

УДК 621.923

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-10>

Полянский В. И., к. т. н.

ООО «Империя металлов», г. Харьков

КОНЦЕПЦИИ ВЫСОКОТОЧНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ МАШИН

Теоретически определены условия повышения точности обработки отверстий при использовании мерных и немерных лезвийных инструментов и при шлифовании. Показано, что при обработке отверстий с неравномерно снимаемым припуском осевыми инструментами образуются упругие перемещения, снижающие точность обработки. Поэтому обработку отверстий в несколько проходов целесообразно осуществлять сверлами с разными диаметрами, увеличивая диаметр от прохода к проходу. Показано, что основным параметром, определяющим погрешность обработки, является несоосность осевого инструмента и обрабатываемого отверстия. Теоретически установлено, что при обработке отверстий мерными инструментами, например, при растачивании, гораздо проще обеспечить требуемую точность, чем при обработке осевым инструментом. Для этого необходимо увеличивать скорость резания и уменьшать подачу и глубину резания и применять высокоэффективные режущие инструменты из СТМ. При расфрезеровывании отверстия можно достичь еще большего повышения точности его обработки. Показано, что основным условием высокоточной обработки при внутреннем шлифовании является снижение энергоемкости процесса резания за счет уменьшения интенсивности трения в зоне резания.

Ключевые слова: *рассверливание отверстия, растачивание, внутреннее шлифование, упругое перемещение, точность обработки, производительность обработки*

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами. Обеспечение высокоточной обработки отверстий в деталях машин является важным условием создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. В успешном решении этой задачи важная роль принадлежит разработке эффективных технологических процессов финишной лезвийной и абразивной обработки отверстий. Наряду с повышением точности обработки, они должны обеспечивать и высокие показатели производительности и качества (бездефектность, уменьшение шероховатости обработанной поверхности и т.д.). В связи с этим возникает необходимость проведения теоретического анализа показателей точности лезвийной и абразивной обработки отверстий и выявления условия их повышения. Это позволит научно обоснованно подходить к разработке эффективных технологических процессов финишной лезвийной и абразивной обработки отверстий, обеспечивающих высокие показатели точности, качества и производительности обработки. В особой мере это относится к технологическим процессам рассверливания и расфрезеровывания отверстий, внутреннего шлифования. Исследования выполнены в соответствии с тематическим планом научно-практических работ ООО «Империя металлов» (г. Харьков).

Анализ последних достижений и публикаций. Вопросам обеспечения точности механической обработки отверстий в научно-технической литературе постоянно уделяется значительное внимание. В работах [1 – 4] рассмотрены общие подходы к определению условий повышения точности обработки отверстий лезвийными и абразивными инструментами. Показано, что вследствие неравномерности снимаемого припуска и возникающих упругих перемещений в технологической системе сложно при финишной обработке отверстий добиться требуемой точности. В работах [5 – 7] приведены теоретические решения по исправлению погрешности обработки отверстий для конкретных условий резания лезвийными инструментами и шлифования. Однако, для более полного представления о технологических возможностях повышения точности обработки отверстий необходимо располагать обобщенными теоретическими решениями, охватывающими все основные методы механической обработки отверстий. Для этого необходимо с единых позиций аналитически описать возникающие при абразивной и лезвийной обработке погрешности отверстий и на их основе определить пути их уменьшения.

Цель работы – теоретический анализ путей повышения точности обработки отверстий в деталях машин при их лезвийной обработке и при шлифовании.

Матеріали досліджень. Традиційно фінішну обробку отверстий виробляють мерними і немерними режущими інструментами. В останні роки отримав також застосування високоефективний метод расфрезерування отверстий на сучасних металорежущих станках з ЧПУ типу «оброблюючий центр», який дозволяє суттєво підвищити точність і продуктивність обробки. Основним недоліком обробки мерними осевими інструментами (сверлами, зенкерами, развертками) є перевищення діаметра обробленого отверстия діаметра інструмента в зв'язі з нерівномірністю снимаемого припуску і виникаючими упругими переміщеннями в технологічній системі, що, природно, знижує точність оброблюваного отверстия (точності його розміра і форми). При обробці немерним інструментом (при растачивании отверстия резцом), навпаки, діаметр обробленого отверстия, як правило, менше заданого діаметра внаслідок виникаючих в технологічній системі упругих переміщень. Тому важливо теоретично встановити закономірності формування погрешностей обробки в двох розглянутих випадках.

На рис. 1 представлена розрахункова схема визначення величини упругого переміщення (деформування) сверла при расверливанні отверстия за один проход Δ_1 , коли осі сверла з центром O і оброблюваного отверстия з центром O_0 не збігаються на величину Δ_0 [6]:

$$\Delta_1 = \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta_0}{K_{рез} \cdot c}, \quad (1)$$

де σ – умовне напруження різання, Н/м²; $K_{рез} = P_z / P_y$; P_z, P_y – тангенціальна і радіальна складові сили різання, діючі на лезві сверла, Н; S – подача, м/об.; c – приведена жорсткість сверла в радіальному напрямку, Н/м; φ – половина подвійного кута в плані сверла; Δ_0 – величина несоосности сверла і оброблюваного отверстия, м.

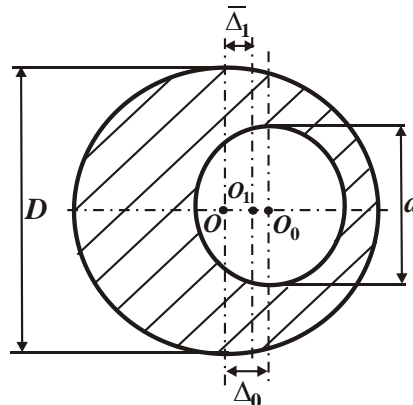


Рис. 1. Розрахункова схема визначення величини упругого переміщення сверла при расверливанні отверстия з початковим діаметром d

На другому проході сверла величина його упругого деформування Δ_2 визначається цією ж залежністю (1), розглядаючи в ній замість величини Δ_0 величину Δ_1 :

$$\Delta_2 = \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta_1}{K_{рез} \cdot c} = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c} \right)^2 \cdot \Delta_0. \quad (2)$$

Аналогічно описується величина упругої деформації сверла на третьому і на всіх наступних n проходах:

$$\Delta_3 = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c} \right)^3 \cdot \Delta_0; \quad (3)$$

$$\Delta_n = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c} \right)^n \cdot \Delta_0; \quad (4)$$

Отношение Δ_0 / Δ_n определяет суммарное уточнение $\varepsilon_{сум}$ [2]:

$$\varepsilon_{сум} = \frac{\Delta_0}{\Delta_n} = \left(\frac{K_{рез} \cdot c}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)^n. \quad (5)$$

Соответственно уточнение на проходе ε равно:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_0}{\Delta_1} = \frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{\Delta_2}{\Delta_3} = \dots = \frac{\Delta_{n-1}}{\Delta_n} = \frac{K_{рез} \cdot c}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}. \quad (6)$$

Поскольку $\varepsilon > 1$, то отношение $\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c} < 1$. Следовательно, с каждым последующим проходом сверла величина его упругой деформации будет уменьшаться $\Delta_n \rightarrow 0$, что обеспечит достижение заданной точности обрабатываемого отверстия.

Необходимо обратить внимание на то, что если обработка на первом проходе будет производиться сверлом с диаметром, равным заданному диаметру обрабатываемого отверстия, то это приведет к образованию погрешности обработки отверстия величиной Δ_0 . Причем, устранить эту погрешность на последующих проходах сверла невозможно. Поэтому обработку отверстий за несколько проходов целесообразно осуществлять сверлами с разными диаметрами, увеличивая диаметр от прохода к проходу. Аналогично устанавливаются диаметры зенкеров и разверток при обработке отверстий за несколько проходов, обеспечивая, таким образом, заданную точность обрабатываемого отверстия.

При растачивании отверстия резцом с неравномерно снимаемым припуском, т.е. при его обработке немерным инструментом, диаметр обрабатываемого отверстия формируется лишь за счет уменьшения величины упругого перемещения резца или детали, тогда как в предыдущем случае (при рассверливании отверстия) диаметр отверстия определялся суммой диаметра сверла и его упругого перемещения. Следовательно, при растачивании отверстия значительно проще добиться требуемой точности его обработки, чем при рассверливании. Для этого достаточно управлять лишь величиной упругого перемещения резца. Так, при первом проходе резца величина его упругого перемещения y_1 в радиальном направлении, исходя из соотношений [4]:

$$y_1 = \frac{P_{y1}}{c} = \frac{P_{z1} \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot (t - y_1) \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c}, \quad \text{равна:}$$

$$y_1 = \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{рез} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)}, \quad (7)$$

где P_{y1} , P_{z1} – радиальная и тангенциальная составляющие силы резания при первом проходе, Н; c – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м; φ – главный угол резца в плане; $K_{рез} = P_{z1} / P_{y1}$; S – подача, м/об.; t – глубина резания, м.

Уменьшить величину y_1 можно увеличением второго слагаемого, стоящего в знаменателе. При втором проходе сверла величина его упругого перемещения y_2 определяется:

$$y_2 = \frac{(t + y_1)}{\left(1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} + \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2}. \quad (8)$$

При n -ом проходе имеем:

$$y_n = \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} + \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2} + \dots + \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n}. \quad (9)$$

Характер изменения величины y_n подчиняется геометрической прогрессии, тогда [8]:

$$y_n = y_1 \cdot \frac{(1 - \varepsilon^{-n})}{(1 - \varepsilon)} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t \cdot \cos \varphi}{K_{pez} \cdot c} \cdot (1 - \varepsilon^{-n}) = \frac{\sigma \cdot Q \cdot \cos \varphi}{K_{pez} \cdot c \cdot V} \cdot (1 - \varepsilon^{-n}), \quad (10)$$

где $\varepsilon = 1 + \frac{K_{pez} \cdot c}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}$ – уточнение на проходе; $Q = S \cdot t \cdot V$ – производительность обработки, м³/с.

Исходя из зависимости (10) уменьшить величину y_n при заданной производительности обработки $Q = S \cdot t \cdot V$ можно путем увеличения скорости резания V , пропорционально уменьшая подачу S или глубину резания t . При этом с уменьшением подачи S увеличивается уточнение на проходе ε , уменьшается величина ε^{-n} и увеличивается множитель $(1 - \varepsilon^{-n})$, что не позволяет пропорционально уменьшать величину y_n с увеличением скорости резания V .

Уменьшение глубины резания t при заданном значении снимаемого припуска Π приводит к увеличению $n = \Pi/t$ и соответственно к уменьшению величина ε^{-n} и увеличению множителя $(1 - \varepsilon^{-n})$, а это приводит к увеличению величины y_n . Поэтому с увеличением скорости резания V (при пропорциональном уменьшении глубины резания t и выполнении условия $Q = const$) величина y_n будет уменьшаться, однако не по линейному закону в связи с увеличением множителя $(1 - \varepsilon^{-n})$ в зависимости (10).

Более эффективным решением, вытекающим из зависимости (10), следует рассматривать возможность увеличения производительности обработки $Q = S \cdot t \cdot V$ за счет увеличения скорости резания V . В этом случае будет выполняться условие $y_n = const$ при неизменных значениях подачи S и глубины резания t и увеличивающемся значении скорости продольной подачи $S_{прод}$, определяемой из условия: $\tau = \frac{S}{S_{прод}} = \frac{\pi \cdot D_{дет}}{V}$, где τ – время перемещения резца в продольном направлении на величину подачи S , с; $D_{дет}$ – диаметр детали, м. Тогда

$$S_{прод} = \frac{S \cdot V}{\pi \cdot D_{дет}}. \quad (11)$$

Как видно, чем больше V , тем больше $S_{прод}$. Уточнение на проходе ε будет оставаться неизменным, поскольку подача S в этом случае является неизменной.

Для обеспечения заданной точности обработки, исходя из зависимости (10), необходимо уменьшать отношение σ/K_{pez} и увеличивать жесткость технологической системы c . При этом уточнение на проходе ε увеличивается, что приводит к уменьшению величины ε^{-n} и увеличению множителя $(1 - \varepsilon^{-n})$, однако не столь существенно по сравнению с уменьшением y_n за счет линейного уменьшения отношения σ/K_{pez} и увеличения жесткости

технологической системы c . В итоге величину U_n можно уменьшить до необходимого значения.

Полученные теоретические решения согласуются с практикой растачивания отверстий, где на финишных операциях, например, с применением резцов из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ) обработку осуществляют с увеличенной скоростью резания V и относительно небольшими значениями подачи S или глубины резания t . Это обеспечивает повышение точности и производительности обработки. Кроме того, применение резцов из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ), обладающих высокой остротой и режущей способностью, позволяет уменьшить отношение $\sigma / K_{рез}$, что дополнительно снижает величину U_n и повышает точность обработки.

Используя зависимость (10), произведем анализ возможностей уменьшения величины U_n при внутреннем шлифовании. В этом случае угол $\varphi = 0$; $\cos \varphi = 1$; $V = V_{дет}$ и, соответственно, все закономерности, установленные для лезвийной обработки, остаются справедливыми и для внутреннего шлифования. Поэтому целесообразно увеличивать скорость детали $V_{дет}$ при одновременном уменьшении подачи S и глубины шлифования t . Это способствует повышению точности и производительности обработки. Важно также обеспечить уменьшение отношения $\sigma / K_{рез}$ и увеличение жесткости технологической системы c .

Как известно, при шлифовании параметр σ больше, чем при лезвийной обработке из-за наличия интенсивного трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом. Поэтому уточнение на проходе ε будет меньше, что приведет к увеличению величины ε^{-n} и уменьшению множителя $(1 - \varepsilon^{-n})$ в зависимости (10). Это в определенной степени будет компенсировать увеличение величины U_n с увеличением параметра σ . Исходя из сказанного, увеличение величины U_n при внутреннем шлифовании не будет столь значительным по сравнению с лезвийной обработкой. При глубинном внутреннем шлифовании с относительно небольшой скоростью детали $V_{дет}$ величина U_n увеличится. Следовательно, целесообразно использовать схему многопроходного внутреннего шлифования.

При расфрезеровывании отверстия величина U_n подчиняется тем же закономерностям, что и при растачивании и внутреннем шлифовании [9]. Следовательно, эффективно увеличивать скорость резания, т.е. обработку производить в условиях высокоскоростного резания. Благодаря увеличению количества одновременно работающих режущих лезвий фрезы, это позволит повысить производительность и точность обработки по сравнению с процессами растачивания и внутреннего шлифования и, тем более, по сравнению с процессом рассверливания отверстия. Таким образом показано, что с точки зрения повышения производительности и точности методы механической обработки отверстий немерными инструментами (резцами, шлифовальными кругами, фрезами) располагают большими технологическими возможностями, чем методы обработки мерными осевыми инструментами (сверлами, зенкерами, развертками).

Выводы. Теоретически определены условия повышения точности обработки отверстий при использовании мерных и немерных лезвийных инструментов и при шлифовании. Показано, что при обработке отверстий с неравномерно снимаемым припуском осевыми инструментами образуются упругие перемещения, снижающие точность обработки. Поэтому обработку отверстий за несколько проходов целесообразно осуществлять сверлами с разными диаметрами, увеличивая диаметр от прохода к проходу. Установлено, что при обработке отверстий мерными инструментами, например, при растачивании и расфрезеровывании, гораздо проще обеспечить требуемую точность, чем при рассверливании. Показано, что основным условием высокоточной обработки при внутреннем шлифовании является снижение энергоемкости процесса резания за счет уменьшения интенсивности трения в зоне резания.

Перспективы дальнейшей работы в данном направлении. В дальнейших исследованиях необходимо теоретически и экспериментально определить условия уменьшения

енергоємкості процесу різання, оказуючого значительне вплив на точність оброблюваного отвору при його розсверлюванні, растачуванні і внутрішньому шліфуванні.

Информационные источники

1. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. Маталин А. А. Технология машиностроения: учебник. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
3. Сизый Ю. А., Сталинский Д. В. Динамика и теплофизика шлифования. – Харьков: ГП УкрНТЦ «Энергосталь», 2016. – 448 с.
4. 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.
5. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Л.: Машиностроение, 1984. – 103 с.
6. Иванов И. Е. Технологическое обеспечение точности и стабильности изготовления резьбовых отверстий в баллонах в условиях массового производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения». – Мариуполь, 2008. – 21 с.
7. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов, 1979. – 232 с.
8. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей: монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.
9. Полянский В. И. Расширение технологических возможностей повышения точности механической обработки отверстий // Перспективні технології та прилади: Збірник наукових праць. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – №11 (2). – С. 87-92.

Полянський В. І., к.т.н.

ТОВ «Імперія металів», м. Харків

КОНЦЕПЦІЇ ВИСОКОТОЧНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ОТВОРІВ В ДЕТАЛЯХ МАШИН

Теоретично визначено умови підвищення точності обробки отворів при використанні мірних і немірних лезових інструментів і при шліфуванні. Показано, що при обробці отворів з нерівномірно знімаємим припуском осьовими інструментами утворюються пружні переміщення, що знижують точність обробки. Тому обробку отворів в кілька проходів доцільно здійснювати свердлами з різними діаметрами, збільшуючи діаметр від проходу до проходу. Показано, що основним параметром, що визначає похибку обробки, є неспіввідношення осьового інструменту і оброблюваного отвору. Теоретично встановлено, що при обробці отворів мірними інструментами, наприклад, при розточуванні, набагато простіше забезпечити необхідну точність, ніж при обробці осьовим інструментом. Для цього необхідно збільшувати швидкість різання і зменшувати подачу і глибину різання та застосовувати високоефективні різальні інструменти з СНМ. При розфрезеруванні отвору можна досягти ще більшого підвищення точності його обробки. Показано, що основною умовою високоточної обробки при внутрішньому шліфуванні є зниження енергоємності процесу різання за рахунок зменшення інтенсивності тертя в зоні різання.

Ключові слова: розсверлювання отвору, розточування, внутрішнє шліфування, пружне переміщення, точність обробки, продуктивність обробки

Polyansky V. I., Ph.D.

LLC "Empire of metals", Kharkiv

CONCEPTS OF HIGH-PRECISION MECHANICAL MACHINING OF OPENINGS IN MACHINE PARTS

Theoretically, the conditions for increasing the accuracy of hole machining when using dimensional and non-dimensional blade tools and during grinding are theoretically determined. It is shown that when machining holes with uneven allowance with axial tools, elastic displacements are formed that reduce the accuracy of the machining. Therefore, it is advisable to process holes in several passes with drills with different diameters, increasing the diameter from the passage to the

passage. It is shown that the main parameter determining the processing error is the misalignment of the axial tool and the machined hole. It has been theoretically established that when machining holes with measuring tools, for example, during boring, it is much easier to provide the required accuracy than when machining with an axial tool. To do this, it is necessary to increase the cutting speed and reduce the feed and depth of cut and apply high-performance cutting tools from STM. When milling holes, you can achieve even greater increase in the accuracy of its processing. It is shown that the main condition for high-precision machining during internal grinding is to reduce the energy intensity of the cutting process by reducing the friction intensity in the cutting zone.

Key words: *hole drilling, boring, internal grinding, elastic displacement, machining accuracy, machining productivity*