

**Т.М. БРИЖАН**, ГВУЗ "ПГТУ", Мариуполь;

**С.А. ДИТИНЕНКО**, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ РАЗВЕРТЫВАНИИ ОТВЕРСТИЙ**

В работе предложена математическая модель определения составляющих силы резания при развертывании отверстий с позиции косоугольного резания, что позволило обеспечить высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных. Теоретически и экспериментально обоснована возможность существенного снижения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания за счет создания наклонных зубьев на развертке, что способствует повышению точности обработки отверстий. Показано значительное влияние интенсивности трения на передней поверхности зуба развертки на силы резания при развертывании отверстия.

**Ключевые слова:** развертывание отверстий, зубья развертки, механическая обработка, точность обработки, сила резания, коэффициент усадки стружки.

**Введение.** Изготовление высокоточных отверстий в деталях машин является одной из наиболее сложных задач в технологии машиностроения. Поэтому решению этой задачи постоянно уделяется большое внимание. В настоящее время существует достаточно большое количество эффективных методов обработки отверстий, одним из которых является развертывание. Однако в полной мере не раскрыты физические закономерности и технологические возможности высокоточной обработки отверстий. Отсутствует формализованная математическая теория обработки высокоточных отверстий, основанная на аналитическом представлении силы резания и образующихся при этом погрешностей обработки. В связи с этим, в работе решается актуальная задача разработки эффективного процесса развертывания отверстий.

**Анализ последних достижений и литературы.** В работах [1 – 3] показано, что точность обработки отверстий обусловлена главным образом возникающими в технологической системе упругими перемещениями и интенсивными колебаниями. Установлено [4], что чем меньше сила резания, тем меньше погрешности обработки отверстия. Поэтому решение задачи повышения точности обработки отверстия в процессе развертывания связано, в первую очередь, с уменьшением силовой напряженности процесса резания. Это требует аналити-

ческого описания составляющих силы резания при развертывании отверстия и определения условий их уменьшения.

**Цель работы, постановка проблемы.** Целью работы является теоретическое обоснование условий повышения точности обработки при развертывании отверстий на основе аналитического определения параметров силовой напряженности процесса развертывания.

**Материалы исследования.** Известно, что процесс развертывания отверстий подчиняется законам косоугольного резания. Поэтому при определении условий повышения точности обработки отверстия необходимо расчет составляющих силы резания производить с учетом дополнительного движения образующей стружки вдоль режущего лезвия инструмента и образующейся при этом дополнительной силы трения, которая применительно к процессу продольного точения (рис. 1,а) имеет вид:  $P_{mp} = P_z \cdot f$ , где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;  $f$  – коэффициент трения обрабатываемого и инструментального материалов.

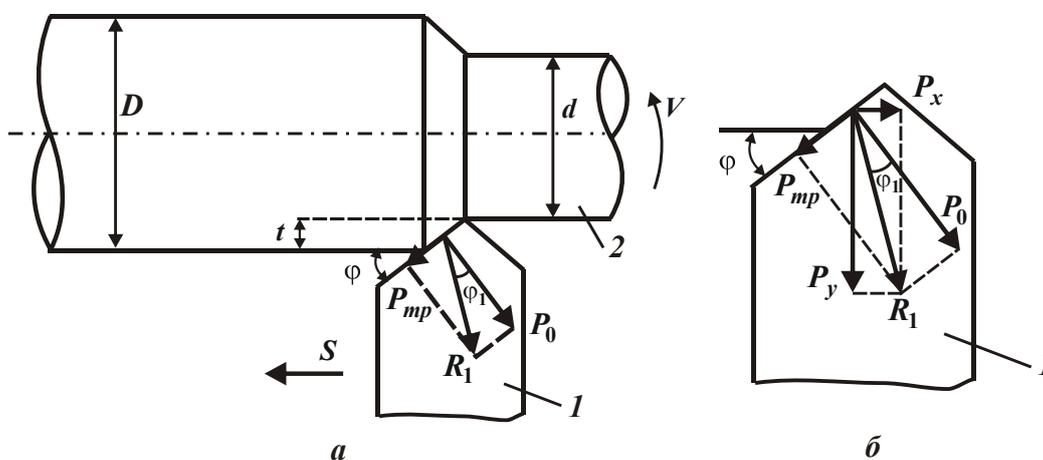


Рис. 1 – Расчетная схема параметров продольного точения (а) и схема расположения составляющих силы резания (б): 1 – резец; 2 – деталь

Исходя из этого, суммарную силу резания при продольном точении следует рассматривать функцией от трех составляющих:  $P_z$ ,  $P_{mp}$  и  $P_0 = P_z / K_{рез}$ , которые направлены вдоль трех взаимно перпендикулярных осей (рис. 1,а). Тогда радиальная  $P_y$  и осевая  $P_x$  составляющие силы резания, а также суммарная

составляющая силы резания  $R_1$  определяются зависимостями (рис. 1,б):

$$P_y = P_0 \cdot \cos \varphi + P_{mp} \cdot \sin \varphi; \quad P_x = P_0 \cdot \sin \varphi - P_{mp} \cdot \cos \varphi; \quad R_1 = \sqrt{P_0^2 + P_{mp}^2}, \quad \text{где}$$

$\varphi$  – главный угол резца в плане;  $K_{рез}$  – коэффициент резания.

Угол  $\varphi_1$  между силами  $R_1$  и  $P_0$  определяется из соотношения:  $\text{tg} \varphi_1 = P_{mp} / P_0 = f \cdot K_{рез}$ . Радиальная  $P_y$  и осевая  $P_x$  составляющие силы резания выражаются:  $P_y = R_1 \cdot \cos(\varphi - \varphi_1)$ ;  $P_x = R_1 \cdot \sin(\varphi - \varphi_1)$ .

Угол  $(\varphi - \varphi_1)$ , по сути, определяет угол схода стружки и может быть установлен из тригонометрического соотношения:  $P_x / P_y = \text{tg}(\varphi - \varphi_1)$ .

Как видно, уменьшить  $P_y$  и повысить точность обработки можно уменьшением силы  $R_1$  и угла  $\varphi_1$  за счет уменьшения силы трения  $P_{mp}$ . Полученная зависимость соответствует зависимости, полученной проф. Соколовским А.П. [5]:  $P_x / P_y = \text{tg}(\varphi \pm \eta_{xy})$ , где  $\eta_{xy}$  – угол, являющийся проекцией угла схода стружки на координатную плоскость XY. Для проверки теоретического решения использованы экспериментальные значения радиальной  $P_y$  и осевой  $P_x$  составляющих силы резания, установленные при продольном значении (рис. 2).

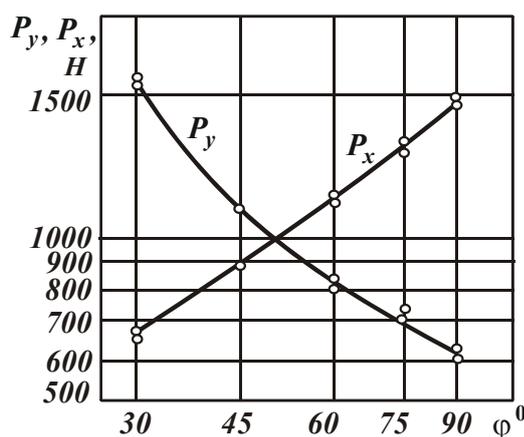


Рис. 2. Влияние угла  $\varphi$  на  $P_y$  и  $P_x$  при точении (сталь 40;  $t = 3$  мм;  $S = 0,6$  мм/об.)

Как следует из табл. 1, угол  $\varphi_1$  не равен нулю, поэтому угол  $(\varphi - \varphi_1)$  меньше главного угла резца в плане  $\varphi$ . Это указывает на присутствие силы

трения  $P_{mp}$  в процессе стружкообразования и свидетельствует о правильности расчета составляющих силы резания при продольном точении и достоверности зависимости  $P_x / P_y = tg(\varphi - \varphi_1)$ . Следовательно, в расчетах необходимо учитывать силу трения  $P_{mp}$ , действующую вдоль режущего лезвия резца.

Таблица 1 – Расчетные значения  $P_x / P_y = tg(\varphi - \varphi_1)$  и углов  $(\varphi - \varphi_1)$ ,  $\varphi_1$

$\varphi$ , град	30	45	60	75	90
$P_x / P_y$	0,44	0,8	1,32	1,88	2,35
$(\varphi - \varphi_1)$ , град	24	39	53	62	67
$\varphi_1$ , град	6	6	7	13	13

При развертывании отверстия, исходя из рис. 3 (с учетом угла наклона зубьев развертки  $\omega$  и тангенциальной  $P_{z0}$  составляющей силы резания при  $\omega=0$ ), составляющие силы резания, возникающей на зубе развертки, опишутся:

$$\begin{aligned}
 P_z &= P_{z0} \cdot \cos \omega + P_{mp} \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega - P_0 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \omega = \\
 &= P_{z0} \cdot \left[ \cos \omega + \left( f \cdot \cos \varphi - \frac{\sin \varphi}{K_{рез}} \right) \cdot \sin \omega \right]; \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$P_y = P_0 \cdot \cos \varphi + P_{mp} \cdot \sin \varphi = P_{z0} \cdot \left( \frac{\cos \varphi}{K_{рез}} + f \cdot \sin \varphi \right); \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 P_x &= P_{z0} \cdot \sin \omega - P_{mp} \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + P_0 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \omega = \\
 &= P_{z0} \cdot \left[ \sin \omega + \left( \frac{\sin \varphi}{K_{рез}} - f \cdot \cos \varphi \right) \cdot \sin \omega \right]. \quad (3)
 \end{aligned}$$

С учетом участия в резании  $n$  зубьев развертки и соотношений  $P_{z0} = \sigma \cdot S \cdot t = \sigma_{сж} \cdot S \cdot t \cdot \frac{(K_L - \sin \gamma_1)}{\cos \gamma_1}$  [6] ( $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $S$  – подача, м/об.;  $t$  – глубина резания, м;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>;  $K_L$  – коэффициент усадки стружки;  $n_1$  – условное количество зубьев развертки, которые непосредственно участву-

ют в формировании радиальной  $P_y$  составляющей силы резания, устанавливается расчетно-экспериментальным путем;  $\Delta t = t_1 - t_2$ ;  $t_1, t_2$  – максимальное и минимальное значения глубины резания, м), зависимости (1)–(3) примут вид:

$$P_z = n \cdot \sigma_{сж} \cdot S \cdot t \cdot \frac{(K_L - \sin \gamma_1)}{\cos \gamma_1} \cdot \left[ \cos \omega + \left( f \cdot \cos \varphi - \frac{\sin \varphi}{K_{рез}} \right) \cdot \sin \omega \right]; \quad (4)$$

$$P_y = n_1 \cdot \sigma_{сж} \cdot S \cdot \Delta t \cdot \frac{(K_L - \sin \gamma_1)}{\cos \gamma_1} \cdot \left( \frac{\cos \varphi}{K_{рез}} + f \cdot \sin \varphi \right); \quad (5)$$

$$P_x = n \cdot \sigma_{сж} \cdot S \cdot t \cdot \frac{(K_L - \sin \gamma_1)}{\cos \gamma_1} \cdot \left[ \sin \omega + \left( \frac{\sin \varphi}{K_{рез}} - f \cdot \cos \varphi \right) \cdot \sin \omega \right]. \quad (6)$$

Фактический передний угол зуба развертки  $\gamma_1$  определяется:  $\cos \gamma_1 = \cos \gamma \cdot \cos \omega_1$ , где  $\gamma$  – номинальный передний угол зуба развертки;  $\omega_1$  – угол, определяемый зависимостью [2]:  $P_x = (0,2 \dots 0,4) \cdot P_z \cdot \operatorname{tg} \omega$ .

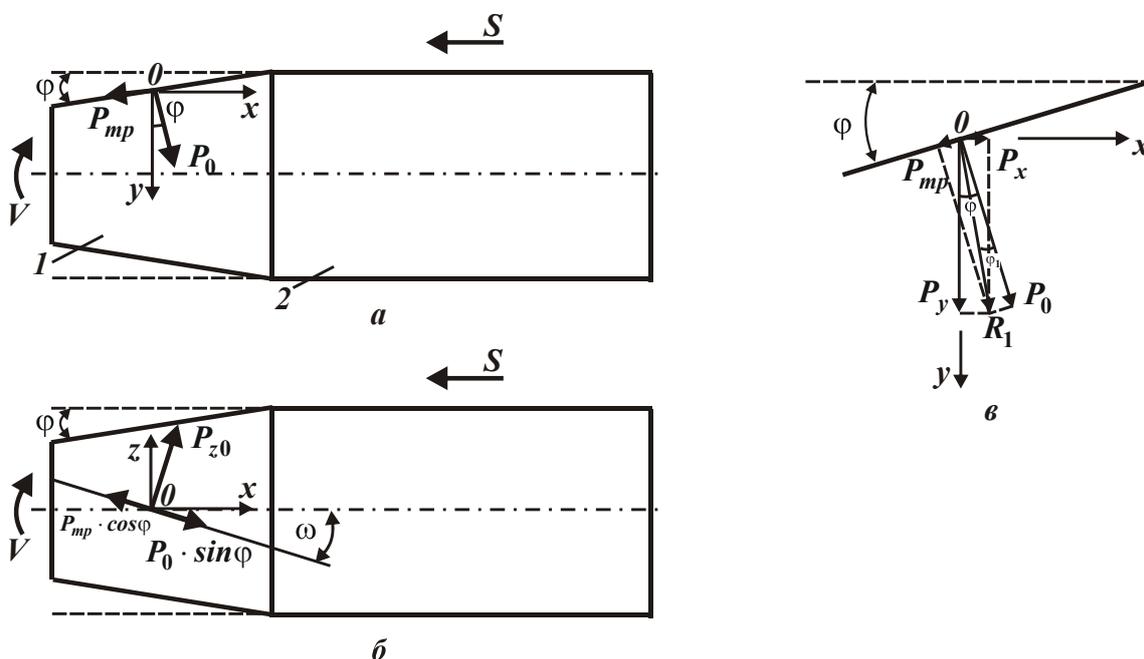


Рис. 3 – Проекция составляющих силы резания при развертывании отверстия в плоскостях  $xoy$  (а, в) и  $xoz$  (б): 1 – заборная часть развертки; 2 – калибрующая часть развертки

Коэффициент резания  $K_{рез}$  устанавливается из уравнения:

$$\frac{(K_L - \sin \gamma_1)}{\cos \gamma_1} = \frac{1}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right). \quad (7)$$

Из зависимости (4) следует, что с увеличением угла  $\omega$  тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  уменьшается (т.к. второе слагаемое зависимости меньше первого слагаемого), радиальная составляющая силы резания  $P_y$  остается неизменной, а осевая составляющая силы резания  $P_x$  увеличивается. Изменение радиальной составляющей силы резания  $P_y$  будет обусловлено изменением величин  $P_{z0}$  и  $K_{рез}$  в зависимости от угла  $\omega$ .

**Результаты исследований.** Используя зависимости (4) – (6), в табл. 2 приведены расчетные значения параметров  $\omega_1$ ,  $\gamma_1$ ,  $\sigma / \sigma_{сж}$ ,  $K_{рез}$ ,  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$ ,  $P_z / P_x$ . Как видно, с увеличением  $\omega$  составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$  уменьшаются, а  $P_x$  увеличивается, что способствует повышению точности обработки. Установлено, что при угле  $\omega = 45^0$  отличие расчетных и экспериментальных значений  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  не превышает 10 %.

Таблица 2 – Расчетные значения  $\omega_1$ ,  $\gamma_1$ ,  $\sigma / \sigma_{сж}$ ,  $K_{рез}$ ,  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$ ,  $P_z / P_x$

$\omega$ , град.	0	11	30	45
$K_L$	4,2	3,1	2,3	2,1
$\omega_1$ , град.	0	4	13	22
$\gamma_1$ , град.	5	6	13	22
$\sigma / \sigma_{сж}$	4,2	3,037	2,13	1,86
$K_{рез}$	0,5	0,74	1,2	1,5
$P_z$ , Н	402,7	288,4	192,8	150,3
$P_y$ , Н	268,4	135,6	60,4	38,2
$P_x$ , Н	44	44,1	75	102,2
$P_z / P_x$	9,15	6,54	2,57	1,47

На рис. 4 приведены расчетные и экспериментальные значения отношения  $P_z / P_x$ . Как видно, с увеличением угла наклона зубьев развертки  $\omega$  отношение  $P_z / P_x$  непрерывно уменьшается, приближаясь к единичному значению.

При этом расхождение расчетных и экспериментальных значений отношения  $P_z / P_x$  для условий  $\omega = 0$  и  $\omega = 45^\circ$  незначительно и составляет не более 10 %. Это свидетельствует о правильности выполненных расчетов  $P_z$  и  $P_x$ .

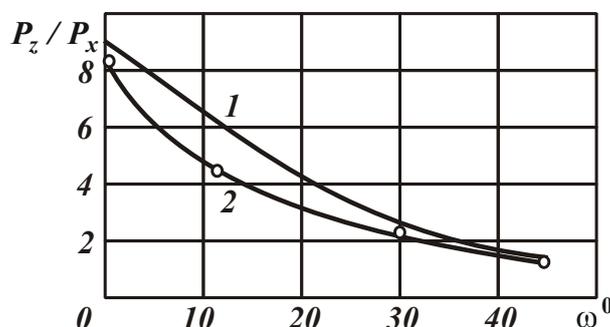


Рис. 4 – Расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости отношения  $P_z / P_x$  от  $\omega$

**Выводы.** В работе предложена математическая модель определения составляющих силы резания при развертывании отверстий с позиции косоугольного резания, что позволило обеспечить высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных. Теоретически и экспериментально обоснована возможность существенного снижения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания за счет создания наклонных зубьев на развертке, что способствует повышению точности обработки отверстий.

**Список литературы:** 1. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1970. – 390 с. 2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. 3. Колев К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев, Л.М. Горчаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с. 4. Технологія машино- та приладобудування: підручник / О.В. Якимов, В.І. Марчук, П.А. Лінчевський та ін. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛДТУ, 2005. – 712 с. 5. Соколовский А.П. Расчеты точности обработки на металлорежущих станках / А.П. Соколовский. – М.–Л.: Машгиз, 1952. – 286 с. 6. Новиков Ф.В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф.В. Новиков, І.О. Рябенков. – Х.: Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Matalin A.A. Tochnost mekhanicheskoy obrabotki i proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov / A.A. Matalin. – M.: Mashinostroenie, 1970. – 390 s. 2. Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov / V.F. Bobrov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 343 s. 3. Kolev K.S. Tochnost obrabotki i rezhimy rezaniya / K.S. Kolev, L.M. Gorchakov. – M.: Mashinostroenie, 1976. – 144 s. 4. Tekhnologiiia mashino- ta priladobuduvannya: pidruchnik / O.V. Yakimov, V.I. Marchuk, P.A. Linchevskii ta in. – Lutsk: Red.-vyd. viddil LDTU, 2005. – 712 s. 5. Sokolovskiy A.P. Raschety tochnosti obrabotki na metallorzhushikh stankakh / A.P. Sokolovskiy. – M.–L.: Mashgiz, 1952. – 286 s. 6. Novikov F.V. Teoretichni osnovy mekhanichnoi obrobki vysokotochnykh detalei: monografiia / F.V. Novikov, I.O. Riabenkov. – Kh.: Vyd. KNEU, 2013. – 352 s.

