

*Р.М. МИНЧЕВ*, ХНЭУ, Харьков;

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

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

Разработана расчетная схема определения шероховатости поверхности при шлифовании на основе равномерного и вероятностного характера участия зерен круга в резании, что позволило обосновать условия уменьшения шероховатости и выбрать оптимальную зернистость круга для заданной шероховатости поверхности. Показано, что при расчете оптимальной зернистости круга можно ограничиться рассмотрением равномерного характера участия зерен круга в резании, учитывая вероятность участия зерен круга в резании за счет 2-кратной поправки на установленную зернистость круга.

**Ключевые слова:** шлифование, шлифовальный круг, абразивные зерна, режимы шлифования, шероховатость поверхности, зернистость круга, теоретико-вероятностный подход

**Введение.** Одним из основных направлений эффективного применения процессов шлифования в технологии изготовления деталей машин является обеспечение высоких показателей шероховатости поверхности. Это достигается за счет участия в резании большого количества абразивных зерен шлифовального круга и снижения толщин срезов, приходящихся на каждое режущее зерно. Однако, в связи с разновысотным расположением абразивных зерен на рабочей поверхности круга, износом круга и другими технологическими факторами, как показывает практика, фактическое количество зерен, участвующих в процессе резания, значительно меньше номинального, что не всегда позволяет достичь требуемой шероховатости поверхности. Поэтому приходится прибегать к более трудоемким процессам доводки, хонингования и т.д. Исходя из этого, актуальной задачей машиностроения является определение новых технологических возможностей снижения шероховатости поверхности на операциях шлифования, что требует проведения теоретического анализа шероховатости поверхности и установления условий ее уменьшения.

**Анализ последних достижений и литературы.** Проблеме исследования шероховатости поверхности при шлифовании посвящены работы [1-3], в которых теоретически и экспериментально определены количественные значения шероховатости поверхности, достигаемые при различных условиях шлифова-

ния, включая режимы шлифования, характеристики кругов, технологические среды и т.д. Установлено, что основным условием снижения шероховатости поверхности является поддержание в процессе высокой режущей способности круга, уменьшения зернистости круга, применение кругов из синтетических сверхтвердых материалов, обеспечивающих тончайшие срезы за счет высокой остроты зерен, уменьшение разновысотного расположения вершин зерен на рабочей поверхности круга, например за счет создания плосковершинных зерен, и т.д. Важные результаты получены на основе математического моделирования закономерностей формирования шероховатости поверхности [4, 5]. Однако в полном объеме эти задачи в силу их сложности не решены, что требует разработки новых подходов к их решению.

**Цель работы, постановка проблемы.** Целью работы является теоретическое определение условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании на основе равномерного и вероятностного участия зерен круга в резании и разработка упрощенной методики расчета оптимальных параметров шлифования для заданной шероховатости поверхности.

**Материалы исследований.** Шероховатость поверхности при шлифовании формируется в результате наложения и перекрытия большого количества срезов, образуемых абразивными зернами, имеющими различную форму, размеры и различное расположение на рабочей поверхности круга. Поэтому, чтобы учесть эти факторы, необходимо расчеты шероховатости поверхности, образуемой при шлифовании, производить с использованием положений теории вероятностей [4]. Однако, полученные аналитические зависимости справедливы, как правило, для отдельных схем шлифования и не позволяют с единых позиций (в общем случае) решить задачу определения оптимальных условий шлифования по критерию наименьшей шероховатости поверхности. В особой мере это относится к выбору наиболее рациональной кинематической схемы шлифования, обеспечивающей наименьшую шероховатость поверхности для условий, когда требуется достичь высоких показателей шероховатости поверхности, близких к условиям обработки свободным абразивом. В частности, это отно-

сится к шлифованию отверстий в гидро- и пневмоцилиндрах, где требуется обеспечить шероховатость поверхности на уровне  $R_a=0,04$  мкм. Очевидно, добиться практически такого высокого уровня шероховатости поверхности шлифованием сложно, даже применяя мелкозернистые круги. Поэтому важно теоретически оценить технологические возможности шлифования с точки зрения достижения таких высоких показателей шероховатости поверхности. Для этого может быть предложена расчетная схема, которая основана на приближенном определении шероховатости поверхности при шлифовании исходя из условия, что все зерна, проконтактировавшие с обрабатываемой поверхностью в пределах базовой длины  $B$ , оставили свои полные проекции в поперечном сечении (без пересечения) и сформировали полный профиль, соответствующий шероховатости поверхности с максимальной высотой микронеровностей  $R_{max}$ .

Согласно рис. 1, полный сьем обрабатываемого металла режущими зернами круга происходит на уровне  $y = R_{max}$ , где  $y$  – координата, отсчитываемая от вершины зерна (высоты выступания зерен над уровнем связки круга приняты одинаковыми). Для определения параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$  следует ввести новый параметр  $\bar{B}$ , который равен сумме длин несрезанных участков металла на уровне  $y < R_{max}$ . Очевидно, на уровне  $y = R_{max}$  справедливо условие  $\bar{B} = B$ , а при  $y < R_{max}$  – условие  $\bar{B} < B$ . Поэтому необходимо оценить характер изменения  $\bar{B} / B$  для различных условий обработки.

В общем случае при круглом внутреннем шлифовании  $\bar{B} = 2tg\gamma \cdot y \cdot n = 2tg\gamma \cdot y \cdot k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau$ , где  $n$  – общее количество зерен круга, участвующих в формировании шероховатости поверхности;  $2\gamma$  – угол при вершине конусообразного режущего зерна;  $k$  – поверхностная концентрация зерен круга, шт./м<sup>2</sup>;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $\tau = l / V_{дет}$  – время, в течение которого зерна шлифовального круга могут контактировать с фиксированным поперечным сечением обрабатываемой детали, с;  $l = \sqrt{2t / \rho}$  – длина дуги контак-

та круга с обрабатываемой деталью [6], м;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с;  $t$  – глубина шлифования, м;  $\bar{B} = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau$ ;  $R_{кр}$ ,  $R_{дет}$  – радиусы круга и детали, м.

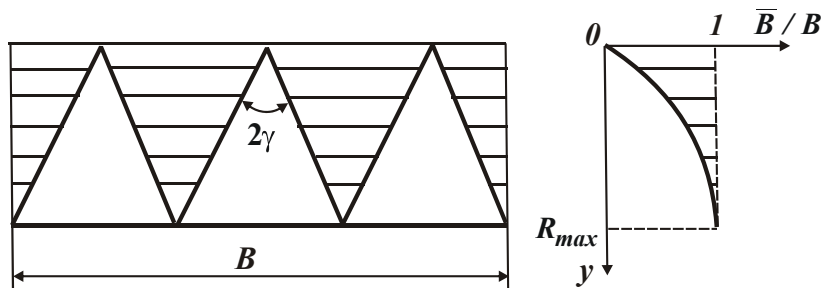


Рис. 1 – Расчетная схема определения отношения  $\bar{B} / B$

Параметр  $k$  при шлифовании алмазным кругом определяется зависимостью [7]:  $k = \frac{3m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}$ , где  $m$  – объемная концентрация зерен круга (например, для 100%-й концентрации  $m=100$ );  $\bar{X}$  – зернистость круга, м;  $(1 - \varepsilon)$  – коэффициент, учитывающий высоту выступания зерен над уровнем связки круга.

Физически коэффициент  $(1 - \varepsilon)$  может быть выражен:  $(1 - \varepsilon) = y / \bar{X}$ . Тогда с учетом всех преобразований отношение  $\bar{B} / B$  определится:

$$\frac{\bar{B}}{B} = \frac{3m \cdot \text{tg} \gamma \cdot y^2}{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} \cdot \sqrt{\frac{2t}{\left(\frac{1}{R_{кр}} - \frac{1}{R_{дет}}\right)}} \quad (1)$$

Как видно, с увеличением  $y$  отношение  $\bar{B} / B$  увеличивается и при условии  $y = R_{max} = 1$  мкм, поскольку в принятой расчетной схеме (рис. 1) в пределах базовой длины  $B$  отсутствует наложение проекций срезов отдельными зернами. Выполнение данного условия обеспечивается за счет равномерного участия зерен в резании и правильного выбора параметров шлифования, входящих в зависимость (1). В связи с этим определим значение  $\bar{B} / B$  для следующих исходных данных:  $m=100$ ;  $\bar{X}=0,1$  мм;  $2\gamma=90^0$ ;  $V_{кр}=30$  м/с;  $V_{дет}=30$  м/мин;  $t=0,01$  мм;  $R_{кр}=0,04$  м;  $R_{дет}=0,05$  м;  $y = R_{max} = 1$  мкм. В результате  $\bar{B} / B = 0,12$ .

Как видно, полученное значение  $\bar{B} / B$  меньше единицы. Следовательно, на уровне  $y = R_{max} = 1$  мкм полный профиль от наложения проекций зерен не

образуется. Очевидно, полный профиль для тех же исходных данных может быть образован при условии  $y = R_{max} = 2,9$  мкм, т.е. при значительно большем значении параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$ . Чтобы добиться требуемого значения  $R_{max} = 1$  мкм, необходимо, например, уменьшить зернистость круга  $\bar{X}$ , которая входит в зависимость (1) с наибольшей степенью и поэтому в наибольшей мере влияет на отношение  $\bar{B} / B$ . В табл. 1 приведены расчетные значения отношения  $\bar{B} / B$  для различных значений зернистости круга  $\bar{X}$ . Как видно, при  $\bar{X} = 50$  мкм фактически обеспечивается условие  $\bar{B} / B = 1$ , т.е. в этом случае образуется полный профиль от наложения проекций зерен в поперечном сечении обрабатываемой детали в пределах базовой длины  $B$ , а параметр шероховатости поверхности  $R_{max} = 1$  мкм.

Таблица 1. Расчетные значения отношения  $\bar{B} / B$

$\bar{X}$ , мкм	20	30	40	50	100
$\bar{B} / B$	15	4,43	1,88	0,96	0,12

Для удобства выполнения расчетов зернистости круга  $\bar{X}$ , при которой выполняется условие  $\bar{B} / B = 1$ , а параметр  $R_{max}$  принимает заданное значение, необходимо зависимость (1) разрешить относительно зернистости круга:

$$\bar{X} = \sqrt[3]{\frac{3m \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot R_{max}^2}{100\pi} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}}} \cdot \sqrt{\frac{2t}{\left(\frac{1}{R_{кр}} - \frac{1}{R_{дет}}\right)}}. \quad (2)$$

Из полученной зависимости (2) следует, что при заданной шероховатости поверхности  $R_{max}$  зернистость круга  $\bar{X}$  тем больше, чем больше параметры  $m$ ,  $V_{кр}$ ,  $t$  и меньше  $V_{дет}$ . Зависимость (2) является приближенной, т.к. не учитывает вероятностный характер участия зерен в резании, в результате которого происходит наложение проекций зерен в поперечном сечении обрабатываемой детали (рис. 1) и поэтому полный профиль может быть образован при условии

$\bar{B}/B > 1$ , например при  $\bar{B}/B = 5$  и т.д. В связи с этим, в зависимости (2) необходимо учитывать отношение  $\bar{B}/B > 1$ . Тогда, разрешая зависимость (1) относительно зернистости круга  $\bar{X}$ , получено:

$$\bar{X} = \sqrt[3]{\frac{B}{\bar{B}} \cdot \frac{3m \cdot \text{tg} \gamma \cdot R_{max}^2}{100\pi} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}}} \cdot \sqrt{\frac{2t}{\left(\frac{1}{R_{кр}} - \frac{1}{R_{дет}}\right)}}. \quad (3)$$

Отношение  $B/\bar{B}$  меньше единицы, что приводит к уменьшению зернистости круга  $\bar{X}$ . Следовательно, вероятностный характер участия зерен в резании приводит к тому, что зернистость круга  $\bar{X}$  необходимо уменьшать для обеспечения заданного значения параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$ .

Очевидно, чем меньше отношение  $B/\bar{B}$ , тем меньше зернистость круга  $\bar{X}$ . Однако, уменьшение  $\bar{X}$  происходит не столь существенно, т.к. отношение  $B/\bar{B}$  входит в зависимость (3) с небольшой степенью – 0,33. Поэтому уменьшение отношения  $B/\bar{B}$ , например в 8 раз приведет к уменьшению зернистости круга  $\bar{X}$  всего в 2 раза. Следовательно, для обеспечения заданного значения параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$  с учетом вероятностного характера участия зерен в резании достаточно при выборе оптимальной зернистости круга  $\bar{X}$  учесть 2-кратную поправку, например, при номинальном значении  $\bar{X}$  фактически принять  $50 \text{ мкм} < \bar{X} < 100 \text{ мкм}$ . Предложенная методика расчета оптимальной зернистости круга согласуется с результатами исследований шероховатости поверхности, выполненными с учетом вероятностного характера участия зерен круга в резании [8] и полученной зависимостью для определения относительной полноты профиля круга  $\varepsilon(y)$ , по физической сути соответствующей отношению  $\bar{B}/B$ :  $\varepsilon(y) = 1 - e^{-\frac{2\text{tg} \gamma \cdot n \cdot y}{B}}$ . Очевидно,  $\frac{2\text{tg} \gamma \cdot n \cdot y}{B} = \frac{\bar{B}}{B}$ . Тогда с учетом  $y = R_{max}$  имеем:  $\varepsilon(y = R_{max}) = 1 - e^{-\frac{\bar{B}}{B}}$ . В табл. 2 приведены расчетные значения функции  $\varepsilon(y = R_{max})$  для разных значений отношения  $\bar{B}/B$ .

Таблица 2. Расчетные значения функции  $\varepsilon(y = R_{max})$

$\bar{B} / B$	0,12	1	2	4	8	10
$\varepsilon(y = R_{max})$	0,11	0,422	0,865	0,982	0,996	0,999

Как видно, с увеличением отношения  $\bar{B} / B > 1$  функция  $\varepsilon(y = R_{max})$  асимптотически стремится к единице. Это условие может быть реализовано в результате наложения и перекрытия проекций зерен в поперечном сечении обрабатываемой детали. Выполнение условия  $\bar{B} / B = 1$  является приближенным, т.к. функция  $\varepsilon(y = R_{max}) = 0,422$ , что значительно меньше единицы. Следовательно, при расчете оптимальной зернистости круга  $\bar{X}$  по зависимости (3) необходимо отношение  $\bar{B} / B$  принимать больше единицы. Это приведет в соответствие расчетные и экспериментальные значения зернистости круга  $\bar{X}$ .

**Выводы.** Разработана расчетная схема определения шероховатости поверхности при шлифовании на основе равномерного и вероятностного характера участия зерен круга в резании, что позволило обосновать условия уменьшения шероховатости и выбрать оптимальную зернистость круга для заданной шероховатости поверхности. Показано, что в первом приближении при расчете оптимальной зернистости круга можно ограничиться рассмотрением равномерного характера участия зерен круга в резании, учитывая вероятность участия зерен в резании за счет 2-кратной поправки на значение зернистости круга.

**Список литературы:** 1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 2. Яцерицын П.И. Шлифование металлов / П.И. Яцерицын, Е.А. Жалнерович. – Минск: Беларусь, 1970. – 464 с. 3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 4. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с. 5. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Гл. ред. физ.-мат. литературы изд-ва "Наука", 1975. – 344 с. 6. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування: монографія / Ф. В. Новіков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с. 7. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с. 8. Шкурупий В.Г. Аналитическое описание и технологическое обеспечение параметров шероховатости обработки / В.Г. Шкурупий, Ф.В. Новиков // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2004. – Вып. 67. – С. 46-56.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Maslov E.N.* Teoriya shlifovaniya metallov / *E.N. Maslov.* – M.: Mashinostroenie, 1974. – 319 s. 2. *Yasheritsyn P.I.* Shlifovanie metallov / *P.I. Yasheritsyn, E.A. Zhalnerovith.* – Minsk: Belarus, 1970. – 464 s. 3. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologiy mashinostroeniya / Pod obsh. red. *F.V. Novikova i A.V. Yakimova.* V 10 tomakh.– T. 4. "Teoriya abrazivnoy i almazno-abrazivnoy obrabotki materialov" – Odessa: ONPU, 2002. – 802 s. 4. *Novoselov Y.K.* Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke / *Y.K. Novoselov.* – Saratov, 1979. – 232 s. 5. Sherokhovatost poverkhnostey (teoretiko-veroyatnostnyiy podkhod) / *A.P. Khusu, Y.R. Vitenberg, V.A. Palymov.* – M.: Gl. red. fiz.-mat. literatury izd-va "Nauka", 1975. – 344 s. 6. *Novikov F.V.* Vysokoproduktyvne almazne shlifuvannya: monografiya / *F.V. Novikov.* – Kh.: Vyd. KhNEU, 2014. – 412 s. 7. Almazno-abrazivnaya obrabotka materialov: spravothnik / Pod red. prof. *A.N. Reznikova.* – M.: Mashinostroenie, 1977. – 390 s. 8. *Shkurupiy V.G.* Analiticheskoe opisanie i tekhnologicheskoe obespechenie parametrov sherokhovatosti obrabotki / *V.G. Shkurupiy, F.V. Novikov* // Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh: Mezhd. nauthn.-tekhn. sbornik. – Kharkov: NTU "KPI", 2004. – Vyp. 67. – S. 46-56.