

УДК 621.923

© Брижан Т.М.*

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ ОСЕВЫМИ МНОГОЛЕЗВИЙНЫМИ
ИНСТРУМЕНТАМИ**

В работе на основе аналитического представления силы резания при обработке отверстий осевыми многолезвийными инструментами получено новое теоретическое решение о характере изменения величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе и определяющего погрешности обработки отверстия. Расчетами установлено, что в случае несовпадения осей обрабатываемого отверстия осевого инструмента с четырьмя и более лезвиями величина упругого перемещения остается постоянной, независимой от положения лезвий. Однако при этом циклически изменяется крутящий момент, что приводит к возникновению в технологической системе крутильных колебаний. Доказано, что с увеличением количества лезвий инструмента переменная часть крутящего момента уменьшается. Из этого вытекает перспективность применения осевых многолезвийных инструментов с наклонными лезвиями, позволяющих исключить изменение во времени крутящего момента и соответственно исключить крутильные колебания в технологической системе, что является важным условием повышения точности обработки отверстия.

Ключевые слова: осевые многолезвийные инструменты, свело, зенкер, развертка, обрабатываемое отверстие, упругое перемещение, крутильные колебания, сила резания.

Брижан Т.М. Теоретичний аналіз умов підвищення точності обробки отворів осьовими багатолезовими інструментами. У роботі на основі аналітичного подання сили різання при обробці отворів осьовими багатолезовими інструментами отримане нове теоретичне рішення про характер зміни величини пружного переміщення, що виникає в технологічній системі й визначає погрешності обробки отвору. Розрахунками встановлено, що у випадку розбіжності осей оброблюваного отвору осевого інструмента із чотирма й більше лезами величина пружного переміщення залишається постійною, незалежною від положення лез. Однак при цьому циклічно змінюється крутний момент, що призводить до виникнення в технологічній системі крутильних коливань. Доведено, що зі збільшенням кількості лез інструмента змінна частина крутного моменту зменшується. Із цього впливає перспективність застосування осьових багатолезових інструментів з похилими лезами, які дозволяють виключити зміну в часі крутного моменту й відповідно виключити крутильні коливання в технологічній системі, що є важливою умовою підвищення точності обробки отвору.

Ключові слова: осьові багатолезові інструменти, свердло, зенкер, розгортка, оброблюваний отвір, пружне переміщення, крутильні коливання, сила різання.

T.M. Brizhan. Theoretical analysis of the conditions for increasing the accuracy of the axial hole machining multiple tip tools. This paper deals with the development of a mathematical model for determining the value of the elastic displacement that occurs when reaming and deployment of holes. The lack of theoretical studies of the analytical representation of the cutting force limits the study of conditions to improve the accuracy of hole machining. A promising direction should be considered a theoretical approach, which allows to determine the magnitude of the elastic displacement occurring in the technological system when drilling and thus to estimate the error handling holes. A

* ст. научный сотрудник, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Brizhan@ukr.net

further development of this approach is a theoretical analysis of the magnitude of the elastic displacement that occurs when processing multiple tip tools axial holes (core drills and reamers). In this paper, based on the analytic representation of cutting forces in machining holes axial multiple tip tools have received a new theoretical solution of the nature of changes in the magnitude of the elastic displacement occurring in the technological system and determining error processing holes. Calculations revealed, that in the case of misalignment of the hole axis tool with four or more blades magnitude of the elastic displacement remains constant, regardless of the position of the blades. However, the torque varies cyclically, giving rise to a torsional oscillation process system. Proved, that with increasing amounts of the variable part of the tool blades torque decreases. It follows from this promising application of axial multiple tip tools (reamers, reamers) with inclined blades, so as to avoid the time variation of torque and thus eliminate torsional vibrations in the technological system, that is essential for improving the accuracy of hole machining and surface finish class.

Keywords: *axial multiple tip tools, cramped, countersink, scan, machined holes, elastic movement, torsional oscillations, the cutting force.*

Постановка проблеми. Изготовление высокоточных отверстий по-прежнему остается одной из наиболее сложных задач технологии машиностроения, несмотря на большое количество имеющихся практических решений. Так, установлено, что применение одно- и многолезвийных инструментов приводит к появлению различных погрешностей обработки отверстий, связанных в первую очередь с упругими перемещениями и колебаниями, возникающими в технологической системе.

Поэтому поиск условий уменьшения механических погрешностей обработки отверстий имеет большое теоретическое и практическое значение, в особенности на операциях зенкерования и развертывания, на которых окончательно формируются параметры точности и качества обрабатываемых поверхностей. В связи с этим актуальной является задача математического моделирования упругих перемещений, возникающих в технологической системе при обработке отверстий осевым многолезвийным инструментом, определяющих параметры точности обработки.

Анализ последних исследований и публикаций. Проблеме повышения точности обработки отверстий осевыми многолезвийными инструментами в научно-технической литературе уделено значительное внимание [1-3]. Однако полученные результаты носят в основном эмпирический характер, что не позволяет в полной мере выявить технологические возможности уменьшения погрешностей обработки отверстий. Отсутствие в теоретических работах аналитического представления силы резания ограничивает возможности обоснования условий повышения точности обработки отверстий. Поэтому перспективным направлением в этом плане следует рассматривать теоретический подход, предложенный в работах [4, 5], который позволяет определить величину упругого перемещения, возникающего в технологической системе при рассверливании и соответственно оценить погрешности обработки отверстий. Дальнейшим развитием этого подхода является теоретический анализ величины упругого перемещения, возникающего при обработке отверстий осевыми многолезвийными инструментами (зенкерами и развертками). В связи с этим, настоящая работа посвящена, по сути, разработке математической модели определения величины упругого перемещения, возникающего при зенкерowaniu и развертывании отверстий.

Цель работы – теоретическое обоснование условий повышения точности обработки отверстий осевыми многолезвийными инструментами на основе исследования упругих перемещений, возникающих в технологической системе.

Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи следует воспользоваться результатами исследований, приведенных в работе [6], согласно которым при рассверливании отверстия в случае несовпадения осей обрабатываемого отверстия (радиусом r) и инструмента (радиусом R) величина упругого перемещения y , возникающего в технологической системе, определяется аналитической зависимостью (рис. 1):

$$y = \frac{(t_1 - t_2)}{\left(2 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}, \quad (1)$$

где c – жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $K_{рез} = P_{z1}/P_{y1} = P_{z2}/P_{y2}$ – коэффициент резания; $P_{z1}, P_{z2}, P_{y1}, P_{y2}$ – тангенциальные и радиальные составляющие силы резания, действующие на оба лезвия сверла, Н; S – подача, м/об; t_1, t_2 – глубины резания, приходящиеся на оба лезвия сверла, м; φ – половина главного угла сверла в плане.

Расчетами установлено, что разность глубин резания равна:

$$(t_1 - t_2) = 2 \cdot \Delta \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

где Δ – сдвиг оси сверла относительно оси обрабатываемого отверстия, м; α – угол, определяющий положение лезвий сверла.

Как следует из зависимостей (1) и (2), наибольшее значение величины упругого перемещения y достигается при угле $\alpha = 0$:

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}, \quad (3)$$

Уменьшить величину y можно уменьшением Δ, σ, S и увеличением c и $K_{рез}$.

Зависимость (1) описывает положение оси сверла в разные моменты времени.

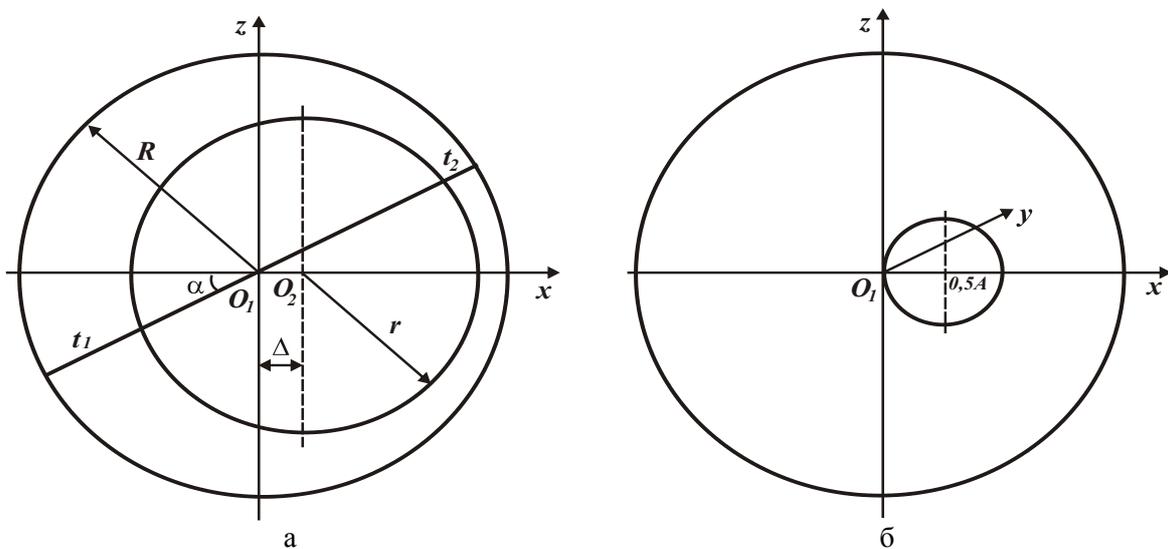


Рис. 1 – Расчетная схема погрешности обработки отверстия при рассверливании (а) и траектория движения оси сверла во времени (б)

Для более наглядного графического представления об изменении положения оси сверла следует выразить величину y через координаты x и z :

$$x = y \cdot \cos \alpha = A \cdot \cos^2 \alpha; \quad (4)$$

$$z = y \cdot \sin \alpha = A \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

где

$$A = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}.$$

Представляя $\cos \alpha = \sqrt{\frac{x}{A}}$; $\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} = \sqrt{1 - \frac{x}{A}}$, зависимость (5) выразится:

$$z = A \cdot \sqrt{\frac{x}{A}} \cdot \sqrt{1 - \frac{x}{A}} \text{ или } z^2 + x^2 = A \cdot x \text{ или}$$

$$z^2 + \left(x - \frac{A}{2}\right)^2 = \frac{A^2}{4}. \quad (6)$$

В итоге пришли к уравнению окружности радиусом $A/2$ со смещением ее центра вдоль оси x на величину $A/2$ (рис. 1б). Следовательно, положение оси сверла в разные моменты времени (в зависимости от положения лезвий сверла) описывается уравнением окружности радиусом $A/2$. Очевидно, чем меньше параметр A , тем точнее будет обрабатываемое отверстие.

Используя полученное решение, можно определить положение оси осевого инструмента, например, зенкера с 4 лезвиями в разные моменты времени, т.е. в зависимости от положения лезвий инструмента. Для этого необходимо установить суммы проекций радиальных составляющих силы резания от работы всех лезвий инструмента на оси ox и oz (рис. 2):

$$(P_y)_x = (P_{y1} - P_{y3}) \cdot \cos \alpha + (P_{y2} - P_{y4}) \cdot \cos(90^\circ - \alpha); \quad (7)$$

$$(P_y)_z = (P_{y1} - P_{y3}) \cdot \sin \alpha - (P_{y2} - P_{y4}) \cdot \sin(90^\circ - \alpha), \quad (8)$$

где

$$(P_{y1} - P_{y3}) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{рез}} \cdot (t_1 - t_3) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{рез}} \cdot 2 \cdot \Delta \cdot \cos \alpha;$$

$$(P_{y2} - P_{y4}) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{рез}} \cdot (t_2 - t_4) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{рез}} \cdot 2 \cdot \Delta \cdot \cos(90^\circ - \alpha).$$

После преобразований получено:

$$(P_y)_x = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{2 \cdot K_{рез}} \cdot (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{2 \cdot K_{рез}}; \quad (9)$$

$$(P_y)_z = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{2 \cdot K_{рез}} \cdot (\cos \alpha \cdot \sin \alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha) = 0. \quad (10)$$

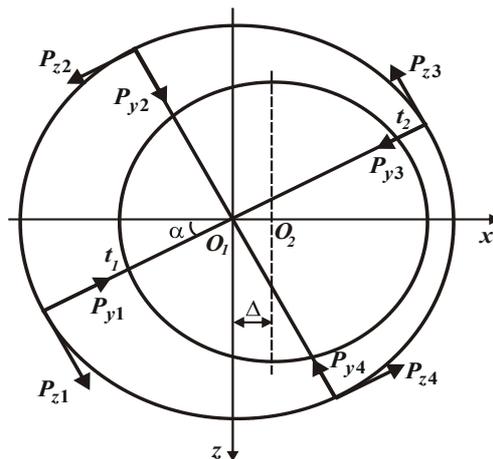


Рис. 2 – Расчетная схема погрешности обработки отверстия при зенкеровании

Из зависимостей (9) и (10) вытекает, что положение оси инструмента в процессе обработки остается неизменным, независимо от положения лезвий инструмента, т.е. независимо от угла α . Это указывает на то, что в данном процессе обработки образуется точное отверстие радиусом R . Погрешность обработки связана лишь с отклонением оси отверстия от оси инструмента на величину упругого перемещения y . Данная величина определяется с учетом зависимо-

сти (9), рассматривая в ней вместо величины Δ величину $(\Delta - y)$:

$$y = \frac{(P_y)_x}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{2 \cdot K_{pez} \cdot c} \cdot (\Delta - y). \quad (11)$$

Разрешая полученное уравнение (11) относительно неизвестной величины y , имеем

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (12)$$

Сравнивая зависимость (12) с аналогичной зависимостью (3), полученной при обработке отверстия инструментом с двумя лезвиями (сверлом), видно, что при обработке отверстия инструментом с 4 лезвиями величина упругого перемещения y меньше, т.к. больше знаменатель зависимости (12). Это указывает на эффективность применения операции зенкерования отверстия после его рассверливания с точки зрения уменьшения погрешности обработки отверстия. Однако, эффект будет достигаться при условии, когда второе слагаемое знаменателя в зависимости (12) будет больше единицы. В противном случае величина упругого перемещения $y \rightarrow \Delta$.

Важно оценить влияние на погрешности обработки отверстия тангенциальных составляющих сил резания P_z , действующих на каждое лезвие инструмента (рис. 2). Для этого спроектируем тангенциальные составляющие сил резания P_z на оси ox и oz :

$$(P_z)_x = (P_{z1} - P_{z3}) \cdot \sin \alpha + (P_{z2} - P_{z4}) \cdot \sin(90^\circ - \alpha); \quad (13)$$

$$(P_z)_z = (P_{z1} - P_{z3}) \cdot \cos \alpha - (P_{z2} - P_{z4}) \cdot \cos(90^\circ - \alpha), \quad (14)$$

где

$$(P_{z1} - P_{z3}) = (P_{y1} - P_{y3}) \cdot K_{pez} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4} \cdot (t_1 - t_3) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4} \cdot 2 \cdot \Delta \cdot \cos \alpha;$$

$$(P_{z2} - P_{z4}) = (P_{y2} - P_{y4}) \cdot K_{pez} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4} \cdot (t_2 - t_4) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4} \cdot 2 \cdot \Delta \cdot \cos(90^\circ - \alpha).$$

После преобразований получено:

$$(P_z)_x = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{2} \cdot (\cos \alpha \cdot \sin \alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha) = 0; \quad (15)$$

$$(P_z)_z = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{2} \cdot (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{2}. \quad (16)$$

Как видно, в направлении оси ox тангенциальные составляющие сил резания P_z , действующие на лезвия инструмента, уравновешиваются, поэтому упругое перемещение y равно нулю. В направлении оси oz упругое перемещение, равное величине z , с учетом зависимости (16), рассматривая в ней вместо величины Δ величину $(\Delta - y)$, определится:

$$z = \frac{(P_z)_z}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{2 \cdot c} \cdot (\Delta - y). \quad (17)$$

В данном случае упругое перемещение y определяется неуравновешенностью радиальных составляющих сил резания P_y , действующих на лезвия инструмента, и описывается зависимостью (12).

Из зависимости (17) следует, что величина упругого перемещения z не зависит от угла α , т.е. не изменяется во времени. Следовательно, в процессе обработки ось инструмента находится в деформированном (изогнутом) состоянии, однако не изменяет своего устойчивого положения, определяемого величинами упругих перемещений y (по оси ox) и z (по оси oz).

Заслуживает внимания анализ закономерностей изменения крутящего момента M , возникающего в процессе обработки:

$$M = 2 \cdot R \cdot (P_{z1} - P_{z3}) + 2 \cdot R \cdot (P_{z2} - P_{z4}) = 2 \cdot R \cdot \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4} \cdot 2 \cdot \Delta \cdot [\cos \alpha + \cos(90^\circ - \alpha)] = \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot R \cdot \Delta \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha). \quad (18)$$

В табл. 1 и на рис. 3а приведены расчетные значения тригонометрической функции $(\cos \alpha + \sin \alpha) = 1,41 \cdot \cos(45^\circ - \alpha)$ при изменении угла α в диапазоне $0 < \alpha < 90^\circ$. Как видно, тригонометрическая функция $(\cos \alpha + \sin \alpha) = 1,41 \cdot \cos(45^\circ - \alpha)$ является периодической с периодом 90° и принимает значения в пределах от 1 до 1,41. Этим показано, что крутящий момент M является переменной (периодической) функцией, изменяющейся по закону $\cos(45^\circ - \alpha)$ в пределах периода, равного 90° . Очевидно, цикличность изменения крутящего момента M приведет к возникновению в технологической системе крутильных колебаний и появлению различных погрешностей обработки отверстия.

Таблица 1

Расчетные значения тригонометрической функции $(\cos \alpha + \sin \alpha) = 1,41 \cdot \cos(45^\circ - \alpha)$

α , град.	0	10	20	30	45	60	70	80	90
$1,41 \cdot \cos(45^\circ - \alpha)$	1	1,15	1,27	1,36	1,41	1,36	1,27	1,15	1

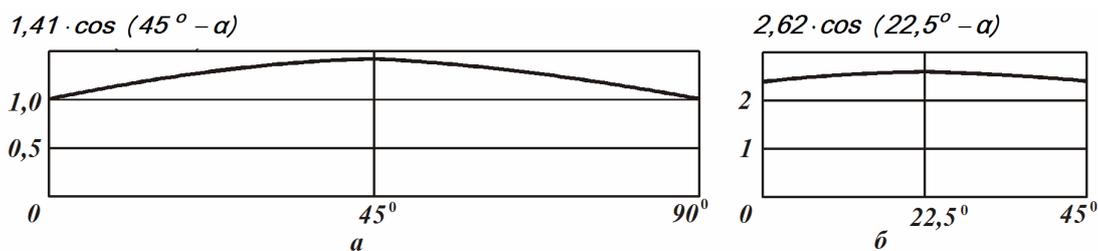


Рис. 3 – Графики функций: а) – $1,41 \cdot \cos(45^\circ - \alpha)$; б) – $2,62 \cdot \cos(22,5^\circ - \alpha)$

Определим положение оси осевого инструмента (развертки) с 8 лезвиями в разные моменты времени, т.е. в зависимости от положения лезвий инструмента. В этом случае суммы проекций радиальных составляющих силы резания от работы всех лезвий инструмента на оси ox и oz (по аналогии с рис. 2) будут определяться четырьмя слагаемыми:

$$(P_y)_x = (P_{y1} - P_{y3}) \cdot \cos \alpha + (P_{y2} - P_{y4}) \cdot \cos(90^\circ - \alpha) + (P_{y5} - P_{y7}) \cdot \cos(\alpha - 45^\circ) + (P_{y6} - P_{y8}) \cdot \cos[90^\circ - (\alpha - 45^\circ)]; \quad (19)$$

$$(P_y)_z = (P_{y1} - P_{y3}) \cdot \sin \alpha - (P_{y2} - P_{y4}) \cdot \sin(90^\circ - \alpha) + (P_{y5} - P_{y7}) \cdot \sin(\alpha - 45^\circ) - (P_{y6} - P_{y8}) \cdot \sin[90^\circ - (\alpha - 45^\circ)], \quad (20)$$

где

$$(P_{y1} - P_{y3}) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{pez}} \cdot 2 \cdot \Delta \cdot \cos \alpha; \quad (P_{y6} - P_{y8}) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{8 \cdot K_{pez}} \cdot 2 \cdot \Delta \cdot \cos[90^\circ - (\alpha - 45^\circ)].$$

После преобразований получено:

$$(P_y)_x = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{4 \cdot K_{pez}} \cdot (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) + \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{4 \cdot K_{pez}} \cdot [\cos^2(\alpha - 45^\circ) + \sin^2(\alpha - 45^\circ)] = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{2 \cdot K_{pez}}; \quad (21)$$

$$(P_y)_z = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{4 \cdot K_{pez}} \cdot (\cos \alpha \cdot \sin \alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha) +$$

$$+ \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{4 \cdot K_{\text{рез}}} \cdot [\cos(\alpha - 45^0) \cdot \sin(\alpha - 45^0) - \sin(\alpha - 45^0) \cdot \cos(\alpha - 45^0)] = 0. \quad (22)$$

В итоге пришли к таким же зависимостям, как и в случае обработки осевым инструментом с 4 лезвиями. Величина упругого перемещения y , исходя из зависимости (21), будет определяться такой же зависимостью (12). Следовательно, увеличение количества лезвий осевого инструмента не снижает величину y , т.е. погрешность обработки, связанная с несовпадением осей обрабатываемого отверстия и осевого инструмента, остается такой же, как и в случае обработки осевым инструментом с 4 лезвиями.

Оценим влияние на погрешности обработки отверстия тангенциальных составляющих сил резания P_z , действующих на каждое лезвие инструмента (по аналогии с рис. 2). Для этого спроектируем тангенциальные составляющие сил резания P_z на оси ox и oz , аналогично зависимостям (13) и (14):

$$\begin{aligned} (P_z)_x &= \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{4} \cdot [\cos \alpha \cdot \sin \alpha - \cos(45^0 - \alpha) \cdot \sin(45^0 - \alpha) + \\ &+ \cos(45^0 + \alpha) \cdot \sin(45^0 + \alpha) - \cos(90^0 - \alpha) \cdot \sin(90^0 - \alpha)] = \\ &= \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{4} \cdot [\cos \alpha \cdot \sin \alpha - \cos(45^0 - \alpha) \cdot \sin(45^0 - \alpha) + \\ &+ \sin(45^0 - \alpha) \cdot \cos(45^0 - \alpha) - \sin \alpha \cdot \cos \alpha] = 0; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} (P_z)_z &= \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{4} \cdot [\cos^2 \alpha + \cos^2(45^0 - \alpha) + \cos^2(45^0 + \alpha) + \cos^2(90^0 - \alpha)] = \\ &= \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{4} \cdot [\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha + \cos^2(45^0 - \alpha) + \sin^2(45^0 - \alpha)] = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{2}. \end{aligned} \quad (24)$$

Как следует из зависимости (23), проекции тангенциальных составляющих сил резания P_z , действующих на лезвия инструмента, в направлении оси ox уравниваются. Поэтому упругое перемещение y равно нулю. В направлении оси oz упругое перемещение, равное величине z , с учетом зависимости (24), рассматривая в ней вместо величины Δ величину $(\Delta - y)$, определится:

$$z = \frac{(P_z)_z}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{2 \cdot c} \cdot (\Delta - y). \quad (25)$$

В итоге пришли к зависимости (17), полученной при обработке осевым инструментом с 4 лезвиями. Следовательно, увеличение количества лезвий осевого инструмента с 4 до 8 не внесло изменений в закономерности формирования упругих перемещений в направлении осей ox и oz .

Упругое перемещение y , входящее в зависимость (25), определяется неуравновешенностью радиальных составляющих сил резания P_y , действующих на лезвия инструмента, и описывается зависимостью (12).

Крутящий момент M , возникающий в процессе обработки отверстия, описывается зависимостью, аналогичной зависимости (18):

$$\begin{aligned} M &= 2 \cdot R \cdot \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{8} \cdot 2 \cdot \Delta \cdot [\cos \alpha + \cos(45^0 - \alpha) + \cos(45^0 + \alpha) + \cos(90^0 - \alpha)] = \\ &= \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot R \cdot \Delta \cdot 1,31 \cdot \cos(22,5^0 - \alpha). \end{aligned} \quad (26)$$

В табл. 2 и на рис. 3б приведены расчетные значения тригонометрической функции, заключенной в зависимости (26) в квадратные скобки и равной $2,62 \cdot \cos(22,5^0 - \alpha)$, при изменении угла α в диапазоне $0 < \alpha < 45^0$. Как видно, данная тригонометрическая функция является периодической с периодом 45^0 и изменяется в пределах от 2,42 до 2,62, т.е. не столь существенно. Следовательно, с увеличением количества лезвий инструмента с четырех до восьми переменная часть крутящего момента M уменьшается. Из этого вытекает перспективность применения осевых многолезвийных инструментов с наклонными лезвиями, позволяющих исключить изменение во времени крутящего момента M и соответственно исключить крутильные

колебания в технологической системе, что является важным условием повышения точности обработки отверстия.

Таблица 2

Расчетные значения тригонометрической функции $2,62 \cdot \cos(22,5^{\circ} - \alpha)$

α , град.	0	10	22,5	30	45
$2,62 \cdot \cos(22,5^{\circ} - \alpha)$	2,42	2,56	2,62	2,6	2,42

Как следует из полученного решения, с увеличением количества лезвий с 4 до 8 частота следований импульсов силы увеличится в 2 раза.

Исходя из полученного решения, очевидно, величина упругого перемещения y не изменится и при обработке осевым инструментом с большим количеством лезвий, например, 16; 32 и т.д. Однако при этом уменьшится переменная часть крутящего момента M , что важно с точки зрения уменьшения или даже исключения крутильных колебаний в технологической системе и повышения точности обработки.

Выводы

В работе на основе аналитического представления силы резания при обработке отверстий осевыми многолезвийными инструментами получено новое теоретическое решение о характере изменения величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе и определяющего погрешности обработки отверстия. Расчетами установлено, что в случае несовпадения осей обрабатываемого отверстия осевого инструмента с четырьмя и более лезвиями величина упругого перемещения остается постоянной, независимой от положения лезвий. Однако при этом циклически изменяется крутящий момент, что приводит к возникновению в технологической системе крутильных колебаний. Доказано, что с увеличением количества лезвий инструмента переменная часть крутящего момента уменьшается. Из этого вытекает перспективность применения осевых многолезвийных инструментов с наклонными лезвиями, позволяющих исключить изменение во времени крутящего момента и соответственно исключить крутильные колебания в технологической системе, что является важным условием повышения точности обработки отверстия.

Список использованных источников:

1. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Маталин. – М. : Машиностроение, 1970. – 390 с.
2. 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.
3. Колев К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев, Л.М. Горчаков. – М. : Машиностроение, 1976. – 144 с.
4. Иванов И.Е. Высокоэффективная технология изготовления резьбовых отверстий в горловинах баллонов на автоматических линиях : монография / И.Е. Иванов, Ф.В. Новиков, Е.И. Иванов. – Мариуполь : Изд. ПГТУ. – 2011. – 209 с.
5. Новіков Ф.В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф.В. Новіков, І.О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.
6. Брижан Т.М. Математическая модель определения закономерностей формирования погрешностей механической обработки отверстий / Т.М. Брижан // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту. : Зб. наук. пр. – Мариуполь, 2014. – Вип. 28. – С. 167-173.

Bibliography:

1. Matalin A.A. Accuracy machining and design processes / A.A. Matalin. – M. : Mashinostroenie, 1970. – 390 p. (Rus.)
2. Physical and mathematical theory of material processing and mechanical engineering / ed. F.V. Novikov and A.V. Yakimova. In ten volumes. – T. 1. «Mechanics of cutting materials». –

- Odessa : ONPU, 2002. – 580 p. (Rus.)
3. Kolev K.S. Precision machining and cutting / K.S. Kolev, L.M. Gorchakov. – M. : Mashinostroenie, 1976. – 144 p. (Rus.)
 4. Ivanov I.E. Highly efficient technology for manufacturing threaded holes in the neck of the cylinder on automated lines : monograph / I.E. Ivanov, F.V. Novikov, E.I. Ivanov. – Mariupol : Publ. PSTU. – 2011. – 209 p. (Rus.)
 5. Novikov F.V. Theoretical foundations of machining precision parts : monograph / F.V. Novikov, I.O. Ryabenko. – Kharkiv. : Publ. KNUE, 2013. – 352 p. (Ukr.)
 6. Brizhan T.M. The mathematical model for determining patterns of formation errors machining holes / T.M. Brizhan // Reporter of the Priazovskyi state technical university: collection of scientific works. – Mariupol, 2014. – Issue 28. – P. 167-173. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самотугин
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 01.12.2014