

УДК 531.717.8

КООРДИНАТНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ШЛИЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ**К.А. ШАЛЫЖИН***(Белорусско-Российский университет, Могилёв)*

Представлен краткий обзор существующих методов контроля шлицевых поверхностей деталей машин. Представлен новый подход к проверке качества данных поверхностей на основе измерения координат её точек. Указан способ определения базовых элементов шлицевого профиля – системы осей шлицев профиля и центра системы осей, а также базовых элементов шлицевой поверхности – оси и плоскостей симметрии. Сформулированы общие принципы разделения суммарных погрешностей боковых сторон шлицевого профиля и шлицевой поверхности на элементарные погрешности, соответственно для профиля – отклонений от параллельности, симметричности, накопленной погрешности шага и погрешности ширины шлица, для поверхности – спиральность шлица на длине нормируемого участка, отклонение от плоскостности боковой поверхности и отклонение от профиля продольного сечения перпендикулярного оси симметрии шлица. Указана область применения разработанной методики координатного контроля шлицевой поверхности.

Введение. Одним из путей повышения качества изделий машиностроения является повышение эффективности их контроля технологических параметров точности, таких как отклонения формы и взаимного положения поверхностей, погрешности размеров. Реализация данного направления совершенствования обязательно включает в себя совершенствование старых и поиск новых методик контроля соответствующих текущему уровню техники и производства.

Решению такого рода задач посвящено большое количество работ конструкторского, вычислительного, методологического характера. Создан широкий спектр стандартных и нестандартных приспособлений, подробно описаны методики контроля и обработки результатов. Однако несмотря на это остаётся много нерешённых проблем, появляются новые задачи контроля, обусловленные требованиями развития производства. Одной из таких задач является повышение точности измерительных методик и способов анализа полученных данных.

Основная часть. Широкое применение на производстве координатно-измерительных машин делает рациональным, при обработке полученных от них данных, использование методик контроля параметров качества деталей по определённому количеству координат их поверхностей.

По этому направлению проведены исследования круглых профилей и цилиндрических поверхностей. Уточнены методики определения базовых линий и поверхностей. В связи с этим большой интерес представляет исследование более сложных профилей и поверхностей деталей. В этом смысле мало исследованным остаётся прямобочный шлицевый профиль и шлицевая поверхность.

Контролируемыми параметрами шлицевых валов являются [1]:

- 1) наружный или внутренний диаметр в зависимости от посадки детали – по наружному или внутреннему диаметру шлицевого вала. Наружный диаметр проверяется обыкновенной предельной скобой; внутренний диаметр можно измерять микрометром, специальной скобой и индикаторной скобой. У индикаторной скобы опорная шпилька устанавливается по наружному диаметру, что даёт возможность быстрее измерять диаметр впадины. Нулевое положение индикатора устанавливается по измерительным плиткам или по эталону. Отклонение стрелки определяет действительный размер;
- 2) толщина шлицев проверяется предельными скобами;
- 3) шлицевой вал на биение по внутреннему диаметру проверяется индикатором; проверяются также конусность и спиральность, для чего индикатор перемещается параллельно оси, а вал предварительно устанавливается горизонтально;
- 4) расположение шлицев по окружности проверяется специальным шлицевым кольцом;
- 5) профиль поверхности впадины шлицевых валов (по внутреннему диаметру) проверяется при помощи специальных шаблонов.

Универсальный прибор с делительной головкой позволяет проверить все элементы шлицевых валов: шаг, расположение шлицев по окружности и др.

Несмотря на широкий спектр стандартных средств контроля шлицевых валов и отверстий, все они имеют определённые недостатки, которые в дальнейшем отражаются на технологических и эксплуатационных показателях изделия. Это обуславливает на сегодняшний день широкое применение координатно-измерительных контрольных средств обеспечивающих быстрое и с высокой точностью измерение ряда параметров для широкого диапазона типоразмеров шлицевых валов и отверстий, дающих количествен-

ную оценку несоответствия, что позволяет скорректировать параметры технологического процесса и тем самым избежать последующего брака.

При этом особого внимания заслуживает определение значений контролируемых параметров при наличии комплекса погрешностей боковых сторон шлица. Одновременное присутствие отклонения от симметричности и параллельности боковых сторон шлица, погрешности его ширины, накопленной погрешности шага шлицев делает сложной задачу определения их числовых значений. Для осуществления отсчёта указанных параметров после проведения измерений необходимо определить положение базовых элементов. К ним относятся:

- 1) система осей шлицев в профиле;
- 2) центр системы осей в профиле;
- 3) набор систем осей шлицев по длине шлицевого вала;
- 4) продольная ось шлицевого вала.

Положение оси каждого шлица в профиле находится как биссектриса, проведённая из точки пересечения образующих прямых боковых поверхностей шлица. Положение самих образующих прямых рационально определяется не как прилегающая прямая, а как средняя линия [2] (рис. 1), положение которой относительно реального профиля соответствует условиям сопряжения боковых поверхностей шлицевого вала и отверстия. Следовательно, с увеличением числа точек точность определения положения образующей прямой боковой поверхности возрастает, однако при этом снижается производительность измерений и увеличивается объём необходимой памяти.

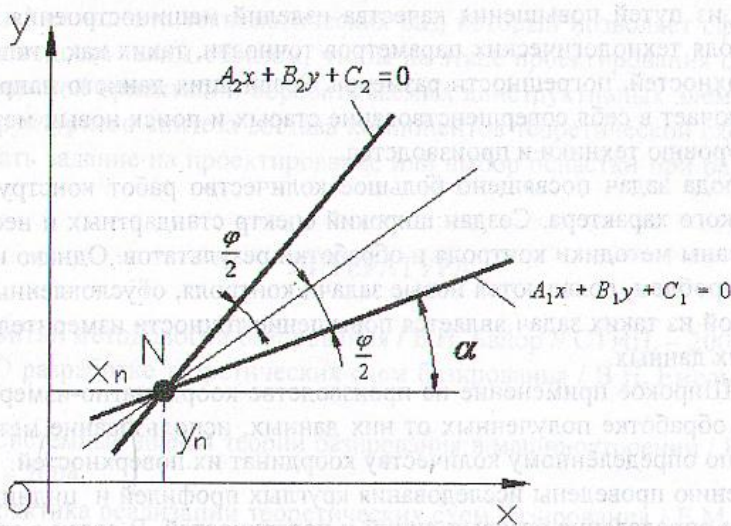


Рис. 1. Схема определения положения боковых образующих шлица

Таким образом, зная уравнения прямых образующих боковых поверхностей шлица, уравнение биссектрисы определяется из следующих представлений. Угол между двумя образующими боковых сторон шлица

$$\varphi = \arctg \left(\frac{A_1 B_2 - A_2 B_1}{A_1 A_2 + B_1 B_2} \right), \quad (1)$$

где $A_1 x + B_1 y + C_1 = 0$; $A_2 x + B_2 y + C_2 = 0$ – уравнения соответственно левой и правой образующих шлица (см. рис. 1).

Угол наклона левой образующей к оси X

$$\alpha = \arctg \left(-\frac{A_1}{B_1} \right). \quad (2)$$

Координаты точки пересечения прямых образующих боковых поверхностей шлица

$$x_c = \frac{A_2 C_1 - C_2 B_1}{B_2 B_1 - A_1 A_2}; \quad (3)$$

$$y_c = \frac{A_1 C_2 - C_1 B_2}{B_1 B_2 - A_1 A_2}. \quad (4)$$

Данная точка пересечения неизбежно возникнет в реальных условиях, поскольку идеальная параллельность прямых – это частный случай с малой вероятностью возникновения.

В итоге уравнения биссектрисы

$$y - \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2} + \alpha\right)x + \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2} + \alpha\right)x_c + y_c = 0 \quad (5)$$

или

$$A_3y + B_3x + C_3 = 0, \quad (6)$$

где $A_3 = 1$, $B_3 = \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2} + \alpha\right)$, $C_3 = \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2} + \alpha\right)x_c + y_c$.

Полученные для каждого шлица уравнения биссектрис являются предварительными уравнениями положения осей каждого шлица профиля. Данные положения требуют уточнения, поскольку номинально все оси шлицевого профиля пересекаются в одной точке и расположены под углом

$$\varphi = \frac{180}{z}, \quad (7)$$

где z – число шлицев.

В реальных же условиях положения биссектрис образуют некоторую область σ в плоскости шлицевого вала (рис. 2).

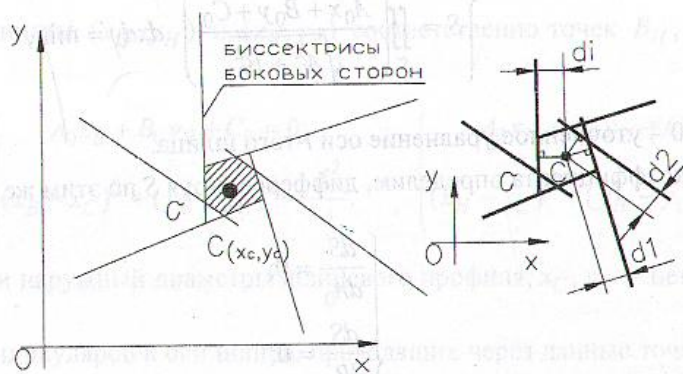


Рис. 2. Схема положения центра шлицевого профиля

Данная область содержит в себе центр системы осей в шлицевом профиле, положение которого определяется экстремальной функцией. Определим положение центра системы осей из следующих представлений.

Центр системы осей это некая точка C с координатами x_c, y_c , принадлежащая области σ , сумма расстояний от которой до каждой биссектрисы минимальна.

Расстояние от точки C до произвольной биссектрисы определяется по формуле [3]

$$l_i = \frac{|A_i x_c + B_i y_c + C_i|}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}}. \quad (8)$$

Следовательно, для определения положения центра системы осей шлицевого профиля необходимо решить уравнение:

$$\sum_{i=1}^z l_i = \sum_{i=1}^z \frac{|A_i x_c + B_i y_c + C_i|}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}} = \min. \quad (9)$$

Решение данного уравнения в области σ даёт координаты x_c, y_c центра C . Для дальнейшего уточнения положения системы осей в профиле необходимо определить угловое положение каждой её оси относительно указанного центра C . В качестве критерия для определения положения каждой оси выберем их максимальное приближение к исходным биссектрисам. Данное приближение выражаем через минимум квадратического отклонения уточнённого положения оси от исходной биссектрисы, ограниченного точкой центра системы осей и средней окружностью шлицев (рис. 3).

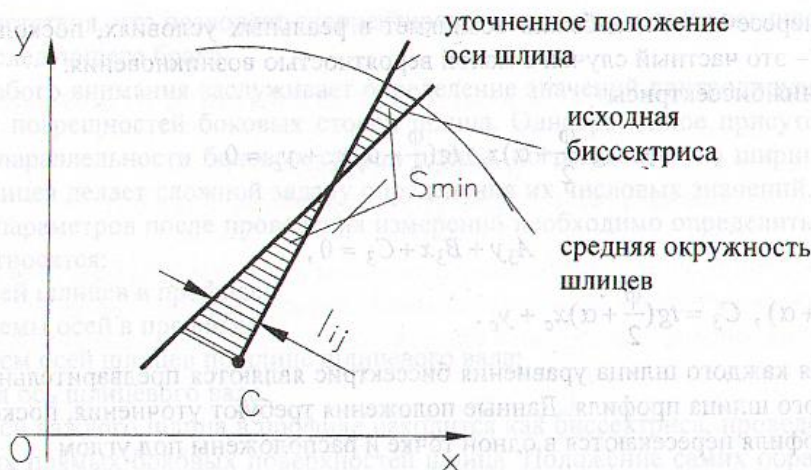


Рис. 3. Схема уточнения углового положения осей шлицев

Таким образом, уточнённое положение оси каждого шлица определим из следующих выражений:

$$\begin{cases} A_i x + B_i y + C_i = 0; \\ S = \iint_S \left(\frac{A_0 x + B_0 y + C_0}{\sqrt{A_0^2 + B_0^2}} \right)^2 dx dy = \min, \end{cases} \quad (10)$$

где $A_{0i}x_0 + B_{0i}y_{0i} + C_{0i} = 0$ – уточнённое уравнение оси i -того шлица.

Значения каждого коэффициента определим, дифференцируя S по этим же коэффициентам:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dA_0} = 0; \\ \frac{dS}{dB_0} = 0; \\ \frac{dS}{dC_0} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Решая данную систему относительно коэффициентов для каждой оси шлицев, определяются их значения.

Теперь, установив уточнённые положения осей шлицев и зная уравнения боковых сторон шлица, определим критерии для расчёта погрешностей размера и относительного положения шлица в профиле.

Для установления погрешностей углового положения шлицев в профиле определим значения углов между осями каждого соседнего шлица

$$\varphi_i = \frac{A_{0i}A_{0(i+1)} - B_{0i}B_{0(i+1)}}{\sqrt{A_{0i}^2 + B_{0i}^2} \sqrt{A_{0(i+1)}^2 + B_{0(i+1)}^2}}. \quad (12)$$

При этом возможны следующие два соотношения значений углов. В первом случае существует закономерное изменение угла при последовательном переходе от одного шлица к другому. Чаще всего при этом возникает линейная или близкая к линейной закономерность, определяющая накопленную погрешность шага шлица. Во втором случае соотношения значений углов не подчиняются видимой закономерности и при этом можно определить только отклонение шага каждого шлица.

Отклонение от параллельности, отклонение от параллельности боковых сторон шлица, погрешность ширины шлица определим из схемы, представленной на рисунке 4. Базой для определения отклонений является осевая линия, поэтому для установления числового значения отклонения здесь используются четыре точки (B_{H1} ; B_{H2} ; B_{B1} ; B_{B2}) пересечения прямых образующих боковых поверхностей

шлица с перпендикулярами, проведёнными из точек $(B_H; B_B)$ пересечения оси шлица с внутренней и наружной окружностями шлицевого профиля.

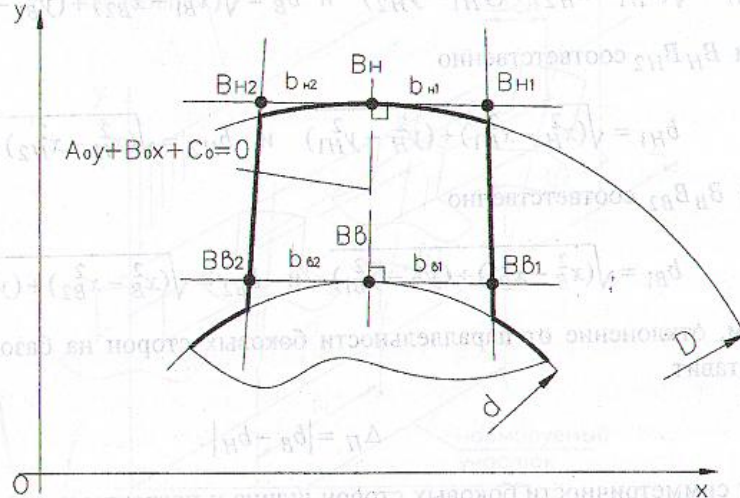


Рис. 4. Схема определения погрешностей боковых сторон шлица

Определим координаты (x_H, y_H) и (x_B, y_B) соответственно точек B_H, B_B из следующих выражений:

$$\begin{cases} A_0x_B + B_0y_B + C_0 = 0; \\ (x_B - x_C)^2 + (y_B - y_C)^2 = \frac{d^2}{4}. \end{cases} \quad \begin{cases} A_0x_H + B_0y_H + C_0 = 0; \\ (x_H - x_C)^2 + (y_H - y_C)^2 = \frac{D^2}{4}. \end{cases} \quad (13)$$

где d и D – внутренний и наружный диаметры шлицевого профиля; x_C, y_C – центр системы осей шлицев в профиле.

Уравнения перпендикуляров к оси шлица, проходящих через данные точки, определим, зная уравнение оси. Уравнение перпендикуляра, проходящего через точку B_B , представим как

$$A_0B_0y - A_0^2x + x_B(A_0^2 + B_0^2) + B_0C_0 = 0 \quad (14)$$

или

$$A_By + B_Bx + C_B = 0, \quad (15)$$

где $A_B = A_0B_0, B_B = -A_0^2, C_B = x_B(A_0^2 + B_0^2) + B_0C_0$.

Уравнение перпендикуляра, проходящего через точку B_H , имеет вид:

$$A_0B_0y - A_0^2x + x_H(A_0^2 + B_0^2) + B_0C_0 = 0 \quad (16)$$

или

$$A_Hy + B_Hx + C_H = 0, \quad (17)$$

где $A_H = A_0B_0, B_H = -A_0^2, C_H = x_H(A_0^2 + B_0^2) + B_0C_0$.

Координаты точек B_{H1}, B_{H2} определим соответственно из следующих систем уравнений:

$$\begin{cases} A_Hx_{H1} + B_Hy_{H1} + C_H = 0; \\ A_1x_{H1} + B_1y_{H1} + C_1 = 0. \end{cases} \quad \begin{cases} A_Hx_{H2} + B_Hy_{H2} + C_H = 0; \\ A_2x_{H2} + B_2y_{H2} + C_2 = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Координаты точек B_{B1}, B_{B2} – из следующих систем уравнений:

$$\begin{cases} A_Hx_{H1} + B_Hy_{H1} + C_H = 0; \\ A_1x_{H1} + B_1y_{H1} + C_1 = 0. \end{cases} \quad \begin{cases} A_Hx_{H2} + B_Hy_{H2} + C_H = 0; \\ A_2x_{H2} + B_2y_{H2} + C_2 = 0. \end{cases} \quad (19)$$

Зная координаты вышеуказанных точек, определим расстояния между ними:

- для $B_{H1}B_{H2}$ и $B_{B1}B_{B2}$ соответственно

$$b_H = \sqrt{(x_{H1}^2 - x_{H2}^2) + (y_{H1}^2 - y_{H2}^2)} \quad \text{и} \quad b_B = \sqrt{(x_{B1}^2 - x_{B2}^2) + (y_{B1}^2 - y_{B2}^2)}; \quad (20)$$

- для $B_H B_{H1}$ и $B_H B_{H2}$ соответственно

$$b_{H1} = \sqrt{(x_H^2 - x_{H1}^2) + (y_H^2 - y_{H1}^2)} \quad \text{и} \quad b_{H2} = \sqrt{(x_H^2 - x_{H2}^2) + (y_H^2 - y_{H2}^2)}; \quad (21)$$

- для $B_B B_{B1}$ и $B_B B_{B2}$ соответственно

$$b_{B1} = \sqrt{(x_B^2 - x_{B1}^2) + (y_B^2 - y_{B1}^2)} \quad \text{и} \quad b_{B2} = \sqrt{(x_B^2 - x_{B2}^2) + (y_B^2 - y_{B2}^2)}. \quad (22)$$

Таким образом, отклонение от параллельности боковых сторон на базовом участке оси шлица длиной $(D-d)/2$ составит

$$\Delta_{\Pi} = |b_B - b_H|. \quad (23)$$

Отклонение от симметричности боковых сторон шлица и погрешность его ширины определяются в соответствии с нормами измерений на уровне средней окружности шлицев. Следовательно, отклонение от симметричности

$$\Delta_{\text{СИМ}} = \frac{|b_{H1} + b_{B1} - b_{H2} - b_{B2}|}{2}. \quad (24)$$

Погрешность ширины шлица

$$\Delta_b = b - (b_H + b_B), \quad (25)$$

где b – стандартная ширина шлица.

В итоге, следуя вышеизложенной методике, определяются единичные погрешности каждого шлица любого профиля по длине шлицевого вала.

Рассматривая, таким образом, методику определения элементарных погрешностей, поперечный профиль шлица представляется в виде так называемого образующего четырёхугольника, и поскольку две противоположенные стороны его параллельны, а две другие являются средними линиями бокового профиля, рационально определить данный четырёхугольник как среднюю трапецию профиля. Характерными параметрами средней трапеции являются величины: b_H и b_B , b_{H1} и b_{H2} , b_{B1} и b_{B2} . Кроме того, через каждую среднюю трапецию проходит ось шлица в профиле, определяющая относительное положение каждой средней трапеции для всех шлицев профиля поперечного сечения шлицевого вала.

Погрешности расположения средней трапеции шлица в пределах нормируемого участка по его длине вызовут различные отклонения от прямолинейности шлица. Частным и наиболее вероятным случаем при этом является спиральность. Признак присутствия такой погрешности определяется постоянным либо переменным отклонением угла наклона оси средней трапеции относительно базовой оси на нормируемом участке (рис. 5).

При постоянной дискретизации нормируемого участка на равные части l_j , каждой из которых соответствует определённый угол φ_{ij} , спиральность шлица найдем, используя линейную аппроксимацию функции $\varphi(l)$. Коэффициенты линейной функции определим с помощью метода наименьших квадратов. Для этого используем следующую систему уравнений [4]:

$$\begin{cases} na_0 + a_1 \sum l_j = \sum \varphi_i; \\ a_0 \sum l_j + a_1 \sum l_j^2 = \sum l_j \varphi_i, \end{cases} \quad (26)$$

где $\hat{\varphi}(l) = a_0 + a_1 l$ – линейная аппроксимация функции углов оси шлица.

Зная коэффициенты линейной модели, определяем спиральность шлица по формуле:

$$\Delta_{\text{СП}} = a_1 L, \quad (27)$$

где L – длина нормируемого участка.

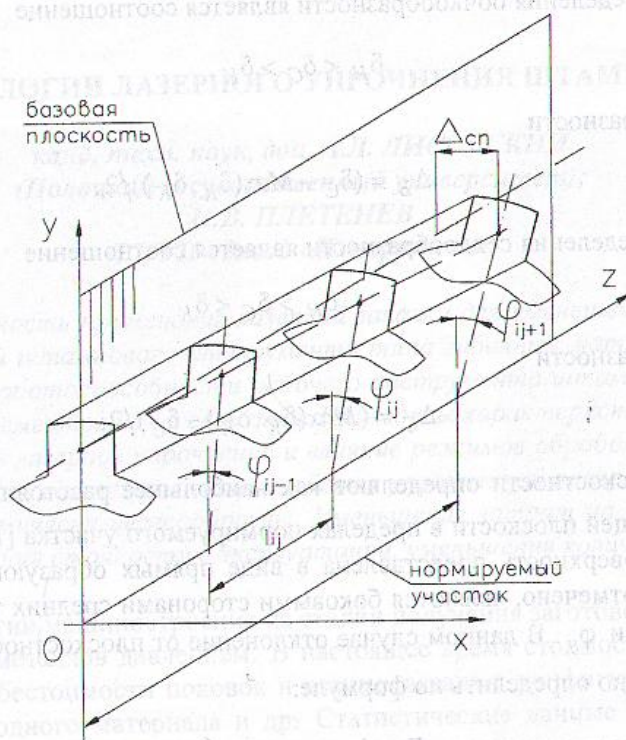


Рис. 5. Схема определения погрешностей шлица вдоль оси вала

Для определения погрешностей шлица в профиле продольного сечения, проходящего параллельно оси шлицевого вала и перпендикулярно оси шлица, рассмотрим набор средних трапеций шлица, расположенных на одинаковых или разных, в зависимости от требований измерений, расстояниях вдоль оси вала. Величина расстояний между сечениями, содержащими трапеции, также зависит от степени и условий дискретизации профиля, также определяемой требованиями точности измерений. Характерными параметрами, лежащими в рассматриваемой плоскости, являются величины:

$$b_C = \frac{b_H + b_B}{2}, \quad b_{C1} = \frac{b_{H1} + b_{B1}}{2}, \quad b_{C2} = \frac{b_{H2} + b_{B2}}{2}, \quad (28)$$

где b_C – средняя ширина шлица; b_{C1}, b_{C2} – составляющие средней ширины, отмеряемые от оси шлица.

Так же как и при определении спиральности при постоянной дискретизации нормируемого участка на равные части l_{ij} , введём аналогичные зависимости $b_C(l), b_{C1}(l), b_{C2}(l)$. Теперь, имея массив указанных характеристик, определим критерии для нахождения элементарных погрешностей.

При нахождении отклонений от профиля продольного сечения по аналогии с цилиндрическими поверхностями принципиально возможны три варианта отклонений – конусообразность, бочкообразность, седлообразность. Кроме того, возможны их комбинации, например, бочкообразность наложенная на конусность.

Для идентификации и нахождения числовых значений отклонений условно разделим нормируемый участок на три равные части: начальную, среднюю и конечную. Каждая часть содержит одинаковое число дискретных участков l_j . В каждой части определим соответственно средние значения ширины шлица:

$$\delta_H = \sum_{l_0}^{l_{n/3}} b_{Cj} / (n/3); \quad \delta_C = \sum_{l_{n/3}}^{l_{2n/3}} b_{Cj} / (n/3); \quad \delta_K = \sum_{l_{2n/3}}^{l_n} b_{Cj} / (n/3). \quad (29)$$

Критерием для определения конусообразности являются следующие соотношения:

$$\delta_H > \delta_C > \delta_K \text{ или } \delta_H < \delta_C < \delta_K. \quad (30)$$

Величина конусообразности

$$\Delta_K = |\delta_H - \delta_K| / 2. \quad (31)$$

Критерием для определения бочкообразности является соотношение

$$\delta_H < \delta_C > \delta_K. \quad (32)$$

Величина бочкообразности

$$\Delta_B = (\delta_C - \text{Max}(\delta_K, \delta_H))/2. \quad (33)$$

Критерием для определения седлообразности является соотношение

$$\delta_H > \delta_C < \delta_K. \quad (34)$$

Величина седлообразности

$$\Delta_C = (\text{Max}(\delta_K, \delta_H) - \delta_C)/2. \quad (35)$$

Отклонение от плоскостности определяют как наибольшее расстояние $\Delta_{Пл}$ от точек реальной поверхности до прилегающей плоскости в пределах нормируемого участка [1]. В рассматриваемой методике реальная боковая поверхность представлена в виде прямых образующих боковых поверхностей шлица, которые, как уже отмечено, являются боковыми сторонами средних трапеций, ориентированных по длине шлица под углами φ_{ij} . В данном случае отклонение от плоскостности боковой поверхности на нормируемом участке можно определить по формуле:

$$\Delta_{Пл} = \text{Max}(\text{Max}(b_{Bj}, b_{Cj}, b_{Hj}) \cdot \text{Cos}\varphi_j + \frac{D-d}{4} \text{tg}\varphi_j) - \text{Min}(\text{Min}(b_{Bj}, b_{Cj}, b_{Hj}) \cdot \text{Cos}\varphi_j + \frac{D-d}{4} \text{tg}\varphi_j). \quad (36)$$

Здесь отклонение от плоскостности определяется как разность любой максимальной и минимальной характеристики средней трапеции с учётом её углового положения.

Заключение. Реализуя вышеизложенную методику в алгоритмах программ для автоматизированного контроля на устройствах измерения координат при проверке качества ответственных шлицевых валов, можно из комплекса погрешностей шлицев выделить наиболее значимые элементарные погрешности и определить их числовые значения.

Рассмотренная методика контроля шлицевого вала была успешно опробована при проведении экспериментальных измерений партии шлицевых оправок на Оршанском станкостроительном заводе «Красный борец». Измерение координат осуществлялось на координатно-измерительной машине «Mitutoyo». Применение данной методики дало возможность точно определить элементарные погрешности шлицевого вала, что в свою очередь определило создание адекватных моделей процесса шлицефрезерования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якушев, А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: учебник для вузов / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.М. Федотов. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
2. Сысоев, Ю.С. Координатные методы контроля геометрии поверхностей изделий машиностроения. Методы контроля профилей деталей // Справочник. Инженерный журнал. – 2007. – № 2. – С. 19 – 25.
3. Сысоев, Ю.С. Методика определения базовой средней плоскости при координатных методах анализа номинально плоской поверхности // Метрология. – 2003. – № 12. – С. 8 – 16.
4. Ящерицын, П.И. Планирование эксперимента в машиностроении: справ. пособие / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. – Минск: Выш. шк., 1985. – 286 с.: ил.

Поступила 18.12.2007