

УДК 621.923

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЯ С НАЧАЛЬНОЙ ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ НЕКРУГЛОСТЬЮ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Иванов И.Е., Рябенков И.А.
(Харьковский национальный экономический университет)

Проблема создания высокоточных отверстий является актуальной для машиностроения. В настоящее время накоплен большой опыт в данном направлении [1,2]. Однако, все возрастающие требования к точности и качеству обработки отверстий ставят новые задачи по созданию более совершенных технологий. Для этого важно провести теоретический анализ формирования погрешностей при обработке отверстия с начальной значительной некруглостью, т.е. при обработке отверстия с неравномерно снимаемым припуском. Поэтому цель работы – разработка математической модели определения погрешностей обработки отверстия и на ее основе выявления условий уменьшения погрешностей.

В основу работы положены теоретические решения, полученные в наших работах [3, 4, 5]. Для обобщенного анализа погрешностей обработки отверстия, обусловленных упругими перемещениями в технологической системе, рассмотрим первоначально более простую схему механической обработки – схему продольного точения, рис. 1. Как известно [2], возникающую в процессе обработки силу резания P можно разложить на три составляющие: тангенциальную P_z , радиальную P_y и осевую P_x . Под действием радиальной составляющей силы резания P_y происходит упругое перемещение (преимущественно обрабатываемой детали) в направлении оси ou . Величина упругого перемещения y аналитически может быть описана:

$$y = \frac{P_y}{c}, \quad (1)$$

где c – жесткость технологической системы в направлении оси ou , Н/м.

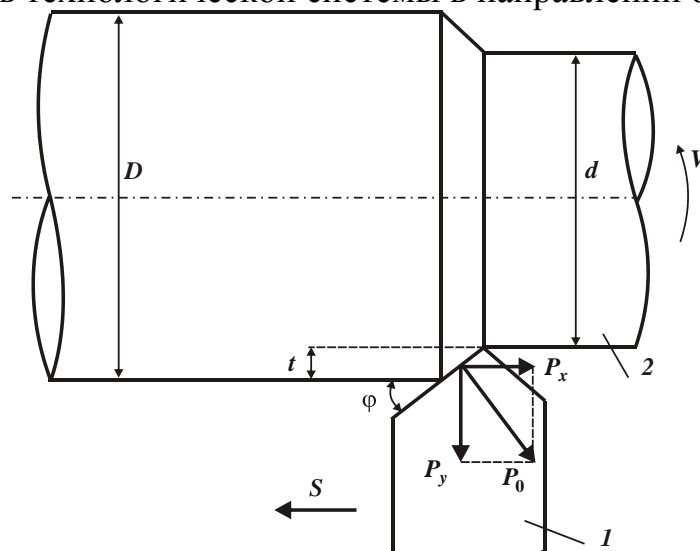


Рис. 1. Расчетная схема продольного точения: 1 – резец;

2 – обрабатываемая деталь.

Радиальную P_y и осевую P_x составляющие силы резания выразим через равнодействующую силу $P_0 = \sqrt{P_y^2 + P_x^2}$, возникающую в плоскости uox :

$$P_y = P_0 \cdot \cos \varphi, \quad (2)$$

$$P_x = P_0 \cdot \sin \varphi, \quad (3)$$

где φ – угол резца в плане, град.

Характер изменения составляющих силы резания P_y и P_x от угла резца в плане φ показан на рис. 2. Как видно, с увеличением угла φ радиальная составляющая силы резания P_y уменьшается, а осевая составляющая силы резания P_x , наоборот, увеличивается. Следовательно, изменение угла резца в плане φ позволяет регулировать направлением действия силы резания, что очень важно с точки зрения уменьшения упругого перемещения в технологической системе в радиальном направлении, определяющего погрешность обработки.

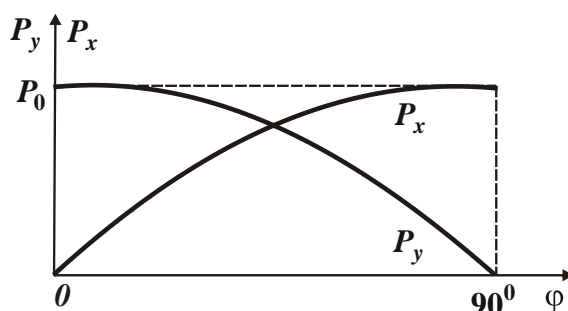


Рис. 2. Зависимости составляющих силы резания P_y и P_x от угла резца в плане φ .

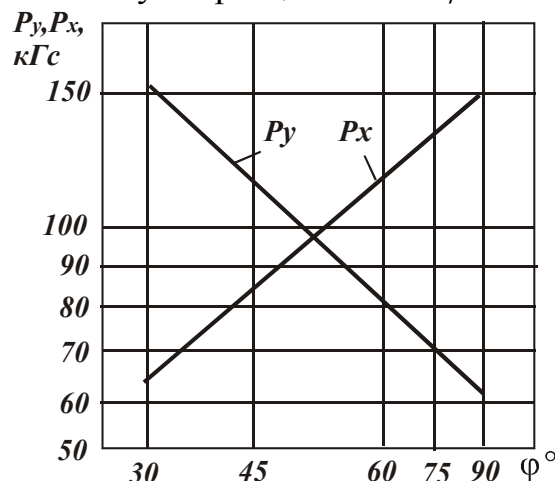


Рис. 3. Влияние главного угла в плане на составляющие силы резания P_y и P_x при точении (сталь 40; $t = 3$ мм; $S = 0,6$ мм/об).

Теоретические результаты согласуются с известными экспериментальными данными, приведенными в работе [2]. Так, с увеличением угла резца в плане φ осевая составляющая силы резания P_x увеличивается, а

радиальная составляющая силы резания P_y , наоборот, уменьшается, рис. 3. Используя экспериментальные данные P_x и P_y , в табл. 1 приведены расчетные значения отношения P_x/P_y , равного, исходя из зависимостей (2) и (3), тангенсу угла φ' (соответствующего углу резца в плане). Иными словами, $P_x/P_y = \operatorname{tg} \varphi'$.

Таблица 1

Расчетные значения P_x/P_y и φ'

φ , град	30	45	60	75	90
P_x/P_y	0,437	0,818	1,294	2,076	2,42
φ' , град	24	40	53	65	68

Как следует из табл. 1, угол φ' меньше угла резца в плане φ . Причем, в диапазоне $\varphi=30\dots75^\circ$ их отличие не столь значительно. Наибольшее расхождение значений углов φ и φ' имеет место при $\varphi=90^\circ$. Это может быть связано с особенностями процесса стружкообразования при несвободном резании.

К аналогичным результатам приходим, анализируя экспериментальные данные, приведенные на рис. 4 [2]. Как видно, с уменьшением переднего угла резца γ тангенциальная P_z , радиальная P_y и осевая P_x составляющие силы резания увеличиваются, однако с разной интенсивностью. В табл. 2 приведены расчетные значения $P_x/P_y = \operatorname{tg} \varphi'$, а также значения угла φ' .

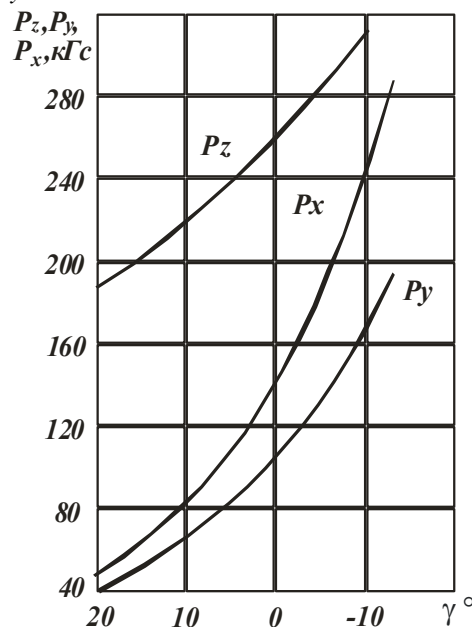


Рис. 4. Влияние переднего угла на составляющие силы резания P_z, P_y, P_x при точении (сталь 40; $\varphi=60^\circ$; $t=4$ мм; $S=0,285$ мм/об; $V=40$ м/мин).

Как следует из табл. 2, экспериментально установленные значения φ' меньше истинного значения угла резца в плане $\varphi=60^\circ$. Однако их расхождение

незначительно – в пределах 8...16%. Это свидетельствует о возможности практического использования полученных аналитических зависимостей (2) и (3).

Таблица 2

Расчетные значения P_x/P_y и φ' для $\varphi=60^0$

γ , град	20	10	0	-10
P_x/P_y	1,125	1,23	1,33	1,41
φ' , град	50	51	54	55

Выразим силу P_0 в зависимостях (2) и (3) через тангенциальную составляющую силы резания P_z :

$$P_0 = \frac{P_z}{K_{рез}}, \quad (4)$$

где $K_{рез}$ – коэффициент резания (при точении, как правило, $K_{рез} \geq 1$).

С учетом зависимостей (2) и (3) величина упругого перемещения y , определяемая зависимостью (1), выразится:

$$y = \frac{P_z}{c \cdot K_{рез}} \cdot \cos \varphi. \quad (5)$$

Тангенциальную составляющую силы резания P_z представим [3]:

$$P_z = \sigma \cdot S_{срез}, \quad (6)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; $S_{срез}$ – площадь поперечного сечения среза, м².

Тогда зависимость (5) примет вид:

$$y = \frac{\sigma \cdot S_{срез}}{c \cdot K_{рез}} \cdot \cos \varphi. \quad (7)$$

Как следует из зависимости (7), уменьшить величину упругого перемещения y можно уменьшением параметров σ , $S_{срез}$ и увеличением c , $K_{рез}$ и φ . Выразим площадь поперечного сечения среза $S_{срез}$ через параметры режима резания. Для этого рассмотрим расчетную схему продольного точения, представленную на рис. 1. Толщина a и ширина b среза выражаются тригонометрическими соотношениями:

$$a = S \cdot \sin \varphi, \quad (8)$$

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}, \quad (9)$$

где S – продольная подача, м/об; $t = \frac{D-d}{2}$ – глубина резания, м; D, d – соответственно диаметры обрабатываемой и обработанной поверхностей детали, м.

Очевидно, произведение параметров $a \cdot b$ определяет площадь поперечного сечения среза $S_{\text{срез}}$, т.е.

$$S_{\text{срез}} = a \cdot b = S \cdot t . \quad (10)$$

Как видно, $S_{\text{срез}}$ выражается произведением подачи S и глубины резания t . Угол резца в плане φ на $S_{\text{срез}}$ влияния не оказывает.

Необходимо отметить, что площадь поперечного сечения среза $S_{\text{срез}}$ функционально связана с производительностью обработки Q зависимостью:

$$Q = S_{\text{срез}} \cdot V = S \cdot t \cdot V , \quad (11)$$

где V – скорость резания, м/с.

Из зависимости (11) следует, что чем больше параметры режима резания S, t и V , тем больше производительность обработки Q .

Подставим зависимость (10) в зависимость (7):

$$y = \frac{\sigma \cdot S \cdot t}{c \cdot K_{\text{рез}}} \cdot \cos \varphi . \quad (12)$$

Из зависимости (12) следует, что уменьшить величину упругого перемещения y и соответственно погрешность обработки можно, в первую очередь, за счет уменьшения параметров режима резания S, t , поскольку они линейно связаны с величиной y . Однако, исходя из зависимости (11), это предполагает уменьшение производительности обработки Q , что не всегда эффективно. Поэтому более эффективно в зависимости (12) уменьшить отношение $\sigma / K_{\text{рез}}$ или увеличить жесткость технологической системы c и угол резца в плане φ . Представим отношение $\sigma / K_{\text{рез}}$ в виде:

$$\frac{\sigma}{K_{\text{рез}}} = \sigma \cdot \frac{P_0}{P_z} = \frac{P_0}{S_{\text{срез}}} = \frac{\sqrt{P_y^2 + P_x^2}}{S \cdot t} . \quad (13)$$

По аналогии с условным напряжением резания $\sigma = P_z / S_{\text{срез}}$ (по сути, условным нормальным напряжением резания) отношение $\sigma / K_{\text{рез}} = P_0 / S_{\text{срез}}$ определяет условное касательное напряжение резания. Поэтому в дальнейшем $\sigma / K_{\text{рез}}$ будем рассматривать как условное касательное напряжение резания.

С физической точки зрения, существенно уменьшить и даже исключить упругие перемещения в технологической системе при точении можно, приложив к обрабатываемой детали силу P_y , противоположно направленную действующей силе P_y . Это возможно, например, при точении детали двумя резцами, расположенными в соответствии со схемой (рис. 5), с их абсолютно жестким закреплением. Кроме исключения упругих перемещений, данная схема точения позволит в два раза увеличить производительность обработки.

Исключить упругие перемещения в технологической системе при обработке отверстия можно аналогичным способом, расположив два резца в соответствии со схемой, показанной на рис. 6. Жестко соединив резцы между

собой, мы приходим к осевому многолезвийному инструменту, в частности, сверлу, и к принципиальной схеме сверления. Из этого вытекает, что существующая на практике схема сверления по своей сути исключает образование упругих перемещений в технологической системе, т.е. представляет собой идеальную в данном плане схему обработки. При традиционном способе точения цилиндрической поверхности одним резцом, в отличие от схемы сверления, возникают упругие перемещения y , которые приводят к погрешностям обработки.

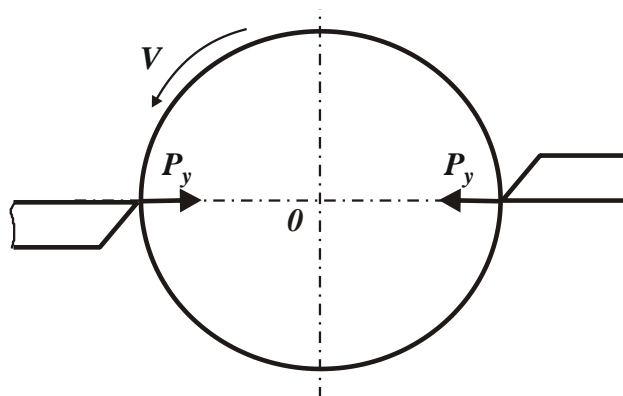


Рис. 5. Схема точения детали двумя резцами.

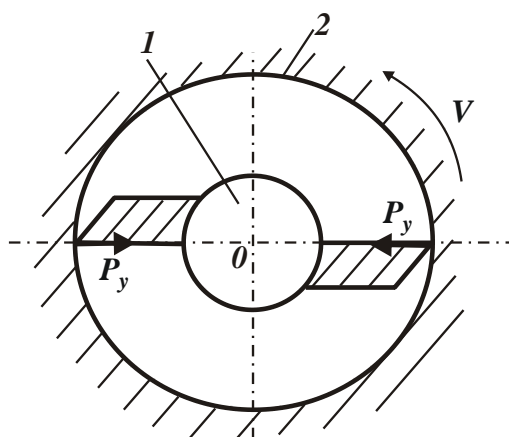


Рис. 6. Схема обработки отверстия: 1 – осевой многолезвийный инструмент; 2 – обрабатываемая деталь.

Сделанный выше вывод справедлив при сверлении отверстия в сплошном материале или же при рассверливании отверстия симметричной формы, ось которого совпадает с осью сверла, рис. 7. Если же рассматривать рассверливание отверстия (в горловине баллона) с начальной значительной некруглостью и характеризующегося неравномерным снимаемым припуском, то вследствие разных значений глубины резания оба лезвия сверла будут испытывать неодинаковые нагрузки. Это приведет к нарушению условия равновесия сил P_{y1} и P_{y2} , действующих на оба лезвия, соответственно к возникновению упругих деформаций (изгибу) сверла и обрабатываемого баллона и появлению погрешностей обработки в виде смещения оси отверстия от номинального положения и отклонения оси отверстия от прямолинейности.

При значительной неравномерности нагрузки, вызывающей изгиб сверла, возможна его поломка.

Исходя из этого, величина упругого перемещения y , возникающего в технологической системе, определится:

$$y = \frac{\Delta P_y}{c}, \quad (14)$$

где $\Delta P_y = P_{y1} - P_{y2}$ – наибольшая разница радиальных составляющих сил резания, действующих на оба лезвия сверла, Н; c – жесткость технологической системы, Н/м (зависит от жесткости инструмента и обрабатываемого баллона).

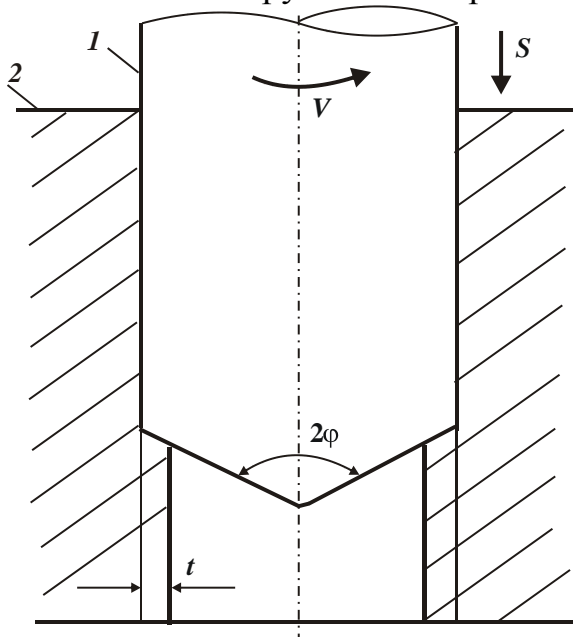


Рис. 7. Принципиальная схема рассверливания отверстия:
1 – сверло; 2 – обрабатываемая деталь.

С учетом зависимости (12) зависимость (14) примет вид:

$$y = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_1}{c \cdot K_{рез}} \cdot \cos \varphi - \frac{\sigma \cdot S \cdot t_2}{c \cdot K_{рез}} \cdot \cos \varphi = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{S \cdot \Delta t}{c} \cdot \cos \varphi, \quad (15)$$

где $\Delta t = t_1 - t_2$ – разность глубин резания, приходящихся на оба лезвия сверла, м; S – подача, приходящаяся на одно лезвие сверла, м/об.

Как видно, в зависимость (15) входит неопределенная величина Δt , требующая математического представления и анализа.

Необходимо отметить, что в образовании погрешности обработки отверстия кроме радиальной составляющей силы резания будет участвовать и тангенциальная составляющая силы резания. Так, сила $\Delta P_z = P_{z1} - P_{z2}$ (где P_{z1} , P_{z2} – значения тангенциальной составляющей силы резания, действующей на оба лезвия сверла, Н) вызовет смещение оси сверла O_1 вдоль координатной оси ou на величину Δ в положение O_2 , рис. 8,а. Оценим, как это повлияет на погрешность размера обрабатываемого отверстия $\Delta_R = O_1A - R$, где R – радиус сверла, м ($O_2A = R$).

Длина отрезка O_1A определяется по теореме Пифагора: $O_1A = \sqrt{R^2 + \Delta^2}$. Тогда $\Delta_R = \sqrt{R^2 + \Delta^2} - R$. В табл. 3 приведены расчетные значения Δ_R в зависимости от величины Δ для $R=11$ мм.

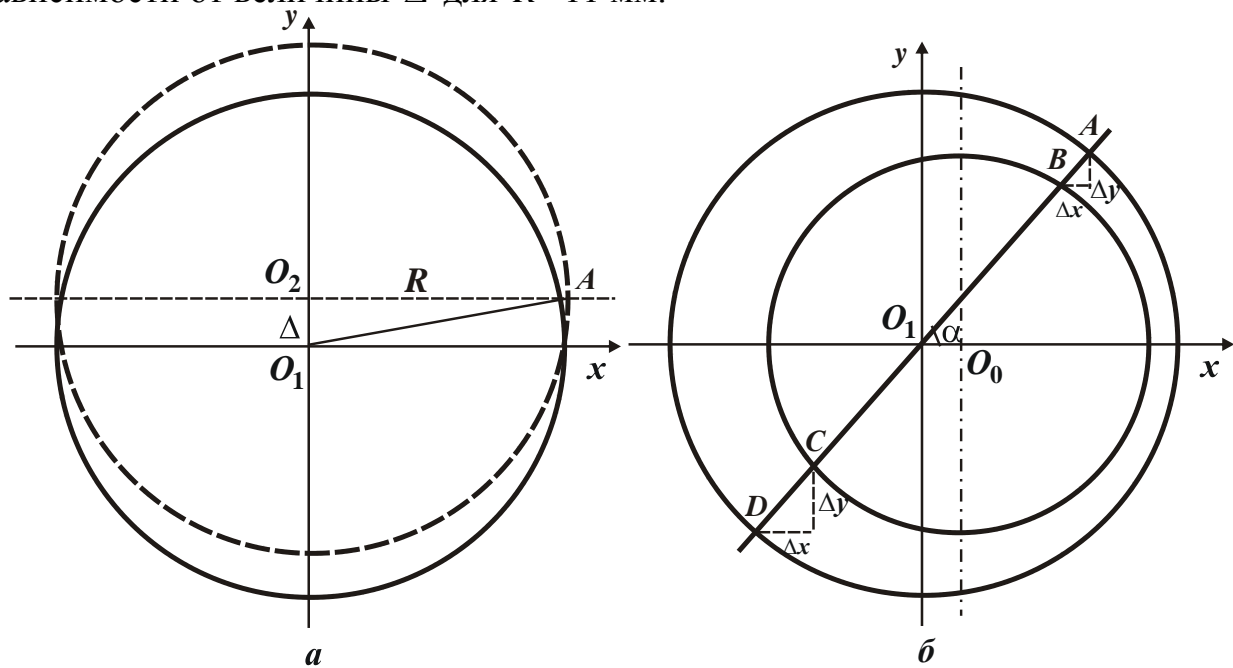


Рис. 8. Расчетные схемы погрешностей обработки отверстия.

Таблица 3

Расчетные значения Δ_R и отношения Δ / Δ_R

Δ , мм	0,1	0,3	0,5	1,0
Δ_R , мм	0,00045	0,004	0,011	0,045
Δ / Δ_R	222,2	75,0	45,5	22,2

Как следует из табл. 3, погрешность обработки отверстия Δ_R , вызванная смещением оси сверла Δ от действия силы $\Delta P_z = P_{z1} - P_{z2}$, весьма незначительна, на много меньше самого смещения Δ . Например, если от действия силы $\Delta P_y = P_{y1} - P_{y2}$ погрешность обработки отверстия равна $\Delta=1$ мм, то от действия силы ΔP_z она в 22,2 раза меньше, табл. 3. При $\Delta < 1$ мм это отличие еще больше. Этим показано, что погрешность обработки отверстия при рассверливании будет определяться главным образом силой ΔP_y в соответствии с зависимостью (15). Погрешностью обработки отверстия, связанной с действием силы ΔP_z , можно пренебречь.

Если предположить, что обрабатываемое отверстие имеет вид идеальной цилиндрической поверхности, то величину Δt , входящую в зависимость (15), можно выразить аналитически.

Для этого рассмотрим расчетную схему (рис. 8,б), на которой показано взаимное расположение начального (рассверливаемого) отверстия горловины

баллона с осью O_0 и обработанного отверстия с номинальным положением оси сверла O_1 . Рассматривая расстояние $O_0 O_1$ как величину отклонения между осями отверстия горловины баллона и сверла и обозначая ее через Δ_0 , установим значения глубин резания t_1 и t_2 , приходящихся на оба лезвия сверла. Исходя из рис. 8,б примем, что $t_1=CD$, а $t_2=AB$. Для определения длин отрезков CD и AB необходимо знать координаты точек пересечения прямой $y=k \cdot x$ (где $k = \operatorname{tg} \alpha$, α – текущее значение угла наклона лезвий сверла к оси ox) с двумя окружностями радиусами R и r . В данном случае R определяет радиус сверла, а r – радиус рассверливаемого отверстия. Уравнения окружностей имеют вид:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R^2 \\ (x - \Delta_0)^2 + y^2 = r^2 \end{cases} \quad (16)$$

Первоначально установим координаты точек A и D пересечения окружности радиусом R (с центром O_1 , совмещенным с началом координат) и прямой $y = k \cdot x$, для чего разрешим систему двух уравнений с неизвестными x и y :

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R^2 \\ y = k \cdot x \end{cases} \quad (17)$$

Подставляя второе уравнение системы в первое, и разрешая полученное выражение относительно координаты x , имеем

$$x = \pm \frac{R}{\sqrt{1+k^2}}, \quad (18)$$

откуда получим $x_A = \frac{R}{\sqrt{1+k^2}}$; $x_D = -\frac{R}{\sqrt{1+k^2}}$.

Установим теперь координаты точек B и C пересечения окружности радиусом r (с центром O_1 , смещенным относительно начала координат на величину Δ_0) и прямой $y = k \cdot x$, для чего разрешим систему двух уравнений с двумя неизвестными x и y :

$$\begin{cases} (x - \Delta_0)^2 + y^2 = r^2 \\ y = k \cdot x \end{cases} \quad (19)$$

Подставляя второе уравнение системы в первое, приходим к квадратному уравнению:

$$x^2 - \frac{2 \cdot \Delta_0}{(1+k^2)} \cdot x + \frac{(\Delta_0^2 - k^2)}{(1+k^2)} = 0 \quad (20)$$

Решение квадратного уравнения:

$$x = \frac{1}{(1+k^2)} \cdot \left[\Delta_0 \pm \sqrt{r^2 \cdot (1+k^2) - \Delta_0^2 \cdot k^2} \right], \quad (21)$$

откуда получим

$$x_B = \frac{1}{(1+k^2)} \cdot \left[\Delta_0 + \sqrt{r^2 \cdot (1+k^2) - \Delta_0^2 \cdot k^2} \right];$$

$$x_C = \frac{1}{(1+k^2)} \cdot \left[\Delta_0 - \sqrt{r^2 \cdot (1+k^2) - \Delta_0^2 \cdot k^2} \right].$$

Из рис. 8,б следует, что согласно теореме Пифагора $AB = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}$. С учетом того, что $(y_A - y_B) = k \cdot (x_A - x_B)$, имеем

$$t_2 = AB = (x_A - x_B) \cdot \sqrt{1+k^2}. \quad (22)$$

Аналогичным образом определяется $t_1 = CD = (x_C - x_D) \cdot \sqrt{1+k^2}$. Тогда

$$\Delta t = t_1 - t_2 = CD - AB = (x_C - x_D - x_A + x_B) \cdot \sqrt{1+k^2}. \quad (23)$$

Подставляя в зависимость (2.23) координаты x_A, x_B, x_C, x_D , получим

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \Delta_0}{\sqrt{1+k^2}}. \quad (24)$$

В результате математических преобразований пришли к очень простой аналитической зависимости, из которой следует, что разность глубин резания $\Delta t = t_1 - t_2$, приходящихся на оба лезвия сверла, определяется параметрами Δ_0 и k , и не зависит от радиусов R и r .

Зависимость (24) с учетом выражения $k = \operatorname{tg} \alpha$ можно представить в виде:

$$\Delta t = 2 \cdot \Delta_0 \cdot \cos \alpha. \quad (25)$$

В табл. 4 и на рис. 9 приведены рассчитанные по зависимости (24) значения величины Δt в зависимости от угла α наклона прямой $y = k \cdot x$ к оси ox , а также в зависимости от $k = \operatorname{tg} \alpha$. Как видно, с увеличением угла α и соответственно k величина Δt уменьшается от значения $2 \cdot \Delta_0$ до нуля. Следовательно, наибольшее значение величины Δt достигается при $\alpha = 0$ (или $k = 0$) и оно равно $2 \cdot \Delta_0$, т.е. равного двойному значению величины отклонения между осями Δ_0 отверстия горловины баллона и сверла.

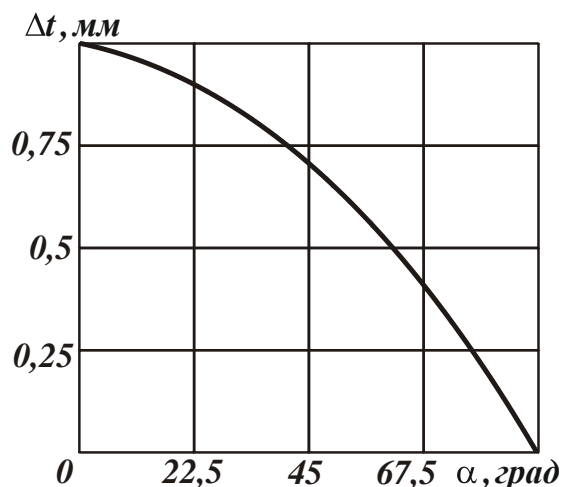


Рис. 9. Зависимость величины Δt от угла α .

Расчетные значения величины Δt для условия $2 \cdot \Delta_0 = 1$ мм

α , град	0	30	45	60	80	90
$k = \operatorname{tg} \alpha$	0	0,577	1,0	1,732	5,671	∞
Δt , мм	1	0,87	0,71	0,5	0,17	0

Установим проекции величины Δt на оси oy и ox с учетом (25):

$$\Delta t_y = \Delta t \cdot \sin \alpha = 2 \cdot \Delta_0 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha = \Delta_0 \cdot \sin 2\alpha, \quad (26)$$

$$\Delta t_x = \Delta t \cdot \cos \alpha = 2 \cdot \Delta_0 \cdot \cos^2 \alpha. \quad (27)$$

На рис. 2.10,а показан график изменения проекции величины Δt на ось oy в зависимости от угла α , рассматривая изменение угла α в отрицательном направлении (при вращении сверла против часовой стрелки). Как видно, проекция Δt_y изменяется по экстремальной зависимости с увеличением угла α . Наибольшее значение Δt_y достигается при условии $\alpha = 45^\circ$ и равно Δ_0 . Соответственно, исходя из зависимости (15), при условии $\alpha = 45^\circ$ будет достигаться наибольшая погрешность обработки отверстия в направлении оси oy . В результате обработанное отверстие будет принимать несимметричный, т.е. отличный от окружности, вид. Как следует из зависимости (26) и рис. 10,а, наименьшее значение Δt_y (при $\alpha = 90^\circ$) равно нулю, т.е. наименьший диаметр обрабатываемого отверстия равен диаметру сверла.

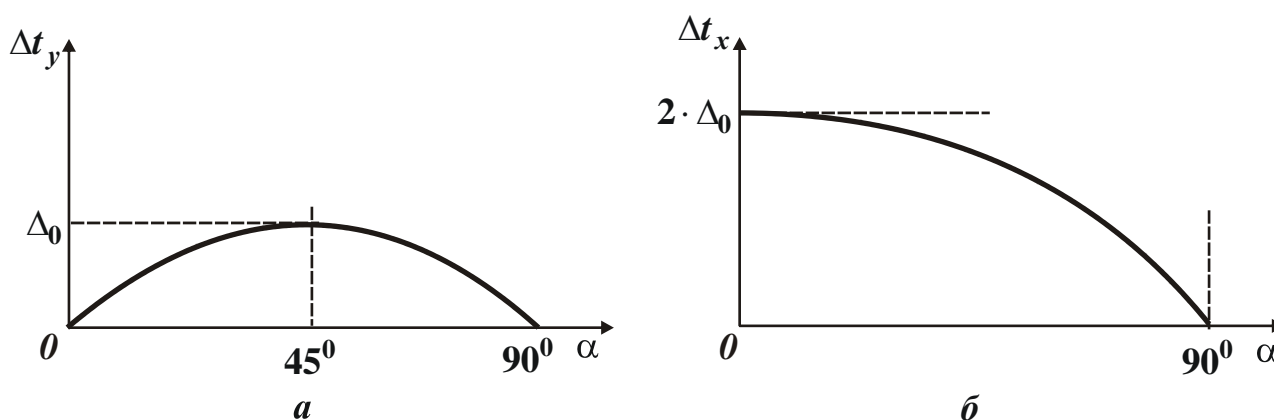


Рис. 10. Зависимости величин проекций Δt_y (а) и Δt_x (б) от угла α .

На рис. 10,б показан график изменения проекции величины Δt на ось ox в зависимости от угла α , рассматривая изменение угла α в отрицательном направлении (при вращении сверла против часовой стрелки). Как видно, величина проекции Δt_x непрерывно уменьшается с увеличением угла α . Наибольшее значение Δt_x достигается при условии $\alpha = 0$ и равно $2 \cdot \Delta_0$. Следовательно, при рассверливании отверстия с неравномерным снимаемым припуском его разбивка будет происходить по двум осям. Наименьшее значение диаметра обработанного отверстия, как показано выше, равно диаметру сверла, а наибольшее значение диаметра обработанного отверстия будет превышать диаметр сверла на величину упругого перемещения y ,

возникающего в технологической системе, определяемую зависимостью (15) при условии $\Delta t = \Delta t_x = 2 \cdot \Delta_0$:

$$y = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{2 \cdot S \cdot \Delta_0}{c} \cdot \cos \varphi.$$

Как следует из приведенной зависимости, при одинаковых условиях обработки величина упругого перемещения y , возникающего в технологической системе, линейно зависит от величины Δ_0 . Поэтому, чем больше величина Δ_0 , тем больше погрешность обработки и значительнее отличие диаметра обработанного отверстия от диаметра сверла. Этим показано, что в процессе рассверливания отверстия с неравномерным припуском формируются значительные погрешности обработки, для устранения которых необходимы последующие операции зенкерования и развертывания. Из этого следует также, что для высокоточной обработки отверстия с начальной значительной некруглостью не обязательно применение процесса рассверливания, который не позволяет получить высокую точность обработки. Возможны и другие варианты обработки, например, связанные с фрезерованием, шлифованием отверстия и др., которые позволяют кардинальным образом изменить характер формирования погрешностей обработки. Однако в данной работе рассматривается случай рассверливания, как наиболее приемлемый для обработки отверстия в горловине баллона.

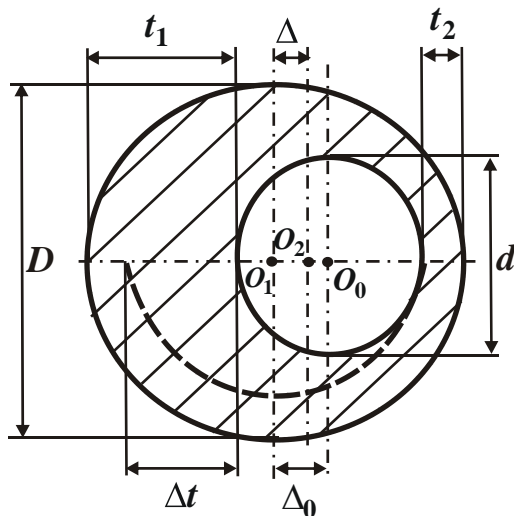


Рис. 11. Расчетная схема величины смещения оси обработанного отверстия относительно ее номинального положения Δ .

Для проверки правильности выполненных расчетов определим величину Δt для случая $\alpha = 0$ (т.е. определим наибольшее значение величины Δt) более простым методом. Для этого рассмотрим расчетную схему (рис. 11), аналогичную предыдущей схеме (рис. 8,б), и составим два уравнения:

$$\begin{cases} A_0 = \frac{d}{2} - \left(\frac{D}{2} - t_1 \right), \\ \frac{D}{2} = A_0 + \frac{d}{2} + t_2, \end{cases} \quad (28)$$

где d, D – диаметры обрабатываемого и обработанного отверстий, м.

Из системы уравнений (28) можно определить значения максимальной t_1 и минимальной t_2 глубин резания, приходящихся на оба лезвия сверла:

$$\begin{cases} t_1 = \frac{D}{2} - \frac{d}{2} + A_0, \\ t_2 = \frac{D}{2} - \frac{d}{2} - A_0. \end{cases} \quad (29)$$

Откуда разность глубин резания $\Delta t = t_1 - t_2$ равна

$$\Delta t = 2 \cdot A_0. \quad (30)$$

В результате получена аналитическая зависимость, идентичная зависимости (24) для случая $k=0$ (или $\alpha=0$). Это свидетельствует о правильности выполненных расчетов. Зависимость (30) увязывает величину Δt с величиной отклонения между осями A_0 , т.е. по сути, получена аналитическая зависимость для определения несоосности отверстий. Как видно, с увеличением A_0 величина Δt увеличивается. При $A_0 \rightarrow 0$ имеем $\Delta t \rightarrow 0$. Величина Δt не зависит от диаметров обрабатываемого и обработанного отверстий, а определяется A_0 .

В процессе резания под действием неуравновешенной силы ΔP_y , обусловленной изменением глубины резания за один оборот инструмента, ось рассверливаемого отверстия O_1 сместится в направлении оси O_0 и примет положение O_2 , рис. 11. Расстояние от оси O_1 до оси O_2 равно величине упругого перемещения y , описываемой зависимостью (15). Этим показано, что величина y равна смещению оси обработанного отверстия относительно ее номинального положения O_1 . Для удобства анализа обозначим расстояние между осями O_1 и O_2 через Δ , тогда $\Delta = y$ и зависимость (15) с учетом (30) выразится:

$$\Delta = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{2 \cdot S \cdot A_0}{c} \cdot \cos \varphi. \quad (31)$$

В результате получена аналитическая зависимость для определения величины смещения оси обработанного отверстия относительно ее номинального положения Δ . Очевидно, при $A_0=0$ величина $\Delta=0$ и мы приходим к обработанному отверстию симметричной формы. При $A_0>0$ будет образовываться отверстие овальной формы с наибольшим диаметром $D + \Delta$. Таким образом, задача определения погрешностей обработки отверстия свелась к определению величины смещения оси обработанного отверстия относительно

ее номинального положения Δ . Учитывая то, что $\Delta = y$, а $\Delta_0 = 0,5 \cdot \Delta t$, справедливо соотношение:

$$\frac{\Delta}{\Delta_0} = \frac{y}{0,5 \cdot \Delta t}.$$

Очевидно, $y < 0,5 \cdot \Delta t$. Следовательно, $\Delta < \Delta_0$. Тогда, исходя из зависимости (31), имеем

$$\frac{\Delta}{\Delta_0} = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{2 \cdot S \cdot \cos \varphi}{c} < 1, \quad (32)$$

т.е. выражение $\frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{2 \cdot S \cdot \cos \varphi}{c}$ по физической сути является передаточной функцией между величинами Δ , Δ_0 и оно всегда меньше единицы. Чем меньше данное выражение, тем меньше величина Δ и соответственно выше точность обработанного отверстия. При условии $\Delta / \Delta_0 \rightarrow 1$ фактически будет иметь место копирование положения оси O_0 обрабатываемого отверстия, что отрицательно скажется на точности его обработки.

Зависимость (31) отличается от аналогичных известных зависимостей которые получены на основе эмпирических зависимостей для определения радиальной составляющей силы резания, т.е. для частных условий обработки. Зависимость (31) в явном виде не содержит составляющие силы резания. Вместо них в зависимость входят параметры силовой напряженности процесса резания σ и $K_{рез}$, которые выражаются через параметры обработки.

Благодаря этому зависимость (31), в отличие от указанных зависимостей, позволяет в общем виде проанализировать закономерности изменения погрешностей обработки и выявить предпочтительные пути их уменьшения.

Необходимо отметить, что в случае достижения значений величины Δ , соизмеримых со значениями Δ_0 , в зависимости (31) вместо величины Δ_0 следует рассматривать $(\Delta_0 - \Delta)$. Тогда зависимость (31) примет вид:

$$\Delta = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{2 \cdot S \cdot (\Delta_0 - \Delta)}{c} \cdot \cos \varphi.$$

В результате пришли к линейному уравнению относительно величины Δ . Разрешая его относительно величины Δ , имеем

$$\Delta = \frac{\Delta_0}{\left(1 + \frac{K_{рез}}{\sigma} \cdot \frac{c}{2 \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (33)$$

Полученная зависимость (33) отличается от исходной зависимости (31) тем, что входящие в нее параметры $K_{рез}, \sigma, c, S, \varphi$ в меньшей мере влияют на

величину Δ . При условии $\frac{K_{рез}}{\sigma} \cdot \frac{c}{2 \cdot S \cdot \cos \varphi} < 1$ указанные выше параметры практически не будут влиять на величину Δ , которая в данном случае фактически будет равна величине Δ_0 . Этот случай может иметь место при

весьма малой жесткости технологической системы c , при резании затупленным инструментом, вызывающим большие значения $\sigma / K_{рез}$, и увеличенных значениях S .

С увеличением жесткости технологической системы c и уменьшением отношения $\sigma / K_{рез}$ второе слагаемое знаменателя зависимости (33) увеличится и при его существенном превышении единицы зависимость (33) трансформируется в исходную зависимость (31). Таким образом показано, что при условии $\Delta \rightarrow \Delta_0$ расчет и анализ величины Δ следует производить по зависимости (33), а при условии $\Delta \ll \Delta_0$ – по зависимости (31). Учитывая то, что в настоящей работе решается задача существенного уменьшения погрешностей обработки отверстия, в дальнейших исследованиях будем использовать зависимость (31). Это позволит обосновать условия обработки, реализующие случай $\Delta \ll \Delta_0$, т.е. случай высокоточной обработки отверстия.

Используя зависимость (31), можно сформулировать основные условия уменьшения погрешностей при обработке отверстия с начальной значительной некруглостью и характеризующегося неравномерным снимаемым припуском. Они состоят в уменьшении отношения $\sigma / K_{рез}$, величины отклонения между осями Δ_0 отверстия горловины баллона и сверла, подачи S и увеличении жесткости c технологической системы и угла сверла в плане φ .

С физической точки зрения уменьшение отношения $\sigma / K_{рез}$ означает снижение силовой напряженности процесса рассверливания, например, за счет повышения режущей способности инструмента путем увеличения переднего угла лезвия или использования вибраций при обработке. Однако в научно-технической литературе отсутствуют аналитические зависимости для определения параметров σ и $K_{рез}$ при рассверливании, что требует их аналитического описания и исследования. Очевидно, наиболее простым путем уменьшения величины Δ является уменьшение подачи S при рассверливании, рис. 7. Однако, как отмечалось выше, это ведет к уменьшению производительности обработки Q , что не всегда целесообразно.

Уменьшить величину отклонения между осями Δ_0 отверстия горловины баллона и сверла можно обеспечением соосности режущего инструмента и обрабатываемого отверстия путем уменьшения погрешностей базирования обрабатываемого баллона. Для этого необходимо использовать более эффективную схему базирования заготовки баллона, обеспечивающую соосность горловины баллона и шпинделя станка. Необходимо также использовать специальные приспособления для точного установления оси горловины баллона относительно оси шпинделя станка, это позволит уменьшить величину Δ_0 .

Исходя из (31), уменьшить погрешность обработки отверстия Δ можно увеличением двойного угла сверла в плане $2\varphi \rightarrow 180^0$ ($\cos \varphi \rightarrow 0$). В этом случае произойдет перераспределение составляющих силы резания P_y и P_x .

Радиальная составляющая силы резания P_y уменьшится, а осевая составляющая P_x – увеличится, рис. 2. Реализация данного условия требует создания специальных конструкций сверл с углом $2\varphi \rightarrow 180^\circ$, рис. 7.

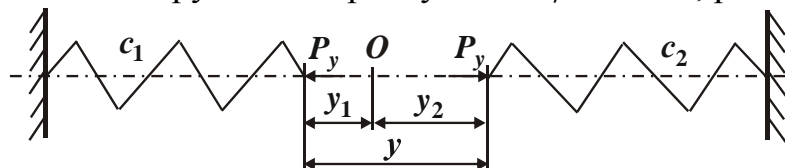


Рис. 12. Расчетная схема жесткости c технологической системы.

Жесткость c технологической системы, входящая в зависимость (31), в общем случае определяется изгибной жесткостью c_1 подсистемы “инструмент” и изгибной жесткостью c_2 подсистемы “обрабатываемый баллон”. Для определения жесткости c рассмотрим расчетную схему (рис. 12), в которой подсистема “инструмент” представлена пружиной жесткостью c_1 , а подсистема “обрабатываемый баллон” – пружиной жесткостью c_2 . Обе пружины под действием силы P_y сжимаются соответственно на величины y_1 и y_2 . Тогда величина упругого перемещения y , возникающего в технологической системе, равна

$$y = y_1 + y_2 = \frac{P_y}{c_1} + \frac{P_y}{c_2}. \quad (34)$$

Учитывая то, что $P_y / y = c$, имеем:

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \quad \text{или} \quad c = \frac{1}{\left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}\right)}. \quad (35)$$

Таким образом, получена аналитическая зависимость для определения жесткости c технологической системы, которая выражена через изгибные жесткости c_1 и c_2 . Как видно, изгибные жесткости c_1 и c_2 в одинаковой степени влияют на жесткость c технологической системы. С увеличением c_1 и c_2 жесткость c технологической системы увеличивается и при $c_1 \rightarrow \infty$, $c_2 \rightarrow \infty$ стремится к бесконечности, т.е. $c \rightarrow \infty$. Следовательно, уменьшить величину y , определяемую зависимостью (14), можно увеличением величин c_1 и c_2 . Увеличить изгибную жесткость сверла c_1 можно за счет применения более прочных инструментальных материалов и конструкций сверл, использования сверл с укороченной рабочей частью, повышения жесткости крепления сверла и т.д. Увеличить изгибную жесткость c_2 обрабатываемого баллона можно в первую очередь путем повышения жесткости его крепления, применяя для этого одну из прогрессивных схем базирования.

Следует отметить, что обеспечить более высокие значения изгибной жесткости сверла c_1 значительно сложнее, чем изгибной жесткости c_2 горловины обрабатываемого баллона. Это связано со спецификой крепления

сверла и баллона. Так, сверло имеет консольное закрепление, тогда как обрабатываемый баллон “зажимается” по торцу горловины и днищу баллона. В этом случае изгибная жесткость c_2 горловины обрабатываемого баллона может быть увеличена фактически неограниченно: $c_2 \rightarrow \infty$. Тогда, исходя из зависимости (35), жесткость c технологической системы будет определяться лишь изгибной жесткостью сверла c_1 , которая является ограниченной величиной, определяемой, по сути, длиной вылета сверла. Более полный анализ условий увеличения величины c_1 и соответственно жесткости c технологической системы будет проведен в последующих параграфах раздела.

Существует еще один подход, позволяющий уменьшить величину упругого перемещения y по зависимости (14) и соответственно величину смещения оси обработанного отверстия относительно ее номинального положения Δ , определяемую зависимостью (31). Это увеличение количества лезвий инструмента. В данном случае при одинаковой производительности обработки можно уменьшить подачу, приходящуюся на одно лезвие, и, следовательно, величину Δ . Зависимость (31) с учетом сказанного примет вид:

$$\Delta = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{4 \cdot S \cdot \Delta_0}{\left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}\right) \cdot n} \cdot \cos \varphi, \quad (36)$$

где n – количество лезвий инструмента; S – подача, м/об.

Чем больше лезвий инструмента будет участвовать в процессе резания, тем меньше будет нагрузка, приходящаяся на одно лезвие, и соответственно величина смещения оси обработанного отверстия относительно ее номинального положения Δ . Данный подход получил широкое применение на практике, в особенности для окончательной обработки высокоточных отверстий. На его основе разработаны конструкции осевых многолезвийных инструментов – зенкеров и разверток. Зенкер, как правило, имеет 3–4 режущих зуба (лезвия), развертка – более 10. Сверла изготавливаются с количеством лезвий не более 4. Развертка конструктивно состоит из заборной и калибрующей частей. Заборная часть предназначена для удаления припуска на обработку, а калибрующая – для обеспечения высоких показателей шероховатости и точности обрабатываемой поверхности. Угол заборного конуса развертки φ относительно небольшой – изменяется в пределах 10° , тогда как такой же угол у сверла принимает значительно большие значения. Исходя из зависимости (36), уменьшение угла φ ведет к увеличению величины смещения оси обработанного отверстия относительно ее номинального положения Δ .

Рассмотрим, с чем может быть связано уменьшение угла заборного конуса и увеличение длины заборной части развертки, поскольку это, как показано выше, приводит к увеличению величины смещения оси обработанного отверстия относительно ее номинального положения Δ . Развертка применяется для окончательной обработки отверстия. Поэтому для нее важно обеспечить высокую размерную стойкость, что достигается

снижением нагрузки, действующей на каждое режущее лезвие. Согласно зависимостям (8) и (9), это предполагает уменьшение толщины среза a за счет уменьшения угла φ и соответственно увеличения ширины среза b . Следовательно, развертка должна иметь небольшой угол заборного конуса и достаточно протяженную заборную часть. Таким образом, теоретически показано, что для создания высокоточных отверстий с начальной значительной некруглостью необходимо использовать несколько технологических переходов, включая переходы сверления, зенкерования и развертывания. В обобщенном виде выявленные условия уменьшения погрешности обработки отверстия с начальной значительной некруглостью показаны на рис. 13. Задача дальнейших исследований состоит в научно-обоснованном выборе тех условий, которые обеспечивают наиболее существенное уменьшение погрешности обработки отверстия.

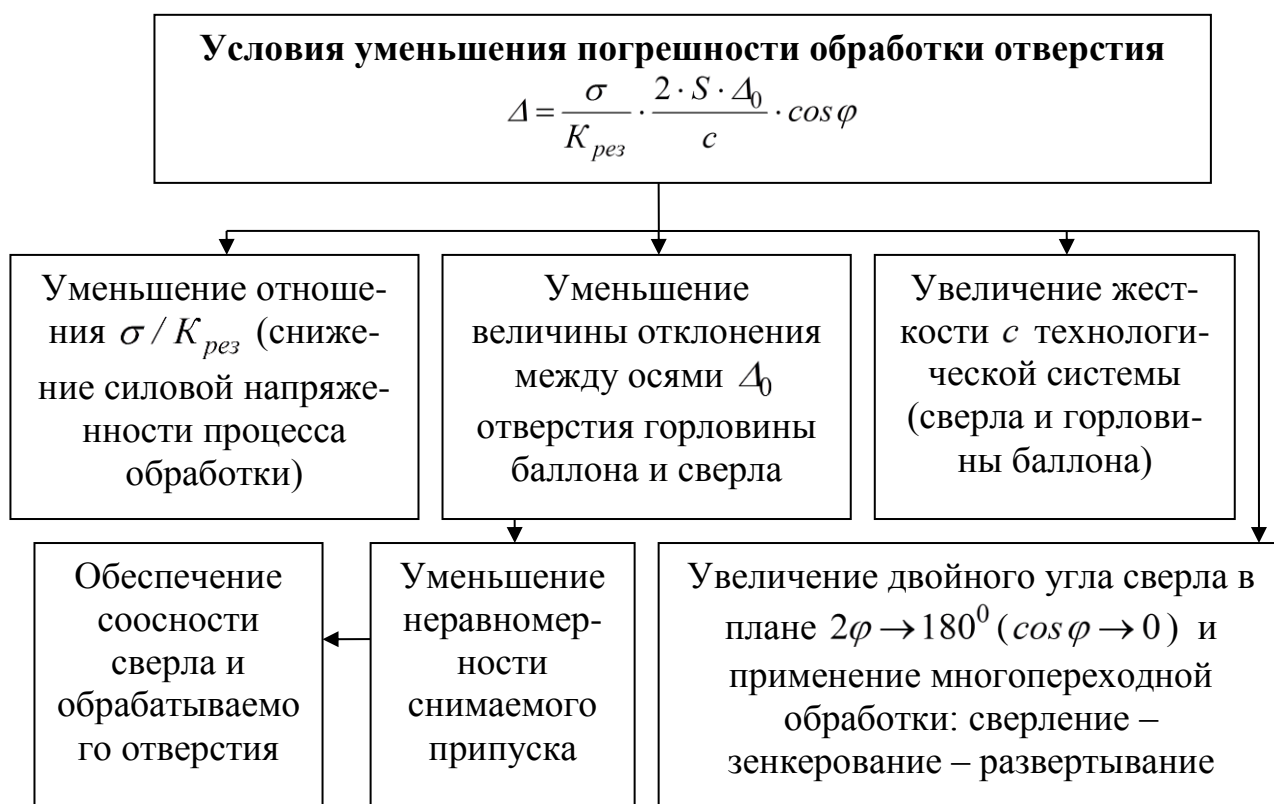


Рис. 13. Структурная схема условий уменьшения погрешности обработки отверстия с начальной значительной некруглостью.

Список литературы

1. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник. – М.: Высшая школа, 1985. –304 с.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.

4. Новиков Ф.В. Условия повышения точности и производительности механической обработки. – Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції 18-19 травня 2006 р., присвяченої 100-річчю з дня народження М.Ф. Семка. – Х.: Вид-во “Курсор”, 2006. – С. 91-98.

5. Новиков Ф.В., Иванов И.Е. Разработка математической модели формирования погрешностей при механической обработке отверстия. – Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ”ХПІ”. – Харків, 2006. – Вип. 2 (13). – С. 87-94.