

**В. Г. Шкурупий**, канд. техн. наук, доцент, ХНЭУ, Харьков

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

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. Показано, что применение сферических и овализованных абразивных зерен следует рассматривать существенным фактором сглаживания микронеровностей на обрабатываемой поверхности образца в процессе абразивного полирования. 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 параметров шероховатости поверхности подтвердили достоверность полученного решения.

**Ключевые слова:** абразивное полирование, износ зерен, площадки износа, шероховатость поверхности, радиальное усилие, скорость радиальной подачи

**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 существенно-го снижения шероховатости обрабатываемых поверхностей является актуальной задачей технологии машиностроения.

**Анализ основных достижений 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 ше-

роховатость поверхности. Поэтому актуально 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.

**Цель исследования, постановка задачи.** 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 неударенного металла с поверхности обрабатываемого образца [4], т.е. определяющая долю оставшегося на обрабатываемой поверхности металла в виде микронеровностей:

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

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. Для этого в зависимости (1) вместо величины  $y$  следует рассматривать величину  $(x + 2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot y)$ , где  $x$  – длина площадки износа на абразивном зерне, м. Тогда зависимость (1) опишется:

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

Поскольку обрабатываемый образец в радиальном направлении перемещается со скоростью радиальной подачи  $S_{\text{рад}}$ , 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:

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^n \Phi_i(y) = e^{-\frac{n}{B \cdot R_{\text{max}}} \int_0^y [x + 2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot (y - y_i)] dy_i} = e^{-\frac{n \cdot y}{B \cdot R_{\text{max}}} \cdot (x + \text{tg} \gamma \cdot y)}, \quad (3)$$

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  $S_{pad}$  в вертикальном направлении на величину  $R_{max}$ , равную максимальной высоте микронеровностей обрабатываемой поверхности:

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

$k$  – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности инструмента, шт./м<sup>2</sup>;  $B$  – ширина образца, м;  $V_{инстр}$  – скорость перемещения инструмента, м/с;  $\tau = R_{max} / S_{pad}$  – 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. 1). Наибольшая впадина микропрофиля соответствует значению  $y = 0$ , а наибольший выступ микропрофиля соответствует значению  $y = R_{max}$ . Тогда

$$a = \int_0^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \int_0^{R_{max}} e^{-\frac{n}{B \cdot R_{max}} \cdot (x \cdot y + t g \gamma \cdot y^2)} \cdot dy. \quad (5)$$

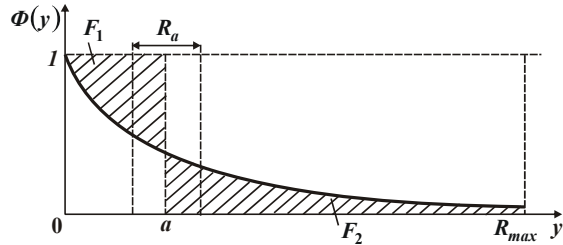


Рисунок 1 – Расчетная схема параметра шероховатости поверхности  $R_a$

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

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

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

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:

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

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

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

Как видно, положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности  $y = a$  определяется четырьмя параметрами: чем больше  $S_{pad}$  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  $S_{pad}$  определяется зависимостью [6]:

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

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<sup>2</sup>;  $F$  – фактическая площадь контакта образца с инструментом, м<sup>2</sup>.

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

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

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:

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

Подставляя в нее зависимость (6), получено

$$R_a = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} e^{-\frac{n \cdot x \cdot y}{B \cdot R_{max}}} \cdot dy = \frac{2 \cdot B \cdot R_{max}}{n \cdot x} \cdot \left( e^{-\frac{n \cdot x}{B} \cdot \frac{a}{R_{max}}} - e^{-\frac{n \cdot x}{B}} \right). \quad (13)$$

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

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

С учетом зависимостей (9) и (4) имеем

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

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

$$R_a = 0,735 \cdot a \quad (16)$$

**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<sup>2</sup>;  $V_{инстр} = 60$  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  $R_a$ . Следовательно, применение сферических и овальных абразивных зерен следует рассматривать существенным фактором сглаживания микронеровностей на обрабатываемой поверхности образца в процессе абразивного полирования.

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

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

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 пара-

метры уменьшать. Следовательно, требования к назначению параметров  $x$  и  $\sigma$  по обеспечению наименьшей шероховатости и наибольшей производительности обработки должны быть противоположными.

**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.

**Список использованных источников:** 1. Кедров С. М. Средства повышения производительности доводки металлов / С. М. Кедров // Станки и инструмент, 1987. – №6. – С. 10-13. 2. Гребенищikov И. В. Роль химии в процессе полирования / И. В. Гребенищikov // Качество поверхности деталей машин: Сб. статей Всесоюзного научно-технического семинара. – М., 1957. – С. 17-18. 3. Исaев А. И. Влияние температуры шлифования на изменение свойств поверхностного слоя деталей / А. И. Исaев, 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. Шкурupий // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2004. – № 44. – С. 140-149. 5. Новиков Ф. В. Математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці / Ф. В. Новиков, В. В. Нежебовський, В. Г. Шкурupий // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2013. – № 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.

**Bibliography:** 1. Kedrov S. M. Sredstva povysheniya proizvoditelnosti dovodki metallov / S. M. Kedrov // Stanki i instrument, 1987. – №6. – S. 10-13. 2. Grebenshikov I. V. Rol Khimii v protsesse polirovaniya / I. V. Grebenshikov // Kachestvo poverkhnosti detaley mashin: Sb. statey Vsesoyuznogo nauchno-tekhnicheskogo seminar. – M., 1957. – S. 17-18. 3. Isaev A. I. Vliyanie temperatury shlifovaniya na izmenenie svoystv poverkhnostnogo sloya detaley / A. I. Isaev, S. S. Silin // Trudy MATI, 1969. – Вып. 38. – S. 32-36. 4. Novikov F. V. Issledovaniya sherokhovatosti poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke metodami teorii veroyatnostey / F. V. Novikov, V. G. Shkurupiy // Visnyk NTU “KhPI”. Zbirnyk naukovykh prats. – Kh.: NTU “KhPI”. – 2004. – № 44. – S. 140-149. 5. Novikov F. V. Matematychna model vyznachennya shorstkosti poverkhnii pri abrazyvniy obrobtsi / F. V. Novikov, V. V. Nezhebovskiy, V. G. Shkurupiy // Visnyk NTU “KhPI”. Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Matematychne modelivannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh. – Kh.: NTU “KhPI”. – 2013. – № 5 (979). – S. 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 “Protssy mekhanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty” / F. V. Novikov. – Odessa, 1995. – 36 s.

Надійшла (received) 26.03.2015