

№19. **7.** Пат. 72820 Україна, МПК В23D19/00. Спосіб розташування дискових ножиць в потоці прокатного стану / *Боровік П. В., Селезньов М. Є.*; заявник і патентовласник Донбаський гірничо-металургійний інститут. – №201202702; заявл. 06.03.12; опубл. 27.08.12, Бюл. №16. **8.** *Liu G. R. The Finite Element Method: A Practical Course / G. R. Liu, S. S. Quek.* – 2003. – 348 с. **9.** *Боровік П. В.* Математическое моделирование процесса резки толстолистовых раскатов в горячем состоянии на дисковых ножницах / *П. В. Боровік // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, – 2013. – №1(14). – С. 69–76.*

Bibliography (transliterated): **1.** *Konovalov Ju. V. Spravochnik prokatchika. Spravochnoe posobie v 2-h t. Ju. V. Konovalov.* – Moscow. : Teplotehnik, 2008. – Kniga 1: Proizvodstvo gorjachekatannyh listov i polos. – 2008. – 640 P. **2.** *Ginzburg V. B. Flat-rolled steel processes: Advanced Technologies V. B. Ginzburg.* – CRC Press, 2009. – 372 p. **3.** *Lukashin N. D. Konstrukcija i raschet mashin i agregatov metallurgicheskikh zavodov: uchebnyk dlja vuzov N. D. Lukashin, L. S. Kohan, A. M. Jakushev* – Moscow: ІКС «Akademkniga», 2003. – 456 P. **4.** *Borovik P. V. Sovershenstvovanie tehnologii i oborudovanija processa prodol'noj rezki tolstyh gorjachekatannyh listov na diskovyh nozhnicah : diP. na soiskanie uchen. stepeni kand. tehn. nauk, spec. 05.03.05 Borovik Pavel Vladimirovich.* – Kramatorsk, 2008. – 225 P. **5.** Пат. 25865 Україна, МПК В23D1900. Nozhyci diskovi z podaval'nymy rolykami *Grycenko S. A., Kalashnikov A. A., Bagnov V. P. ta in.*; заявник і патентовласник ЗАТ «Novokramators'kyj mashynobudivnyj zavod». – №200703913; заявл. 10.04.07; опубл. 27.08.08, Вжл. №13. **6.** Пат. 63571 Україна, МПК В23D1900. Diskovi nozhyci *Borovik P. V., Selez'ov M. Je.*; заявник і патентовласник Donbas'kyj girnycho-metalurgijnyj instytut. – №201103732; заявл. 28.03.11; опубл. 10.10.11, Вжл. №19. **7.** Пат. 72820 Україна, МПК В23D1900. Sposib roztashuvannja diskovyh nozhyc' v potoci prokatnogo stanu *Borovik P. V., Selez'ov M. Je.*; заявник і патентовласник Donbas'kyj girnycho-metalurgijnyj instytut. – №201202702; заявл. 06.03.12; опубл. 27.08.12, Вжл. №16. **8.** *Liu G. R. The Finite Element Method: A Practical Course G. R. Liu, P. P. Quek.* – 2003. – 348 P. **9.** *Borovik P. V. Matematicheskoe modelirovanie processa rezki tolstolistovyh raskatov v gorjachem sostojanii na diskovyh nozhnicah P. V. Borovik Resursozberigajuchi tehnologii' vyrobnyctva ta obrobky tyskom materialiv u mashynobuduvanni: Zb. nauk. pr. – Lugansk: Vyd-vo SNU im. V. Dalja, – 2013, – №1(14). – P. 69–76.*

Поступила (received) 25.10.2014

УДК 621.923

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 аналитического 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 образующейся стружки вдоль режущего лезвия инструмента и образующейся при этом дополнительной силы трения, которая применительно к процессу продольного точения (рис. 1, а) имеет вид: $P_{тр} = P_z \cdot f$, где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; f – коэффициент трения обрабатываемого и инструментального материалов.

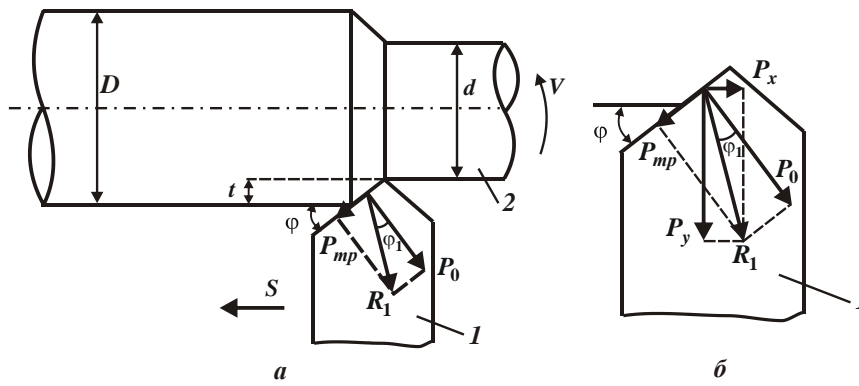


Рис. 1 – Процесс развёртывания отверстий: а – расчетная схема параметров продольного точения и б – схема расположения составляющих силы резания: 1 – резец; 2 – деталь

Исходя из этого, суммарную силу резания при продольном точении следует рассматривать функцией от трех составляющих: P_z , $P_{тр}$ 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): $P_y = P_0 \cdot \cos \varphi + P_{тр} \cdot \sin \varphi$; $P_x = P_0 \cdot \sin \varphi - P_{тр} \cdot \cos \varphi$; $R_1 = \sqrt{P_0^2 + P_{тр}^2}$, где φ – главный угол резца в плане; $K_{рез}$ – коэффициент резания.

Угол φ_1 между силами R_1 и P_0 определяется из соотношения: $\operatorname{tg} \varphi_1 = P_{тр} / P_0 = f \cdot K_{рез}$. 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: $P_x / P_y = \operatorname{tg}(\varphi - \varphi_1)$.

Как видно, уменьшить P_y и повысить точность обработки можно уменьшением силы R_1 и угла φ_1 за счет уменьшения силы трения $P_{тр}$. Полученная зависимость соответствует зависимости, полученной проф. Соколовским А.П. [5]: $P_x / P_y = \operatorname{tg}(\varphi \pm \eta_{xy})$, где η_{xy} – угол, являющийся проекцией угла схода стружки на координатную плоскость ХУ. Для проверки теоретического решения использованы экспериментальные значения радиальной P_y и осевой P_x составляющих силы резания, установленные при продольном значении (рис. 2).

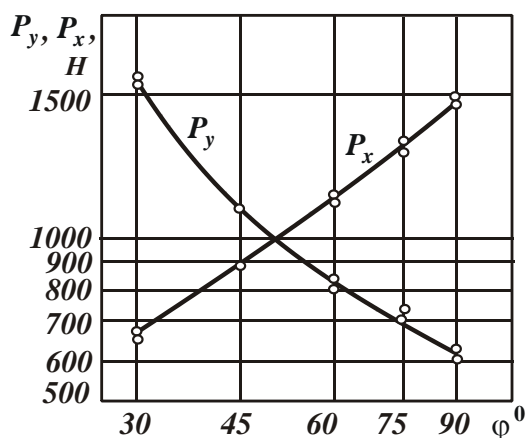


Рис. 2 – Влияние угла φ на P_y и P_x при точении (сталь 40; $t = 3$ мм; $S = 0,6$ мм/об.)

Как следует из табл. 1, угол φ_1 не равен нулю, поэтому угол $(\varphi - \varphi_1)$ меньше главного угла резца в плане φ . Это указывает на присутствие силы трения $P_{тр}$ в процессе стружкообразования и свидетельствует о правильности расчета составляющих силы резания при продольном точении и достоверности зависимости $P_x / P_y = \text{tg}(\varphi - \varphi_1)$. Следовательно, в расчетах необходимо учитывать силу трения $P_{тр}$, действующую вдоль режущего лезвия резца.

Таблица 1 – Расчетные значения $P_x / P_y = \text{tg}(\varphi - \varphi_1)$ и углов $(\varphi - \varphi_1)$, φ_1

φ , 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
φ_1 , град	6	6	7	13	13

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

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

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

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

С учетом участия в резании n зубьев развертки и соотношений $P_{z0} = \sigma \cdot S \cdot t = \sigma_{\text{сж}} \cdot S \cdot t \cdot \frac{(K_L - \sin \gamma_1)}{\cos \gamma_1}$ [6] (σ – условное напряжение резания, Н/м²; S – подача, м/об.; t – глубина резания, м; $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; K_L – коэффициент усадки стружки; n_1 – условное количество зубьев развертки, которые непосредственно участвуют 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:

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

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

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

Фактический передний угол зуба развертки γ_1 определяется: $\cos \gamma_1 = \cos \gamma \cdot \cos \omega_1$, где γ – номинальный передний угол зуба развертки; ω_1 – угол, определяемый зависимостью [2]: $P_x = (0,2 \dots 0,4) \cdot P_z \cdot \text{tg} \omega$.

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

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

Из зависимости (4) следует, что с увеличением угла ω 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 ω .

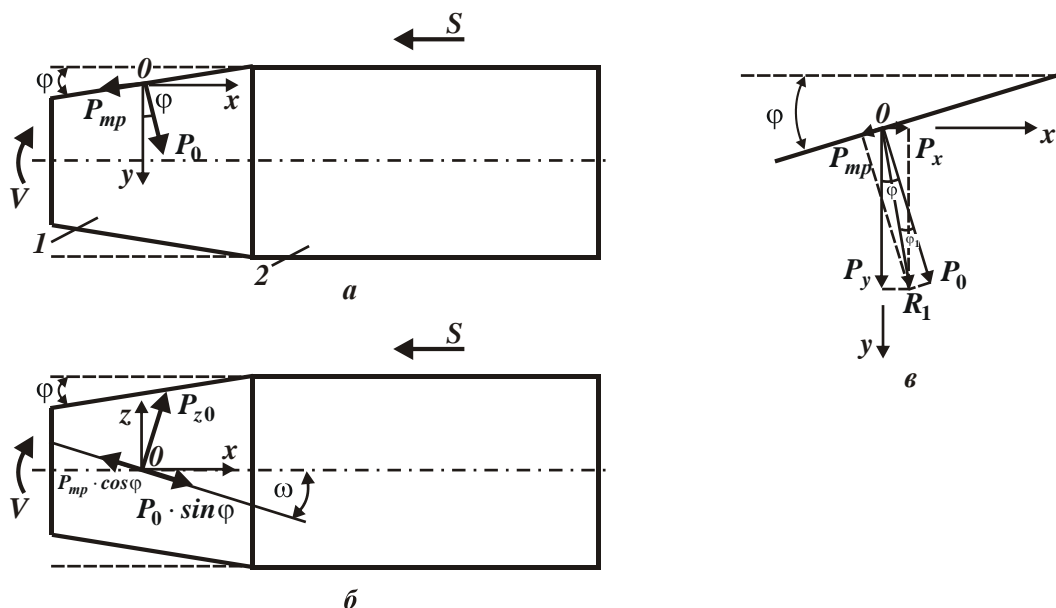


Рис. 3 – Проекция составляющих силы резания при разворачивании отверстия:
 а, в – в плоскостях uox и zox : 1 – заборная часть развертки; 2 – калибрующая часть развертки

Результаты исследований. Используя зависимости (4) – (6), в табл. 2 приведены расчетные значения параметров ω_1 , γ_1 , $\sigma/\sigma_{сж}$, $K_{рез}$, P_z , P_y , P_x , P_z/P_x . Как видно, с увеличением ω составляющие силы резания P_z и P_y уменьшаются, а P_x увеличивается, что способствует повышению точности обработки. Установлено, что при угле $\omega = 45^\circ$ отличие расчетных и экспериментальных значений P_z , P_y , P_x не превышает 10 %.

Таблица 2 – Расчетные значения ω_1 , γ_1 , $\sigma/\sigma_{сж}$, $K_{рез}$, P_z , P_y , P_x , P_z/P_x

ω , град.	0	11	30	45
K_L	4,2	3,1	2,3	2,1
ω_1 , град.	0	4	13	22
γ_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 приведенные расчетные и экспериментальные значения отношения P_z/P_x . Как видно, с увеличением угла наклона зубьев развертки ω 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 .

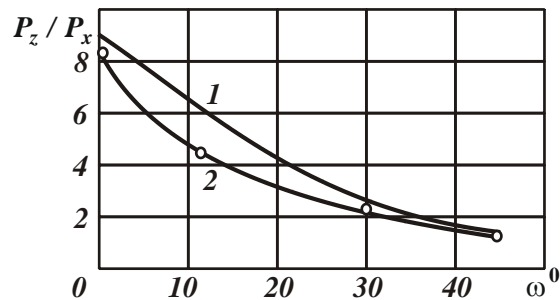


Рис. 4 – Зависимости отношения P_z/P_x от ω : 1 – расчетная и 2 – экспериментальная

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. Новіков Ф.В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф.В. Новіков, 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. – Moscow: Mashinostroenie, 1970. – 390 p. 2. Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov V.F. Bobrov. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 343 p. 3. Kolev K.S. Tochnost obrabotki i rezhimy rezaniya K.S. Kolev, L.M. Gorchakov. – Moscow: Mashinostroenie, 1976. – 144 p. 4. Tekhnologiya mashino– ta priladobuduvannya: pidruchnik O.V. Yakimov, V.I. Marchuk, P.A. Linchevskii ta in. – Lutsk: Red.-vyd. viddil LDTU, 2005. – 712 p. 5. Sokolovskiy A.P. Raschety tochnosti obrabotki na metallorazhushikh stankakh A.P. Sokolovskiy. – Moscow–Leningrds: Mashgiz, 1952. – 286 p. 6. Novikov F.V. Teoretichni osnovy mekhanichnoi obrobki vysokotochnykh detalei: monografiia F.V. Novikov, I.O. Riabenkov. – Khsrkov: Vyd. KNEU, 2013. – 352 p.

Поступила (received) 23.10.2014р.