

ТЭХНАЛОГІЯ МАШЫНАБУДАВАННЯ

УДК 621.81.002.73.001.24

М. Ф. ПАШКЕВИЧ**РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ УСТАНОВКИ ДЕТАЛЕЙ
НА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ**

Погрешности обработанных деталей в значительной мере определяются погрешностями установки заготовок на станках, которые в свою очередь включают погрешности базирования и закрепления, а также погрешности, связанные с неточностями и износом приспособления и его неточной установкой на станке. На практике приходится вести расчет погрешностей установки всякий раз, когда разрабатывается технологический процесс обработки детали или проектируется станочное приспособление.

Задача расчета погрешностей установки решена и методика этого расчета изложена в [1, 2]. Однако последняя связана со значительными трудностями, обусловленными идентификацией баз, составлением матрицы нормальных координат опорных точек и матрицы налагаемых связей для приведения любой реальной схемы установки заготовки к теоретической схеме базирования с шестью опорными точками.

Ранее мы показали [3], что многих трудностей в существующей теории базирования можно избежать, если отказаться от теоретических схем базирования и правила шести точек. Оказалось, что при этом можно существенно упростить и расчет погрешностей установки заготовок. Ниже приведем предлагаемую методику.

На основе анализа положений теории базирования было сформулировано два основных принципа базирования, т. е. придания заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат:

для обеспечения полной ориентации (полного базирования) заготовки или изделия в выбранной системе координат необходимо придать соответствующую ориентацию системе координат технологических баз заготовки или изделия в шести направлениях — вдоль и вокруг трех координатных осей, — что достигается либо с помощью специальных опорных устройств, либо выверкой;

для достижения требуемой точности обработки на данной операции при базировании и закреплении необходимо ориентировать заготовку с соответствующей точностью лишь в направлениях выполняемых размеров и направлениях, определяющих расположение обрабатываемых поверхностей, в то время как в других направлениях строгой ориентации положения заготовки может не быть (неполное базирование).

Рассмотрим базирование заготовок непосредственно на столе станка с позиции сформулированных принципов. Свяжем с деталью систему координат $X_1 Y_1 Z_1$. Ее положение в системе координат $X_0 Y_0 Z_0$, связанной со станком, определяется шестью независимыми координатами — X_0 , Y_0 и Z_0 — координатами ее начала и α , β , γ — углами последовательных поворотов системы координат $X_0 Y_0 Z_0$ вокруг оси X_0 , нового положения оси Y_0 , а затем вокруг нового положения оси Z_0 соответственно, переводящими систему координат $X_0 Y_0 Z_0$ в $X_1 Y_1 Z_1$. Таким образом, в общем случае положение детали может быть определено вектором смещения $\mathbf{r}(X_0, Y_0, Z_0)$ и вектором относительного поворота $\varphi(\alpha, \beta, \gamma)$.

На рис. 1 представлен пример базирования. Система $X_1 Y_1 Z_1$, связанная с призматической деталью, изображена повернутой относительно оси X_0 на угол α в положительном направлении (против часовой стрелки, если смотреть с конца оси X_0). В данном случае $\mathbf{r}(0, Y_0, Z_0)$, $\varphi(\alpha, 0, 0)$. Если значения координат вектора $\mathbf{r}$ известны, а также задано значение угла α , то всегда можно определить координаты любой точки детали в системе координат $X_0 Y_0 Z_0$ по ее координатам в системе $X_1 Y_1 Z_1$ и наоборот. Для этого требуется располагать направляющими ко-

синусами осей координат одной системы в другой, т. е. матрицей преобразования пространства, состоящего в его повороте на угол α вокруг оси X_0 в положительном направлении. Такая матрица выглядит так:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix}. \quad (1)$$

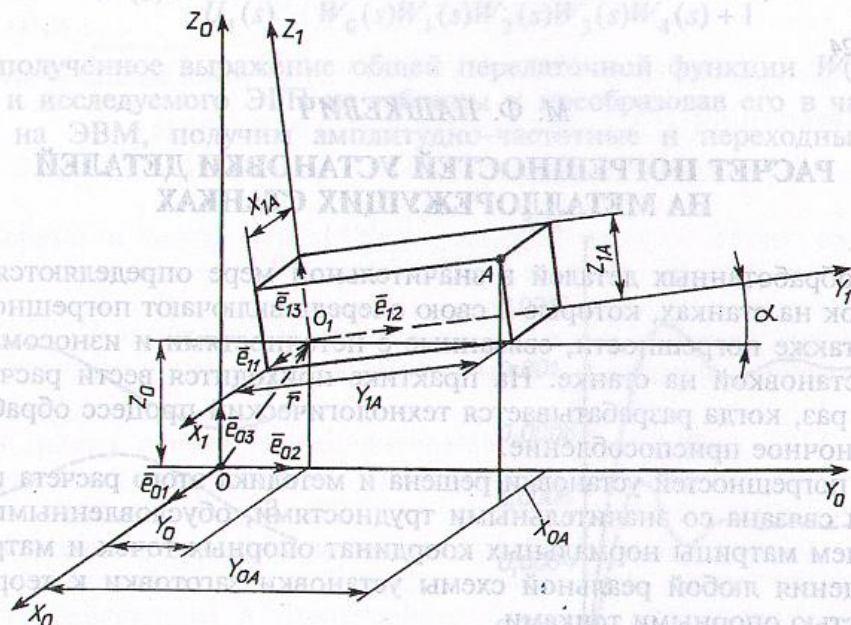


Рис. 1. Базирование призматической детали на станке: $X_0Y_0Z_0$ — система координат станка; $X_1Y_1Z_1$ — система координат основных технологических баз детали

Строки матрицы A составлены из направляющих косинусов единичных векторов e_{11} , e_{12} , e_{13} осей координат X_1 , Y_1 и Z_1 соответственно в системе координат $X_0Y_0Z_0$, а столбцы этой матрицы представляют собой направляющие косинусы ортов e_{01} , e_{02} и e_{03} осей координат X_0 , Y_0 и Z_0 соответственно в системе координат $X_1Y_1Z_1$.

Пусть, например, известны координаты некоторой точки A в системе $X_0Y_0Z_0$, т. е. $A(X_{0A}, Y_{0A}, Z_{0A})$. Тогда в системе координат $X_1Y_1Z_1$ координаты этой точки X_{1A} , Y_{1A} и Z_{1A} можно определить, умножив координаты X_{0A} , Y_{0A} и Z_{0A} на элементы матрицы A , расположенные в соответствующих строках. С учетом координат начала X_0 , Y_0 , Z_0 получим

$$X_{1A} = (X_{0A} - X_0)a_{11} + (Y_{0A} - Y_0)a_{12} + (Z_{0A} - Z_0)a_{13}, \quad (2)$$

$$Y_{1A} = (X_{0A} - X_0)a_{21} + (Y_{0A} - Y_0)a_{22} + (Z_{0A} - Z_0)a_{23}, \quad (3)$$

$$Z_{1A} = (X_{0A} - X_0)a_{31} + (Y_{0A} - Y_0)a_{32} + (Z_{0A} - Z_0)a_{33}, \quad (4)$$

или, используя более короткую запись:

$$\begin{vmatrix} X_{1A} \\ Y_{1A} \\ Z_{1A} \end{vmatrix} = A \begin{vmatrix} X_{0A} - X_0 \\ Y_{0A} - Y_0 \\ Z_{0A} - Z_0 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Если же требуется определить координаты X_{0A} , Y_{0A} и Z_{0A} точки A в системе координат $X_0Y_0Z_0$ по ее координатам X_{1A} , Y_{1A} и Z_{1A} , то в этом случае следует производить вычисления по формулам:

$$X_{0A} = X_{1A}a_{11} + Y_{1A}a_{21} + Z_{1A}a_{31} + X_0, \quad (6)$$

$$Y_{0A} = X_{1A}a_{12} + Y_{1A}a_{22} + Z_{1A}a_{32} + Y_0, \quad (7)$$

$$Z_{0A} = X_{1A}a_{13} + Y_{1A}a_{23} + Z_{1A}a_{33} + Z_0, \quad (8)$$

или в сокращенной записи:

$$\begin{bmatrix} X_{0A} \\ Y_{0A} \\ Z_{0A} \end{bmatrix} = A^T \begin{bmatrix} X_{1A} \\ Y_{1A} \\ Z_{1A} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где A^T — транспонированная матрица преобразования, которая получена из матрицы A путем замены в ней строк столбцами, т. е.

$$A^T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

В том случае, когда имеют место последовательные повороты на углы α , β и γ , матрица K результирующего преобразования может быть представлена произведением матриц, описывающих эти повороты:

$$K = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ -\cos \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \\ \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Эта матрица позволяет определить координаты любой точки A детали при любом способе ее базирования по уравнениям (5) или (9), в которые вместо матриц A и A^T подставляется матрица K или транспонированная K^T , в зависимости от того, в какой системе координат производятся вычисления.

Таким образом, в самом общем случае любая схема базирования заготовки на станке может быть описана вектором смещения начала системы координат технологических баз заготовки $r(X_0, Y_0, Z_0)$ и матрицей ее поворотов K . Если бы координаты вектора смещения и элементы матрицы поворотов оставались неизменными при обработке партии деталей, а измерительные и технологические базы в направлении выполняемых размеров были совмещены, то погрешность установки отсутствовала бы. В действительности при обработке деталей координаты X_0, Y_0, Z_0 , а также значения углов α, β и γ в силу самых разных причин изменяются на некоторую величину. Колебания этих параметров установки ведут к появлению погрешностей обработки, причем на отклонение размеров в направлении какой-либо оси влияют не только колебания смещения в направлении этой оси, но и повороты вокруг других осей.

Погрешности обработки для любой схемы установки детали также могут быть рассчитаны в соответствии с приведенной методикой. Покажем это на примере расчета погрешности установки.

Установка — это совокупность базирования и закрепления, состоящая в совмещении системы координат $X_1 Y_1 Z_1$ основных технологических баз детали с системой координат $X_{11} Y_{11} Z_{11}$ вспомогательных баз приспособления, а также системы координат основных баз приспособления XYZ с системой координат $X_0 Y_0 Z_0$ вспомогательных баз станка [1, 2]. Последняя обычно связана с направлениями рабочих движений инструмента.

Погрешность установки определяется смещениями и поворотами координатной системы $X_1 Y_1 Z_1$ относительно системы $X_0 Y_0 Z_0$. Если установка осуществляется на столе станка без приспособления, то рассматриваются смещения и повороты системы $X_1 Y_1 Z_1$ в системе $X_0 Y_0 Z_0$ непосредственно. Если же установка производится в приспособлении, то смещения и повороты системы координат детали $X_1 Y_1 Z_1$ в системе координат станка $X_0 Y_0 Z_0$ определяются суммой смещений и поворотов координатной системы XYZ приспособления в координатной системе $X_0 Y_0 Z_0$ станка и системы координат детали $X_1 Y_1 Z_1$ в системе координат приспособления XYZ . В этом наиболее общем случае погрешность установки определяется вектором $\epsilon_{дс}$ смещений и вектором $\sigma(\varphi, \psi, \theta)$ поворотов. При этом вектор смещений можно представить векторной суммой, т. е.

$$\epsilon_{дс} = \epsilon_{пс} + \epsilon_{дп}, \quad (12)$$

где $\epsilon_{дс}(\epsilon_{дс0}, \epsilon_{дс1}, \epsilon_{дс2})$ — вектор смещений детали относительно системы координат станка; $\epsilon_{пс}(\epsilon_{пс0}, \epsilon_{пс1}, \epsilon_{пс2})$ — вектор смещений приспособления относительно системы координат

станка; $\varepsilon_{дл}(\varepsilon_{дх}, \varepsilon_{ду}, \varepsilon_{дз})$ — вектор смещений детали относительно системы координат приспособления.

Векторное уравнение (12) можно представить в координатной форме:

$$\varepsilon_{дх0} = \varepsilon_{пх0} + \varepsilon_{дх}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_{ду0} = \varepsilon_{пу0} + \varepsilon_{ду}, \quad (14)$$

$$\varepsilon_{дз0} = \varepsilon_{пз0} + \varepsilon_{дз}. \quad (15)$$

Каждое из слагаемых $\varepsilon_{дх}$, $\varepsilon_{ду}$ и $\varepsilon_{дз}$ в уравнениях (13)—(15) состоит из суммы погрешности базирования, обусловленной несовпадением технологической и измерительной баз детали, и погрешности закрепления, связанной с относительным смещением технологической и измерительной баз в направлении выполняемого размера под действием сил закрепления [4]. Погрешности, связанные с установкой приспособления (первые слагаемые уравнений), чаще всего могут быть скомпенсированы настройкой, однако в каждом конкретном случае их влияние на точность выполняемого размера должно рассматриваться отдельно.

Если координатная система $X_1 Y_1 Z_1$ не только смещена, но и повернута относительно системы $X_0 Y_0 Z_0$, то погрешности размеров детали, обусловленные погрешностями ее установки относительно осей X_0 , Y_0 и Z_0 , могут быть определены по формулам, аналогичным (5):

$$\begin{pmatrix} \Delta_{x1} \\ \Delta_{y1} \\ \Delta_{z1} \end{pmatrix} = \pi \begin{pmatrix} \varepsilon_{дх0} \\ \varepsilon_{ду0} \\ \varepsilon_{дз0} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

где π — матрица преобразования пространства, состоящего в его последовательных поворотах на углы φ , ψ и θ вокруг координатных осей X_0 , Y_0 и Z_0 соответственно.

Углы поворота φ , ψ и θ определяются на основе погрешностей формы и расположения поверхностей детали и приспособления, использующихся в качестве технологических баз на рассматриваемой операции.

Матрица π имеет такой же вид, что и матрица K , т. е.

$$\pi = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \varphi \sin \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta & -\cos \varphi \sin \psi \cos \theta + \sin \varphi \sin \theta \\ -\cos \psi \sin \theta & -\sin \varphi \sin \psi \sin \theta + \cos \varphi \cos \theta & \cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \sin \varphi \cos \theta \\ \sin \psi & -\sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \cos \psi \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Однако матрица π в отличие от матрицы K характеризуется малыми значениями углов поворота. Известно, что для малых углов τ $\cos \tau = 1$, $\sin \tau = \tau$. Поэтому, исключая из матрицы малые высших порядков (произведения синусов), получаем

$$\pi = \begin{pmatrix} 1 & \theta & -\psi \\ -\theta & 1 & \varphi \\ \psi & -\varphi & 1 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Подставив в (16) матрицу (18) и выполнив формальные преобразования, получим формулы для расчета погрешностей установки в направлениях осей X_1 , Y_1 и Z_1 :

$$\Delta_{x1} = \varepsilon_{дх0} + \varepsilon_{ду0}\theta - \varepsilon_{дз0}\psi, \quad (19)$$

$$\Delta_{y1} = \varepsilon_{ду0} - \varepsilon_{дх0}\theta + \varepsilon_{дз0}\varphi, \quad (20)$$

$$\Delta_{z1} = \varepsilon_{дз0} + \varepsilon_{дх0}\psi - \varepsilon_{ду0}\varphi. \quad (21)$$

Можно также решить и обратную задачу. Если, например, известны погрешности размеров детали в направлении осей X_1 , Y_1 и Z_1 , а также погрешности углового расположения детали относительно системы координат станка, то можно определить допустимые величины смещений детали при ее установке в направлениях X_0 , Y_0 и Z_0 , при которых достигается заданная точность обработки. Расчет этих смещений следует производить по формулам, аналогичным (6)—(8), т. е.

$$\varepsilon_{дх0} = \Delta_{x1} - \Delta_{y1}\theta + \Delta_{z1}\psi, \quad (22)$$

$$\varepsilon_{ду0} = \Delta_{y1} + \Delta_{x1}\theta - \Delta_{z1}\varphi, \quad (23)$$

$$\varepsilon_{dz0} = \Delta_{z1} - \Delta_{x1}\psi + \Delta_{y1}\varphi. \quad (24)$$

Несколько усложняется решение задачи определения погрешностей установки, когда ведется обработка поверхностей детали, расположенных под углом к ее основным технологическим базам. В этом случае в соответствии с изложенным порядком вначале ведется расчет погрешностей установки детали относительно вспомогательных баз приспособления, с которыми совмещаются основные базы детали. Иными словами, вначале определяются смещения и повороты системы координат $X_1Y_1Z_1$ основных баз детали относительно системы координат $X_{11}Y_{11}Z_{11}$ вспомогательных баз приспособления, т.е. определяются составляющие вектора смещения ε_{dx1} , ε_{dy1} , ε_{dz1} и углы поворота φ_1 , ψ_1 , θ_1 , по которым можно найти смещения в направлениях осей X_{11} , Y_{11} , Z_{11} . По аналогии с (19)–(21) они равны:

$$\Delta_{x11} = \varepsilon_{dx1} + \varepsilon_{dy1}\theta_1 - \varepsilon_{dz1}\psi_1, \quad (25)$$

$$\Delta_{y11} = \varepsilon_{dy1} - \varepsilon_{dx1}\theta_1 + \varepsilon_{dz1}\varphi_1, \quad (26)$$

$$\Delta_{z11} = \varepsilon_{dz1} + \varepsilon_{dx1}\psi_1 - \varepsilon_{dy1}\varphi_1. \quad (27)$$

По найденным значениям Δ_{x11} , Δ_{y11} , Δ_{z11} определяются смещения детали относительно системы координат XYZ основных баз приспособления. При этом используется соответствующая матрица поворотов (в самом общем случае — матрица K). По аналогии с (9)

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{dx} \\ \varepsilon_{dy} \\ \varepsilon_{dz} \end{pmatrix} = K^T \begin{pmatrix} \Delta_{x11} \\ \Delta_{y11} \\ \Delta_{z11} \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Затем определяются смещения приспособления относительно системы координат станка. Сумма их в соответствии с (13)–(15) с найденными по формулам (28) смещениями детали определяет совместно с поворотами погрешности установки.

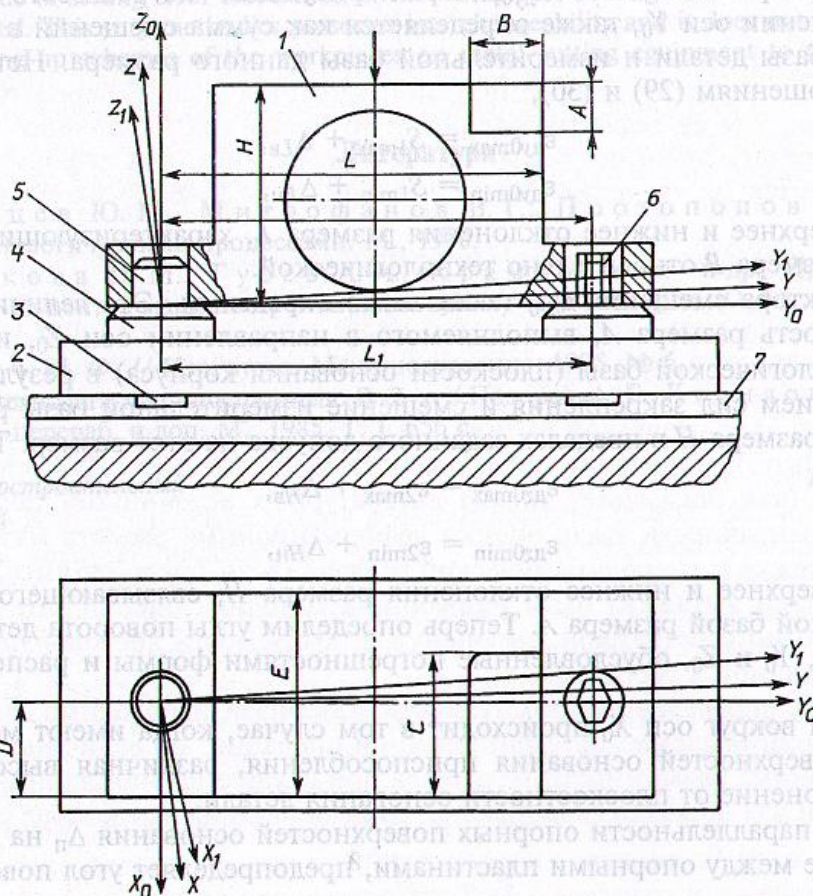


Рис. 2. Схема для расчета погрешностей установки при базировании корпусной детали по плоскости и двум отверстиям: 1 — деталь; 2 — основание приспособления; 3 — направляющая шпонка; 4 — опорная пластина; 5 — палец цилиндрический; 6 — палец срезанный; 7 — стол станка

Рассмотрим применение данной методики при расчете погрешностей установки корпусной детали (рис. 2). Деталь установлена в приспособлении, базирование осуществляется по плоскости основания и двум отверстиям при помощи цилиндрического и срезанного пальцев. Производится фрезерование уступа в размеры A , B и C . Требуется определить погрешности установки для выполняемых размеров.

Выберем три системы координат: $X_0Y_0Z_0$, связанную со станком, $X_1Y_1Z_1$, связанную с основными технологическими базами детали, и XYZ , связанную с вспомогательными базами приспособления.

При базировании детали по плоскости и двум отверстиям на точность ее установки влияют точность диаметральных размеров базовых отверстий и пальцев; точность расположения и геометрической формы базовых поверхностей; точность установки приспособления на столе станка и другие параметры.

Найдем смещения детали в положительных направлениях осей X_0 , Y_0 и Z_0 и ее повороты вокруг этих осей, обусловленные точностными характеристиками базирующих поверхностей, т. е. найдем координаты вектора смещения $\epsilon_{дс}$ и вектора относительных поворотов σ .

Координата вектора смещения $\epsilon_{дх0}$, характеризующая вместе с поворотами погрешность размера C , измеренного в направлении оси X_0 , определяется как сумма смещений в этом направлении технологической базы детали (оси базового отверстия) и измерительной базы данного размера. При этом наибольшее смещение $\epsilon_{дх0\max}$ определяется суммой наибольших зазоров между шпонкой приспособления и пазом стола $S_{\max}$, между цилиндрическим пальцем и базирующим отверстием $S_{1\max}$ и верхним предельным отклонением $\Delta_{ДВ}$ расстояния D от центра отверстия до измерительной базы размера C , т. е.

$$\epsilon_{дх0\max} = S_{\max} + S_{1\max} + \Delta_{ДВ}. \quad (29)$$

Наименьшее смещение определяется суммой минимальных зазоров и нижнего предельного отклонения $\Delta_{ДН}$ размера D :

$$\epsilon_{дх0\min} = S_{\min} + S_{1\min} + \Delta_{ДН}. \quad (30)$$

Координата вектора смещения $\epsilon_{дх0}$, характеризующая погрешность размера B , выполняемого в направлении оси Y_0 , также определяется как сумма смещений в этом направлении технологической базы детали и измерительной базы данного размера. Нетрудно видеть, что аналогично соотношениям (29) и (30),

$$\epsilon_{дх0\max} = S_{1\max} + \Delta_{ЛВ}, \quad (31)$$

$$\epsilon_{дх0\min} = S_{1\min} + \Delta_{ЛН}, \quad (32)$$

где $\Delta_{ЛВ}$ и $\Delta_{ЛН}$ — верхнее и нижнее отклонения размера L , характеризующие смещение измерительной базы размера B относительно технологической.

Координату вектора смещения $\epsilon_{дх0}$ также легко определить. Эта величина будет характеризовать погрешность размера A , выполняемого в направлении оси Z_0 , и включать в себя смещение ϵ_3 технологической базы (плоскости основания корпуса) в результате деформации стыков под действием сил закрепления и смещение измерительной базы размера A , связанное с колебанием размера H в пределах заданного допуска на этот размер. Таким образом,

$$\epsilon_{дх0\max} = \epsilon_{2\max} + \Delta_{НВ}, \quad (33)$$

$$\epsilon_{дх0\min} = \epsilon_{2\min} + \Delta_{НН}, \quad (34)$$

где $\Delta_{НВ}$ и $\Delta_{НН}$ — верхнее и нижнее отклонения размера H , связывающего технологическую базу с измерительной базой размера A . Теперь определим углы поворота детали относительно осей координат X_0 , Y_0 и Z_0 , обусловленные погрешностями формы и расположения базовых поверхностей.

Поворот детали вокруг оси X_0 происходит в том случае, когда имеют место непараллельность опорных поверхностей основания приспособления, различная высота опорных пластин, а также отклонение от плоскостности основания детали.

Отклонение от параллельности опорных поверхностей основания $\Delta_{п}$ на длине L_1 , определяющей расстояние между опорными пластинами, предопределяет угол поворота

$$\phi_1 = \arctg (\Delta_{п}/L_1), \quad (35)$$

изменение высоты двух опорных пластин в пределах допуска $T_{п}$ дает на длине L_1 угол поворота

$$\varphi_2 = \arctg (T_n/L_1), \quad (36)$$

а отклонение от плоскостности основания детали Δ_d на длине L_1 дает угол

$$\varphi_3 = \arctg (\Delta_d/L_1), \quad (37)$$

Если направления поворотов совпали (самый неблагоприятный случай), то результирующий угол поворота будет определяться суммой:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3. \quad (38)$$

Поворот детали вокруг оси Y_0 происходит тогда, когда основание приспособления имеет непараллельность плоскостей Δ_n в направлении X_0 , опорные пластины также имеют отклонения Δ_0 от параллельности оснований, а основание детали имеет отклонение от плоскостности Δ_d также в этом направлении. При одинаковых направлениях поворотов результирующий угол поворота φ , отнесенный к ширине детали E , можно определить по соотношению

$$\varphi = \arctg ((\Delta_n + \Delta_0 + \Delta_d)/E), \quad (39)$$

Угол поворота детали θ вокруг оси Z_0 имеет место в том случае, когда существуют зазоры S_1 между базовыми отверстиями и пальцами, S между направляющими шпонками приспособления и пазом стола станка, а также непараллельность Δ в плоскости X_0Y_0 оси симметрии шпонок и линии, соединяющей оси установочных пальцев. Нетрудно видеть, что его наибольшее значение можно определить по зависимости

$$\theta = \arctg ((S_{1\max} + S_{\max} + \Delta)/L_1). \quad (40)$$

После определения координат вектора смещения детали и составляющих φ , ψ , θ вектора относительного поворота можно рассчитать погрешности установки детали в направлении любой координатной оси по формулам (15)—(21) и (22)—(24).

Summary

The new technique of setting error calculation of the workpieces during their machining with metal-cutting tools has been reported. This very methodics possesses interchangeability and it does not demand for conformation of the real setting-up schemes of the workpieces on metal-cutting equipment to the theoretical locating charts.

Литература

1. Соломенцев Ю. М., Митрофанов В. Г., Протопопов С. П. и др. Адаптивное управление технологическими процессами. М., 1980.
2. Баранчукова И. М., Гусев А. А., Крамаренко и др. Проектирование технологии: Учебник для студентов машиностроительных вузов / Под общ. ред. Ю. М. Соломенцева. М., 1990.
3. Пашкевич М. Ф. // Изв. вузов. Машиностроение. 1995. № 6.
4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М., 1985. Т. 1. 656 с.

Могилевский машиностроительный институт

Поступила в редакцию
18.12.97