

УДК 621.923

Т.М. Брижан, Минчев Р.М., Мариуполь, Украина

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

В роботі теоретично обґрунтовані умови підвищення точності обробки глибоких отворів у зв'язку з виникненням в технологічній системі пружних переміщень стосовно до процесів лезової і абразивної обробки, включаючи процеси розточування, розсвердлювання, розгортання, фрезерування та шліфування. Теоретично доведені принципові відмінності у формуванні похибок обробки отворів для розглянутих процесів. Встановлено, що при зніманні нерівномірних припусків домогтися найкращих показників точності та продуктивності обробки отворів можна на основі використання методу внутрішнього шліфування і високошвидкісного фрезерування кінцевими фрезами на верстатах зі ЧПУ.

В работе теоретически обоснованы условия повышения точности обработки глубоких отверстий в связи с возникновением в технологической системе упругих перемещений применительно к процессам лезвийной и абразивной обработке, включая процессы растачивания, рассверливания, развертывания, фрезерования и шлифования. Теоретически доказаны принципиальные отличия в формировании погрешностей обработки отверстий для рассмотренных процессов. Установлено, что при съеме неравномерных припусков добиться наилучших показателей точности и производительности обработки отверстий можно на основе использования метода внутреннего шлифования и высокоскоростного фрезерования концевыми фрезами на станках с ЧПУ.

In this paper theoretically grounded conditions increase the accuracy of the machining of deep holes on the occurrence in the technological system of elastic displacements in relation to the processes of cutting and abrasive machining processes including boring, boring, reaming, milling and grinding. Theoretically proved fundamental differences in the formation of the hole machining errors for the considered processes. It is found that when removing irregular allowances to achieve the best performance and the accuracy of the processing performance of holes can be using the method of internal grinding and high speed end mills milling on CNC machines.

Введение. Изготовление высокоточных глубоких отверстий является наиболее сложными операциями технологии машиностроения в связи с возникновением при обработке значительных погрешностей. Поэтому совершенствованию данных операций на основе применения новых технологий, инструментов и оборудования уделяется большое внимание. В последние годы широко применяются технологии высокоскоростной обработки отверстий, позволяющие уменьшить силовую и тепловую напряженность процесса резания и соответственно повысить точность и производительность обработки. Вместе с тем, возможности этих технологий в полной мере не изучены, что затрудняет их практическое использование. В связи с этим актуальным является теоретическое обоснование условий

повышения точности и производительности обработки глубоких отверстий в деталях, изготовленных из труднообрабатываемых материалов.

Анализ основных достижений и литературы. Научные основы точности и производительности механической обработки отверстий отражены в учебниках и монографиях по технологии машиностроения и теории резания материалов [1 – 4]. Однако в них выбор методов обработки отверстий и рациональных технологических параметров рекомендуется производить в основном с использованием результатов экспериментальных исследований, т.к. отсутствуют общие аналитические решения, с единых позиций описывающие технологические закономерности и возможности всего многообразия существующих методов обработки отверстий. В особой мере это относится к современным методам высокоскоростной обработки глубоких отверстий. Поэтому установление общих теоретических решений по формированию погрешностей обработки глубоких отверстий для основных методов лезвийной и абразивной обработки, в том числе высокоскоростной обработки, имеет важное теоретическое и практическое значение.

Цель исследования, постановка задачи. Целью работы является определение путей повышения точности и производительности обработки глубоких отверстий на основе установления общих технологических закономерностей формирования погрешностей обработки и условий их уменьшения для различных процессов лезвийной и абразивной обработки отверстий. Используя данные решения, можно будет научно обоснованно подходить к выбору наиболее эффективных методов обработки глубоких отверстий и направлений их дальнейшего совершенствования.

Материалы исследования. В общем случае при механической обработке радиальная составляющая силы резания P_y , определяющая упругое перемещение y , возникающее в технологической системе, и погрешность обработки, описывается аналитической зависимостью [5]:

$$P_y = \frac{\sigma \cdot F}{K_{pez}}, \quad (1)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м² (энергоёмкость обработки); $K_{pez} = P_z / P_y$; P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; F – площадь поперечного сечения среза, м².

При точении и растачивании (рис. 1) с учетом соотношений [2]:

$$a = S \cdot \sin \varphi; \quad (2)$$

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}, \quad (3)$$

площадь поперечного сечения среза F определяется:

$$F = a \cdot b = S \cdot t, \quad (4)$$

где a , b – соответственно толщина и ширина среза, м; S – подача, м/об.; t – глубина резания, м; φ – главный угол резца в плане.

При шлифовании площадь поперечного сечения среза F равна [5]:

$$F = \frac{Q}{V_{кр}}, \quad (5)$$

где Q – производительность обработки, м³/с; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

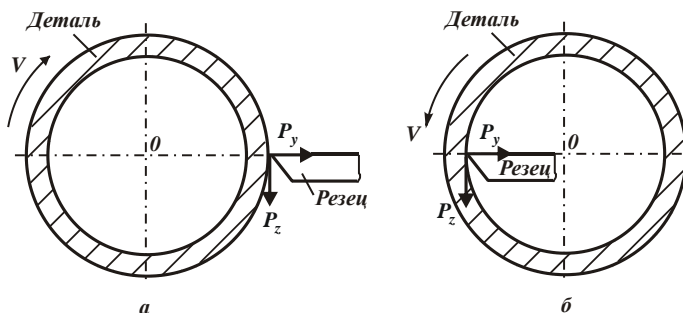


Рисунок 1 – Расчетные схемы параметров процессов точения (а) и растачивания (б)

По физической сути параметр F при шлифовании определяет мгновенную суммарную площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зёрнами шлифовального круга (рис. 2,а).

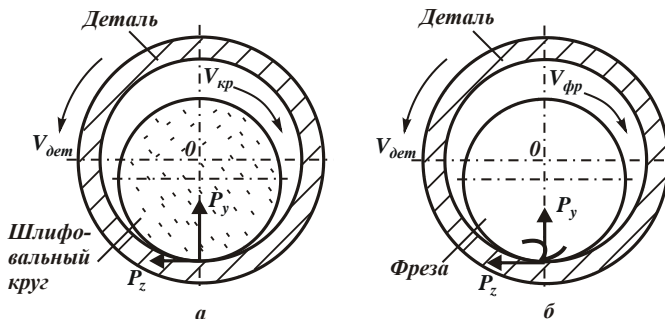


Рисунок 2 – Расчетные схемы параметров процессов шлифования (а) и фрезерования (б) отверстия

При круглом продольном шлифовании Q выражается:

$$Q = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot S_{\text{прод}} \cdot t, \quad (6)$$

где $D_{\text{дет}}$ – диаметр обрабатываемой детали, м; $S_{\text{прод}}$ – скорость продольной подачи, м/с; t – глубина шлифования, м.

Соответственно при круглом врезном шлифовании:

$$Q = S \cdot V_{\text{дет}} \cdot t, \quad (7)$$

где S – продольная подача, м/об.; $V_{\text{дет}}$ – скорость вращения детали, м/с.

Как следует из зависимости (1), основными условиями уменьшения радиальной составляющей силы резания P_y и соответственно величины упругого перемещения y , возникающего в технологической системе, является уменьшение отношения $\sigma / K_{\text{рез}}$ и площади поперечного сечения среза F . Уменьшение отношения $\sigma / K_{\text{рез}}$ (энергоёмкости обработки σ) предполагает повышение режущей способности инструмента и уменьшение интенсивности трения в зоне резания. При точении и растачивании уменьшение F по зависимости (4) предполагает уменьшение толщины a и ширины b среза и соответственно подачи S и глубины резания t . Однако, это приведет к уменьшению производительности обработки

$$Q = S \cdot V \cdot t, \quad (8)$$

где V – скорость резания (скорость вращения детали или инструмента), м/с.

Поэтому с целью поддержания на заданном уровне производительности обработки Q при решении задачи уменьшения величин P_y , y и соответственно повышение точности обработки, необходимо увеличивать скорость резания V , т.е. переходить в область высокоскоростного резания. Иными словами, необходимо уменьшать F , снижая тем самым величины P_y и y , и одновременно увеличивая скорость резания V , обеспечивая неизменной производительность обработки Q .

При шлифовании, исходя из зависимости (5), уменьшение площади поперечного сечения среза F (без снижения производительности обработки Q) может быть достигнуто за счет увеличения скорости круга $V_{\text{кр}}$. Данная закономерность справедлива и при фрезеровании, рассматривая в

зависимости (5) вместо скорости круга $V_{кр}$ скорость вращения фрезы $V_{фр}$ (рис. 2,б). В этом случае производительность обработки Q , определяемая, например, при фрезеровании цилиндрической фрезой зависимостью (7), может оставаться неизменной, а за счет увеличения скорости вращения фрезы $V_{фр}$ будет достигаться уменьшение величин P_y , u и соответственно повышение точности обработки. Из этого вытекает, что применение высокоскоростного фрезерования открывает принципиально новые технологические возможности высокоточной и высокопроизводительной обработки. Причем, данные зависимости справедливы и при обработке отверстий методом фрезерования с использованием концевой фрезы (рис. 2,б), который подобен методу внутреннего шлифования. Этот метод осуществляется на современных высокооборотных станках с ЧПУ. Движение инструмента по контуру обрабатываемого отверстия может осуществляться инструментом или с помощью стола станка, на котором установлена обрабатываемая деталь. Система ЧПУ позволяет обеспечить точное движение инструмента по контуру обрабатываемого отверстия, что и предопределяет высокую точность обработки отверстия.

Таким образом показано, что при растачивании и шлифовании (или фрезеровании) отверстия условия снижения величин P_y и u за счет уменьшения площади поперечного сечения среза F различны. Так, при растачивании отверстия уменьшить площадь поперечного сечения среза

$$F = \frac{Q}{V} \quad (9)$$

при одновременном обеспечении постоянства производительности обработки $Q = S \cdot V \cdot t$ можно за счет увеличения скорости резания V при пропорциональном уменьшении подачи S или глубины резания t .

При шлифовании (или фрезеровании) отверстия уменьшить параметр F , определяемый зависимостью (5), при одновременном обеспечении производительности обработки Q можно уменьшением скорости круга $V_{кр}$ или скорости вращения фрезы $V_{фр}$, не изменяя другие параметры режима резания, которые входят в зависимости (6) и (7) для определения производительности обработки Q . Это принципиальное отличие в механизме формирования параметров точности обработки при растачивании и шлифовании (или фрезеровании) отверстий. Из этого можно также сделать вывод о том, что процессы внутреннего шлифования и фрезерования

отверстий с точки зрения обеспечения требуемой производительности и точности обработки обладают большими технологическими возможностями, чем растачивание. В особой мере это проявляется при переходе в область высокоскоростной обработки, поскольку при шлифовании и фрезеровании, во-первых, можно обеспечить большие скорости резания, во-вторых, фреза – это многолезвийный инструмент, а резец – однолезвийный инструмент. Этим объясняется широкое применение процесса высокоскоростного фрезерования, в том числе и при обработке высокоточных отверстий в деталях из труднообрабатываемых материалов [6].

Необходимо отметить, что рассмотренные процессы механической обработки отверстий являются достаточно эффективными, однако они не позволяют полностью исключить радиальную составляющую силы резания P_y в процессе обработки, а это ограничивает возможности достижения высоких показателей точности глубоких отверстий. Вместе с тем, наряду с рассмотренными существуют и другие методы обработки глубоких отверстий – рассверливание, зенкерование и развертывание, которые осуществляются осевыми многолезвийными мерными инструментами и за счет симметричного расположения лезвий позволяют уравновесить в процессе обработки суммарную радиальную составляющую силы резания P_y , в результате она становится равной нулю [7]. Это означает, что величина упругого перемещения y , возникающего в технологической системе, также становится равной нулю и погрешности обработки отверстия отсутствуют, т.е. такими методами обработки фактически можно получить идеальную по точности поверхность обрабатываемого отверстия. Следовательно, можно сделать вывод, что методы обработки – рассверливание, зенкерование и развертывание – с точки зрения обеспечения точности обработки располагают наибольшими технологическими возможностями. Причем, условие уравнивания в процессе обработки суммарной радиальной составляющей силы резания $P_y=0$ достигается независимо от производительности обработки, т.е. можно практически неограниченно производительность обработки увеличивать при гарантированном обеспечении заданной точности обработки глубокого отверстия. Это еще одно преимущество указанных методов обработки глубоких отверстий.

Вместе с тем, рассмотренные закономерности справедливы при смене равномерного припуска, т.е. при одинаковой площади поперечного сечения среза F каждым лезвием инструмента. В случае невыполнения данного

условия, очевидно, суммарная радиальная составляющая силы резания P_y не будет равна нулю и поэтому все преимущества данных методов обработки глубоких отверстий исключаются. Собственно этим объясняются значительные проблемы на практике обеспечения точности обработки глубоких отверстий с применением методов рассверливания, зенкерования и развертывания. Этим также объясняется и то, что после рассверливания рекомендуется применять зенкерование, а затем развертывание, т.к. зенкер имеет больше лезвий, чем сверло, а развертка имеет больше лезвий, чем зенкер. Как показывает практика, с увеличением количества лезвий инструмента точность обработки повышается и поэтому развертывание из рассмотренных методов является завершающим технологическим переходом обработки отверстия. Хотя с увеличением неуровновешенности суммарной радиальной составляющей силы резания P_y проблемы обеспечения высокой точности обработки глубоких отверстий и при развертывании остаются актуальными, требующими изыскания новых технологических решений. Те же проблемы имеют место и при обработке отверстий с применением метода хонингования, поскольку неуровновешенность суммарной радиальной составляющей силы резания P_y при съеме неравномерных припусков не всегда позволяет добиться высоких показателей точности обрабатываемых отверстий.

Таким образом, на основе сказанного можно заключить, что при съеме равномерных припусков существуют возможности высокоточной обработки отверстий за счет применения осевых многолезвийных инструментов (сверл, зенкеров, разверток, хонеров и т.д.). В этом случае методы рассверливания, зенкерования и развертывания располагают большими технологическими возможностями по сравнению с методами растачивания, шлифования и фрезерования отверстий. В условиях же съема неравномерных припусков, когда сложно уравновесить суммарную радиальную составляющую силы резания P_y и исключить упругие перемещения y , возникающие в технологической системе, появляется возможность более эффективного применения методов растачивания, шлифования и фрезерования отверстий, которые не так сильно связаны с таким понятием как “уравновешивание суммарной радиальной составляющей силы резания P_y ”. В этих условиях фактически с одинаковой эффективностью можно применять все вышеуказанные методы обработки глубоких отверстий. На рис. 3 приведена структурная схема условий повышения точности обработки отверстий с

неравномерно снимаемым припуском, в которой выделены 4 группы методов обработки отверстий, анализ которых проведен выше.



Рисунок 3 – Структурная схема условий повышения точности обработки отверстий с неравномерно снимаемым припуском

Выводы. В работе теоретически обоснованы условия повышения точности обработки глубоких отверстий в связи с возникновением в технологической системе упругих перемещений применительно к процессам лезвийной и абразивной обработке включая процессы растачивания, рассверливания, развертывания, фрезерования и шлифования. Теоретически доказаны принципиальные отличия в формировании погрешностей обработки отверстий для рассмотренных процессов. Установлено, что при съеме неравномерных припусков добиться наилучших показателей точности и производительности обработки отверстий можно на основе использования метода внутреннего шлифования и высокоскоростного фрезерования концевыми фрезами на станках с ЧПУ.

Список использованных источников: 1. Балакишин Б.С. Основы технологии машиностроения / Б.С. Балакишин. – М.: Машиностроение, 1969. – 359 с. 2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. 3. Колев К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев, Л.М. Горчаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.

4. *Лурье Г.Б.* Шлифование металлов / *Г.Б. Лурье.* – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с.
5. *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. – Харків: ХНТУСГ 2008. – Вип. 68. – С. 119-135.
6. *Новиков Ф.В.* Определение условий уменьшения погрешностей механической обработки отверстий / *Ф.В. Новиков, А.Н. Ковальчук, И.А. Рябенков* // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь: ПГТУ, 2009. – Вып. 11. – С. 273-279.
7. *Брижан Т.М.* Условия повышения точности обработки отверстий / *Т.М. Брижан* // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции (4-5 июня 2014 г.). В 3-х томах, Том 1. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – С. 104-109.

Bibliography (transliterated): 1. *Balakshin B.S.* Osnovy tekhnologii mashinostroeniya / *B.S. Balakshin.* – М.: Mashinostroenie, 1969. – 359 s. 2. *Bobrov V.F.* Osnovy teorii rezaniya metallov / *V.F. Bobrov.* – М.: Mashinostroenie, 1975. – 343 s. 3. *Kolev K.S.* Tochnost obrabotki i rezhimy rezaniya / *K.S. Kolev, L.M. Gorchakov.* – М.: Mashinostroenie, 1976. – 144 s. 4. *Lure G.B.* Shlifovanie metallov / *G.B. Lure.* – М.: Mashinostroenie, 1969. – 197 s. 5. *Novikov F.V.* Teoreticheskiy analiz formirovaniya pogreshnostey pri obrabotke otverstiya s nachalnoy znachitelnoy nekruglostu / *F.V. Novikov, I.E. Ivanov, I.A. Ryabenkov* // Visnyk Kharkivskogo natsionaknogo tekhnichnogo universytetu silskogo gospodarstva im. Petra Vasylenka. – Kharkiv: KhNTUSG, 2008. – Vyp. 68. – S. 119-135. 6. *Novikov F.V.* Opredelenie usloviy umensheniya pogreshnostey mekhanicheskoy obrabotki otverstiy / *F.V. Novikov, A.N. Kovalchuk, I.A. Ryabenkov* // Zashita metalurgicheskikh mashin ot polomok. – Mariupol: PGTU, 2009. – Vyp. 11. – S. 273-279. 7. *Brizhan T.M.* Usloviya povysheniya tochnosti obrabotki otverstiy / *T.M. Brizhan* // Innovatsii, kachestvo i servis v tekhnike i tekhnologiyakh: sbornik nauchnykh trudov 4-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (4-5 iyunya 2014 g.). V 3 tomakh, Tom 1. – Kursk: Yugo-Zap. gos. un-t, 2014. – S. 104-109.

Поступила в редколлегию 23.10.2014