

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН****Нежебовский В.В.***ОАО “Харьковский машиностроительный завод “Свет шахтера”*

Произведен расчет на основе теории вероятностей параметров шероховатости поверхности деталей машин при их абразивной обработке. Обоснованы условия уменьшения шероховатости поверхности как фактора повышения надежности и долговечности деталей машин

Основной задачей изготовления деталей машин является выполнение требований по точности и качеству обрабатываемых поверхностей. Для этого необходимо знать оптимальные режимы резания, располагать глубокими математическими моделями формирования параметров точности и качества обработки. В особой мере это относится к процессам абразивной обработки, которая используется для окончательного формирования размеров, шероховатости и физического состояния поверхностного слоя обрабатываемой детали. В настоящее время достигнуты определенные успехи в прогнозировании оптимальных параметров обработки, разработаны формализованные теории расчета режимов обработки [1,2]. Вместе с тем проблема остается нерешенной и требует новых решений. Целью настоящей работы является аналитическое описание микрогеометрии обрабатываемых поверхностей и определение условий уменьшения шероховатости поверхности, как основного фактора повышения надежности и долговечности работы деталей машин.

В основу решений положены важные результаты исследований шероховатости поверхности, полученные в работах проф. Новикова Ф.В. [3,4] применительно к абразивной обработке. Рассмотрим схему образования шероховатости поверхности при доводке свободным абразивом. Будем считать, что все абразивные зерна имеют одинаковую форму и размеры. Определим шероховатость поверхности с учетом наложения и перекрытия проекций зерен в соответствии с теорией вероятностей. Относительная полнота профиля отдельного зерна, спроецированного на поверхность обрабатываемого образца, равна:

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

где 2γ – угол при вершине конусообразной части режущего зерна;
 B – ширина обрабатываемого образца, м; y – координата, отсчи-
 тываемая от вершины режущего зерна, м (рис. 1).

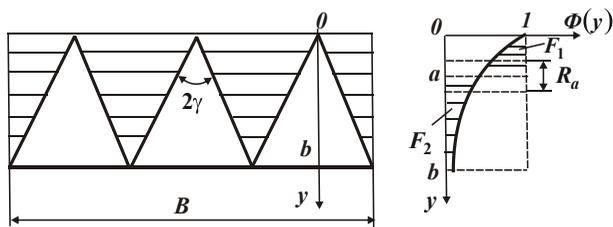


Рис. 1. Схема формирования шероховатости поверхности на обра-
 батываемом образце при доводке абразивными зёрнами.

Установим противоположную вероятностную функцию $\Phi_i(y)$:

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

Вероятностная функция $\Phi(y)$, учитывающая наложение и перекрытие проекций n зерен (расположенных на рабочей поверхности инстру-
 мента), согласно теореме умножения независимых случайных величин, примет вид

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

Вероятностная функция $\Phi(y)$ изменяется в пределах $0 \dots 1$ и опреде-
 ляет, какая доля материала является не удаленной, рис. 1. Преобразуем
 зависимость (3) с помощью разложения Бинома Ньютона:

$$[1 - \varepsilon_i(y)]^n = 1 - n \cdot \varepsilon_i(y) + \frac{n \cdot (n-1)}{1 \cdot 2} \cdot \varepsilon_i^2(y) - \frac{n \cdot (n-1) \cdot (n-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot \varepsilon_i^3(y) + \dots \quad (4)$$

Здесь $\varepsilon_i(y) < 1$, а n – относительно большая величина. Поэтому в
 зависимости (4) преобладают первые слагаемые. Исходя из этого зависи-
 мость (4) представим в упрощенном виде:

$$[1 - \varepsilon_i(y)]^n \approx 1 - n \cdot \varepsilon_i(y) + \frac{n^2}{2!} \cdot \varepsilon_i^2(y) - \frac{n^3}{3!} \cdot \varepsilon_i^3(y) + \dots \quad (5)$$

Приходим к разложению в степенной ряд экспоненциальной функ-
 ции:

$$\Phi(y) = e^{-n\varepsilon_i(y)} = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y} = e^{-A \cdot y}, \quad (6)$$

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

Используя полученное выше теоретическое решение, определим основной параметр шероховатости поверхности R_a . Для этого установим положение средней линии $y = a$, рис. 1. 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. 1 заштрихованными. Уровень $y = 0$ определяет положение наибольшей впадины, а уровень $y = b$ – положение максимального выступа на обработанной поверхности. Зная положение средней линии $y = a$ и значения площадей $F_1 = F_2$, можно определить R_a . Он равен длине стороны прямоугольника с высотой $\Phi(y) = 1$:

$$R_a = \frac{F_1 + F_2}{1} = 2 \cdot F_1. \quad (7)$$

Определим положение средней линии $y = a$ из условия: $F_1 = F_2$. Исходя из рис. 1, с учетом зависимости (6), площади F_1 и F_2 выразятся:

$$F_1 = \int_0^a [1 - \Phi(y)] \cdot dy = a + \frac{1}{A} \cdot (e^{-A \cdot a} - 1), \quad (8)$$

$$F_2 = \int_a^b \Phi(y) \cdot dy = \frac{1}{A} \cdot (e^{-A \cdot a} - e^{-A \cdot b}). \quad (9)$$

Подчиняя полученные зависимости (8) и (9) условию $F_1 = F_2$, имеем

$$a = \int_0^b \Phi(y) \cdot dy = \frac{1}{A} \cdot (1 - e^{-A \cdot b}) = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot b}{B}} \right). \quad (10)$$

Вторым слагаемым в зависимости (10) можно пренебречь, т.е. положить $\Phi(y = b) = e^{-A \cdot b} \approx 0$. Тогда зависимость (10) упростится и примет вид:

$$a = \frac{1}{A} = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (11)$$

Зная величину a , описываемую в общем виде зависимостью (10), определим площадь F_1 :

$$F_1 = \frac{1}{A} \cdot (e^{-A \cdot a} - e^{-A \cdot b}) = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n} \cdot \left(0,367 - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot b}{B}} \right) \approx \frac{0,367 \cdot B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (12)$$

Параметр R_a определим в соответствии с зависимостями (7) и (12):

$$R_a = 2 \cdot \int_a^b \Phi(y) \cdot dy = \frac{2}{A} \cdot (e^{-A \cdot a} - e^{-A \cdot b}) = \frac{B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n} \left(0,367 - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot b}{B}} \right) \approx \frac{0,367 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n} . \quad (13)$$

Между параметрами R_a и a существует простая связь:

$$R_a = 0,734 \cdot a . \quad (14)$$

Следовательно, уменьшение параметра шероховатости поверхности R_a равносильно уменьшению величины a , определяющей положение средней линии профиля обработанной поверхности. Проведем анализ функции $\Phi(y)$, описываемой (6), с использованием полученных зависимостей (11) и (14):

$$\Phi(y) = e^{-\frac{y}{a}} = e^{-\frac{0,734 \cdot y}{R_a}} . \quad (15)$$

Как видно, функция $\Phi(y)$ вполне однозначно определяется величиной a и соответственно параметром R_a . Меньшим значениям R_a и a соответствуют меньшие значения функции $\Phi(y)$. Определим $\Phi(y)$ при условии $y = b = R_{\max}$:

$$\Phi(y = b) = e^{-\frac{0,734 \cdot R_{\max}}{R_a}} , \quad (16)$$

где R_{\max} – максимальная высота микронеровностей поверхности, м.

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (16) значения $\Phi(y = b)$. С увеличением отношения R_{\max} / R_a значения функции $\Phi(y = b)$ существенно уменьшаются – приблизительно по геометрической прогрессии со знаменателем 0,5. Из этого вытекает, что незначительное изменение отношения R_{\max} / R_a (в пределах 4...10, т.е. в 2,5 раза) приводит к многократному (до 100 раз) уменьшению функции $\Phi(y = b)$. В этой же таблице приведены расчетные значения величины удаленного слоя материала $B \cdot \Phi(y = b)$ на уровне $y = b$, т.е. оставшегося материала в виде микронеровностей. В качестве исходных данных при расчете приняты значения $b = 1$ мкм; $B = 20$ мкм.

Таблица 1. Расчетные значения функции $\Phi(y = b)$ и $B \cdot \Phi(y = b)$

R_{\max} / R_a	4	5	6	7	8	9	10
$\Phi(y = b)$	0,053	0,025	0,0122	0,0061	0,003	0,00123	0,00067
$B \cdot \Phi(y = b)$	1,06	0,5	0,244	0,122	0,061	0,024	0,013

Величина $B \cdot \Phi(y = b)$ изменяется по закону изменения функции $\Phi(y = b)$. При $R_{\max} / R_a > 5$ данная величина принимает весьма малые значения. Этим показано, что в связи с вероятностным характером наложе-

ния и перекрытия проекций зерен, обеспечить полный съем обрабатываемого материала на уровне $y = b$ нельзя. Всегда будет оставаться слой не удаленного материала шириной $B \cdot \Phi(y = b)$, т.е. уменьшить величину $B \cdot \Phi(y = b)$ до нуля и получить остроугольную форму максимальной микронеровности не представляется возможным. Следовательно, максимальная величина микронеровностей обработанной поверхности R_{\max} , исходя из данного геометрического представления, равна величине b , а переменной величиной в отношении R_{\max} / R_a является параметр шероховатости поверхности R_a , т.к. $R_{\max} = b$. В действительности механизм формирования величины $B \cdot \Phi(y = b)$ и соответственно параметра шероховатости поверхности R_{\max} несколько иной. Как показывает практика, в процессе абразивной обработки всегда образуется полный профиль на обработанной поверхности, т.е. функция $\Phi(y)$ на уровне максимальной микронеровности равна нулю. Это связано с тем, что под действием механических нагрузок, возникающих в процессе резания абразивными зёрнами, микронеровности будут разрушаться с образованием на них сглаженных вершин, т.е. теоретически невозможно получить остроугольную форму максимальной микронеровности. На ее вершине будет образовываться площадка определенной длины, которая, собственно, и будет определять величину $B \cdot \Phi(y = b)$. Таким образом, обоснована возможность образования на обработанной поверхности полного профиля от работы абразивных зерен в результате разрушения вершин микронеровностей и образования на них площадок. Чем прочнее обрабатываемый материал, тем, очевидно, меньше будет площадка на вершине микронеровности и соответственно величина $B \cdot \Phi(y = b)$.

Исходя из этого, параметр шероховатости поверхности R_{\max} должен определяться из условия прочности микронеровностей обработанной поверхности и принимать значения $R_{\max} \leq b$. По-видимому, этим можно объяснить то, что на практике (например, при шлифовании) реализуются значения R_{\max} / R_a , изменяющиеся в пределах 4...8. Не случайно и то, что отношение параметров шероховатости поверхности R_z / R_a в технологии машиностроения принято рассматривать равным 4. Учитывая, что по определению параметр шероховатости поверхности R_{\max} больше параметра R_z , справедливо соотношение $R_{\max} / R_a \geq 4$.

В процессе резания абразивные зёрна подвергаются изнашиванию. В результате их островершинная форма становится плосковершинной. Функция $\varepsilon_i(y)$ в этом случае по аналогии с зависимостью (1) принимает

вид:

$$\varepsilon_i(y) = \frac{(x + 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot y)}{B}, \quad (17)$$

где x – длина площадки износа на режущем зерне, м.

Соответственно функция $\Phi(y)$ описывается:

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^n [1 - \varepsilon_i(y)] = \left(1 - \frac{(x + 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot y)}{B} \right)^n = e^{-\frac{x \cdot n}{B}} \cdot e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot y}{B}}. \quad (18)$$

Наличие первого множителя в зависимости (18) указывает на то, что при $y=0$ функция $\Phi(y)$ может принимать любое значение, изменяющееся в пределах $0 \dots 1$, тогда как при $x=0$ (при резании островершинными зернами) функция $\Phi(y=0) = 1$. Следовательно, наличие площадок износа на зернах принципиально изменяет закономерности формирования шероховатости поверхности. Увеличение длины площадки износа x ведет к существенному уменьшению значений функций $\Phi(y=0)$ и шероховатости поверхности. Причем, эффект от увеличения величины x значительно больше, чем от увеличения количества зерен n , поскольку увеличение n не приводит к принципиальному изменению $\Phi(y)$, что имеет место при изменении величины x . Определим параметры a и R_a :

$$a = \int_0^b \Phi(y) \cdot dy = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n} \cdot e^{-\frac{x \cdot n}{B}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot b}{B}} \right) \approx \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n} \cdot e^{-\frac{x \cdot n}{B}}, \quad (19)$$

$$R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n} \cdot e^{-\frac{x \cdot n}{B}}. \quad (20)$$

Таблица 2. Расчетные значения множителя $e^{-\frac{x \cdot n}{B}}$ для $x/B=0,05$

n	20	40	80	160	320
$e^{-\frac{x \cdot n}{B}}$	0,368	0,135	0,0182	0,00033	0,0000001

Как следует из табл. 2, с увеличением n в пределах $20 \dots 320$ множитель $e^{-\frac{x \cdot n}{B}}$ уменьшился в 10^6 раз, тогда как множитель $\frac{0,367 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}$ умень-

шился всего в 16 раз. Следовательно, за счет увеличения величины площадки износа на зерне x можно многократно уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a , чего нельзя добиться другими методами. Таким образом, в работе аналитически описаны основные параметры шероховатости поверхности, образующейся на финишной операции – до-

водке свободным абразивом. Показано, что результаты расчетов хорошо согласуются с известными экспериментальными данными. Это свидетельствует о достоверности предложенного теоретического подхода к расчету параметров шероховатости поверхности, основанного на использовании теории вероятностей. Обоснованы условия уменьшения шероховатости при доводке свободным абразивом, что является важным фактором повышения надежности и долговечности деталей машин.

Список использованных источников

1. Захаренко И.П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента. – К.: Наук. думка, 1981. – 300 с.
2. Сагарда А.А., Чеповецкий И. Х., Мишнаевский Л.Л. Алмазно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техніка, 1974. – 179 с.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.
4. 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.

Анотація

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Нежебовський В.В.

Розроблено розрахунок на основі теорії ймовірностей параметрів шорсткості поверхні деталей машин при їхній абразивній обробці. Обґрунтовано умови зменшення шорсткості поверхні як фактора підвищення надійності й довговічності деталей машин

Abstract

TECHNOLOGICAL SECURITY OF MANUFACTURE OF MACHINE PARTS

V. Negebovskiy

Calculated on the basis of the theory of probability parameters sherohovatosti surface of machine parts, with their abrasive processing. Sound diverted conditions reduce surface roughness as a factor for improvement of reliability and durability of machine parts