

Новиков Ф.В., Брижан Т.М.

Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця;  
ГВУЗ “Приазовский государственный технический университет”, г. Мариуполь

### Определение условий уменьшения погрешностей и основного времени при механической обработке отверстий

#### Введение

Повышение точности и производительности механической обработки отверстий в деталях машин является важным условием создания конкурентоспособной машиностроительной продукции [1-3], требующим проведения теоретических и экспериментальных исследований. В связи с этим в работе решается актуальная задача изыскания технологических возможностей создания высокоточных отверстий на основе теоретического анализа закономерностей формирования погрешностей обработки отверстий и условий их уменьшения, а также на основе определения наименьшего основного времени механической обработки.

#### Основная часть

Обработка отверстий со съемом неравномерных припусков лезвийными инструментами располагает значительными технологическими возможностями с точки зрения обеспечения точности обрабатываемых поверхностей. В связи с этим, первоначально рассмотрены закономерности возникновения погрешностей обработки отверстия для наиболее простого метода – рассверливания, затем полученные решения распространены для растачивания, что позволило обосновать условия повышения точности и производительности обработки отверстий. В основу решений положен теоретический подход [4], учитывающий формирование погрешностей обработки при наличии сдвига оси сверла относительно оси обрабатываемого отверстия  $\Delta$  (рис. 1). В результате нарушения равенства радиальных составляющих сил резания, действующих на оба лезвия сверла, это приводит к возникновению упругого перемещения оси сверла:

$$y = \frac{(P_{y1} - P_{y2})}{c}, \quad (1)$$

где  $P_{y1}$ ,  $P_{y2}$  – радиальные составляющие сил резания, действующие на оба лезвия сверла, Н;  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м.

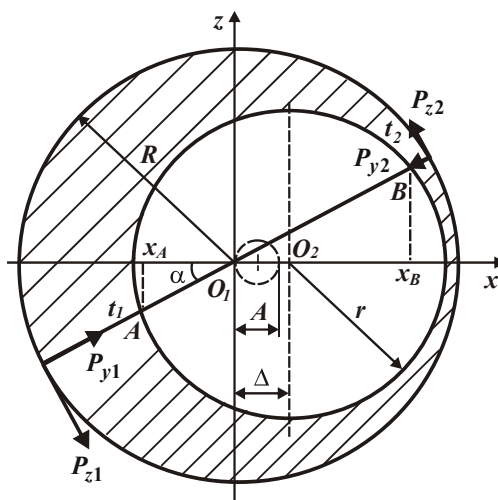


Рис. 1 – Расчетная схема определения погрешности обработки отверстия при рассверливании

При рассверливании отверстия сверлом с двумя лезвиями подача, приходящаяся на одно лезвие сверла, равна  $0,5 \cdot S$ . Тогда, представляя зависимости  $P_{y1} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{1\phi} \cdot \cos \varphi}{2 \cdot K_{рез}}$ ,  $P_{y2} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{2\phi} \cdot \cos \varphi}{2 \cdot K_{рез}}$  с учетом (1), получено:

$$y = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot (t_{1\phi} - t_{2\phi})}{2 \cdot c \cdot K_{рез}}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $K_{рез} = P_{z1} / P_{y1} = P_{z2} / P_{y2}$  – коэффициент резания;  $P_{z1}$ ,  $P_{z2}$  – тангенциальные составляющие сил резания, действующие на оба лезвия сверла, Н;  $S$  – подача, м/об;  $t_{1\phi}$ ,  $t_{2\phi}$  – текущие фактические глубины резания, приходящиеся на оба лезвия сверла, м;  $\varphi$  – половина главного угла сверла в плане.

Исходя из зависимости (2), уменьшить величину  $y$  и повысить точность обработки отверстия можно уменьшением параметров  $(t_{1\phi} - t_{2\phi})$ ,  $\sigma / K_{\text{пез}}$ ,  $S$  и увеличением жесткости технологической системы  $c$  и угла  $\varphi \rightarrow 90^\circ$ . Величина  $y$  определяет упругое перемещение оси сверла относительно исходного центра  $O_I$  в направлении, зависящем от угла  $\alpha$ , т.е. по сути величины  $y$  и  $\alpha$  являются координатами полярной системы с центром в точке  $O_I$ . Из расчетной схемы (рис. 1) имеем:  $t_1 = R - O_1A$ ;  $t_2 = R - O_1B$ , откуда  $(t_1 - t_2) = (R - O_1A) - (R - O_1B) = O_1B - O_1A$ , где  $R$  – радиус сверла, м. Длины отрезков  $O_1A$  и  $O_1B$  (рис. 1) устанавливаются из системы уравнений:

$$\begin{cases} z^2 + (x - \Delta)^2 = r^2; \\ z = \operatorname{tg} \alpha \cdot x, \end{cases} \quad (3)$$

где  $r$  – начальный радиус обрабатываемого отверстия, м;  $\alpha$  – угол, определяющий положение лезвий сверла;  $\Delta$  – сдвиг оси сверла относительно оси обрабатываемого отверстия (несоосность инструмента и отверстия), м.

Разрешая систему уравнений (3) относительно  $x$ , получено:

$$x^2 - 2 \cdot x \cdot \Delta \cdot \cos^2 \alpha - (r^2 - \Delta^2) \cdot \cos^2 \alpha = 0. \quad (4)$$

Решение квадратного уравнения:

$$x = \Delta \cdot \cos^2 \alpha \pm \sqrt{(\Delta \cdot \cos^2 \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2) \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (5)$$

Исходя из полученного решения, координаты  $x$  точки  $A$  и  $B$  равны:

$$x_A = \Delta \cdot \cos^2 \alpha - \sqrt{(\Delta \cdot \cos^2 \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2) \cdot \cos^2 \alpha}; \quad x_B = \Delta \cdot \cos^2 \alpha + \sqrt{(\Delta \cdot \cos^2 \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2) \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (6)$$

Соответственно длины отрезков  $O_1A$ ,  $O_1B$  и глубины резания  $t_1$  и  $t_2$  равны:

$$O_1A = \frac{x_A}{\cos \alpha} = \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)} - \Delta \cdot \cos \alpha; \quad O_1B = \frac{x_B}{\cos \alpha} = \Delta \cdot \cos \alpha + \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)}; \quad (7)$$

$$t_1 = R - O_1A = R - \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)} + \Delta \cdot \cos \alpha; \quad t_2 = R - O_1B = R - \Delta \cdot \cos \alpha - \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)}; \quad (8)$$

$$(t_1 - t_2) = 2 \cdot \Delta \cdot \cos \alpha. \quad (9)$$

Текущие фактические глубины резания  $t_{1\phi}$ ,  $t_{2\phi}$  и разность  $(t_{1\phi} - t_{2\phi}) = (t_1 - t_2) - 2y$  определяются:

$$t_{1\phi} = t_1 - y = R - \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)} + \Delta \cdot \cos \alpha - y; \quad t_{2\phi} = t_2 + y = R - \Delta \cdot \cos \alpha - \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)} + y. \quad (10)$$

$$(t_{1\phi} - t_{2\phi}) = 2 \cdot \Delta \cdot \cos \alpha - 2y. \quad (11)$$

Подставляя зависимость (11) в зависимость (2) получено:

$$y = \frac{\Delta \cdot \cos \alpha}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{пез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{(t_1 - t_2)}{\left(2 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{\text{пез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (12)$$

Из зависимости (12) вытекает, что с увеличением угла  $\alpha$  величина упругого перемещения  $y$  уменьшается по закону косинуса. Наибольшее значение величины упругого перемещения  $y$  достигается при положении лезвий сверла, соответствующем координате  $z = 0$ , т.е. вдоль оси  $x$  при  $\alpha = 0^\circ$ :

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{пез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (13)$$

При условии  $\Delta=0$ , т.е. при съеме равномерного припуска, величина упругого перемещения  $y=0$ , что указывает на отсутствие погрешности обработки отверстия. С учетом уточнения на размер на проходе инструмента  $\varepsilon = 1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}$  [5, 6] зависимость (13) может быть представлена в общем виде:  $y = \frac{\Delta}{\varepsilon}$ .

Используя зависимость (12), проведем анализ характера изменения величины упругого перемещения оси сверла  $y$  в радиальном направлении в зависимости от угла  $\alpha$  (в полярных координатах). Как видно, при  $\alpha=0$  величина  $y$  принимает наибольшее значение и с увеличением угла  $\alpha$  уменьшается до нуля (при  $\alpha=90^0$ ). По сути, представленная на рис. 1 кривая  $O_1O$  описывает положение оси сверла в зависимости от положения лезвий сверла. Очевидно, наибольшая погрешность обработки отверстия имеет место при угле  $\alpha=0$ , т.е. вдоль оси  $x$ . По мере увеличения угла  $\alpha$  происходит смещение оси сверла также и вдоль оси  $z$ . Следовательно, наблюдается разбивка отверстия по двум координатам, в результате чего обрабатываемое отверстие приобретает сложную геометрическую форму, близкую к форме эллипса с наибольшим размером вдоль оси  $x$ . Это соответствует практическим данным и указывает на то, что при рассверливании отверстия с неравномерно снимаемым припуском сложно добиться требуемой точности обработки в связи с возникновением в технологической системе упругих перемещений. Кривая  $O_1O$  на рис. 1 может быть представлена аналитически, выражая величину упругого перемещения сверла  $y$ , описываемую зависимостью (12), через координаты  $x$  и  $z$ :

$$x = y \cdot \cos \alpha = A \cdot \cos^2 \alpha; \quad z = y \cdot \sin \alpha = A \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha, \quad \text{где} \quad A = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad \text{Представляя} \quad \cos \alpha = \sqrt{\frac{x}{A}};$$

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} = \sqrt{1 - \frac{x}{A}}, \quad \text{имеем:} \quad z = A \cdot \sqrt{\frac{x}{A}} \cdot \sqrt{1 - \frac{x}{A}} \quad \text{или} \quad z^2 + x^2 = A \cdot x, \quad \text{или}$$

$$z^2 + \left(x - \frac{A}{2}\right)^2 = \frac{A^2}{4}. \quad (14)$$

В итоге получено уравнение окружности радиусом  $A/2$  со смещением ее центра вдоль оси  $x$  на величину  $A/2$  (рис. 1). Следовательно, положение оси сверла в разные моменты времени (в зависимости от положения лезвий сверла) описывается уравнением окружности радиусом  $A/2$ . Очевидно, чем меньше параметр  $A$ , тем точнее будет обрабатываемое отверстие. Из зависимости (12) вытекают основные направления уменьшения погрешностей обработки отверстия при рассверливании. Они состоят в уменьшении величины  $\Delta \rightarrow 0$  и отношения  $\sigma / K_{pez}$ , увеличении жесткости технологической системы  $c$  и угла  $\varphi \rightarrow 90^0$ .

Важным условием уменьшения погрешностей обработки отверстия следует рассматривать процесс рассверливания за 2 прохода инструмента. При втором проходе инструмента в качестве  $\Delta$  необходимо рассматривать величину  $y_1$  для первого прохода. Тогда зависимость (12) с учетом  $\alpha=0$  опишется:

$$y_1 = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad \text{Принимая на втором проходе} \quad y_2 = \frac{y_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}, \quad \text{получено:} \quad y_2 = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2}.$$

Поскольку знаменатель зависимости больше единицы, то  $y_2 < y_1$ , т.е. после второго прохода инструмента величина упругого перемещения  $y_2$  уменьшится.

Аналогично можно определить величину упругого перемещения  $y_3$  после третьего прохода инструмента:  $y_3 = \frac{y_2}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2} = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^3}$ . Соответственно, после  $n$ -го прохода инструмента:

$$y_n = \frac{y_{n-1}}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^{n-1}} = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n} = \frac{\Delta}{\varepsilon^n}. \quad (15)$$

Как видно, за счет многократного прохождения отверстия сверлом (одного диаметра) величина упругого перемещения  $y_n$ , определяющая положение оси изогнутого сверла в соответствии с зависимостью (15), существенно уменьшится (рис. 2,а). Однако погрешность размера отверстия  $\Delta y_n$  будет оставаться неизменной, определяемой погрешностью размера отверстия, образованного после первого прохода сверла (рис. 2,а). Поэтому для уменьшения величины  $\Delta y_n$  необходимо каждый последующий проход осуществлять сверлом большего диаметра. Поскольку диаметр сверла не входит в зависимость (15) для определения величины упругого перемещения, то это позволит выполнить условие  $y_n = \Delta y_n \rightarrow 0$  и исключить разбивку отверстия, вызванную съемом неравномерного припуска (рис. 2,б). Собственно этим можно объяснить то, что

на практике, как правило, рассверливание отверстия производят с использованием двух сверл разного диаметра. Одно сверло (меньшего диаметра) предназначено для предварительной обработки отверстия, а второе сверло (большого диаметра, равного требуемому диаметру обрабатываемого отверстия) предназначено для окончательной обработки, т.е. для обеспечения требуемых параметров точности обработки.

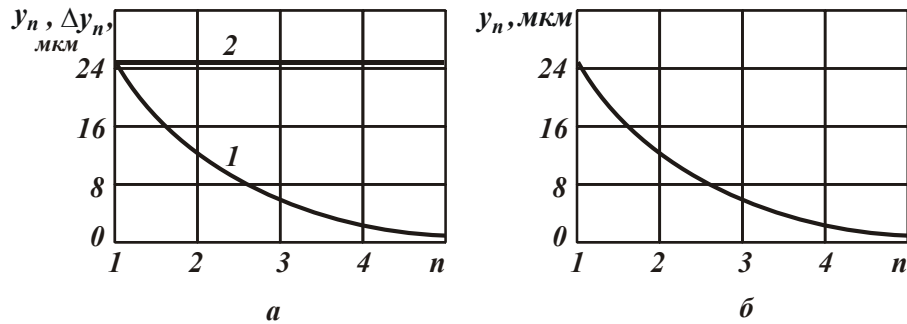


Рис. 2 – Зависимости величин  $y_n$  (1) и  $\Delta y_n$  (2) от  $n$  для  $\Delta = 50$  мкм и  $\varepsilon = 2$ : а – обработка отверстия одним сверлом; б – обработка отверстия сверлами разного диаметра

Из зависимости (12) также следует, что при условиях  $\alpha = 0$  и  $\frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \rightarrow 0$  величина упругого перемещения сверла  $y$  принимает максимальное значение  $y \rightarrow \Delta$ . Этот случай будет иметь место при низкой жесткости технологической системы  $c$ , увеличенной подаче  $S$  и работе затупленным инструментом, характеризующимся повышенными значениями  $\sigma / K_{\text{рез}}$ .

Используя полученное решение, можно оценить технологические возможности снижения погрешности обработки отверстия при растачивании, т.е. при обработке отверстия инструментом с одним лезвием. Величина упругого перемещения резца  $y$  определяется из уравнения (1) с учетом  $P_{y2} = 0$ :  $y = \frac{\sigma \cdot S \cdot (t_1 - y) \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{\text{рез}}}$ . Откуда

$$y = \frac{t_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (16)$$

Сравнивая зависимости (16) и (12), видно, что при растачивании отверстия величина  $y$  больше, чем при рассверливании отверстия, т.к. больше числитель и меньше знаменатель зависимости (16). Это обусловлено тем, что при рассверливании на лезвия сверла действуют две противоположно направленные радиальные составляющие силы резания, тогда как при растачивании отверстия на резец действует лишь одна радиальная составляющая силы резания. Очевидно, суммарная радиальная составляющая силы резания при рассверливании при одинаковых условиях обработки будет меньше, чем при растачивании, что и предопределяет меньшие значения величины упругого перемещения  $y$  (оси сверла).

Уточнение на размер на проходе инструмента  $\varepsilon$  [5, 6], равное знаменателю зависимости (16), больше при рассверливании отверстия. Следовательно, в этом случае обеспечивается уменьшение упругого перемещения сверла и повышение устойчивости процесса. Однако, в данном случае из-за того, что в резании участвуют два противоположно расположенные лезвия сверла, происходит увеличение диаметра обрабатываемого отверстия на величину упругого перемещения. Как показано в предыдущем параграфе, это приводит к разбивке отверстия и снижает точность обработки. Повторный проход сверла не позволит исправить погрешность обработки, т.к. при этом уменьшается сдвиг оси сверла относительно оси обрабатываемого отверстия, что приводит к еще большей разбивке отверстия. Поэтому повторный проход следует осуществить сверлом большего диаметра или же произвести обработку отверстия последовательно зенкером и разверткой, что позволит за счет увеличения количества работающих лезвий инструмента уменьшить погрешность обработки и соответственно повысить точность обрабатываемого отверстия.

При растачивании отверстия в резании участвует лишь одно лезвие и поэтому возникновение в технологической системе упругого перемещения не приводит к превышению диаметра обрабатываемого отверстия номинального значения. Собственно, в этом и состоит принципиальное отличие формирования погрешностей обработки при рассверливании и растачивании отверстий, т.е. при обработке отверстий мерным и немерным инструментом. Следовательно, при растачивании потенциально может быть исключена разбивка отверстия и обеспечена более высокая точность обработки по сравнению с рассверливанием отверстия. При растачивании отверстия глубина резания  $t_1$ , входящая в зависимость (16), определяется с учетом зависимости (7):  $t_1 = R - O_1 A = R + (\Delta \cdot \cos \alpha - \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)})$ . После умножения и деления выражения в скобках зависимости на сопряженную величину  $(\Delta \cdot \cos \alpha + \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)})$ , получено:

$$t_1 = R - \frac{(r^2 - \Delta^2)}{\left[ \Delta \cdot \cos \alpha + \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)} \right]}. \quad (17)$$

Как следует из зависимости (17), с увеличением угла  $\alpha$  глубина резания  $t_1$  уменьшается. Наибольшее значение  $t_1$  достигается при  $\alpha=0$  и равно  $t_1 = R - r + \Delta$ . Соответственно наибольшее значение упругого перемещения  $y$ , исходя из зависимости (16), определяется:

$$y = \frac{(R - r + \Delta)}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{\text{pez}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)}. \quad (18)$$

Как и при рассверливании отверстия, при растачивании отверстия уменьшить величину  $y$  (при съеме всего припуска за один проход инструмента) можно увеличением параметров  $c$ ,  $\varphi$  и уменьшением  $\sigma / K_{\text{pez}}$  и  $S$ .

На рис. 3 показана траектория перемещения оси расточной системы во времени. В соответствии с расчетной схемой, показанной на рис. 1, при резании с глубиной резания  $t_1$  расточная система деформируется в положительном направлении оси  $x$ , а при резании с глубиной резания  $t_2$  – в отрицательном направлении оси  $x$ , принимая меньшие значения  $y$ . В итоге ось расточной системы описывает сложную геометрическую фигуру, которая в отличие от процесса рассверливания отверстия (рис. 1) расположена в двух полуплоскостях:  $x > 0$  и  $x < 0$ . В случае  $\Delta=0$  ось расточной системы во времени будет перемещаться по окружности с радиусом, равным величине  $y$  (рис. 3,б).

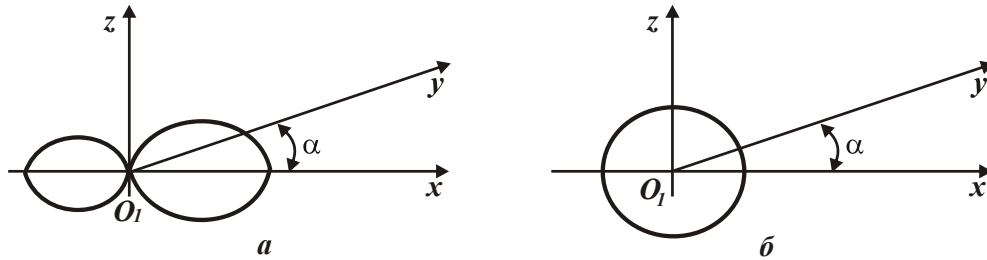


Рис. 3 – Траектория движения оси расточной системы за ее одно вращение для  $\Delta > 0$  (а) и  $\Delta = 0$  (б)

Одним из важных условий уменьшения погрешностей обработки отверстия является осуществление процесса рассверливания за несколько проходов инструмента. В связи с этим следует оценить возможности уменьшения погрешностей обработки отверстия при растачивании за счет увеличения количества проходов инструмента (без увеличения поперечной подачи, т.е. при обработке в размер). Величина упругого перемещения  $y_1$ , возникающего при первом проходе инструмента, описывается зависимостью (18). Для

удобства анализа представим ее в виде:  $y_1 = \frac{t_{11}}{\varepsilon}$ , где  $t_{11}$  – номинальная глубина резания при первом проходе

инструмента, м;  $\varepsilon = 1 + \frac{c \cdot K_{\text{pez}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}$  – уточнение на размер на проходе инструмента. При втором проходе

инструмента величина  $y_2$  определится:  $y_2 = \frac{t_{12} + y_1}{\varepsilon} = \frac{t_{12}}{\varepsilon} + \frac{t_{11}}{\varepsilon^2}$ , где  $t_{12}$  – номинальная глубина резания при

втором проходе инструмента, м. Принимая, например, что съем всего припуска  $t_1 = R - r + \Delta$  производится за два прохода инструмента, т.е.  $t_1 = t_{11} + t_{12}$ , окончательно получено:  $y_2 = \frac{t_1}{\varepsilon} - \frac{t_{11}}{\varepsilon} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon} \right)$ .

Из полученной зависимости вытекает, что уменьшить величину  $y_2$  можно увеличением  $t_{11}$ . Наименьшее значение величины  $y_2$  достигается при условии  $t_{11} = t_1$ . Тогда из соотношения  $t_1 = t_{11} + t_{12}$  следует, что  $t_{12} = 0$ . Этим показано, что эффективно весь припуск величиной  $t_1$  удалить при первом проходе, а второй проход осуществить как выхаживающий (без поперечной подачи) с целью уменьшения величины  $y_2$ ,

которая в данном случае опишется:  $y_2 = \frac{t_1}{\varepsilon^2}$ . Как видно, при съеме припуска величиной  $t_1$  за два прохода инструмента величина  $y_2$  меньше, чем при съеме того же припуска за один проход. Поэтому с точки зрения уменьшения  $y_2$  эффективно съем всего припуска производить за два прохода.

Необходимо отметить, что фактическая глубина резания при втором проходе равна величине упругого перемещения  $y_1$ , возникающего при первом проходе инструмента. Поскольку величина  $y_1$  небольшая, то осуществить процесс резания лезвийным инструментом в этих условиях достаточно сложно в связи с

повышенной энергоемкостью обработки (увеличением параметра  $\varepsilon$ ). Гораздо проще осуществить процесс резания в этих условиях абразивным инструментом, например, применяя процессы шлифования или хонингования отверстий. Поэтому при растачивании отверстий целесообразно увеличивать фактическую глубину резания при втором проходе инструмента за счет перераспределения величин припусков, удаляемых при первом и втором проходах. Очевидно, при первом проходе снимаемый припуск должен быть больше, чем при втором проходе. Это не внесет принципиальных изменений в закономерности формирования величины  $y_2$ , т.к. она при этом увеличится несущественно.

Если съем всего припуска величиной  $t_1$  производится за три прохода инструмента, то при третьем проходе инструмента величина упругого перемещения  $y_3$  с учетом  $t_1 = t_{11} + t_{12} + t_{13}$  опишется зависимостью:

$$y_3 = \frac{t_{13} + y_2}{\varepsilon} = \frac{t_{13}}{\varepsilon} + \frac{t_{12}}{\varepsilon^2} + \frac{t_{11}}{\varepsilon^3} = \frac{t_1}{\varepsilon} - \frac{t_{11}}{\varepsilon} \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^2}\right) - \frac{t_{12}}{\varepsilon} \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right), \quad (19)$$

где  $t_{13}$  – номинальная глубина резания при третьем проходе инструмента, м.

Как следует из зависимости (19), уменьшить величину упругого перемещения  $y_3$  можно увеличением параметров  $t_{11}$  и  $t_{12}$ . Однако, поскольку  $\left(1 - \frac{1}{\varepsilon^2}\right) > \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)$ , то наименьшее значение величины  $y_3$  будет достигаться при условиях  $t_{11} = t_1$ ;  $t_{12} = t_{13} = 0$ , т.е., по сути, съем всего припуска величиной  $t_1$  должен осуществляться за один проход инструмента, а второй и третий проходы должны быть выхаживающими, когда процесс резания происходит лишь под действием упруго-восстанавливающей силы, возникающей в технологической системе. В этом случае величина  $y_3$  опишется:  $y_3 = \frac{t_1}{\varepsilon^3}$ . Очевидно, величина  $y_3$  будет меньше величин  $y_2$  и  $y_1$ . Следовательно, с точки зрения уменьшения величины упругого перемещения и соответственно повышения точности обработки отверстия целесообразно съем всего припуска производить за три прохода инструмента. Поскольку фактические глубины резания при втором и третьем проходах инструмента равны величинам упругих перемещений, возникающих при втором и третьем проходах инструмента, и они принимают небольшие значения, то эффективно номинальные глубины резания при втором и третьем проходах устанавливать ненулевыми, уменьшив при этом номинальную глубину резания при первом проходе. Это не приведет к заметному увеличению  $y_3$ , однако позволит уменьшить энергоемкость  $\sigma$ .

Если съем всего припуска величиной  $t_1$  производится за  $n$  проходов инструмента, то величина упругого перемещения  $y_n$  с учетом  $t_1 = R - r + \Delta$  и  $\varepsilon = 1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}$  определится:

$$y_n = \frac{t_1}{\varepsilon^n} = \frac{(R - r + \Delta)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n}. \quad (20)$$

Как следует из зависимости, с увеличением количества проходов  $n$  величина упругого перемещения  $y_n$ , образуемого в технологической системе, уменьшается по закону убывающей геометрической прогрессии (рис. 4), что способствует повышению точности обработки отверстия. По физической сути, зависимость описывает закономерности изменения величины упругого перемещения  $y_n$  в процессе выхаживания, т.е. процесс выхаживания оказывается наиболее эффективным с точки зрения обеспечения высокой точности обработки. Из зависимости также следует, что с увеличением количества проходов инструмента  $n$  при растачивании отверстия можно выполнить условие  $y_n \rightarrow 0$ . При этом диаметр обрабатываемого отверстия не будет увеличиваться, как это имело место при рассверливании. Поскольку глубина резания не входит в зависимость, то съем всего припуска  $t_1$ , как показано выше, целесообразно осуществить за несколько проходов инструмента. Данное условие эквивалентно увеличению диаметра сверла с каждым его последующим проходом в соответствии с зависимостью (15). Однако при рассверливании необходимо применять сверла разного диаметра, тогда как при растачивании данное условие выполняется с применением одного резца, что упрощает обработку отверстия.

Необходимо отметить, что, несмотря на более высокие значения упругих перемещений, возникающих при первом проходе резца при растачивании отверстия, как показано выше, данный метод обеспечивает более высокую точность обработки на последующих проходах по сравнению с рассверливанием отверстия. Следовательно, процесс растачивания позволяет получить более высокую точность обработки по сравнению с процессом рассверливания, который может быть эффективно использован лишь при предварительной обработке, т.е. при съеме основной части припуска. Повысить эффективность процесса рассверливания можно, например, за счет применения однолезвийного сверла, работающего по принципу расточного резца.

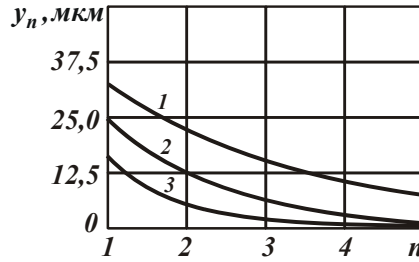


Рис. 4 – Зависимость упругого перемещения  $y_n$  от количества проходов  $n$ : 1 –  $\varepsilon = 1,5$ ; 2 –  $\varepsilon = 2$ ; 3 –  $\varepsilon = 3$

В зависимость (20) входит неопределенная величина – количество проходов инструмента  $n$ . Очевидно, определить  $n$  можно по критерию наименьшего основного времени обработки  $\tau$  на операции с учетом ограничения по заданной величине  $y_n$ , определяющей точность обрабатываемого отверстия:

$$\tau = \frac{l \cdot n}{S_m} = \frac{\pi \cdot D \cdot l \cdot n}{S \cdot V}, \quad (21)$$

где  $l$  – длина отверстия, м;  $S_m = V \cdot \frac{S}{\pi \cdot D}$  – скорость продольной подачи, м/с;  $V$  – скорость резания, м/с;  $S$  – подача, м/об;  $D$  – диаметр отверстия, м.

В качестве переменной величины будет рассматривать подачу  $S$ , которую можно выразить через уточнение  $\varepsilon = 1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}$ . Откуда  $S = \frac{c \cdot K_{рез}}{(\varepsilon - 1) \cdot \sigma \cdot \cos \varphi}$ . Тогда с учетом  $t/y_n = \varepsilon_{сум}$  (где  $\varepsilon_{сум} = \varepsilon^n$  – суммарное уточнение на размер) зависимость (21) принимает вид:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D \cdot l \cdot \cos \varphi \cdot \sigma \cdot (\sqrt[n]{\varepsilon_{сум}} - 1) \cdot n}{c \cdot K_{рез} \cdot V}. \quad (22)$$

Подчиняя зависимость (22) необходимому условию экстремума:  $\tau'_n = 0$ , определено наименьшее основное время обработки, которое достигается при условии  $n \rightarrow \infty$ :

$$\tau_{min} = \frac{\pi \cdot D \cdot l \cdot \cos \varphi \cdot \sigma \cdot \ln \varepsilon_{сум}}{c \cdot K_{рез} \cdot V}. \quad (23)$$

Из зависимости (23) вытекает, что добиться уменьшения  $\tau_{min}$  можно за счет уменьшения  $\sigma / K_{рез}$ ,  $\varepsilon_{сум}$  и увеличения  $c$  и  $V$ . Подача  $S$  будет определяться:  $S = \frac{c \cdot K_{рез}}{(\sqrt[n]{\varepsilon_{сум}} - 1) \cdot \sigma \cdot \cos \varphi}$ . На рис. 5,а показан характер

изменения  $S$  от  $n$  при условии  $\frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot \cos \varphi} = 1$  ( $c = 3 \cdot 10^3$  Н/мм;  $\sigma = 3 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup>;  $K_{рез} = 1$ ;  $\cos \varphi = 1$ ). Скорость

продольной подачи  $S_m = V \cdot \frac{S}{\pi \cdot D}$  при этом также будет увеличиваться. На рис. 5,а показан характер изменения  $S_m$  от  $n$  для  $D = 10$  мм и  $V = 1570$  мм/с.

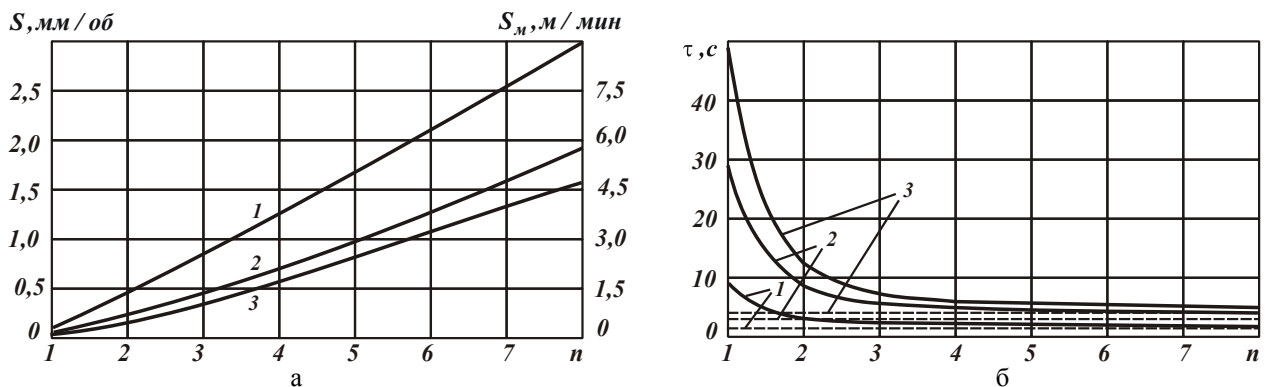


Рис. 5 – Зависимости  $S$  (а) и  $\tau$  (б) от  $n$ : 1 –  $\varepsilon_{сум} = 10$ ; 2 –  $\varepsilon_{сум} = 30$ ; 3 –  $\varepsilon_{сум} = 50$

Расчеты, выполненные на основе зависимостей (22) и (23) при условии  $\frac{\pi \cdot D \cdot l \cdot \cos \varphi \cdot \sigma}{c \cdot K_{рез} \cdot V} = 1$  с ( $D=10$  мм;  $l=50$  мм;  $c=3 \cdot 10^3$  Н/мм;  $\sigma=3 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup>;  $K_{рез}=1$ ;  $\cos \varphi=1$ ;  $V=1570$  мм/с), показали (рис. 5,б), что основное время обработки  $\tau$  с увеличением  $n$  (в пределах 1 – 3 проходов) интенсивно уменьшается, затем асимптотически приближается к значению  $\tau_{min}$ . Поэтому сьем неравномерного припуска целесообразно осуществлять за 2 – 3 прохода.

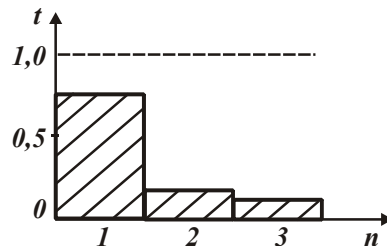


Рис. 6 – Характер изменения глубины резания по проходам

Естественно, наилучший результат может быть получен при осуществлении схемы выхаживания, однако, в связи с весьма малыми фактическими глубинами резания на втором и третьем проходах (равными величинам упругих перемещений) целесообразно снимаемый припуск перераспределить по проходам. Например, на первом проходе удалить 75% общего снимаемого припуска, а на втором и третьем проходах - соответственно 15 и 10% общего снимаемого припуска (рис. 6). Такой подход позволит снизить энергоемкость обработки (параметр  $\sigma$ ) на втором и третьем проходах, в связи с уменьшением отношения толщины среза  $a$  и радиуса округления лезвия инструмента  $\rho$  (т.е.  $a/\rho$ ), и обеспечить высокоточную обработку отверстия. Это согласуется с практическими данными [7]. Таким образом, теоретически обоснованы практические рекомендации, используемые для эффективного ведения процесса растачивания отверстий. Показано, что распределение припусков по проходам при растачивании отверстий подчиняется закону убывающей геометрической прогрессии, который описывает закономерности изменения величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе в процессе выхаживания.

#### Выводы

Получены уточненные аналитические зависимости для определения величины упругого перемещения при механической обработке отверстия со сьемом неравномерного припуска. Показано, что при рассверливании отверстия вследствие участия в резании двух противоположно расположенных лезвий сверла происходит увеличение диаметра обрабатываемого отверстия на величину упругого перемещения. Это приводит к разбивке отверстия и снижает точность обработки. При растачивании отверстия в резании участвует лишь одно лезвие и поэтому возникновение в технологической системе упругого перемещения не приводит к превышению диаметра обрабатываемого отверстия номинального значения. Расчетами установлено, что с увеличением количества проходов сверла величина упругого перемещения уменьшается по закону убывающей геометрической прогрессии, однако при этом увеличивается диаметр обрабатываемого отверстия. Поэтому с точки зрения повышения точности обработки целесообразно последующие проходы осуществлять сверлами большего диаметра. Теоретически доказано, что при растачивании отверстия величина упругого перемещения с увеличением количества проходов инструмента также уменьшается по закону убывающей геометрической прогрессии. При этом происходит уменьшение основного времени обработки, особенно интенсивно при сьеме припуска за 2 – 3 прохода инструмента в условиях высокоскоростного резания. Поэтому с целью снижения энергоемкости и повышения точности и производительности обработки целесообразно сьем припуска осуществлять за несколько проходов инструмента, уменьшая с каждым последующим проходом глубину резания по закону убывающей геометрической прогрессии.

**Перечень источников литературы:** 1. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1970. – 390 с. 2. Линчевский П.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках / П.А. Линчевский, Т.Г. Джугурян, А.А. Оргиян. – К.: Техника, 2001. – 300 с. 3. Новоселов Ю.К. Моделирование операций при оценке отклонений формы деталей при шлифовании / Ю.К. Новоселов, Д.А. Каинов // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових статей. – Том 2. – Харків: НТУ “ХП”, 2006. – С. 391-400. 4. Иванов И.Е. Технологическое обеспечение точности и стабильности изготовления резьбовых отверстий в баллонах в условиях массового производства: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / И.Е. Иванов. – Мариуполь, 2008. – 21 с. 5. Новіков Ф.В. Теорія високоякісної обробки деталей машин: монографія / Ф.В. Новіков. – Х.: Вид. ХНЕУ, 2013. – 384 с. 6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 10. ”Концепции развития технологии машиностроения” – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с. 7. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.