

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

Изготовление высокоточных отверстий в деталях машин является наиболее сложной задачей в технологии машиностроения [1]. В настоящее время накоплен значительный опыт решения данной задачи [2]. В месте с тем, все возрастающие требования к точности и качеству обработки отверстий, особенно в деталях, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, требует постоянного совершенствования технологии механической обработки отверстий. Поэтому целью настоящей работы является теоретическое обоснование условий уменьшения погрешностей обработки отверстий и выбор наиболее эффективных методов обработки.

При обработке отверстий с неравномерно снимаемым припуском под действием неуравновешенных сил резания происходит упругое перемещение элементов технологической системы, что вызывает образование погрешностей обработки. В работах [3, 4] приведена зависимость для определения упругого перемещения  $y$  в технологической системе, обусловленного нарушением условия равновесия радиальных составляющих сил резания, действующих на оба лезвия сверла при рассверливании отверстия:

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

где  $\sigma = P_z / S_{срез}$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $K_{рез} = P_z / P_0$  – 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;  $S_{срез}$  – площадь поперечного сечения среза лезвием сверла, м<sup>2</sup>;  $S$  – подача, м/об;  $\Delta_0$  – величина отклонения между осями обрабатываемого отверстия и сверла, м;  $c = 1 / (1/c_1 + 1/c_2)$  – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;  $c_1, c_2$  – соответственно изгибные жесткости сверла и обрабатываемой детали в радиальном направлении, Н/м;  $2\varphi$  – двойной угол в плане сверла, град;

Используя данную зависимость, может быть выработан общий подход к анализу условий повышения точности механической обработки отверстий. Из зависимости (1) вытекает, что уменьшить величину  $y$  можно за счет уменьшения параметров  $\sigma, S, \Delta_0$  и увеличения  $K_{рез}, \varphi, c$ . Уменьшить отношение  $\sigma / K_{рез}$  можно за счет повышения режущей способности инструмента путем снижения интенсивности трения инструмента с обрабатываемым материалом, увеличения переднего угла лезвия инструмента, применения более твердых инструментальных материалов, повышающих износостойкость лезвий инструмента и т.д. Уменьшение подачи  $S$ , хотя и ведет к уменьшению величины  $y$ , но требует снижения производительности обработки, что не эффективно. Уменьшить  $y$  за счет увеличения угла  $\varphi \rightarrow 90^\circ$  можно применением специальных конструкций сверл. Однако, основной путь уменьшения величины  $y$  связан с уменьшением величины  $\Delta_0$ , т.е. повышением точности позиционирования сверла относительно оси обрабатываемого отверстия. К сожалению, выполнить данное условие удастся далеко не всегда. Поэтому после рассверливания имеют место значительные погрешности обработки отверстия, для устранения которых требуется применение последующих технологических

переходов зенкерования, развертывания, хонингования и т.д. Данная технология обработки отверстий в принципе решает задачу точности, и поэтому получила широкое применение на практике. По сути, она является основной при обработке отверстий, хотя далеко не всегда оказывается эффективной. Это связано, в первую очередь, со значительными упругими перемещениями элементов технологической системы, которые ведут не только к существенным погрешностям обработки, но зачастую и к поломке сверла. Например, как установлено на практике, в ряде случаев из-за поломок сверл фактически невозможно рассверлить отверстие.

Сверла, зенкера и развертки – это мерные инструменты, их диаметр равен диаметру обрабатываемого отверстия. Следовательно, в данном случае имеет место обработка отверстий мерным инструментом. Но существует и другой подход к обработке отверстий. Он состоит в применении немерных инструментов и основан на таких методах обработки как шлифование, растачивание и фрезерование отверстий, рис. 1. В этом случае диаметр шлифовального круга и фрезы меньше диаметра обрабатываемого отверстия, что позволяет уменьшить глубину резания за счет распределения снимаемого припуска по проходам. В итоге можно добиться повышения точности и производительности обработки. При этом величина упругого перемещения  $y$  в технологической системе определяется:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{K_{рез} \cdot c} = \frac{\sigma \cdot S_{срез}}{K_{рез} \cdot c}. \quad (2)$$

Обозначения, принятые в зависимости (2), соответствуют обозначениям в зависимости (1). Проведем теоретический анализ зависимости (2) применительно к процессам шлифования, растачивания и фрезерования отверстий с неравномерно снимаемым припуском.

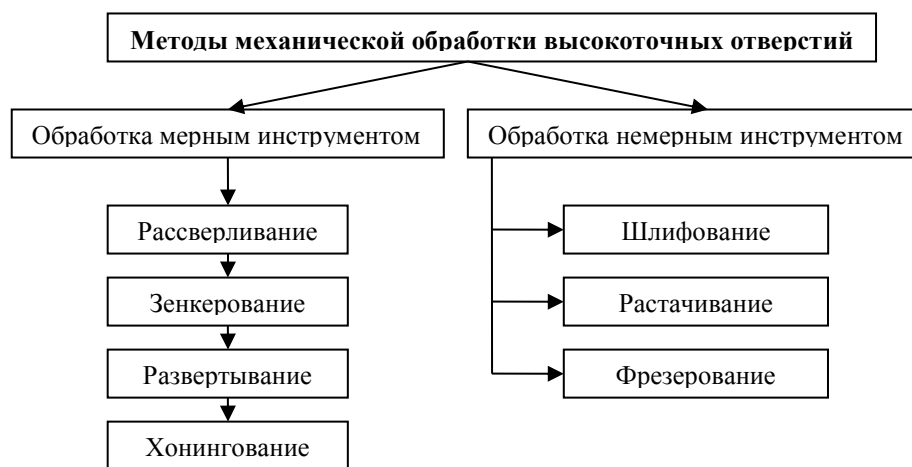


Рис. 1. Основные методы механической обработки высокоточных отверстий.

При круглом внутреннем продольном шлифовании (рис. 2) величина  $S_{срез}$  равна суммарной мгновенной площади поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами шлифовального круга. С физической точки зрения это означает, что если представить снятый за фиксированное время  $\tau$  объем материала  $v$  в виде ленты площадью поперечного сечения  $S_{срез}$  и длиной  $V_{кр} \cdot \tau$ , то справедливо соотношение:  $v = S_{срез} \cdot V_{кр} \cdot \tau$ , где  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с.



развертыванием) к технологии шлифования отверстия, т.е. к внутреннему шлифованию.

Оценим возможности уменьшения упругого перемещения  $y$  в технологической системе при растачивании отверстия на основе зависимости (2), рис. 3. Площадь поперечного сечения среза  $S_{срез}$  аналогично зависимости (4) определится:

$$S_{срез} = \frac{Q}{V_{дет}}, \quad (7)$$

где  $Q = S \cdot t \cdot V_{дет}$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $S$  – подача, м/об;  $t$  – глубина резания, м;  $V_{дет}$  – скорость вращения детали (скорость резания), м/с.

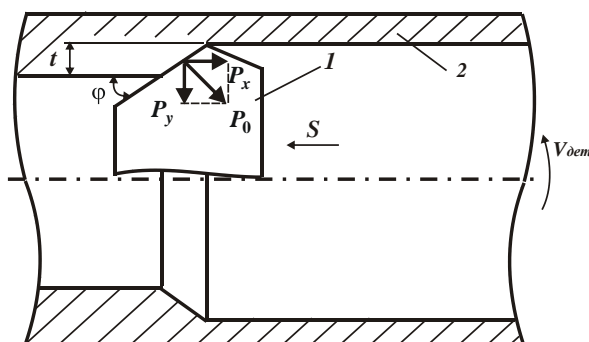


Рис. 3. Расчетная схема параметров процесса растачивания отверстия: 1 – резец; 2 – обрабатываемая деталь.

Окончательно зависимость (7) примет вид:

$$S_{срез} = S \cdot t. \quad (8)$$

Величину упругого перемещения  $y$  в технологической системе определим следующим образом (рис. 2):

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_0 \cdot \cos \varphi}{c} = \frac{P_z \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c} = \frac{\sigma \cdot S_{срез} \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c} = \frac{\sigma}{K_{рез} \cdot c} \cdot S \cdot t \cdot \cos \varphi, \quad (9)$$

где  $P_y = P_0 \cdot \cos \varphi$  – радиальная составляющая силы резания, Н;  $P_0 = P_z / K_{рез}$  – равнодействующая радиальной  $P_y$  и осевой  $P_x$  составляющих силы резания, Н;  $P_z = \sigma \cdot S_{срез}$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н.

Сравнивая аналогичные зависимости (6) и (8), видно, что они отличаются множителями  $V_{дет}/V_{кр}$  и  $\cos \varphi$ . Множитель  $V_{дет}/V_{кр}$  равен 1/60...1/100, а угол резца в плане  $\varphi$ , как правило, устанавливается в пределах  $0...45^\circ$ , т.е.  $\cos \varphi = 0,7...1,0$ . Следовательно, при шлифовании можно до 100 раз уменьшить величину упругого перемещения  $y$  в технологической системе. Это возможно при одинаковых значениях  $\sigma/K_{рез}$  и  $c$ . Как показано выше, при лезвийной обработке отношение  $\sigma/K_{рез}$  меньше, чем при шлифовании. Однако данное отличие составляет максимум 10 раз, тогда как отличие, вносимое множителем  $V_{дет}/V_{кр}$ , больше. Поэтому при шлифовании отверстия величина  $y$  будет меньше, чем при растачивании. Для того чтобы уменьшить величину  $y$  при растачивании, необходимо существенно увеличить скорость вращения детали  $V_{дет}$  (до уровня скорости круга  $V_{кр}$  при шлифовании). Это требует применения современных высокоскоростных металлорежущих станков.

Определим величину упругого перемещения  $y$  в технологической системе при фрезеровании цилиндрической фрезой диаметром  $D$ , рис. 4. Предположим, что за время  $\tau$  контакта одного зуба фрезы с обрабатываемой деталью снят материал объемом  $v = Q \cdot \tau$ , где  $Q = S \cdot t \cdot V_{\text{дем}}$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $S$  – подача, м/об;  $t$  – глубина резания, м;  $V_{\text{дем}}$  – скорость детали, м/с;  $\tau = \frac{\pi \cdot D}{z \cdot V_{\text{фр}}}$ ;  $z$  – количество зубьев фрезы;  $V_{\text{фр}}$  – скорость вращения фрезы, м/с.

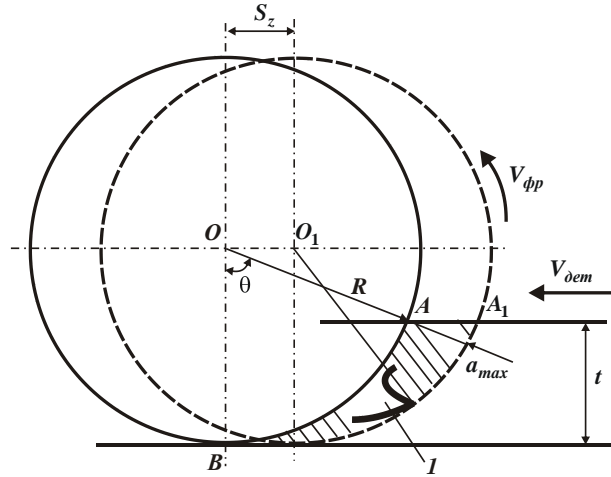


Рис. 4. Расчетная схема параметров процесса фрезерования цилиндрической фрезой: 1 – зуб фрезы.

Представим удаленный объем материала  $v$  в виде ленты площадью поперечного сечения  $S_{\text{срез}}$  и длиной, равной длине дуги контакта фрезы с обрабатываемым материалом, т.е. длине  $l = AB$  (рис. 4)  $v = S_{\text{срез}} \cdot l$ . Длина  $l$  равна:  $l = 0,5 \cdot D \cdot \theta$ , где  $\theta$  – угол контакта фрезы с обрабатываемой деталью, град. Исходя из рис. 4, угол  $\theta$  определяется  $\sin \theta \approx 2 \cdot \sqrt{t/D}$ .

С учетом того, что угол  $\theta$  изменяется в небольших пределах, справедливо соотношение:  $\sin \theta \approx \theta$ . Тогда  $\theta \approx 2 \cdot \sqrt{t/D}$ . Соответственно, длина  $l$  выразится:  $l = \sqrt{t \cdot D}$ . Средняя площадь поперечного сечения среза  $S_{\text{срез}}$  равна

$$S_{\text{срез}} = S \cdot t \cdot \frac{V_{\text{дем}}}{V_{\text{фр}}} \cdot \frac{\pi}{z} \cdot \sqrt{\frac{D}{t}}. \quad (10)$$

Если сравнить аналогичные зависимости (5) и (10) для шлифования и фрезерования, то видно, что они отличаются множителем  $\pi/z \cdot \sqrt{D/t}$  и величинами  $V_{\text{кр}}$  и  $V_{\text{фр}}$ . Множитель  $\pi/z \cdot \sqrt{D/t}$ , очевидно, всегда больше единицы. Следовательно, при фрезеровании при одинаковой производительности обработки  $Q = S \cdot t \cdot V_{\text{дем}}$  площадь поперечного сечения среза  $S_{\text{срез}}$  всегда будет больше, чем при шлифовании. Из этого вытекает, что и величина упругого перемещения  $y$  в технологической системе, которую можно определить по зависимости, аналогичной зависимости (6)

$$y = \frac{\sigma}{K_{\text{рез}} \cdot c} \cdot S \cdot t \cdot \frac{V_{\text{дем}}}{V_{\text{фр}}} \cdot \frac{\pi}{z} \cdot \sqrt{\frac{D}{t}}, \quad (11)$$

всегда будет больше при фрезеровании. Уменьшить площадь поперечного сечения среза  $S_{рез}$  и соответственно величину  $y$  при фрезеровании можно увеличением скорости вращения фрезы  $V_{фр}$  до значения скорости вращения круга  $V_{кр}$  при шлифовании, а также уменьшением диаметра фрезы  $D$ .

Сравним зависимости (9) и (11) для растачивания и фрезерования. Как видно, зависимость (9) содержит дополнительно множитель  $\cos \varphi$ , а зависимость (11) – множитель  $V_{дет}/V_{фр} \cdot \pi/z \cdot \sqrt{D/t}$ . Выше показано, что угол реза в плане  $\varphi$ , как правило, устанавливается в пределах  $0 \dots 45^\circ$ , т.е.  $\cos \varphi = 0,7 \dots 1,0$ . Множитель  $V_{дет}/V_{фр} \cdot \pi/z \cdot \sqrt{D/t}$  зависит от многих параметров и может изменяться в значительных пределах, принимая значения меньше единицы. Следовательно, при фрезеровании при одной и той же производительности обработки можно обеспечить меньшую величину упругого перемещения  $y$  в технологической системе, чем при растачивании. Это свидетельствует о возможности эффективного применения метода фрезерования с использованием концевой фрезы для финишной обработки отверстия, рис. 5. При обработке по данной схеме станок обеспечивает движение фрезы по контуру, описывающему окружность с заданным радиусом, т.е. происходит своего рода “расфрезеровывание” отверстия с круговой подачей. Одновременно производится вертикальная подача. По сути, данная схема обработки фактически соответствует схеме круглого внутреннего продольного шлифования.

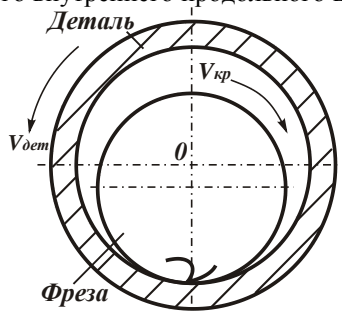


Рис. 5. Схема фрезерования отверстия концевой фрезой.

На основе проведенного в настоящем параграфе анализа можно заключить, что переход от обработки отверстий мерным инструментом к обработке немерным инструментом (рис. 1) позволяет уменьшить упругие перемещения, возникающие в технологической системе, и соответственно повысить точность обработки. Так, упругие перемещения, образующиеся при растачивании, будут меньше, чем при рассверливании отверстий. При фрезеровании и шлифовании отверстий можно добиться еще меньших значений величины упругого перемещения  $y$ . Существенное увеличение скорости резания (скорости вращения инструмента  $V_{инст}$ ), т.е. переход в область высокоскоростного фрезерования и шлифования, позволяет еще в большей степени уменьшить величину упругого перемещения  $y$ , согласно преобразованной зависимости (6):

$$y = \frac{\sigma}{K_{рез} \cdot c} \cdot S \cdot t \cdot \frac{1}{\left( \frac{V_{инст}}{V_{дет}} \right)} . \quad (12)$$

В обобщенном виде характер изменения величины упругого перемещения  $y$  от соотношения  $V_{инст}/V_{дет}$  при условии  $\frac{\sigma}{K_{рез} \cdot c} \cdot S \cdot t = 1$  показан на рис. 6. Там же

показаны уровни значений величины упругого перемещения  $y$ , достигаемые для различных методов механической обработки отверстий.

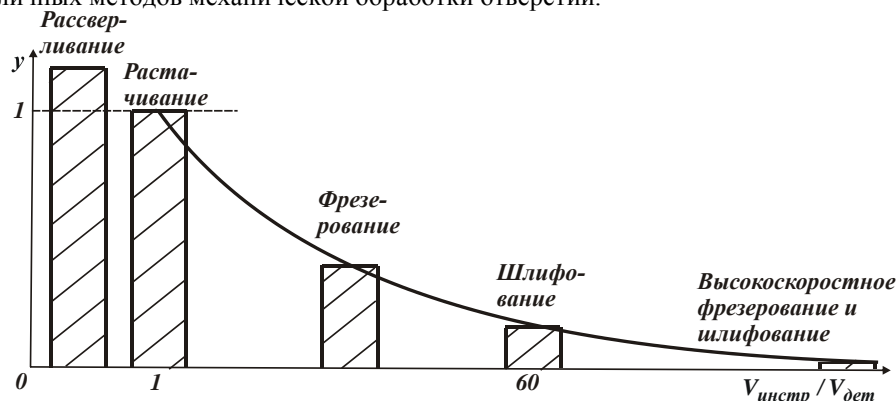


Рис. 6. Обобщенная зависимость величины упругого перемещения  $y$  от соотношения  $V_{инстр} / V_{дет}$  для различных методов механической обработки отверстия.

Таким образом, аналитически определены погрешности обработки отверстий, обусловленные неравномерно снимаемым припуском и образующимися в технологической системе упругими перемещениями, при резании мерными и немерными лезвийными и абразивными инструментами. Показано, что при обработке отверстий мерными инструментами (например, при рассверливании) образуются значительные погрешности, обусловленные, главным образом, величиной отклонения от соосности обрабатываемого и обработанного отверстий, которые трудно устранить на последующих переходах зенкерования, развертывания и хонингования. Расчетами установлено, что при переходе к обработке отверстий немерными инструментами (шлифованию, растачиванию и фрезерованию) за счет разбиения припуска по проходам появляется возможность существенного уменьшения погрешностей при одинаковой производительности обработки. В особой мере это относится к высокоскоростному фрезерованию отверстий, что позволяет рассматривать его одним из наиболее эффективных методов обработки высокоточных отверстий в условиях съема неравномерного припуска.

#### Перечень ссылок:

1. Технологія машинобудування: підручник / О.В. Якимов, В.М. Царюк, О.О. Якимов, Г.О. Оборський, В.П. Ларшин, О.В. Самойленко. – Одеса: Астропринт, 2001. – 608 с.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
3. 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.
4. Новиков Ф.В. Теоретический анализ формирования погрешностей при обработке отверстия с начальной значительной некруглостью / Ф.В. Новиков, И.Е. Иванов, И.А. Рябенков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2008. – Вип. 68. – С. 119-135.