УДК 621.923

*В.Г. Шкурупий*

# АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОМ ПОЛИРОВАНИИ С УЧЕТОМ ИЗНОСА ЗЕРЕН

В работе получено новое теоретическое решение об определении параметров шероховатости обрабатываемой поверхности при абразивном полировании с учетом износа абразивных зерен. Установлено, что образование в процессе обработки на абразивных зернах площадок износа приводит к существенному уменьшению параметров шероховатости поверхности. Показано, что применение сферических и овализованных абразивных зерен следует рассматривать существенным фактором сглаживания микронеровностей на обрабатываемой поверхности образца в процессе абразивного полирования. Показано, что полученное решение справедливо для абразивного полирования с фиксированной скоростью радиальной подачи и с фиксированным радиальным усилием.

***Ключевые слова:*** абразивное полирование, износ зерен, площадки износа, шероховатость поверхности

**Введение.** Эффективным методом финишной обработки деталей машин, обеспечивающим сглаживание микронеровностей на обрабатываемых поверхностях и получение высоких показателей шероховатости поверхности, является абразивное полирование. Однако, технологические возможности этого прогрессивного метода при обработке материалов с повышенными физико-механическими свойствами используются не в полной мере. Это затрудняет создание поверхностей деталей с высокой светоотражательной способностью, например, зеркал лазерных установок, которые изготавливаются из меди и ее сплавов, молибдена, бериллиевых и других сплавов с обеспечением высокой отражательной способности поверхностей. В связи с этим, исследование новых резервов абразивного полирования с точки зрения существенного снижения шероховатости обрабатываемых поверхностей является актуальной задачей технологии машиностроения.

**Анализ последних исследований и литературы.** Проблеме формообразования поверхностей и съема металла при абразивном полировании в научно-технической литературе уделено значительно меньше внимания, чем при шлифовании. В работах [1 – 3] рассмотрены вопросы снижения шероховатости поверхности при абразивном полировании на основе анализа результатов экспериментальных исследований. Формализованная математическая теория формообразования поверхностей и съема металла при абразивном полировании в настоящее время отсутствует. Это ограничивает возможности поиска оптимальных условий обработки, позволяющих существенно уменьшить шероховатость поверхности. Поэтому актуальным является решение задачи определения параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании с позиции теории вероятностей с учетом реальной геометрической формы абразивных зерен, т.е. с учетом образующихся на них площадок износа.

**Целью** исследования является теоретическое обоснование условий существенного уменьшения шероховатости обрабатываемых поверхностей при абразивном полировании с учетом оценки влияния износа зерен на шероховатость поверхности. В связи с этим поставлена задача на основе теоретических решений, приведенных в работе [4], определить влияние на шероховатость поверхности образующихся в процессе обработки на абразивных зернах площадок износа. В работе [5] произведена такая оценка применительно к процессу шлифования. Однако процесс абразивного полирования отличается от процесса шлифования и поэтому использование полученных решений при полировании затруднено.

**Материалы исследований.** Для определения параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании использована аналитическая функция, описывающая вероятность неудаленного металла с поверхности обрабатываемого образца [4], т.е. определяющая долю оставшегося на обрабатываемой поверхности металла в виде микронеровностей:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2\cdot tg\gamma\cdot n}{B}\cdot y}, \qquad (1)$$

где $2\gamma$ − угол при вершине конусообразной части режущего зерна; $n$ – количество абразивных зерен, участвующих в процессе резания; $B$ − ширина образца, м; $y$ − координата, отсчитываемая от вершины режущего зерна, м.

В связи со значительным влиянием геометрической формы зерен на шероховатость обработанной поверхности, важно оценить роль образующихся в процессе обработки площадок износа на зернах на закономерности формирования шероховатости поверхности (рис 1). Для этого в зависимости (1) вместо величины $y$ следует рассматривать величину $(x + 2\cdot tg\gamma\cdot y)$, где $x$ – длина площадки износа на абразивном зерне, м.

Тогда зависимость (1) опишется:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{(x+2tg\gamma\cdot y)\cdot n}{B}}. \qquad (2)$$

© В.Г. Шкурупий, 2015

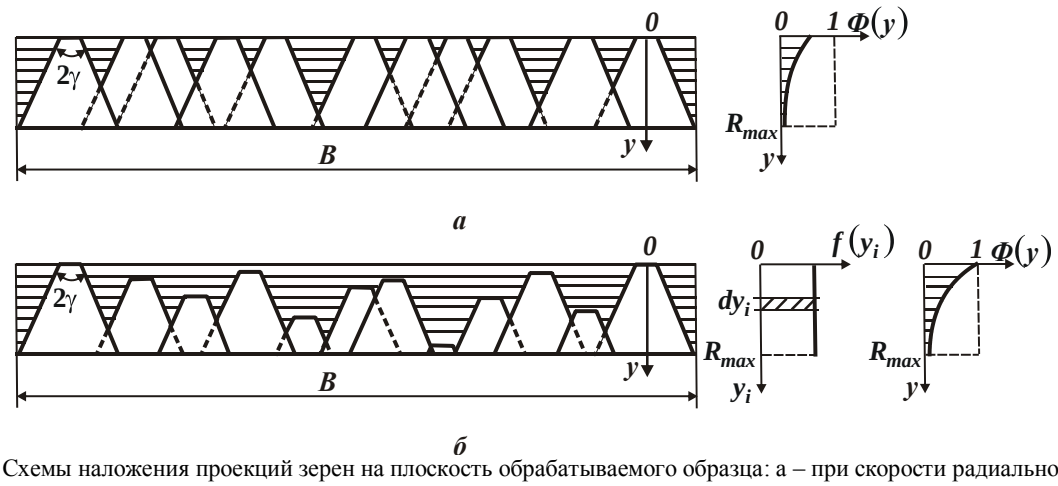


Рис. 1 – Схемы наложения проекций зерен на плоскость обрабатываемого образца: а – при скорости радиальной подачи $S_{рад}$=0; б – при скорости радиальной подачи $S_{рад}$>0

Поскольку обрабатываемый образец в радиальном направлении перемещается со скоростью радиальной подачи $S_{рад}$, закономерности формирования шероховатости поверхности можно описать с использованием суммарной вероятностной функции $\Phi(y)$, образованной элементарными функциями $\Phi_i(y)$, описываемыми зависимостью (2) с позиции теории вероятностей:

$$\Phi(y)=\prod_{i=1}^{n}\Phi_i(y)=e^{-\frac{n}{B\cdot R_{max}}\cdot\int_0^y[x+tg\gamma\cdot(y-y_i)]dy_i}=$$

$$=e^{-\frac{n\cdot y}{B\cdot R_{max}}\cdot(x+tg\gamma\cdot y)}, \qquad (3)$$

где $dn_i=n\cdot f(y_i)\cdot dy_i$; $n$ – общее количество абразивных зерен, которые проконтактировали с обрабатываемым образцом за время его перемещения со скоростью $S_{рад}$ в вертикальном направлении на величину $R_{max}$, равную максимальной высоте микронеровностей обрабатываемой поверхности:

$$n=k\cdot B\cdot V_{инстр}\cdot\tau=k\cdot B\cdot V_{инстр}\cdot\frac{R_{max}}{S_{рад}}; \qquad (4)$$

$k$ – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности инструмента, шт./м$^2$; $B$ – ширина образца, м; $V_{инстр}$ – скорость перемещения инструмента, м/с; $\tau=R_{max}/S_{рад}$– время обработки, с; $f(y_i)=1/R_{max}$ – плотность распределения высот вершин зерен, которые проконтактировали с обрабатываемым образцом и оставили на нем свои проекции.

Из условия равенства площадей $F_1$ и $F_2$ определяется положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности $y=a$ (рис. 2). Наибольшая впадина микропрофиля соответствует значению $y$ =0, а наибольший выступ микропрофиля соответствует значению $y=R_{max}$. Тогда

$$a=\int_0^{R_{max}}\Phi(y)\cdot dy=\int_0^{R_{max}}e^{-\frac{n}{B\cdot R_{max}}\cdot\left(x\cdot y+tg\gamma\cdot y^2\right)}\cdot dy. \qquad (5)$$

Аналитически вычислить данный интеграл не представляется возможным, поэтому необходимо использовать численные расчеты. Однако они ограничивают возможности проведения общего теоретического анализа полученного решения.

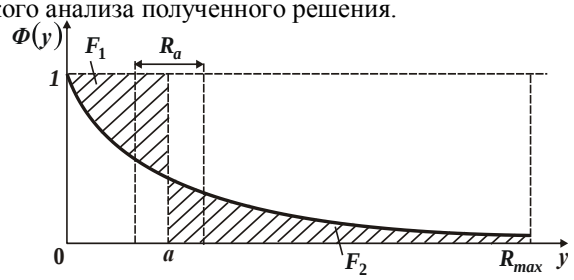


Рис. 2 – Расчетная схема параметра шероховатости поверхности $R_a$

В связи с этим, подинтегральную функцию следует упростить, например, с учетом того, что вследствие значительных площадок износа, образующихся на абразивных зернах, второе слагаемое будет меньше первого и им можно пренебречь. Тогда зависимости (3) и (5) примут вид:

$$\Phi(y)=e^{-\frac{n\cdot x\cdot y}{B\cdot R_{max}}}; \qquad (6)$$

$$a=\int_0^{R_{max}}e^{-\frac{n\cdot x\cdot y}{B\cdot R_{max}}}\cdot dy=\frac{B\cdot R_{max}}{n\cdot x}\cdot\left(1-e^{-\frac{n\cdot x}{B}}\right). \qquad (7)$$

При условии $n\cdot x>B$, что имеет место в реальном процессе абразивного полирования, второе слагаемое зависимости (7) будет меньше первого слагаемого и поэтому им можно пренебречь. Тогда зависимость (7) упростится:

$$a=\frac{B\cdot R_{max}}{n\cdot x}. \qquad (8)$$

Учитывая, что количество абразивных зерен, участвующих в процессе обработки, определяется зависимостью (4), зависимость (8) преобразуется:

$$a=\frac{S_{рад}}{k\cdot V_{инстр}\cdot x}. \qquad (9)$$

параметрами: чем больше $S_{рад}$ и меньше $k$, $V_{инстр}$, $x$, тем больше параметр $a$.

В случае обработки с фиксированным радиальным усилием $P_y$, что типично для процесса абразивного полирования, скорость радиальной подачи $S_{рад}$ определяется зависимостью [6]:

$$S_{рад} = \frac{K_{рез} \cdot P_y \cdot V_{инстр}}{\sigma \cdot F}. \qquad (10)$$

где $K_{рез} = P_z / P_y$ – коэффициент резания; $P_z$, $P_y$ – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н; $\sigma$ – условное напряжение резания, Н/м$^2$; $F$ – фактическая площадь контакта образца с инструментом, м$^2$.

Подставляя зависимость (10) в зависимость (9), получено:

$$a = \frac{K_{рез} \cdot P_y}{\sigma \cdot F \cdot k \cdot x}. \qquad (11)$$

Параметр $a$ тем меньше, чем больше отношение $\sigma / K_{рез}$, параметры $F$, $k$, $x$ и меньше $P_y$.

Параметр $R_a$, исходя из рис. 1, определяется зависимостью:

$$R_a = 2 \cdot F_2 = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy. \qquad (12)$$

Подставляя в нее зависимость (6), получено

$$R_a = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} e^{-\frac{n \cdot x \cdot y}{B \cdot R_{max}}} \cdot dy =$$

$$= \frac{2 \cdot B \cdot R_{max}}{n \cdot x} \cdot \left( e^{-\frac{n \cdot x}{B} \cdot \frac{a}{R_{max}}} - e^{-\frac{n \cdot x}{B}} \right). \qquad (13)$$

Поскольку второе слагаемое зависимости меньше первого слагаемого, то для упрощения анализа в первом приближении им можно пренебречь, тогда зависимость (13) опишется:

$$R_a = \frac{2 \cdot B \cdot R_{max}}{n \cdot x} \cdot e^{-\frac{n \cdot x}{B} \cdot \frac{a}{R_{max}}}. \qquad (14)$$

С учетом зависимостей (9) и (4) имеем

$$R_a = \frac{0{,}735 \cdot S_{рад}}{k \cdot V_{инстр} \cdot x}. \qquad (15)$$

Как видно, основными условиями уменьшения параметра шероховатости поверхности $R_a$ являются уменьшение скорости радиальной подачи $S_{рад}$ и увеличение параметров $k$, $V_{инстр}$ и $x$. Поскольку пределы изменения параметров $k$, $V_{инстр}$ ограничены, то наибольший эффект можно достичь от увеличения длины площадки износа на абразивном зерне $x$.

Сравнивая зависимости (9) и (15), установлено соотношение между параметрами $a$ и $R_a$:

$$R_a = 0{,}735 \cdot a. \qquad (16)$$

**Результаты исследований.** Как следует из зависимости (16), параметр шероховатости поверхности $R_a$ меньше параметра $a$, что свидетельствует о правильности выполненных расчетов. Подставляя в зависимость (15) исходные данные параметров $S_{рад}$, $k$, $V_{инстр}$ и $x$, можно определить параметр шероховатости поверхности $R_a$. Например, для исходных данных: $S_{рад} = 0{,}3$ мм/мин, $k = 10$ шт./мм$^2$; $V_{инстр} = 60$ м/мин; $x = 0{,}01$ мм, рассчитанное по зависимости (15) значение $R_a = 0{,}036$ мкм. Этим показано, что наличие площадок износа на зернах приводит к существенному уменьшению параметра шероховатости поверхности $R_a$, в данном случае почти в 30 раз, рассматривая исходное значение $R_a = 1$ мкм (рис. 3). Следовательно, применение сферических и овализованных абразивных зерен следует рассматривать существенным фактором сглаживания микронеровностей на обрабатываемой поверхности образца в процессе абразивного полирования.

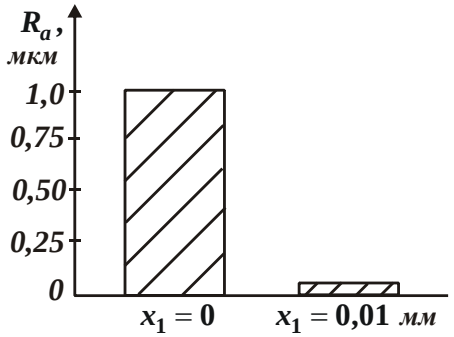


Рис. 3 – Значения параметра шероховатости поверхности $R_a$ для $x_1 = 0$ и $x_1 = 0{,}01$ мм

При обработке с фиксированным радиальным усилием $P_y$ зависимость (15) с учетом зависимости (10) примет вид:

$$R_a = \frac{0{,}735 \cdot K_{рез} \cdot P_y}{\sigma \cdot F \cdot k \cdot x}. \qquad (17)$$

В этом случае образование площадок износа на зернах приводит к уменьшению параметра шероховатости поверхности $R_a$ по двум каналам: за счет увеличения длины площадки износа на зерне $x$ и за счет увеличения отношения $\sigma / K_{рез}$, т.к. резание притупленными абразивными зернами, как известно, характеризуется повышенной силовой напряженностью процесса резания и соответственно увеличением условного напряжения резания $\sigma$. Из этого вытекает, что для выполнения требований по шероховатости поверхности необходимо увеличивать параметры $x$ и $\sigma$, тогда как общеизвестно, что для обеспечения высокопроизводительной обработки необходимо эти параметры уменьшать. Следовательно, требования к назначению параметров $x$ и $\sigma$ по обеспечению наименьшей шероховатости и наибольшей производительности обработки должны быть противоположными.

Полученное теоретическое решение согласуется с известными экспериментальными данными применительно к процессу круглого наружного продольно-

го шлифования цилиндрических деталей из твердого сплава ВК8 [7]. Так, экспериментально установлено, что при шлифовании алмазным кругом на металлической связке 1А1 300х20х5 АС6 125/100 М1-10 4 (после его электроэрозионной правки, а затем обтачивания алмазным правящим карандашом) параметр шероховатости обработки $R_a$ уменьшился с 2,2 до 0,1 мкм, т.е. примерно в 20 раз (кривая 2 на рис. 4). При этом изменение режимов шлифования и приработка круга (кривая 1 на рис. 4) не привели к существенному уменьшению шероховатости обработки. Этим показано, что образование на режущих зернах площадок износа и создание примерно одновысотного выступания режущих зерен над уровнем связки круга путем его обтачивания алмазным правящим карандашом позволяет значительно уменьшить шероховатость обработки. Это открывает новые технологические возможности прецизионной алмазной обработки цилиндрических поверхностей.

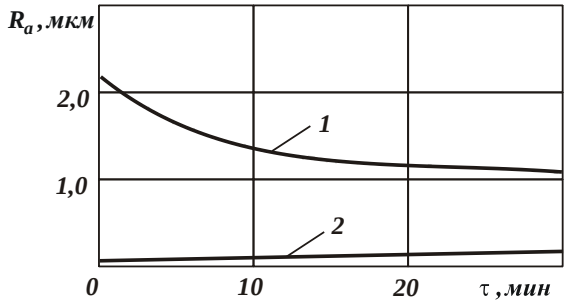


Рис. 4 – Зависимость параметра шероховатости обработки $R_a$ от времени шлифования $\tau$: 1 – после электроэрозионной правки алмазного круга; 2 – после создания площадок на вершинах зерен алмазного круга

Таким образом показано, что независимо от метода абразивной обработки (шлифования или абразивного полирования) создание площадок износа на режущих зернах приводит к существенному уменьшению шероховатости поверхности. Это согласуется с полученными в настоящей работе теоретическими решениями применительно к процессу абразивного полирования.

**Выводы.** В работе на основе вероятностного представления процесса взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым материалом при абразивном полировании получено новое теоретическое решение об определении параметров шероховатости обрабатываемой поверхности с учетом износа абразивных зерен. Установлено, что образование в процессе обработки на абразивных зернах площадок износа приводит к существенному уменьшению параметров шероховатости поверхности. На этой основе определены основные условия эффективного осуществления процесса абразивного полирования. Показано, что полученное решение справедливо для абразивного полирования с фиксированной скоростью радиальной подачи и с фиксированным радиальным усилием. Выполненные численные расчеты параметра шероховатости поверхности $R_a$ подтвердили достоверность полученного решения, которое согласуется с известными экспериментальными данными применительно к процессу круглого наружного продольного шлифования цилиндрических деталей из твердого сплава ВК8.

**Список литературы: 1.** Кедров С. М. Средства повышения производительности доводки металлов / С. М. Кедров // Станки и инструмент, 1987. – No6. – С. 10-13. **2.** Гребенщиков И. В. Роль химии в процессе полирования / И. В. Гребенщиков // Качество поверхности деталей машин: Сб. статей Всесоюзного научно-технического семинара. – М., 1957. – С.17-18. **3.** Исаев А. И. Влияние температуры шлифования на изменение свойств поверхностного слоя деталей / А. И. Исаев, С. С. Силин // Труды МАТИ, 1969. – Вып. 38. – С 32-36. **4.** Новиков Ф.В. Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятностей / Ф.В. Новиков, В.Г. Шкурупий // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. – Х.: НТУ "ХПІ". − 2004. − No 44. − С. 140-149. **5.** Новіков Ф.В. Математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці / Ф.В. Новіков, В.В. Нежебовський, В.Г. Шкурупій // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ "ХПІ". − 2013. − No 5 (979). − С. 199-210. **6.** 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. **7.** Прогресивні технології механічної обробки: монографія / Новіков Ф.В., Крюк А.Г., Шкурупій В.Г. та ін. ; за заг. ред. докт. техн. наук, професора Новікова Ф.В. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2012. – 372 с.

**Bibliography (transliterated): 1.** Kedrov S. M. Sredstva povysheniya proizvoditelnosti dovodki metallov S. M. Kedrov/ Stanki i instrument, 1987. – No6. – pp. 10-13. **2.** Grebenshikov I. V. Rol Khimii v protsesse polirovaniya I. V. Grebenshikov Kachestvo poverkhnosti detaley mashin: Sb. statey Vsesoyuznogo nauchno-tekhnicheskogo seminara. – Moscow, 1957. – pp.17-18. **3.** Isaev A. I. Vliyanie temperatury shlifovaniya na izmenenie svoystv poverkhnostnogo sloya detaley A. I. Isaev, S. S. Silin Trudy MATI, 1969. –Publ. 38. – pp. 32-36. **4.** Novikov F.V. Issledovaniy sherokhovatosti poverkhnosti pri almaznoabrazivnoy obrabotke metodami teoriy veroyatnostey F.V. Novikov, V.G. Shkurupiy Visnyk NTU "KhPI". Zbirnyk naukovykh prats. – Kharkov: NTU "KhPI". − 2004. − No 44. − pp. 140-149. **5.** Novikov F.V. Matematychna model vyznachennya shorstkosti poverkhni pri abrazyvniy obrobtsi F.V. Novikov, V.V. Nezhebovskiy, V.G. Shkurupiy Visnyk NTU "KhPI". Zbirnyk naukovykh prats. Sepriya: Matematychne modeliavannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh. – Kharkov: NTU "KhPI". − 2013. − No 5 (979). − pp. 199-210. **6.** Novikov F.V. Fizicheskie i kinematicheskie osnovy vysokoproizvoditelnogo almaznogo shlifovaniya: avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni dokt. tekhn. nauk: spets. 05.03.01 "Protsessy mekhanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty" / F.V. Novikov. − Odessa, 1995. – 36 p. **7.** Progresyvni tekhnologiy mekhanichnoy obrobky: monografiya Novikov F.V., Kruik A.G., Shkurupiy V.G. ta in.; za zag. red. dokt. tekhn. nauk, profesora Novikova F.V. – Kharkov: Vyd. KNEU, 2012. – 372 p.

*Поступила* (received) 28.03.2015

**Шкурупий Валентин Григорьевич** – канд. техн. наук, доцент ХНЭУ, Харьков, тел.: (057)-3361415.