

Тема 5. Расчеты погрешностей механической обработки

Расчеты погрешностей механической обработки

Систематические и случайные погрешности

Систематические погрешности – это такие погрешности, которые для всех заготовок рассматриваемой партии остаются постоянными или же закономерно изменяются при переходе от одной обрабатываемой заготовки к следующей. Это постоянные и переменные систематические погрешности.

Причинами возникновения систематических погрешностей являются:

- погрешности станков, их износ и деформации;
- погрешности приспособлений;
- погрешности инструмента, его износ;
- температурные деформации.

Случайные погрешности – это такие погрешности, которые для разных заготовок рассматриваемой партии имеют различные значения, не подчиняющиеся видимым закономерностям.

Причины возникновения случайных погрешностей:

- погрешности базирования, закрепления и положения детали в приспособлении;
- колебания упругих деформаций технологической системы, вызванные колебаниями твердости и припуска;
- погрешности регулировки суппортов, положения инструмента;
- погрешности измерений;
- колебания температурного режима.

Деление погрешностей на систематические и случайные условно. Одна и та же погрешность может в одних условиях обработки деталей рассматриваться как случайная, а в других условиях - как систематическая.

Погрешность установки заготовок на станках и в приспособлениях

Погрешность установки заготовок на станках и в приспособлениях

Погрешность установки ε_y определяется суммой погрешности базирования ε_δ и погрешности закрепления ε_3 : $\varepsilon_y = \varepsilon_\delta + \varepsilon_3$.

Погрешность базирования возникает вследствие погрешностей формы и расположения базовых поверхностей, а также в связи с несовпадением установочной и измерительной баз. Эта погрешность определяется разностью предельных расстояний измерительной базы от режущей кромки установленного на размер инструмента.

Погрешность закрепления возникает вследствие смещения заготовки под действием зажимной силы, прилагаемой для фиксации положения заготовки. Смещение заготовки происходит вследствие деформаций отдельных элементов цепи: заготовка – установочные элементы – корпус приспособления. При обработке плоскостей векторы погрешности базирования и погрешности закрепления можно считать коллинеарными, а поэтому

$$\varepsilon_y = \varepsilon_\delta + \varepsilon_3$$

При обработке тел вращения векторы и могут быть направлены под углом друг к другу. Тогда

$$\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_\delta^2 + \varepsilon_3^2}$$

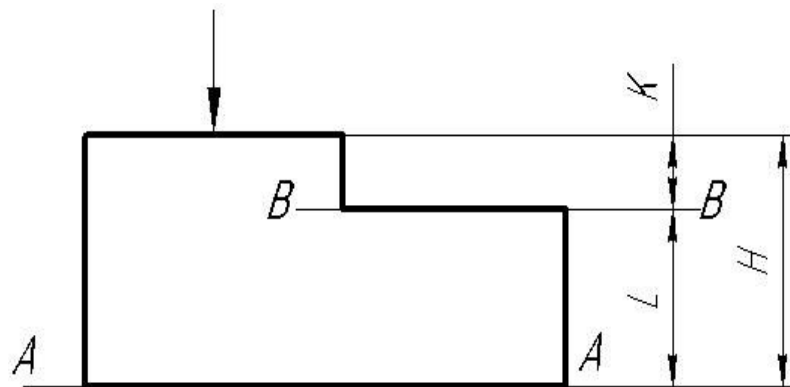
Погрешность установки заготовок на станках и в приспособлениях

Погрешность установки

При обработке на станках, настроенных на размер, при совмещении установочной и измерительной баз погрешностями формы и расположения базовых поверхностей во многих случаях пренебрегают, если их можно считать малыми, и тогда принимают, если измерительная и установочная базы совпадают.

Погрешность базирования отсутствует при обработке методом пробных ходов, так как положение режущей кромки относительно установочной базы регулируют путём взятия пробных стружек и последующих замеров от измерительной базы.

На представленной схеме обработки погрешность базирования по отношению к размеру L можно принять равной нулю, так как измерительная и установочная базы совмещены ($A - A$). По отношению к размеру K погрешность базирования имеет место, так установочная база ($A - A$) и измерительная ($B - B$) не совмещены. Погрешность базирования в этом случае, если не учитывать погрешности формы и расположения базовой поверхности, равна допуску на размер H .



При обработке в приспособлениях в погрешность установки включают не только погрешность базирования и погрешность закрепления, но и погрешность самого приспособления (эту погрешность часто называют погрешностью положения заготовки).

Рассмотренные погрешности, как составные части погрешности установки, являются случайными погрешностями и поэтому их следует суммировать по законам теории вероятностей. Можно считать, что эти погрешности подчиняются закону Гаусса, и тогда

$$\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_\delta^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_n^2}$$

Общая методика расчета погрешности базирования

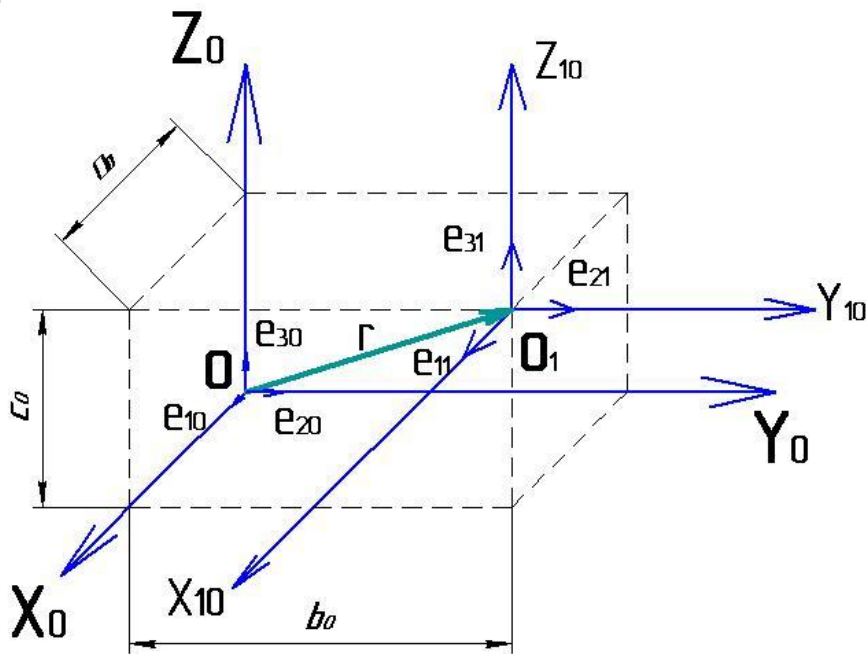
Общая методика расчета погрешности базирования

- Для того чтобы определить погрешность базирования заготовок при их обработке, необходимо оценить влияние смещений и поворотов системы координат технологических баз детали в системе координат станка на фактические величины выполняемых размеров, а также на расположение обрабатываемых поверхностей. Иначе, необходимо уметь определять координаты точек обрабатываемых поверхностей в системе координат станка и системе координат основных баз детали.

Общая методика расчета погрешности базирования

- Будем рассматривать две системы координат:

$X_0 Y_0 Z_0$ - система координат вспомогательных баз станка; $X_1 Y_1 Z_1$ - система координат основных баз детали.



Если значения координат вектора смещения r (a_0, b_0, c_0) известны, т.е. величины a_0, b_0 и c_0 заданы, то всегда можно определить координаты любой точки детали в системе координат станка $X_0 Y_0 Z_0$ по ее координатам в системе $X_1 Y_1 Z_1$ детали и наоборот.

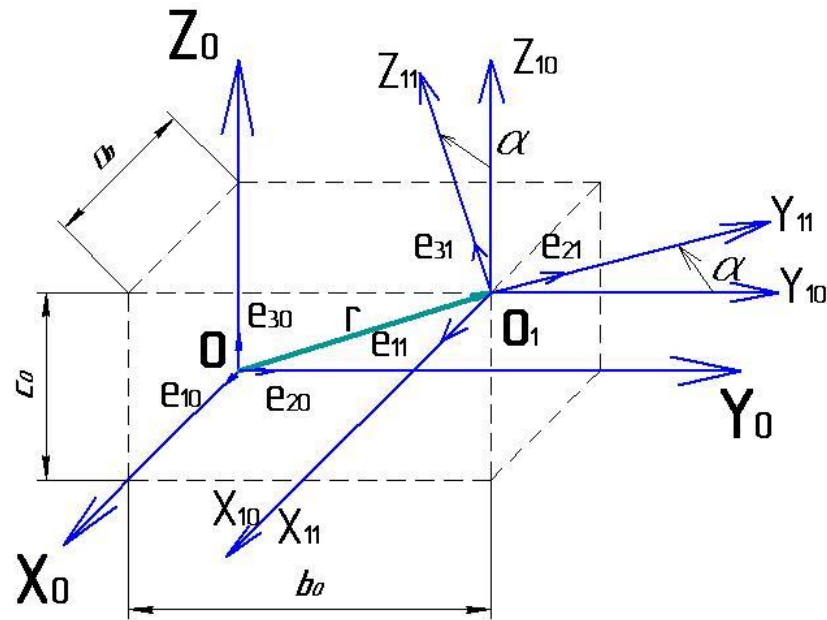
Общая методика расчета погрешности базирования

В общем случае система координат $X_1Y_1Z_1$ детали может быть также повернута относительно системы координат станка $X_0Y_0Z_0$. И если также заданы значения координат вектора поворотов $\phi (\alpha, \beta, \gamma)$, т.е. значения углов α , β и γ , то, как и в случае одних лишь смещений, всегда можно определить координаты любой точки детали в системе координат станка $X_0Y_0Z_0$ по ее координатам в системе $X_1Y_1Z_1$ технологических баз детали и наоборот.

Общая методика расчета погрешности базирования

- Пусть, например угол α задан, $\beta=0$, $\gamma=0$. Если угол α положительный (поворот осуществляется против часовой стрелки, если смотреть с конца оси), то матрица преобразования пространства будет выглядеть так:

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



Общая методика расчета погрешности базирования

- Строки матрицы A составлены из направляющих косинусов единичных векторов (ортов) e_{11} , e_{21} , e_{31} осей координат X_{11} , Y_{11} и Z_{11} в системе координат $X_0 Y_0 Z_0$, а столбцы этой матрицы представляют собой направляющие косинусы ортов e_{10} , e_{20} и e_{30} осей координат X_0 , Y_0 и Z_0 соответственно в системе координат $X_{11} Y_{11} Z_{11}$.
- Пусть, например, известны координаты некоторой точки A в системе $X_0 Y_0 Z_0$, т.е. x_{0A} , y_{0A} , z_{0A} . Тогда в системе координат $X_1 Y_1 Z_1$ 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.

Общая методика расчета погрешности базирования

- С учетом координат начала a_0, b_0, c_0 получим

$$X_{1A} = (X_{0A} - a_0)a_{11} + (Y_{0A} - b_0)a_{12} + (Z_{0A} - c_0)a_{13};$$

$$Y_{1A} = (X_{0A} - a_0)a_{21} + (Y_{0A} - b_0)a_{22} + (Z_{0A} - c_0)a_{23};$$

$$Z_{1A} = (X_{0A} - a_0)a_{31} + (Y_{0A} - b_0)a_{32} + (Z_{0A} - c_0)a_{33}.$$

или, используя более короткую запись,

$$\begin{vmatrix} X_{1A} \\ Y_{1A} \\ Z_{1A} \end{vmatrix} = A \begin{vmatrix} X_{0A} - a_0 \\ Y_{0A} - b_0 \\ Z_{0A} - c_0 \end{vmatrix} . \quad (1)$$

Общая методика расчета погрешности базирования

- 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 проводить вычисления по формулам

$$X_{0A} = X_{1A}a_{11} + Y_{1A}a_{21} + Z_{1A}a_{31} + a_0 ;$$

$$Y_{0A} = X_{1A}a_{12} + Y_{1A}a_{22} + Z_{1A}a_{32} + b_0 ;$$

$$Z_{0A} = X_{1A}a_{13} + Y_{1A}a_{23} + Z_{1A}a_{33} + c_0 ,$$

или, в сокращенной записи,

$$\begin{pmatrix} X_{0A} \\ Y_{0A} \\ Z_{0A} \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} x_{1A} \\ y_{1A} \\ z_{1A} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \\ c_0 \end{pmatrix} , \quad (2)$$

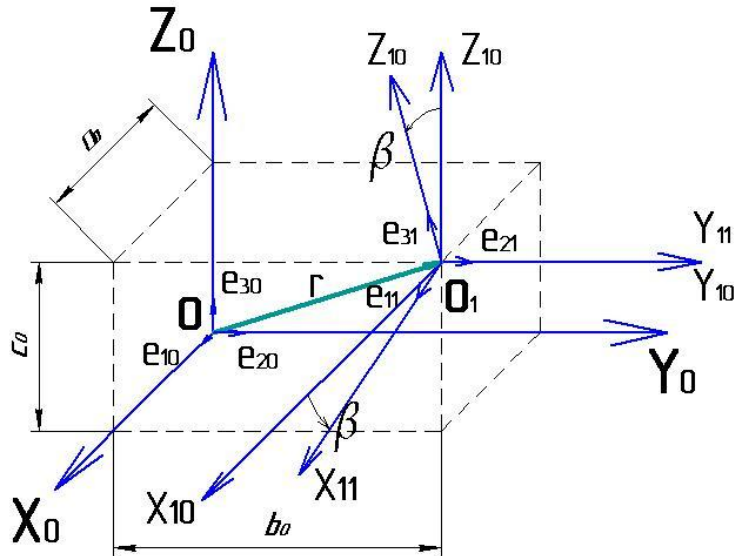
Общая методика расчета погрешности базирования

- A^T -транспонированная матрица преобразования, которая получена из матрицы A путем замены в ней строк столбцами

$$A^T = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{vmatrix}$$

Общая методика расчета погрешности базирования

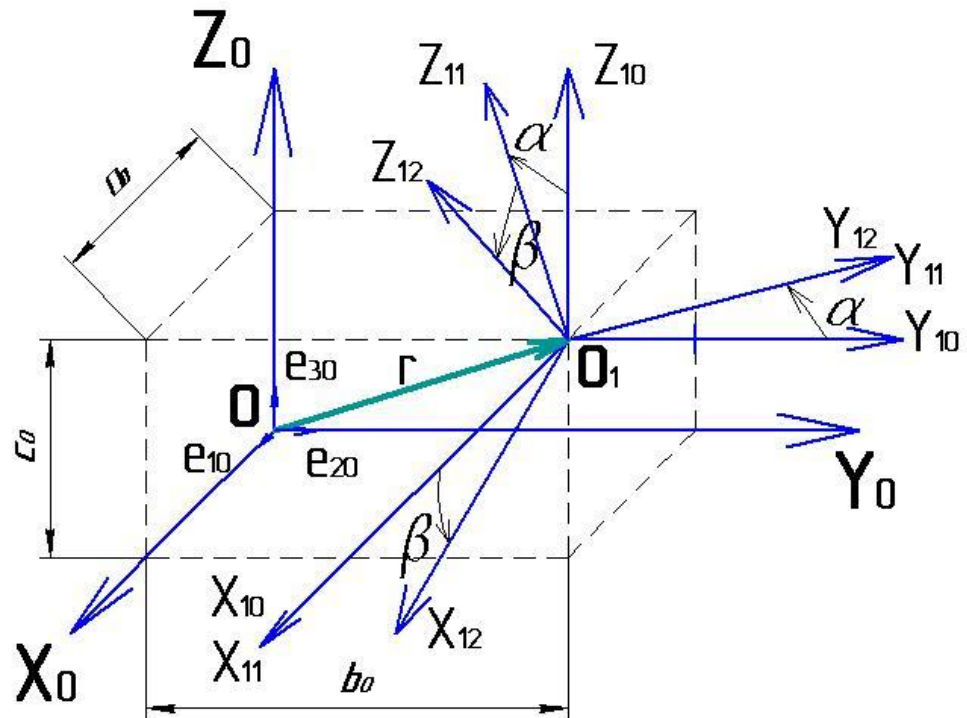
- В том случае, когда система координат $X_1 Y_1 Z_1$ повернута лишь на угол β вокруг оси Y_0 в положительном направлении, т.е. при $\alpha=0$ и $\gamma=0$ матрица B такого преобразования будет выглядеть так:



$$B = \begin{vmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{vmatrix} .$$

Общая методика расчета погрешности базирования

- Если одновременно α и $\beta \neq 0$, а $\gamma = 0$, то матрицу результирующего преобразования пространства, состоящего в его последовательных поворотах на углы α и β , можно получить X_0 перемножением матриц A и B .



Общая методика расчета погрешности базирования

Перемножая матрицы **A** и **B**, получим

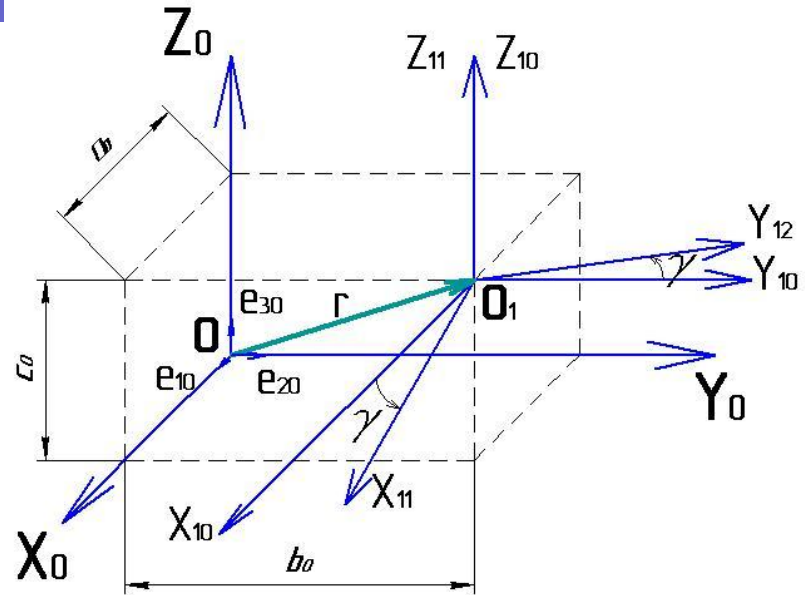
$$L = B \times A = \begin{vmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix}$$

$$L = \begin{vmatrix} \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & -\cos \alpha \sin \beta \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{vmatrix}$$

ОБЩАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ БАЗИРОВАНИЯ

- Если пространство $X_1 Y_1 Z_1$ повернуто лишь на угол γ вокруг оси Z_0 в положительном направлении, а $\alpha=0$ и $\beta=0$, то матрица C будет:

$$C = \begin{vmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$



ОБЩАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ БАЗИРОВАНИЯ

- При последовательных поворотах пространства $X_1 Y_1 Z_1$ на углы β и γ , если $\alpha = 0$, матрица M результирующего преобразования может быть получена перемножением матриц B и C , т.е.

$$M = \begin{vmatrix} \cos\beta \cos\gamma & \sin\gamma & -\sin\beta \cos\gamma \\ -\cos\beta \sin\gamma & \cos\gamma & \sin\beta \sin\gamma \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{vmatrix}$$

Общая методика расчета погрешности базирования

- Если же пространство X_1, Y_1, Z_1 повернуто на углы α и γ , а $\beta = 0$, то матрица N результирующего преобразования может быть получена как произведение матриц A и C :

$$N = \begin{vmatrix} \cos \gamma & \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \gamma \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix}$$

Общая методика расчета погрешности базирования

- В том случае, когда имеют место последовательные повороты на углы α , β и γ , матрица K результирующего преобразования может быть представлена произведением матриц A , B и C , т.е.

$$K = \begin{vmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ -\cos \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \\ \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{vmatrix}.$$

Общая методика расчета погрешности базирования

- Полученные матрицы преобразования пространства позволяют определить координаты любой точки A детали при любом способе ее базирования по уравнениям (1) или (2), в которые вместо матриц A и A^T подставляются соответственно матрицы B, L, M, N, K или транспонированные $B^T, L^T, C^T, M^T, N^T, K^T$, в зависимости от того, в какой системе координат производятся вычисления.

Общая методика расчета погрешности базирования

- Таким образом, можно определить координаты любой точки обрабатываемой поверхности детали в системе координат $X_0Y_0Z_0$ станка по ее координатам в системе координат $X_1Y_1Z_1$ основных баз этой детали и, наоборот, определить координаты любой точки обрабатываемой поверхности детали в системе координат $X_1Y_1Z_1$ по ее координатам в системе $X_0Y_0Z_0$. На базе этого метода определения координат точек детали, разработана универсальная методика расчета погрешностей базирования заготовок.

Общая методика расчета погрешности базирования

- Если базирование осуществляется на столе станка без приспособления, то рассматриваются смещения и повороты системы $X_1Y_1Z_1$ относительно системы $X_0Y_0Z_0$ непосредственно. Если же базирование производится в приспособлении, то смещения и повороты системы координат детали $X_1Y_1Z_1$ в системе координат станка $X_0Y_0Z_0$ определяются суммой смещений и поворотов координатной системы XYZ основных баз приспособления в координатной системе $X_0Y_0Z_0$ вспомогательных баз станка и системы координат основных баз детали $X_1Y_1Z_1$ в системе координат вспомогательных баз приспособления $X_{11}Y_{11}Z_{11}$. В этом наиболее общем случае погрешность базирования детали определяется вектором $\epsilon_{\text{ДС}}$ смещений и вектором σ (ϕ, ψ, θ) поворотов.

ОБЩАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ БАЗИРОВАНИЯ

- При этом вектор смещений можно представить векторной суммой, т.е.

$$\varepsilon_{ДС} = \varepsilon_{ПС} + \varepsilon_{ДП},$$

где $\varepsilon_{ДС}$ ($\varepsilon_{ДХ0}$, $\varepsilon_{ДУ0}$, $\varepsilon_{ДZ0}$) - вектор смещений детали относительно системы координат станка;

$\varepsilon_{ПС}$ ($\varepsilon_{ПХ0}$, $\varepsilon_{ПУ0}$, $\varepsilon_{ПZ0}$) - вектор смещений приспособления относительно системы координат станка;

$\varepsilon_{ДП}$ ($\varepsilon_{ДХ}$, $\varepsilon_{ДУ}$, $\varepsilon_{ДZ}$) - вектор смещений детали относительно системы координат приспособления.

ОБЩАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ БАЗИРОВАНИЯ

- Приведенную векторную сумму можно представить в координатной форме:

- $\varepsilon_{dx0} = \varepsilon_{px0} + \varepsilon_{dx}; \quad \varepsilon_{dz0} = \varepsilon_{pz0} + \varepsilon_{dz};$

- $\varepsilon_{dy0} = \varepsilon_{py0} + \varepsilon_{dy}.$

Каждое из слагаемых ε_{dx} , ε_{dy} , ε_{dz} включает в себя составляющую погрешности базирования, обусловленную несовпадением технологической и измерительной баз детали, а также составляющую этой погрешности, связанную с относительным смещением технологической базы в направлении выполняемого размера в связи с имеющими место погрешностями ее формы.

ОБЩАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ БАЗИРОВАНИЯ

- Если координатная система $X_1Y_1Z_1$ не только смещена, но и повернута относительно системы $X_0Y_0Z_0$, то погрешности размеров детали, обусловленные погрешностями ее базирования относительно осей X_0 , Y_0 и Z_0 , могут быть определены по формулам, аналогичным (1), т. е.

$$\begin{vmatrix} \Delta_{X1} \\ \Delta_{Y1} \\ \Delta_{Z1} \end{vmatrix} = \pi \begin{vmatrix} \varepsilon_{DXO} \\ \varepsilon_{DUO} \\ \varepsilon_{DZO} \end{vmatrix} \quad (3)$$

где π - матрица последовательных поворотов осей на углы φ , ψ и θ вокруг координатных осей X_0 , Y_0 и Z_0 соответственно

Общая методика расчета погрешности базирования

- Углы поворота определяются на основе погрешностей формы и расположения поверхностей заготовки и приспособления, использующихся в качестве технологических баз на рассматриваемой операции.
- Матрица имеет такой же вид, что и приведенная выше матрица K :

$$\pi = \begin{vmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \varphi \sin \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta & -\cos \varphi \sin \psi \cos \theta + \sin \varphi \sin \theta \\ -\cos \psi \sin \theta & -\sin \varphi \sin \psi \sin \theta + \cos \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \sin \varphi \cos \theta \\ \sin \psi & -\sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \cos \psi \end{vmatrix}.$$

Матрица характеризуется малыми значениями углов поворота. Как известно, для малых углов t имеет место соотношения $\cos t = 1$, $\sin t = \operatorname{tg} t = t$. Поэтому, исключая из матрицы малые величины высших порядков малости (произведения синусов), получим

Общая методика расчета погрешности базирования

- Подставив в (3) матрицу π и выполнив преобразования, получим формулы для расчета погрешностей базирования в направлениях осей X_1, Y_1 и Z_1 :

$$\pi = \begin{vmatrix} 1 & \theta & -\psi \\ -\theta & 1 & \varphi \\ \psi & -\varphi & 1 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{X1} = \varepsilon_{DXO} + \varepsilon_{DYO} \theta - \varepsilon_{DZO} \psi$$

$$\Delta_{Y1} = \varepsilon_{DYO} - \varepsilon_{DXO} \theta + \varepsilon_{DZO} \varphi$$

$$\Delta_{Z1} = \varepsilon_{DZO} + \varepsilon_{DXO} \psi - \varepsilon_{DYO} \varphi$$

Общая методика расчета погрешности базирования

- Если система координат $X_1Y_1Z_1$ не повернута относительно системы $X_0Y_0Z_0$, то имеет место преобразование пространства, при котором

$$\pi = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

и тогда зависимость (3) сводится к виду

$$\begin{vmatrix} \Delta_{X1} \\ \Delta_{Y1} \\ \Delta_{Z1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{DXO} \\ \varepsilon_{DUO} \\ \varepsilon_{DZO} \end{vmatrix}$$

Общая методика расчета погрешности базирования

- Можно также решить и **обратную задачу**. Если известны погрешности размеров детали в направлении осей X_1 , Y_1 и Z_1 , а также погрешности углового расположения обрабатываемых поверхностей относительно системы координат станка, то можно определить допустимые величины смещения заготовки при ее базировании в направлениях X_0 , Y_0 и Z_0 , при которых достигается заданная точность обработки.
- Расчет этих смещений следует вести по **формулам**

Общая методика расчета погрешности базирования

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{ДХО} \\ \varepsilon_{ДЮО} \\ \varepsilon_{ДЗО} \end{pmatrix} = \pi^T \begin{pmatrix} \Delta_{X1} \\ \Delta_{Y1} \\ \Delta_{Z1} \end{pmatrix},$$

Выполнив преобразования, получим формулы для расчета погрешностей базирования в направлениях осей X_0, Y_0 и Z_0 :

$$\varepsilon_{ДХО} = \Delta_{X1} - \Delta_{Y1} \theta + \Delta_{Z1} \psi$$

$$\varepsilon_{ДЮО} = \Delta_{Y1} + \Delta_{X1} \theta - \Delta_{Z1} \varphi$$

$$\varepsilon_{ДЗО} = \Delta_{Z1} - \Delta_{X1} \psi + \Delta_{Y1} \varphi$$

Примеры расчета погрешности базирования

Пример расчета погрешности базирования

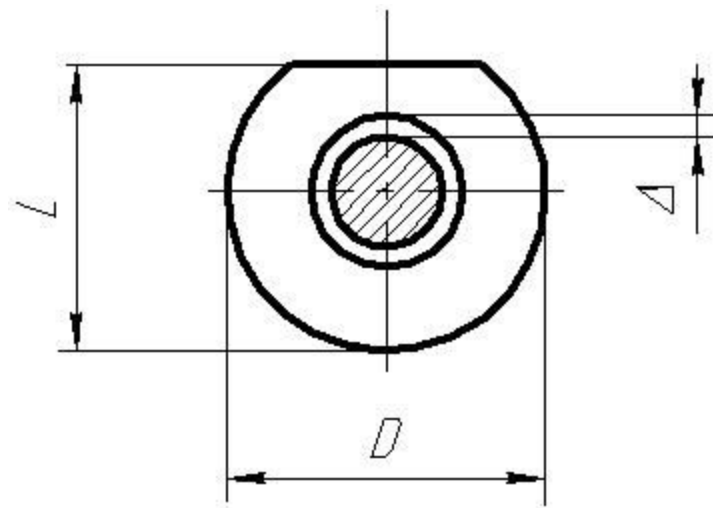
Определение погрешности базирования при установке заготовки по отверстию

При установке детали базовым отверстием на оправку следует учитывать смещение измерительной базы в направлении выдерживаемого размера.

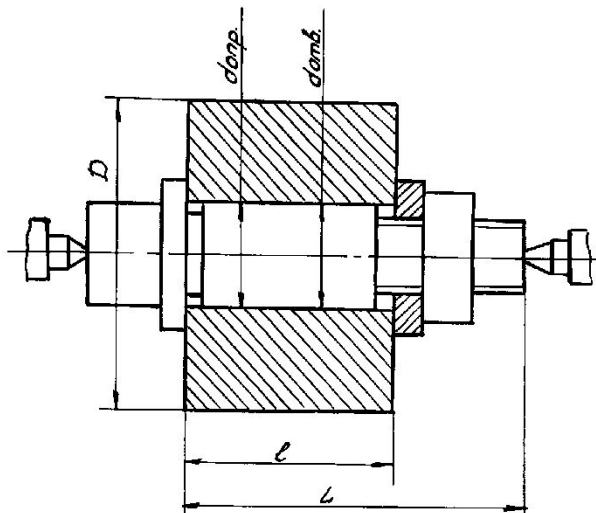
При посадке на разжимную оправку, т.е. без зазора, погрешность базирования по отношению к размеру L выражается величиной половины допуска на диаметр D заготовки, т.е. $\varepsilon_{\bar{o}} = T_D / 2$

При посадке на жёсткий палец с зазором погрешность базирования будет больше на величину предельного колебания диаметрального зазора и в этом случае будет $\varepsilon_{\bar{o}} = T_D / 2 + \Delta$

Здесь не учитывались погрешности расположения базовых поверхностей установочного элемента и заготовки. Покажем на примере, как это можно сделать.



Пример расчета погрешности базирования



Расчет погрешности базирования

Пусть требуется определить погрешность базирования втулки на жесткой оправке с зазором и упором в торец при точении наружной поверхности диаметром $D=65-0,19$. Заданные размеры: $d_{\text{опр}}=30-0,03$; $d_{\text{отв}}=30+0,13$; $l=50$. Наружная поверхность партии заготовок обработана в размер $D_3 = 66-0,3$.

В данном случае при обработке наружного диаметра партии втулок на настроенном станке погрешность базирования будет определяться смещением оси заготовки относительно линии центров станка, а также ее поворотом на некоторый угол к линии центров. Величины смещения и поворота определяются зазором между оправкой и поверхностью базового отверстия, а также отклонением от перпендикулярности торца заготовки к оси отверстия, т.е. биением торца.

Смещение оси заготовки относительно линии центров станка приведет к отклонению от соосности обработанной поверхности и базового отверстия, а торцовое биение - к отклонению от цилиндричности обработанной поверхности (конусности).

Погрешность базирования, обусловленную смещением заготовки относительно линии центров станка, можно представить в виде

$$\Delta_{\sigma_{см}}^0 = \Delta_{смз}^0 + \Delta_{смo}^0$$

$\Delta_{смз}^0$ - смещение отверстия заготовки относительно оси оправки;

$\Delta_{смo}^0$ - смещение оси цилиндрической поверхности оправки относительно линии центров станка.

Пример расчета погрешности базирования

Расчет погрешности базирования (см. предыдущий слайд)

При нормальной относительной точности допуск смещения оси цилиндрической поверхности оправки относительно оси центровых гнезд (радиальное биение) составит:

$$\Delta_{см0}^0 = 0,6 \cdot 30 / 2 = 9 \text{ мкм}$$

Смещение $\Delta_{см0}^0$ определяется суммой смещений оси заготовки относительно оси оправки за счет зазора Δ и за счет отклонения от круглости оправки $T_{опр}$:

$$\Delta = d_{отв}^{\max} - d_{опр}^{\min} = 30,13 - 29,97 = 160 \text{ мкм};$$

$$T_{ОПР} = 0,6 \cdot 30 / 2 = 9 \text{ мкм}.$$

Тогда наибольшая погрешность базирования, обусловленная указанными смещениями, составит:

$$\Delta_{\sigma см} = 9 + 160 + 9 = 178 \text{ мкм}$$

Видно, что даже без учета других составляющих погрешности требуемая точность обработки не будет достигнута, так как допускаемое радиальное биение этой поверхности (отклонение от соосности с отверстием) составляет

$$T_{ср} = 0,6 \cdot 190 / 2 = 57 \text{ мкм},$$

что в 3 раза меньше погрешности базирования.

Оценим величину полученной конусности обработанной поверхности. При нормальной относительной точности биение торца относительно оси отверстия составит

$T_{тд} = 0,6 \cdot 150 / 2 = 45 \text{ мкм}$ на диаметре 30 мм. Это торцовое биение, отнесенное к длине детали $l = 50$ мм, определит конусность:

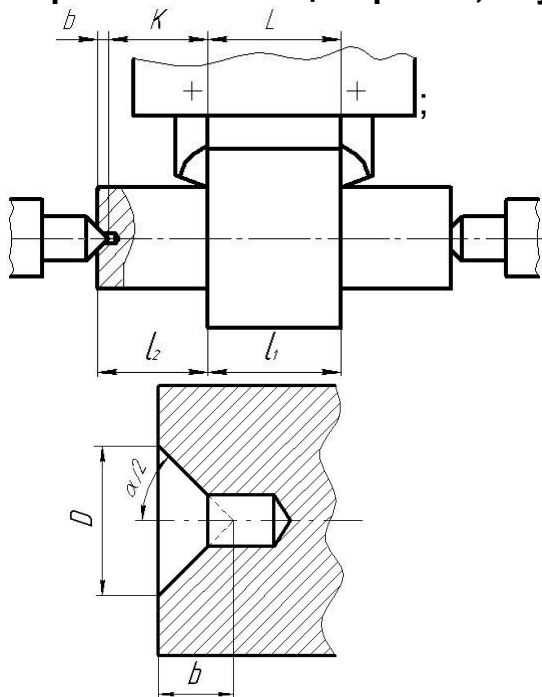
$$\Delta_k = \frac{0,039}{30} \cdot 50 = 55 \text{ мкм}$$

Пример расчета погрешности базирования

Определение погрешности базирования при установке заготовки в центрах

Рассмотрим схему, представленную на рисунке. Передний центр – жёсткий. Торцовые поверхности обрабатываются двумя резцами, причём $K = \text{const}$, $L = \text{const}$.

В этом случае погрешность базирования не окажет влияния на точность размера l_1 , но будет влиять на точность размера l_2 , отсчитываемого от левого торца валика, который служит измерительной базой для данного размера. Здесь l_2 может изменяться в связи с погрешностью зацентровки, обусловленной неодинаковой глубиной сверления.



Погрешность базирования для размера l_2 определяется разностью предельных значений размера b , т.е. $(b_{max} - b_{min})$ от торца заготовки до вершины центра

$$b_{max} = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)_{max}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

$$b_{min} = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)_{min}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

вычислив $(b_{max} - b_{min})$, а также преобразовав соотношение, получим

$$\varepsilon_{\delta} = \frac{T_D}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

T_D - допуск на диаметр конической части центрального отверстия

Пример расчета погрешности базирования

Определение погрешности базирования при установке заготовки в призме

Определим погрешность базирования вала в призме при фрезеровании плоскости и выдерживании размеров H_1 , H_2 , H_3 . Погрешность базирования для размера H_1 определяется разностью $AB_1 - AB_2$. Из расчетной схемы находим:

$$AB_1 = D_1 / 2 \sin \alpha + D_1 / 2 = D_1 / 2 (1 / \sin \alpha + 1)$$

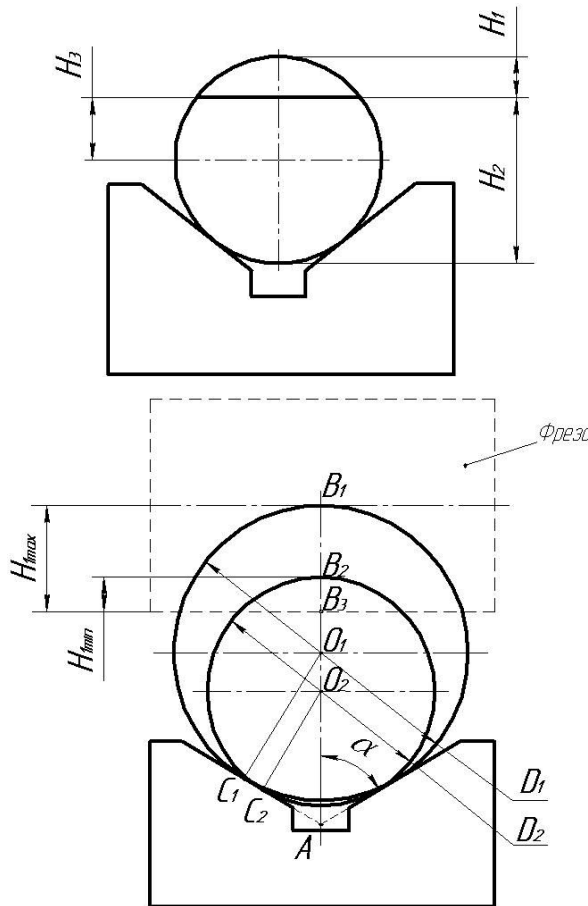
$$AB_2 = D_2 / 2 \sin \alpha + D_2 / 2 = D_2 / 2 (1 / \sin \alpha + 1)$$

После вычислений получим

$$\varepsilon_{\delta H_1} = (D_1 - D_2) (1 / \sin \alpha + 1) = \frac{T_D}{2} (1 / \sin \alpha + 1).$$

Погрешности базирования для размеров H_2 и H_3 определяются зависимостями

$$\varepsilon_{\delta H_2} = \frac{T_D}{2} (1 / \sin \alpha - 1) \quad \varepsilon_{\delta H_3} = \frac{T_D}{2 \sin \alpha}.$$



Пример расчета погрешности базирования

Определение погрешности базирования при установке заготовки в призме

Если рабочие поверхности призмы получили износ, определяемый глубиной лунок Δ , то в этом случае ось заготовки получает смещение вниз на величину $\varepsilon_{z0} = \Delta / \sin \alpha$

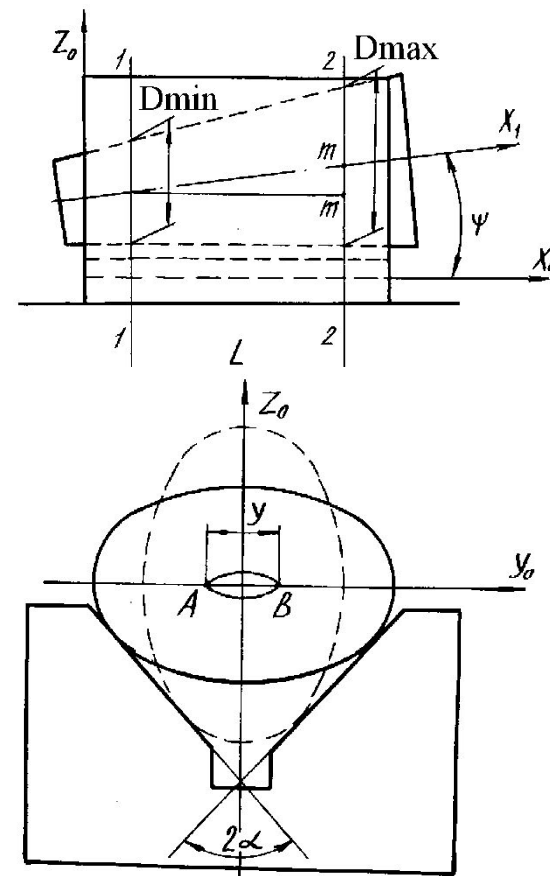
Если базовая поверхность имеет конусообразность, ось заготовки X_1 располагается под некоторым углом ψ к оси X_0 . Конусообразность Δ определяется соотношением $\Delta = (D_{\max} - D_{\min})/2$, следовательно, смещение заготовки в направлении оси Z_0 , т.е. погрешность базирования, обусловленная конусообразностью, составит $\varepsilon_{bz0} = \Delta / \sin \alpha$.

Угол ψ поворота оси X_1 вокруг Y_0 определяется на длине L по соотношению $\psi = \arctg (mm/L)$.

Если заготовка в поперечном сечении имеет погрешность формы в виде эллипсности, то ее ось занимает различные положения по высоте и в горизонтальном направлении для различных угловых положений.

Перемещение оси заготовки в горизонтальном направлении определяется соотношением $y = \sqrt{2} (a - b)$,

где a и b - большая и малая полуоси эллипса. Смещение по вертикали в несколько раз меньше величины y .



Расчеты прочих погрешностей

Расчет погрешности закрепления

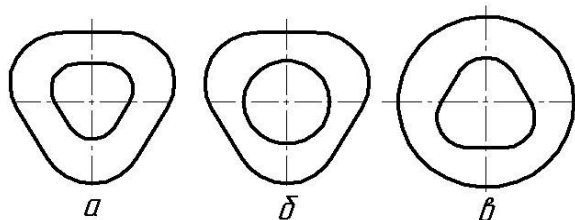
Деформации детали при её закреплении и погрешности закрепления

На точность обработки детали влияют силы, действующие при её закреплении. Эти силы деформируют деталь, в частности её поверхностные слои, которыми она соприкасается с поверхностями станка или приспособления. Иногда на точности обработки отражаются деформации стола станка или приспособления.

Влияние сил зажима детали на её точность особенно активно проявляется при обработке длинных рам, станин, плит.

При закреплении длинных валов в центрах токарных станков давлением заднего центра вызывает сжатие и продольный изгиб. Поэтому величина силы зажатия для точных деталей имеет большое значение.

При закреплении тонкостенных втулок, колец, гильз и т.д. в трёхкулачковом патроне для обработки отверстия их цилиндрическая форма искажается от сил зажима. Такие детали при освобождении из патрона теряют форму обработанного отверстия. На рисунке показана схема деформаций тонкого кольца после его закрепления в трехкулачковом патроне (а), после расточки (б) и после снятия со станка (в).



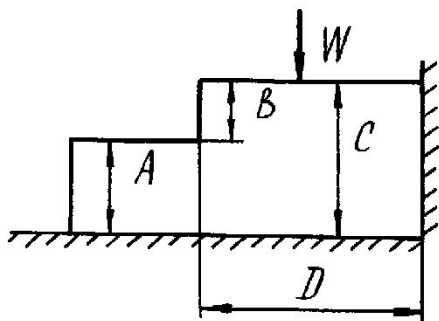
Смещение заготовки из положения, определяемого установочными элементами, а значит, смещение её измерительной базы происходит вследствие деформаций отдельных звеньев цепи «заготовка – установочные элементы – корпус приспособления».

Расчет погрешности закрепления

Погрешность закрепления равна разности между предельными (наибольшей и наименьшей) величинами смещения измерительной базы по направлению выполняемого размера.

Погрешность закрепления заготовки Δz представляет собой разность наибольшей и наименьшей проекций смещения измерительной базы на направление выполняемого размера при приложении к заготовке силы закрепления. Если величина указанного смещения постоянна для партии заготовок, то погрешность закрепления равна нулю, и поле допуска выполняемого размера не изменяется. Согласно определению,

$\Delta z = (y_{max} - y_{min}) \cos \alpha$, где α - угол между направлением выполняемого размера и направлением смещения измерительной базы.



В соответствии с приведенным соотношением, погрешность закрепления для размеров A , B и C (см. рисунок) не равна нулю, так как $\alpha = 0$. Для размера D погрешность закрепления равна нулю, так как измерительная база (правая боковая поверхность) перемещается при закреплении в своей плоскости $\alpha = 90$).

Таким образом, наибольшая погрешность закрепления, заготовки в приспособлении, достигается при направлении зажимного усилия, перпендикулярном технологической (установочной) базе.

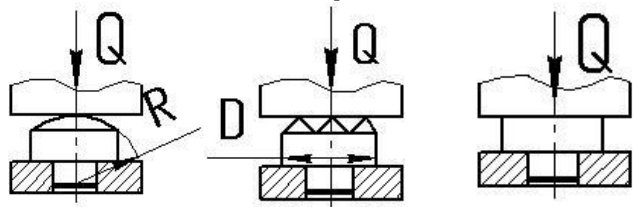
Примеры расчета погрешности закрепления

Погрешность закрепления зависит от шероховатости опорных поверхностей заготовок и наличия контактных деформаций поверхностей стыка "поверхность заготовки - поверхность установочного элемента приспособления". Эти деформации в отдельных случаях могут достигать больших значений и в общем случае списываются нелинейным законом вида

$$Y = CQ^n$$

где C и n - эмпирические коэффициент и показатель степени характеризующие вид контакта, материал заготовки, шероховатость и состояние ее поверхностного слоя (обычно $n < 1$); Q - сила, действующая на контактный элемент приспособления (опору).

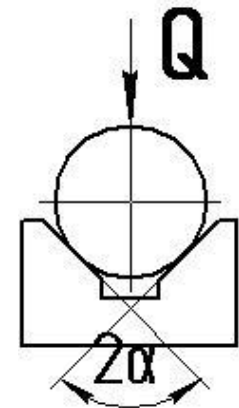
Установка на опоры постоянные и пластины опорные



Установка на призму

$$\varepsilon_3 = \left[(k_{Rz} R_z + k_{HB} HB) + C_1 \right] \frac{Q^n}{F^m}$$

$$\varepsilon_3 = \left[\left(k_{Rz} R_z + \frac{k_{HB}}{HB} \right) + C_1 \right] \left(\frac{Q}{2l} \right)^n$$



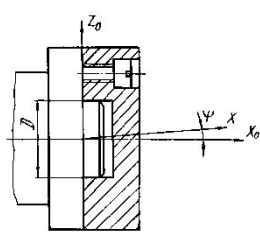
Погрешности положения заготовки в приспособлении

Погрешности положения заготовки в приспособлении

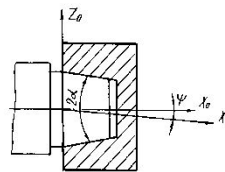
При установке и закреплении заготовки в приспособлении её положение относительно инструмента может оказаться неточным в связи с погрешностью изготовления и сборки самого приспособления, износа и неточности установки на станке. Для различных приспособлений **такие погрешности составляют 0,005...0,02** и, суммируясь, образуют общую погрешность приспособления.

При однократном применении одноместного приспособления погрешность приспособления вызывает систематическую погрешность, которая может быть компенсирована при настройке станка. В этом случае при расчёте общей погрешности установки погрешность положения может не учитываться.

При применении многоместных приспособлений погрешности приспособлений в процессе настройки станков компенсированы быть не могут. Они оказывают влияние на общее рассеяние размеров заготовок как случайные величины.

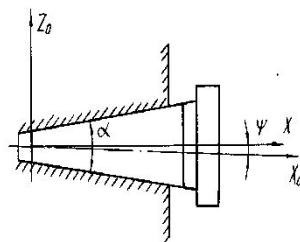


$$\psi = \arctg(\Delta / D)$$



$$\Delta x = (0,03 \dots 0,06)$$

$$\psi = (2 \dots 8) \text{ мин}$$



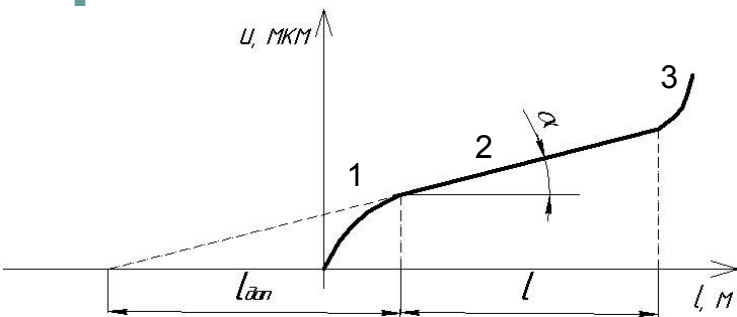
Погрешность в направлении оси X_0 составляет (0,01...0,2) мм при конусе Морзе №0... №3 и (0,2...0,5) мм при конусе Морзе от №4 до №6. Угол поворота принимается равным погрешности половины угла конуса

Погрешности от размерного износа режущих инструментов

Погрешности, возникающие в результате размерного износа режущих инструментов

В условиях нормального износа связь величины размерного износа с длиной пути резания определяется соотношением

$$u = \frac{u_0 l}{1000}$$

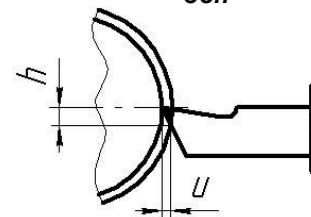


Участок приработки можно заменить некоторой дополнительной длиной пути резания $l_{доп}$. Эту длину часто принимают равной 1000 м. И с учетом $l_{доп}$ величину размерного износа можно определять по соотношению

$$u = \frac{u_0 (l + l_{доп})}{1000}$$

При точении длина пути резания l определяется соотношением

$$l = \frac{\pi \cdot D}{1000} \cdot \frac{l_0}{s}$$



Приращение размера может происходить в связи с возрастанием силы P_y и, как следствие, в возрастанием упругого отжатия.

$$l = \frac{l_n \cdot B}{1000 \cdot z \cdot s_z}$$

При фрезеровании

Погрешности, связанные с настройкой технологической системы

Погрешности, связанные с настройкой технологической системы

Настройка (наладка) включает установку режущего инструмента, рабочих органов станка, приспособления в положение, которое обеспечивает получение заданного размера с установленным допуском на изготовление.

Поле рассеяния положений инструмента при настройке называют погрешностью настройки на размер ε_n . Эта погрешность равна разности предельных значений установочных размеров. Она зависит от погрешности регулирования положения инструмента (по лимбу, эталону, жёсткому упору) и погрешности измерения размера детали.

$$\varepsilon_n = \sqrt{(K_p \varepsilon_p)^2 + (K_u \varepsilon_{изм.})^2}$$

Для поверхностей вращения погрешности настройки и регулирования относятся к радиусу, а погрешность измерения – к диаметру. Поэтому

$$\varepsilon_n = \sqrt{(K_p \varepsilon_p)^2 + \left(K_u \frac{\varepsilon_{изм.}}{2}\right)^2}$$

где $K_p = 1,14 \dots 1,73$, $K_u = 1$ учитывают отклонение закона распределения элементарных погрешностей ε_p и $\varepsilon_{изм.}$ от нормального закона распределения. Слагаемые погрешности ε_n определяют по справочным данным.

Допустимые погрешности измерения составляют от 20 (для грубых квалитетов) до 35% допуска на изготовление изделия. Случайная погрешность измерения не должна превышать 0,6 нормируемого предела допустимой погрешности измерения.

Погрешности от геометрических неточностей станка

Погрешности обработки, возникающие вследствие геометрических неточностей станка

При точении консольно закрепленной заготовки в результате отклонения от параллельности оси шпинделя и направляющих станины образуется конусообразность

$$\varepsilon_{\text{кон}} = \frac{C_m l_m}{l},$$

где C_m - отклонение от параллельности на длине l ,

l_m - длина обработанной поверхности.

При обработке поверхностей на вертикально-фрезерных станках вследствие отклонения от параллельности рабочей поверхности стола и его продольных направляющих возникает отклонение от параллельности обработанной и установочной поверхностей

$$\varepsilon_{\text{пл}} = \frac{C_{\Phi} l_{\Phi}}{l},$$

Отклонение от перпендикулярности оси шпинделя вертикально-фрезерного станка и поверхности стола в продольном направлении вызывает вогнутость обработанной поверхности.

Погрешности от неточностей приспособления и инструмента

Погрешности обработки, возникающие вследствие неточностей приспособления и режущего инструмента

Погрешность изготовления приспособления зависит от точности изготовления его деталей. Эта погрешность в общем случае не должна превышать $1/3 \dots 1/10$ допуска на соответствующий размер детали. При эксплуатации приспособлений элементы для установки деталей и направления инструмента изнашиваются, это приводит к дополнительным погрешностям обработки. При применении односторонних приспособлений погрешность приспособления может быть скомпенсирована наладкой. При применении многосторонних приспособлений эта погрешность не может быть скомпенсирована.

Погрешности обработки, вызванные остаточными напряжениями

Остаточные (или внутренние) напряжения уравновешены и внешне не проявляются пока их равновесие не будет нарушено по каким-либо причинам (тепловые изменения, частичное или неравномерное удаление припуска, вибрации, удары и т.п.).

При механической обработке происходит перераспределение этих напряжений, сопровождающееся деформациями детали. Поэтому после обдирки особенно отливок их надо освобождать от зажимов – пусть свободно деформируется. Высоко жесткие детали можно обработать без открепления.

Для снятия внутреннего напряжения может применяться старение (отливки вылеживаются от 15...20 дней до полугода после предварительной обработки – естественное старение). Искусственное старение – нагрев до $(500 \dots 600)^\circ\text{C}$, выдержка 2...6 часов, медленное охлаждение с печью (20 град/час) до $150 \dots 200^\circ\text{C}$.

Погрешности от тепловых деформаций станка

Погрешности, связанные с тепловыми деформациями технологической системы

Оказывают существенное влияние на точность обработки. Вызванные ими погрешности могут достигать величин, выходящих за пределы 8...9 квалитетов.

Источниками тепла являются зона резания, контактные поверхности подвижных частей станка, электродвигатели и гидронасосы

Тепловые деформации станка

В течение первых 3...5 часов работы передняя бабка станков нагревается, а затем её температура стабилизируется. Ось шпинделя при нагреве смещается «на рабочего». Диаметральная \sqrt{n} погрешность деталей при этом равна **удвоенному смещению шпинделя**. С увеличением числа оборотов шпинделя смещение его оси увеличивается пропорционально

Станины станков также нагреваются. Разность температур в их разных частях достигают 10⁰С. Это вызывает деформацию станины и приводит к нарушению взаимного расположения отдельных узлов.

Ослабить влияние температурных деформаций станка можно за счёт:

- выноса гидропривода за пределы станка (это также приводит к снижению вибраций);
- установки регуляторов температуры масла в гидроприводе (подогреватели температуры масел до рабочей). Это способствует ускоренному достижению теплового равновесия;
- применения теплоизоляции гидроцилиндра и гидропанели от станины;
- правильного выбора объёма резервуара для масла;
- Применения эффективной смазки подшипников, улучшающей теплоотвод.

Погрешности от тепловых деформаций детали и инструмента

Тепловые деформации детали. Теплота, образующаяся в зоне резания при работе лезвийным инструментом, в количестве 3...9 % переходит в заготовку. При сверлении в заготовку переходит до 52 % тепла. Если деталь нагревается равномерно, то её средняя температура

$$t = \frac{Q}{c \cdot \gamma \cdot V}$$

где c – удельная теплоёмкость материала детали (ккал/); γ – плотность, кг/м³; V – объём детали, м³.

Температурное расширение в направлении размера L $\Delta L = \alpha L t$

Тепловые деформации режущего инструмента. В инструмент переходит при средних скоростях резания 10...20 % образующегося тепла. Но и при этих условиях имеют место существенные температурные деформации: тепловое изменение длины резца может достигать 30...50 мкм. Нагревание и удлинение возрастают с увеличением V , S , t и $HВ$ материала заготовки. Установившийся тепловой режим в резце имеет место через 10...30 минут работы. Удлинение резца в условиях установившегося теплового режима составляет

$$\Delta L_p = C \frac{L_p}{\sigma_b} (t \cdot S)^{0,75} \sqrt{V}$$

При обильном охлаждении удлинение резцов уменьшается в 3...3,5 раза. Нагревание фрез, протяжек зуборезных инструментов оказывает меньшее влияние на точность обработки по сравнению с резцами. Нагрев абразивного инструмента почти не влияет на точность

Погрешности, вызванные упругими деформациями технолог. системы

Погрешности, вызванные упругими деформациями технологической системы

При точении вала в центрах на токарном станке его диаметр в некотором сечении А-А будет равным $D = D_{настр.} + 2(y_{з.б.} + y_{п.б.} + y_{инстр.} + y_{заг.})$

Жёсткостью технологической системы \square называется способность этой системы оказывать сопротивление действию деформирующих её сил. При обработке резанием жёсткость \square технологической системы принято выразить отношением $\square = P/y$, где $y = y_{ст.} + y_{пр.} + y_{заг.} + y_{инстр.}$ Единицы измерения жесткости - Н/м; кН/м; Н/мм; кН/мм.

Отжим резца, связанный с его прогибом под действием сил резания, мало отражается на изменении радиуса обработки: при прогибе резца в несколько десятых долей миллиметра и при диаметре в несколько десятков миллиметров радиальное отжатие $y_{инстр.}$ резца измеряется десятитысячными долями миллиметра и может не приниматься в расчёт.

Отжатие заготовки $y_{заг.}$ зависит от метода установки заготовки на станке. При обработке вала в центрах наибольший прогиб в середине

$$y_{заг.} = \frac{P_y l^3}{48EI}$$

а в сечении на расстоянии резца x от передней бабки

$$y_{заг.} = \frac{P_y x^2 (l-x)^2}{3EIl}$$

Следовательно, упругие отжатия в технологической системе приводят к увеличению фактического радиуса обработки заготовки

$$r_{факт.} = r_{теор.} + y_{ст.} + y_{заг.} + y_{инстр.}$$

Закон копирования погрешностей

Закон копирования погрешностей

При обработке заготовок существует явление копирования исходных погрешностей формы заготовки на обработанную деталь в виде одноименных погрешностей меньшей величины (овальности заготовки соответствует овальность обработанной детали; конусности – конусность; биению – биение). Уточнение

$$\varepsilon = \Delta_{\text{заг.}} / \Delta_{\text{дет}}$$

Величина, обратная уточнению, называется коэффициентом уменьшения погрешностей

$$K = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{\Delta_{\text{дет.}}}{\Delta_{\text{заг.}}}$$

Погрешность формы поперечного сечения детали можно выразить так

$$\Delta_{\text{дет.}} = y_{\text{max}} - y_{\text{min}} = \frac{P_{y\text{max}} - P_{y\text{min}}}{j_c}$$

$$P_{y\text{max}} = \lambda P_{z\text{max}} = \lambda C_{p_z} t_{\text{max}}^{xp_z} S^{yp_z}$$

$$P_{y\text{min}} = \lambda C_{p_z} t_{\text{min}}^{xp_z} S^{yp_z}$$

Закон копирования погрешностей

$$X_{pz} = 1$$

$$\Delta_{det.} = \frac{\lambda C_{pz} S^{y_{pz}}}{j_c} (t_{max} - t_{min})$$

Если обозначить

$$\Delta_{заг.} = t_{max} - t_{min}$$

то получим

$$\varepsilon = \frac{j_c}{\lambda C_{pz} S^{y_{pz}}} = \frac{\Delta_{заг.}}{\Delta_{det.}}$$

т.е. величина уточнения прямо пропорциональна жёсткости технологической системы.

По полученной зависимости можно подобрать режимы резания, обеспечивающие получение заданной точности при известной погрешности заготовки. Чаще всего, $\varepsilon > 1$, а $K < 1$, т.е. с каждым последующем рабочим ходом инструмента погрешность детали уменьшается, а точность обработки повышается.

Суммарная погрешность механической обработки

Случайные погрешности складываются геометрически

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_n^2}$$

Если эти погрешности не подчиняются закону Гаусса, то

где k - коэффициенты, зависящие от вида закона распределения. Для закона нормального распределения (Гаусса) $k=1$, для закона Симпсона $k=1,22$, а для закона равной вероятности $k=1,73$. Если все погрешности изменяются по одному закону, то $k_1 = k_2 = k_3 = \dots = k_n = k$. Тогда

$$\varepsilon = k \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_n^2}$$

Суммарная погрешность механической обработки

Суммарная погрешность обработки включает:

- погрешность установки;
- погрешность настройки;
- погрешность обработки, вызванную колебаниями упругих деформаций технологической системы под влиянием нестабильности нагрузок;
- погрешность обработки, вызванную износом инструмента;
- погрешность обработки, вызванную геометрическими неточностями станка;
- погрешность обработки, вызванную температурными деформациями в ТС;
- прочие, не упомянутые выше погрешности.

Суммарная погрешность механической обработки

Окончательно, **полагая все погрешности случайными величинами,** можно записать

$$\varepsilon = 1,2 \cdot \sqrt{\varepsilon_y^2 + \varepsilon_n^2 + \varepsilon_j^2 + \varepsilon_{инс}^2 + \varepsilon_{ст}^2 + \varepsilon_t^2 + \varepsilon_{проч.}^2}$$

В данной формуле коэффициент 1,2 – коэффициент относительного рассеяния погрешностей обработки, корректирующий суммарную погрешность с гарантированной надежностью $P = 0,9995$.

Суммарная погрешность механической обработки

В МГТУ им Баумана для определения суммарной погрешности рекомендуют использовать формулу

$$\Delta = \sqrt{\Delta_y^2 + \varepsilon^2 + \Delta_H^2 + 3\Delta_{И}^2 + 3\Delta_T^2 + \sum \Delta_{\phi}}$$

где Δ_y - погрешность, вызванная упругими деформациями технологической системы; ε - погрешность, связанная с установкой заготовки на станок или в приспособление; Δ_H - погрешность, связанная с настройкой режущих инструментов; $\Delta_{И}$ - погрешность, возникающая в результате размерного износа режущих инструментов; Δ_T - погрешность, вызванная тепловыми деформациями технологической системы; $\sum \Delta_{\phi}$ - погрешности, связанные с геометрическими отклонениями оборудования.

Суммарная погрешность механической обработки

При использовании метода пробных ходов и измерений погрешность рассчитывают по формуле

$$\Delta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \Delta_y + \Delta_{И} + \Delta_T + \Delta_{ст} ,$$

где ε_1 – погрешность установки режущего инструмента; ε_2 – погрешность формы обработанной поверхности или погрешность ее положения относительно измерительной базы; Δ_y – погрешность формы обрабатываемой поверхности из-за копирования первичных погрешностей заготовки; $\Delta_{И}$ – погрешность формы поверхности в результате износа режущего инструмента; Δ_T – погрешность формы детали из-за тепловых деформаций системы; $\Delta_{ст}$ – погрешность формы обрабатываемой поверхности, вызываемая геометрическими погрешностями станка.