

РАСШІРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕННЯ ТОЧНОСТІ МЕХАНИЧЕСКОЇ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

Проведен теоретичний аналіз умов повышения точності обробки отверстий з використанням методів розверливання, растачування та високоскоростного фрезерування. На основі отриманих аналітических залежностей встановлено, що при растачуванні та високоскоростному фрезеруванні отверстий на сучасних високооборотних металорежущих станках з ЧПУ типу «оброблюючий центр» зарубежного виробництва з використанням твердосплавних фрез з ізносостійкими покриттями можна досягти більш високих показників точності, ніж при розверливанні, при одночасному існуванні зростання продуктивності обробки. Показано, що найбільший ефект повышения точності обробки досягається в умовах високоскоростного фрезерування, забезпечуючого значительне зменшення величини упругого переміщення, що виникає в технологічній системі, та відповідно зменшує погрешності обробки. Результати дослідження впроваджені в операціях виготовлення високоточних отверстий в деталях формуючої оснастки для макаронної та кондитерської промисловості, що дозволило виключити традиційно використовувані при обробці отверстий операції сверлення (розверливання), растачування та внутрішнього шлифування та досягти повышения точності, якості та продуктивності обробки.

Ключові слова: точність обробки отверстия, упруге переміщення, продуктивність обробки, розверливання, растачування, високоскоростне фрезерування.

Постановка проблеми в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами. При изготовлении высокоточных деталей машин из материалов с повышенными физико-механическими свойствами значительные сложности представляет механическая обработка высокоточных отверстий. Возникающие различного рода погрешности при обработке отверстия снижают его точность и требуют изыскания новых более эффективных методов обработки. В настоящее время накоплен значительный опыт механической обработки высокоточных отверстий, в особенности с использованием прогрессивного метода високоскоростного фрезерования твердосплавными фрезами с износостойкими покрытиями, обеспечивающими значительное повышение точности, качества и производительности обработки. Вместе с тем, разработка практических рекомендаций по его применению требует установления оптимальных условий обработки и знания основных закономерностей формирования параметров точности обработки отверстий. В связи с этим в работе решается актуальная задача машиностроения, состоящая в определении условий повышения точности обработки отверстий в деталях машин на основе разработки математических моделей процесса образования погрешностей обработки отверстий методами розверливания, растачивания и високоскоростного фрезерования. Исследования выполнены в соответствии с тематическими планами научно-практических работ ООО «Імперія металлов» (г. Харків).

Аналіз підходів до обробки отверстий та публікації. Вопросам теоретического обоснования условий повышения точности обработки отверстий в деталях машин в научно-технической литературе уделяется большое внимание [1–3], что позволяет научно обоснованно подходить к выбору оптимальных условий обработки. Особого внимания заслуживает работа [4], посвященная аналитическому определению величины упругого перемещения в технологической системе при розверливании отверстия с неравномерно снимаемым припуском, когда оси сверла и обрабатываемого отверстия смешены на некоторую величину. Установлено, что в данном случае величина упругого перемещения однозначно определяется величиной этого смещения, равной несоосности сверла и обрабатываемого отверстия. Это решение получило дальнейшее развитие в работе [5], что позволило уточнить его и более полно определить условия повышения точности обработки отверстия. Поэтому настоящая работа посвящена изысканию новых технологических возможностей повышения точности обработки отверстия на основе использования этого решения.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Цель работы – определение условий повышения точности механической обработки отверстий путем математического моделирования процесса образования погрешностей обработки отверстий методами рассверливания, растачивания и высокоскоростного фрезерования.

Материалы исследований. В работе [4] приведена аналитическая зависимость для определения величины упругого перемещения y в технологической системе при обработке отверстия с учетом несоосности (величиной Δ) осей сверла диаметром D и обрабатываемого отверстия диаметром d (рис. 1):

$$y = \frac{\Delta P_y}{c} = \frac{\sigma}{K_{pes}} \cdot \frac{S \cdot \Delta t}{c} \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где $\Delta P_y = P_{y1} - P_{y2} = \frac{\Delta P_z}{K_{pes}} \cdot \cos \varphi$ – наибольшая разность радиальных составляющих сил резания, действующих на оба лезвия сверла, Н; $\Delta P_z = P_{z1} - P_{z2} = \sigma \cdot \Delta S_{cpes}$ – наибольшая разность тангенциальных составляющих сил резания, действующих на оба лезвия сверла, Н; $K_{pes} = P_z / P_0$ – 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; 2φ – двойной угол в плане сверла, град; $\sigma = P_z / S_{cpes}$ – условное напряжение резания, Н/м²; S_{cpes} – площадь поперечного сечения среза лезвием сверла, м²; $\Delta S_{cpes} = S \cdot \Delta t$ – наибольшая разность площадей поперечного сечения среза, приходящихся на оба лезвия сверла, м²; S – подача, м/об; Δt – наибольшая разность глубин резания, приходящихся на оба лезвия сверла, м; $c = \frac{1}{(1/c_1 + 1/c_2)}$

– приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м; c_1 , c_2 – изгибные жесткости сверла и обрабатываемой детали, Н/м.

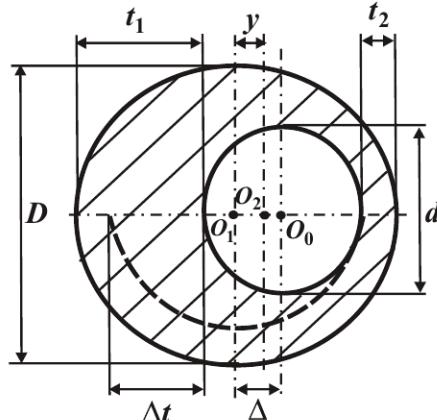


Рис. 1. Расчетная схема величины смещения оси обработанного отверстия относительно ее номинального положения Δ [4]

Разность глубин резания $\Delta t = t_1 - t_2$ определяется из условия взаимного расположения начального (рассверливаемого) отверстия с осью O_0 и обработанного отверстия с номинальным положением оси сверла O_1 (рис. 1):

$$\begin{cases} t_1 = 0,5 \cdot D - 0,5 \cdot d + \Delta, \\ t_2 = 0,5 \cdot D - 0,5 \cdot d - \Delta, \end{cases} \quad (2)$$

где отрезок $O_0O_1 = \Delta$; t_1 , t_2 – максимальная и минимальная глубины резания, м.

Тогда $\Delta t = t_1 - t_2 = 2 \cdot \Delta$, а величина упругого перемещения y определяется:

$$y = \frac{\Delta}{\left(\frac{c \cdot K_{pes}}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)}. \quad (3)$$

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Однако приведенное решение требует уточнения, так как в зависимостях (2) не учтена величина упругого перемещения сверла y , которая может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} t_1 = 0,5 \cdot D - y - 0,5 \cdot d + \Delta, \\ t_2 = 0,5 \cdot D + y - 0,5 \cdot d - \Delta, \end{cases} \quad (4)$$

откуда $\Delta t = t_1 - t_2 = 2 \cdot (\Delta - y)$. Подставляя данное выражение в зависимость (1) и разрешая ее относительно величины упругого перемещения y с учетом того, что вместо подачи S следует рассматривать величину $0,5 \cdot S$, получено:

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pes}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (5)$$

Зависимости (5) и (3) отличаются выражением, стоящим в знаменателе зависимости (5) и определяющим уточнение на размер. Такая же зависимость получена в работе [5] другим методом расчета, что указывает на ее достоверность. Следовательно, полученная зависимость (5) позволяет уточнить зависимость (3), которая справедлива лишь для условия $A = \frac{c \cdot K_{pes}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \gg 1$. Очевидно, зависимость (5) представляет собой обобщенную зависимость,

охватывающую весь возможный диапазон изменения величины A , т.е. $0 < A < \infty$. Например, при условии $A \rightarrow 0$ зависимость (5) принимает вид: $y \rightarrow \Delta$. В этом случае несоосность отверстия Δ фактически не устраняется в процессе рассверливания отверстий. С увеличением A несоосность отверстия Δ уменьшается.

В работе [5] предлагается устраниить несоосность отверстия за счет поочередного применения двух и более сверл различных диаметров. Так, при обработке первым сверлом погрешность обработки (величина y_1) определяется зависимостью (5). При обработке вторым сверлом погрешность обработки (величина y_2) определяется преобразованной зависимостью (5):

$$y_2 = \frac{y_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pes}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pes}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2}. \quad (6)$$

Соответственно, при обработке n -м сверлом погрешность обработки (величина упругого перемещения y_n) определяется:

$$y_n = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pes}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n}. \quad (7)$$

Поскольку знаменатель зависимости (7) всегда больше единицы, то с увеличением количества применяемых сверл n величина $y_n \rightarrow 0$. Однако, полученное решение справедливо и при обработке отверстия одним сверлом, рассматривая в качестве величины n количество вращений сверла до момента полного ввода его заборной (конической) части в обрабатываемое отверстие $n = L_{заб} / 0,5 \cdot S$, где $L_{заб}$ – длина заборной (конической) части сверла, м. С учетом известного соотношения $S = \pi \cdot D \cdot S_{нпод} / V$ окончательно получено: $n = L_{заб} \cdot V / (0,5 \cdot \pi \cdot D \cdot S_{нпод})$, где V – скорость резания (скорость вращения сверла), м/с; $S_{нпод}$ – скорость подачи, м/с.

Очевидно, чем больше $L_{заб}$, тем больше параметр n и соответственно меньше величина y_n . Поэтому эффективно использовать метод высокоскоростного рассверливания отверстия, который за счет увеличения скорости резания V обеспечивает уменьшение подачи $S = \pi \cdot D \cdot S_{нпод} / V$, а соответственно увеличение параметра n и уменьшение величины y_n , согласно зависимости (7). Причем, эффект повышения точности обработки достигается без

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

снижения производительности обработки, так как зависимость для определения производительности обработки $Q = \pi \cdot D \cdot S_{\text{под}} \cdot t$ не содержит скорости резания V . Из этого можно сделать вывод, что уменьшение погрешности обработки в этом случае достигается по двум направлениям: за счет уменьшения подачи S и за счет увеличения параметра n . Однако основным фактором повышения точности обработки отверстия является увеличение скорости резания V .

Наибольший эффект с точки зрения увеличения параметра n и уменьшения величины y_n можно достичь при обработке отверстия многолезвийным осевым инструментом с увеличенной зaborной (конической) частью $L_{\text{заб}}$, например, зенкером и разверткой. В этом случае параметр n может принимать достаточно большие значения, позволяющие существенно уменьшить величину y_n и повысить точность обработки отверстия, что согласуется с практическими результатами.

При растачивании отверстия в зависимости (1) вместо разности глубин резания $\Delta t = t_1 - t_2$ необходимо рассматривать максимальную глубину резания t_1 , определяемую зависимостью (4). Тогда зависимость (1) после преобразования примет вид [5]:

$$y = \frac{(R - r + \Delta)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (8)$$

Числитель зависимости (8) больше числителя зависимости (5). Однако параметр Δ , входящий в зависимость (8), значительно меньше влияет на величину y , чем в условиях рассверливания отверстия, согласно зависимости (5). Поэтому процесс растачивания располагает большими технологическими возможностями повышения точности обработки отверстия по сравнению с процессом рассверливания отверстия. Добиться уменьшения величины y в условиях растачивания отверстия можно главным образом за счет увеличения количества проходов инструмента n :

$$y_n = \frac{(R - r + \Delta)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n}. \quad (9)$$

В этом случае с каждым проходом инструмента знаменатель зависимости (9) будет увеличиваться, что приведет к уменьшению величины y . Как известно, отношение $\sigma / K_{\text{рез}}$ при растачивании меньше, чем при рассверливании отверстия, что также способствует достижению требуемой точности обработки отверстия за меньшее количество проходов инструмента n .

При высокоскоростном фрезеровании отверстия концевой фрезой на станке с ЧПУ величина y определяется из условия равновесия радиальной составляющей силы резания $P_y = P_z / K_{\text{рез}}$ и упруго-восстановливающей силы $c \cdot y$, рассматривая тангенциальную составляющую силы резания в виде [6; 7]: $P_z = \sigma \cdot S_{\text{мен}}$, где $S_{\text{мен}} = Q / V_{\text{фр}}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зубьями фрезы, м^2 ; $Q = S \cdot V \cdot (t - y)$ – фактическая производительность обработки, $\text{м}^3/\text{с}$; V – скорость обхода фрезой контура обрабатываемого отверстия, $\text{м}/\text{с}$; t – глубина резания, м ; $V_{\text{фр}}$ – скорость вращения фрезы, $\text{м}/\text{с}$. Тогда

$$y = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}} \cdot V_{\text{фр}}}{\sigma \cdot S \cdot V}\right)}. \quad (10)$$

В данном случае глубина резания t может быть переменной величиной. Поэтому основным условием уменьшения величины упругого перемещения y является увеличение знаменателя зависимости (10) за счет увеличения скорости вращения фрезы $V_{\text{фр}}$ и уменьшения скорости обхода фрезой контура обрабатываемого отверстия V . Реализовать это условие

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

можно применением высокоскоростного фрезерования: чем больше V_{fp} , тем выше точность обработки.

Полученное теоретическое решение подтверждается практическими данными и, например, широко используется в ООО «Империя металлов» (г. Харьков), которое является многопрофильным производственным предприятием, одним из ведущих операторов отечественного рынка формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности, производит более 50 % оснастки для этих отраслей среди стран СНГ. В настоящее время все отверстия в деталях формующей оснастки (включая оснастку для производства сахарного печенья, затяжного «крекерного» печенья, песочного печенья, пряников, а также в матрицах и фильтрах для производства всех видов макарон) изготавливаются методом высокоскоростного фрезерования на современных высокооборотных металлорежущих станках с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» зарубежного производства с применением твердосплавных фрез с износостойкими покрытиями. В результате обеспечиваются требуемые высокие показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей при существенном увеличении производительности обработки. Это позволило исключить традиционно используемые при обработке отверстий операции сверления (рассверливания), растачивания и внутреннего шлифования и добиться повышения точности, качества и производительности обработки. Опыт изготовления отверстий в деталях из латуни показал на возможность обеспечения точности их обработки в пределах нескольких микрон при многократном увеличении производительности обработки, что позволило резко сократить трудоемкость их изготовления. При этом появилась возможность высокоточного изготовления фрезерованием различных пазов и «карманов» на плоских и цилиндрических деталях и т.д.

Выводы. Проведен теоретический анализ условий повышения точности обработки отверстий с использованием методов рассверливания, растачивания и высокоскоростного фрезерования. На основе полученных аналитических зависимостей установлено, что при растачивании и высокоскоростном фрезеровании отверстий на современных высокооборотных металлорежущих станках с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» зарубежного производства с применением твердосплавных фрез с износостойкими покрытиями можно добиться более высоких показателей точности, чем при рассверливании, при одновременном существенном увеличении производительности обработки. Показано, что наибольший эффект повышения точности обработки достигается в условиях высокоскоростного фрезерования, обеспечивающего значительное уменьшение величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе, и соответственно погрешности обработки. Полученные в работе практические результаты внедрены на операциях изготовления высокоточных отверстий в деталях формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности, что позволило исключить традиционно используемые при обработке отверстий операции сверления (рассверливания), растачивания и внутреннего шлифования и добиться повышения точности, качества и производительности обработки.

Перспективы дальнейшей работы в данном направлении. В дальнейшей работе необходимо провести теоретический анализ основных закономерностей высокоскоростного фрезерования как наиболее прогрессивного технологического процесса механической обработки отверстий и на этой основе выявить его потенциальные возможности и разработать практические рекомендации по эффективному внедрению в производство на операциях обработки отверстий.

Інформаційні джерела

1. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. Маталин А. А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А. А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1970. – 390 с.
3. Колев К. С. Точность обработки и режимы резания / К. С. Колев, Л. М. Горчаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.
4. Иванов И. Е. Технологическое обеспечение точности и стабильности изготовления резьбовых отверстий в баллонах в условиях массового производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: специальности 05.02.08 “Технология машиностроения” / И. Е. Иванов. – Мариуполь, 2008. – 21 с.
5. Брижан Т. М. Обеспечение точности лезвийной и абразивной обработки отверстий в деталях гидравлической аппаратуры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: специальности 05.02.08 “Технология машиностроения” / Т. М. Брижан. – Одеса: ОНПУ, 2015. – 21 с.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

6. 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.
7. Новиков Ф. В. Условия уменьшения удельной работы процесса механической обработки резанием / Ф. В. Новиков, В. И. Полянский // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 5 (1177). – С. 75–80.

Полянський В.І., к.т.н.

ТОВ «Імперія металів», м. Харків

РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ОТВОРІВ

Проведено теоретичний аналіз умов підвищення точності обробки отворів з використанням методів розсвердлювання, розточування й високошвидкісного фрезерування. На основі отриманих аналітичних залежностей встановлено, що при розточуванні й високошвидкісному фрезеруванні отворів на сучасних високообертових металорізальних верстатах з ЧПУ типу «обробний центр» закордонного виробництва із застосуванням твердосплавних фрез зі зносостійкими покриттями можна домогтися більш високих показників точності, ніж при розсвердлюванні, при одночасному суттєвому збільшенні продуктивності обробки. Показано, що найбільший ефект підвищення точності обробки досягається в умовах високошвидкісного фрезерування, яке забезпечує значне зменшення величини пружного переміщення, що виникає в технологічній системі, та, відповідно, похиби обробки. Результати досліджень впроваджено на операціях виготовлення високоточних отворів в деталях формуючої оснастки для макаронної та кондитерської галузей промисловості, що дозволило виключити операції свердління (розсвердлювання), розточування й внутрішнього шліфування, які традиційно використовують при обробці отворів, і домогтися підвищення точності, якості й продуктивності обробки.

Ключові слова: точність обробки отвору, пружне переміщення, продуктивність обробки, розсвердлювання, розточування, високошвидкісне фрезерування.

V. Polyansky

LLC "Empire of metals", Kharkiv

EXPANSION OF TECHNOLOGICAL OPPORTUNITIES TO INCREASE ACCURACY OF MECHANICAL PROCESSING OF HOLES

Theoretical analysis of the conditions for increasing the accuracy of hole machining using the methods of reaming, boring and high-speed milling is carried out. On the basis of the analytical dependencies obtained, it is established that when boring and high-speed milling of holes on modern high-speed CNC machine tools of the "machining center" type of foreign production with the use of carbide-tipped cutters with wear-resistant coatings, it is possible to achieve higher accuracy than drilling, while substantially increasing processing performance. It is shown that the greatest effect of increasing the accuracy of machining is achieved in conditions of high-speed milling, which provides a significant reduction in the magnitude of the elastic displacement that occurs in the technological system and, accordingly, the error in processing. The results of the research are implemented in the operations of manufacturing high-precision holes in the details of the forming equipment for the pasta and confectionery industries, which made it possible to exclude the drilling, reaming and internal grinding operations traditionally used in drilling holes and to improve the accuracy, quality and productivity of the processing.

Key words: accuracy of hole machining, elastic movement, processing efficiency, reaming, boring, high-speed milling.