

УДК 621.923

В.Г. Шкурупий, канд. техн. наук, Харьков, Украина

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗНОСА ЗЕРЕН НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОМ ПОЛИРОВАНИИ**

*Наведено теоретичне рішення щодо визначення параметрів шорсткості поверхні при абразивному поліруванні з фіксованим радіальним зусиллям і з урахуванням зносу абразивних зерен. Встановлено значний вплив на величину шорсткості поверхні в процесі обробки площадок зносу, які утворюються на абразивних зернах, що є важливим чинником зменшення шорсткості поверхні. Чисельні розрахунки параметра шорсткості поверхні підтвердили достовірність отриманого теоретичного рішення.*

*Приведено теоретическое решение по определению параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании с фиксированным радиальным усилием и с учетом износа абразивных зерен. Установлено значительное влияние на величину шероховатости поверхности образующихся в процессе обработки на абразивных зернах площадок износа, что является важным фактором уменьшения шероховатости поверхности. Численные расчеты параметра шероховатости поверхности  $R_a$  подтвердили достоверность полученного теоретического решения.*

*A theoretical solution for the characterization of surface roughness in abrasive polishing with a fixed radial force and taking into account the wear of abrasive grains. A considerable influence on the value of surface roughness formed during the processing by the abrasive grains of wear pads, which is an important factor in reducing the surface roughness. Numerical calculations of the roughness parameter confirmed the accuracy of the obtained theoretical solutions.*

**Введение.** Абразивное полирование является эффективным методом финишной обработки деталей машин, обеспечивающим сглаживание микронеровностей на обрабатываемых поверхностях, образованных на предыдущих операциях шлифования и лезвийной обработки, и получение высоких показателей шероховатости поверхности. Вместе с тем, технологические возможности абразивного полирования при обработке материалов с повышенными физико-механическими свойствами используются не в полной мере, что затрудняет, в частности, создание поверхностей деталей с высокой светоотражательной способностью (зеркала лазерных установок, которые изготавливаются из меди и ее сплавов, молибдена, бериллиевых и других сплавов с обеспечением высокой отражательной способности поверхностей). Поэтому расширение технологических возможностей абразивного полирования с точки зрения существенного снижения шероховатости обрабатываемых поверхностей является актуальной задачей технологии машиностроения.

**Анализ основных достижений и литературы.** В отличие от процессов шлифования, вопросам формообразования поверхностей и съема металла при абразивном полировании в научно-технической литературе уделено значительно меньше внимания. В известных работах [1 – 3] вопросы снижения шероховатости поверхности при абразивном полировании рассматриваются, как правило, на основе анализа результатов экспериментальных исследований. Формализованная математическая теория формообразования поверхностей и съема металла при абразивном полировании в настоящее время отсутствует, что ограничивает возможности поиска оптимальных условий обработки, позволяющих существенно уменьшить шероховатость поверхности. В связи с этим представляется важным решение задачи аналитического описания 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. Научной предпосылкой решения данной задачи следует рассматривать теоретический подход к определению параметров шероховатости поверхности, предложенный в работе [4].

**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. Необходимо отметить, что 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. Необходимо получить новые решения.

**Материалы исследований.** В работе [4] установлено, что функция, описывающая вероятность неударенного металла с поверхности обрабатываемого образца, т.е. определяющая долю оставшегося на обрабатываемой поверхности металла в виде микронеровностей, имеет вид:

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

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.

Учитывая значительное влияние геометрической формы абразивных зерен на шероховатость обработанной поверхности, оценим роль образующихся в процессе обработки площадок износа на зернах на

закономерности формирования шероховатости поверхности. Для этого в зависимости (1) вместо величины  $y$  будем рассматривать величину  $(x + 2 \cdot tg\gamma \cdot y)$ , где  $x$  – длина площадки износа на абразивном зерне, м. Тогда зависимость (1) примет вид:

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

С учетом перемещения обрабатываемого образца в радиальном направлении со скоростью радиальной подачи  $S_{рад}$ , закономерности формирования шероховатости обрабатываемой поверхности можно аналитически описать с использованием суммарной вероятностной функции  $\Phi(y)$ , образованной элементарными функциями  $\Phi_i(y)$ , описываемыми зависимостью (2) с позиции теории вероятностей:

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

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

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

$k$  – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности инструмента, шт./м<sup>2</sup>;  $B$  – ширина образца, м;  $V_{инстр}$  – скорость перемещения инструмента, м/с;  $\tau = R_{max}/S_{рад}$  – 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.

Положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности  $y = a$  (рис. 1) определится из условия равенства площадей  $F_1$  и  $F_2$ . В этом случае наибольшая впадина микропрофиля соответствует значению  $y = 0$ , а наибольший выступ микропрофиля соответствует значению  $y = R_{max}$ . Тогда

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

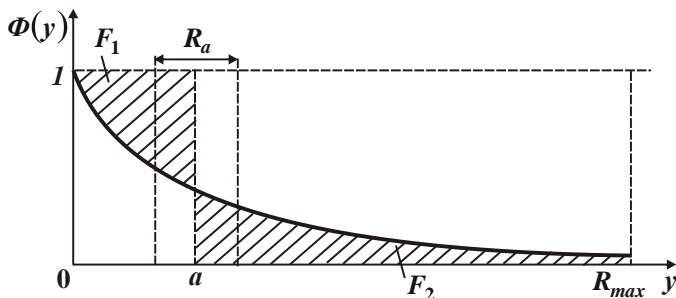


Рисунок 1 – Расчетная схема параметра шероховатости поверхности  $R_a$

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 обрабатываемого 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 шероховатости поверхности  $R_a$ , исходя из рис. 1, в общем виде 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

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

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

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

С учетом зависимостей (9) и (4) имеем

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

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

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

Как видно, параметр  $R_a$  меньше параметра  $a$ , что свидетельствует о правильности выполненных расчетов. Подставляя в зависимость (15) исходные данные параметров  $S_{pad}$ ,  $k$ ,  $V_{инстр}$  и  $x$ , можно определить параметр шероховатости поверхности  $R_a$ . Например, для исходных данных:  $S_{pad} = 0,3$  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 овализованных 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 зёрнами, 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.

**Выводы.** В работе получено теоретическое решение по определению параметров шероховатости обрабатываемой поверхности при абразивном полировании с учетом износа абразивных зерен. Установлено значительное влияние на величину шероховатости поверхности образующихся в процессе обработки на абразивных зернах площадок износа, что является важным фактором уменьшения шероховатости поверхности. Показано, что полученное решение справедливо для абразивного полирования как с фиксированной скоростью радиальной подачи, так и с фиксированным радиальным усилием. Приведенные численные расчеты параметра шероховатости поверхности  $R_a$  указывают на достоверность полученного теоретического 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. *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. – № 44. – С. 140-149. 5. *Новиков Ф.В.* Математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці / *Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовський, В.Г. Шкурупий* // 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 (transliterated):** 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. – Vyp. 38. – S. 32-36. 4. *Novikov F.V.* Issledovaniy sherokhotvosti poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke metodami teorii veroyatnostey / *F.V. Novikov, V.G. Shkurupiy* // Visnyk NTU “KhPI”. Zbirnyk naukovykh prats. – Kh.: NTU “KhPI”. – 2004. – S. 140-149. 5. *Novikov F.V.* Matematychna model vyznachennya shorstkosti poverkhnii pri abrazyvniy obrobtsti / *F.V. Novikov, V.V. Nezhebovskiy, V.G. Shkurupiy* // Visnyk NTU “KhPI”. Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Matematychno modelivannya v tekhnitsi ta tehnologiyakh. – 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 “Protsesty mekhanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty” / *F.V. Novikov.* – Odessa, 1995. – 36 s.

*Поступила в редколлегию 23.10.2014*