

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ****Нежебовский В.В.***(ХНЭУ, г. Харьков, Украина)***Введение**

Общеизвестно, что основным направлением уменьшения шероховатости обрабатываемых поверхностей является применение процессов абразивной обработки: шлифования, хонингования, доводки и других. Благодаря возможности осуществления тончайших срезов отдельными абразивными зёрнами может быть достигнута шероховатость поверхности на уровне  $R_a=0,006$  мкм. Доказано, что наибольшее влияние на шероховатость оказывает зернистость абразивного порошка, в особенности при обработке свободным абразивом (на операциях доводки). Так, с уменьшением зернистости в пределах 60/40...1,0 параметр шероховатости  $R_a$  при доводке алмазным микропорошком твердых сплавов уменьшается с 0,63 до 0,006 мкм [1]. Необходимо отметить, что добиться существенного уменьшения шероховатости поверхности за счет изменения других параметров обработки (скорости резания, подачи, времени обработки) достаточно сложно. Например, увеличение продолжительности притирки абразивным порошком твердосплавных уплотнительных колец [2] с 10 до 30 минут фактически не привело к уменьшению шероховатости поверхности, хотя за это время с обрабатываемой поверхностью проконтактировало чрезвычайно большое количество абразивных зёрен. То же самое наблюдается и при шлифовании на этапе выхаживания: увеличение продолжительности обработки мало сказывается на уменьшении шероховатости поверхности [3]. Из этого вытекает, что шероховатость определяется главным образом зернистостью абразивного порошка.

Целью работы является определение технологических возможностей уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке. Для этого важно раскрыть физическую сущность и закономерности формирования шероховатости поверхности, а также выяснить причины, ограничивающие возможности существенного уменьшения шероховатости поверхности на операциях доводки и шлифования (на этапе выхаживания).

**Основное содержание работы**

Для решения поставленных задач воспользуемся теоретическим подходом к расчету шероховатости поверхности при абразивной обработке, предложенным в работах [4,5]. Рассмотрим схему образования шероховатости поверхности при обработке (доводке) свободным абразивом. Первоначально будем считать, что все абразивные зёрна имеют одинаковую форму и размеры. На рис. 1,а показано положение проекций 10 зёрен на обрабатываемую поверхность без учета их перекрытия. Как видно, при  $y = b$  происходит полный съём обрабатываемого материала и на поверхности образца формируется шероховатый слой толщиной  $b$ , т.е. максимальная высота микронеровностей обработанной поверхности равна величине  $b$ .

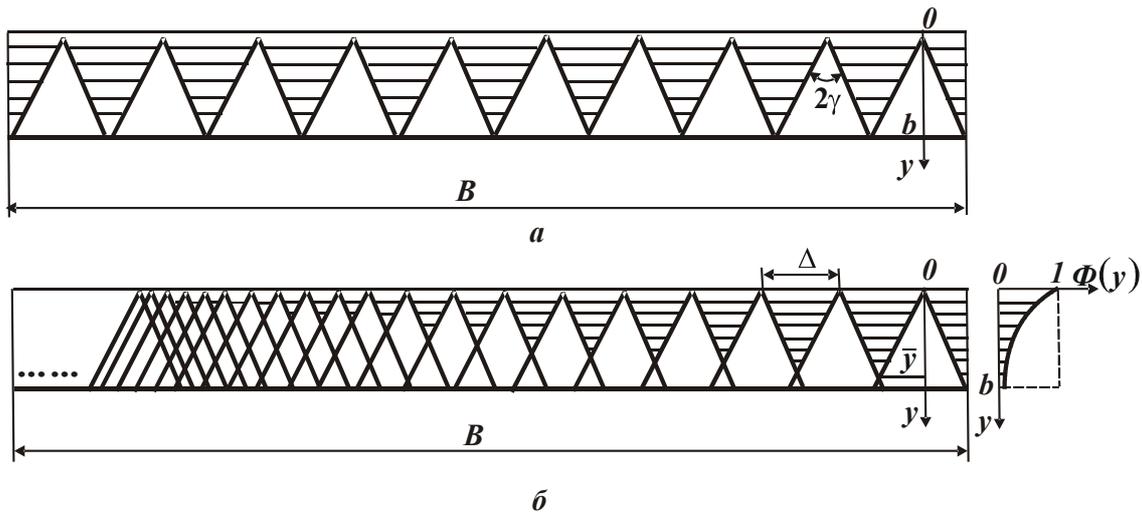


Рис. 1. Схемы формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке

Установим закономерности формирования шероховатости поверхности с учетом наложения и перекрытия проекций зерен в соответствии с положениями теории вероятностей. Для этого определим относительную полноту профиля отдельного зерна, спроектированного на поверхность обрабатываемого образца

$$\varepsilon_i(y) = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot y}{B}, \quad (1)$$

где  $2\gamma$  – угол при вершине конусообразной части режущего зерна;

$B$  – ширина обрабатываемого образца, м;  $y$  – координата, отсчитываемая от вершины режущего зерна, м.

Установим противоположную вероятностной функции  $\varepsilon_i(y)$  функцию  $\Phi_i(y)$

$$\Phi_i(y) = 1 - \varepsilon_i(y) = 1 - \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot y}{B}. \quad (2)$$

Противоположная вероятностная функция  $\Phi(y)$ , которая учитывает наложение и перекрытие проекций  $n$  зерен (расположенных на рабочей поверхности инструмента) (табл. 1), согласно теореме умножения независимых случайных величин [6], примет вид

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^n \Phi_i(y) = \left(1 - \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot y}{B}\right)^n = [1 - \varepsilon_i(y)]^n. \quad (3)$$

Таблица 1. Расчетные значения функции  $\Phi(y)$  в зависимости от количества зерен  $n$  для  $\varepsilon_i(y)=0,1$  и  $y = b$

|           |       |       |       |       |       |          |                      |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------------------|
| $n$       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6        | 7                    |
| $\Phi(y)$ | 0,9   | 0,81  | 0,729 | 0,656 | 0,59  | 0,531    | 0,477                |
| $n$       | 8     | 9     | 10    | 20    | 40    | 80       | 160                  |
| $\Phi(y)$ | 0,429 | 0,386 | 0,347 | 0,12  | 0,144 | 0,000207 | $4,29 \cdot 10^{-8}$ |

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (3) значения функции  $\Phi(y)$  для  $\varepsilon_i(y)=0,1$  и  $y = b$ . Как следует из табл. 1, при  $n=10$  функция  $\Phi(y)$  равна 0,347, тогда как в случае отсутствия перекрытия проекций 10 зерен (рис. 1, а) функция  $\Phi(y) = 0$ . Следовательно, для того чтобы добиться такого же результата в случае наложения и перекрытия проекций зерен, необходимо в контакт с обрабатываемым образцом ввести большее количество зерен. Например, исходя из табл. 1, при  $n = 40 \dots 80$  функция  $\Phi(y)$  принимает весьма малые значения, близкие к нулю, т.е. участие в резании 40... 80-ти зерен позволяет обеспечить полный съём обрабатываемого материала на уровне  $y = b$ .

На рис. 1, б графически показан характер наложения на обрабатываемый образец проекций зерен с учетом их перекрытия. Как видно, с увеличением количества зерен расстояние между их проекциями, определяемое безразмерной величиной  $\Delta / B$ , бесконечно уменьшается. Это вытекает из аналитической зависимости

$$\frac{\Delta}{B} = \Phi_n(y) - \Phi_{n-1}(y), \quad (4)$$

где  $\Phi_n(y) = [1 - \varepsilon_i(y)]^n$ ;  $\Phi_{n-1}(y) = [1 - \varepsilon_i(y)]^{n-1}$ .

После несложных преобразований зависимость (4) принимает вид

$$\frac{\Delta}{B} = \Phi_{n-1}(y) \cdot \varepsilon_i(y). \quad (5)$$

В табл. 2 приведены рассчитанные по зависимости (5) значения  $\Delta / B$  с учетом значений  $\Phi_{n-1}(y)$ , приведенных в табл. 1. Как видно, чем больше количество зерен  $n$ , тем меньше  $\Delta / B$ .

Таблица 2. Расчетные значения расстояния между проекциями зерен  $\Delta / B$  для  $\varepsilon_i(y) = 0,1$  и  $y = b$

|              |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $n$          | 2    | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |
| $\Delta / B$ | 0,09 | 0,081 | 0,073 | 0,066 | 0,059 | 0,053 | 0,048 | 0,043 | 0,038 | 0,035 |

Из рис. 1, б видно, что высоты отдельных микронеровностей обработанной поверхности  $\bar{y}$  с увеличением  $n$  уменьшаются. Это следует из расчетной зависимости

$$\bar{y} = \frac{\Delta}{2} \cdot \operatorname{tg} \gamma, \quad (6)$$

согласно которой величина  $\bar{y}$  вполне однозначно определяется расстоянием между проекциями двух соседних зерен  $\Delta$ .

По физической сути функция  $\Phi(y)$  соответствует стандартному параметру шероховатости поверхности – относительной опорной длине микропрофиля обрабатываемой поверхности, рассматривая координату  $y$  в противоположном направлении. Гра-

фически общий вид функции  $\Phi(y)$  показан на рис. 1, б. При  $y = 0$  функция  $\Phi(y) = 0$ , а с увеличением  $y$  – неограниченно уменьшается.

Определение функции  $\Phi(y)$  по зависимости (3) требует проведения достаточно сложных математических вычислений. Поэтому получим более простую и удобную для расчета аналитическую зависимость, описывающую функцию  $\Phi(y)$ . Преобразуем зависимость (3) с помощью разложения биннома Ньютона

$$[1 - \varepsilon_i(y)]^n = 1 - n \cdot \varepsilon_i(y) + \frac{n \cdot (n-1)}{1 \cdot 2} \cdot \varepsilon_i^2(y) - \frac{n \cdot (n-1) \cdot (n-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot \varepsilon_i^3(y) + \dots \quad (7)$$

Здесь  $\varepsilon_i(y) < 1$ , а  $n$  – относительно большая величина. Поэтому в зависимости (7) преобладают первые слагаемые. Исходя из этого зависимость (7) представим в упрощенном виде

$$[1 - \varepsilon_i(y)]^n \approx 1 - n \cdot \varepsilon_i(y) + \frac{n^2}{2!} \cdot \varepsilon_i^2(y) - \frac{n^3}{3!} \cdot \varepsilon_i^3(y) + \dots \quad (8)$$

В итоге приходим к разложению в степенной ряд экспоненциальной функции

$$\Phi(y) = e^{-n\varepsilon_i(y)} = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg}\gamma \cdot n}{B} \cdot y} = e^{-A \cdot y}, \quad (9)$$

где  $A = \frac{2 \cdot \text{tg}\gamma \cdot n}{B}$ .

Соответственно вероятностная функция  $\varepsilon(y)$ , противоположная функции  $\Phi(y)$ , выразится

$$\varepsilon(y) = 1 - \Phi(y) = 1 - e^{-\frac{2 \cdot \text{tg}\gamma \cdot n}{B} \cdot y}. \quad (10)$$

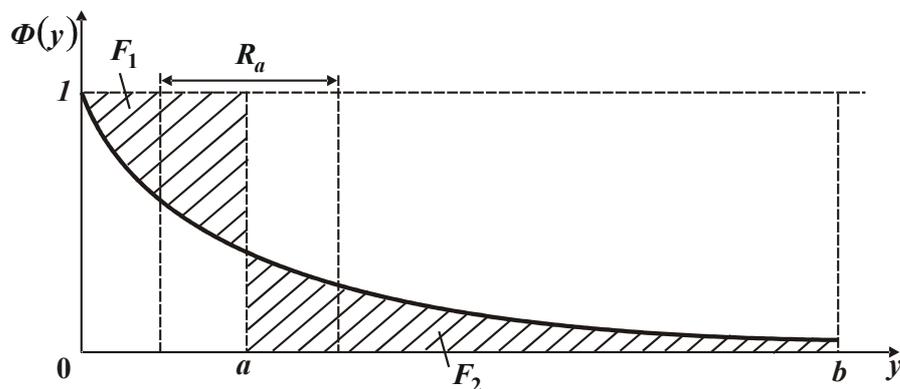


Рис. 2. Расчетная схема параметра шероховатости поверхности  $R_a$

Используя полученное выше теоретическое решение, определим основной параметр шероховатости поверхности  $R_a$ . Согласно общей методике определения параметра шероховатости поверхности  $R_a$ , первоначально надо установить положение средней линии  $y = a$ , рис. 2. Оно определяется из условия равенства площадей, занимаемых выступами и впадинами на участке базовой длины  $B$  обработанной поверхности, т.е. площадей  $F_1$  и  $F_2$ , показанных на рис. 2 заштрихованными. Зная положение средней линии  $y = a$  и площадей  $F_1$  и  $F_2$ , можно определить параметр шероховатости поверхности  $R_a$ . Он равен длине стороны прямоугольника с высотой  $\Phi(y) = 1$

$$R_a = \frac{F_1 + F_2}{1} = 2 \cdot F_1. \quad (11)$$

Определим положение средней линии  $y = a$  из условия:  $F_1 = F_2$ . Исходя из рис. 2 с учетом зависимости (9), площади  $F_1$  и  $F_2$  выразятся

$$F_1 = \int_0^a [1 - \Phi(y)] \cdot dy = a + \frac{1}{A} \cdot (e^{-Aa} - 1), \quad (12)$$

$$F_2 = \int_a^b \Phi(y) \cdot dy = \frac{1}{A} \cdot (e^{-Aa} - e^{-Ab}). \quad (13)$$

Подчиняя полученные зависимости (12) и (13) условию  $F_1 = F_2$ , имеем

$$a = \int_0^b \Phi(y) \cdot dy = \frac{1}{A} \cdot (1 - e^{-Ab}). \quad (14)$$

Из зависимости (14) вытекает, что с увеличением параметра  $b$  величина  $a$  увеличивается, а с увеличением  $n$  — уменьшается, так как влияние второго слагаемого, заключенного в скобки, несущественно. Как показано выше, при  $n > 20$  функция  $\Phi(y = b) < 0,12$ . Следовательно, вторым слагаемым в зависимости (14) можно пренебречь, т.е. положить  $\Phi(y = b) = e^{-Ab} \approx 0$ . Тогда зависимость (14) упростится и примет вид

$$a = \frac{1}{A} = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (15)$$

Зная величину  $a$ , определим площадь  $F_1$

$$F_1 = \frac{1}{A} \cdot (e^{-Aa} - e^{-Ab}) = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n} \left( 0,367 - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot b}{B}} \right). \quad (16)$$

Сравнивая зависимости (16) и (13), видно, что они идентичны, т.е.  $F_1 = F_2$ . Следовательно, расчет величины  $a$  выполнен правильно. Учитывая то, что второе слагае-

мое меньше первого, им в первом приближении можно пренебречь. Тогда зависимость (16) упростится и примет вид

$$F_1 \approx \frac{0,367 \cdot B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n} \quad (17)$$

Параметр шероховатости поверхности  $R_a$  определим в соответствии с зависимостями (11) и (15)

$$R_a = 2 \cdot \int_a^b \Phi(y) \cdot dy = \frac{2}{A} \cdot (e^{-A \cdot a} - e^{-A \cdot b}) = \frac{B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n} \left( 0,367 - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot b}{B}} \right) \approx \frac{0,367 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n} \quad (18)$$

Как видно, параметр шероховатости поверхности  $R_a$  для заданных значений  $B$  и  $\gamma$  вполне однозначно определяется количеством зерен  $n$ , участвующих в резании. Чем больше  $n$ , тем меньше  $R_a$ . За счет увеличения количества зерен  $n$  можно фактически неограниченно уменьшать параметр шероховатости поверхности  $R_a$ . В этом состоит особенность и преимущество абразивной обработки зернами одного размера по схеме притирки. Исходя из этого, данную схему можно рассматривать идеальной с точки зрения высокого качества обработки.

Сравнивая зависимости (15) и (18), нетрудно видеть, что между параметрами  $R_a$  и  $a$  существует простая связь

$$R_a = 0,734 \cdot a \quad (19)$$

Следовательно, уменьшение параметра шероховатости поверхности  $R_a$  равносильно уменьшению величины  $a$ , определяющей положение средней линии профиля обработанной поверхности.

Согласно расчетной схеме, показанной на рис. 2, максимальная высота микронеровностей обработанной поверхности  $R_{max}$  равна параметру  $b$ . Тогда справедливо отношение:

$$\frac{R_a}{R_{max}} = \frac{0,734 \cdot a}{b} = \frac{0,367 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot b} \quad (20)$$

Очевидно, уменьшая величину  $a$ , можно в значительных пределах изменять отношение  $R_a / R_{max} \rightarrow 0$ . Таким образом, теоретически показано, что, увеличивая количество режущих зерен при притирке, можно практически неограниченно уменьшать параметр шероховатости поверхности  $R_a$ . Однако в действительности такого не происходит. Уменьшение шероховатости поверхности происходит лишь до определенного значения. Дальнейшее увеличение количества зерен  $n$ , контактирующих с обрабатываемой поверхностью, не приводит к уменьшению параметра шероховатости поверхности  $R_a$ . Это связано с разбросом размеров абразивных зерен в пределах одной зернистости; наличием движения образца в направлении, перпендикулярном движению абразивных зерен, что снижает количество зерен  $n$ , участвующих в формировании шероховатости

поверхности. Одной из причин также следует рассматривать наличие вибраций при обработке.

Полученные результаты исследований использованы для совершенствования процессов доводки свободным абразивом (алмазным порошком и алмазной пастой) твердосплавных инструментов (твердосплавных разверток и фрез) на ГП Харьковский машиностроительный завод “ФЭД” и ОАО Харьковский машиностроительный завод “Свет шахтера”. Достигнуто увеличение производительности обработки в 2 и более раз при обеспечении заданной шероховатости поверхности ( $R_a=0,1$  мкм и ниже).

### Выводы

Раскрыты закономерности формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке, что позволило определить технологические возможности ее уменьшения. С использованием положений теории вероятностей, в частности, теоремы умножения независимых случайных величин, получены аналитические зависимости для расчета параметров шероховатости поверхности. Доказано, что основным путем уменьшения шероховатости поверхности при обработке свободным абразивом является увеличение количества работающих зерен. Обоснованы причины, не позволяющие в полной мере реализовать высокие потенциальные возможности процесса доводки свободным абразивом. Показана эффективность применения полученных результатов на практике.

**Список литературы:** 1. Захаренко И.П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента. – Киев: Наук. думка, 1981. – 300 с. 2. Ткаченко В.П. Повышение эффективности технологии прецизионной обработки уплотнительных колец из композиционного материала на основе релита. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / НТУ “ХПИ”. – Харьков, 2004. – 21 с. 3. Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. – К.: Наук. думка, 1994. – 180 с. 4. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Одес. гос. политехн. ун-т, Одесса, 1995. – 36 с. 5. Шкурупий В.Г., Новиков Ф.В. Аналитическое описание и технологическое обеспечение параметров шероховатости обработки// Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2004. – Вып. 67. – С. 46-56. 6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗМЕНШЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ АБРАЗИВНІЙ ОБРОБЦІ

Нежебовський В.В.

У роботі наведені результати досліджень шорсткості поверхні при абразивній обробці. Розкрито закономірності формування шорсткості поверхні при доведенні вільним абразивом. Отримано аналітичні залежності для розрахунку параметрів шорсткості поверхні з використанням положень теорії ймовірностей. Доведено, що основним шляхом зменшення шорсткості поверхні при доведенні вільним абразивом є збільшення кількості працюючих зерен. Обґрунтовані причини, що обмежують можливості істотного зменшення шорсткості поверхні на операціях доведення й шлифування (на етапі виходжування). Показано ефективність застосування отриманих результатів на практиці.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ

## ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Нежебовский В.В.

В работе приведены результаты исследований шероховатости поверхности при абразивной обработке. Раскрыты закономерности формирования шероховатости поверхности при доводке свободным абразивом. Получены аналитические зависимости для расчета параметров шероховатости поверхности с использованием положений теории вероятностей. Доказано, что основным путем уменьшения шероховатости поверхности при доводке свободным абразивом является увеличение количества работающих зерен. Обоснованы причины, ограничивающие возможности существенного уменьшения шероховатости поверхности на операциях доводки и шлифования (на этапе выхаживания). Показана эффективность применения полученных результатов на практике.

## DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES FOR REDUCING OF SURFACE ROUGHNESS WITH ABRASIVE MACHINING

Nezhebovsky V.V.

The paper presents the results of studies of surface roughness during abrasive machining. It is revealed the regularities of formation of roughness on the surface with the free abrasive tuning. Analytical dependences for calculation of the parameters of surface roughness using the theory of probability are obtained. It is shown that the main way of reducing surface roughness during free abrasive tuning is to increase the number of grains. Reasons for limiting the possibility of a significant reduction of surface roughness in fine-tuning and grinding operations (at stage of dead-stop grinding) are substantiated. The efficiency of application of the results obtained in practice is demonstrated.

*Рецензент: д.т.н., проф. Матюха П.Г.*