

УДК 621.9.02

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОГО ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА НА ВЕЛИЧИНУ НАЧАЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ОСИ

М.С. Степанов, проф., д.т.н., А.Л. Мироненко, доц., к.т.н.,
М.С. Иванова, ст. препод., Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»

Аннотация. Рассмотрено влияние конструктивных параметров комбинированного осевого инструмента на направление действия неуравновешенной составляющей радиальной силы резания. Проанализированы различные состояния направления и места действия неуравновешенной составляющей радиальной силы резания и их влияние на упругое смещение оси инструмента.

Ключевые слова: обработка отверстий, комбинированный осевой инструмент, упругие деформации, неуравновешенная составляющая радиальной силы резания.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО ОСЬОВОГО ІНСТРУМЕНТА НА ВЕЛИЧИНУ ПОЧАТКОВОГО ЗМІЩЕННЯ ОСІ

М.С. Степанов, проф., д.т.н., О.Л. Мироненко, доц., к.т.н.,
М.С. Иванова, ст. викл.,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація. Розглянуто вплив конструктивних параметрів комбінованого осьового інструмента на напрямки дії невідноваженої складової радіальної сили різання. Проаналізовано різні напрямки та місця дії невідноваженої складової радіальної сили різання та їх вплив на пружне зміщення осі інструмента.

Ключові слова: обробка отворів, комбінований осьовий інструмент, пружні деформації, невідноважена складова радіальної сили різання.

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THE COMBINED AXIAL TOOL ON THE INITIAL DISPLACEMENT OF THE AXIS

M. Stepanov, Prof., D. Sc. (Eng.),
A. Mironenko, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.), M. Ivanova, Asst. Prof.,
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

Abstract. The article considers the influence of geometric parameters of the combined axial tool in the direction of action of the unbalanced radial force. Various states and the place of action of the unbalanced radial force and its influence on the elastic displacement of the tool axis are analyzed.

Key words: processing holes, combined axial tool, elastic deformation, unbalanced radial force.

Введение

При обработке отверстий осевым инструментом имеют место упругие деформации его оси под действием неуравновешенной составляющей радиальной силы резания. Эти

деформации являются причиной образования погрешностей обработки: разбивки диаметра, увода оси. Наибольшее влияние имеет величина упругих деформаций в момент врезания осевого инструмента в металл, т.к. зачастую имеет место схема консольного закрепления

инструмента со свободным концом, на который и действует неуравновешенная составляющая радиальной силы резания. В этот момент появляется начальное смещение оси инструмента, которое и определяет направление оси и размер обрабатываемого отверстия.

Анализ публикаций

На величину начального смещения оси инструмента влияет длина вылета инструмента и его диаметр, величина неуравновешенной радиальной силы резания, жесткость технологической системы в целом, режимы резания и т.п. [1–3]. Известны различные причины возникновения неуравновешенной составляющей радиальной силы при сверлении: несимметричная заточка режущих кромок инструмента [1–4]; неоднородность материала заготовки, наличие пустот и раковин, что приводит к несимметричной нагрузке на режущих кромках [5]; искривление оси инструмента под действием осевой силы [1, 5, 6]; различные неточности предварительно обработанного отверстия [7, 8, 9] и т.д.

Цель и постановка задачи

При обработке отверстий комбинированным осевым инструментом (КОИ) с параллельным или параллельно-последовательным принципом работы ступеней, когда происходит одновременное врезание несколькими ступенями, имеет место концентрация сил резания, что может привести к появлению неуравновешенной составляющей радиальной силы резания на каждой его ступени и, как следствие, снизить точность обработанного отверстия. А величина начального смещения оси КОИ, наряду с вышеуказанными причинами, зависит и от величин и направлений всех неуравновешенных составляющих сил резания, на которые влияют конструктивные параметры его ступеней, а именно: диаметры, длины ступеней и угол наклона стружечной канавки. Поэтому актуальной является задача исследования влияния этих параметров на величину начального смещения оси.

Исследование начального смещения оси КОИ при параллельной обработке

Как было сказано выше, при одновременной обработке двумя и более ступенями КОИ

направления неуравновешенных составляющих радиальной силы резания для каждой ступени не совпадают, находятся в разных плоскостях и зависят от угла наклона стружечной канавки и длины предыдущей ступени. Угол между направлениями действия двух неуравновешенных составляющих радиальных сил резания, действующих на кромках двух соседних ступеней диаметрами D_i и D_{i+1} (рис. 1), можно рассчитать, рад,

$$Q_p = \frac{2 \cdot L_p \cdot \operatorname{tg} \omega_i}{D_{i+1}}, \quad (1)$$

где L_p – расстояние между точками действия неуравновешенных радиальных сил по оси X (вдоль оси инструмента); ω_i – угол наклона стружечной канавки на i -й ступени; D_i – диаметр i -й ступени инструмента.

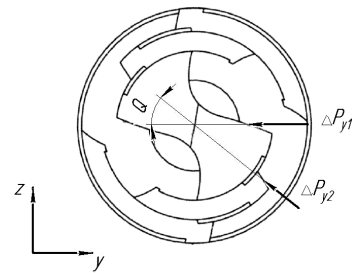


Рис. 1. Расчетная схема для определения взаимного направления неуравновешенной составляющей радиальной силы резания на разных ступенях

Кроме того, следует учитывать, что угол наклона спиральной канавки неравномерный и уменьшается по направлению к центру сверла, поэтому при изготовлении ступенчатого КОИ методом переточки угол наклона стружечной канавки у ступеней меньшего диаметра будет

$$\operatorname{tg} \omega_i = \frac{D_i}{D_m} \cdot \operatorname{tg} \omega, \quad (2)$$

где D_i – диаметр ступни, для которой требуется найти угол наклона стружечной канавки после переточки, мм; D_m – диаметр наибольшей ступени, мм; $\operatorname{tg} \omega$ – угол наклона спиральной канавки КОИ на максимальном диаметре D_m , мм.

Как видно из рис. 1, неуравновешенная составляющая радиальной силы резания поворачивается относительно оси Y на угол Q , что приводит к изменению упругих отжатий оси КОИ как относительно оси Y , так и относительно оси Z . Таким образом, в зависимости от ситуаций, возникающих в процессе обработки, расчет смещения оси под действием неуравновешенных составляющих радиальных сил резания, действующих на разные режущие кромки в двух направлениях, сводится к определению смещения вдоль относительно осей координат Y и Z отдельно; при этом проекции силы ΔP_y на соответствующие оси:

$$\begin{aligned} (\Delta P_y)_Y &= (\Delta P_y) \cdot \cos Q; \\ (\Delta P_y)_Z &= (\Delta P_y) \cdot \sin Q. \end{aligned} \quad (3)$$

Очевидно, что наибольшая величина упругих отжатий (смещения) оси n -ступенчатого КОИ будет наблюдаться при условии $Q_i = 0 = 360^\circ$, тогда

$$\begin{aligned} &(\Delta P_{y1}) \cdot \cos Q_1 + (\Delta P_{y2}) \cdot \cos Q_2 + \\ &+ \dots + (\Delta P_{yN}) \cdot \cos Q_N \rightarrow \max; \\ &(\Delta P_{y1}) \cdot \sin Q_1 + (\Delta P_{y2}) \cdot \sin Q_2 + \\ &+ \dots + (\Delta P_{yN}) \cdot \sin Q_N \rightarrow \max; \end{aligned} \quad (4)$$

а наименьшая – в случае, когда суммы проекций неуравновешенных радиальных составляющих сил резания на рассматриваемую ось будут равны нулю:

$$\begin{aligned} &(\Delta P_{y1}) \cdot \cos Q_1 + (\Delta P_{y2}) \cdot \cos Q_2 + \\ &+ \dots + (\Delta P_{yN}) \cdot \cos Q_N = 0; \\ &(\Delta P_{y1}) \cdot \sin Q_1 + (\Delta P_{y2}) \cdot \sin Q_2 + \\ &+ \dots + (\Delta P_{yN}) \cdot \sin Q_N = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где Q_1, Q_2, Q_N – угол между направлением действия неуравновешенной радиальной составляющей силы резания и осью Y для 1-й, 2-й, n -й ступеней КОИ.

Для трехступенчатых КОИ, например трехступенчатого сверла, в зависимости от схемы нагружения (рис. 2) величина начального смещения (упругих деформаций) оси инструмента у вершины будет определяться:

$$\Delta_1 = \Delta_{P_{y1}} + \Delta_{P_{y2}} + \Delta_{P_{y3}}, \quad (6)$$

где $\Delta_{P_{y1}}, \Delta_{P_{y2}}, \Delta_{P_{y3}}$ – величины упругих деформаций оси от действия сил $\Delta P_{y1}, \Delta P_{y2}, \Delta P_{y3}$ соответственно.

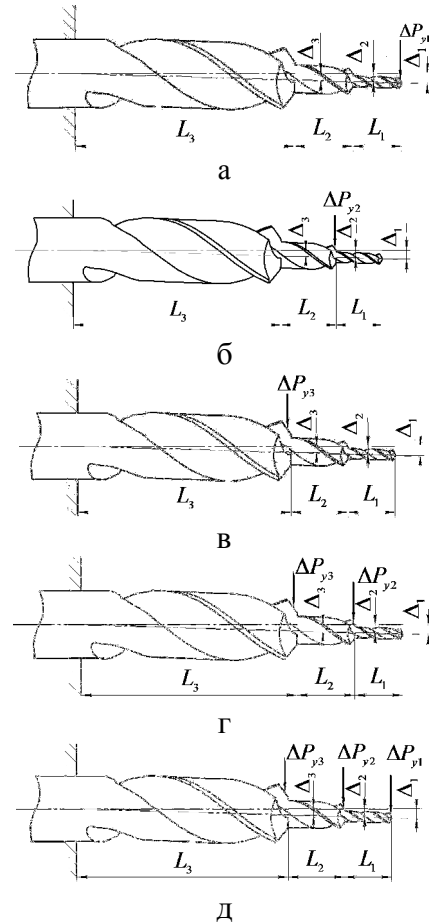


Рис. 2. Расчетные схемы для определения смещения оси КОИ

Определим смещение оси КОИ у вершины в зависимости от схемы нагружения: – когда сила действует только на 1-ю ступень КОИ (рис. 2, а)

$$\begin{aligned} \Delta_1 = \Delta_{P_{y1}} &= \frac{\Delta P_{y1}}{3 \cdot E} \times \\ &\times \left\{ \frac{L_1^3}{J_{x1}} + \frac{L_2}{J_{x2}} \cdot \left[L_1^2 + (L_1 + L_2)^2 + L_1 \cdot (L_1 + L_2) \right] + \right. \\ &\left. \frac{L_3}{J_{x3}} \times \left[(L_1 + L_2)^2 + (L_1 + L_2 + L_3)^2 + \right. \right. \\ &\left. \left. + (L_1 + L_2) \cdot (L_1 + L_2 + L_3) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где L_1, L_2, L_3 – длина соответствующей ступени КОИ, мм; E – модуль упругости мате-

риала инструмента, МПа; $J_{x_1}, J_{x_2}, J_{x_3}$ – момент инерции сечения соответствующей ступени КОИ.

– когда в обработке принимает участие только 2-я ступень КОИ (рис. 2, б)

$$\Delta_1 = \Delta_{P_{y2}} = \frac{\Delta P_{y2}}{6 \cdot E} \left\{ \frac{L_2}{J_{x_2}} \cdot [2 \cdot L_2 \cdot (L_1 + L_2) + L_1 \cdot L_2] + \frac{L_3}{6 \cdot J_{x_3}} [2 \cdot (L_2 + L_3) \cdot (L_1 + L_2 + L_3) + 2 \cdot L_2 \cdot (L_1 + L_2) + (L_2 + L_3) \cdot (L_1 + L_2) + L_2 \cdot (L_1 + L_2 + L_3)] \right\};$$

– когда в обработке принимает участие только 3-я ступень КОИ (рис. 2, в)

$$\Delta_1 = \Delta_{P_{y3}} = \frac{\Delta P_{y3} \cdot L_3}{6 \cdot E \cdot J_{x_3}} \times \{ 2 \cdot L_3 \cdot (L_1 + L_2 + L_3) + L_3 \cdot (L_1 + L_2) \};$$

– когда в обработке принимают участие 2-я и 3-я ступени КОИ одновременно (рис. 2, г)

$$\Delta_1 = \Delta_{P_{y2}} + \Delta_{P_{y3}}; \tag{10}$$

– когда в обработке принимают участие все три ступени КОИ одновременно (рис. 2, д)

$$\Delta_1 = \Delta_{P_{y1}} + \Delta_{P_{y2}} + \Delta_{P_{y3}}. \tag{11}$$

Исследования проводили в системе Creo Simulate 2.0, которая давала возможность методом конечных элементов, учитывая геометрические параметры ступеней КОИ (диаметр, длина, угол наклона стружечной канавки), определить смещение оси трехступенчатого КОИ относительно трех осей координат X, Y, Z отдельно, а также их результирующую величину $\Delta_{P_{y\Sigma}}$. Для этого была сформирована параметрическая трехмерная модель трехступенчатого сверла. В качестве варьируемых параметров принимались диаметры и длины ступеней, а также направление и место действия силы ΔP_y . Значения неуравновешенной составляющей радиальной силы ΔP_y определялись по методике Глухова Н.А. [3]. В зависимости от условий обработки значение ΔP_y варьировали от 10

до 16 Н. Диаметры ступеней трехступенчатого КОИ принимались равными $D_{И1} / D_{И2} / D_{И3} = 8 / 10 / 12$ мм, а длины варьировались от 10 до 80 мм.

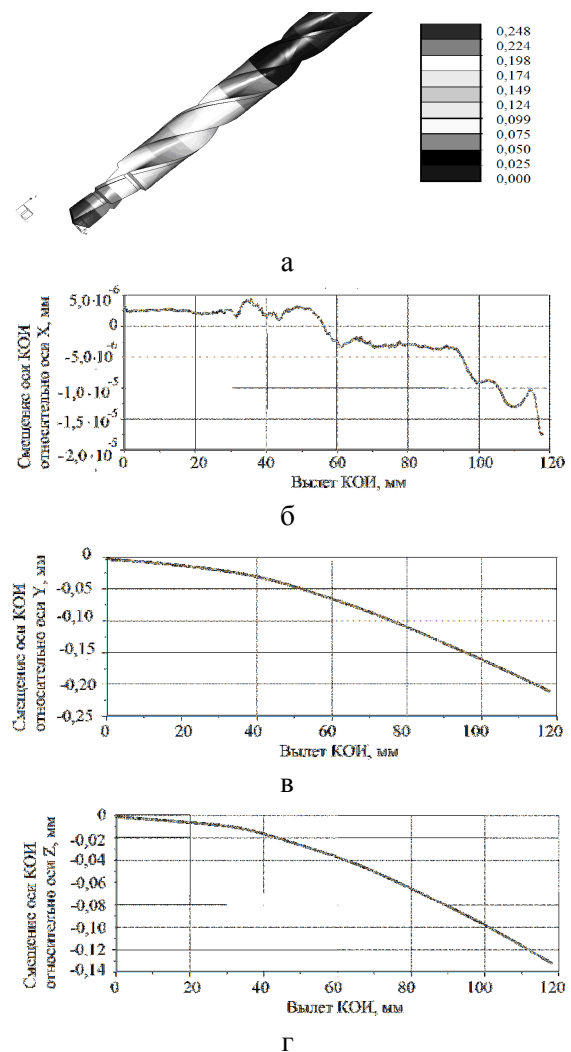


Рис. 3. Влияние параметров инструмента на смещение оси КОИ под действием ΔP_y при $\Delta P_{y1} = 16$ Н, $\Delta P_{y2} = 10$ Н, $\Delta P_{y3} = 13,2$ Н, $D_{И1} = 8$ мм, $D_{И2} = 10$ мм, $D_{И3} = 12$ мм, $L_{И1} = 10$ мм; $L_{И2} = 10$ мм, $L_{И3} = 80$ мм

Результаты статического анализа упругих перемещений оси КОИ визуальнo видно по модели (рис. 3, а), показывающей суммарные значения смещения оси в каждой точке, а также в виде графиков (рис. 3, б, в, г), демонстрирующих смещение оси инструмента относительно каждой оси координат X, Y по отдельности. Из графиков видно, что величина смещения оси инструмента увеличивается по направлению от хвостовика до вершины КОИ, и наибольшее смещение зафиксировано у вершины первой ступени КОИ.

Исследования проводили для различных вариантов направлений действия неуравновешенных составляющих радиальных сил резания, которые могут возникать в результате наличия погрешностей заточки режущих кромок и несовпадения оси инструмента с осью исходного отверстия. В таблице 1 представлен анализ двух из множества возможных ситуаций направления и места действия неуравновешенных составляющих радиальной силы резания в зависимости от длины 1-й ступени КОИ, для условия, когда выполняется одновременное резание тремя ступенями (параллельная обработка).

Таблица 1 Состояния направления и места действия неуравновешенных составляющих радиальной силы резания

Соотношение длин ступеней КОИ $L_1/L_2/L_3$	Состояние	
	1	2
1	2	3
10/10/80		
20/10/70		
30/10/60		
40/10/50		
50/10/40		

Окончание таблицы 1

1	2	3
60/10/30		

Как видим, с увеличением длины первой ступени L_1 место действия и направление неуравновешенной составляющей силы резания на второй и третьей ступенях меняется. В результате чего суммарная величина смещения оси инструмента изменяется (рис. 4).

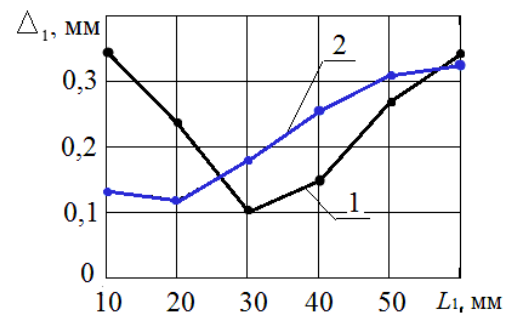


Рис. 4. Влияние длины первой ступени на величину максимального смещения оси инструмента: 1 – состояние 1; 2 – состояние 2

Исследования показали, что смещение оси инструмента относительно оси X (вдоль оси инструмента) под действием указанных факторов незначительны (порядка 10^{-6} мм), поэтому ими можно пренебречь.

Результаты моделирования говорят о том, что максимальная величина смещения при совпадении направлений неуравновешенных составляющих радиальной силы составляет 0,348 мм. Если же эти силы имеют противоположное направление, то величина смещения оси составляет 0,119 мм.

Как видим, направление неуравновешенной составляющей радиальной силы под действием вышеперечисленных факторов на каждой ступени изменяется, поэтому изменяется и результирующая величина смещения оси инструмента, а следовательно, и точность обработки отверстия. Если направление неуравновешенных радиальных сил совпадает, то это приводит к увеличению смещения оси КОИ. Однако если направле-

ния действия этих сил противоположны, то уменьшается в 2–3 раза величина смещения оси инструмента.

Зенкер, как правило, имеет три-четыре лезвия, снимает меньший припуск и имеет больший момент инерции сечения, по сравнению со сверлом, поэтому величина неуравновешенной составляющей силы резания на каждой ступени ступенчатого зенкера будет меньше. Кроме того, угол наклона стружечных канавок зенкеров из быстрорежущей стали, как правило, $\omega = 20^\circ$, а из твердого сплава – $\omega = 15^\circ$ [10]. Таким образом, при параллельной обработке ступенчатыми зенкерами характер влияния длин ступеней на направление действия неуравновешенной составляющей радиальной силы резания ΔP_y и, как следствие, величину начального смещения оси инструмента будет аналогичным. Для зенкеров с углом наклона стружечных канавок $\omega = 0^\circ$ и разверток направление действия силы ΔP_y от длины ступеней не зависит, а зависит только от погрешностей изготовления (заточки) режущих кромок, равномерности припуска и погрешностей обработки отверстия, полученных на предыдущем переходе.

Выводы

Погрешности заточки режущих кромок ступеней, в особенности первой, ступенчатого сверла и неравномерное распределение припуска, снимаемого каждым лезвием, могут как компенсироваться, так и усугубляться погрешностями, возникающими в результате действий сил на 2-й, 3-й и последующих ступенях. Характеристики этого процесса во многом определяются длинами ступеней инструмента и их соотношением.

Литература

1. Точность обработки деталей на автоматических линиях / А.Г. Косилова. – М.: Машиностроение, 1976. – 224 с.
2. Холмогорцев Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий / Ю.П. Холмогорцев. – М.: Машиностроение, 1984. – 184 с.

3. Горанский Г.К. Автоматизация технического нормирования работ на металло-режущих станках с помощью ЭВМ / Г.К. Горанский, Е.В. Владимиров, Л.Н. Ламбин. – М.: Машиностроение, 1970. – 224 с.
5. Корсаков В.С. Точность механической обработки / В.С. Корсаков. – М.: Машгиз, 1961. – 380 с.
6. Троицкий Н.Д. Глубокое сверление / Н.Д. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1971. – 176 с.
7. Капустин, Н. М. Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ / Н. М. Капустин. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.
8. Кравцов В.И. Неуравновешенные силы резания при обработке стержневым многолезвийным инструментом отверстий с неперпендикулярностью входа торца заготовки / В.И. Кравцов, В.А. Стрельцов // Труды Фрунзенского политехнического института. – 1971. – Вып. 54. – С. 41–46.
9. Стрельцов В.А. Неуравновешенные силы резания, действующие на многолезвийный инструмент при несовпадении оси его с осью исходного отверстия / В.А. Стрельцов, В.И. Кравцов // Труды Фрунзенского политехнического института. – 1971. – Вып. 54. – С. 86–100.
10. Кравцов В.И. К расчету неуравновешенной силы резания и начального смещения оси обработанного отверстия многолезвийным стержневым инструментом при наличии неперпендикулярности входного торца заготовки заготовки / В.И. Кравцов // Труды Фрунзенского политехнического института. – 1971. – Вып. 54. – С. 178–191.
11. Ординарцев И.А. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 846 с.

Рецензент: В.И. Мощенок, профессор, к.т.н., ХНАДУ.