

КЛЕНОВ О. С., ДИТИНЕНКО С. А., КРЮК А. Г., НОВИКОВ Ф. В.

ФОРМИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ

Приведены аналитические зависимости для определения шероховатости поверхности при шлифовании, полученные на основе теоретико-вероятностного подхода при моделировании режущих зерен круга в форме конуса и сферы. Показано, что моделирование режущих зерен круга в форме сферы приводит к заниженным значениям, а в форме конуса – к завышенным значениям шероховатости поверхности по сравнению с экспериментальными данными. Поэтому при расчете шероховатости поверхности режущие зерна круга следует рассматривать в форме усеченного конуса, учитывая размеры образующейся площадки износа на зерне.

Ключевые слова: шлифование, шероховатость поверхности, режущие зерна круга, конус, сфера, площадка износа, теоретико-вероятностный подход

Наведено аналітичні залежності для визначення шорсткості поверхні при шліфуванні, які отримано на основі теоретико-імовірнісного підходу при моделюванні ріжучих зерен круга в формі конуса та сфери. Показано, що моделювання ріжучих зерен круга в формі сфери призводить до занижених значень, а в формі конуса - до завищених значень шорсткості поверхні порівняно з експериментальними даними. Тому при розрахунку шорсткості поверхні ріжучі зерна круга слід розглядати в формі усеченого конуса з урахуванням розмірів майданчиків зносу, що утворюються на зернах.

Ключові слова: шліфування, шорсткість поверхні, ріжучі зерна круга, конус, сфера, майданчик зносу, теоретико-імовірнісний підхід

Analytical dependences are given for determining the surface roughness during grinding, obtained on the basis of the theoretical-probabilistic approach in the modeling of the cutting grains of a circle in the form of a cone and a sphere. It is shown that the modeling of the cutting grains of a circle in the form of a sphere leads to underestimated values, and in the form of a cone - to overestimated values of the surface roughness in comparison with the experimental data. Therefore, to determine the roughness parameters of the surface when grinding with a diamond circle after dressing, it is suggested that the grains be considered in the form of a cone, and after the running-in of a circle, in the form of a sphere. When the roughness of the surface is refined, the cutting grain of the circle should be considered in the form of a truncated cone, taking into account the dimensions of the wear area on the grain, using a dimensionless coefficient equal to zero for the sharpened grain and varying within 0 ... 1 for worn-out grain. Based on the results of the research, practical recommendations are given to reduce the surface roughness during grinding.

Keywords: grinding, surface roughness, cutting circle grains, cone, sphere, wear surface, probability-theoretic approach

Введение. Механическая обработка характеризуется наименьшей энергоемкостью среди всего разнообразия методов обработки деталей машин, что предполагает ее широкое практическое использование. Наибольшими возможностями с точки зрения обеспечения параметров качества и точности обрабатываемых поверхностей обладает метод шлифования. Благодаря тому, что сьем материала при шлифовании происходит в результате участия в резании чрезвычайно большого количества абразивных зерен, обеспечивающих тончайшие микросрезы, шероховатость обрабатываемой поверхности существенно уменьшается, достигая значений $R_a=0,05$ мкм и менее. Это позволяет рассматривать метод шлифования основным финишным методом обработки деталей машин. Для обоснования технологических возможностей шлифования необходимо располагать научными знаниями о закономерностях формирования шероховатости поверхности при шлифовании и основных условиях ее уменьшения. Это требует проведения дальнейших исследований и разработки новых математических моделей определения шероховатости поверхности при шлифовании.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам исследования шероховатости поверхности при шлифовании в научно-технической литературе уделено большое внимание [1–3]. Экспериментально установлено влияние параметров шлифования на показатели шероховатости поверхности и определены условия ее уменьшения. Разработан теоретико-вероятностный подход при шлифовании [4, 5], позволяющий теоретически прогнозировать оптимальные

условия обработки с точки зрения уменьшения шероховатости поверхности. Однако большое количество факторов, возникающих в процессе шлифования, затрудняет точный расчет шероховатости поверхности. Поэтому в настоящей работе, в развитие теоретико-вероятностного подхода при шлифовании, предложены новые теоретические зависимости для определения шероховатости поверхности с учетом параметров режущего рельефа круга, моделируя режущие зерна в форме конуса, усеченного конуса и сферы. Сравнение расчетных и экспериментальных значений шероховатости поверхности позволит обосновать наиболее приемлемую для расчетов форму режущих зерен и научно обоснованно подойти к определению оптимальных условий шлифования по критерию наименьшей шероховатости поверхности.

Целью работы является определение условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании на основе применения новых аналитических подходов к ее определению.

Изложение основного материала. В работах [6, 7] приведены аналитические зависимости для определения максимальной вероятностной (приведенной) толщины среза H_{max} и параметра шероховатости поверхности R_a при шлифовании алмазным кругом с режущими зернами, имеющими конусообразную форму (рис. 1):

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{t \cdot \rho} \cdot (1 - \eta)^2}{tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot (1 + \eta)}}; \quad (1)$$

$$R_a = 0,2 \cdot H_{max} \cdot \sqrt[5]{\frac{H_{max}}{4 \cdot t}}; \quad (2)$$

$$R_a = 2 \cdot \sqrt[5]{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} \cdot \frac{\pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{дет}^2 \cdot \rho}{t g^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{кр}^2}}; \quad (3)$$

где \bar{X} – зернистость круга, м;
 m – объемная концентрация зерен в круге;
 γ – половина угла при вершине зерна конусообразной формы;
 $V_{дет}$ – скорость детали, м/с;
 $V_{кр}$ – скорость круга, м/с;
 t – глубина шлифования, м;
 $\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{дет}$;
 $R_{кр}, R_{дет}$ – радиусы круга и детали, м;
 $\eta = x/H$ – безразмерный коэффициент, определяющий степень затупления зерна (для острозаточенного зерна $\eta = 0$, для затупленного зерна $\eta \rightarrow 1$);
 x – величина линейного износа зерна, м;
 H – максимальная условная глубина внедрения зерна в обрабатываемый материал, отсчитывается от вершины исходного неизношенного максимально выступающего над уровнем связки зерна, м.

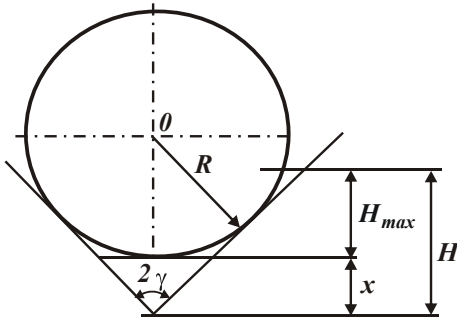


Рис. 1 – Расчетная схема параметров шлифования

Наряду с параметрами режима шлифования, характеристиками алмазного круга и обрабатываемой детали, зависимость (3) содержит множитель $\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2}$, который обусловлен линейным износом зерен круга. Очевидно, чем больше безразмерный коэффициент η , тем больше линейный износ зерен круга и меньше параметр шероховатости поверхности R_a . Это условие предопределяет основное направление уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании, так как безразмерный коэффициент η из всех входящих в зависимость (3) параметров оказывает на R_a наибольшее влияние.

Следует отметить, что традиционно расчеты шероховатости поверхности при шлифовании выполняются для исходного режущего рельефа круга, т.е. для $\eta = 0$, что приводит к завышенным расчетным значениям шероховатости поверхности. Поэтому наличие в зависимости (3) безразмерного коэффициента η , учитывающего линейный износ зерен круга, позволяет

приблизить расчетные значения шероховатости поверхности к экспериментальным значениям и открывает новые технологические возможности изыскания условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании. Для решения этих задач целесообразно перейти от конусообразной к сферической форме зерен радиусом R , рассматривая расчетную схему, показанную на рис. 1. В результате выполненных расчетов установлено, что безразмерный коэффициент η для условия $\gamma = 45^\circ$ определяется зависимостью:

$$\eta = \frac{1}{\left(1 + 2,415 \cdot \frac{H_{max}}{R}\right)}. \quad (4)$$

Как видно, безразмерный коэффициент η зависит лишь от отношения H_{max}/R : чем оно больше, тем меньше безразмерный коэффициент η . Это приводит к более полному использованию режущих возможностей алмазного круга.

Соответственно, множитель $\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2}$, входящий в зависимость (3), примет вид:

$$\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} = 8,5 \cdot \left(\frac{H_{max}}{R}\right)^4. \quad (5)$$

Подставляя преобразованную зависимость (5) в (1), имеем:

$$H_{max} = \frac{1836,45 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot R^2}. \quad (6)$$

В итоге получена аналитическая зависимость для определения максимальной вероятностной (приведенной) толщины среза H_{max} , которая по структуре отличается от аналогичной зависимости (1), полученной при шлифовании алмазным кругом с режущими зернами, имеющими конусообразную форму. Входящие в зависимость (6) параметры в большей степени влияют на параметр H_{max} , чем в зависимости (1). Следовательно, моделируя режущие зерна в форме сферы, можно в более широких пределах изменять параметр H_{max} за счет изменения входящих в зависимость (6) параметров.

При условии $\bar{X} = 2 \cdot R$ зависимость (6) окончательно выразится:

$$H_{max} = \frac{14,7 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot R \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр}}. \quad (7)$$

В полученной зависимости (7) зернистость круга, определяемая радиусом зерна R , влияет на параметр H_{max} аналогично параметрам $V_{дет}$, $V_{кр}$ и m , тогда как в зависимость (1) зернистость круга $\bar{X} = 2 \cdot R$ входит с наибольшей степенью. Следовательно, моделируя режущие зерна в форме сферы, сложно добиться существенного уменьшения параметра H_{max} за счет уменьшения зернистости круга (радиуса зерна R).

С учетом зависимости (6) зависимость (2) принимает вид:

$$R_a = \frac{367,3 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot R^2} \times \sqrt[5]{\frac{459 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{\rho}}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot R^2} \cdot \sqrt{t}} \quad (8)$$

Из зависимостей (2) и (8) вытекает, что параметр шероховатости поверхности R_a , по сути, определяется максимальной вероятностной (приведенной) толщиной среза H_{max} , т.е. чем меньше H_{max} , тем меньше параметр R_a .

Если принять, что $\bar{X} = 2 \cdot R$, то зависимость (8) выразится:

$$R_a = \frac{2938,4 \cdot \pi \cdot R \cdot V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{\text{кр}}} \times \sqrt[5]{\frac{3672 \cdot \pi \cdot R \cdot V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{\rho}}{m \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \sqrt{t}} \quad (9)$$

Исходя из зависимости (9), основными условиями уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a являются: уменьшение зернистости круга (радиуса зерна R), скорости детали $V_{\text{дет}}$, глубины шлифования t и увеличение объемной концентрации зерен в круге m и скорости круга $V_{\text{кр}}$. В отличие от зависимости (3), полученной при шлифовании алмазным кругом с режущими зернами, имеющими конусообразную форму, в зависимости (8) зернистость круга, определяемая радиусом зерна R , влияет на R_a аналогично параметрам $V_{\text{дет}}$, $V_{\text{кр}}$ и m . Поэтому, моделируя режущие зерна в форме сферы, сложно добиться значительного уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a за счет уменьшения зернистости круга (радиуса зерна R), так как влияние параметров R , $V_{\text{дет}}$, $V_{\text{кр}}$ и m на параметр R_a равносильно.

При глубинном шлифовании кругом с режущими зернами в форме сферы, так же как и при шлифовании кругом с режущими зернами в форме конуса, сохраняется закономерность уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a для заданной производительности обработки $Q = B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t$:

$$R_a = \frac{2938,4 \cdot \pi \cdot R \cdot Q}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \times \sqrt[5]{\frac{3672 \cdot \pi \cdot R \cdot Q}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot B \cdot t} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}}} \quad (10)$$

где B – ширина шлифования, м.

Как следует из зависимости (10), с увеличением глубины шлифования t параметр шероховатости поверхности R_a уменьшается. Следовательно, применяя схему глубинного шлифования с относительно не-

большой скоростью детали $V_{\text{дет}}$, можно одновременно добиться увеличения производительности обработки и уменьшения шероховатости обработанной поверхности при сьеме значительных припусков. Это позволяет операции предварительного и окончательного шлифования объединить в одну операцию, что снижает трудоемкость обработки при одновременном увеличении производительности и обеспечении высокого качества обрабатываемых поверхностей.

Расчеты, выполненные на основе полученных зависимостей (6) и (2), показали, что для исходных данных: $V_{\text{дет}}=10$ м/мин; $V_{\text{кр}}=30$ м/мин; $t=0,1 \cdot 10^{-3}$ м; $m=100$; $R=0,1 \cdot 10^{-3}$ м; $R_{\text{кр}}=0,15$ м; $R_{\text{дет}}=0,08$ м максимальная вероятностная (приведенная) толщина среза $H_{\text{max}}=11,1$ мкм, а параметр шероховатости поверхности $R_a=1,11$ мкм.

Расчетами, выполненными на основе зависимостей (1) и (2), для этих же исходных данных при условии $\eta=0$ (т.е. для зерен конусообразной формы) установлено, что $H_{\text{max}}=33$ мкм, а $R_a=4,27$ мкм.

Приведенные экспериментальные исследования процесса круглого наружного шлифования алмазным кругом на металлической связке 1A1 300x25 AC6 200/160 4 M1-01 цилиндрической твердосплавной фрезы диаметром 160 мм (изготовленной из твердого сплава ВК8) с режимом шлифования $V_{\text{дет}}=10$ м/мин; $V_{\text{кр}}=30$ м/мин; $t=0,1 \cdot 10^{-3}$ м показали, что для этих же исходных данных параметр шероховатости поверхности $R_a=2,0$ мкм.

Как видно, расчетные значения параметра шероховатости поверхности R_a отличаются от экспериментального значения. Так, при шлифовании алмазным кругом с режущими зернами сферической формы расчетное значение R_a в 1,8 раза меньше экспериментального значения, а при шлифовании алмазным кругом с режущими зернами конусообразной формы, наоборот, расчетное значение R_a в 2,13 раз больше экспериментального значения. Следовательно, расчет параметра шероховатости поверхности R_a необходимо производить по зависимости (3), рассматривая режущие зерна в форме усеченного конуса с учетом безразмерного коэффициента $\eta>0$, т.е. с учетом образования на зернах конусообразной формы “площадок износа”, определяемых величиной линейного износа зерен x и, соответственно, безразмерным коэффициентом $\eta>0$.

Расчеты, выполненные на основе зависимости (2), показали, что экспериментальное значение параметра шероховатости поверхности $R_a=2,0$ мкм достигается при значениях $H_{\text{max}}=19$ мкм и $\eta=0,45$.

Экспериментально установлено, что при алмазном шлифовании с параметрами режима резания $V_{\text{дет}}=1$ м/мин и $t=0,6 \cdot 10^{-3}$ м параметр шероховатости поверхности $R_a=1,5$ мкм. Тогда для зерен сферической формы параметры H_{max} и R_a принимают значения: $H_{\text{max}}=3,21$ мкм и $R_a=0,17$ мкм. Соответственно,

для зерен конусообразной формы (при условии $\eta = 0$): $H_{max} = 18,8$ мкм и $R_a = 1,43$ мкм.

Как видно, расчетное значение R_a для зерен конусообразной формы ($\eta = 0$) незначительно отличается от экспериментально установленного значения. Следовательно, в этом случае шлифование производится алмазным кругом с режущими зернами конусообразной формы фактически с нулевой величиной их линейного износа ($x \rightarrow 0$, $\eta \rightarrow 0$). С физической точки зрения это означает, что в связи с небольшой скоростью детали $V_{дет} = 1$ м/мин режущие зерна фактически не изнашивались, тогда как при увеличении скорости детали до значения $V_{дет} = 10$ м/мин шлифование осуществлялось зернами со значительными «площадками износа», т.е. почти сферическими зернами. Из этого вытекает, что с увеличением скорости детали $V_{дет}$ (соответственно, производительности обработки) в связи с повышенной силовой напряженностью процесса шлифования происходит увеличение площадок износа на режущих зернах. Поэтому при расчете шероховатости поверхности режущие зерна можно рассматривать в форме сферы. При шлифовании алмазным кругом после правки, т.е. острозаточенным кругом, режущие зерна можно рассматривать в форме конуса. При уточненном расчете шероховатости поверхности режущие зерна алмазного круга следует рассматривать в форме усеченного конуса, учитывая размеры образующейся площадки износа на зерне с помощью безразмерного коэффициента η , равного нулю для острозаточенного зерна и изменяющегося в пределах $0 \dots 1$ – для изношенного зерна. Таким образом, теоретически и экспериментально доказано, что для расчета параметра шероховатости поверхности R_a по зависимостям (2) или (3) необходимо знать количественные значения параметра H_{max} или безразмерного коэффициента η .

Расчетами установлено, что при $V_{дет} = 10$ м/мин отношение $H_{max} / R = 0,33$, а при $V_{дет} = 1$ м/мин соответственно $H_{max} / R = 0,188$. Согласно известным экспериментальным данным профессоров Крагельского И. В. и Богомолова Н. И., в первом случае процесс стружкообразования при резании протекает в устойчивом режиме, тогда как во втором случае имеет место переход от процесса упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала (без образования микростружек) к процессу стружкообразования при резании. Этим обусловлена незначительная силовая напряженность процесса шлифования и соответственно образование незначительных площадок износа на режущих зернах круга. Следовательно, уменьшение отношения H_{max} / R приводит к уменьшению шероховатости обработанной поверхности, чем, собственно, и объясняется эффективность применения на финишных операциях обработки деталей машин процессов абразивного полирования и доводки, обеспечивающих существенное уменьшение шероховатости обработанной поверхности.

Выводы. В работе приведены аналитические зависимости для определения параметра шероховатости поверхности R_a при шлифовании, полученные на основе теоретико-вероятностного подхода при моделировании режущих зерен круга в форме конуса и сферы. Показано, что моделирование режущих зерен круга в форме сферы приводит к заниженным значениям параметра шероховатости поверхности R_a , а моделирование режущих зерен круга в форме конуса, наоборот, к завышенным значениям параметра R_a по сравнению с экспериментальными данными. Поэтому для определения параметра R_a при шлифовании алмазным кругом после правки предложено режущие зерна рассматривать в форме конуса, а после приработки круга и их износа – в форме сферы.

При уточненном расчете шероховатости поверхности режущие зерна круга следует рассматривать в форме усеченного конуса, учитывая размеры образующейся площадки износа на зерне с помощью безразмерного коэффициента, равного нулю для острозаточенного зерна и изменяющегося в пределах $0 \dots 1$ – для изношенного зерна. На основе полученных результатов исследований даны практические рекомендации по уменьшению шероховатости поверхности при шлифовании.

Список литературы:

1. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
2. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 245 с.
3. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
4. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 212 с.
5. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с.
6. Новиков Ф. В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / Ф. В. Новиков. – Одесса, 1995. – 36 с.
7. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування: монографія / Ф. В. Новіков. – Х.: Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с.

References (transliterated)

1. Maslov Ye.N. Teoriya shlifovaniya metallov / Ye.N. Maslov. – M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 319 s.
2. Filimonov L.N. Vysokoskorostnoye shlifovaniye / L.N. Filimonov. – L.: Mashinostroyeniye, 1979. – 245 s.
3. Yakimov A.V. Optimizatsiya protsesssa shlifovaniya / A.V. Yakimov. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 175 s.
4. Korolev A.V. Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke / A.V. Korolev. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. – 212 s.
5. Novoselov Yu.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke / Yu.K. Novoselov. – Saratov, 1979. – 232 s.
6. Novikov F.V. Fizicheskiye i kinematcheskiye osnovy vysokoproduktivnogo almaznogo shlifovaniya: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk: spets. 05.03.01 «Protsepsy mekhanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty» / F.V. Novikov. – Odessa, 1995. – 36 s.
7. Novіkov F. V. Visokoproduktivne almazne shlifuvannya : monografiya / F. V. Novіkov. – Kh.: Vid. KhNEU, 2014. – 412 s.

Поступила (received) 26.10.2017