

УДК 621.923

**Ф. В. НОВИКОВ, Р. М. МИНЧЕВ****ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЯ**

Обоснованы условия уменьшения шероховатости поверхности обрабатываемого отверстия за счет применения схемы внутреннего шлифования с расположением оси вращения круга перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия. Раскрыты закономерности образования погрешностей обработки отверстий при внутреннем шлифовании и хонинговании. Обоснована возможность повышения точности обработки за счет создания упругой системы в конструкции хона, а также показана эффективность применения гибкого круга при внутреннем шлифовании.

**Ключевые слова:** обрабатываемое отверстие, абразивная обработка, внутреннее шлифование, хонингование, хон, режимы шлифования, погрешности обработки, шероховатость поверхности.

**Введение.** Финишная обработка отверстий требует обеспечения параметров точности и шероховатости обработанных поверхностей на основе применения различных методов абразивной обработки, включая внутреннее шлифование, хонингование, обработку свободным абразивом. Однако эти методы достаточно трудоемки и не всегда обеспечивают выполнение требуемых условий обработки. Поэтому актуальной задачей является обоснование технологических возможностей обработки инструментами со связанным свободным абразивом и выбор наиболее эффективных направлений повышения точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей. Решение данной задачи имеет большое теоретическое и практическое значение, например для совершенствования технологии финишной абразивной обработки отверстий в гидро- и пневмоцилиндрах, где требуется обеспечить высокие показатели точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей.

**Анализ последних достижений и литературы.**

Вопросам высокоточной и высококачественной обработки отверстий в научно-технической литературе уделено большое внимание [1, 2], разработаны научные основы финишной абразивной обработки отверстий. Показано, что при обработке материалов с повышенными физико-механическими свойствами эффективно использовать алмазно-абразивные инструменты, обеспечивающие тончайшие срезы, наименьшую шероховатость поверхности, наименьшую силовую напряженность процесса резания, что приводит к повышению точности обработки [3]. В работе [4] получены аналитические зависимости для определения погрешностей лезвийной и абразивной обработки отверстий, что позволило выявить новые условия повышения точности обработки. Поэтому, используя их, можно решить ряд важных вопросов, связанных с выбором наиболее предпочтительных вариантов финишной абразивной обработки отверстий.

**Цель работы, постановка проблемы.** Целью работы является повышение показателей точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей отверстий на операциях внутреннего шлифования и хонингования за счет научно обоснованного выбора оптимальных условий обработки.

**Материалы исследований.** Наибольшее количество зерен, участвующих в процессе резания, имеет место при внутреннем шлифовании кругом с диаметром, равным диаметру обрабатываемого отверстия.

Поэтому и шероховатость поверхности будет наименьшей в этом случае. Однако это возможно при обработке точного отверстия. В противном случае, например при обработке отверстия со значительной нецилиндричностью, в начальный период произойдет деформация системы шлифовального круга, а затем при последующих выхаживающих проходах она будет восстанавливать свою прямолинейную форму. Это приведет к увеличению диаметра отверстия в поперечном сечении (где была наибольшая нецилиндричность) и образованию погрешности обработки отверстия в виде некруглости. Чтобы исключить это явление, необходимо обработку производить за несколько проходов кругами разного диаметра, увеличивая с каждым последующимходом диаметр круга. Однако реализовать на практике такую схему внутреннего шлифования довольно сложно и малоэффективно. Наиболее просто реализовать данную схему обработки можно при хонинговании, где имеется возможность непрерывного увеличения диаметра хона в процессе обработки с каждым егоходом за счет создания упругой системы в конструкции хона. Это позволит исключить образование погрешности обработки отверстия.

В работе [4] показано, что некруглость отверстия сложно устранить и в процессе рассверливания, используя лишь одно сверло. Необходимо с каждым последующимходом использовать сверла большего диаметра, что позволит в определенной степени устранить некруглость отверстия.

Применение обычной схемы внутреннего врезного или продольного шлифования, как показывает практика, также обеспечивает устранение погрешности обработки отверстия в виде некруглости и нецилиндричности. Однако, при этом существенно уменьшается длина дуги контакта круга с обрабатываемым отверстием и количество одновременно работающих зерен круга, что не позволяет добиться значительного уменьшения шероховатости поверхности. В связи с этим целесообразно использовать схему внутреннего шлифования, согласно которой ось вращения круга расположена перпендикулярно оси вращения обрабатываемой детали, а форма рабочей поверхности круга приобретает форму окружности обрабатываемого отверстия. В результате существенно увеличивается длина дуги контакта круга с обрабатываемым отверстием и соответственно количество од-

новременно работающих зерен круга, что является важным фактором уменьшения шероховатости поверхности. Используя данную схему внутреннего шлифования, кругом можно охватить до половины длины окружности обрабатываемого отверстия, что фактически реализует эффект шлифования кругом с диаметром, равным диаметру обрабатываемого отверстия. Отличие в количестве одновременно работающих зерен круга будет приблизительно в 2 раза, тогда как при обычном внутреннем шлифовании кругом с диаметром, например в 2 раза меньшим диаметра обрабатываемого отверстия, это отличие во много раз больше.

Для оценки влияния диаметра шлифовального круга на длину его контакта с обрабатываемым отверстием рассмотрена схема внутреннего шлифования (рис. 1), согласно которой длина дуги контакта круга с обрабатываемой поверхностью  $l$  равна  $AA'$  и определяется из условия пересечения двух окружностей радиусом  $(R_{\text{дем}} - t)$  и  $R_{\text{кр}}$ :

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = (R_{\text{дем}} - t)^2; \\ [x - (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}})]^2 + y^2 = R_{\text{кр}}^2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $R_{\text{дем}}$ ,  $R_{\text{кр}}$  – радиусы обрабатываемого отверстия и шлифовального круга, м;  
 $t$  – глубина шлифования, м.

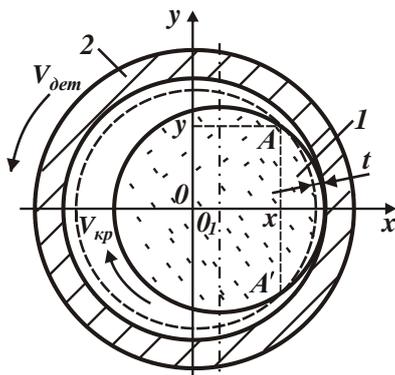


Рис. 1 – Расчетная схема параметров внутреннего шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь.

Для определения координаты  $x$  точки  $A$ , в которой происходит пересечение рассматриваемых окружностей, необходимо взять разность первого и второго уравнений системы уравнений (1). Тогда

$$x = \frac{[(R_{\text{дем}} - t)^2 - R_{\text{кр}}^2]}{2 \cdot (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}})} + \frac{1}{2} \cdot (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}}). \quad (2)$$

Координата  $y$  точки  $A$ , где пересекаются рассматриваемые окружности, с учетом системы уравнений (1) и зависимости (2) определяется:

$$y = \sqrt{R_{\text{кр}}^2 - \left[ \frac{(R_{\text{дем}} - t)^2 - R_{\text{кр}}^2}{2 \cdot (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}})} - \frac{1}{2} \cdot (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}}) \right]^2}. \quad (3)$$

Для удобства анализа зависимости (2) и (3) представим в виде:  $x = a + b$ ;  $y = \sqrt{R_{\text{кр}}^2 - (a - b)^2}$ , где  $a = \frac{[(R_{\text{дем}} - t)^2 - R_{\text{кр}}^2]}{2 \cdot (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}})}$ ;  $b = \frac{1}{2} \cdot (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}})$ . Тогда угол  $\psi$ , определяющий половину длины дуги контакта круга с обрабатываемой поверхностью, примет вид:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{y}{x} = \sqrt{\frac{R_{\text{кр}}^2}{(a + b)^2} - \frac{(a - b)^2}{(a + b)^2}}. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены результаты численных расчетов функции  $\operatorname{tg} \psi$ , угла  $2\psi$  в зависимости от радиуса круга  $R_{\text{кр}}$  для исходных данных:  $R_{\text{дем}} = 40$  мм и  $t = 0,01$  мм, а также расчетные значения длины дуги контакта круга с обрабатываемой поверхностью  $l = 2\pi \cdot R_{\text{дем}} \cdot \psi / 180^\circ$ .

Таблица 1 – Расчетные значения  $\operatorname{tg} \psi$ ,  $2\psi$  и  $l$

$R_{\text{кр}}$ , мм	20	30	36	39
$\operatorname{tg} \psi$	0,0223	0,0365	0,068	0,1309
$2\psi$ , град.	4	5	8	16
$l$ , мм	1,395	1,744	2,791	5,582

Как видно, с увеличением  $R_{\text{кр}}$  в пределах  $0,5R_{\text{дем}} \leq R_{\text{кр}} < R_{\text{дем}}$  угол  $2\psi$  и параметр  $l$  принимают значительно меньшие значения в сравнении с номинальными значениями  $360^\circ$  и  $2\pi \cdot R_{\text{дем}}$ . Поэтому в процессе внутреннего шлифования участвует весьма небольшое количество одновременно работающих зерен круга, что не позволяет добиться существенного уменьшения шероховатости поверхности, например, в сравнении с рассмотренной выше схемой внутреннего шлифования с осью вращения круга, расположенной перпендикулярно оси вращения детали.

При съеме неравномерных припусков в условиях внутреннего шлифования величина упругого перемещения  $y$  будет описываться такой же зависимостью, как и при растачивании отверстия [4]:

$$y = \frac{t_1}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{\text{pez}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)}, \quad (5)$$

а при хонинговании, вследствие того, что хон контактирует фактически со всей обрабатываемой поверхностью отверстия, такой же зависимостью, как и при рассверливании отверстия [4]:

$$y = \frac{\Delta}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{\text{pez}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)}, \quad (6)$$

где  $t_1$  – глубина резания при растачивании, м;

$\Delta$  – сдвиг оси сверла относительно оси исходного обрабатываемого отверстия, м;

$c$  – жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;

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

$\varphi$  – половина главного угла сверла в плане.

Сравнивая зависимости (5) и (6), видно, что при внутреннем шлифовании величина упругого перемещения  $y$  будет больше, чем при хонинговании, т.к. числитель зависимости (6) меньше, а знаменатель больше. Следовательно, эффект от применения хонингования с точки зрения уменьшения погрешности обработки выше, чем от применения внутреннего шлифования. Однако, данное условие может выполняться не всегда, все зависит от того, можно ли увеличить диаметр хона с его каждым последующим проходом. Так, при рассверливании для этого необходимо увеличивать диаметры сверл с каждым их последующим проходом, тогда как при растачивании такой же эффект обработки достигается одним резцом, реализуя поперечную подачу. Такая же закономерность наблюдается и при внутреннем шлифовании и хонинговании, рассматривая вместо растачивания процесс внутреннего шлифования, а вместо рассверливания – процесс хонингования.

Добиться одновременно существенного повышения точности и производительности обработки отверстия, можно, применяя схему выхаживания, которая наиболее эффективно может быть реализована при шлифовании. Исходя из аналитической зависимости [4]:

$$y_n = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n}, \quad (7)$$

с увеличением количества проходов шлифовального круга  $n$  величина упругого перемещения  $y_n$ , возникающего в технологической системе, непрерывно уменьшается, где  $n$  – количество проходов инструмента. Входящий в зависимость (7) угол  $\varphi$  применительно к процессу шлифования необходимо рассматривать как угол наклона рабочей поверхности круга к обрабатываемой поверхности (рис. 2). Очевидно, при обычном многопроходном круглом шлифовании угол  $\varphi \approx 0$  (рис. 2, а). При глубинном шлифовании угол  $\varphi$  определяет угол заборного конуса круга (рис. 2, б), который может изменяться в широких пределах. Необходимо отметить, что зависимость (7) справедлива для процесса шлифования абсолютно жестким кругом, например, абразивным или алмазным кругами на органических, керамических и металлических связках. При использовании на финишных операциях шлифовальных кругов на мягких связках (например, на вулканитовой связке), способных упруго деформироваться в процессе шлифования, расчетная зависимость (7) требует уточнения.

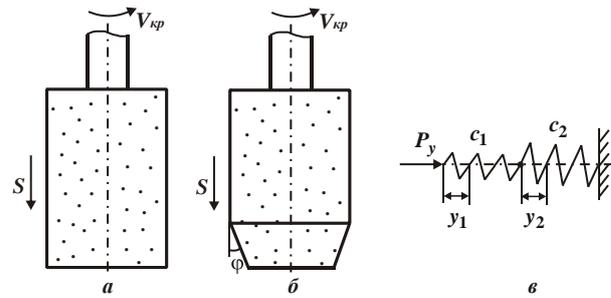


Рис. 2 – Расчетные схемы процесса внутреннего шлифования

В этом случае необходимо учитывать как изгибную жесткость шпинделя шлифовального станка, так и собственно контактную жесткость самого круга. Исходя из такого представления упругой системы станка, примем, что контактная жесткость круга равна  $c_1$ , а изгибная жесткость шпинделя станка равна  $c_2$ . На рис. 2, в круг и шпиндель станка представлены в виде пружин жесткостью соответственно  $c_1$  и  $c_2$ . Примем, что при шлифовании под действием радиальной составляющей силы резания  $P_y$  происходит сжатие пружины жесткостью  $c_1$  на величину  $y_1$  и сжатие пружины жесткостью  $c_2$  на величину  $y_2$ . Тогда

$$P_y = c_1 \cdot y_1 = c_2 \cdot y_2. \quad (8)$$

Величину  $y_2$  можно представить:  $y_2 = t_1 - y_1$ , где  $t_1$  – припуск при внутреннем шлифовании, м.

В случае несовпадения осей шпинделя станка и обрабатываемого отверстия параметр  $t_1$  определяет величину максимального снимаемого припуска. Тогда уравнение (8) примет вид:  $c_1 \cdot y_1 = c_2 \cdot (t_1 - y_1)$ . Откуда  $y_1 = t_1 / (1 + c_1 / c_2)$ . Как следует из этой зависимости, при условии  $c_1 \rightarrow \infty$  (т.е. при шлифовании абсолютно жестким кругом) величина  $y_1 = 0$ . При условии  $c_2 \rightarrow \infty$  (т.е. при существенном увеличении изгибной жесткости шпинделя станка) величина  $y_1 = t_1$ . В этом случае величина упругого перемещения в технологической системе будет определяться лишь сжатием пружины жесткостью  $c_1$ .

Разрешая зависимость  $y_2 = t_1 - y_1$  относительно величины  $y_1 = t_1 - y_2$  и подставляя ее в зависимость (8), получено:  $y_2 = t_1 / (1 + c_2 / c_1)$ . При контактной жесткости круга  $c_1$ , соизмеримой с изгибной жесткостью шпинделя станка  $c_2$ , величина упругого перемещения  $y_2$  становится меньше. Следовательно, будет меньше погрешность обработки отверстия, т.е. применение менее жестких кругов позволяет повысить точность обработки отверстия.

Приведенное решение указывает, что уменьшая жесткость  $c_1$ , можно добиться существенного уменьшения величины упругого перемещения  $y_2$ . Именно этим фактом можно объяснить эффектив-

ность применения процесса хонингования отверстия, основанного на создании упругой системы (жесткостью  $c_1$ ) сборного абразивного инструмента – хона. Очевидно, при съеме равномерного припуска (когда оси шпинделя станка и обрабатываемого отверстия совпадают) начальный натяг величиной  $t_1$  в технологической системе будет определяться лишь сжатием пружины жесткостью  $c_1$ . В этом случае жесткость пружины  $c_2$  условно равна бесконечности ( $c_2 \rightarrow \infty$ ). Исходя из этого, величина упругого перемещения  $y_n$  будет описываться зависимостью (7), рассматривая в ней вместо жесткости  $c_2$  жесткость  $c_1$  (для угла

$$\varphi = 0): y_n = \frac{t_1}{\left(1 + \frac{c_1 \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S}\right)^n}. \text{ Как видно, с увеличением}$$

жесткости  $c_1$  величина  $y_n$  с течением времени обработки (т.е. с увеличением количества проходов инструмента  $n$ ) будет уменьшаться интенсивнее, способствуя повышению производительности обработки.

При условии  $c_2 > c_1$  такая же закономерность будет и при хонинговании отверстия с неравномерно снимаемым припуском, т.е. когда оси шпинделя станка и обрабатываемого отверстия не совпадают. За счет создания упругой системы жесткостью  $c_1$  инструмента и возможности увеличения его диаметра в процессе обработки можно одновременно добиться требуемых значений величины  $y_n$  и диаметра обрабатываемого отверстия. Например, при рассверливании отверстия одновременно выполнить эти два условия невозможно, т.к. уменьшение величины  $y_n \rightarrow 0$  за счет увеличения количества проходов инструмента  $n$  ведет к увеличению разбивки отверстия, т.е. к увеличению его диаметра. При хонинговании за счет искусственного создания упругой системы инструмента жесткостью  $c_1$ , позволяющей увеличивать диаметр инструмента в процессе обработки, такая возможность существует. Для ее осуществления необходимо

выполнить условие  $c_2 > c_1$ , поскольку в противном случае продолжительность исправления погрешностей обрабатываемого отверстия, полученных на предыдущих операциях, увеличится.

**Выводы.** Обоснованы условия уменьшения шероховатости поверхности обрабатываемого отверстия за счет применения схемы внутреннего шлифования с расположением оси вращения круга перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия. Раскрыты закономерности образования погрешностей обработки отверстия при внутреннем шлифовании и хонинговании. Показаны значительные технологические возможности хонингования отверстия с точки зрения повышения точности обработки, достигаемые за счет создания упругой системы в конструкции абразивного инструмента – хона. Показана также эффективность применения гибкого шлифовального круга при внутреннем шлифовании.

**Список литературы:** 1. Технология машиностроения: учебник / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, П.А. Линчевский и др. – Одесса: ОНПУ, 2010. – 691 с. 2. Линчевский П.А. Обработка деталей на отделочнорасточных станках / П.А. Линчевский, Т.Г. Джугурян, А.А. Оргиян. – К.: Техника, 2001. – 300 с. 3. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий и др. – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с. 4. 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. – Маріуполь: ПДТУ, 2014. – Вип. 28. – С. 167-173.

**Bibliography (transliterated):** 1. Tekhnologiya mashinostroeniya: uchebnik / A.V. Yakimov, F.V. Novikov, P.A. Linchevskiy i dr. – Odessa: ONPU, 2010. – 691 p. 2. Linchevskiy P.A. Obrabotka detaley na otdelochno-rastochnykh stankakh / P.A. Linchevskiy, T.G. Dzjuguryan, A.A. Orgyan. – Kiev: Tekhnika, 2001. – 300 p. 3. Kachestvo poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke / E.V. Ryzhov, A.A. Sagarda, V.B. Ilyitskiy i dr. – Kiev: Nauk. dumka, 1979. – 244 p. 4. Brizhan T.M. Matematicheskaya model opredeleniya zakonornostey formirovaniya pogreshnostey mekhanicheskoy obrabotki otverstiy / T. M. Brizhan // Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnithnogo universitetu: zb. nauk. pratP. Seriya: Tekhnithni nauky. – Mariupol: PDTU, 2014. – Vol. 28. – PP. 167-173.

Поступила (received) 11.11.2015

**Новиков Федор Васильевич** – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеца, и.о. заведующего кафедрой “Естественные науки и технологии”; тел.: (067) 6890342; e-mail: [fokusnic1@rambler.ru](mailto:fokusnic1@rambler.ru)

**Novikov Fedor Vasilyovith** – Doktor of Technical Sciences (Ph. D.), Full Professor, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеца, и.о. заведующего кафедрой “Естественные науки и технологии”; тел.: (067) 6890342; e-mail: [fokusnic1@rambler.ru](mailto:fokusnic1@rambler.ru)

**Минчев Роман Александрович** – ООО “Энергореле” (г. Мариуполь), инженер; тел. (067) 3905657; e-mail: [tmbrizhan@ukr.net](mailto:tmbrizhan@ukr.net)

**Minthev Roman Aleksandrovith** – Ltd. "Energorеле" (Mariupol), engineer; тел. (067) 3905657; e-mail: [tmbrizhan@ukr.net](mailto:tmbrizhan@ukr.net)