

Новиков Ф.В., д-р техн. наук., проф. (Харьковский национальный экономический университет),

Рябенков И.А. (ГП Харьковский машиностроительный завод "ФЭД")

## УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

*Статья посвящена расчету и анализу погрешностей механической обработки отверстий, обусловленных упругими перемещениями в технологической системе*

Проблема изготовления высокоточных отверстий обусловлена во многом неравномерно снимаемым припуском и образующимися в технологической системе упругими перемещениями [1]. В настоящее время существуют различные способы окончательной механической обработки отверстий. Однако их технологические возможности в теоретическом плане изучены недостаточно, т.к. имеются в основном эмпирические решения, справедливые для частных условий обработки. Поэтому целью работы является анализ погрешностей механической обработки отверстий на основе определения упругого перемещения  $y$ , возникающего в технологической системе. Первоначально определена величина  $y$  при рассверливании отверстия [2-4]:

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

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $S$  – подача, м/об;  $\Delta_0$  – величина отклонения между осями обрабатываемого и обработанного отверстий, м;  $K_{рез} = P_z / P_0$  – коэффициент резания;  $P_0 = \sqrt{P_y^2 + P_x^2}$  – равнодействующая радиальной  $P_y$  и осевой  $P_x$  составляющих силы резания, действующих на лезвие сверла, Н;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;  $2\varphi$  – двойной угол в плане сверла, град.

По физической сути величина упругого перемещения  $y$  равна смещению оси обработанного отверстия относительно ее номинального поло-

жения. Основным условием ее уменьшения является уменьшение  $\Delta_0$ , т.к. при  $\Delta_0=0$  справедливо условие  $y=0$ . Установлено, что параметр  $\Delta_0$  может принимать довольно большие значения, вызывая изменение величины  $y$  в широких пределах. Из этого вытекает, что при рассверливании отверстия с неравномерно снимаемым припуском образуются значительные погрешности, устранить которые сложно на последующих технологических переходах зенкерования, развертывания и хонингования, т.е. при обработке мерными инструментами. Уменьшить погрешности обработки отверстий можно уменьшением глубины резания за счет распределения снимаемого припуска по проходам, применяя обработку немерными инструментами – шлифование, растачивание и фрезерование. В связи с этим произведена оценка величины упругого перемещения  $y$  при внутреннем продольном шлифовании, растачивании и фрезеровании на основе следующих аналитических зависимостей:

$$y = \frac{\sigma \cdot S \cdot t}{K_{рез} \cdot c} \cdot \frac{V_{дет}}{V_{кр}} ; \quad y = \frac{\sigma \cdot S \cdot t \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c} ; \quad y = \frac{\sigma \cdot S \cdot t}{K_{рез} \cdot c} \cdot \frac{V_{дет}}{V_{фр}} \cdot \frac{\pi}{z} \cdot \sqrt{\frac{D}{t}}, \quad (2)$$

где  $S$  – продольная подача, м/об;  $t$  – глубина (резания) шлифования, м;  $V_{дет}$ ,  $V_{кр}$  – скорости детали и круга, м/с;  $\varphi$  – угол резца в плане, град;  $z$  – количество зубьев фрезы;  $V_{фр}$  – скорость фрезы, м/с;  $D$  – диаметр фрезы, м.

Расчетами установлено, что существенно уменьшить величину  $y$  можно в условиях высокоскоростного шлифования и фрезерования (рис. 1), рассматривая параметры  $V_{кр}$  и  $V_{фр}$  обобщенно как скорость инструмента  $V_{инст}$ .

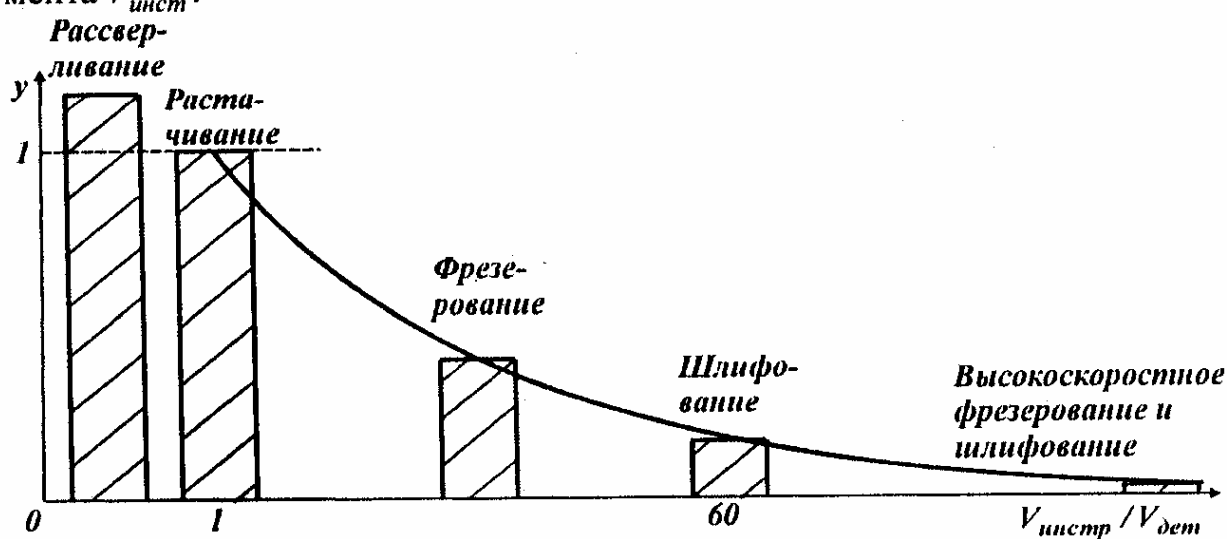


Рис. 1. Зависимость величины  $y$  от соотношения  $V_{инст}/V_{дет}$  для различных методов механической обработки отверстия.

Учитывая высокую эффективность процесса шлифования в исправлении погрешностей обрабатываемого отверстия, исследован характер изменения величины упругого перемещения  $y$  с течением времени обработки  $\tau$  при внутреннем продольном шлифовании. Установлено, что при первом и соответственно  $n$ -ном проходах круга величины  $y_1$  и  $y_n$  описываются зависимостями:

$$y_1 = \frac{t}{\varepsilon}; \quad y_n = \frac{t + y_{n-1}}{\varepsilon} = y_1 \cdot \left( 1 + \frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon^2} + \dots + \frac{1}{\varepsilon^{n-1}} \right), \quad (3)$$

где  $\varepsilon = 1 + \frac{K_{рез} \cdot c}{\sigma \cdot S} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}}$  – уточнение на проходе.

Как видно, величина  $y_n$  подчиняется закону убывающей геометрической прогрессии, сумма первых  $n$  членов которой равна  $y_n = \frac{t}{\varepsilon - 1}$   
 $= \frac{\sigma \cdot S \cdot t \cdot V_{дет}}{K_{рез} \cdot c \cdot V_{кр}}$ . В итоге пришли к зависимости (2), справедливой для установившегося во времени процесса шлифования, когда фактическая и номинальная глубины шлифования равны между собой. Расчетами установлено, что величины  $y_n$  и  $y_1$ , а также фактическая и номинальная глубины шлифования отличаются в несколько раз (рис. 2). Это ведет к снижению производительности обработки и требует изыскания технологических возможностей по устранению данного расхождения. Наиболее эффективным решением в этом плане, исходя из полученных зависимостей, может быть повышение режущей способности круга (уменьшение отношения  $\sigma / K_{рез}$ ) и увеличение скорости круга  $V_{кр}$ . Данное решение позволяет также уменьшить величину  $y_n$  и соответственно погрешности обработки отверстия.

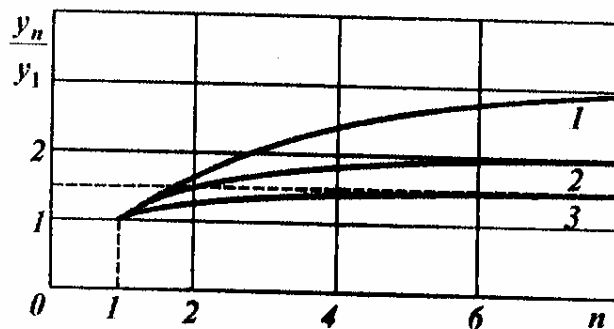


Рис. 2. Зависимость отношения  $y_n / y_1$  от количества проходов круга  $n$ : 1 —  $\varepsilon=1,5$ ; 2 —  $\varepsilon=2$ ; 3 —  $\varepsilon=3$ .

Сравним продолжительности неустановившегося процесса обработки для схем внутреннего продольного и врезного шлифования на основе двух различных аналитических зависимостей для определения величин упругих перемещений:

$$y_n = y_{уст} \cdot (1 - \varepsilon^{-n}), \quad y = y_{уст} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot n}), \quad (4)$$

где  $y_{уст} = \frac{\sigma}{K_{рез} \cdot c} \cdot \frac{Q}{V_{кр}}$  — значение упругого перемещения при установившемся во времени процессе шлифования, м;  $Q$  — производительность обработки, м/с;  $\alpha = \varepsilon - 1$  — безразмерная величина.

Расчетами установлено, что продолжительность неустановившегося процесса обработки при внутреннем врезном шлифовании меньше. Следовательно, при внутреннем шлифовании целесообразно использовать непрерывную вместо дискретно изменяющейся во времени радиальной подачи. При этом шлифование можно выполнять как с продольной подачей, так и без нее. В связи с этим получена новая аналитическая зависимость для определения величины упругого перемещения  $y_n$  на этапе выхаживания при внутреннем продольном шлифовании:

$$y_n = \frac{y_{n-1}}{\varepsilon} = \frac{t}{\varepsilon^n} \quad (5)$$

Показано, что на каждом проходе круга реализуется одно и то же уточнение  $\varepsilon = \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}}$ , где  $\varepsilon_{сум}$  — суммарное уточнение. Установлено, что для уменьшения основного времени обработки

$$\tau = \frac{\sigma}{K_{рез} \cdot c} \cdot \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot n}{V_{кр}} \cdot (\sqrt[n]{\varepsilon_{сум}} - 1) \quad (6)$$

обеспечивающего достижение заданного суммарного уточнения  $\varepsilon_{сум}$ , необходимо выполнить условие  $n \rightarrow \infty$  ( $V_{дет} \rightarrow \infty$ ), рис. 3. Следовательно, шлифование эффективно осуществлять с максимально достижимой на станке скоростью детали  $V_{дет}$  и количеством проходов круга  $n$ , устанавливаемым из зависимости:

$$\varepsilon = 1 + \frac{K_{рез} \cdot c}{\sigma \cdot S} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} = \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}} \quad (7)$$

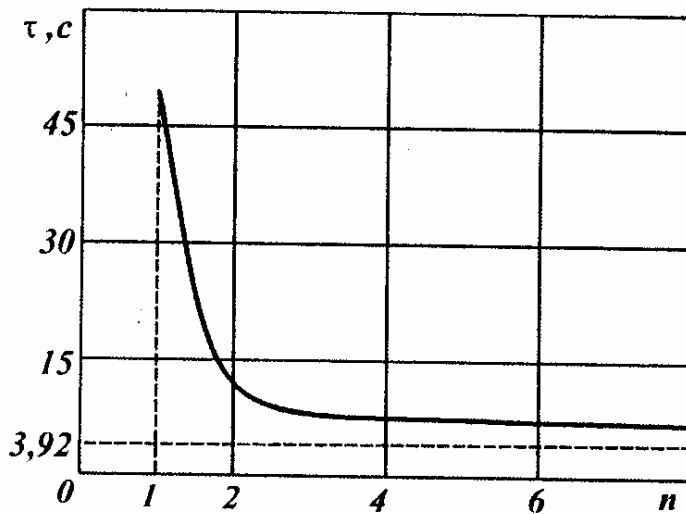


Рис. 3. Зависимость основного времени обработки  $\tau$  от количества проходов круга  $n$  для  $\varepsilon_{сум}=50$ .

Проведено сравнение величин упругих перемещений на этапах выхаживания при внутреннем продольном и врезном шлифовании по зависимостям:

$$y_n = y_{уст} \cdot (1 + \alpha)^{-n}; \quad y = y_{уст} \cdot e^{-\alpha \cdot n} \quad (8)$$

Расчетами установлено, что применение схемы внутреннего врезного шлифования позволяет интенсифицировать процесс исправления погрешностей обрабатываемого отверстия.

В работе произведена оценка влияния изменения толщины среза на амплитуду колебаний при внутреннем шлифовании. Для этого составлено дифференциальное уравнение движения массы  $m$  (приведенной массы системы шлифовального круга) в направлении действия радиальной составляющей силы резания

$$P_y = \frac{\sigma \cdot S}{K_{рез}} \cdot (t - y) \cdot \frac{V_{дет}}{V_{кр}} ;$$

$$m \cdot \ddot{y} + c_1 \cdot y = P_{y0}, \quad (9)$$

где  $P_{y0} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t}{K_{рез}} \cdot \frac{V_{дет}}{V_{кр}}$ ;  $c_1 = c + \frac{\sigma \cdot S}{K_{рез}} \cdot \frac{V_{дет}}{V_{кр}}$  – жесткость технологической системы при шлифовании, Н/м;  $c$  – начальная жесткость системы, Н/м.

Принимая нулевые начальные условия:  $y(\tau = 0) = 0$  и  $\dot{y}(\tau = 0) = 0$ , получено решение дифференциального уравнения (9):

$$y = y_{см} \cdot (1 - \cos p\tau), \quad (10)$$

где  $y_{см} = \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{рез} \cdot c}{\sigma \cdot S} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}}\right)}$ ;  $p = \sqrt{\frac{c_1}{m}} = \sqrt{\frac{c + \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot S \cdot \frac{V_{дет}}{V_{кр}}}{m}}$  – собственная частота технологической системы, 1/с.

Установлено, что амплитуда колебаний, описываемая зависимостью (12), может в 2 раза превышать статическое значение упругого перемещения  $y_{см}$ . Учитывая, что в пределе  $y_{max} = 2 \cdot y_{см} \rightarrow 2 \cdot t$ , при определенных условиях обработки круг будет периодически выходить из контакта с деталью, вызывая снижение качества обработки. Исходя из зависимости (10), уменьшить амплитуду колебаний можно уменьшением  $y_{см}$  за счет повышения режущей способности круга (уменьшения отношения  $\sigma / K_{рез}$ ), увеличения жесткости технологической системы  $c$  и скорости круга  $V_{кр}$ . Необходимо отметить, что согласно полученному выше решению, приведенная жесткость технологической системы  $c_1$  и собственная частота системы  $P$  при шлифовании увеличиваются.

Таким образом, в работе обоснованы новые технологические возможности повышения точности механической обработки отверстий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1985. – 496 с.

Новиков Ф.В., Иванов И.Е., Рябенков И.А. Теоретический анализ формирования погрешностей при обработке отверстия с начальной значительной некруглостью // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2008. – Вип. 68. – С. 119-135.

Новиков Ф.В., Рябенков И.А. Расчет и анализ закономерностей изменения величины упругого перемещения при шлифовании с течением

времени обработки // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2008. – Вып. 75. – С. 299-305.

Рябенков И.А. Определение условий образования погрешностей обработки при шлифовании // Восточно-европейский журнал, №3/5 (33), 2008. – С. 6-9.