

Новиков Ф.В., Брижан Т.М.

Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця;  
ГВУЗ “Приазовский государственный технический университет”, г. Мариуполь**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ****Введение**

Эффективность применения шлифования при обработке отверстий в деталях гидравлической аппаратуры (взамен трудоемких операций доводки свободным абразивом) можно существенно повысить за счет уменьшения шероховатости поверхности путем уменьшения разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности круга [1-3]. Однако аналитических решений, позволяющих обосновать закономерности формирования шероховатости поверхности в этих условиях, в научно-технической литературе фактически нет. Поэтому задачу выбора оптимальных условий обработки и характеристик абразивных кругов по критерию наименьшей шероховатости поверхности на основе снижения разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности круга следует рассматривать актуальной применительно к операциям шлифования отверстий в высокоточных деталях гидравлической аппаратуры.

**Основная часть**

Для решения поставленной задачи необходимо сравнить шероховатость поверхности, которая образуется при внутреннем шлифовании кругами с разновысотным и одновысотным расположением зерен на рабочей поверхности. Одновысотное расположение зерен соответствует случаю обработки отверстия свободным абразивом, что позволит сравнить шероховатость поверхности, достигаемую при внутреннем шлифовании и доводке свободным абразивом. Для достижения поставленной цели следует воспользоваться зависимостью, определяющей параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$  при внутреннем шлифовании (рис. 1) [4]:

$$R_{max} = H_{max} \cdot \sqrt[5]{\frac{H_{max}}{4 \cdot t}}; \quad (1)$$

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{6,75 \cdot b \cdot V'_{дем}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}}, \quad (2)$$

где  $H_{max}$  – максимальная (вероятностная) толщина среза, м;  $V'_{дем} = V_{дем} \cdot \cos \alpha = \sqrt{2 \cdot t \cdot \left( \frac{1}{R_{кр}} - \frac{1}{R_{дем}} \right)}$  – нормальная составляющая вектора скорости детали по нормали к рабочей поверхности круга, м/с;  $V_{дем}$ ,  $V_{кр}$  – скорости детали и круга, м/с;  $\alpha$  – угол между векторами скоростей  $V_{дем}$  и  $V'_{дем}$ ;  $t$  – глубина шлифования, м;  $b$  – максимальная высота выступания режущих зерен над уровнем связи круга, м;  $2\gamma$  – угол при вершине конусообразной части режущего зерна;  $k$  – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности круга, шт./м<sup>2</sup>;  $R_{дем}$ ,  $R_{кр}$  – радиусы детали и круга, м ( $R_{дем} > R_{кр}$ ).

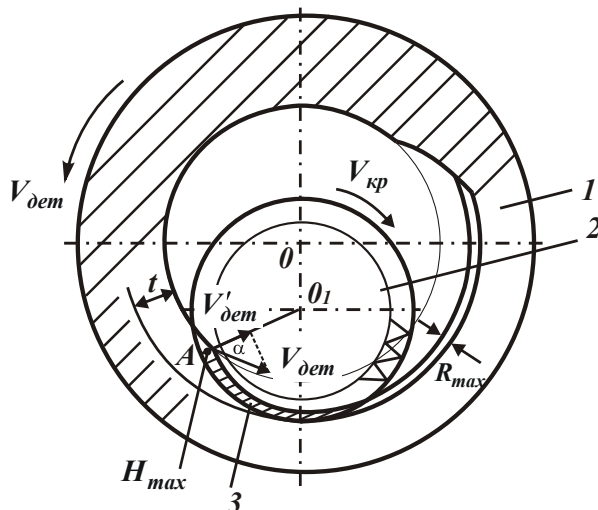


Рис. 1 – Расчетная схема параметра шероховатости  $R_{max}$  при внутреннем шлифовании:

1 – деталь; 2 – круг; 3 – форма среза отдельным зерном круга

Параметры  $b$  и  $k$  для алмазного круга определяются зависимостями [5]:

$$b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}; \quad (3)$$

$$k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}, \quad (4)$$

где  $m$  – объемная концентрация зерен круга (для 100%-й концентрации алмазного круга –  $m=100$ );  $\bar{X}$  – зернистость круга, м;  $(1 - \varepsilon)$  – безразмерная величина, определяющая степень выступания режущих зерен над уровнем связки круга, изменяется в пределах 0...0,5.

Подставляя зависимости (2), (3) и (4) в (1), получено [103]:

$$R_{max} = 10 \cdot \bar{X} \cdot \sqrt[5]{\frac{\pi^2 \cdot \bar{X} \cdot V_{dem}^2}{tg^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{kp}^2} \cdot \left( \frac{1}{R_{kp}} - \frac{1}{R_{dem}} \right)}. \quad (5)$$

Из зависимости (5) вытекает, что наибольшее влияние на параметр  $R_{max}$  оказывает зернистость круга  $\bar{X}$ . Поэтому добиться уменьшения параметра  $R_{max}$  можно, прежде всего, за счет уменьшения зернистости круга  $\bar{X}$ . Уменьшить  $R_{max}$  можно также увеличением  $m$ ,  $V_{kp}$  и уменьшением  $V_{dem}$ .

Зависимость (1) получена с учетом вероятностного участия зерен в резании и разновысотного расположения их на рабочей поверхности круга. Очевидно, при этом в резании будут участвовать лишь наиболее выступающие над уровнем связки зерна. Их количество относительно небольшое. Поэтому и шероховатость обработанной поверхности при внутреннем шлифовании принимает, как правило, достаточно большие значения. Следовательно, уменьшение разновысотности расположения вершин зерен над уровнем связки круга и соответственно увеличение количества одновременно работающих зерен является важным фактором уменьшения шероховатости поверхности. Добиться увеличения количества одновременно работающих зерен в процессе внутреннего шлифования можно, исходя из зависимости (4), увеличением их объемной концентрации в круге  $m$  и уменьшением зернистости круга  $\bar{X}$ . Можно также использовать относительно мягкие связки круга, обеспечивающие “утопание” в них наиболее выступающих зерен под действием возникающих при внутреннем шлифовании нагрузок [6]. Такой же эффект обработки можно достичь за счет применения зерен небольшой прочности, для которых характерно увеличение размерного износа. В результате фактически все зерна, выступающие над уровнем связки круга, могут принимать участие в процессе резания, что приведет к уменьшению шероховатости поверхности. Чтобы количественно оценить влияние “утопания” зерен в связку круга и их размерного износа на шероховатость поверхности, следует провести анализ вероятностной функции  $\Phi(y)$ , описывающей вероятность неуглубленного металла с поверхности обрабатываемого образца при абразивной обработке [7].

В случае абразивной обработки (доводки абразивными зёрнами одинакового размера без учета радиальной подачи, т.е. при условии  $V'_{dem}=0$ , рис. 2, а,б) обрабатываемого образца вероятностная функция  $\Phi(y)$  принимает вид:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot tg \gamma \cdot n \cdot y}{B}}, \quad (6)$$

где  $n$  – количество абразивных зерен, участвующих в процессе резания;  $B$  – ширина обрабатываемого отверстия, м;  $y$  – координата, отсчитываемая от вершины зерна, м.

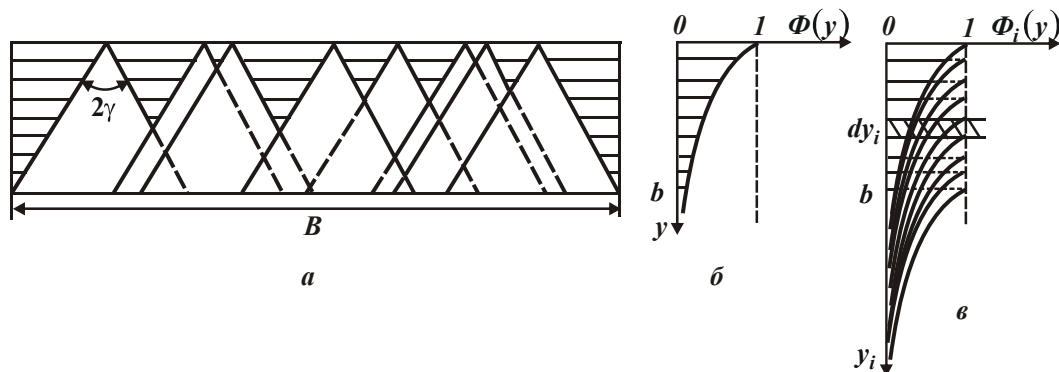


Рис. 2 – Расчетная схема вероятностной функции  $\Phi(y)$

В случае  $V'_{dem} > 0$  (рис. 1) функцию  $\Phi(y)$  необходимо рассматривать результатом вероятностного суммирования элементарных функций  $\Phi_i(y)$ , описываемых зависимостью (6), от работы зерен, вершины которых расположены в бесконечно малом интервале  $dy_i$  на удалении  $y_i$  от начала координаты  $y$  (рис. 2,в). Принимая условие, что количество вершин зерен  $dn_i$ , попавших в интервал  $dy_i$ , равно  $dn_i = n \cdot f(y_i) \cdot dy_i$ , а  $f(y_i) = 1/b$ , после вероятностного суммирования элементарных функций  $\Phi_i(y)$  от 0 до  $y$ , получено:

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^n \Phi_i(y) = e^{-\int_0^y \frac{2tg\gamma \cdot (y-y_i) \cdot dn}{B}} = e^{-\int_0^y \frac{2tg\gamma \cdot n \cdot (y-y_i) \cdot dy_i}{B \cdot b}} = e^{-\frac{tg\gamma \cdot n}{B \cdot b} \cdot y^2}, \quad (7)$$

где  $f(y_i)$  – условная плотность распределения по координате  $y$  вершин зерен, оставивших свои проекции на движущейся вглубь рабочей поверхности круга плоскости  $O_1A$  (рис. 1).

Функция  $\Phi(y)$ , описываемая зависимостью (7), определяет вероятность неударенного материала зернами, которые имеют одинаковую высоту выступания над уровнем связки круга. Поскольку “утопание” зерен в связку круга приводит к фактически одинаковой высоте их выступания над уровнем связки, то можно полагать, что зависимость (7) описывает именно данный случай шлифования. Параметр  $H_{max}$  (рис. 1), принимая  $b = b_1$ , определяется из условия:

$$y = H_{max} = \sqrt{\frac{-\ln \Phi(y = H_{max}) \cdot B \cdot b_1}{tg\gamma \cdot n}}. \quad (8)$$

Для случая  $\Phi(y = H_{max}) = 0,895$  с учетом  $-\ln \Phi(y = H_{max}) = 2,25$ , получено:

$$H_{max} = \sqrt{\frac{2,25 \cdot B \cdot b_1}{tg\gamma \cdot n}}. \quad (9)$$

Как видно, параметр  $H_{max}$  тем меньше, чем меньше  $b_1$  и больше  $n$ .

С учетом разновысотного расположения вершин зерен над уровнем связки круга функцию  $\Phi(y)$  необходимо рассматривать результатом вероятностного суммирования элементарных функций  $\Phi_i(y)$ , описываемых зависимостью (7), от работы зерен, вершины которых расположены в бесконечно малом интервале  $dy_i$  на удалении  $y_i$  от начала координаты  $y$ . Принимая условие, при котором количество вершин зерен  $dn_i$ , попавших в интервал  $dy_i$ , равно  $dn_i = n \cdot f(y_i) \cdot dy_i$ , а  $f(y_i) = 1/b$ , в результате вероятностного суммирования элементарных функций  $\Phi_i(y)$  в пределах от 0 до  $y$  функция  $\Phi(y)$  выразится:

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^n \Phi_i(y) = e^{-\int_0^y \frac{tg\gamma \cdot (y-y_i)^2 \cdot dn}{B \cdot b}} = e^{-\int_0^y \frac{tg\gamma \cdot n \cdot (y-y_i)^2 \cdot dy_i}{B \cdot b^2}} = e^{-\frac{tg\gamma \cdot n}{3 \cdot B \cdot b^2} \cdot y^3}. \quad (10)$$

Тогда параметр  $H_{max}$ , при  $b = b_2$ , определяется из условия:

$$y = H_{max} = \sqrt[3]{\frac{-3 \cdot \ln \Phi(y = H_{max}) \cdot B \cdot b_2^2}{tg\gamma \cdot n}}. \quad (11)$$

Для случая  $\Phi(y = H_{max}) = 0,895$  с учетом  $-\ln \Phi(y = H_{max}) = 2,25$ , получено:

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{6,75 \cdot B \cdot b_2^2}{tg\gamma \cdot n}}. \quad (12)$$

От зависимости (12) можно перейти к зависимости (2), принимая  $n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot b_2 / V_{dem}$  с учетом зависимостей (3) и (4).

Из полученной зависимости (12) следует, что уменьшить параметр  $H_{max}$  можно уменьшением параметра  $b_2$  и увеличением  $n$ . Как видно, параметры  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $n$  входят в зависимости (9) и (12) с разными степенями, что указывает на различия в формировании параметра  $H_{max}$  и соответственно шероховатости поверхности для двух рассматриваемых случаев внутреннего шлифования. Обозначая в зависимости (9)

параметр  $H_{max}$  через  $H_{max1}$ , а в зависимости (12) параметр  $H_{max}$  через  $H_{max2}$ , после преобразований зависимостей (19) и (12) имеем:

$$H_{max2} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot b_2^2 \cdot H_{max1}^2}{b_1}}. \quad (13)$$

Таким образом, получена аналитическая зависимость, увязывающая параметры  $H_{max1}$  и  $H_{max2}$ , которые достигаются при внутреннем шлифовании кругом с фактически одновысотным выступанием зерен над уровнем связки и кругом с разновысотным выступанием зерен над уровнем связки. Задавая значения параметров  $H_{max1}$ ,  $b_1$  и  $b_2$ , по зависимости (13) можно рассчитать значения  $H_{max2}$ . Подставляя зависимость (13) в зависимость (1), определяется параметр шероховатости обработанной поверхности  $R_{max2}$  при внутреннем шлифовании кругом с разновысотным выступанием зерен над уровнем связки:

$$R_{max2} = H_{max2} \cdot \sqrt[5]{\frac{H_{max2}}{4 \cdot t}} = \left( \frac{3 \cdot b_2^2 \cdot H_{max1}^2}{b_1} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot \left( \frac{1}{4 \cdot t} \right)^{\frac{1}{5}}. \quad (14)$$

Из зависимости (14) следует, что уменьшить параметр  $R_{max2}$  можно главным образом за счет уменьшения  $b_2$  путем увеличения размерного износа зерен или обеспечения их “утопания” в связку круга. Как показывает практика, в большей мере это условие выполняется при внутреннем шлифовании мелкозернистыми кругами. Следовательно, основным направлением уменьшения параметра  $R_{max2}$  является уменьшение зернистости круга. Принимая в зависимости (13) условие  $H_{max} = H_{max1}$ , можно определить параметр шероховатости обработанной поверхности  $R_{max1}$  при внутреннем шлифовании кругом с фактически одновысотным выступанием зерен над уровнем связки:

$$R_{max1} = H_{max1} \cdot \sqrt[5]{\frac{H_{max1}}{4 \cdot t}}. \quad (15)$$

Тогда

$$\frac{R_{max2}}{R_{max1}} = \left( \frac{H_{max2}}{H_{max1}} \right)^{\frac{6}{5}} = \left( \frac{3 \cdot b_2^2}{b_1 \cdot H_{max1}} \right)^{\frac{2}{5}}. \quad (16)$$

На основе сравнения значений параметров  $R_{max1}$  и  $R_{max2}$  оценивается степень влияния “утопания” зерен в связку круга или их размерного износа на шероховатость обработанной поверхности.

Пример расчета. Для исходных данных:  $H_{max1} = 1$  мкм;  $b_1 = 3$  мкм;  $t = 30$  мкм, используя зависимости (13) – (16), определены значения параметров  $H_{max2}$ ,  $R_{max2}$ ,  $R_{max1}$  и отношения  $R_{max2}/R_{max1}$  (табл. 1, рис. 3).

Таблица 1 – Расчетные значения параметров  $H_{max2}$ ,  $R_{max2}$ ,  $R_{max1}$  и отношения  $R_{max2}/R_{max1}$

$b_2$ , мкм	2	3	4	8	12	16	20	24
$H_{max2}$ , мкм	1,26	2,08	2,5	4	5,2	6,25	7,33	8,3
$R_{max2}$ , мкм	0,5	0,88	1,14	2	2,75	3,45	4,16	4,8
$R_{max1}$ , мкм	0,4							
$R_{max2}/R_{max1}$	1,25	2,2	2,85	5	6,88	8,63	10,4	12

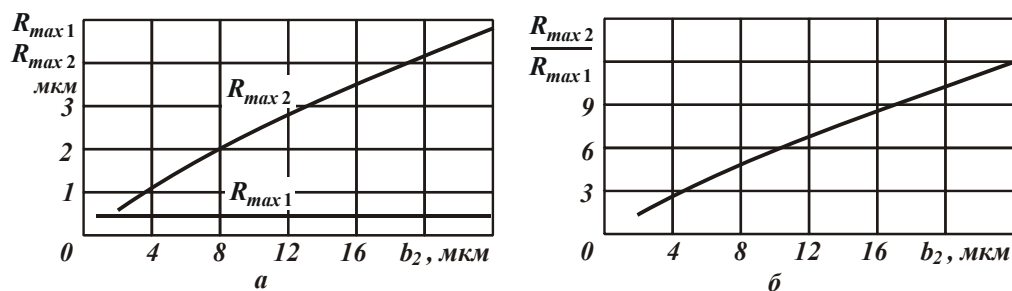


Рис. 3 – Расчетные значения параметров шероховатости  $R_{max1}$ ,  $R_{max2}$  (а) и отношения  $R_{max2}/R_{max1}$  (б)

Как следует из табл. 1 и рис. 3,а, с увеличением параметра  $b_2$  параметр шероховатости  $R_{max2}$  увеличивается фактически по линейной зависимости, тогда как параметр  $R_{max1}$  не зависит от параметра  $b_2$ , остается неизменным и принимает значение, которое меньше  $R_{max2}$ . Так, при  $b_2=24$  мкм отношение  $R_{max2}/R_{max1}=12$  (рис. 3,б). Из этого вытекает, что за счет “утопания” зерен в связку круга (или их размерного износа) параметр шероховатости поверхности  $R_{max2}$  может уменьшиться с 4,8 до 0,5 мкм, т.е. приблизиться к значению  $R_{max1}$ . Следовательно, существуют значительные резервы уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности при внутреннем шлифовании. Для их оценки выполнен комплекс экспериментальных исследований шероховатости поверхности при шлифовании отверстий в гидро- и пневмоцилиндрах [8].

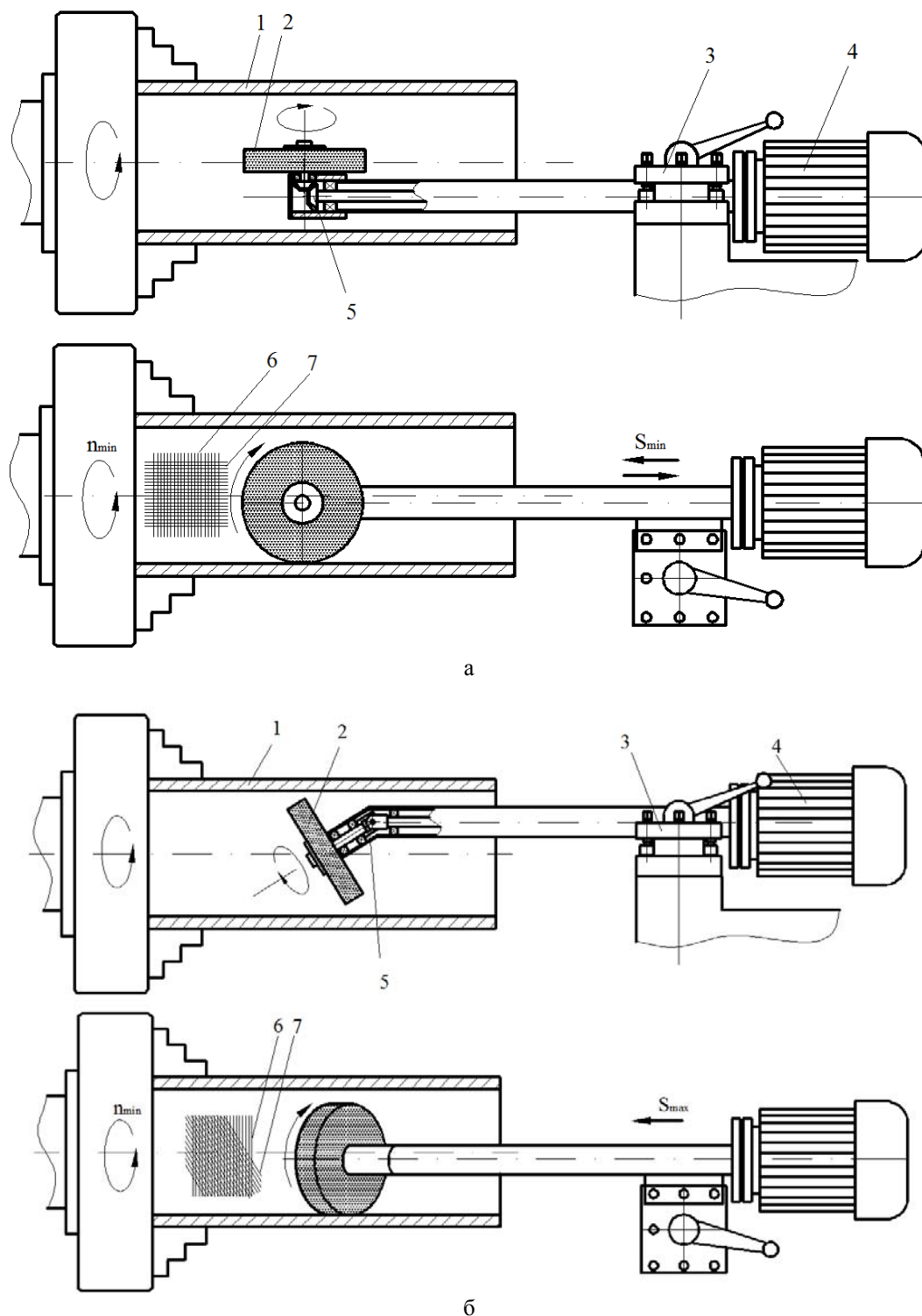


Рис. 4 – Схемы финишной обработки отверстия цилиндра: 1 – обрабатываемый цилиндр; 2 – войлочный (фетровый) круг; 3 – резцедержатель токарного станка; 4 – электродвигатель; 5 – коническая зубчатая передача (а) и шарнир Гукса (б); 6 – обработочные риски после растачивания; 7 – обработочные риски после шлифования ( $S_{min}$ ,  $S_{max}$  – значения подачи;  $n_{min}$  – частота вращения шпинделя)

Практикой установлено, что при внутреннем шлифовании абразивными кругами отверстий в гидро- и пневмоцилиндрах фактически невозможно обеспечить требуемую шероховатость поверхности на уровне  $Ra = 0,05$  мкм. В связи с этим, предложено после предварительного внутреннего шлифования выполнить окончательное внутреннее шлифование на токарном станке модели 1М63 мягким войлочным (фетровым) кругом с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П с частотой вращения шпинделя 200 об/мин и шлифовального круга – 1400 об/мин. При этом ось вращения круга с индивидуальным приводом перпендикулярна оси вращения отверстия обрабатываемого цилиндра.

На рис. 4 показаны схемы финишной обработки отверстия цилиндра, обеспечивающие взаимное пересечение обработочных рисок после растачивания и шлифования войлочным (фетровым) кругом с наклеенным абразивным порошком.

Проведенные исследования процесса внутреннего шлифования отверстия во втулке на токарном станке модели 1М63 показали, что за 30 мин обработки достигается требуемая шероховатость поверхности  $Ra = 0,04$  мкм. Это указывает на то, что применение кругов, обладающих повышенной степенью “утопания” абразивных зерен в связку, и, как следствие, характеризующихся небольшой разновысотностью зерен, позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности – до требуемого уровня и тем самым исключить необходимость применения последующей трудоемкой обработки свободным абразивом.

Следует отметить, что абразивный порошок наносили с помощью силикатного клея (или жидкого стекла), затем его высушивали в течение 3 - 5 часов. Установлено, что обрабатываемую деталь можно переустанавливать сколько угодно без потери точности. Радиальное биение (до миллиметра) не сказывается на качестве поверхности, что позволяет получать требуемую шероховатость поверхности отверстия за 4 - 6 рабочих ходов. Установлено также, что из двух схем внутреннего шлифования, представленных на рис. 4, схема с конической зубчатой передачей (рис. 4,а), обеспечивающая взаимно перпендикулярные риски после растачивания и шлифования, более эффективна.

Приведенные выше примеры практической реализации теоретических решений указывают на их достоверность, а также на возможность существенного уменьшения шероховатости поверхности (до уровня обработки свободным абразивом) на операциях внутреннего шлифования отверстий в деталях гидроаппаратуры при одновременном снижении трудоемкости обработки.

Разработанные технологии и оснастка для изготовления рабочих поверхностей гидро- и пневмоцилиндров, а также технологии финишной механической обработки отверстий в деталях гидравлической аппаратуры внедрены на ряде машиностроительных и металлургических предприятий Украины.

### Выводы

Теоретически и экспериментально доказана возможность уменьшения шероховатости поверхности до уровня  $Ra = 0,05$  мкм и ниже при внутреннем шлифовании за счет уменьшения разновысотности расположения абразивных зерен на рабочей поверхности круга и соответственно увеличения количества одновременно работающих зерен, что позволяет уменьшить трудоемкость последующих финишных операций обработки свободным абразивом и обеспечить высококачественную и производительную обработку отверстий в деталях гидравлической аппаратуры. Экспериментально обоснована эффективность обработки отверстий в пневмоцилиндрах гибкими абразивными инструментами, позволяющими за счет “утопания” абразивных зерен в связку инструмента существенно уменьшить шероховатость поверхности. Это послужило основой разработки прогрессивной схемы финишной обработки отверстия пневмоцилиндра, обеспечивающей взаимное пересечение обработочных рисок после растачивания и шлифования войлочным кругом с наклеенным на него абразивным порошком, и достижение требуемой шероховатости поверхности  $Ra = 0,04$  мкм, исключая тем самым необходимость применения последующих финишных трудоемких операций обработки свободным абразивом.

**Перечень источников литературы:** 1. Лавріненко В.І. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник / В.І. Лавріненко, М.В. Новіков / Під загальною ред. академіка НАНУ М.В. Новікова. – К.: ІНМ НАН України, 2013. – 456 с. 2. Марчук В.И. Технологические основы качества рабочих поверхностей колец роликоподшипников: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / В.И. Марчук. – Одесса, 2004. – 36 с. 3. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.Н. Михелькевич. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с. 4. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / Ф.В. Новиков. – Одесса, 1995. – 36 с. 5. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с. 6. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов. – К.: Наукова думка, 1984. – 272 с. 7. Новиков Ф.В. Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятностей / Ф.В. Новиков, В.Г. Шкурупий // Вісник НТУ “ХП”. Збірник наукових праць. – Х.: НТУ “ХП”. – 2004. – № 44. – С. 140-149. 8. Брижан Т. М. Исследование точности и шероховатости при развертывании глубоких отверстий / Т. М. Брижан, А. С. Крепак // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2004. – Вип. 14. – С. 187–190.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ  
ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ  
НОВИКОВ Ф.В., БРИЖАН Т.М.

Теоретически и экспериментально доказана возможность уменьшения шероховатости поверхности до уровня  $Ra=0,05$  мкм и ниже при внутреннем шлифовании за счет уменьшения разновысотности расположения абразивных зерен на рабочей поверхности круга и соответственно увеличения количества одновременно работающих зерен, что позволяет уменьшить трудоемкость последующих финишных операций обработки свободным абразивом и обеспечить высококачественную и производительную обработку отверстий в деталях гидравлической аппаратуры. Экспериментально обоснована эффективность обработки отверстий в пневмоцилиндрах гибкими абразивными инструментами, позволяющими за счет "утопания" абразивных зерен в связку инструмента существенно уменьшить шероховатость поверхности. Это послужило основой разработки прогрессивной схемы финишной обработки отверстия пневмоцилиндра, обеспечивающей взаимное пересечение обработочных рисок после растачивания и шлифования войлочным кругом с наклеенным на него абразивным порошком, и достижение требуемой шероховатости поверхности  $Ra=0,04$  мкм, исключая тем самым необходимость применения последующей трудоемкой обработки свободным абразивом.

ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЗМЕНШЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ ШЛІФУВАННІ ОТВОРІВ У  
ДЕТАЛЯХ ГІДРАВЛІЧНОЇ АПАРАТУРИ  
НОВИКОВ Ф.В., БРИЖАН Т.М.

Теоретично й експериментально доведена можливість зменшення шорсткості поверхні до рівня  $Ra=0,05$  мкм і нижче при внутрішньому шліфуванні за рахунок зменшення різновисотності розташування абразивних зерен на робочій поверхні круга й відповідно збільшення кількості одночасно працюючих зерен, що дозволяє зменшити трудомісткість наступних фінішних операцій обробки вільним абразивом і забезпечити високоякісну й продуктивну обробку отворів у деталях гідравлічної апаратури. Експериментально обґрунтовано ефективність обробки отворів у пневмоциліндрах гнучкими абразивними інструментами, які дозволяють за рахунок "утопання" абразивних зерен у зв'язку інструмента суттєво зменшити шорсткість поверхні. Це стало основою розробки прогресивної схеми фінішної обробки отвору пневмоциліндра, що забезпечує взаємне перетинання оброблювальних рисок після розточування й шліфування повстятим кругом з наклеєним на його робочу поверхню абразивним порошком, і досягнення необхідної шорсткості поверхні  $Ra=0,04$  мкм, виключаючи тим самим необхідність застосування наступної трудомісткої обробки вільним абразивом.

DETERMINATION OF THE REDUCTION IN GRINDING SURFACE ROUGHNESS HOLES IN  
HYDRAULIC EQUIPMENT  
NOVIKOV F.V., BRIZHAN T.M.

Theoretically and experimentally demonstrated the ability to reduce the surface roughness to a level  $Ra = 0.05$  m and below at internal grinding by reducing *raznovysotnyh* location of abrasive grains on the working surface of the wheel and thus increase the number of simultaneous grains, thereby reducing complexity of subsequent finishing operations free abrasive machining and provide high-quality and productive processing holes in hydraulic equipment. Experimentally proved the efficiency of processing holes in the pneumatic cylinders flexible abrasive tools to the expense of "utopaniya" abrasive grains in a bunch of tools to significantly reduce the surface roughness. This served as the basis for developing a progressive scheme finishing hole pneumatic cylinder, which provides mutual intersection of the treatment of scratches after boring and grinding disc with a felt glued on him abrasive powder, and the achievement of the desired surface roughness  $Ra = 0.04$  micrometers, thereby eliminating the need for time-consuming subsequent treatment free abrasive.

Ключевые слова: внутреннее шлифование, обработка свободным абразивом, абразивные зерна, войлочный круг, разновысотное выступание зерен, шероховатость поверхности, пневмоцилиндр

Ключові слова: внутрішнє шліфування, обробка вільним абразивом, абразивні зерна, повстятний круг, різновисотне виступання зерен, шорсткість поверхні, пневмоциліндр

Keywords: internal grinding, free abrasive machining, abrasive grains, a felt ring, *raznovysotnyh* protrusion grains, surface roughness, the air cylinder