

УДК 621.923

**В. Г. ШКУРУПІЙ**, канд. техн. наук, ХНЭУ;  
**Ф. В. НОВИКОВ**, докт. техн. наук, ХНЭУ;  
**А. Г. КРЮК**, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗЕРНИСТОСТИ АБРАЗИВА НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ**

В работе с позиции теории вероятностей получены аналитические зависимости для определения параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке, рассматривая режущие зерна в форме сферы. Произведена оценка влияния зернистости абразивных зерен на шероховатость поверхности. Теоретически установлено, что с уменьшением зернистости абразивного порошка параметры шероховатости поверхности уменьшаются фактически по линейной зависимости. Это указывает на возможность фактически неограниченного уменьшения шероховатости поверхности с уменьшением зернистости абразивного порошка. Установлено также существенное влияние скорости радиальной подачи на шероховатость поверхности.

**Ключевые слова:** абразивная обработка, абразивное зерно, зернистость, шероховатость поверхности, скорость радиальной подачи.

**Введение.** Как известно, шероховатость поверхности при обработке свободным абразивом зависит в основном от зернистости абразива: чем она меньше, тем меньше высота образующихся микронеровностей на обрабатываемой поверхности. Этим обусловлено широкое применение абразивной обработки на финишных операциях с целью достижения высоких показателей шероховатости поверхности. Однако при этом важно знать предельные возможности уменьшения высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности с уменьшением зернистости абразива, т.е., по сути, границы применимости методов обработки свободным абразивом, что требует проведения дальнейших исследований.

**Анализ последних достижений и литературы.** В работах [1 – 3] предложен теоретико-вероятностный подход к математическому описанию параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке. Получены зависимости для определения параметров шероховатости поверхности при обработке свободным абразивом, однако в них отсутствует зернистость абразива, что не позволяет выявить и обосновать условия уменьшения шероховатости поверхности. В связи с этим, представляется актуальной задача разработки новой математической модели определения параметров шероховатости поверхности с позиции теории вероятностей с учетом зернистости абразива.

**Цель работы, постановка проблемы.** Целью работы является теоретическое определение условий уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке с учетом зернистости абразива.

**Матеріали дослідження.** Як показує практика абразивного полірування, зернистість зерен оказує домінуюче впливання на шероховатість поверхності. Поэтому важно оценить роль зернистости зерен в формировании шероховатости поверхности. Для этого необходимо моделировать абразивные зерна в форме сферы. Тогда профиль проекции зерна на плоскость обрабатываемого образца будет описываться окружностью с радиусом  $R$ , уравнение которой в системе координат  $x'oy'$  имеет вид:  $x'^2 + y'^2 = R^2$ . Длина проекции зерна равна:  $2x' = 2 \cdot \sqrt{R^2 - y'^2}$ . Соответственно элементарная функция  $\Phi_i(y')$ , определяющая вероятность не удаленного с обрабатываемой поверхности металла (оставшегося в виде микронеровностей)

описується (рис. 1) [4]:  $\Phi_i(y') = 1 - \frac{2 \cdot \sqrt{R^2 - y'^2}}{B}$ ;  $\Phi_i(y) = 1 - \frac{2 \cdot R \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2}}{B}$ , замінюючи  $y'$  на  $y = R - y'$ .

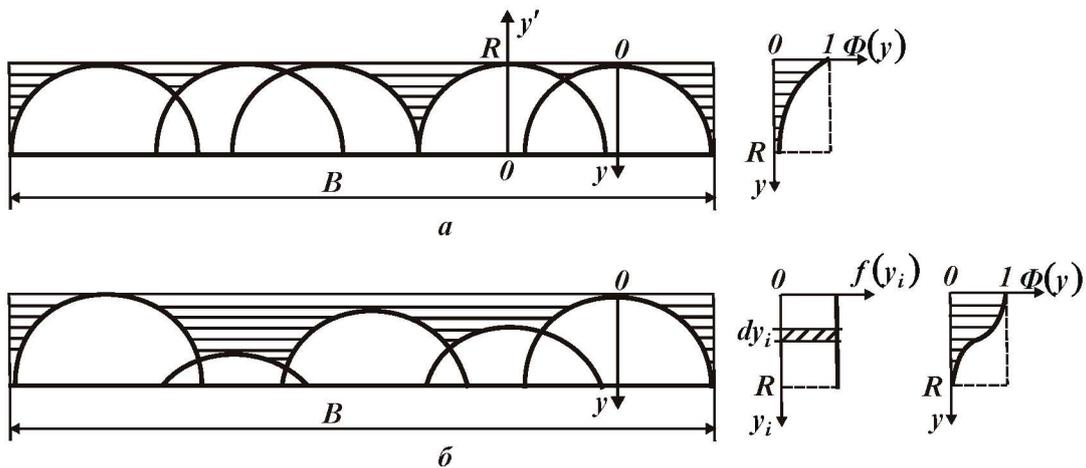


Рис. 1 – Схеми наложения проекций зерен на плоскость обрабатываемого образца при скорости радиальной подачи: а – при  $S_{rad}=0$  и б – при  $S_{rad}>0$

Суммарная вероятностная функция  $\Phi(y)$  описується залежністю [4]:

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^n \Phi_i(y) = \left[ 1 - \frac{2 \cdot R \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2}}{B} \right]^n = e^{-\frac{2 \cdot R \cdot n}{B} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2}} = e^{-N \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2}}, \quad (1)$$

где  $N = \frac{2 \cdot R \cdot n}{B}$  – число, определяющее во сколько раз суммарная длина оснований проекций  $n$  зерен на вертикальную плоскость  $2 \cdot R \cdot n$  будет больше ширины обрабатываемого образца  $B$  на уровне  $y = R$ .

Расчетами установлено, что с увеличением величины  $y/R$  функция  $\Phi(y)$  уменьшается тем интенсивнее, чем больше число  $N$  (рис. 2).

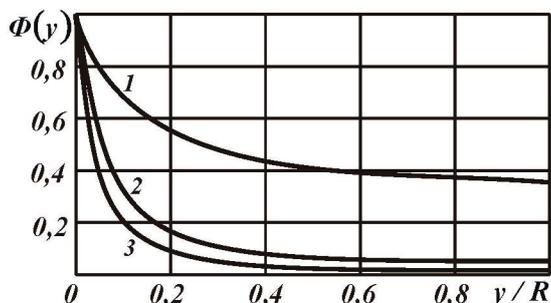


Рис. 2 – Функция  $\Phi(y)$  для различных значений  $N$ : 1 –  $N=1$ ; 2 –  $N=3$ ; 3 –  $N=4$

Положение средней линии  $y = a$ , которая разделяет микропрофиль обработанной поверхности на две части таким образом, что заштрихованные на рис. 4 площади  $F_1$  и  $F_2$  равны между собой, определяется зависимостью [4]:

$$a = \int_0^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \int_0^{R_{max}} e^{-\frac{2 \cdot R \cdot n}{B} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{y}{R}\right)^2}} \cdot dy. \quad (2)$$

Наибольшая впадина микропрофиля соответствует  $y=0$ , а наибольший выступ микропрофиля –  $y=R_{max}$ . Параметр шероховатости поверхности  $R_a$  (рис. 3) определяется:

$$R_a = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} e^{-\frac{2 \cdot R \cdot n}{B} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{y}{R}\right)^2}} \cdot dy. \quad (3)$$

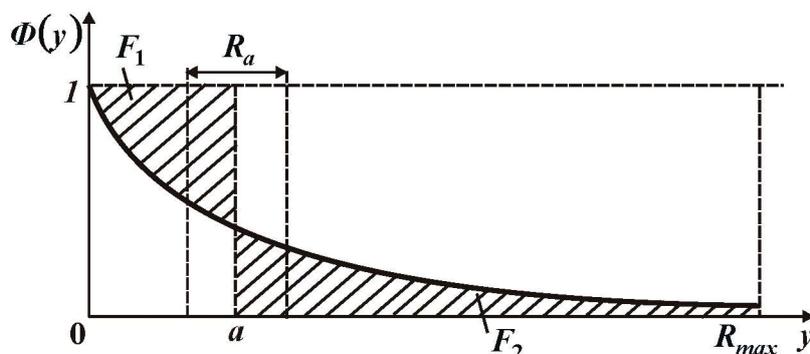


Рис. 3 – Расчетная схема параметра шероховатости поверхности  $R_a$ .

Однако, вычислить интегралы (2) и (3) сложно. Поэтому расчет параметров  $a$  и  $R_a$  следует произвести численным методом с учетом того, что параметр  $a$  определяется из условия равенства площадей  $F_1 = F_2$  (рис. 3), а параметр  $R_a$  определяется зависимостью  $R_a = 2 \cdot F_2$ , где  $F_2 = \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy$ . Отсчет площади  $F_1$  следует производить в направлении оси  $oy$  (рис. 3), а площади  $F_2$  – в обратном направлении, начиная с  $y/R_{max}=1$ . Площади  $F_1$  и  $F_2$  необходимо определять по зависимостям:  $F_1 = \sum_{i=1}^{10} [1 - \Phi_i(y)] \cdot \Delta y$ ;  $F_2 = \sum_{j=1}^{10} \Phi_j(y) \cdot \Delta y$ , где  $\Delta y = 0,1 \cdot R$  – интервал разбиения по координате  $y$ ;  $j = 10 - i$  – количество разбиений; значения функции  $\Phi_i(y)$  принимаются из рис. 2.

**Результаты исследований.** Расчетами установлено, что с увеличением  $N$  отношения  $a/R$  и  $R_a/R$  уменьшаются (табл.), что связано с увеличением количества абразивных зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности. С увеличением  $N$  отношение  $R_{max}/R_a$  (принимая  $R = R_{max}$ ) увеличивается, рис. 4. Традиционные для абразивной обработки значения  $R_{max}/R_a = 4 \dots 6$  достигаются при  $N = 2 \dots 3$ .

Таблица. Расчетные значения  $a/R$  и  $R_a/R$

$N$	1	3	4
$a/R$	0,45	0,15	0,05
$R_a/R$	0,4	0,18	0,1

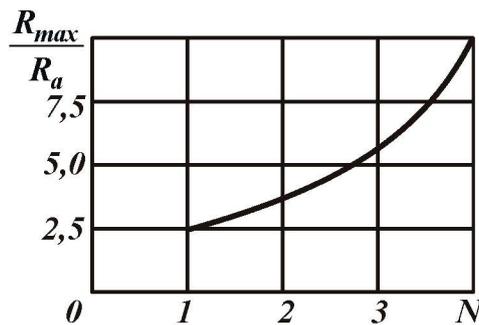


Рис. 4 – Зависимость  $R_{max}/R_a$  от  $N$

Расчетами установлено, что при  $N=4$  параметр  $R_a$  в 20 раз меньше зернистости абразива  $D$ : при  $D=1$  мкм можно обеспечить  $R_a=0,05$  мкм. Однако, на параметр  $R_a$  оказывает влияние скорость радиальной подачи  $S_{рад}$ . Поэтому важно ее учесть в расчетах, условно рассматривая разновысотное

расположение вершин зерен с учетом функции  $\Phi_i(y) = 1 - \frac{2 \cdot R \cdot \sqrt{1 - \frac{[R - (y - y_i)]^2}{R^2}}}{B}$ , где  $y_i$  – координата вершины зерна ( $0 \dots y$ ). Тогда суммарная вероятностная функция  $\Phi(y)$  с учетом  $dn_i = n \cdot f(y_i) \cdot dy_i$ ;  $f(y_i) = 1/R$  определится:

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^n \Phi_i(y) = e^{-\frac{2 \cdot R}{B} \sum_{i=1}^n \sqrt{1 - \frac{[R - (y - y_i)]^2}{R^2}} \cdot dn_i} = e^{-\frac{N}{2} \left[ \arccos\left(1 - \frac{y}{R}\right) - \left(1 - \frac{y}{R}\right) \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2} \right]}. \quad (4)$$

Как следует из рис. 5, функция  $\Phi(y)$  с увеличением величины  $y/R$  уменьшается, принимая большие значения по сравнению со значениями, полученными для  $S_{\text{рад}} = 0$ . Этим показано, что наличие радиальной подачи увеличивает значения  $\Phi(y)$  и увеличивает параметры шероховатости поверхности.

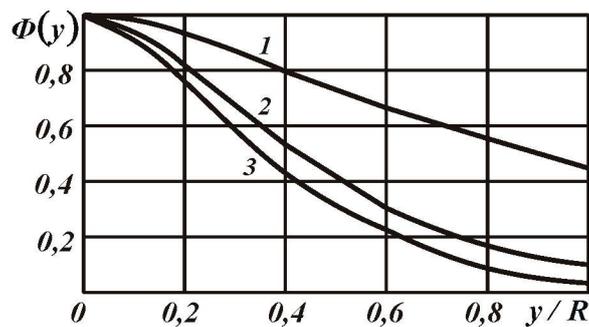


Рис. 5 – Функция  $\Phi(y)$  для различных значений  $N$ : 1 –  $N=1$ ; 2 –  $N=3$ ; 3 –  $N=4$

Установлено, что при моделировании абразивных зерен в виде сферы параметры шероховатости поверхности принимают меньшие значения по сравнению со случаем, когда абразивные зерна моделируются в виде конуса. Это приближает расчетные данные к практическим данным.

**Выводы.** В работе с позиции теории вероятностей получены аналитические зависимости для определения параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке, рассматривая режущие зерна в форме сферы. Произведена оценка влияния зернистости зерен на шероховатость поверхности. Теоретически установлено, что с уменьшением зернистости абразива параметры шероховатости поверхности уменьшаются фактически по линейной зависимости.

**Список литературы:** 1. Королев А.А. Современная технология формообразующего суперфиниширования поверхностей деталей сложного профиля / А.А. Королев. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2001. – 156 с. 2. Королев А.А. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.А. Королев. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975.

– 212 с. **3.** Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с. **4.** 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. – № 5 (979). – С. 199-210.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Korolev A.A. Sovremennaya tekhnologiya formobrazuyushogo superfinishirovaniya poverkhnostey detaley slozhnogo profilya A.A. Korolev. – Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2001. – 156 p. **2.** Korolev A.A. Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke A.A. Korolev. – Saratov: Sarat. un-t, 1975. – 212 p. **3.** Novoselov Y.K. Dinamika formobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke Y.K. Novoselov. – Saratov: Sarat. un-t, 1979. – 232 p. **4.** Novikov F.V. Matematichna model vyznachennia shorstkosti poverkhni pry abrazivniy obrohtsi F.V. Novikov, V.V. Nezhebovskiy, V.G. Shkurupiy Visnyk NTU “KhPI”. Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Matematychno modeliuвання v tekhnitsi ta tekhnologiyakh. – Kharkiv: NTU “KhPI”. – 2013. – No 5 (979). – P. 199–210.

*Поступила (received) 23.10.2014*