Для случая, представленного на рис. 5, а, имеем три диаметра вала в точках касания, лежащих в пределах допуска:

$$D'_B; D''_B; D'''_B \quad (D'_B > D''_B = D'''_B; D'_B = D; D'_B - D''_B = \delta; D'_B - D'''_B = \delta).$$

Тогда расчетный диаметр вала следует принимать равным

$$D_B = D - \Delta' = D - 0,5\delta = D - \frac{D'_B - D''_B}{2} = \frac{D + D''_B}{2}.$$

Для случая, представленного на рис. 5, б,

$$D'_B; D''_B; D'''_B, \quad (D'''_B < D'_B = D''_B = D; D'_B - D'''_B = \delta; D''_B - D'''_B = \delta)$$

и расчетный диаметр вала определяется по тем же зависимостям, что и для случая, приведенного на рис. 5, а.

1. *Тимченко А.И.* Технология изготовления деталей профильных бесшпоночных соединений. – М.: МОССТАНКИН, 1988. – 143 с.
2. Детали машин. Расчет и конструирование. Справочник / Под ред. Н.С. Ачеркана. Т. 1. – М.: Машиностроение, 1968. – 440 с.

*Статья поступила в редакцию 15 октября 2012 г.*

## ANGULAR ACCURACY OF PROFILE LINKS

*A.F. Denisenko, D.V. Nazarov, I.K. Rylcev*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*Discusses the method of determining the angular accuracy of profile joints with gaps and transitional plantings. Identifies areas requiring special profile control of precision in manufacture. Influence of errors of the profile on the angular precision of the connection.*

**Keywords:** *connection, profile, angle, precision manufacturing, contact profile error.*

---

*Alexander F. Denisenko (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Denis V. Nazarov, Postgraduate Student.  
Igor K. Rylcev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*