

УДК 621.9.015: 519.87

К. А. Шалыжин, А. А. Жолобов, канд. техн. наук, проф.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ШЛИЦЕФРЕЗЕРОВАНИЯ ЧЕРВЯЧНОЙ ФРЕЗОЙ

В статье представлена методика определения элементарных погрешностей шлицевого вала при наличии погрешностей и деформаций элементов технологической системы шлицефрезерования. Описаны способы определения геометрических параметров шлицевого профиля. Установлены базовые элементы технологической системы, с учётом которых производится отсчёт погрешностей. Представлена программа, реализующая алгоритм указанной методики. Рассмотрена область её практического применения.

Для наиболее эффективного использования возможностей высокопроизводительного процесса шлицефрезерования с использованием червячных фрез необходимо правильный учёт погрешностей, возникающих в технологической системе. Наибольшее число погрешностей возникает из-за действия сил резания и недостаточной жесткости элементов технологической системы. Как известно, жесткость любого станка характеризуется величиной суммарного относительного перемещения инструмента и заготовки под действием силы, поэтому необходимо,

прежде всего, знать величину, направление и точку приложения результирующей силы, нагружающей технологическую систему. Для удобства определения величины силы, её представляют в виде составляющих.

При нарезании цилиндрических зубчатых колёс и шлицевых валов действие силы  $P_z$  направлено параллельно оси нарезаемого колеса,  $P_y$  – перпендикулярно осям инструмента и заготовки,  $P_x$  – перпендикулярно составляющим  $P_z$  и  $P_y$  (рис. 1) [1].

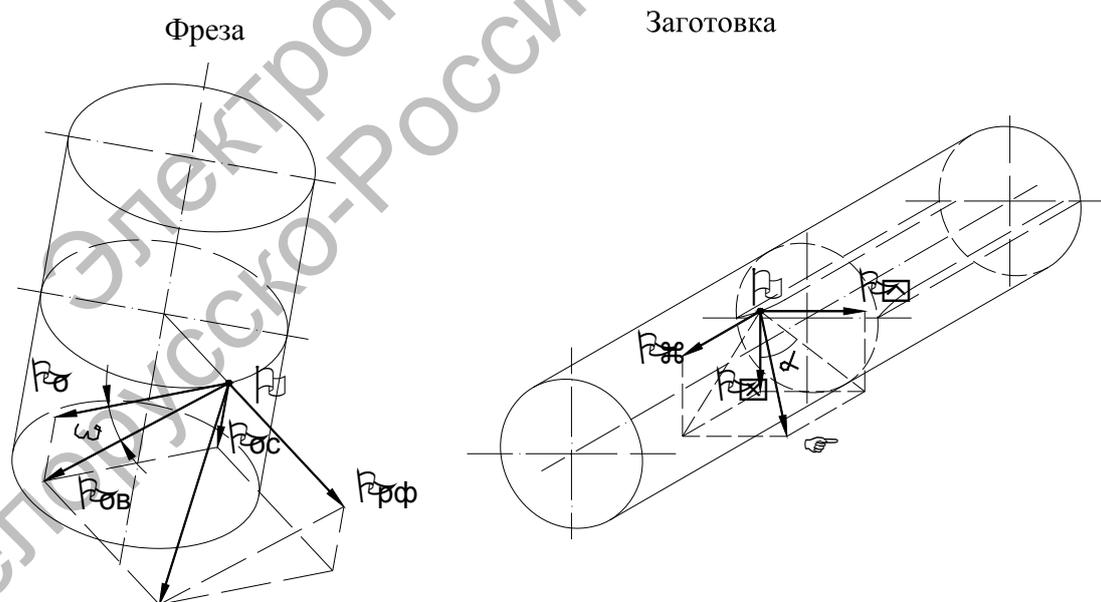


Рис. 1. Составляющие силы резания при шлицефрезеровании:  $P_{0B}$  – сила, направленная вдоль работающего витка фрезы;  $P_{0F}$  – радиальная составляющая силы резания, пересекающая ось фрезы;  $P_z$  – составляющая силы резания, направленная вдоль впадины между шлицами нарезаемого вала, параллельная дну впадины;  $\omega$  – угол подъема витка червяка фрезы;  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания, направленная к оси заготовки, параллельно её торцу;  $\alpha$  – угол, характеризующий направление результирующей силы резания  $F$ ;  $P_0$  – окружная составляющая силы резания

Для определения силы резания и её составляющих необходимы следующие исходные данные:

– геометрические параметры фрезы. В соответствии с ГОСТ 8027–86 к ним относятся  $d_{ao}$  – наружный диаметр фрезы,  $L$  – длина фрезы,  $z_o$  – число зубьев фрезы,  $\omega$  – угол подъёма витка червяка фрезы,  $T$  – стойкость фрезы;

– геометрические параметры заготовки и детали –  $z \times d \times D$  соответственно число шлицев на валу, внутренний диаметр и наружный диаметр шлицевого вала;

– режимы обработки –  $S_o$  – подача инструмента за оборот.

Скорость резания определяется по формуле [2]

$$V = \frac{780z^{0,37}}{T^{0,4}S_o^{0,5}h^{1,28}}. \quad (1)$$

Мощность, затрачиваемая на резание при фрезеровании шлицевых валов, изготовленных из стали 45 твёрдостью НВ 207, определяется по формуле [2]

$$N = 42 \cdot 10^{-5} S_o^{0,65} D^{1,1}. \quad (2)$$

Окружная составляющая силы резания [3]

$$P_o = \frac{60 \cdot 10^3 N}{V}. \quad (3)$$

Сила, направленная вдоль работающего витка фрезы [1],

$$P_{OB} = \frac{P_o}{\cos \omega}. \quad (4)$$

Таким образом, составляющая силы резания, направленная вдоль впадины между шлицами нарезаемого вала, параллельная дну впадины:

$$P_z = \frac{P_{OB} \cos \alpha'}{\cos(\psi + \alpha')}. \quad (5)$$

Составляющая силы резания, направленная перпендикулярно оси заготовки,

$$P_y = P_z \operatorname{tg} \alpha'. \quad (6)$$

Угол контакта, действующего в данной впадине зуба фрезы,

$$\psi = \arccos \left( 1 - \frac{D-d}{0,5D} \right). \quad (7)$$

Угол, характеризующий направление результирующей силы резания  $F$ ,

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{\cos \psi}{\frac{P_o}{P_z \cos \omega} + \sin \psi} \right). \quad (8)$$

Составляющая силы резания, перпендикулярная  $P_z$  и  $P_y$ ,

$$P_x = \frac{P_z}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (9)$$

где  $\alpha = 30^\circ$  принят по данным, представленным в [1].

Результирующая сил определяется по формуле

$$F = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}. \quad (10)$$

Сила, направленная вдоль оси фрезы,

$$P_{oc} = \sqrt{P_{os}^2 - P_o^2}. \quad (11)$$

Сила, перпендикулярная оси фрезы,

$$P_{p\phi} = \sqrt{F^2 - P_{os}^2}. \quad (12)$$

Таким образом, по вышеизложенной методике в итоге определяются все составляющие силы резания, действующие на заготовку и червячную фрезу.

Установка заготовки в шлицефрезерном станке производится в центрах передней и задней бабок. При этом прогиб заготовки под действием сил резания в точках их приложения можно определить как для балки, установленной на двух опорах, по формулам:

$$\Delta_{zx} = \frac{P_x \cdot L_0^2 \cdot (L - L_0)^2}{3 \cdot E \cdot J \cdot L}; \quad (13)$$

$$\Delta_{zy} = \frac{P_y \cdot L_0^2 \cdot (L - L_0)^2}{3 \cdot E \cdot J \cdot L}. \quad (14)$$

При таком способе установки заготовки наибольший прогиб от действия сил резания заготовка будет иметь в середине пролёта. Для определения значения осевого момента инерции шлицевого профиля необходимо представить его в виде отдельных элементов и фигур. Простейшим элементом, отражающим геометрическую характеристику шлицевого профиля, является сектор, ограниченный одним выступом и одной впадиной. Угол сектора определяется делением окружности на число зубьев или шлицев вала.

Для определения осевых моментов инерции элементарного сектора он был представлен в виде комплекса элементарных фигур: равнобедренного треугольника, прямоугольника и сегмента. Для каждой фигуры, условно ориентированной вдоль осей X и Y, были определены осевые моменты инерции. В итоге были определены осевые и центробежные моменты инерции элементарного сектора как сумма осевых и центробежных моментов инерции фигур, его составляющих. Осевой момент инерции шлицевого профиля определяется как сумма осевых моментов всех z его составляющих элементарных секторов, численные значения которых определяются с использованием оператора поворота осей. В результате получаем осевые моменты инерции всего профиля.

Используя вышеизложенную методику, с помощью разработанной программы для каждого номинального размера шлицевого профиля из ГОСТ 1139–80 был определен осевой момент инерции сечений.

Сравнивая рассчитанные значения осевого момента инерции для шлицевого профиля со значениями момента инерции профиля, соответствующего круглой заготовке для данного профиля, можно установить, что формирование шлицев ослабляет сечение примерно на 30–40 % для

различных шлицевых профилей. Это приводит к различному характеру прогибов обрабатываемой заготовки на участках до и после обработки. Для определения координат действительных точек осевой линии заготовки при обработке воспользуемся формулами расчёта стрелы прогиба балки, закреплённой на двух опорах:

$$\Delta_1 = \frac{P_{x(y)} \cdot (L - L_0)}{6 \cdot E \cdot J_o \cdot L} \times (z^3 - zL_0(2L - L_0)); \quad (15)$$

$$\Delta_2 = \frac{P_{x(y)} \cdot L_0}{6 \cdot E \cdot J \cdot L} \cdot (-z^3 + 3z^2L - z(2L^2 + L_0^2) + L_0^2L), \quad (16)$$

где  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  – деформации до и после обработки соответственно; z – осевая координата точки;  $J_o$  – осевой момент инерции круглого сечения заготовки.

В процессе резания на фрезу действуют силы резания, которые вызывают упругие деформации инструментальной оправки. Направления деформаций определяются из схемы составляющих сил, действующих на фрезу. Величины деформаций зависят от жесткостных и геометрических параметров инструментальной оправки и определяются по формулам, аналогичным формулам для определения прогиба заготовки, поскольку закрепление фрезы также соответствует схеме закрепления балки на двух опорах. Закрепление червячной фрезы на оправке осуществляется, в основном, посередине её пролёта.

В указанных условиях деформации инструментальной оправки под действием приложенных сил определяются по формулам:

$$\Delta_{ирф} = \frac{P_{рф} \cdot L_{и}^3}{48 \cdot E \cdot I}; \quad \Delta_{ио} = \frac{P_o \cdot L_{и}^3}{48 \cdot E \cdot I}, \quad (17)$$

где I – осевой момент инерции профиля круглого сечения оправки, определяе-

мый в зависимости от её диаметра.

Деформация шпиндельного узла  $\Delta_{ш}$ , а также деформация задней бабки  $\Delta_{б}$  изменяются в соответствии с изменением силы резания по мере продвижения фрезы к шпинделю станка. Их величину можно определить исходя из величины действительной жёсткости шпиндельного узла  $j_{ш}$  и задней бабки  $j_{б}$  соответственно, а также с учётом расстояния  $L_0$  от торца заготовки до рассматриваемой точки. Принимая во внимание допущение, что их жёсткость одинакова в направлении осей  $Y$  и  $X$  при обработке заготовки в центрах, то

$$\Delta_{шY} = (P_Y \cdot L_0) / (j_{ш} \cdot L); \quad (18)$$

$$\Delta_{шX} = (P_X \cdot L_0) / (j_{ш} \cdot L); \quad (19)$$

$$\Delta_{бY} = (P_Y \cdot (L - L_0)) / (j_{б} \cdot L); \quad (20)$$

$$\Delta_{бX} = (P_X \cdot (L - L_0)) / (j_{б} \cdot L), \quad (21)$$

где  $j_{ш}$  – жёсткость шпиндельного узла, Н/м;  $j_{б}$  – жёсткость задней бабки, Н/м.

В результате совместного действия деформаций шпиндельного узла  $\Delta_{ш}$  и задней бабки  $\Delta_{б}$  суммарная величина деформаций на длине  $L_0$  может быть определена по формулам:

$$\Delta_{шбY} = \Delta_{бY} + (\Delta_{шY} - \Delta_{бY}) L_0 / L; \quad (22)$$

$$\Delta_{шбX} = \Delta_{бX} + (\Delta_{шX} - \Delta_{бX}) L_0 / L. \quad (23)$$

Наличие смещения центровочных отверстий  $\Delta_{сп}$ ,  $\Delta_{сл}$  приводит к дополнительному смещению её оси относительно оси центров станка. Эти факторы не зависят от силы резания и в данной модели учтены при нахождении действительного радиуса заготовки  $R_3^D$ , определяемого как расстояние от оси центров станка до точки на поверхности заготовки.

Таким образом, действительный радиус заготовки  $R_3^D$  с учетом смещения

центровых отверстий заготовки при обработке в центрах можно определить по формуле

$$R_3^D = \sqrt{R_3^2 - (\Delta_{см} \cdot \sin(\varphi + \varpi_1))^2} + \Delta_{см} \cdot \cos(\varphi + \varpi_1), \quad (24)$$

где  $\Delta_{см}$  – суммарная величина смещения в рассматриваемой точке, расположенной на длине  $L_0$ ;  $\varpi_1$  – угол между горизонталью и прямой, проведённой из центра заготовки через правое центровое отверстие.

Суммарная величина смещения  $\Delta_{см}$  определяется как геометрическая сумма смещений центровых отверстий правого и левого торцов заготовки на длине  $L_0$ :

$$\Delta_{см} = \sqrt{\Delta_{сп}^2 + \Delta_{сл}^2 \pm 2\Delta_{сп}\Delta_{сл} \cdot \cos(180 - \varphi_{цц})}, \quad (25)$$

где  $\Delta_{сп}$ ,  $\Delta_{сл}$  – величина смещения центровых отверстий правого и левого торцов заготовки на длине  $L_0$  соответственно:

$$\Delta_{сп} = \Delta_{сп} \cdot (1 - L_0 / L); \quad (26)$$

$$\Delta_{сл} = \Delta_{сл} \cdot (L_0 / L), \quad (27)$$

где  $\Delta_{сп}$ ,  $\Delta_{сл}$  – величины смещения центровых отверстий правого и левого торцов заготовки;  $\varphi_{цц}$  – угол между прямыми линиями, проведенными от оси заготовки через центровые отверстия.

Овальность  $\Delta_0$  и конусность  $\Delta_k$  поверхности заготовки оказывают влияние на исходный радиус заготовки  $R_3$ , соответствующий расстоянию от оси заготовки до точки, расположенной на ее поверхности, и не зависят от изменения силы резания. Наличие исходной овальности поверхности  $\Delta_0$  оказывает влияние на изменение радиуса заготовки от нуля до  $\Delta_0$  во время вращения заготовки вокруг своей оси. Величина конусности  $\Delta_k$  изменяет его величину от  $R_3$  до  $R_3 - \Delta_k$ . Можно записать формулу

для расчета величины исходного радиуса заготовки  $\varphi$  для каждой точки её поверх-

ности, выраженного через угол  $R_3$ , полярной системы координат

$$R_3 = \sqrt{((R_3 - \Delta_K \cdot L_0/L_3) \cos \varphi)^2 + ((R_3 - \Delta_O - \Delta_K \cdot L_0/L_3) \sin \varphi)^2}, \quad (28)$$

где  $R_3$  – исходный радиус заготовки;  $\Delta_K$  – величина конусности поверхности заготовки;  $\varphi$  – полярная координата точки, расположенной на поверхности заготовки;  $\Delta_O$  – величина овальности заготовки.

При обработке заготовки в центрах действительный радиус детали  $R_d$  будет непосредственно влиять на смещение оси задней бабки  $\Delta_{СБУ}$  и  $\Delta_{СБХ}$ . Эту величину смещения оси задней бабки по направлению осей  $Y$  и  $X$  для любой точки заготовки, расположенной на длине  $L_0$  от правого торца, можно определить из соотношений:

$$\Delta_{СБУЛ} = \Delta_{СБУ} \cdot (1 - L_0/L); \quad (29)$$

$$\Delta_{СБХЛ} = \Delta_{СБХ} \cdot (1 - L_0/L), \quad (30)$$

где  $\Delta_{СБУ}$ ,  $\Delta_{СБХ}$  – смещение оси задней бабки станка, измеренное в направлениях осей  $Y$  и  $X$  соответственно.

Для определения изменения глубины резания, вызванного исходной шероховатостью поверхности заготовки  $\Delta_{RZ}$ , введем допущение, что высота неровностей изменяется случайным образом в соответствии с нормальным законом распределения. Тогда в соответствии с правилом «шести сигм», для каждой точки поверхности заготовки можно принять значение шероховатости поверхности соответственно формулам:

$$\sigma_{RZ} = R_{Z3} / 6; \quad (31)$$

$$\Delta_{RZ} = \sigma_{RZ} \cdot RandF, \quad (32)$$

где  $\sigma_{RZ}$  – среднеквадратическое отклонение высоты неровностей поверхности;  $R_{Z3}$  – значение шероховатости поверхности;  $RandF$  – случайная функция, значения которой соответствуют стандартизованному нормальному распределению.

Деформации посадочных гнезд инструментальной оправки, условно обозначенных как верхнее и нижнее гнездо (соответственно  $\Delta_{ВГ}$  и  $\Delta_{НГ}$ ), изменяются в соответствии с изменением сил, действующих на фрезу по мере продвижения фрезы к шпинделю станка. Их величину можно определить исходя из величины действительной жёсткости верхнего и нижнего гнезд  $j_{ВГ}$  и  $j_{НГ}$  соответственно, а также с учётом того, что в общем случае червячная фреза установлена на половине длины  $L_{II}$  инструментальной оправки. Принимая во внимание допущение, что их жёсткость одинакова в направлении действия сил  $P_O$  и  $P_{P\Phi}$ , то

$$\Delta_{ВГР\Phi} = P_{P\Phi} / 2j_{ВГ}; \quad (33)$$

$$\Delta_{ВГО} = P_O / 2j_{ВГ}; \quad (34)$$

$$\Delta_{НГР\Phi} = P_{P\Phi} / 2j_{НГ}; \quad (35)$$

$$\Delta_{НГО} = P_O / 2j_{НГ}, \quad (36)$$

где  $j_{ВГ}$  – жёсткость верхнего гнезда, Н/м;  $j_{НГ}$  – жёсткость нижнего гнезда, Н/м.

Учет смещения осей посадочных гнезд инструментальной оправки. При установке инструментальной оправки в посадочных гнездах на положение фрезы будет непосредственно влиять смещение осей посадочных гнезд инструментальной оправки  $\Delta_{СНР\Phi}$  и  $\Delta_{СНО}$ . Величину смещения осей по направлению действия сил  $P_{P\Phi}$  и  $P_O$  для точки оправки, на половине длины  $L_{II}$ , можно определить из соотношений:

$$\Delta_{СНР\Phi L} = \Delta_{СНР\Phi} / 2; \quad (37)$$

$$\Delta_{СНО L} = \Delta_{СНО} / 2. \quad (38)$$

Определение влияния элементарных погрешностей на формообразование шлицевого вала. Для оценки воздействия каждой элементарной погрешности на формообразование шлицевого профиля в каждом поперечном сечении вала необходимо ввести определённую систему отсчёта. Для количественной оценки свяжем с данной системой декартову систему координат  $OXYZ$ . Определим необходимую её ориентацию в рабочем пространстве формообразования.

В идеальном случае формообразования, т. е. в условиях абсолютной жёсткости технологической системы и полном отсутствии каких-либо погрешностей её элементов, ось заготовки и траектория пе-

ремещения червячной фрезы представляют собой идеальные прямые, строго параллельные друг другу. При этом червячная фреза формирует в каждом поперечном сечении вала точный шлицевый профиль.

Совместим координатную ось  $Z$  с осью заготовки; ось заготовки и траектория перемещения червячной фрезы пересекают координатную плоскость  $XOY$  в некоторых точках. Далее совместим начало координат системы с точкой  $O_3$  пересечения оси заготовки координатной плоскости  $XOY$ , в результате чего точка  $O_\Phi$  пересечения траектории фрезы лежит на оси  $X$  (рис. 2).

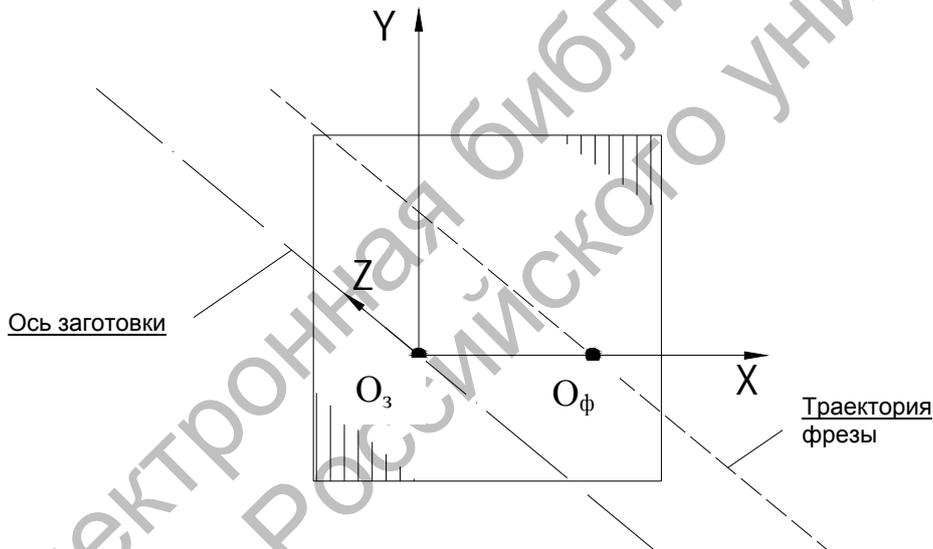


Рис. 2. Расположение системы отсчёта

Обозначим точки  $O_3$  и  $O_\Phi$  как начала локальных систем координат соответственно заготовки и фрезы, относительно которых будут отсчитываться текущие состояния и положения заготовки и фрезы с учетом погрешностей реальных условий работы технологической системы.

Рассмотрим локальную систему координат фрезы с началом в точке  $O_\Phi$ . Относительно данной системы координат определяются положения самой фрезы и её условной передней поверхности, которая

формирует в пространстве идеальный шлицевый профиль, центр которого совпадает с идеальной осью заготовки.

Определим, как вышеизложенные погрешности относительного положения фрезы влияют на форму и положение формируемого профиля. Для этого найдём кусочно-непрерывную функцию любого шлицевого прямообочного профиля. С этой целью выделим элементарные функции на участке профиля, ограничивающего один элементарный сектор.

Угол, соответствующий профилю выступа одного элементарного шлицевого сектора, равен

$$\varphi_B = 2 \arcsin \frac{b}{d}, \quad (39)$$

где  $b$  – ширина шлица;  $d$  – диаметр впадин.

Угол, соответствующий профилю впадины одного элементарного шлицевого сектора, равен

$$\varphi_{ВП} = \frac{2\pi}{z} - 2 \arcsin \frac{b}{d}, \quad (40)$$

где  $b$  – ширина шлица;  $d$  – диаметр впадин.

Угол, соответствующий профилю боковой стороны одного элементарного шлицевого сектора, можно найти из формулы

$$\varphi_B = \arcsin \frac{b(D-d)}{D \cdot d}, \quad (41)$$

где  $d$  – диаметр выступов.

Таким образом, кусочно-непрерывная функция шлицевого профиля выглядит следующим образом:

$$R = \begin{cases} \frac{d}{2}, & -\frac{\varphi_{ВП}}{2} + \frac{2\pi}{z}k \leq \varphi \leq \frac{\varphi_{ВП}}{2} + \frac{2\pi}{z}k, & k = 0 \dots (z-1); \\ \frac{b}{2 \sin\left(\frac{\pi}{z}(1+2k) - \varphi\right)}, & \frac{\varphi_{ВП}}{2} + \frac{2\pi}{z}k \leq \varphi \leq \frac{\varphi_{ВП}}{2} + \varphi_B + \frac{2\pi}{z}k, & k = 0 \dots (z-1); \\ \frac{D}{2}, & \frac{\varphi_{ВП}}{2} + \varphi_B + \frac{2\pi}{z}k \leq \varphi \leq \frac{\varphi_{ВП}}{2} + \varphi_B + \varphi_B + \frac{2\pi}{z}k, & k = 0 \dots (z-1); \\ \frac{b}{2 \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{z}(1+2k)\right)}, & \frac{\varphi_{ВП}}{2} + \varphi_B + \varphi_B + \frac{2\pi}{z}k \leq \varphi \leq \frac{\varphi_{ВП}}{2} + 2\varphi_B + \varphi_B + \frac{2\pi}{z}k, & k = 0 \dots (z-1). \end{cases} \quad (42)$$

Используя данную функцию, можно построить любой стандартный прямоугольный шлицевый профиль.

Далее, рассматривая идеальный случай формообразования, привяжем к системе координат  $O_zXYZ$  функцию профиля заготовки – окружность, а к системе коор-

динат  $O_\phi XYZ$  – функцию шлицевого профиля, при этом шлицевый профиль получает смещение по оси  $X$  на величину установки  $a$  (рис. 3). В результате чего, в идеальном случае, шлицевый профиль и профиль заготовки концентричны.

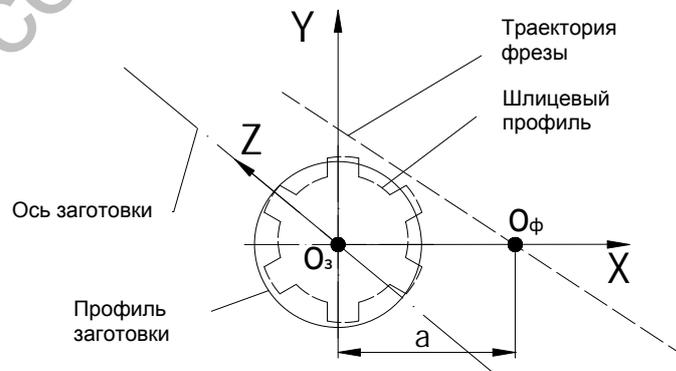


Рис. 3. Расположения идеальных профилей заготовки и шлицевого вала в системе отсчёта

Таким образом, получена система отсчёта вышеизложенных погрешностей технологической системы, которые вызывают погрешность формообразования шлицевого профиля и приводят к погрешностям изготовления шлицевого вала.

Далее сначала определим, как влияет каждая отдельная и все в совокупности погрешности фрезы и заготовки на погрешность формообразования шлицевого профиля, а затем на погрешности изготовления шлицевого вала.

1.  $\Delta_{НРФ}$  – упругая деформация инструмента в направлении действия силы  $P_{рф}$  вызовет увеличение диаметра впадин шлицевого профиля. Влияние упругой деформации инструмента в направлении действия силы  $P_0$  незначительно в силу малости изменения собственной величины на всей длине нарезаемого вала и характера кинематики процесса шлицефрезерования.

2.  $\Delta_{ВГО}$ ,  $\Delta_{НГО}$  – деформация верхнего и нижнего посадочных гнёзд инструментальной оправки в направлении действия силы  $P_0$  приведут к изменению угла установки фрезы  $\varpi$  на величину

$$\gamma_{ГО} = \arctg \frac{\Delta_{ВГО} - \Delta_{НГО}}{L_{и}}, \quad (43)$$

что в итоге приведёт к изменению ширины формируемых шлица и впадины в  $\cos \gamma_{СО}$  раз и как результат к изменению окружного шага шлицев и появлению спиральности шлицевой поверхности.

$\Delta_{ВГРФ}$ ,  $\Delta_{НГРФ}$  – деформация верхнего и нижнего посадочных гнёзд инструментальной оправки в направлении действия сил  $P_{рф}$  приведет к изменению расстояния а между осью заготовки и траекторией фиксированной точки червячной фрезы, что приведёт к увеличению диаметра впадин шлицевого профиля на величину

$$\Delta_{ГРФ} = \Delta_{ВГРФ} + \Delta_{НГРФ}. \quad (44)$$

3.  $\Delta_{СИОЛ}$  – смещение осей посадочных гнёзд инструментальной оправки в направлении действия силы  $P_0$  вызовет изменение угла установки фрезы  $\varpi$  на величину

$$\gamma_{СО} = \arctg \frac{\Delta_{СИОЛ}}{L_{и}}, \quad (45)$$

что в итоге также приведёт к изменению ширины формируемых шлица и впадины в  $\cos \gamma_{СО}$  раз и как результат к изменению окружного шага шлицев и появлению спиральности шлицевой поверхности.

$\Delta_{СИРФЛ}$  – смещение осей посадочных гнёзд инструментальной оправки в направлении действия силы  $P_{рф}$  вызовет изменение диаметра впадин шлицевого профиля на величину  $\Delta_{СИРФЛ}$ .

4.  $\Delta_{ЗУ}$  – упругая деформация заготовки по оси  $u$  приведёт к увеличению диаметра впадин шлицевого профиля на величину  $2\Delta_{ЗУ}$ .  $\Delta_{ЗХ}$  – упругая деформация заготовки по оси  $x$  не приведёт к существенным погрешностям формообразования, поскольку при возникновении данной погрешности изменится только угловая координата начала формообразования, а сам процесс формообразования в силу своей кинематики пройдёт без каких-либо отклонений.

5.  $\Delta_{ШБУ}$  – деформация шпиндельного узла и задней бабки по оси  $u$  вызовет увеличение диаметра впадин шлицевого профиля на величину  $2\Delta_{ШБУ}$ .  $\Delta_{ШБХ}$  – деформация шпиндельного узла и задней бабки по оси  $x$  не приведёт к существенным погрешностям формообразования, поскольку характер действия данной погрешности аналогичен  $\Delta_{ЗХ}$  (п. 4).

6.  $\Delta_{СМ}$  – смещение центровых отверстий заготовки вызовет эксцентриситет диаметра впадин шлицевого профиля относительно диаметра выступов.

7.  $\Delta_0$  – овальность заготовки сохранится как овальность диаметра выступов шлицевого профиля.

$\Delta_k$  – конусность заготовки вызовет конусность диаметра впадин шлицевого профиля.

8.  $\Delta_{свхЛ}$  – смещение оси задней бабки по оси  $y$  приведёт к изменению диаметра впадин шлицевого профиля на величину  $2\Delta_{свхЛ}$ .

$\Delta_{свхЛ}$  – смещение оси задней бабки по оси  $x$  не приведёт к существенным погрешностям формообразования.

9.  $\Delta_{Rz}$  – исходная шероховатость заготовки вызовет изменение высоты нарезаемого шлица  $h$  и в итоге повлияет

на величины всех сил и погрешностей.

Таким образом, в модели учтены наиболее значимые погрешности технологической системы фрезерования шлицевой поверхности червячной фрезой.

На основании представленной выше математической модели в среде программирования VBA разработана программа, определяющая точность шлицевого вала при изготовлении его червячной фрезой. Вид диалогового окна представлен на рис. 4.

Рис. 4. Диалоговое окно программы для прогнозирования точности деталей при фрезеровании шлицев червячной фрезой

Исходными данными программы являются параметры шлицевого профиля, параметры заготовки, данные по инструменту и станку, режимы резания, кроме того, предусмотрена возможность задания различных порядков расчета, позволяющих проводить расчёт в одном сечении или их наборе по длине образца с различной точностью.

После ввода исходных данных и проведения расчета программа в виде

таблицы на листе Excel записывает координаты точек любого одного или набора профилей по длине образца в цилиндрической и декартовой системах координат. На основе полученных координат можно построить графики любого профиля продольного и поперечного сечений образца и его заготовки, определить отклонение от симметричности боковых сторон, отклонение от параллельности боковых сторон, по-

грешность толщины шлица, радиальное биение окружности впадин, радиальное биение окружности выступов, погрешность профиля продольного сечения по окружности впадин, погрешность профиля продольного сечения по окружности выступов.

Программа может также выполнить визуализацию обработанной поверхности путём построения трёхмерного изображения её образующих по программе, написанной на языке VBA в среде AutoCAD. Затем можно передать полученное изображение в среду трёхмерного проектирования SolidWorks для создания модели шлицевого вала и анализа его методом конечных элементов.

Представленная методика может быть интегрирована или использована в других, подобных по области применения методиках. Например, совместно с математической моделью определения собираемости разработанная программа позволяет установить статическую и динамическую собираемости шлицевого вала с отверстием. Такой подход в комплексе поэтапно решает задачу производства качественной продукции, начиная от получения отдельных деталей необходимого и

достаточного качества, заканчивая получением их сборки максимально возможного качества.

Результаты математического прогнозирования точности механической обработки шлицевого вала на шлицефрезерном станке дают ясное представление о деформациях в технологической системе и их влиянии на параметры точности детали. Использование такой модели совместно со средствами автоматизации проведения расчётов и проектирования позволяет существенно сократить экспериментальные исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Филатов, В. П.** Жесткость зуборезных станков / В. П. Филатов. – М. : Машиностроение, 1969. – 120 с.
2. Справочник нормировщика-машиностроителя. – М., 1961. – Т. 2. – 465 с.
3. **Филоненко, С. Н.** Резание металлов / С. Н. Филоненко. – Киев : Вища шк., 1969. – 212 с.
4. **Феодосьев, В. И.** Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М. : Наука, 1979. – 560 с.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 09.11.2007

**K. A. Shalyzhyn, A. A. Zholobov**  
**Forecasting of slit milling accuracy**  
**by the worm mill**  
Belarusian-Russian University

The technique of definition of elementary errors of a slit shaft at presence of errors and deformations of elements of technological system of slit milling is presented in the article. Ways of definition of geometrical parameters of a slit structure are described. Base elements of technological system in view of which readout of errors is made are established. The program realizing algorithm of the specified technique is presented. The area of its practical application is considered.