

## ИСПРАВЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОСИ ОТВЕРСТИЯ КОМБИНИРОВАННЫМ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

*Михаил Степанов, Марина Иванова*

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
Ул. Фрунзе, 21, Харьков, Украина. E-mail: [ivamari85@rambler.ru](mailto:ivamari85@rambler.ru)*

*Mihail Stepanov, Maryna Ivanova*

*National technical university «Kharkov polytechnic institute»  
Frunze st., 21, Kharkov, Ukraine. E-mail: [ivamari85@rambler.ru](mailto:ivamari85@rambler.ru)*

**Аннотация.** В статье рассматривается способ исправления погрешности расположения оси исходного отверстия и уменьшение ее влияния на формирование погрешностей, вызванных появлением неуравновешенной составляющей радиальной силы резания, который основан на управлении глубиной резания. Предложена математическая зависимость, которая позволяет учитывать влияния глубины резания на величину упругих деформаций оси стандартного спирального сверла под действием неуравновешенной радиальной составляющей силы резания, возникающей в результате разности глубин резания между лезвиями сверла из-за смещения оси исходного отверстия. Выполнены аналитические исследования, которые показали, что с уменьшением глубины резания величина упругих деформаций оси стандартного спирального сверла также уменьшается. В связи с этим для уменьшения указанных погрешностей предложено выполнять поэтапный съем общего припуска, используя комбинированный осевой инструмент. Проанализированы три различных варианта распределения припуска между ступенями комбинированного осевого инструмента, а именно: равномерное снятие припуска; постепенное уменьшение глубины резания; снятие вначале маленькой глубины резания, затем ее увеличение с дальнейшим постепенным уменьшением. Выполнены соответствующие аналитические исследования на примере двухступенчатого сверла. Результаты исследований показали, что для исправления погрешности расположения оси исходного отверстия и уменьшения ее влияния на величину неуравновешенной составляющей радиальной силы и погрешности, связанные с ее появлением, целесообразно использовать вариант, в котором вначале снимется маленькая глубина резания, затем ее увеличение с дальнейшим постепенным уменьшением. Замечено, что могут возникнуть трудности для технической реализации вышеизложенного подхода при условии малой разницы диаметров ступеней комбинированного осевого инструмента.

**Ключевые слова:** комбинированный осевой инструмент, глубина резания, смещение оси.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Достижение требуемой точности при максимальной производительности является сложной зада-

чей отрасли технологии машиностроения, в которой особое место занимает обеспечение точности обработки отверстий. Как правило, отверстия обрабатывают осевыми мерными инструментами и, обычно, первой операцией является операция сверления. При этом может возникнуть погрешность расположения оси отверстия, что может привести к появлению неуравновешенной радиальной силы при обработке осевым мерным инструментом на последующих переходах. В свою очередь, возникновение неуравновешенной радиальной силы может вызвать отклонение оси инструмента и, как следствие, оси отверстия.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Исследованию точности обработки отверстий посвящено достаточно много работ [1-10]. В работах [11-17] достаточно подробно рассматриваются причины возникновения неуравновешенной радиальной силы и ее влияние на точность обрабатываемого отверстия. Авторы работ [18, 19] утверждают, что при обработке отверстий осевым многолезвийным инструментом (сверлом, зенкером, разверткой), в случае, если ось исходного предварительно полученного отверстия смещена относительно оси вращения шпинделя станка инструмент под действием неуравновешенной составляющей радиальной силы  $\Delta P_y$  смещается в сторону.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данного исследования является уменьшение влияния погрешности исходного отверстия на точность последующей его обработки.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Сила  $\Delta P_y$  возникает вследствие того, что лезвия инструмента работают в условиях удаления разных глубин резания  $t$  и  $t_0$  (рис.1). В результате лезвия будут испытывать различные нагрузки, что приведет к упругим деформациям инструмента, и появлению погрешности обработки в виде увода оси от номинального положения.

В условиях работы стандартным спиральным сверлом радиальная составляющая силы резания

$P_{y1}$ , возникающая при обработке одним лезвием, пропорциональна ширине и толщине среза [20]:

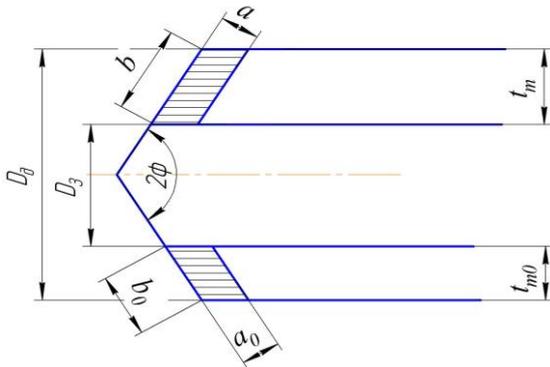
$$P_{y1} = C_P \cdot a \cdot b, \quad (1)$$

где:  $C_P$  – коэффициент, учитывающий постоянные условия обработки, физико-механические свойства обрабатываемого материала, подачу СОЖ и т.д.;  $a, b$  – толщина и ширина среза соответственно на первом лезвии.

Радиальная составляющая силы резания  $P_{y0}$  на втором лезвии:

$$P_{y0} = C_P \cdot a_0 \cdot b_0, \quad (2)$$

где:  $a_0, b_0$  – толщина и ширина среза соответственно на втором лезвии.



**Рис. 1.** Распределение глубины резания между лезвиями сверла:  $D_0$  – диаметр обрабатываемого отверстия;  $D_3$  – диаметр исходного отверстия в заготовке;  $t_m, t_{m0}$  – теоретическая глубина резания соответствующим лезвием

**Fig. 1.** Distribution of the cutting depth between the blades of the drill:  $D_0$  – the diameter of the hole;  $D_3$  – the diameter of the initial hole in the workpiece;  $t_m, t_{m0}$  – theoretical cutting depth corresponding blade

Неуравновешенная составляющая радиальной силы резания, возникающая в начальный момент обработки стандартным спиральным сверлом равна разности радиальных составляющих сил резания, действующих на противоположные лезвия:

$$\Delta P_y = P_{y1} - P_{y0}. \quad (3)$$

Из рис. 1 найдем ширину и толщину среза каждым лезвием:

$$a = \frac{t_m}{\cos^2 \varphi} \cdot \sin \varphi; \quad b = \frac{t_m}{\cos \varphi}; \quad (4)$$

$$a_0 = \frac{t_{m0}}{\cos^2 \varphi} \cdot \sin \varphi; \quad b_0 = \frac{t_{m0}}{\cos \varphi},$$

где:  $\varphi$  – половина угла при вершине сверла.

С учетом (4) значение радиальных составляющих сил резания на каждом лезвии определим по формуле:

$$P_{y1} = C_P \cdot \frac{t_m^2}{\cos^2 \varphi} \cdot \operatorname{tg} \varphi; \quad (5)$$

$$P_{y0} = C_P \cdot \frac{t_{m0}^2}{\cos^2 \varphi} \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Тогда, учитывая (3) и (5), получим:

$$\Delta P_y = C_P \cdot \frac{t_m^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\cos^2 \varphi} - C_P \cdot \frac{t_{m0}^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\cos^2 \varphi} =$$

$$= C_P \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos^2 \varphi} \cdot (t_m^2 - t_{m0}^2) \quad (6)$$

Формула (5) описывает неуравновешенную составляющую радиальной силы резания для стандартного спирального сверла при условии абсолютной жесткости инструмента и технологической системы. В реальных условиях обработки появляется смещение инструмента и системы в целом под действием силы  $\Delta P_y$ :

$$\Delta P_y = C_P \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos^2 \varphi} \cdot [(t+e)^2 - (t-e)^2] =$$

$$= C_P \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos^2 \varphi} \cdot 4 \cdot t \cdot e \quad (7)$$

При обработке стандартным осевым инструментом величина смещения  $\Delta$  оси инструмента определяется по формуле:

$$\Delta = \frac{\Delta P_y}{j} = \frac{C_P \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot 4 \cdot t \cdot e}{\cos^2 \varphi \cdot j}, \quad (8)$$

где:  $j$  – жесткость технологической системы, включая жесткость инструмента.

Формула (8) дает возможность определить величину смещения оси обрабатываемого отверстия, если ось исходного отверстия смещена относительно оси шпинделя на величину  $e$ . Анализ зависимости (8) показывает, что величина смещения оси окончательно полученного отверстия определяется режимами и условиями обработки, конструктивными параметрами инструмента, жесткостью технологической системы, смещением оси исходного обрабатываемого отверстия и глубиной резания. Чем меньше глубина резания, тем меньше величина упругих деформаций оси инструмента (рис. 2).



**Рис. 2.** Влияние глубины резания на величину упругих деформаций оси стандартного спирального сверла при смещения оси исходного отверстия:

1 –  $e = 0,01$  мм; 2 –  $e = 0,05$  мм; 3 –  $e = 0,1$  мм;

**Fig. 2.** Effect of cutting depth on the amount of elastic deformation axis of standard twist drill with the displacement of the axis of the initial hole:

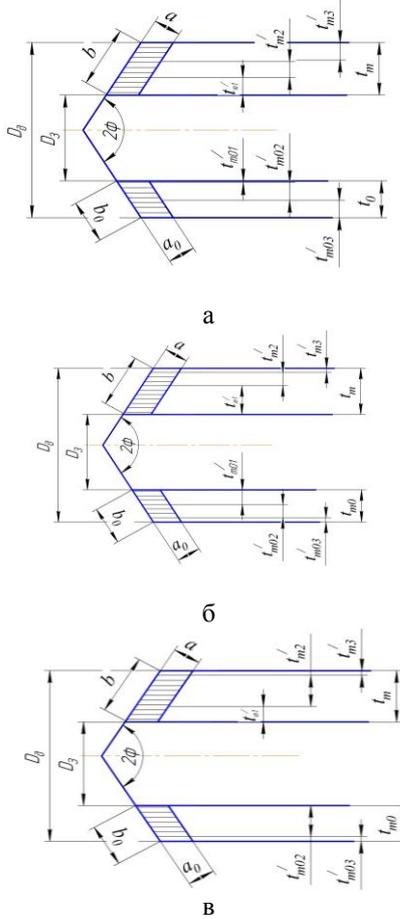
1 –  $e = 0,01$  mm 2 –  $e = 0,05$  mm; 3 –  $e = 0,1$  mm;

Таким образом, при наличии смещения оси исходного отверстия возможно уменьшение упругих перемещений в технологической системе за счет поэтапного съема припуска при обработке, что можно также осуществить, используя комбинированного осевого инструмента (КОИ). Проанализируем возможность уменьшения упругих деформаций оси инструмента путем разбиения общего припуска между ступенями КОИ.

Глубину резания для каждой ступени КОИ можно задавать по различным законам:

- обеспечивая процесс равномерного снятия припуска одним лезвием (рис. 3, а):

$$\begin{aligned} t'_{m1} &= t'_{m2} = t'_{m3} = \dots = t'_{mN} \\ t'_{m01} &= t'_{m02} = t'_{m03} = \dots = t'_{m0N} \end{aligned} \quad (9)$$



**Рис. 3.** Схема поэтапного съема припуска ступенчатым КОИ:

а – равномерное распределение глубины резания;

б – постепенное уменьшение глубины резания;

в – сначала назначаем маленькую глубину, затем ее увеличение с дальнейшим постепенным уменьшением

**Fig. 3.** The scheme of gradual removal of excess material with combined axial tool:

а – constant distribution of the cutting depth;

б – a gradual reduction in the cutting depth;

в – first assign a small depth, and then increasing it to a further gradual decrease in

- соблюдая условие постепенного уменьшения глубины резания (рис. 3, б):

$$\begin{aligned} t'_{m1} &> t'_{m2} > t'_{m3} > \dots > t'_{mN} \\ t'_{m01} &> t'_{m02} > t'_{m03} > \dots > t'_{m0N} \end{aligned} \quad (10)$$

- выполняя следующее условие (рис. 3, в):

$$\begin{aligned} t'_{m1} &< t'_{m2} > t'_{m3} > \dots > t'_{mN} \\ t'_{m01} &< t'_{m02} > t'_{m03} > \dots > t'_{m0N} \end{aligned} \quad (11)$$

где  $t'_{m1}, t'_{m2}, t'_{m3}, t'_{mN}, t'_{m01}, t'_{m02}, t'_{m03}, t'_{m0N}$  – поэтапные теоретические глубины резания соответствующими лезвиями 1-й, 2-й, 3-й,  $n$ -ой ступенями КОИ.

Глубина резания для второго лезвия зависит от величины смещения оси отверстия относительно оси инструмента.

Кроме того, глубину резания на сторону целесообразно назначать таким образом, чтобы обеспечивалось удаление (уменьшение) погрешности, полученной на предыдущем переходе (после обработки предыдущей ступенью):

$$t_{mi} \geq e_{i-1} \quad (12)$$

где  $e_{i-1}$  – величина смещения оси отверстия, полученного после обработки предыдущей ступенью.

Таким образом, глубину резания последней ступенью, а следовательно и диаметр последней ступени КОИ, следует выбирать с учетом смещения отверстия, получаемого после обработки предыдущими ступенями инструмента, а также величины допуска на смещение оси отверстия.

Величина упругих деформаций оси инструмента с учетом его жесткости при обработке  $i$ -ой ступенью КОИ:

$$\Delta_i = \frac{\Delta P_{yi}}{j_i} \quad (13)$$

где  $\Delta P_{yi}$  – неуравновешенная составляющая радиальной силы резания на  $i$ -ой ступени КОИ;  $j_i$  – жесткость технологической системы для  $i$ -ой ступени КОИ.

С учетом зависимости (8) получим величину упругих деформаций оси инструмента после обработки  $i$ -ой ступенью КОИ в отдельности, т.е. принимаем, что каждая ступень работает как стандартный инструмент:

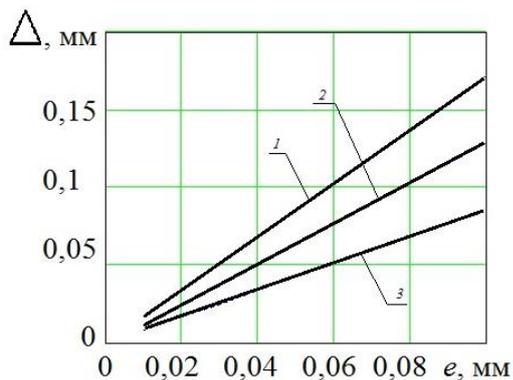
$$\Delta_i = \frac{4 \cdot C_P \cdot \operatorname{tg} \varphi_i \cdot t_{mi} \cdot \Delta_{Ni-1}}{j_N \cdot \cos^2 \varphi_i} \quad (14)$$

Таким образом, после обработки последней ступенью КОИ смещения оси инструмента:

$$\Delta_N = e \cdot \prod_{i=1}^N \frac{4 \cdot C_P \cdot \operatorname{tg} \varphi_i \cdot t_{mi}}{j_i \cdot \cos^2 \varphi_i} \quad (15)$$

Результаты аналитических исследования для двухступенчатого сверла с различными соотношениями диаметров ступеней в сравнении с обработкой одним стандартным спиральным (рис. 4) сверлом подтверждает гипотезу, что для исправления положения оси отверстия и уменьшения погрешностей, вызванных упругими деформациями оси инструмента под действием неуравновешенной радиаль-

ной силы резания необходимо уменьшать глубину резания для первой ступени КОИ.



**Рис. 4.** Влияние величины смещения оси исходного отверстия на величину упругих перемещений оси инструмента при  $D_{исх} = 8$  мм,  $D_{ок} = 12$  мм: 1 – стандартным инструментом; 2 – КОИ с диаметром ступеней  $d_1/d_2 = 11/12$  мм; 3 – КОИ с диаметром ступеней  $d_1/d_2 = 10/12$  мм

**Fig. 4.** The effect of the displacement of the axis of the initial holes on the value of the elastic movements of the tool axis: 1 – standard tool; 2 – with combined axial tool  $d_1/d_2 = 11/12$  mm; 3 – with combined axial tool  $d_1/d_2 = 10/12$  mm

Следует отметить, что вышеизложенный подход может быть затруднительно реализовать технически при условии малой разницы диаметров ступеней КОИ.

#### ВЫВОДЫ

Для исправления погрешности расположения оси исходного отверстия и уменьшения его влияния на величину неуравновешенной радиальной составляющей силы резания, появление которой может привести к упругим деформациям оси инструмента и, как следствие, возникновению увода, целесообразно удалять общий припуск в несколько этапов. Однако это может привести к снижению производительности, что можно частично компенсировать применением комбинированного соевого инструмента, диаметры ступеней которого обеспечивают удаление припуска по заданному закону.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Косилова А.Г. 1976.** Точность обработки деталей на автоматических линиях. М.: Машиностроение, 224.
2. **Холмогорцев Ю.П. 1984.** Оптимизация процессов обработки отверстий. М.: Машиностроение, 184.
3. **Горанский Г.К., Владимиров Е.В., Ламбин Л.Н. 1970.** Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ. М.: Машиностроение, 224.
4. **Корсаков В.С. 1961.** Точность механической обработки. М.: Машиностроение, 380.
5. **Троицкий Н.Д. 1971.** Глубокое сверление. Л.: Машиностроение, 176.
6. **Джигурян Т.Г., Пупин А.П., Собакин А.В. 1994.** Прецизионное растачивание ступенчатых отверстий. СТИН. №3, 26-27.
7. **Сергеев С.В. 2012.** Применение конечноэлементных моделей для расчета погрешностей обработки отверстий. Технология машиностроения. № 2, 60-64.
8. **Мартынов А.Д. 1966.** О контроле симметричности заточки режущих кромок сверла. Спиральные сверла. Сборник материалов Всесоюзного совещания по спиральным сверлам. / Под ред. К.П. Имшенника. М. 267-270.
9. **Дерябин И.П., Кажарина О.А. 2012.** Методы повышения точности оси отверстия при многопереходной обработке на станках с ЧПУ. Технология машиностроения. № 6, 12-15.
10. **Малишко И.А., Киселева И.В. 2006.** Анализ путей повышения точности обработки при развертывании. Научные труды ДонНТУ. Серия Машиностроение и машинознание. №10, 53-58. (Украина).
11. **Кравцов В.И. 1971.** К расчету неуравновешенной силы резания и начального смещения оси обработанного отверстия многолезвийным стержневым инструментом при наличии неперпендикулярности входного торца заготовки. Труды Фрунзенского политехнического института. №54, 178-191.
12. **Капустин Н. М. 1976.** Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ. М.: Машиностроение, 288.
13. **Глухов Н.А. 1955.** Влияние на точность сверления отверстий неперпендикулярности поверхности стола к оси шпинделя вертикально-сверлильного станка. Технология машиностроения. Сб. статей под ред. Кована М.С. М.: гос. науч.-техн. изд. машиностроит. лит.-ры, 103.
14. **Кравцов В.И., Стрельцов В.А. 1971.** Неуравновешенные силы резания при обработке стержневым многолезвийным инструментом отверстий с неперпендикулярностью входа торца заготовки. Труды Фрунзенского политехнического института, №54, 41-46.
15. **Сергеев С.В. 2010.** Анализ механизмов возникновения погрешности при формообразовании отверстий концевым многолезвийным инструментом. Технология машиностроения. № 2, 14-18.
16. **Подураев В.Н. 1975.** О влиянии разнообрабатываемости на точность обработки глубоких отверстий. Известия вузов. М.: Машиностроение. № 10, 141-144.
17. **Гутин Б.Т. 1965.** Исследование технологических факторов, определяющих искривление оси отверстия при зенкерованиях втулок глубинных насосов методом «на растяжение». автореф. дисс. к.т.н. Баку, 24.
18. **Новиков Ф.В., Полянский В.И. 2013.** Разработка математической модели обработки отверстий в высокоточных деталях. / Информационные технологи: наука, техника, технология, образование, здоровье. Тезисы докладов XXI междунар. науч.-практич. конф. Харків, 135.

19. Стрельцов В.А., Кравцов В.И. 1971. Неуравновешенные силы резания, действующие на многолезвийный инструмент при несовпадении оси его с осью исходного отверстия. Труды Фрунзенского политехнического института, № 54. 86-100.
20. Мазур М.П., Внуков Ю.М., Доброскок В.Л., Залога В.О., Новосолов Ю.К., Якуба Ф.Я. 2000. Основы теории резания материалов: учебник [ для высш. учебн. заведений ] / Год ред. М.П. Мазура. Львов : Новый Свет, 422. (Украина).

#### CORRECTION OF HOLE AXIS DISPOSITION INACCURACY WITH COMBINING AXIAL TOOL

**Summary.** In the article the method of correcting the error of the displacement of the axis of the initial holes and decreasing its influence on the formation of the errors caused by the appearance of an unbalanced radial cutting force that is based on controlling the depth of cut is considered.

The mathematical dependence that takes into account the influence of the cutting depth on the elastic deformation of a standard twist drill axis under the action of an unbalanced radial cutting force, which is a re-

sult from difference between the depths of the cutting blades of the drill because of the displacement of the initial hole axis is offered.

Analytical studies have shown that reducing the cutting depth reduces the elastic deformation of a standard twist drill axis. In this regard, in order to reduce these errors to perform a phased removal of general excess material is proposed with using a combined axial tool. Three different variants of distribution of allowance among the stages of the combined axial tool were analyzed namely: the uniform removal of allowance; a gradual decrease in the cutting depth; removing first small cutting depth, then increasing it further to a gradual decrease. The appropriate analytical researches in the example of the two-step drill were done.

The research results showed that for correction of errors of the initial displacement of the hole axis and reducing its impact of the radial imbalance cutting force and errors associated with its appearance, it is advised to use a variant in which a small cutting depth is cut at first, then it increased further with a gradual decrease. It is noted that it may be difficult for the technical implementation of the above mentioned approach at the conditions of the small differences of diameters between stages of the combined axial tool.

**Keywords:** combined axial tool, cutting depth, the displacement of axis.