

УДК 621.81:519.8

СПОСОБ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ШЛИЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ

К. А. ШАЛЫЖИН, А. А. ЖОЛОБОВ

*Государственное учреждение высшего
профессионального образования*

«Белорусско-Российский университет», г. Могилев

Введение

Сборка является заключительной стадией изготовления шлицевого соединения. На этом этапе наряду с основными показателями качества соединения, заложенными при проектировании, проявляются и большинство погрешностей производства отдельных его деталей. Данные погрешности могут явиться причиной отсутствующей или ограниченной собираемости соединения, а также привести к изменению его точностных показателей при приложении нагрузок в эксплуатационных условиях. Поэтому при обеспечении качества формирования шлицевого соединения необходимо рассмотреть вопросы, связанные с собираемостью соединения в процессе его изготовления, т. е. статической собираемостью, и вопросы, связанные с деформациями и относительными перемещениями деталей соединения при его эксплуатации, т. е. динамической собираемостью. В итоге – установить оптимальные условия и способы формирования качественного соединения.

Определение статической собираемости шлицевого сопряжения

Образующая боковой поверхности прямобокого шлица на валу или в отверстии представляет собой прямую линию. Положение этой прямой характеризует качество выполнения шлицевой поверхности. В соответствии с ГОСТ 1139 качество и точность боковой поверхности определяют толщину шлица, отклонение от симметричности шлица, непараллельность его боковых сторон.

Собираемость прямобокого шлицевого соединения по боковым сторонам шлица определяется взаимным положением образующих боковой поверхности шлицевого контура. Эти прямые образующие задаются двумя точками. Возможны следующие случаи положения прямых:

1. Образующие боковых сторон параллельны и расположены так, что между боковыми сторонами шлица на валу и в отверстии образуется зазор. Этот случай характеризуется наличием свободной собираемости шлицевого сопряжения по боковым сторонам шлица.

2. Образующие боковых сторон параллельны и расположены так, что между боковыми сторонами шлица на валу и в отверстии образуется натяг. Данный случай характеризуется отсутствием свободной собираемости шлицевого сопряжения по боковым сторонам шлица.

3. Образующие боковых сторон пересекаются. При этом если точка пересечения находится в контуре, образованном внутренним диаметром шлицевого отверстия, то, как и в первом случае, шлицевое сопряжение собирается свободно. Если точка пересечения находится за указанным контуром, то, как и во втором случае, шлицевое сопряжение не собирается свободно.

Математические модели вышеизложенных представлений основаны на задании прямых образующих боковых поверхностей по двум точкам, что не противоречит методу контроля боковой поверхности шлица, т. е.

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}, \quad (1)$$

где x, y – аргумент и функция прямой образующей боковой поверхности шлица; x_1, y_1, x_2, y_2 – координаты двух точек на прямой образующей боковой поверхности шлица.

Для одной из боковых сторон шлицевого сопряжения

$$\frac{x_i - x_{i1}}{x_{i2} - x_{i1}} = \frac{y_i - y_{i1}}{y_{i2} - y_{i1}}, \quad i = \overline{1, 2}, \quad (2)$$

где x_i, y_i – аргумент и функция прямой образующей боковой поверхности шлица на валу – для $i = 1$ и в отверстии – для $i = 2$; $x_{i1}, y_{i1}, x_{i2}, y_{i2}$ – координаты двух точек на прямой образующей боковой поверхности шлица на валу – для $i = 1$ и в отверстии – для $i = 2$.

Приведя уравнение (2) к нормальному виду, получим следующие функции прямых образующих:

$$A_i x + B_i y + C_i = 0, \quad i = \overline{1, 2}, \quad (3)$$

где $A_i = y_{i2} - y_{i1}$, $B_i = x_{i1} - x_{i2}$, $C_i = x_{i2}y_{i1} - x_{i1}y_{i2}$ – коэффициенты функции.

По нормальным уравнениям прямых образующих боковых поверхностей шлица на валу и в отверстии определяются условия собираемости прямобокого шлицевого соединения по боковым сторонам шлица для вышеописанного первого случая в следующем виде:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} \text{ и } t_1 = \frac{|C_1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}} < \frac{|C_2|}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2}} = t_2, \quad (4)$$

где t_1, t_2 – расстояние от оси симметрии сопряжения до прямых образующих боковых поверхностей шлица соответственно на валу и в отверстии.

В случае выполнения условий (4) в сопряжении между боковыми сторонами образуется зазор Δ , величина которого определяется из выражения

$$\Delta = \frac{|C_2|}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2}} - \frac{|C_1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}}. \quad (5)$$

Условия отсутствия собираемости прямобокого шлицевого соединения по боковым сторонам шлица для вышеописанного второго случая могут быть представлены в следующем виде:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} \text{ и } t_1 = \frac{|C_1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}} > \frac{|C_2|}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2}} = t_2, \quad (6)$$

где t_1, t_2 – расстояние от оси симметрии сопряжения до прямых образующих боковых поверхностей шлица соответственно на валу и в отверстии.

В случае выполнения условий (6) в сопряжении между боковыми сторонами образуется натяг Δ , величина которого определяется из выражения

$$\Delta = \frac{|C_1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}} - \frac{|C_2|}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2}}. \quad (7)$$

Условия собираемости прямобокового шлицевого соединения по боковым сторонам шлица при пересечении их прямых образующих для вышеописанного третьего случая могут быть представлены как

$$\frac{A_1}{A_2} \neq \frac{B_1}{B_2} \text{ и } \begin{cases} A_1x_0 + B_1y_0 + C_1 = 0 \\ A_2x_0 + B_2y_0 + C_2 = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где x_0, y_0 – координаты точки пересечения прямых образующих боковых сторон шлица на валу и в отверстии.

Из системы уравнений (8) определяются

$$x_0 = \frac{B_1(A_1C_2 - A_2C_1)}{A_1(B_1A_2 - B_2A_1)} - \frac{C_1}{A_1}, \quad y_0 = \frac{(A_1C_2 - A_2C_1)}{(B_1A_2 - B_2A_1)}.$$

Кроме этого определяется радиус окружности R , на которой лежит точка пересечения прямых образующих с центром в точке симметрии сопряжения. После этого сравнивается радиус R с радиусом окружности сопряжения $d/2$. При этом возможны следующие случаи:

1. $R > \frac{d}{2}$. При этом угол наклона прямой образующей боковой поверхности шлица на валу α_1 меньше угла наклона прямой образующей боковой поверхности шлица в отверстии α_2 , т. е. $\alpha_1 < \alpha_2$ (рис. 1, а).

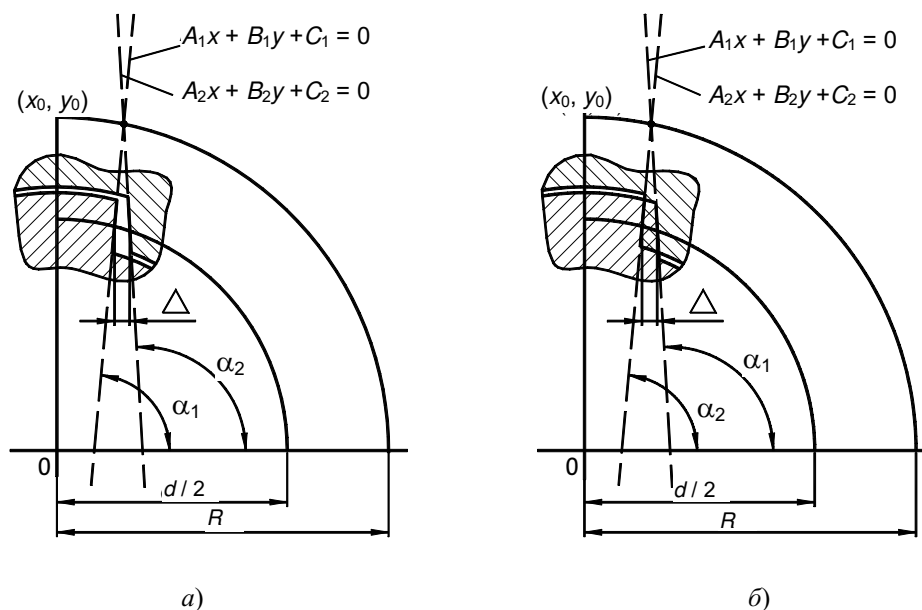


Рис. 1. Расчетные схемы

Углы α_1, α_2 определим из следующих выражений:

$$\alpha_1 = \arctg\left(-\frac{A_1}{B_1}\right), \quad \alpha_2 = \arctg\left(-\frac{A_2}{B_2}\right). \quad (9)$$

Как видно из расчетной схемы, в сопряжении образуется зазор Δ , следовательно, обеспечивается собираемость соединения по боковым сторонам шлицев.

2. $R \geq d/2$. При этом угол наклона прямой образующей боковой поверхности шлица на валу α_1 больше угла наклона прямой образующей боковой поверхности шлица в отверстии α_2 , т. е. $\alpha_1 > \alpha_2$ (рис. 1, б).

Из расчетной схемы видно, что в сопряжении образуется натяг Δ , следовательно, не обеспечивается собираемость соединения по боковым сторонам шлицев.

3. $R \leq d/2$. При этом угол наклона прямой образующей боковой поверхности шлица на валу α_1 меньше угла наклона прямой образующей боковой поверхности шлица в отверстии α_2 , т. е. $\alpha_1 < \alpha_2$ (рис. 2, а).

Как видно из расчетной схемы, в сопряжении образуется натяг Δ , следовательно, не обеспечивается собираемость соединения по боковым сторонам шлицев.

4. $R < d/2$. При этом угол наклона прямой образующей боковой поверхности шлица на валу α_1 больше угла наклона прямой образующей боковой поверхности шлица в отверстии α_2 , т. е. $\alpha_1 > \alpha_2$ (рис. 2, б).

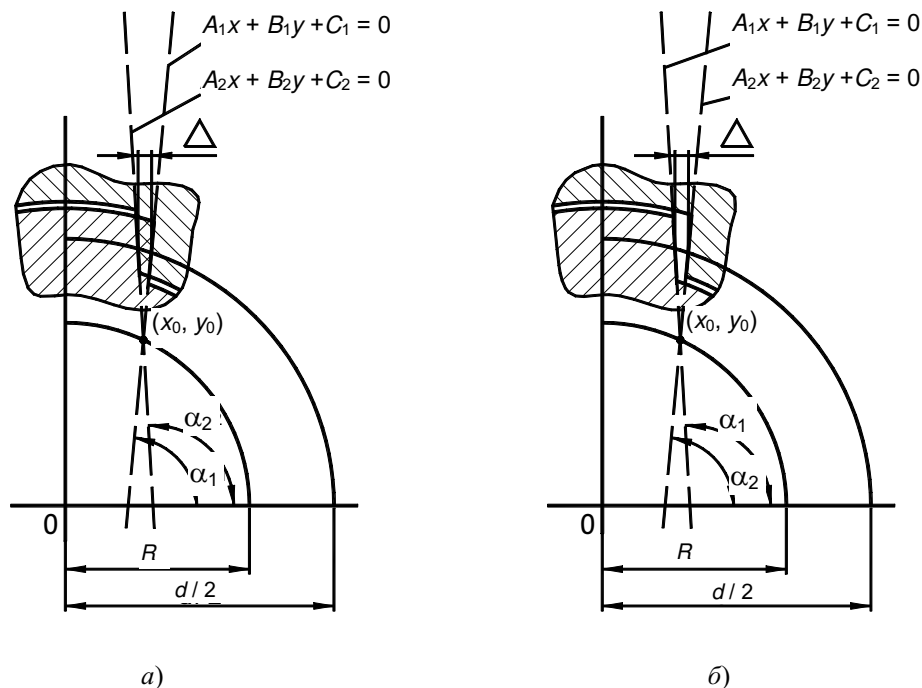


Рис. 2. Расчетные схемы

Из расчетной схемы видно, что в сопряжении образуется зазор Δ , следовательно, обеспечивается собираемость соединения по боковым сторонам шлицев.

Зазоры и натяги в прямобоком шлицевом соединении между боковыми сторонами шлица и отверстия при пересечении их прямых образующих определяются, зная координаты точек пересечения прямых образующих боковых сторон шлица на валу и в отверстии с радиусом окружности сопряжения.

В общем виде координаты точек пересечения определяются из системы уравнений:

$$\begin{cases} Ax + By + C = 0 \\ x^2 + y^2 = \frac{d^2}{4}. \end{cases} \quad (10)$$

Решая систему уравнений для каждой прямой образующей и окружности, находят координаты точек пересечения первой x_1, y_1 и второй x_2, y_2 прямой. Далее зазор (натяг) определяется как расстояние между точками с полученными координатами:

$$\Delta = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (11)$$

В итоге, зная функции прямых образующих правой и левой боковой стороны каждого n -го шлица на валу и в отверстии, можно оценить собираемость соединения.

В качестве критерия оптимальной собираемости представлены следующие выражения:

$$\Delta_{\text{ЗАЗОР}} = \sum_1^{2n} \Delta_{\text{ЗАЗОР}i} \rightarrow \max, \quad \Delta_{\text{НАТЯГ}} = \sum_1^{2n} \Delta_{\text{НАТЯГ}i} \rightarrow \min. \quad (12)$$

Для поиска наиболее оптимального взаимного положения вала и отверстия, обеспечивающего выполнения условий собираемости для рассмотренных возможных случаев, вал последовательно поворачивается относительно отверстия на угол

$$\alpha = \frac{360}{n}, \quad (13)$$

где n – число шлицев на валу и в отверстии.

При этом поворот осуществляется n раз, после чего определяются такое взаимное положение вала и отверстия, которое наиболее оптимально по условию (12).

Если установить, что поворот выполняет вал, а отверстие неподвижно, то преобразование координат каждой прямой образующей вала осуществляется с помощью следующего оператора:

$$\begin{cases} x' = x \cos \alpha + y \sin \alpha, \\ y' = -x \sin \alpha + y \cos \alpha, \end{cases} \quad (14)$$

где x', y' – преобразованные при повороте координаты.

Общее уравнение всех прямых образующих боковых поверхностей шлица на валу в преобразованной системе координат отверстия примет вид

$$(A_1 \cos \alpha - B_1 \sin \alpha)x + (A_1 \sin \alpha - B_1 \cos \alpha)y + C_1 = 0. \quad (15)$$

После выполнения всех поворотов определяется наиболее оптимальное положение деталей соединения.

Таким образом, в результате вышеуказанных представлений определяется собираемость прямобокого шлицевого сопряжения по боковым сторонам шлица и получаются конкретные значения зазоров и натягов на боковых сторонах шлицев в сопряжении, которые в дальнейшем могут быть использованы определения динамической собираемости шлицевого соединения.

Определение динамической собираемости шлицевого сопряжения

Рабочие нагрузки, действующие на прямоугольное шлицевое соединение в процессе эксплуатации, воспринимаются конкретными шлицами отверстия и вала, размеры которых образуют размерную цепь с зазорами и натягами, полученными по результатам определения статической собираемости соединения. При действии нагрузки в этой размерной цепи неизбежно возникают перемещения и деформации. Если в процессе сборки не учитывать влияние действующих при эксплуатации нагрузок, то это может привести к появлению погрешностей и снижению требуемой точности работы соединения.

Набор отношений между силами и возникающими от их действия перемещениями для конечного элемента с n степенями свободы имеет вид:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= k_{11}\Delta_1 + k_{12}\Delta_2 + \dots + k_{1j}\Delta_j + \dots + k_{1n}\Delta_n, \\
 F_i &= k_{i1}\Delta_1 + k_{i2}\Delta_2 + \dots + k_{ij}\Delta_j + \dots + k_{in}\Delta_n, \\
 F_n &= k_{n1}\Delta_1 + k_{n2}\Delta_2 + \dots + k_{nj}\Delta_j + \dots + k_{nn}\Delta_n,
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

где k_{ij} – коэффициент жесткости; i – индекс, определяющий силу, для которой записывается уравнение; j – индекс, определяющий соответствующую степень свободы; F_i – сила; Δ_j – перемещение по j -й степени свободы.

Данная квадратная матрица построена с учетом того, что ее размерность равна числу степеней свободы и каждая сила связана соотношением с каждым перемещением. В общем случае можно записать

$$\{F\} = |k| \{\Delta\},
 \tag{17}$$

где $|k|$ – матрица жесткости элемента; $\{F\}, \{\Delta\}$ – соответственно векторы сил и перемещений для элемента.

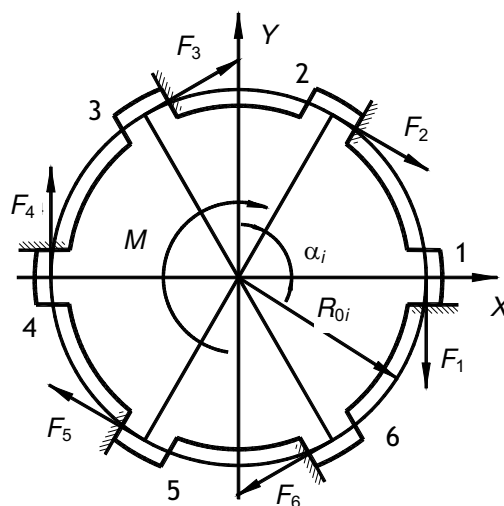


Рис. 3. Схема прямоугольного шлицевого соединения

Для идеального прямоугольного шлицевого соединения (рис. 3) при действии на вал крутящего только момента матрица жесткости выглядит следующим образом:

$$|k| = k \begin{vmatrix} \sum \cos^2 \alpha_i & \sum \cos \alpha_i \sin \alpha_i & \sum R_{0i} \cos \alpha_i \\ \sum \cos \alpha_i \sin \alpha_i & \sum \sin^2 \alpha_i & \sum R_{0i} \sin \alpha_i \\ \sum R_{0i} \cos \alpha_i & \sum R_{0i} \sin \alpha_i & \sum R_{0i}^2 \end{vmatrix}, \quad (18)$$

где k – жесткость шлица; α_i – угол направляющего косинуса; R_{0i} – плечо силы, равное половине среднего диаметра шлицевого вала.

Жесткость шлица на сдвиг рассчитывается по формуле

$$k = \frac{GA}{L}, \quad (19)$$

где G – модуль упругости второго рода; A – площадь продольного сечения шлица; L – длина на сдвиг.

Площадь продольного сечения шлица

$$A = lb, \quad (20)$$

где l – длина шлицевого участка вала; b – ширина шлица.

При контроле ширины шлица измерения проводятся по среднему диаметру шлица, поэтому длина на сдвиг будет равна половине высоты шлица и вычисляется по формуле

$$L = \frac{D-d}{4}, \quad (21)$$

где D – наружный диаметр шлица; d – внутренний диаметр шлица.

Таким образом, уравнение равновесия указанной системы имеет вид:

$$\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ M \end{vmatrix} = \frac{GA}{L} \begin{vmatrix} \sum \cos^2 \alpha_i & \sum \cos \alpha_i \sin \alpha_i & \sum R_{0i} \cos \alpha_i \\ \sum \cos \alpha_i \sin \alpha_i & \sum \sin^2 \alpha_i & \sum R_{0i} \sin \alpha_i \\ \sum R_{0i} \cos \alpha_i & \sum R_{0i} \sin \alpha_i & \sum R_{0i}^2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x \\ y \\ \varphi \end{vmatrix}, \quad (22)$$

где M – крутящий момент; x , y , φ – линейные и угловое относительные перемещения шлицевого вала и отверстия.

В результате решения системы (22) определяются значения относительных перемещений вала и отверстия по координатам x и y , а также угол поворота φ вала относительно отверстия при замыкании каждого из зазоров. В итоге определяются перемещения и деформации соединения, возникающие при максимальной нагрузке, что дает возможность оценить точность работы соединения в эксплуатационных условиях.

Приспособление для комплексного контроля шлицевого вала

Для определения статической и динамической собираемости шлицевого прямогобокого сопряжения и соединения, как совокупность сопряжений, необходимо точно знать геометрическое место точек, принадлежащих каждому сопрягаемому профилю собираемых деталей. Шлицевый прямобочный профиль состоит из набора дуг окружностей и прямых. Дуги окружностей на профиле обуславливают наличие цилиндрических поверхностей на детали, прямые – плоскостей. Цилиндрические поверхности в шлицевом соединении в зависимости от диаметра – внутренние и наружные. Плоскости образуют боковые поверхности шлица. Известны различные средства контроля толщины и направления шлицев на валах. Контроль толщины осуществ-

ляют комплексными калибрами, а также калибрами-скобами. Недостатками этих средств контроля является то, что они не позволяют контролировать направление (спиральность) шлицев, судить о фактической толщине и положении шлица, а также для измерения различных погрешностей шлица необходимо большое число различных средств измерения. Для получения геометрического места точек боковых поверхностей шлицев на валу создано и запатентовано как полезная модель приспособление [1].

Достоинство разработанного устройства состоит в возможности расширения функциональных возможностей для контроля шлицевых валов за счет обеспечения возможности одновременного контроля толщины шлица, его направления (спиральности), а также отклонения профиля продольного сечения.

На рис. 4 представлен общий вид устройства для контроля шлицевых валов. Оно содержит основание 1, закрепленные в стойках 2 и 3 неподвижный 4 и подвижный 5 центры для базирования контролируемого вала 6, стойки 7 и 8 для закрепления цилиндрической скалки 9, служащей в качестве направляющей для измерительной системы. На скалке 9 закреплен поворотный кронштейн 10, опирающийся своим свободным концом на наружную цилиндрическую поверхность шлица. Кронштейн 10 снабжен прорезью. В прорези размещены подпружиненные измерительные рычаги 11 и 12, одно плечо каждого из которых опирается на боковую поверхность шлица, а второе – на измерительные штоки индикаторов 13 и 14. Устройство фиксации вала в требуемом угловом положении выполнено в виде закрепленного с возможностью свободного вращения на неподвижной оси 15 эксцентрика 16, снабженного подпружиненным прихватом 17.

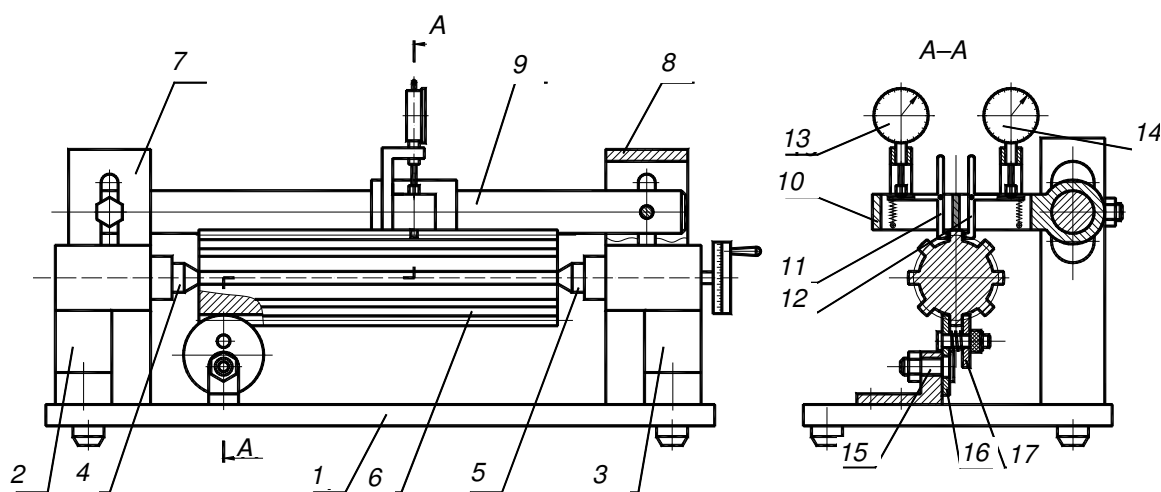


Рис. 4. Устройство для контроля шлицевого вала

Работает устройство следующим образом. Сначала устройство настраивают на измерение конкретного шлицевого вала. Устройство фиксации перемещают по основанию 1 с учетом толщины шлица, а также устанавливают цилиндрическую скалку 9 в стойках 7 и 8 на определенную высоту. Далее, контролируемый вал устанавливают в центры 4, 5 устройства и фиксируют с помощью прихвата 17. Поворотный кронштейн 10 перемещается вдоль цилиндрической скалки 9 в начало контролируемого участка вала. Измерительные рычаги 11 и 12 разводят, нажимая на свободные концы, устанавливают их измерительные плечи на боковые поверхности шлица. Стрелки индикаторов 13 и 14 при этом устанавливают на нуль. Измерения проводятся путем снятия показаний индикатора в определенных местах контролируемого вала пу-

тем перемещения поворотного кронштейна 10 вдоль цилиндрической скалки 9. После измерения одного шлица прихват 17 устройства фиксации отжимают и освобождают контролируемый вал, поворотный кронштейн 10 приподнимают, вал поворачивают и ведут измерение другого шлица. По зафиксированным показаниям индикаторов определяют толщину и спиральность шлицев, анализируют отклонения профиля продольного сечения шлица.

Для получения геометрического места точек профиля боковых поверхностей шлицев в необходимом поперечном сечении вышеизложенное измерение проводят дважды на разных высотах шлица. В результате для каждой боковой стороны шлицев необходимого поперечного сечения получают по две точки, по координатам которых строится прямая образующая боковой поверхности шлица. Эти данные необходимы для вышеописанного определения собираемости шлицевого сопряжения.

Для проведения измерений разработанное приспособление было усовершенствовано путем включения его в автоматизированный комплекс контроля, состоящего из приспособления, индуктивных датчиков линейного перемещения вместо индикаторов часового типа и персональной ЭВМ.

Результаты измерений непосредственно поступают в ЭВМ. Снабжена ЭВМ управляющей программой, служащей для настройки измерительной системы, фиксации цифровой информации о размерах контролируемых деталей и записи этой информации в отдельные файлы для последующего анализа собираемости соединения при использовании специальной программы, написанной в среде VBA.

Таким образом, на основе представленного математического аппарата и технических средств реализован и описан в статье способ обеспечения качества формирования прямобокого шлицевого соединения.

Литература

1. Пат. 2136 Республика Беларусь, G 01B 3/00. Устройство для контроля шлицевых валов / М. Ф. Пашкевич, А. А. Жолобов, К. А. Шалыжин ; заявитель и патентообладатель ГУВПО «Белорус.-Рос. ун-т». – № и 20050066 ; заявл. 14.02.05 ; опубл. 30.09.05.

Получено 04.10.2006 г.