

*Дитиненко С. А.*  
Харьковский национальный экономический университет  
им. Семена Кузнеця, Харьков, Украина

## УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

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.

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 [1]. 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. 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 съем 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  $\bar{B} = 2tg\gamma \cdot yn = 2tg\gamma \cdot ykBV_{кр}\tau$ , 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 контакта круга с обрабатываемой деталью [1], 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.

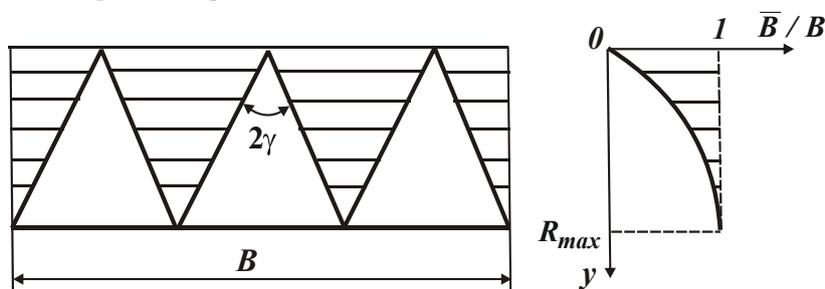


Рисунок 1 – Расчетная схема определения отношения  $\bar{B} / B$

Параметр  $k$  при шлифовании алмазным кругом определяется зависимостью [2]:  $k = \frac{3m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}$ , 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:

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

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  $\bar{B} / B = 0,12$ . Полу-

ченное 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  $R_{\max} = 1$  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:

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

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 [3] и полученной зависимостью для определения относительной полноты профиля круга  $\varepsilon(y)$ , по физической сути соответствующей отношению  $\bar{B}/B$ :  $\varepsilon(y) = 1 - e^{-\frac{2tg\gamma \cdot n \cdot y}{B}}$ . Очевидно,  $\frac{2tg\gamma \cdot n \cdot y}{B} = \frac{\bar{B}}{B}$ . 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  $\bar{X}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування: монографія / Ф. В. Новіков. – Х.: Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с.
2. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.
3. Шкурупий В.Г. Аналитическое описание и технологическое обеспечение параметров шероховатости обработки / В.Г. Шкурупий, Ф.В. Новиков // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – Вып. 67. – С. 46-56.