ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ
(НА ПРИМЕРЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ)

ПОНЯТИЕ ОБ ОБЩЕЙ ПОГРЕШНОСТИ ОБРАБОТКИ

Общую погрешность обработки (в частности механообработки) можно выразить функцией от ряда не зависящих друг от друга величин:

$$\Delta_\Sigma = f(\Sigma\Delta_\phi, \Delta_y, \varepsilon, \Delta_u, \Delta_н, \Delta_T). \qquad (1)$$

Здесь в скобках указаны частные (элементарные) погрешности, вызванные действием Факторов различной природы.

$\sum\Delta_\phi$ - суммарная погрешность Формы изделия (детали), вызванная несовершенством технологического оборудования и состоящая из элементарных погрешностей, вызываемых:

1) геометрическими неточностями оборудования, $\Delta_{об}$;

2) деформациями заготовки под влиянием сил закрепления, $\Delta_{заж}$;

3) неравномерностью упругих отжатий в технологической системе под влиянием возникающих в ней сил, $\Delta_{нер}$.

$\Delta_у$ - погрешность, представляющая собой технологическую наследственность и обусловленная нестабильностью возникающих в технологической системе сил, вследствие имеющихся на заготовке отклонений.

ε - погрешность установки заготовки, состоящая из погрешностей базирования $\varepsilon_б$, закрепления $\varepsilon_з$ и приспособления $\varepsilon_{пр.}$

$\Delta_и$ - погрешность, обусловленная размерным износом инструмента;

$\Delta_н$ - погрешность размерной настройки оборудования;

$\Delta_т$ - погрешность, обусловленная тепловыми деформациями технологической системы.

СУММАРНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ФОРМЫ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ ОБОРУДОВАНИЯ $\sum\Delta_\phi$

ПОГРЕШНОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С НЕТОЧНОСТЬЮ, ИЗНОСОМ И ДЕФОРМАЦИЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ $\Delta_{об}$

Погрешности изготовления и сборки оборудования контролируются стандартными методами проверки его геометрической точности, т.е. точности в ненагруженном состоянии.

Применительно к металлорежущим станкам, параметрами, характеризующими их геометрическую точность, являются, например, следующие:

1) прямолинейность и параллельность направляющих;

2) параллельность оси шпинделя к направлению движения каретки (для токарных станков);

3) перпендикулярность оси шпинделя к плоскости стола (для фрезерных станков);

4) биение конического отверстия в шпинделе станка и т.д.

Указанные характеристики геометрической точности станков задаются в мм и для станков нормальной точности (станки группы Н), предназначенных для обработки заготовок средних размеров в пределах допусков IT9 составляют 0,01 - 0,05 мм. Более высокоточные станки характеризуются тем, что численные значения соответствующих параметров уменьшаются и составляют в процентах относительно значений для станков группы Н:

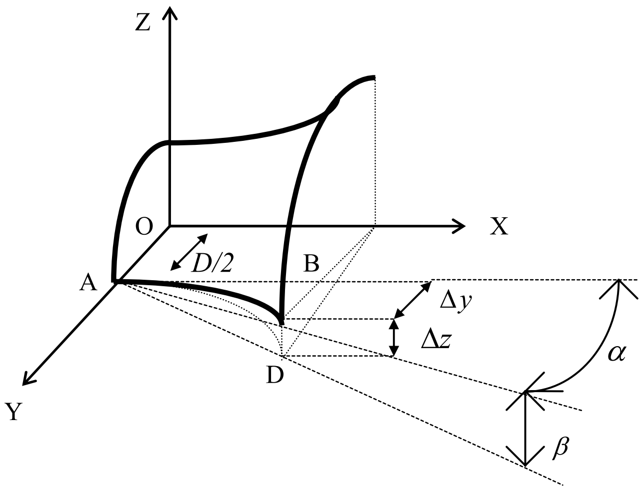
- станки повышенной точности (группа П) - 60%;
- станки высокой точности (группа В) - 40%;
- станки особо высокой точности (группа А) - 24%;

- станки особо точные (группа С) - 16%.

Геометрические погрешности оборудования полностью или частично переносятся на обрабатываемые детали в виде систематических погрешностей последних. Систематические погрешности поддаются предварительному анализу и расчету.

В качестве примера рассчитаем форму поверхности детали при токарной обработке в условиях, когда вершина резца перемещается непараллельно оси вращения заготовки как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

Пусть OX - ось вращения заготовки.



Если построить в плоскости XOY кривую, у которой

$$y^2 = (\frac{D}{2} + \Delta y)^2 + \Delta z^2, \qquad (2)$$

где Δy и Δz - смещения вершины резца при перемещении в горизонтальном и вертикальном направлениях, то вращая эту кривую вокруг оси OX, получим искомую поверхность.

Уравнение искомой кривой в плоскости XOY:

$$y^2 = (\frac{D}{2} + x \cdot tg\alpha)^2 + (\frac{x}{\cos\alpha} \cdot tg\beta)^2 = \frac{D^2}{4} + xDtg\alpha + x^2 tg^2\alpha + \frac{x^2 tg^2\beta}{\cos^2\alpha}.$$

Приводя это уравнение к каноническому виду, имеем:

$$(tg^2\alpha + \frac{tg^2\beta}{\cos^2\alpha}) \cdot x^2 - y^2 + Dtg\alpha \cdot x + \frac{D^2}{4} = 0\,, \qquad (3)$$

где: D/2 - номинальный радиус обрабатываемой цилиндрической поверхности; α и β - связанные с неточностью изготовления станка углы, образуемые реальной траекторией движения вершины резца относительно требуемой соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Общее уравнение кривых второго порядка имеет вид:

$$ax^2+2bxy+cy^2+2dx+2ey+f=0 \qquad (4)$$

и характеризуется следующими инвариантами:

$$I_1=\begin{vmatrix} a & b & d \\ b & c & e \\ d & e & f \end{vmatrix}\ ;\quad I_2=\begin{vmatrix} a & b \\ b & c \end{vmatrix}\ .$$

Относительно инвариант полученного уравнения (3) реальной обработанной поверхности можно отметить следующее:

$$I_1=\begin{vmatrix} tg^2\alpha+\dfrac{tg^2\beta}{\cos^2\alpha} & 0 & \dfrac{Dtg\alpha}{2} \\ 0 & -1 & 0 \\ \dfrac{Dtg\alpha}{2} & 0 & \dfrac{D^2}{4} \end{vmatrix}\neq 0\ ;$$

$$I_2=\begin{vmatrix} tg^2\alpha+\dfrac{tg^2\beta}{\cos^2\alpha} & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}< 0\ ;$$

Эти условия свидетельствуют, что получено уравнение гиперболы. Форма обработанной поверхности - гиперболоид вращения.

Очевидно, что геометрическая неточность станка в горизонтальном направлении Δy полностью переходит в погрешность обработанной поверхности таким образом, что

$$\Delta D = 2\Delta y. \qquad (6)$$

Если предположить, что станок имеет геометрическую неточность только в вертикальном направлении Δz, то погрешность по диаметру детали составит:

$$\Delta D = 2\sqrt{\frac{D^2}{4}+\Delta z^2}-D\ .$$

Производя преобразования, имеем:

$$D+\Delta D=\sqrt{D^2+4\Delta z^2};$$

$$2D\Delta D+\Delta D^2=4\Delta z^2.$$

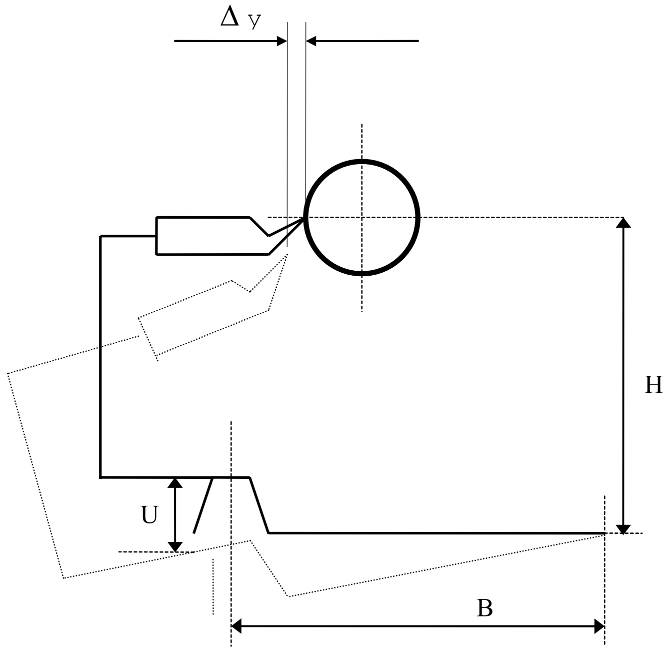
Исключая бесконечно малую величину второго порядка ΔD^2, получаем:

$$\Delta D = \frac{2\Delta z^2}{D}; \qquad (7)$$

Эта величина незначительна по сравнению с полученной выше по формуле (6). Поэтому принято считать,что отклонения формы обработанной поверхности ΔD при точении возникают только от неточности станка в горизонтальной плоскости.

Износ направляющих станков вследствие присущей ему неравномерности приводит к потере точности станков и возникновению на обработанной поверхности систематической погрешности. Износ передней направляющей токарного станка обычно в 5 раз больше, чем износ второй направляющей. Кроме того, износ направляющих по длине также не равномерен - износ максимален на определенном (конкретном для данного типоразмера) расстоянии от торца шпинделя.

Указанный неравномерный износ U вызывает наклон суппорта и смещение вершины резца в горизонтальной плоскости по следующей схеме.

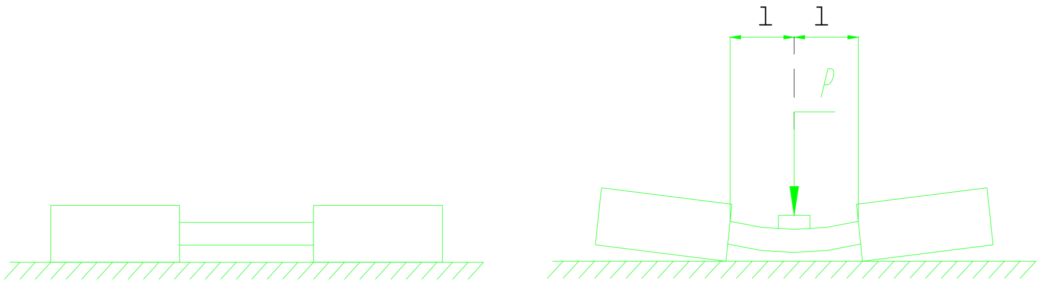


Деформация станков в ненагруженном состоянии (искривление станин и столов, извернутость направляющих) возникает при неправильном монтаже под действием собственной массы вследствие оседания фундамента. Этот фактор приводит к образованию систематической погрешности на обработанной поверхности по схеме, идентичной выявленной при рассмотрении влияния износа направляющих.

ПОГРЕШНОСТИ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ДЕФОРМАЦИЯМИ ЗАГОТОВОК ПОД ВЛИЯНИЕМ СИЛ ЗАКРЕПЛЕНИЯ $\Delta_{заж}$

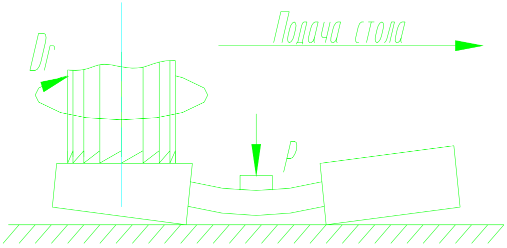
Величина погрешности взаимного расположения и формы обработанной поверхности детали может быть значительной, если место приложения зажимного усилия выбрано неправильно.

Рассмотрим схему установки и закрепления заготовки при фрезеровании бобышек. Если зажимное усилие не пересекает поверхность заготовки, создается изгибающий момент и изгиб заготовки: чем больше усилие P, и плечо l, на котором оно действует, тем больше прогиб. В результате параллельность торцов бобышек после фрезерования нарушается.

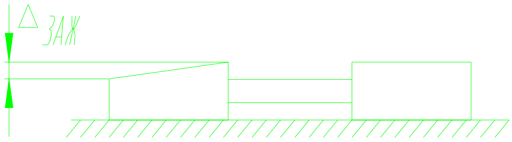


Заготовка до зажатия

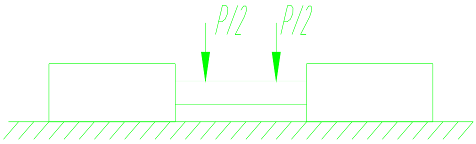
Место зажима выбрано неправильно



Заготовка после обработки

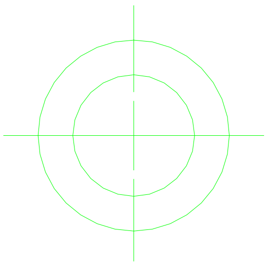


Заготовка после разжатия

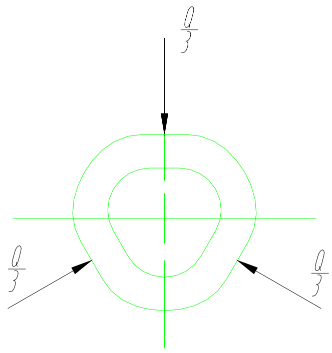


Место зажима выбрано правильно

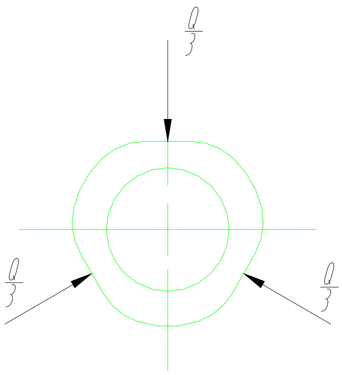
Аналогичные явления наблюдаются при токарной обработке колец с закреплением заготовки в трехкулачковом патроне.



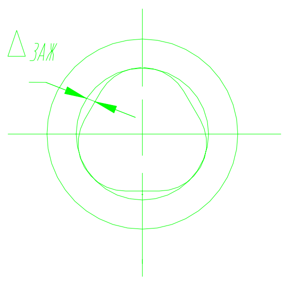
Кольцо до зажима



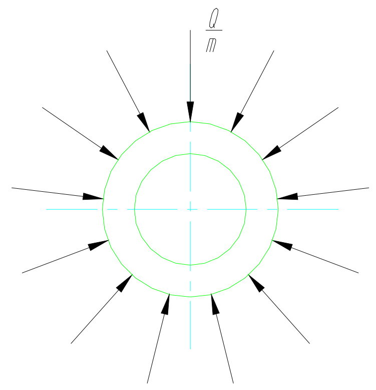
Форма кольца после зажима



Форма отверстия кольца
после его расточки



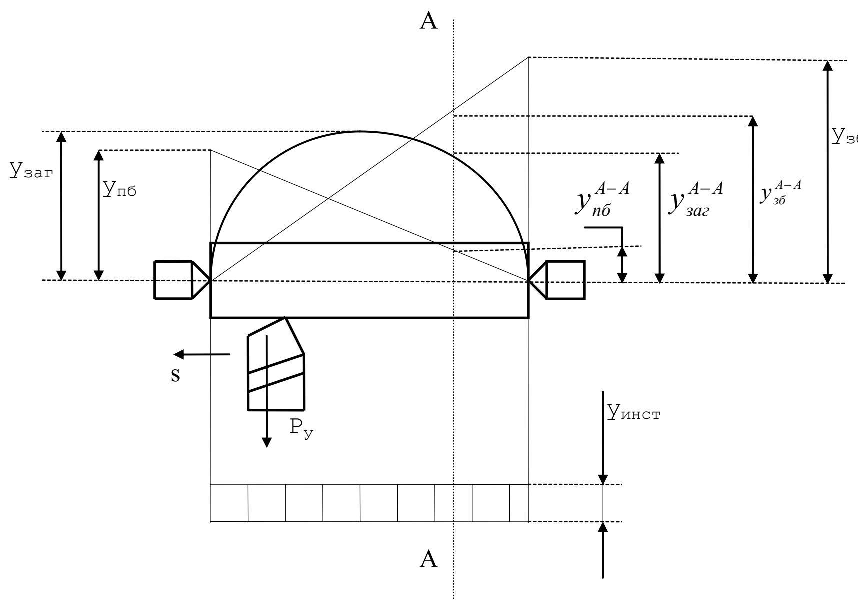
Форма отверстия кольца
после удаления из патрона



Применение мембранного патрона позволяет минимизировать $\Delta_{заж}$

ПОГРЕШНОСТИ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ УПРУГИМИ ОТЖАТИЯМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ РЕЗАНИЯ $\Delta_{нер}$

В качестве примера рассмотрим обработку гладкого вала в центрах на токарном станке.



В начальный момент, когда резец находится у правого конца вала, вся нормальная составляющая $P_у$ усилия резания передается через заготовку на задний центр, пиноль и заднюю бабку станка, вызывая упругую деформацию названных элементов в направлении «от рабочего». Это приводит к увеличению расстояния от вершины резца до оси вращения заготовки на величину $у_{зб}$ и к соответствующему возрастанию радиуса обработанной заготовки.

Одновременно происходит упругое отжатие $у_{инстр}$ резца и суппорта в направления «на рабочего». Таким образом, в начальный момент диаметр обработанной поверхности фактически оказывается больше установленного при настройке на величину $\Delta=2(у_{зб}+ у_{инстр})$.

При дальнейшей обточке, т.е. перемещении резца от задней бабки к передней, отжатие задней бабки уменьшается, но возникает отжатие передней бабки $у_{пб}$ и заготовки $у_{заг}$. Следовательно в некотором сечении А-А фактический диаметр обтачиваемой заготовки оказывается равным:

$$d_{факт}^{A-A} = d_{настр}^{A-A} + 2(y_{зб}^{A-A} + y_{пб}^{A-A} + y_{инстр}^{A-A} + y_{заг}^{A-A}) . \qquad (8)$$

Поскольку упругие отжатия элементов технологической системы (ТС) (кроме $у_{инстр}$) изменяются по длине обрабатываемой заготовки, её диаметр, а следовательно и форма, оказываются переменными по длине.

Под жесткостью j ТС подразумевают способность этой системы оказывать сопротивление действию деформирующих её сил:

$$j = \frac{P_y}{y}; \text{ или } j = \frac{\Delta P_y}{\Delta y}; \qquad (9)$$

Иногда удобнее пользоваться понятием податливости:

$$\omega = \frac{1}{j}; \quad \omega = \frac{y}{P_y};$$

поскольку всегда

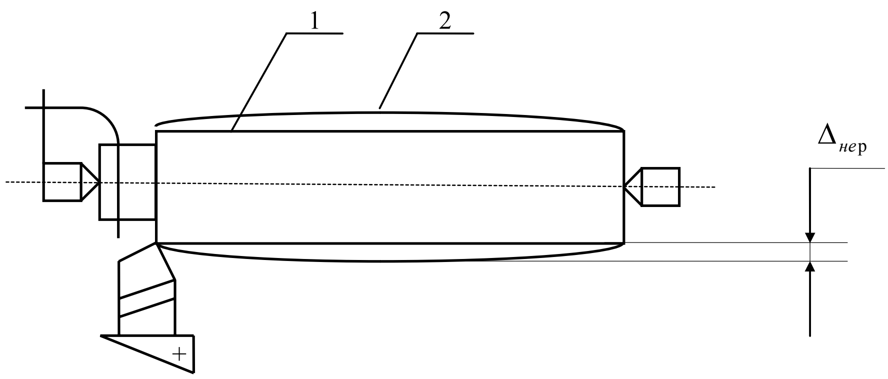
$$\omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \ldots + \omega_n, \qquad (10)$$

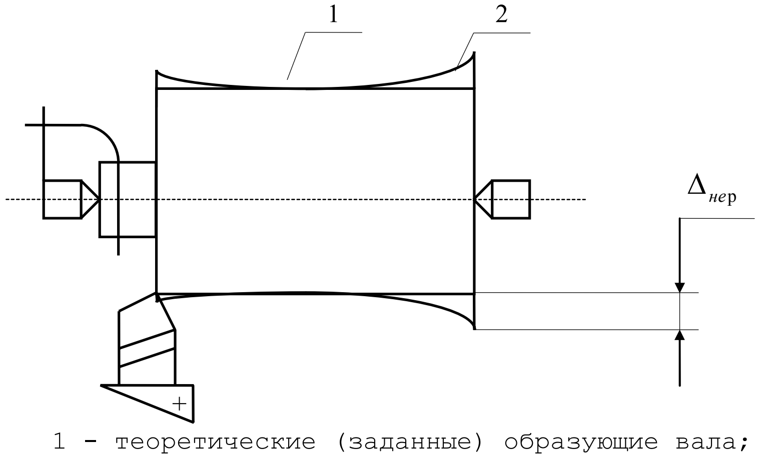
а

$$\frac{1}{j} = \frac{1}{j_1} + \frac{1}{j_2} + \frac{1}{j_3} + \ldots + \frac{1}{j_n}, \qquad (11)$$

где ω_i и j_i - податливость и жесткость i-го элемента ТС.

Если жесткость элементов станка очень велика, а жесткость заготовки мала (обточка длинного и тонкого вала на массивном станке), то отжатия $у_{пб}$ и $у_{зб}$ малы, а $у_{заг}$ значительно. В результате этого форма заготовки станет бочкообразной. Наоборот, при обработке массивной заготовки, дающей минимальный прогиб, на станке малой жесткости ($у_{пб}$ и $у_{зб}$ значительны) форма заготовки получается корсетообразной с наименьшим диаметром в середине заготовки.





1 - теоретические (заданные) образующие вала;
2 - фактические (полученные) образующие вала.

При обтачивании гладкого вала в центрах можно определить величину его прогиба, как прогиба балки, свободно лежащей на двух опорах. Наибольший прогиб вала по его середине

$$y_{заг} = \frac{P_y L^3}{48EI}, \qquad (12)$$

где L - длина заготовки; E - модуль упругости; I - момент инерции сечения заготовки: для круглого вала $I=0{,}05D^4$.

Прогиб заготовки в данном случае в любом сечении, расположенном на расстоянии x от передней бабки

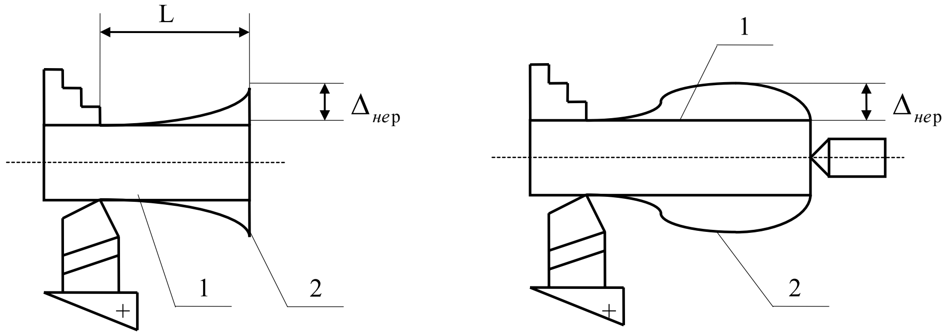
$$y_{заг} = \frac{P_y}{3EI} \cdot \frac{x^2 (L-x)^2}{L}. \qquad (13)$$

Для гладкого вала, консольно закрепленного в патроне,

$$y_{заг} = \frac{P_y L^3}{3EI}. \qquad (14)$$

Если такой валик подпереть центром задней бабки, то

$$y_{заг} = \frac{P_y L^3}{100EI}. \qquad (15)$$



ПОГРЕШНОСТИ, ЯВЛЯЮЩИЕСЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬЮ Δ_y
(ОБУСЛОВЛЕННЫЕ НЕСТАБИЛЬНОСТЬЮ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ВСЛЕДСТВИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ)

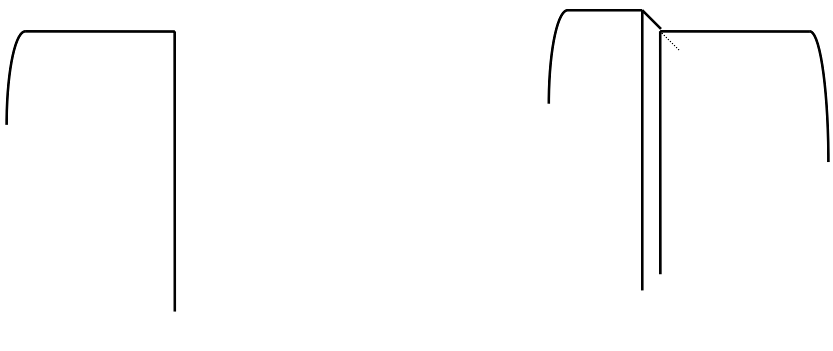
Известно, что радиальная составляющая силы резания определяется следующей формулой:

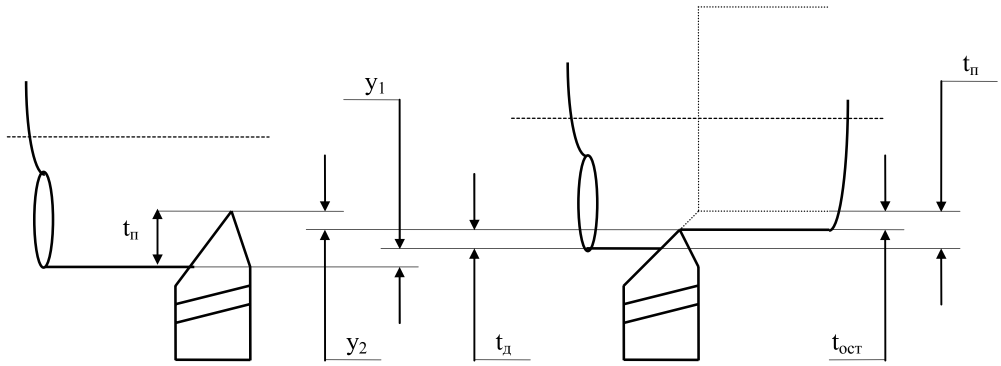
$$P_y = C_{P_y} \cdot s^{y_{P_y}} \cdot t^{x_{P_y}} \cdot HB^n. \qquad (16)$$

Будем считать, что скорость подачи и твердость обрабатываемого материала - величины постоянные, т.е. изменяющимся (нестабильным) фактором является только глубина резания t. Тогда, формулу (16) можно переписать в виде:

$$P_y = C t^{x_{P_y}}. \qquad (17)$$

В процессе обработки имеют место упругие отжатия: заготовки на величину y_1 и инструмента на величину y_2. Поэтому предполагаемая глубина резания $t_п$ уменьшается до фактической (действительной),как это показано на рисунке:





Можно записать, что

$$у_1+у_2=t_п-t_д=t_{ост}\ , \qquad (17)$$

причем

$$у_1=\frac{P_y}{j_{заг}};\quad у_2=\frac{P_y}{j_{инст}}. \qquad (18)$$

Поэтому

$$t_{ост}=у_1+у_2=P_y\left(\frac{1}{j_{заг}}+\frac{1}{j_{инст}}\right)=\frac{P_y}{j}\ , \qquad (19)$$

где $j_{заг}$, $j_{инст}$, j - жесткости соответственно заготовки, инструмента и суммарная.

Относительно радиальной составляющей силы резания можно записать следующую систему уравнений:

$$P_y=Ct_д^{\,x_{P_y}}; \qquad (20)$$

$$P_y=t_{ост}\cdot j\ .$$

Из этой системы определяется $t_{ост}$:

$$t_{ост}=\frac{C\cdot t_д^{\,x_{P_y}}}{j}\ . \qquad (21)$$

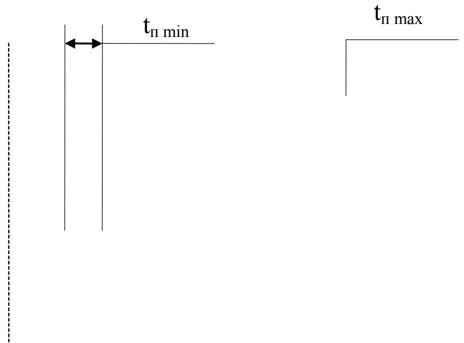
Учитывая, что в соответствии с (17) $t_д=t_п-t_{ост}$,получается:

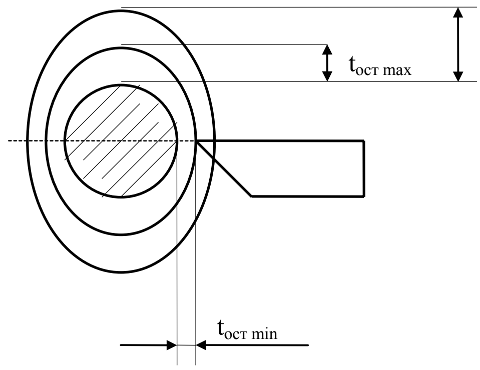
$$t_{ост}=\frac{C\cdot(t_n-t_{ост})^{x_{P_y}}}{j}\ . \qquad (22)$$

Из уравнения (22) величина $t_{ост}$ может быть определена численными методами. Однако, учитывая что для большинства обрабатываемых материалов $x_{p_y}\cong 1$,приняв $x_{p_y}=1$ имеем:

$$t_{ост}=\frac{\dfrac{Ct_n}{j}}{1+\dfrac{c}{j}}\ . \qquad (23)$$

Предположим, что на обрабатываемой заготовке имеется погрешность формы - овальность. Тогда непостоянство свойств срезаемого слоя приводит к колебаниям силы резания, вследствие изменения глубины резания в процессе стружкообразования по следующей схеме:





Рассматриваемая погрешность Δ y определяется как:

$$\Delta y = t_{ост.max} - t_{ост.min} \ , \qquad (24)$$

где $t_{ост.max}$ и $t_{ост.min}$ - наибольшее и наименьшее значения величины $t_{ост}$, соответствующие наибольшему и наименьшему отжатиям в технологической системе.

Соответственно, искомая погрешность, определяемая формулой (24), выразится в следующем виде:

$$\Delta y = \frac{\frac{C}{j}(t_{n\max} - t_{n\min})}{1 + \frac{c}{j}} . \qquad (25)$$

Замечая, что

$$t_{п\ max} - t_{п\ min} = \Delta_{заг} \ , \qquad (26)$$

окончательно получаем:

$$\Delta y = \frac{c\Delta_{заг}}{j + c} . \qquad (27)$$

Анализируя уравнение (27), можно отметить, что при малой жесткости системы (малые j) исправления формы заготовки не происходит: исходная погрешность наследуется полностью. С увеличением жесткости технологической системы возрастает т.н. «уточнение«, определяемое как:

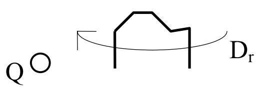
$$q = \frac{\Delta_{заг}}{\Delta_{дет}}, \qquad (28)$$

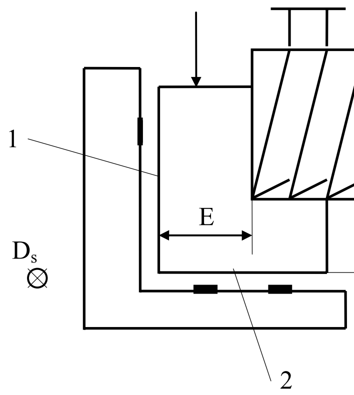
где q - уточнение, обеспечиваемое данным оборудованием.

ПОГРЕШНОСТИ УСТАНОВКИ ЗАГОТОВКИ ε

Погрешность установки ε заготовок в приспособлении состоит из погрешности базирования $\varepsilon_б$, погрешности закрепления $\varepsilon_з$ и погрешности положения заготовки $\varepsilon_{пр}$, вызываемой неточностью приспособления.

Погрешностью закрепления $\varepsilon_з$ называется разность предельных расстояний от исходной базы до установленного на размер инструмента в результате смещения обрабатываемых заготовок под действием силы закрепления.



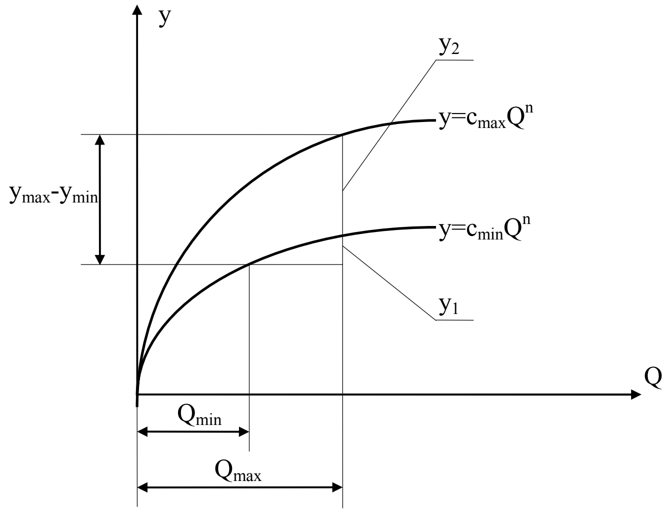


Погрешность закрепления заготовки относительно размера А не равна нулю ($\varepsilon_{зА} \neq 0$), тогда как для размера Е она равна нулю ($\varepsilon_{зЕ}=0$), т.к. исходная база 1 не перемещается при закреплении заготовки.

Наибольшие перемещения исходной базы 2 наблюдаются в стыке заготовка - установочные элементы. Зависимость контактных деформаций для таких стыков выражается в общем виде нелинейной закономерностью

$$y=cQ^n, \qquad (29)$$

где c - коэффициент, характеризующий вид контакта, материал заготовки, шероховатость поверхности, структуру поверхностного слоя. Для партии заготовок при данной схеме установки этот коэффициент изменяется от c_{min} до c_{max} ; Q - сила, действующая на установочный элемент (опору); n - показатель степени, причем $n<1$.



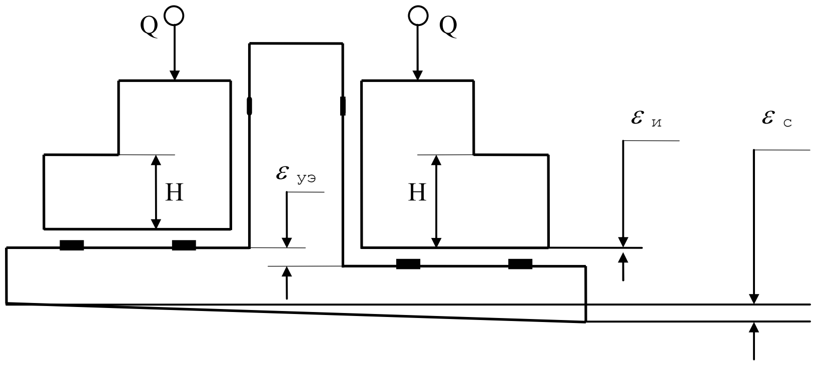
В зажимных устройствах приспособлений сила закрепления при обработке партии заготовок колеблется от Q_{min} до Q_{max} . Применительно к размеру А :

$$\varepsilon_з = y_{max} - y_{min} . \qquad (30)$$

Погрешность положения заготовки $\varepsilon_{пр}$, вызываемая неточностью приспособления, определяется ошибками изготовления и сборки его установочных элементов $\varepsilon_{уэ}$, их прогрессирующим износом $\varepsilon_и$, а также ошибками установки и фиксации приспособления на станке $\varepsilon_с$.

Составляющая $\varepsilon_{уэ}$ при использовании одного приспособления представляет собой систематическую постоянную погрешность, которую можно устранить соответствующей настройкой станка. При использовании нескольких одинаковых приспособлений (приспособлений-дублеров и приспособлений-спутников),а также многоместных приспособлений, эта погрешность не компенсируется и входит полностью в погрешность $\varepsilon_{пр}$.

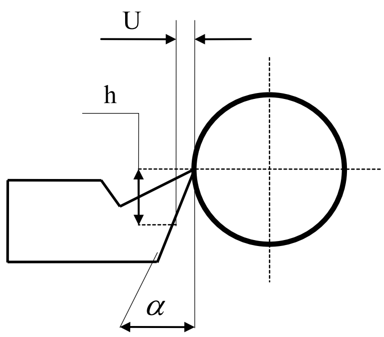
Величины $\varepsilon_с$, $\varepsilon_{уэ}$ и $\varepsilon_и$ покажем на примере двухместного приспособления. Они влияют на размер H, выдерживаемый при обработке.



Составляющая $\varepsilon_с$ возникает в результате смещений и перекосов корпуса приспособления на столе, планшайбе или шпинделе станка. При многократном периодическом переустанавливании приспособления, $\varepsilon_с$ является не компенсируемой случайной величиной, изменяющейся в определенных пределах. При однократном неизменном закреплении приспособления на станке, величина $\varepsilon_с$ остается постоянной в течение эксплуатации данного приспособления.

ПОГРЕШНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ РАЗМЕРНЫМ ИЗНОСОМ ИНСТРУМЕНТА $\Delta_и$

При обработке резанием износ инструмента происходит по задней поверхности, следствием чего является "отдаление" главного режущего лезвия от обрабатываемой поверхности на величину U.

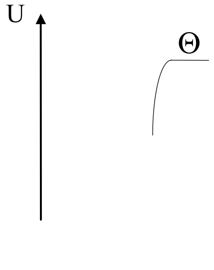


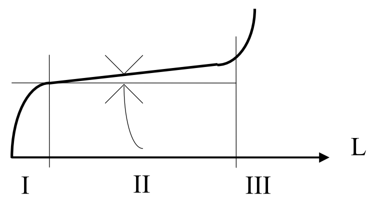
В направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности, величину U можно определить по формуле:

$$U = h \cdot tg\,\alpha \,, \qquad (31)$$

где h - ширина ленточки износа по задней поверхности; α - главный задний угол.

Размерный износ инструмента происходит по следующему закону.





Первый период работы инструмента называется "приработкой" и характеризуется непродолжительностью и повышенным размерным износом. Второй (основной) период характеризуется равномерным износом инструмента, а соответствующий участок кривой прямолинеен и наклонен к оси абсцисс под небольшим углом. Третий период соответствует катастрофическому износу инструмента.

Интенсивность размерного износа на втором участке называют относительным (удельным) износом инструмента:

$$u = tg\Theta = \frac{U}{L} \left[\frac{мкм}{км}\right], \qquad (32)$$

где U - размерный износ инструмента, полученный за время основного периода его работы; L - путь резания, соответствующий этому же периоду работы инструмента.

Погрешность может рассматриваться как переменная систематическая или случайная погрешность с равномерным законом распределения.

ПОГРЕШНОСТЬ НАСТРОЙКИ $\Delta_н$

Настройкой называется процесс подготовки технологического оборудования и технологической оснастки к выполнению определенной технологической операции.

Известны два принципиально различных метода настройки.

По первому методу установку режущего инструмента производят последовательным приближением к заданному настроечному размеру в результате обработки на станке пробных деталей, размеры которых проверяют универсальными измерительными инструментами. По данным проверки пробных деталей определяют величину и направление необходимого смещения инструмента.

По второму методу режущий инструмент устанавливают в требуемое, заранее определенное по эталону положение в нерабочем (статическом) состоянии станка или вне его.

Погрешностью настройки $\Delta_н$ называют поле рассеяния положений инструмента (расстояние между двумя его предельными положениями).

При выполнении настройки по пробным заготовкам $\Delta_н$ состоит из погрешности измерения $\Delta_{изм}$ пробных заготовок, погрешности регулирования $\Delta_{рег}$ положения инструмента, а также погрешностью метода расчета $\Delta_{расч}$ смещения инструмента.

При этом

$$\Delta_{расч} = \pm\frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \qquad (33)$$

где σ - среднее квадратическое отклонение, характеризующее точность данного метода обработки; n - число пробных заготовок (n = 5...10). Приближенно можно считать, что

$$\sigma = \frac{T_\omega}{6}, \qquad (34)$$

где T_ω - поле допуска, соответствующее средней экономической точности данного метода обработки.

При установке инструмента по эталону, необходимое положение инструментов в радиальном и продольном направлениях определяют доведением их режущих кромках до соприкосновения с соответствующими поверхностями эталона. При этом $\Delta_н$ зависит от погрешности изготовления эталона $\Delta_{изг.эт}$, которая может находиться в пределах 10 - 20 мкм, а также погрешность установки инструмента $\Delta_{уст.инст}$, которая составляет 2 - 50 мкм.

ПОГРЕШНОСТЬ ОТ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ $\Delta_т$

Нагрев технологической системы происходит под действием тепла, выделяющегося в зоне резания и в частях станка в результате потерь на трение. Тепловое состояние системы может быть стационарным и нестационарным в зависимости от соотношения подводимого и отводимого тепла.

Тепловые деформации заготовки определяют по средней температуре ее нагрева:

$$t=\frac{Q}{cV\rho}, \qquad (35)$$

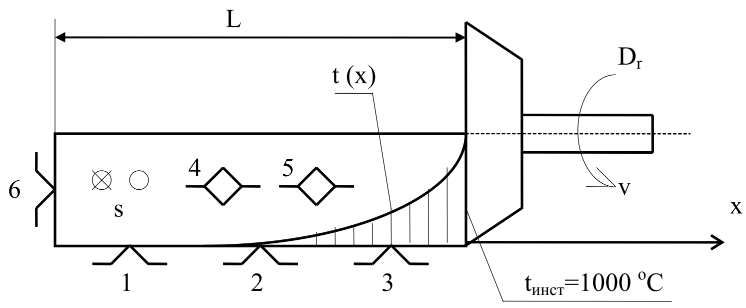
где Q - полученное заготовкой тепло резания, ккал; c - удельная теплоемкость материала заготовки, ккал/кг·К ; ρ - плотность материала заготовки, кг/см^3 ; V - объем заготовки, см^3 .

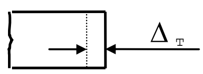
Тепловое расширение (деформация) в направлении линейного размера L:

$$\Delta_T = \alpha Lt, \qquad (36)$$

где α - температурный коэффициент линейного расширения материала заготовки.

Например, при шлифовании призматической заготовки:





Удлинение заготовки может быть определено в виде:

$$\Delta_T = \alpha \int_o^L t(x)dx \qquad (37)$$

При нестационарном тепловом поле заготовки процесс нагрева можно выразить уравнением теплопроводности:

$$a\nabla^2 t = \frac{\partial t}{\partial \tau}, \qquad (38)$$

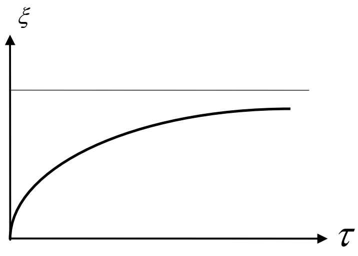
где $a=\frac{\lambda}{c\rho}$, причем λ -коэффициент теплопроводности, τ - время;

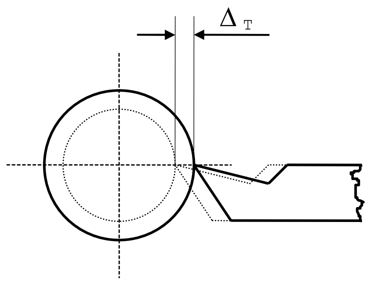
$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}.$$

При одномерном тепловом потоке

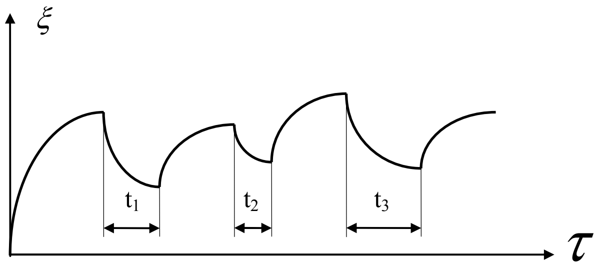
$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\ . \qquad (39)$$

Тепловые деформации ξ режущего инструмента могут достигать при обычных условиях 30 - 50 мкм и вызывают погрешность обработки $\Delta_{т}$ по следующей схеме:





Изменение длины резца при обработке партии заготовок имеет следующий вид:



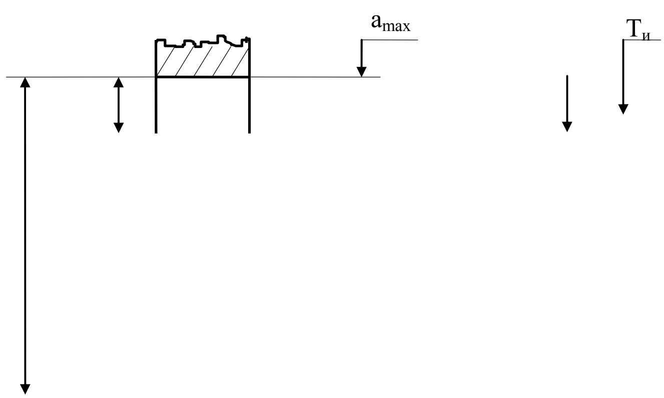
При отсутствии ритмичности ($t_1 \neq t_2$,$t_2 \neq t_3$) деформации резца различны. В этом случае возникает рассеяние размеров деталей в партии.

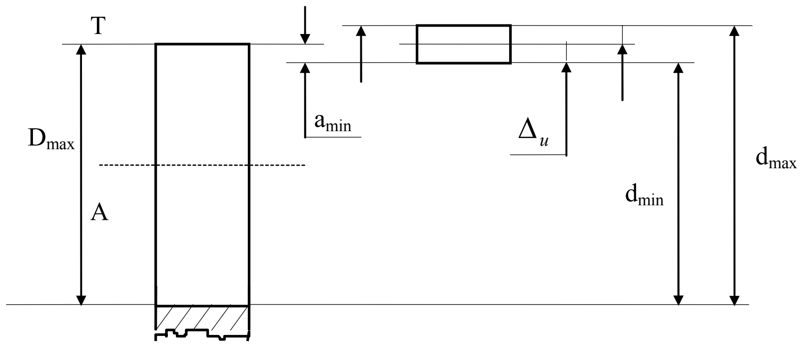
ПРАВИЛА СЛОЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

1. Систематические погрешности складываются алгебраически, т.е. с учетом их знака:

$$\overline{\Delta_\Sigma} = \overline{\Delta_1} + \overline{\Delta_2} + \ldots + \overline{\Delta_n}\ . \qquad (40)$$

В качестве примера определим суммарную погрешность механической обработки при сверлении отверстия в печатной плате. То же относится и к обработке любым размерным инструментом, т.е. для случаев, когда выдерживаемый размер определяется копированием размера инструмента.





Здесь обозначено: a_{max} - увеличение диаметра (разбивка) отверстия при наибольшем размере инструмента d_{max}; $T_и$ - допуск на диаметр инструмента, т.е. погрешность его изготовления, $\Delta_и$ - допустимый износ при наименьшем предельном размере инструмента, a_{min} - увеличение диаметра отверстия при допустимом наименьшем диаметре инструмента с учетом его размерного износа. Суммарная погрешность, таким образом, составит:

$$\Delta_\Sigma = T = a_{max} + T_и + \Delta_и - a_{min} . \qquad (41)$$

Пользуясь этой формулой, можно решать и обратную задачу: по величинам T, a_{max}, a_{min} находить при заданном $\Delta_и$ допуск $T_и$, или при заданном $T_и$ допустимое значение $\Delta_и$.

2. Случайные погрешности суммируются по правилу квадратного корня. В предположении, что Δ_Σ подчиняется нормальному закону распределения, она рассчитывается как:

$$\Delta_\Sigma = t\sqrt{\lambda_1\Delta_1^2 + \lambda_2\Delta_2^2 + \ldots + \lambda_n\Delta_n^2} . \qquad (42)$$

Это обусловлено тем, что дисперсия

$$D\left\{\ \xi + \eta\ \right\} = D\{\xi\} + D\{\eta\} . \qquad (43)$$

В приведенной формуле: t - коэффициент, определяющий процент риска получения брака при обработке: при t=1 процент риска равен 32%, при t=2, он равен 4,5%, при t=3 он равен 0,27%; λ_i - коэффициенты относительного рассеяния характеризующие отклонения действительных кривых нормального распределения.

Для кривой распределения, близкой с нормальной λ=1/9. Для кривой равной вероятности и в случае, когда о формуле кривой распределения ничего неизвестно, рекомендуется принимать λ=1/3. Если форма кривой распределения приближается к форме треугольника, то λ=1/6.

В качестве примера рассмотрим, чему равна погрешность настройки, рассматриваемая как случайная погрешность, состоящая, как указывалось выше, для метода пробных деталей, из $\Delta_{изм}$, $\Delta_{рег}$ и $\Delta_{рас}$.

$$\Delta_н = t\sqrt{\lambda_1\Delta_{изм}^2 + \lambda_2\Delta_{рег}^2 + \lambda_3\Delta_{рас}^2} \qquad (44)$$

Принимаем t=3, поскольку обычно так рекомендуется; $\lambda_1 = \lambda_2$=1/3 - закон равной вероятности, λ_3=1/3 - неизвестный закон, т.к. $\Delta_{расч} = \pm\dfrac{\sigma}{\sqrt{n}}$

Если предполагать что $\Delta_н$ подчиняется нормальному закону распределения, то

$$\Delta_н = 3\sqrt{\frac{1}{3}\Delta_{изм}^2 + \frac{1}{3}\Delta_{рег}^2 + \frac{1}{3}\Delta_{рас}^2} = \sqrt{3}\cdot\sqrt{\Delta_{изм}^2 + \Delta_{рег}^2 + \Delta_{рас}^2} \qquad (45)$$

Если предполагать что, $\Delta_н$ подчиняется закону равной вероятности, то

$$\Delta_н = \sqrt{\Delta^2_{изм} + \Delta^2_{рег} + \Delta^2_{рас}} \qquad (46)$$

Другой пример расчета суммарной погрешности установки, состоящей из $\varepsilon_б$, $\varepsilon_з$ и $\varepsilon_{пр}$. Составляющая $\varepsilon_б$ - случайная погрешность, которая подчиняется закону нормального распределения. Составляющая $\varepsilon_з$ - погрешность закрепления заготовки. Величины $y_1 = C_{min}(Q^n_{max} - Q^n_{min})$ и $y_2 = C_{max}(Q^n_{max} - Q^n_{min})Q^n_{max}$ - случайные, подчиняющиеся нормальному закону распределения, поэтому

$$\varepsilon_з = \sqrt{y_1^2 + y_2^2} \qquad (47)$$

Составляющая $\varepsilon_{пр}$ - погрешность положения заготовки, вызываемая неточностью приспособления, определяется ошибками изготовления и сборки его установочных элементов $\varepsilon_{уэ}$, их прогрессирующим износом $\varepsilon_и$, а также ошибками установки и фиксации приспособления на станке $\varepsilon_с$. Распределение этих величин можно принять по нормальным законам (для приспособлений - спутников):

$$\varepsilon_{пр} = 3\sqrt{\frac{1}{9}\varepsilon^2_{уэ} + \frac{1}{3}\varepsilon^2_и + \frac{1}{9}\varepsilon^2_с} = \sqrt{\varepsilon^2_{уэ} + 3\varepsilon^2_и + \varepsilon^2_с} \qquad (48)$$

Погрешность установки, как суммарное поле рассеивания выполняемого размера

$$\varepsilon_{пр} = \sqrt{\varepsilon^2_б + \varepsilon^2_з + \varepsilon^2_{пр}} \qquad (49)$$

3. Систематические погрешности со случайными складываются арифметически. Поскольку знак случайной погрешности невозможно предвидеть, то нужно считаться с худшим вариантом.

В качестве примера рассмотрим суммарную погрешность, которая возникает при обработке одной партии заготовок в одном приспособлении на одном станке при одной настройке. В этом случае $\Delta_у$ - случайная погрешность, связанная со случайными неравномерностями припуска. $\Delta_н$, $\Sigma\Delta_ф$ - систематические погрешности, причем постоянные. $\Delta_и$ - переменная систематическая погрешность, но она может рассматриваться, как случайная с равномерным законом распределения. Тогда

$$\Delta_\Sigma = 3\sqrt{\frac{1}{9}\Delta^2_у + \frac{1}{9}\varepsilon^2 + \frac{1}{3}\Delta^2_и + \frac{1}{3}\Delta^2_Т} + \Delta_н + \Sigma\Delta_ф \qquad (50)$$

Сокращая коэффициенты, получаем:

$$\Delta_\Sigma = \sqrt{\Delta^2_у + \varepsilon^2 + 3\Delta^2_и + 3\Delta^2_Т} + \Delta_н + \Sigma\Delta_ф \qquad (51)$$

ε и $\Delta_т$ - случайные погрешности, причем в этом случае

$$\varepsilon = \varepsilon_{пр} + \sqrt{\varepsilon^2_б + \varepsilon^2_з}\ . \qquad (52)$$