

УДК 621.923

© Брижан Т.М.*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ
ФОРМИРОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ОТВЕРСТИЙ**

Проведен теоретический анализ закономерностей формирования погрешностей механической обработки отверстий с учетом неравномерности снимаемого припуска и образования в технологической системе упругих перемещений. Показано, что при рассверливании отверстия в следствие участия в резании двух противоположно расположенных лезвий сверла происходит увеличение диаметра обрабатываемого отверстия на величину упругого перемещения. При растачивании отверстия возникновение в технологической системе упругого перемещения не приводит к превышению диаметра обрабатываемого отверстия номинального значения. Это предопределяет принципиальное отличие условий формирования погрешностей обработки при рассверливании и растачивании отверстий. На основе полученных зависимостей определены пути повышения точности обработки отверстий.

Ключевые слова: обрабатываемое отверстие, сверло, растачивание, погрешность обработки, глубина резания, подача, сила резания, упругое перемещение.

Брижан Т.М. Математична модель визначення закономірностей формування похибок механічної обробки отворів. Проведено теоретичний аналіз закономірностей формування похибок механічної обробки отворів з урахуванням нерівномірності припуску, що знімається, і утворення в технологічній системі пружних переміщень. Показано, що при розсвердлюванні отвору внаслідок участі в різанні двох протилежно розташованих лез свердла відбувається збільшення діаметра оброблюваного отвору на величину пружного переміщення. При розточуванні отвору виникнення в технологічній системі пружного переміщення не приводить до перевищення діаметра оброблюваного отвору номінального значення. Це визначає принципову відмінність умов формування похибок обробки при розсвердлюванні й розточуванні отворів. На основі отриманих залежностей визначені шляхи підвищення точності обробки отворів.

Ключові слова: оброблюваний отвір, свердло, розточування, похибка обробки, глибина різання, подача, сила різання, пружне переміщення.

T.M. Brizhan. Mathematical model for determining the regularities of formation of errors at mechanical treatment of holes. A theoretical analysis of the regularities of formation of machining errors, taking into account the uneven holes shoot allowance and education in the technological system of elastic movements. It is shown, that when drilling holes in consequence of participating in two opposed cutting blades drill is increased diameter of the hole on the magnitude of the elastic displacement. When boring holes in the emergence of the technological system of elastic displacement does not result in exceeding the diameter of the hole nominal value. This presupposes the fundamental difference between the conditions of formation of error handling when drilling and boring holes. Based on these dependencies ways were identified of improving the accuracy of holes.

Keywords: machined holes, drill, boring, error handling, cutting depth, feed, cutting force, elastic movement.

Постановка проблемы. Обработка отверстий является наиболее трудоемким методом механической обработки, связанным с необходимостью устранения возникающих погрешно-

* м.л. науч. сотр., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, tmbrizhan@ukr.net

стей. В особой мере это относится к обработке высокоточных отверстий в деталях, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, которые характеризуются значительной силовой напряженностью процесса резания и требуют применения прогрессивных методов обработки. В настоящее время существует большой арсенал лезвийной и абразивной обработки отверстий. Однако, все возрастающие требования к повышению производительности и качеству обработки отверстий предполагают поиск новых технологических решений, в том числе на основе разработки математических моделей формирования погрешностей обработки и определения оптимальных условий по их устранению. В связи с этим, проблему повышения эффективности механической обработки отверстий следует рассматривать актуальной, требующей проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Анализ последних исследований и публикаций. Поиску прогрессивных технологических решений изготовления высокоточных отверстий в научно-технической литературе уделено большое внимание [1-3]. Однако при исследовании, как правило, ограничиваются проведением опытов и в меньшей мере затрагивают вопросы построения математических моделей процесса обработки и выявления на их основе основных закономерностей возникновения и устранения погрешностей обработки отверстий, которые главным образом и определяют высокую трудоемкость технологических операций. В связи с этим, заслуживают особого внимания результаты теоретических исследований погрешностей обработки отверстий мерными инструментами, приведенные в работах [4, 5]. В них аналитически определена величина смещения оси обработанного отверстия относительно ее номинального положения, обусловленная неравномерностью снимаемого припуска. Установлено, что повысить точность обработки отверстия можно снижением энергоемкости обработки, подачи и увеличением жесткости элементов технологической системы. Полученное решение открывает новые направления интенсификации процесса обработки отверстия как мерными, так немерными инструментами. Это относится к процессам рассверливания, зенкерования, развертывания, растачивания, шлифования отверстий. Поэтому в настоящей работе на основе указанного решения обоснованы условия интенсификации процесса устранения погрешностей при обработке отверстий.

Цель работы – определение условий повышения точности и производительности обработки отверстий на основе разработки математической модели формирования погрешностей механической обработки.

Изложение основного материала. Первоначально рассмотрим закономерности возникновения погрешностей обработки отверстия при рассверливании на основе теоретического подхода, предложенного в работе [4]. Как установлено, при рассверливании отверстия существенное влияние на погрешности обработки оказывает сдвиг оси сверла относительно оси обрабатываемого отверстия Δ (рис. 1,а). Это связано с нарушением равенства сил резания, действующих на оба лезвия сверла в связи с неравномерным снимаемым припуском, что приводит к возникновению в технологической системе упругого перемещения

$$y = \frac{(P_{y1} - P_{y2})}{c}, \quad (1)$$

где P_{y1} , P_{y2} – радиальные составляющие силы резания, действующие на оба лезвия сверла, Н; c – жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м.

При рассверливании отверстия подача, приходящаяся на одно лезвие сверла, равна $0,5 \cdot S$. Тогда, представляя $P_{y1} = \frac{\sigma \cdot S \cdot (t_1 - y) \cdot \cos \varphi}{2 \cdot K_{pez}}$, $P_{y2} = \frac{\sigma \cdot S \cdot (t_2 + y) \cdot \cos \varphi}{2 \cdot K_{pez}}$ и разрешая уравнение (1) относительно неизвестной величины y , получено

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

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; $K_{pez} = P_{z1} / P_{y1} = P_{z2} / P_{y2}$ – коэффициент резания; P_{z1} , P_{z2} – тангенциальные составляющие силы резания, действующие на оба лезвия

сверла, Н; S – подача, м/об; t_1, t_2 – глибини резания, приходящиеся на оба лезвия сверла, м; φ – половина главного угла сверла в плане.

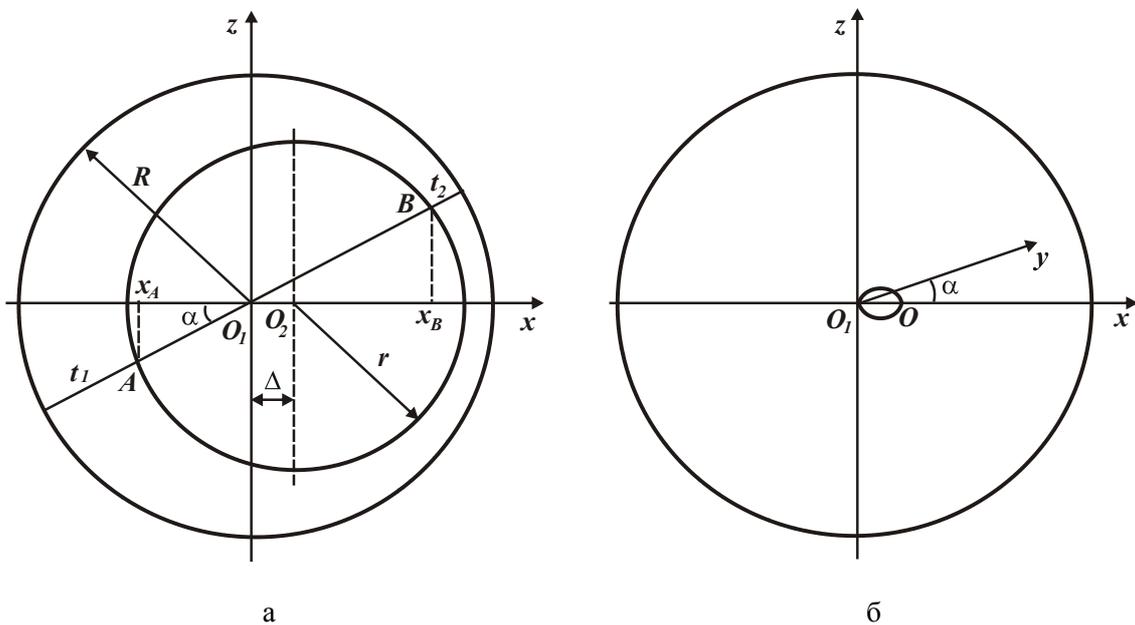


Рис. 1 – Расчетная схема погрешности обработки отверстия (а) и траектория движения оси сверла во времени (б)

Исходя из зависимости (2), уменьшить величину упругого перемещения y и соответственно повысить точность обработки отверстия можно уменьшением параметров $(t_1 - t_2)$, $\sigma / K_{рез}$, S и увеличением жесткости технологической системы c и увеличением угла $\varphi \rightarrow 90^\circ$. Уменьшение отношения $\sigma / K_{рез}$ предполагает снижение силовой напряженности процесса резания за счет повышения режущей способности инструмента.

Из рис. 1,а вытекает, что наибольшее значение разницы $(t_1 - t_2)$ достигается при положении лезвий сверла, соответствующем координате $z = 0$, т.е. вдоль оси x :

$$(t_1 - t_2) = [R - (r - \Delta)] - [R - (r + \Delta)] = 2\Delta, \quad (3)$$

где R – радиус сверла, м; r – начальный радиус обрабатываемого отверстия, м.

Для определения текущего значения разницы $(t_1 - t_2)$ необходимо знать длины отрезков O_1A и O_1B (рис. 1,а), которые устанавливаются из системы уравнений:

$$\begin{cases} z^2 + (x - \Delta)^2 = r^2; \\ z = \operatorname{tg} \alpha \cdot x, \end{cases} \quad (4)$$

где α – угол, определяющий положение лезвий сверла.

Разрешая систему уравнений (4), получено квадратное уравнение:

$$x^2 - 2 \cdot x \cdot \Delta \cdot \cos^2 \alpha - (r^2 - \Delta^2) \cdot \cos^2 \alpha = 0. \quad (5)$$

Его решение:

$$x = \Delta \cdot \cos^2 \alpha \pm \sqrt{(\Delta \cdot \cos^2 \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2) \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (6)$$

Исходя из полученного решения, координата x точки А равна:

$$x_A = \Delta \cdot \cos^2 \alpha - \sqrt{(\Delta \cdot \cos^2 \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2) \cdot \cos^2 \alpha} . \quad (7)$$

Координата x точки В:

$$x_B = \Delta \cdot \cos^2 \alpha + \sqrt{(\Delta \cdot \cos^2 \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2) \cdot \cos^2 \alpha} . \quad (8)$$

Соответственно длины отрезков O_1A и O_1B равны:

$$O_1A = \frac{x_A}{\cos \alpha} = \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)} - \Delta \cdot \cos \alpha ; \quad (9)$$

$$O_1B = \frac{x_B}{\cos \alpha} = \Delta \cdot \cos \alpha + \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)} . \quad (10)$$

Текущие значения t_1 и t_2 определяются зависимостями: $t_1 = R - O_1A$; $t_2 = R - O_1B$, откуда $(t_1 - t_2) = (R - O_1A) - (R - O_1B) = O_1B - O_1A$.

С учетом зависимостей (9) и (10) получено:

$$(t_1 - t_2) = 2 \cdot \Delta \cdot \cos \alpha . \quad (11)$$

Такое же решение получено в работе [4] другим методом расчета.

Исходя из зависимости (11) при условии $\alpha = 0$ разность глубин резания $(t_1 - t_2) = 2 \cdot \Delta$, что соответствует решению (3). Следовательно, расчеты выполнены правильно.

Из зависимости (11) вытекает, что с увеличением угла α разность $(t_1 - t_2)$ уменьшается по закону косинуса. Тогда зависимость (2) с учетом зависимости (11) принимает вид:

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

На рис. 1,б графически показан характер изменения величины упругого перемещения сверла y в радиальном направлении в зависимости от угла α (в полярных координатах). Как видно, при $\alpha = 0$ величина y принимает наибольшее значение и с увеличением угла α уменьшается до нуля (при $\alpha = 90^\circ$). По сути, представленная на рис. 1,б кривая O_1O описывает положение оси сверла в разные моменты времени (в зависимости от положения лезвий сверла). Очевидно, наибольшая погрешность обработки отверстия имеет место при угле $\alpha = 0$, т.е. вдоль оси x . По мере увеличения угла α происходит смещение оси сверла также и вдоль оси z . Следовательно, наблюдается разбивка отверстия по двум координатам, в результате чего обрабатываемое отверстие приобретает сложную геометрическую форму, близкую к форме эллипса с наибольшим размером вдоль оси x . Это соответствует практическим данным и указывает на то, что при рассверливании отверстия с неравномерно снимаемым припуском сложно добиться требуемой точности обработки в связи с возникновением в технологической системе упругих перемещений.

Из зависимости (12) также следует, что при условиях $\alpha = 0$ и $\frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \rightarrow 0$ величина упругого перемещения сверла y принимает максимальное значение $y \rightarrow \Delta$. Этот случай возможен при низкой жесткости технологической системы c , увеличенной подаче S и работе затупленным инструментом, характеризующимся повышенными значениями $\sigma / K_{рез}$.

Полученное решение позволяет оценить возможности снижения погрешности обработки отверстия при растачивании. В этом случае величина упругого перемещения сверла y определяется из уравнения (1) с учетом $P_{y2} = 0$:

$$y = \frac{\sigma \cdot S \cdot (t_1 - y) \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}} \quad (13)$$

Разрешая уравнение (13) относительно величины y , получено

$$y = \frac{t_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} \quad (14)$$

Сравнивая зависимости (14) и (2), видно, что при растачивании отверстия величина y больше, чем при рассверливании отверстия, т.к. больше числитель и меньше знаменатель зависимости (14). Заслуживает внимания тот факт, что уточнение, равное знаменателю зависимости, больше при рассверливании отверстия, т.е. в этом случае обеспечивается уменьшение упругого перемещения сверла и повышение устойчивости процесса. Однако, в данном случае из-за того, что в резании участвуют два противоположно расположенные лезвия сверла, происходит увеличение диаметра обрабатываемого отверстия на величину упругого перемещения. Это приводит к разбивке отверстия и снижает точность обработки. Повторный проход сверла не позволит исправить погрешность обработки, т.к. при этом уменьшается сдвиг оси сверла относительно оси обрабатываемого отверстия, а это приводит к еще большей разбивке отверстия.

При растачивании отверстия в резании участвует лишь одно лезвие и поэтому возникновение в технологической системе упругого перемещения не приводит к превышению диаметра обрабатываемого отверстия номинального значения. Собственно, в этом и состоит принципиальное отличие формирования погрешностей обработки при рассверливании и растачивании отверстий, т.е. при обработке отверстий мерным и немерным инструментом. Следовательно, при растачивании потенциально может быть исключена разбивка отверстия и обеспечена более высокая точность обработки по сравнению с рассверливанием отверстия.

При растачивании отверстия глубина резания t_1 , входящая в зависимость (14), определяется с учетом зависимости (9):

$$t_1 = R - O_1 A = R + (\Delta \cdot \cos \alpha - \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)}). \quad (15)$$

После умножения и деления выражения в скобках зависимости (15) на сопряженную величину $(\Delta \cdot \cos \alpha + \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)})$, получено

$$t_1 = R - \frac{(r^2 - \Delta^2)}{\left[\Delta \cdot \cos \alpha + \sqrt{(\Delta \cdot \cos \alpha)^2 + (r^2 - \Delta^2)}\right]}. \quad (16)$$

Как следует из зависимости (16), с увеличением угла α глубина резания t_1 уменьшается. Наибольшее значение t_1 достигается при $\alpha = 0$ и равно $t_1 = R - r + \Delta$. Соответственно наибольшее значение упругого перемещения y , исходя из зависимости (14), определяется:

$$y = \frac{(R - r + \Delta)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (17)$$

Как и при рассверливании отверстия, при растачивании отверстия уменьшить величину y (при съеме всего припуска за один проход инструмента) можно увеличением параметров c , φ и уменьшением $\sigma / K_{рез}$ и S .

На рис. 2,а показана траектория перемещения оси расточной системы во времени. В соответствии с расчетной схемой, показанной на рис. 1,а, при резании с глубиной резания t_1 расточная система деформируется в положительном направлении оси x , а при резании с глубиной резания t_2 – в отрицательном направлении оси x , принимая меньшие значения y . В итоге ось расточной системы описывает сложную геометрическую фигуру, которая в отличие от процесса рассверливания отверстия (рис. 1,б) расположена в двух полуплоскостях: $x > 0$ и $x < 0$. В случае $\Delta = 0$ ось расточной системы во времени будет перемещаться по окружности с радиусом, равным величине упругого перемещения y (рис. 2,б).

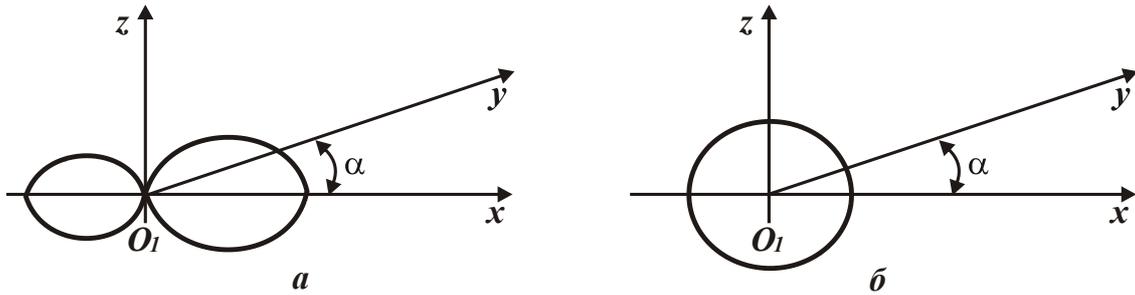


Рис. 2 – Траектория движения оси расточной системы во времени для $\Delta > 0$ (а) и $\Delta = 0$ (б)

Чтобы уменьшить погрешность обработки необходимо процесс расточки производить за несколько проходов инструмента. Например, при втором проходе роль глубины резания $t_1 = R - r + \Delta$ будет выполнять величина упругого перемещения y , описываемая зависимостью (17). Тогда величина упругого перемещения y_2 , образуемая в технологической системе на втором проходе, определится путем подстановки в зависимость (14) вместо глубины резания t_1 величины y , описываемой зависимостью (17):

$$y_2 = \frac{(R - r + \Delta)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2} \cdot \quad (18)$$

Очевидно, справедливо условие $y_2 < y$, поскольку знаменатель зависимости (18) больше единицы. При n -ом проходе инструмента зависимость (18) примет вид:

$$y_n = \frac{(R - r + \Delta)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n} \cdot \quad (19)$$

Как видно, с увеличением количества проходов инструмента n величина упругого перемещения y_n , образуемая в технологической системе, уменьшается по закону убывающей геометрической прогрессии, что в конечном итоге обеспечит требуемую точность обработки.

Необходимо отметить, что, несмотря на более высокие значения упругих перемещений, возникающих при растачивании отверстия, как показано выше, данный метод обеспечивает более высокую точность обработки по сравнению с рассверливанием отверстия. Следовательно, процесс рассверливания может быть эффективно использован лишь при предварительной обработке, т.е. при съеме основной части припуска. Повысить эффективность процесса рассверливания можно, например, за счет применения однолезвийного сверла, работающего по принципу расточного резца.

Для обеспечения более высоких показателей точности необходимо после рассверливания применять окончательную обработку отверстия. Так, в случае относительно невысоких требований к точности можно использовать повторно операцию рассверливания сверлом большего диаметра. Тогда сдвиг оси сверла относительно обрабатываемого отверстия будет меньше, чем на предыдущей операции рассверливания сверлом меньшего диаметра и выше точность обработки.

Для более точной обработки следует использовать зенкеры и развертки [1], эффект применения которых, исходя из полученного решения, состоит в уменьшении подачи, приходящейся на одно лезвие инструмента. В данном случае она равна S/n , где n – количество лезвий многолезвийного инструмента. Тогда зависимость (2) в первом приближении опишется:

$$y = \frac{(t_1 - t_2)}{\left(2 + \frac{n \cdot c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} \cdot \quad (20)$$

Как видно, с увеличением количества лезвий инструмента n уменьшается величина упругого перемещения y , что приводит к повышению точности обработки отверстия. Эффект будет усиливаться при обработке с низкой жесткостью технологической системы c .

Выводы

В работе разработана математическая модель определения закономерностей формирования погрешностей механической обработки отверстий с учетом неравномерности снимаемого припуска и образования в технологической системе упругих перемещений. Показано, что при рассверливании отверстия в следствие участия в резании двух противоположно расположенных лезвий сверла происходит увеличение диаметра обрабатываемого отверстия на величину упругого перемещения. Это приводит к разбивке отверстия и снижает точность обработки. При растачивании отверстия в резании участвует лишь одно лезвие и поэтому возникновение в технологической системе упругого перемещения не приводит к превышению диаметра обрабатываемого отверстия номинального значения. Это предопределяет принципиальное отличие условий формирования погрешностей обработки при рассверливании и растачивании отверстий. На основе полученных аналитических зависимостей для определения упругих перемещений в технологической системе определены пути повышения точности механической обработки отверстий, основным из которых является увеличение количества лезвий многолезвийных инструментов (зенкеров и разверток), участвующих в съеме материала.

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. 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. Новиков Ф.В. Закономерности образования погрешностей механической обработки и теоретический анализ условий их уменьшения / Ф.В. Новиков, И.Е. Иванов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Випуск 1 (10). – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – С. 124-130.

Bibliography:

1. Matalin A.A. Precision machining and design of production processes / A.A. Matalin. – M.: Mashinostroenie, 1970. – 390. (Rus.)
2. Physico-mathematical theory of material processing technology and mechanical engineering / Under total. Ed. F.V. Novikov and A.V. Yakimova. In ten volumes. – Volume 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. Highly efficient production technology threaded holes in the neck of the cylinder on automated lines : monograph / I.E. Ivanov, F.V. Novikov, E.I. Ivanov. – Mariupol: Izd. PGTU. – 2011. – 209 p. (Rus.)
5. Novikov F.V. Regularities of machining errors and theoretical analysis of the conditions for their reduction / F.V. Novikov, I.E. Ivanov // Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tehnicnogo universitetu. Seriya: Mashinobuduvannya i mashinoznavstvo. – Issue 1 (10). – Donetsk: DonNTU, 2013. – P. 124-130. (Rus.)