

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/м²; $K_{рез} = P_z / P_0$ – 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, м²; S – подача, м/об; Δ_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; 2φ – 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 σ, S, Δ_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 Δ_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 проходкам. 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.

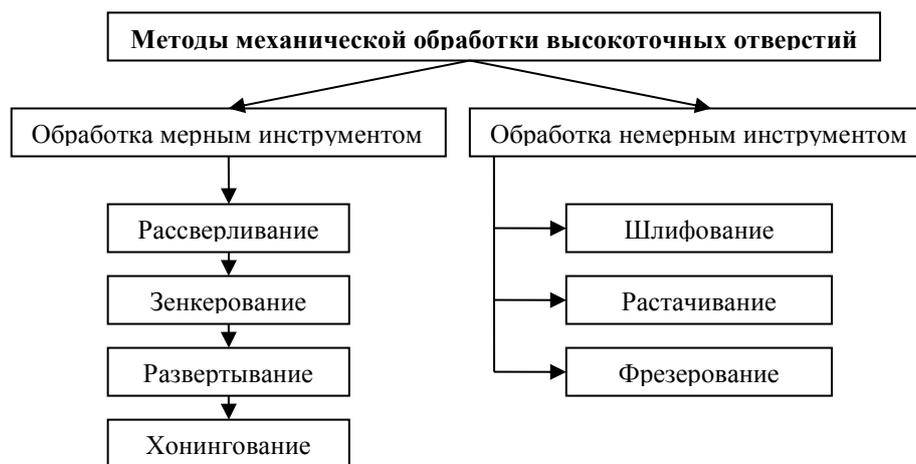


Рис. 1. Основные методы механической обработки высокоточных отверстий.

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 τ 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.

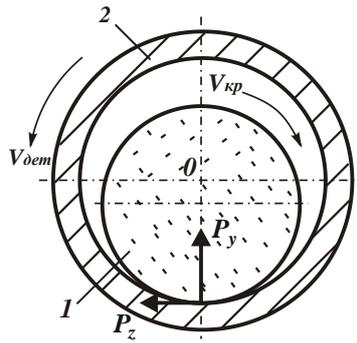


Рис. 2. Расчетная схема параметров процесса внутреннего шлифования: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая деталь.

Объем снятого материала v связан с производительностью обработки Q :

$$v = Q \cdot \tau, \quad \text{тогда} \quad (3)$$

$$S_{\text{срез}} = \frac{Q}{V_{\text{кр}}}. \quad (4)$$

При продольном шлифовании $Q = S \cdot t \cdot V_{\text{дет}}$, где S – продольная подача, м/об; t – глубина шлифования, м; $V_{\text{дет}}$ – скорость вращения детали, м/с. Тогда $S_{\text{срез}}$ и величина упругого перемещения y в технологической системе, определяемая зависимостью (2), аналитически опишутся:

$$S_{\text{срез}} = S \cdot t \cdot \frac{V_{\text{дет}}}{V_{\text{кр}}}, \quad (5)$$

$$y = \frac{\sigma}{K_{\text{рез}} \cdot c} \cdot S \cdot t \cdot \frac{V_{\text{дет}}}{V_{\text{кр}}}. \quad (6)$$

Сравнивая зависимости (1) и (6), видно, что они отличаются множителями: $2 \cdot \Delta_0 \cdot \cos \varphi$ и $t \cdot V_{\text{дет}} / V_{\text{кр}}$. Угол в плане сверла φ может принимать значения $45^\circ \dots 60^\circ$. Тогда наименьшее значение $2 \cdot \Delta_0 \cdot \cos \varphi$ в зависимости (1) равно Δ_0 .

Отношение $V_{\text{дет}} / V_{\text{кр}}$ при шлифовании устанавливается в пределах $1/60 \dots 1/100$. Тогда наименьшее значение множителя $t \cdot V_{\text{дет}} / V_{\text{кр}}$ в зависимости (6) будет равно $0,01 \cdot t$. Учитывая то, что при окончательном шлифовании глубина шлифования t устанавливается, как правило, в пределах $0,005 \dots 0,01$ мм, то наименьшее значение множителя $0,01 \cdot t$ в зависимости (6) равно $0,05$ мкм. Очевидно, величина Δ_0 при рассверливании принимает значительно большие значения (в пределах 1 мм). Следовательно, при шлифовании можно существенно уменьшить величину y , определяемую зависимостью (6). Из этого вытекает, что при относительно больших значениях величины Δ_0 целесообразно обработку отверстия выполнять по схеме шлифования вместо рассверливания. Однако необходимо отметить, что данный расчет справедлив, если жесткости c технологической системы, а также отношения $\sigma / K_{\text{рез}}$ в двух случаях равны.

Несомненно, отношение $\sigma / K_{\text{рез}}$ при шлифовании будет больше, чем при рассверливании. Однако различие отношений $\sigma / K_{\text{рез}}$ не столь существенно по сравнению с различием множителей Δ_0 и $t \cdot V_{\text{дет}} / V_{\text{кр}}$, входящих в зависимости (1) и (6). Поэтому при шлифовании упругое перемещение y в технологической системе будет меньше, чем при рассверливании. Следовательно, эффективно переходить от технологии рассверливания отверстия (с последующим его зенкерованием и

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, м³/с; S – подача, м/об; t – глубина резания, м; $V_{дет}$ – скорость вращения детали (скорость резания), м/с.

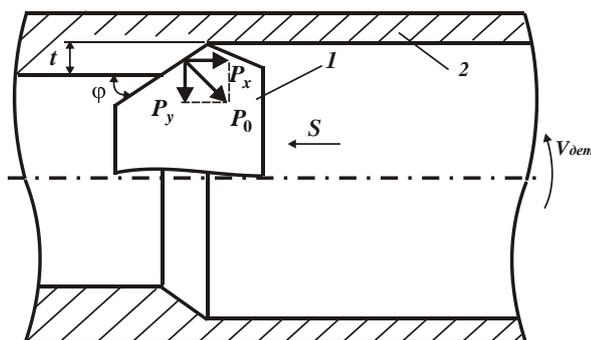


Рис. 3. Расчетная схема параметров процесса растачивания отверстия: 1 – резец; 2 – обрабатываемая деталь.

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 φ , 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 τ 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, м³/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.

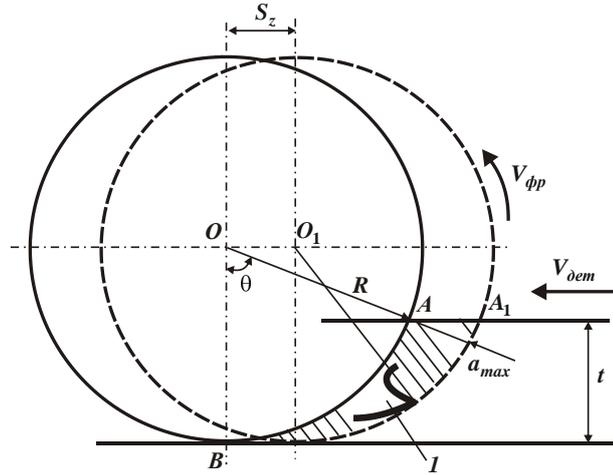


Рис. 4. Расчетная схема параметров процесса фрезерования цилиндрической фрезой: 1 – зуб фрезы.

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 θ – угол контакта фрезы с обрабатываемой

деталью, град. Исходя из рис. 4, угол θ определяется $\sin \theta \approx 2 \cdot \sqrt{t/D}$.

С учетом того, что угол θ 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 φ , 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.

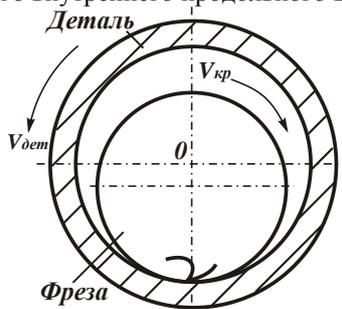


Рис. 5. Схема фрезерования отверстия концевой фрезой.

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.

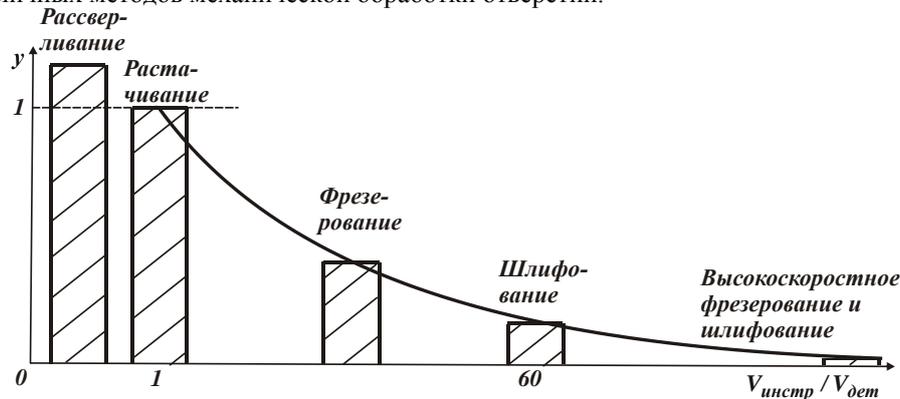


Рис. 6. Обобщенная зависимость величины упругого перемещения y от соотношения $V_{инстр} / V_{дет}$ для различных методов механической обработки отверстия.

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.