

НОВИКОВ Ф.В., ПОЛЯНСКИЙ В. И., ДИТИНЕНКО С.А.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

Аналитично обгрунтовано умови підвищення точності механічної обробки отвору в разі його неспіввісності з осевим багатолезовим інструментом з урахуванням пружного переміщення, що виникає в технологічній системі. Показано, що збільшення кількості лез осевого багатолезового інструмента не дозволяє зменшити пружне переміщення і похибку обробки отвору. Доцільно використовувати розвертки з різнопохилими зубами, які знижують інтенсивність коливань і підвищують точність обробки шляхом виключення роботи "по сліду".

Ключові слова: механічна обробка отвору, точність обробки, осевий багатолезовий інструмент, кількість лез інструмента, пружне переміщення, похибка обробки, розвертки з різнопохилими зубами.

Аналитически обоснованы условия повышения точности механической обработки отверстия в случае его несоосности с осевым многолезвийным инструментом с учетом упругого перемещения, возникающего в технологической системе. Показано, что увеличение количества лезвий осевого многолезвийного инструмента не позволяет уменьшить упругое перемещение и погрешность обработки отверстия. Целесообразно использовать развертки с разнонаклонными зубьями, снижающие интенсивность колебаний и повышающие точность обработки путем исключения работы "по следу".

Ключевые слова: механическая обработка отверстия, точность обработки, осевой многолезвийный инструмент, количество лезвий инструмента, упругое перемещение, погрешность обработки, развертки с разнонаклонными зубьями.

Analytically grounded process conditions increase the accuracy of machining holes in the case of axial misalignment multiblade tool based on the magnitude of the elastic movement occurring in the process system. It is shown that increasing the number of blades of the axial multiblade tool actually does not affect the value of the maximum elastic movements. It was also found that the error of the axial hole machining multiblade tools with inclined blades is the same as in the processing of the axial hole multiblade tools with straight blades. Therefore it is difficult to reduce the hole machining accuracy by increasing the number of multiple tip tool blades. It is advisable to use the scanner with raznonaklonnymi teeth that reduce the intensity of the vibrations and improve machining accuracy by eliminating the work "on the trail". Errors of processing in this case will be determined by the elastic movements arising in technology-cal system.

Keywords: machining of holes, precision machining, axis multiblade tool number of tool blades, elastic movement, error handling, scanning with raznonaklonnymi teeth.

Введение. Повышение точности механической обработки отверстий является актуальной задачей современного машиностроения. В особенности это относится к изготовлению высокоточных отверстий в деталях гидроаппаратуры и других изделиях. В настоящее время накоплен большой практический опыт обработки высокоточных отверстий, в частности, с применением современных методов абразивной обработки. Однако, существуют значительные технологические возможности обеспечения высокоточной обработки отверстий осевыми многолезвийными инструментами (развертками). Поэтому настоящая работа посвящена изысканию новых технологических возможностей повышения точности обработки отверстий осевыми многолезвийными инструментами.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [1-3] установлено, что точность механической обработки отверстия обусловлена несоосностью осевых многолезвийных инструментов, которая вызывает образование в технологической системе упругих перемещений и колебаний. Для их уменьшения, а в отдельных случаях и устранения, применяют развертки с разнонаклонными зубьями [4], которые фактически исключают работу "по следу". Поэтому важно аналитически определить влияние несоосности обрабатываемого отверстия и осевого многолезвийного инструмента на величину упругого перемещения в технологической системе и условия его уменьшения с целью выявления новых технологических возможностей повышения точности механической обработки отверстий.

Цель работы – аналитическое определение технологических условий повышения точности механической обработки отверстий.

Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи следует воспользоваться аналитическими зависимостями [5,6] для определения упругого перемещения y , возникающего в технологической системе, при рассверливании отверстия с учетом несоосного расположения обрабатываемого отверстия радиусом r и инструмента радиусом R (рис. 1):

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

где c – жесткость технологической системы, Н/м;

σ – условное напряжение резания, Н/м²;

$$K_{рез} = P_{z1} / P_{y1} = P_{z2} / P_{y2};$$

$P_{z1}, P_{z2}, P_{y1}, P_{y2}$ – 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;

Δ – сдвиг оси сверла относительно оси обрабатываемого отверстия, м;

α – угол положения лезвий сверла.

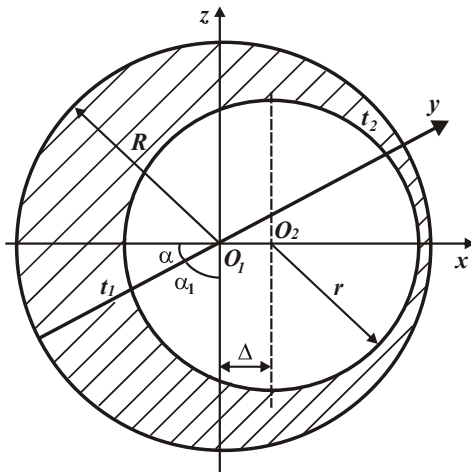


Рис. 1 – Расчетная схема погрешности обработки отверстия при рассверливании

Решение получено в полярной системе координат с координатами y и α . Положение осей инструмента O_1 и обрабатываемого отверстия O_2 рассмотрено в декартовой системе координат xoz . Как видно, максимальное упругое перемещение y достигается при угле $\alpha=0$.

При обработке отверстия зенкером, имеющим 3 лезвия, наибольшая погрешность обработки будет достигаться вдоль координаты ox при осесимметричном расположении лезвий инструмента (рис. 2, а,б). В первом случае радиальные составляющие силы резания, действующие на каждое из трех лезвий инструмента, определяются следующими зависимостями:

$$P_{y1} = P_{y2} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{1\phi} \cdot \cos \varphi}{3 \cdot K_{рез}}; P_{y3} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{3\phi} \cdot \cos \varphi}{3 \cdot K_{рез}}.$$

Под действием этих сил ось инструмента (точка O_1 на рис. 1) переместится вдоль координаты ox на величину упругого перемещения y . По сути, это соответствует уменьшению величины Δ на величину y . Тогда текущая фактическая глубина резания $t_{1\phi}$, приходящаяся на лезвие (зуб) инструмента, будет определяться зависимостью [7], рассматривая в ней вместо величины Δ величину $(\Delta - y)$, т.е.

$$t_{1\phi} = R - \sqrt{(\Delta - y)^2 \cos^2 \alpha + r^2 - (\Delta - y)^2} + (\Delta - y) \cos \alpha. (2)$$

При угле $\alpha = 60^\circ$ с учетом $r \gg (\Delta - y)$ зависимость (2) упростится и примет вид:

$$t_{1\phi} = R - r + 0,5 \cdot (\Delta - y). (3)$$

Соответственно, текущая фактическая глубина резания $t_{3\phi}$ будет определяться зависимостью, приведенной в работе [7], принимая в ней вместо величины Δ величину $(\Delta - y)$, т.е.

$$t_{3\phi} = R - (\Delta - y) \cos \alpha - \sqrt{(\Delta - y)^2 \cos^2 \alpha + r^2 - (\Delta - y)^2}. (4)$$

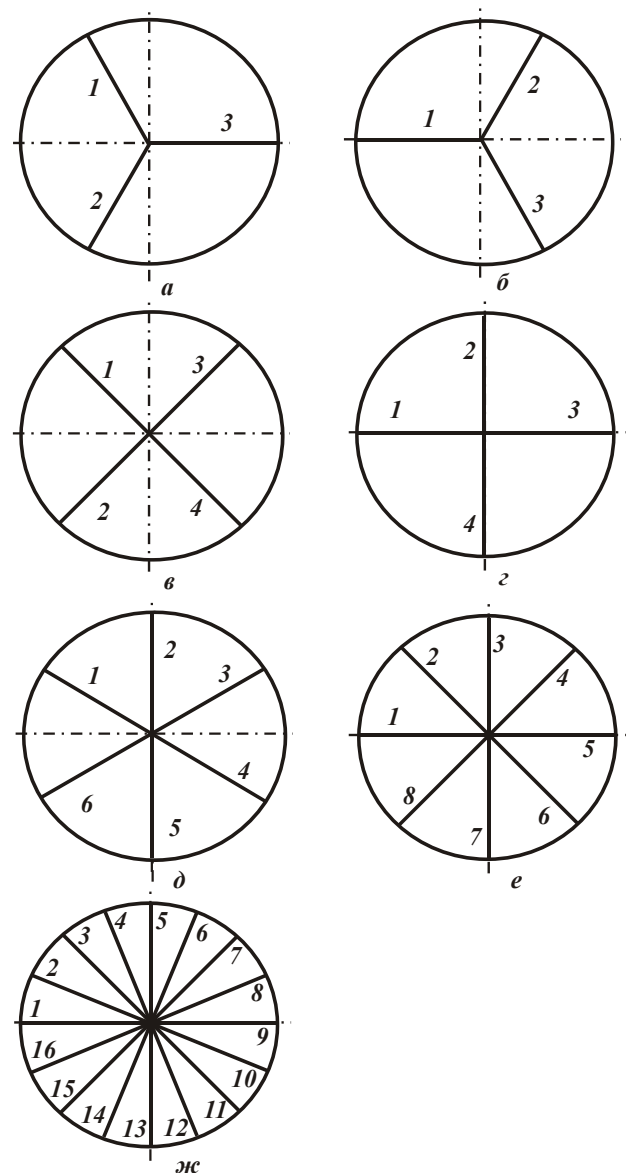


Рис. 2 – Схемы расположения лезвий инструмента

При угле $\alpha = 0^\circ$ с учетом $r \gg (\Delta - y)$ зависимость (4) упростится:

$$t_{3\phi} = R - r - (\Delta - y). (5)$$

Поскольку перемещение оси инструмента происходит вдоль координаты ox , то необходимо рассматривать проекции сил P_{y1} и P_{y2} на координату ox при угле $\alpha = 60^\circ$:

$$(P_{y1})_x = (P_{y2})_x = P_{y1} \cdot \cos \alpha = 0,5 \cdot P_{y1}. (6)$$

Тогда упругое перемещение y определится:

$$y = \frac{2 \cdot (P_{y1})_x - P_{y3}}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{2 \cdot c \cdot K_{рез}} \cdot (\Delta - y), (7)$$

где $(t_{1\phi} - t_{3\phi}) = 1,5 \cdot (\Delta - y)$.

Разрешая полученное уравнение (7) относительно неизвестной величины y (рис. 2,а), получено:

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (8)$$

Для случая, показанного на рис. 2,б, радиальные составляющие силы резания, действующие на каждое из трех лезвий, определяются зависимостями:

$$P_{y1} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{1\phi} \cdot \cos \varphi}{3 \cdot K_{\text{рез}}}, \quad P_{y2} = P_{y3} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{2\phi} \cdot \cos \varphi}{3 \cdot K_{\text{рез}}}. \quad \text{Как}$$

и в первом случае, под действием этих трех сил ось инструмента (точка O_I на рис. 1) переместится вдоль координаты ox на величину упругого перемещения y , что эквивалентно уменьшению величины Δ на величину y . Тогда текущая фактическая глубина резания $t_{1\phi}$, приходящаяся на лезвие (зуб) инструмента, будет определяться зависимостью, приведенной в работе [7], рассматривая в ней вместо величины Δ величину $(\Delta - y)$ для $\alpha = 0^\circ$ с учетом $r \gg (\Delta - y)$:

$$t_{1\phi} = R - r + (\Delta - y). \quad (9)$$

Соответственно, текущая фактическая глубина резания $t_{2\phi}$ будет определяться зависимостью, приведенной в работе [7], принимая в ней вместо величины Δ величину $(\Delta - y)$ для $\alpha = 60^\circ$:

$$t_{2\phi} = R - r - 0,5 \cdot (\Delta - y). \quad (10)$$

Проекция сил P_{y2} и P_{y3} на координату ox при угле $\alpha = 60^\circ$ равны:

$$(P_{y2})_x = (P_{y3})_x = P_{y2} \cdot \cos \alpha = 0,5 \cdot P_{y2}. \quad (11)$$

Величина упругого перемещения y определится:

$$y = \frac{P_{y1} - 2 \cdot (P_{y2})_x}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{3 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}} \cdot 1,5 \cdot (\Delta - y). \quad (12)$$

Разрешая полученное уравнение (12) относительно неизвестной величины y (рис. 2,б), имеем

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (13)$$

Как видно, зависимости (8) и (13) идентичны. Сравнивая их с аналогичной зависимостью (1), полученной при обработке отверстия инструментом с двумя лезвиями (сверлом), видно, что при обработке отверстия инструментом с тремя лезвиями величина упругого перемещения y меньше, т.к. больше знаменатель зависимости (13). 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 (13) будет больше единицы. В противном случае $y \rightarrow \Delta$.

При обработке отверстия осевым инструментом (зенкером), имеющим 4 лезвия, наибольшая погрешность обработки, очевидно, будет достигаться вдоль координаты ox при осесимметричном расположении лезвий инструмента (рис. 2,в,г). В первом случае радиальные составляющие силы резания, действующие на каждое из четырех лезвий инструмента, соответственно определяются зависимостями:

$$P_{y1} = P_{y2} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{1\phi} \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{\text{рез}}}; \quad P_{y3} = P_{y4} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{3\phi} \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{\text{рез}}}.$$

Под действием этих сил ось инструмента (точка O_I на рис. 1) переместится вдоль координаты ox на величину y , что эквивалентно уменьшению величины Δ на величину y . Тогда текущие фактические глубины резания $t_{1\phi}$ и $t_{3\phi}$, приходящиеся на лезвие (зуб) инструмента, будут определяться зависимостями:

$$t_{1\phi} = R - \sqrt{(\Delta - y)^2 \cos^2 \alpha + r^2} - (\Delta - y)^2 + (\Delta - y) \cos \alpha \approx \\ \approx R - r + 0,707(\Delta - y); \quad (14)$$

$$t_{3\phi} = R - (\Delta - y) \cos \alpha - \sqrt{(\Delta - y)^2 \cos^2 \alpha + r^2} - (\Delta - y)^2 \approx \\ \approx R - r - 0,707(\Delta - y). \quad (15)$$

Проекция сил P_{y1} , P_{y2} , P_{y3} и P_{y4} на координату ox при угле $\alpha = 45^\circ$:

$$(P_{y1})_x = (P_{y2})_x = P_{y1} \cdot \cos \alpha = 0,707 \cdot P_{y1}; \\ (P_{y3})_x = (P_{y4})_x = P_{y3} \cdot \cos \alpha = 0,707 \cdot P_{y3}. \quad (16)$$

Величина упругого перемещения y определится:

$$y = \frac{2(P_{y1})_x - 2(P_{y3})_x}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{2c \cdot K_{\text{рез}}} (\Delta - y). \quad (17)$$

Разрешая полученное уравнение (17) относительно неизвестной величины y (рис. 2,в), имеем:

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (18)$$

При расположении лезвий инструмента, показанном на рис. 2,г, величина упругого перемещения y будет формироваться под действием лишь радиальных составляющих силы резания P_{y1} и P_{y3} , т.е.

$$P_{y1} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{1\phi} \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{\text{рез}}}; \quad P_{y3} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{3\phi} \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{\text{рез}}}.$$

Величина упругого перемещения y выразится:

$$y = \frac{P_{y1} - P_{y3}}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}} \cdot (t_{1\phi} - t_{3\phi}). \quad (19)$$

С учетом $(t_{1\phi} - t_{3\phi}) = 2 \cdot (\Delta - y)$ имеем

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (20)$$

Как видно, зависимости (18) и (20) идентичны. Сравнивая их с аналогичной зависимостью (13), полученной при обработке отверстия инструментом с тремя лезвиями, видно, что они также идентичны. Следовательно, увеличение количества лезвий осевого инструмента (зенкера) с трех до четырех не приводит к снижению упругого перемещения y и соответственно к снижению погрешности обработки отверстия, т.е. эффект повышения точности обработки отсутствует.

Используя полученные выше теоретические решения, оценим погрешность обработки отверстия осевым инструментом с 6 лезвиями для положения лезвий (рис. 2,д), которое, очевидно, будет определять наибольшую величину упругого перемещения y .

С учетом проекций радиальных составляющих силы резания P_{y1} , P_{y3} , P_{y4} , P_{y6} на ось ox и условий $P_{y1} = P_{y6}$ и $P_{y3} = P_{y4}$, величина y определится:

$$y = \frac{2 \cdot (P_{y1} - P_{y4}) \cdot \cos 30^0}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{2 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}} \cdot (\Delta - y), \quad (21)$$

где $P_{y1} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{1\phi} \cdot \cos \varphi}{6 \cdot K_{\text{рез}}}$;

$$P_{y4} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{4\phi} \cdot \cos \varphi}{6 \cdot K_{\text{рез}}}$$

$$t_{1\phi} - t_{4\phi} = 2 \cdot (\Delta - y) \cdot \cos 30^0.$$

Откуда

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (22)$$

Как видно, зависимость (22) идентична зависимостям (13) и (20), т.е. обработка отверстия осевым

$$y = \frac{(P_{y1} - P_{y9}) + 2(P_{y2} - P_{y10}) \cos 22,5^0 + 2(P_{y3} - P_{y11}) \cos 45^0 + 2(P_{y4} - P_{y12}) \cos 67,5^0}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{2 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}} \cdot (\Delta - y), \quad (25)$$

где $P_{y1} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{1\phi} \cdot \cos \varphi}{16 \cdot K_{\text{рез}}}$, ..., $P_{y2} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{2\phi} \cdot \cos \varphi}{8 \cdot K_{\text{рез}}}$;

$$t_{1\phi} - t_{9\phi} = 2 \cdot (\Delta - y) \cdot \cos 0^0;$$

$$t_{2\phi} - t_{10\phi} = 2 \cdot (\Delta - y) \cdot \cos 22,5^0;$$

$$t_{3\phi} - t_{11\phi} = 2 \cdot (\Delta - y) \cdot \cos 45^0;$$

$$t_{4\phi} - t_{12\phi} = 2 \cdot (\Delta - y) \cdot \cos 67,5^0.$$

Разрешая уравнение (25) относительно величины y , приходим к зависимости (24):

многолезвийным инструментом с 6 лезвиями приводит к возникновению в технологической системе такой же величины упругого перемещения y как и обработка отверстия инструментом с 3 и 4 лезвиями.

При обработке отверстия осевым инструментом с восемью лезвиями (рис. 2,е) величина упругого перемещения y будет формироваться под действием радиальных составляющих силы резания P_{y1} , ..., P_{y8} . С учетом $P_{y2} = P_{y8}$; $P_{y4} = P_{y6}$; $t_{1\phi} = R - r + (\Delta - y)$; $t_{5\phi} = R - r - (\Delta - y)$; $t_{2\phi} = R - r + (\Delta - y) \cdot \cos \alpha$; $t_{4\phi} = R - r - (\Delta - y) \cdot \cos \alpha$ и $i = 1 \dots 8$ величина упругого перемещения y с учетом $\alpha = 45^0$ определится:

$$y = \frac{(P_{y1} - P_{y5}) + 2 \cdot (P_{y2} - P_{y4}) \cdot \cos \alpha}{c}, \quad (23)$$

где $P_{yi} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{i\phi} \cdot \cos \varphi}{8 \cdot K_{\text{рез}}}$.

Разрешая уравнение (23) относительно величины y , приходим к зависимостям (13) и (22):

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (24)$$

Таким образом показано, что увеличение количества лезвий осевого многолезвийного инструмента с 3 до 8 не привело к снижению величины упругого перемещения y .

При обработке отверстия осевым инструментом с 16 лезвиями (рис. 2,ж) в формировании величины упругого перемещения y не будут принимать участие лишь 5-е и 13-е лезвия, поскольку проекции радиальных составляющих силы резания, возникающих от работы этих лезвий, на ось ox равны нулю. Тогда с учетом условий $P_{y2} = P_{y16}$, $P_{y3} = P_{y15}$, $P_{y4} = P_{y14}$, $P_{y6} = P_{y12}$, $P_{y7} = P_{y11}$, $P_{y8} = P_{y10}$ и проекций радиальных составляющих силы резания на ось ox величина упругого перемещения y определится:

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (26)$$

Следовательно, при обработке отверстия осевым многолезвийным инструментом с 8 и 16 лезвиями величина упругого перемещения y одинакова, т.е. добиться повышения точности обработки отверстия за счет увеличения количества лезвий с 3 до 16 затруднительно.

Рассмотрим погрешности обработки отверстия осевым многолезвийным инструментом с расположением лезвий под наклоном. В этом случае в расчетной схеме (рис. 1) следует рассматривать вместо

сосредоточенной радиальной составляющей силы резания распределенную нагрузку $q = P_y / l$, действующую на определенном участке обрабатываемого отверстия длиной $l = \frac{2\pi \cdot R \cdot \alpha}{360^0}$, где α – угол контакта лезвия осевого многолезвийного инструмента, расположенного под наклоном, с обрабатываемым материалом. Тогда при обработке осевым инструментом с 4 наклонными лезвиями с учетом $dl = R \cdot d\alpha$ величина y определится:

$$y = \frac{1}{c} \cdot \left[\int_0^l (q_1 - q_3) \cdot \cos \alpha \cdot dl + \int_0^l (q_2 - q_4) \cdot \cos \alpha \cdot dl \right], \quad (27)$$

где $(q_1 - q_3) = \frac{(P_{y1} - P_{y3})}{l}$;

$$(P_{y1} - P_{y3}) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{pez}} \cdot 2 \cdot (\Delta - y) \cdot \cos \alpha.$$

Рассматривая пределы интегрирования в зависимости от угла α , имеем:

$$y = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4 \cdot c \cdot K_{pez}} \cdot \frac{360^0}{\pi \cdot \alpha} \cdot (\Delta - y) \times \left[\int_0^{\alpha} \cos^2 \alpha \cdot d\alpha + \int_{90^0 - \alpha}^{90^0} \cos^2 \alpha \cdot d\alpha \right]. \quad (28)$$

Откуда

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)}. \quad (29)$$

В итоге пришли к зависимости (24). Следовательно, погрешность обработки отверстия осевым многолезвийным инструментом с наклонными лезвиями такая же, как и при обработке отверстия осевым многолезвийным инструментом с прямыми лезвиями. Поэтому, как отмечалось выше, целесообразно использовать развертки с разнонаклонными зубьями, которые позволяют уменьшить интенсивность колебаний и повысить точность обработки в результате исключения работы “по следу”. Погрешности обработки в этом случае будут определяться упругими перемещениями, возникающими в технологической системе.

Выводы. Аналитически обоснованы технологические условия повышения точности механической обработки отверстия в случае его несоосности с осевым многолезвийным инструментом с учетом величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе. Показано, что увеличение количества лезвий осевого многолезвийного инструмента фактически не влияет на величину максимального упругого перемещения. Установлено также, что погрешность обработки отверстия осевым многолезвийным инструментом с наклонными лезвиями такая же,

как и при обработке отверстия осевым многолезвийным инструментом с прямыми лезвиями. Поэтому сложно уменьшить погрешности обработки отверстия путем увеличения количества лезвий многолезвийного инструмента. Целесообразно использовать развертки с разнонаклонными зубьями, которые позволяют уменьшить интенсивность колебаний и повысить точность обработки в результате исключения работы “по следу”. Погрешности обработки в этом случае будут определяться упругими перемещениями, возникающими в технологической системе.

Список литературы:

1. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1970. – 390 с.
2. Колев К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев, Л.М. Горчаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.
3. 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.
4. Евтушенко В.А. Обработка отверстий в труднообрабатываемых материалах развертками с разнонаклонными зубьями: дис. ... кандидата техн. наук: 05.03.01 / В.А. Евтушенко. – К.: КПИ, 1986. – 260 с.
5. 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: ПДТУ, 2011. – 209 с.
6. Брижан Т.М. Теоретический анализ условий повышения точности обработки отверстий осевыми многолезвийными инструментами / Т.М. Брижан // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. – Мариуполь: ПДТУ, 2014. – Вип. 29. – С. 160-168.
7. Брижан Т.М. Математическая модель определения закономерностей формирования погрешностей механической обработки отверстий / Т.М. Брижан // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. – Мариуполь: ПДТУ, 2014. – Вип. 28. – С. 167-173.

References (transliterated)

1. Matalin A.A. Tochnost mekhanicheskoy obrabotki i proektirovaniye technologicheskikh protsessov / A.A. Matalin. – M.: Mashinostroeniye, 1970. – 390 s.
2. Kolev K.S. Tochnost obrabotki i rezhimy rezaniya / K.S. Kolev, L.M. Gorchakov. – M.: Mashinostroeniye, 1976. – 144 s.
3. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya / Pod obsh. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. – V 10 tomakh. – Odessa: ONPU. – T. 1. “Mechanika rezaniya materialov”. – 580 s.
4. Evtuchenko V.A. Obrabotka otverstiy v trudnoobrabatyvaemykh materialakh razvertkami s raznonaklonnymi zubyami: dis. ... kand. techn. nauk: 05.03.01 / V.A. Evtuchenko. – K.: KPI, 1986. – 260 s.
5. Ivanov I.E. Vysokoeffektivnaya tekhnologiya izgotovleniya rezbovych otverstiy v gorlovinakh ballonov na avtomaticheskikh liniyach: monografiya / I.E. Ivanov, F.V. Novikov, E.I. Ivanov. – Mariupol: PDTU, 2011. – 209 s.
6. Brizhan T.M. Teoreticheskyy analiz usloviy povycheniya tochnosti obrabotki otverstiy osevyimi mnogolezviynymi instrumentami / T.M. Brizhan // Visnyk Pryazovskogo derzhavnogo technichnogo universytetu: zb. nauk. prats. Seriya: Technichni nauki. – Mariupol: PDTU, 2014. – Vyp. 29. – S. 160-168.
7. Brizhan T.M. Matematicheskaya model opredeleniya zakonornostey formirovaniya pogrechnostey mekhanicheskoy obrabotki otverstiy / T.M. Brizhan // Visnyk Pryazovskogo derzhavnogo technichnogo universytetu: zb. nauk. prats. Seriya: Technichni nauki. – Mariupol: PDTU, 2014. – Vyp. 28. – S. 167-173.

Поступила (received) 02.11.2016