

Новіков Ф.В., Нежебовський В.В., Шкурупій В.Г.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ АБРАЗИВНІЙ ОБРОБЦІ

**Введення.** Шорсткість поверхні є найважливішим параметром якості поверхневого шару деталі. Тому питанням її дослідження в науково-технічній літературі приділена велика увага [1, 2]. В даний час розроблено теоретико-імовірнісний підхід до визначення шорсткості поверхні при шліфуванні [3], що дозволяє достатньо об'єктивно оцінити технологічні закономірності формування шорсткості поверхні й можливості її зменшення. У зв'язку з цим, представляється актуальним рішення завдання пошуку нових технологічних методів і умов зменшення шорсткості поверхні при абразивній обробці й відповідно підвищення якості й продуктивності обробки. В особливій мірі це відноситься до абразивної обробки відповідальних деталей машин, до яких пред'являються високі вимоги по шорсткості обробки, наприклад, до високоточних деталей авіаційного призначення й інших деталей.

**Ціль роботи** – теоретичний аналіз шорсткості поверхні при абразивній обробці й визначення умов її зменшення.

**Основний зміст роботи.** Для вирішення завдання скористаємося теоретичним підходом до розрахунку шорсткості поверхні при абразивній обробці, запропонованим у роботі [4]. Розглянемо схему утворення шорсткості поверхні при доведенні вільним абразивом. Будемо вважати, що всі абразивні зерна мають однакову форму й розміри. На рис. 1,а показано положення проєкцій 10 зерен на оброблювану поверхню без урахування їхнього перекриття. Як видно, при  $y = b$  відбувається повне знімання оброблюваного матеріалу, й на поверхні зразка формується шорсткуватий шар товщиною  $b$ , тобто максимальна висота мікронерівностей обробленої поверхні  $R_{max}$  дорівнює величині  $b$ .

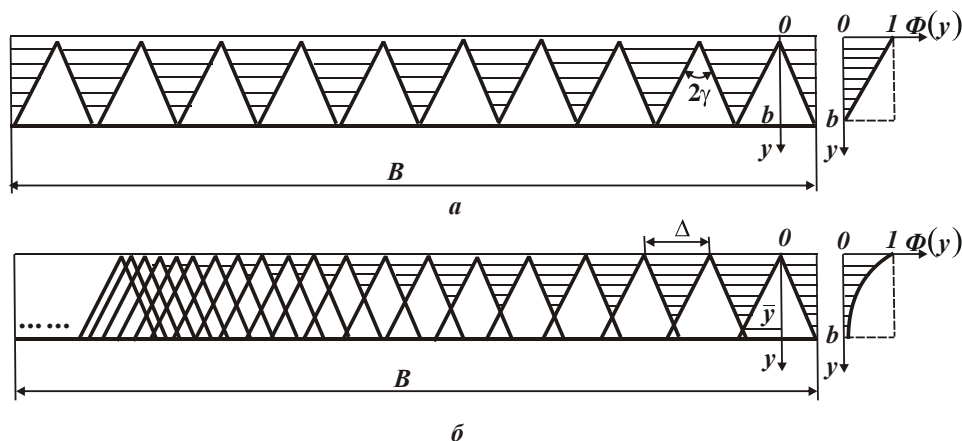


Рис. 1. Схеми формування шорсткості поверхні при абразивній обробці.

Установимо закономірності формування шорсткості поверхні з урахуванням накладення й перекриття проекцій зерен відповідно до теорії імовірностей. Для цього визначимо відносну повноту профілю окремого зерна, спроектованого на поверхню оброблюваного зразка:

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

де  $2\gamma$  – кут при вершині конусоподібної частини ріжучого зерна;  $B$  – ширина зразка, м;  $y$  – координата, яка відлічується від вершини ріжучого зерна, м.

Установимо протилежну імовірнісну функцію  $\Phi_i(y)$ :

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

Протилежна імовірнісна функція  $\Phi(y)$ , що враховує накладення й перекриття проекцій  $n$  зерен (розташованих на робочій поверхні інструмента), відповідно до теореми множення незалежних випадкових величин, прийме вигляд

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

Імовірнісна функція  $\Phi(y)$  змінюється в межах  $0 \dots 1$  і визначає, яка частка матеріалу є невилученою.

Визначення значень функції  $\Phi(y)$  по залежності (3) вимагає проведення досить складних математичних обчислень. Тому одержимо більш просту й зручну для розрахунку залежність, що описує функцію  $\Phi(y)$ . Перетворимо залежність (3) за допомогою розкладання Бінома Ньютона:

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

Тут  $\varepsilon_i(y) < 1$ , а  $n$  – відносно велика величина. Тому в залежності (4) переважають перші доданки. Виходячи із цього залежність (4) спростимо

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

Приходимо до розкладання в степеневий ряд експонентної функції:

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

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

Імовірнісна функція  $\varepsilon(y)$ , протилежна функції  $\Phi(y)$ , дорівнює

$$\varepsilon(y) = 1 - \Phi(y) = 1 - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}. \quad (7)$$

Використовуючи отримане вище теоретичне рішення, визначимо основний параметр шорсткості поверхні  $R_a$ . Відповідно до загальної методики визначення параметра шорсткості поверхні  $R_a$ , спочатку слід встановити

положення середньої лінії  $y = a$  (рис. 2). Воно визначається з умови рівності площ, займаних виступами й впадинами на ділянці базової довжини  $B$  обробленої поверхні, тобто площ  $F_1$  і  $F_2$ , показаних на рис. 2 заштрихованими. Рівень  $y = 0$  визначає положення найбільшої впадини (лінію впадин), а рівень  $y = b$  – положення максимального виступу на обробленій поверхні (лінію виступів). Знаючи положення середньої лінії профілю  $y = a$  й значення площ  $F_1 = F_2$ , можна визначити параметр шорсткості поверхні  $R_a$ . Він дорівнює довжині сторони прямокутника з висотою  $\Phi(y) = 1$  (рис. 2):

$$R_a = \frac{F_1 + F_2}{1} = 2 \cdot F_1. \quad (8)$$

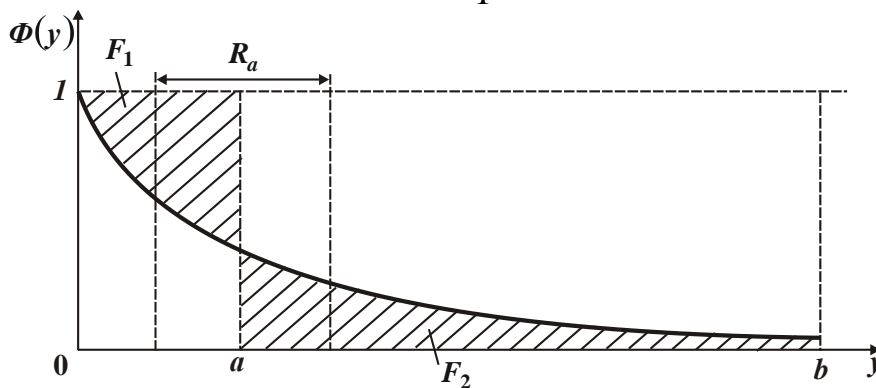


Рис. 2. Розрахункова схема параметра шорсткості поверхні  $R_a$ .

Визначимо положення середньої лінії  $y = a$  з умови:  $F_1 = F_2$ . Виходячи з рис. 2, з урахуванням залежності (6), площі  $F_1$  й  $F_2$  виражаться

$$F_1 = \int_0^a [1 - \Phi(y)] \cdot dy = \left( y + \frac{1}{A} \cdot e^{-A \cdot y} \right) \Big|_0^a = a + \frac{1}{A} \cdot (e^{-A \cdot a} - 1), \quad (9)$$

$$F_2 = \int_a^b \Phi(y) \cdot dy = \left( -\frac{1}{A} \cdot e^{-A \cdot y} \right) \Big|_a^b = \frac{1}{A} \cdot (e^{-A \cdot a} - e^{-A \cdot b}). \quad (10)$$

Підкоряючи отримані залежності (9) і (10) умові  $F_1 = F_2$ , маємо

$$a = \int_0^b \Phi(y) \cdot dy = \frac{1}{A} \cdot (1 - e^{-A \cdot b}) = \frac{B}{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot b}{B}} \right). \quad (11)$$

Із залежності (11) випливає, що зі збільшенням параметра  $b$  величина  $a$  збільшується, а зі збільшенням  $n$  – зменшується. При  $n > 20$  функція  $\Phi(y = b) < 0,12$ . Отже, другим доданком у залежності (11) можна зневажити, тобто прийняти  $\Phi(y = b) = e^{-A \cdot b} \approx 0$ . Тоді залежність (11) спроститься:

$$a = \frac{1}{A} = \frac{B}{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n}. \quad (12)$$

Знаючи величину  $a$ , описувану залежністю (11), визначимо площу  $F_1$ :

$$F_1 = \frac{1}{A} \cdot (e^{-A \cdot a} - e^{-A \cdot b}) = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n} \left( 0,367 - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot b}{B}} \right). \quad (13)$$

Порівнюючи залежності (13) і (10), видно, що вони ідентичні, тобто  $F_1 = F_2$ . Отже, розрахунок величини  $a$  виконаний правильно. З огляду на те, що другий доданок менше першого, їм у першому наближенні можна зневажити. Тоді (13) спроститься й прийме вигляд

$$F_1 \approx \frac{0,367 \cdot B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (14)$$

Параметр  $R_a$  визначимо відповідно до залежностей (8) і (13):

$$R_a = 2 \cdot \int_a^b \Phi(y) \cdot dy = \frac{2}{A} \cdot (e^{-A \cdot a} - e^{-A \cdot b}) = \frac{B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n} \left( 0,367 - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot b}{B}} \right) \approx \frac{0,367 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (15)$$

У залежності (15) другий доданок менше одиниці і їм у першому наближенні можна зневажити, тоді залежність приймає простий вигляд. Як видно, параметр шорсткості поверхні  $R_a$  для заданих значень  $B$  і  $\gamma$  цілком однозначно визначається кількістю зерен  $n$ , що беруть участь у різанні. Чим більше  $n$ , тим менше  $R_a$ . За рахунок збільшення кількості зерен  $n$  можна фактично необмежено зменшувати параметр шорсткості поверхні  $R_a$ . Порівнюючи залежності (11) і (15), видно, що між параметрами  $R_a$  й  $a$  існує простий зв'язок

$$R_a = 0,734 \cdot a. \quad (16)$$

Зменшення параметра  $R_a$  рівносильне зменшенню величини  $a$ , яка визначає положення середньої лінії профілю поверхні. Проведемо аналіз функції  $\Phi(y)$ , описуваною залежністю (6), з використанням залежностей (12) і (16):

$$\Phi(y) = e^{-\frac{y}{a}} = e^{-\frac{0,734 \cdot y}{R_a}}. \quad (17)$$

Як видно, функція  $\Phi(y)$  цілком однозначно визначається величиною  $a$  й параметром  $R_a$ . Меншим значенням  $R_a$  і  $a$  відповідають менші значення функції  $\Phi(y)$ . Визначимо функцію  $\Phi(y)$  за умови  $y = b = R_{max}$ :

$$\Phi(y = b) = e^{-\frac{0,734 \cdot R_{max}}{R_a}}, \quad (18)$$

де  $R_{max}$  – максимальна висота мікронерівностей обробленої поверхні, м.

У цьому випадку значення функції  $\Phi(y = b)$  визначаються лише відношенням  $R_{max}/R_a$ . При цьому параметр  $R_a$ , описуваний залежністю (15), фактично не залежить від значень  $\Phi(y = b)$ , оскільки вони менше 0,367 і ними, відповідно до залежності (15), можна зневажити. Отже, параметр  $R_a$  не залежить від  $R_{max}/R_a$ . Для одного значення  $R_{max}/R_a$  може бути реалізовано багато значень  $R_a$ , оскільки  $R_a$  й  $R_{max}/R_a$  визначаються на основі незв'язаних

між собою залежностей (15) і (18). Це важливий висновок, що розкриває структуру взаємозв'язків між параметрами шорсткості поверхні.

Отримане теоретичне рішення погодиться з відомими експериментальними даними. Так, у роботі [5] показано, що висотні параметри шорсткості поверхні  $R_a$ ,  $R_p$  і  $R_{max}$  мають тісний кореляційний зв'язок, близький до функціонального. Коефіцієнти парної кореляції  $R_a$  й  $R_p$ ,  $R_a$  і  $R_{max}$  для різних методів обробки (алмазно-абразивної і обробки лезовим інструментом) перебувають у межах 0,9–0,98 [5]. Це означає, що забезпечення при механічній обробці параметра  $R_a$  приводить до автоматичного одержання певних значень  $R_p$  і  $R_{max}$ , які залежать від прийнятого технологічного методу обробки. Таким чином, кожному технологічному методу обробки властиві певні відношення  $k_p = R_p/R_a$  і  $k_n = R_{max}/R_a$ . Наприклад, при шліфуванні деталей із чавуну кругами з електрокорунду й ельбору відносна опорна довжина профілю  $\tau_p$  на рівні середньої лінії  $m-m$  дорівнює  $\tau_{pm} = 0,55$ ;  $k_n = 6,4$ ;  $k_p = 2,15$  при  $R_a = 0,26 \dots 1,93$  мкм, тобто одному значенню  $k_n$  відповідає безліч значень  $R_a$ . Це вказує на те, що дані величини по своїй суті різні й визначаються з різних фізичних умов. Як показано вище, параметр  $R_a$  залежить від форми функції  $\Phi(y)$  й визначається тими параметрами, які впливають на форму функції  $\Phi(y)$ . Згідно залежності (15), це параметри  $n, \gamma, B$ . Умови, на основі яких можна визначити відношення  $R_{max}/R_a$ , поки невідомі. Тому проведемо дослідження з їхнього встановлення.

Спочатку зробимо розрахунок значень функції  $\Phi(y=b)$  по залежності (18) для різних значень відношення  $R_{max}/R_a$ . Як впливає з табл. 1, зі збільшенням відношення  $R_{max}/R_a$  значення  $\Phi(y=b)$  істотно зменшуються – приблизно по геометричній прогресії зі знаменником 0,5. Із цього випливає, що незначна зміна відношення  $R_{max}/R_a$  (у межах 4...10, тобто в 2,5 рази) приводить до багаторазового (до 100 разів) зменшення  $\Phi(y=b)$ . У цій же таблиці наведені розрахункові значення величини невилученого шару матеріалу  $B \cdot \Phi(y=b)$  на рівні  $y=b$ , тобто матеріалу, що залишився у вигляді мікронерівностей. У якості вихідних даних за розрахунком прийняті значення  $b=1$  мкм;  $B=20$  мкм.

Таблиця 1

Розрахункові значення функції  $\Phi(y=b)$  й  $B \cdot \Phi(y=b)$

$R_{max}/R_a$	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

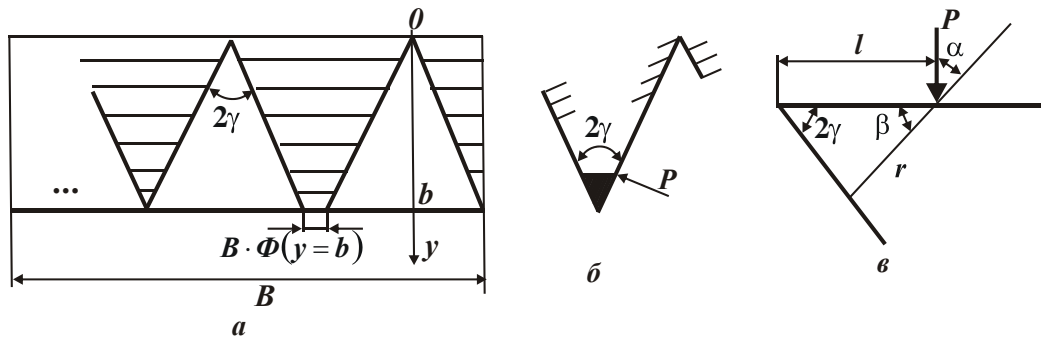


Рис. 3. Розрахункові схеми утворення площадки на вершині мікронерівності.

Величина  $B \cdot \Phi(y=b)$  змінюється за законом зміни функції  $\Phi(y=b)$ . При  $R_{max}/R_a > 5$  дана величина приймає невеликі значення. Цим показано, що у зв'язку з імовірнісним характером накладення й перекриття проєкцій зерен забезпечити повне знімання оброблюваного матеріалу на рівні  $y=b$  не можна. Завжди буде залишатися шар невилученого матеріалу шириною  $B \cdot \Phi(y=b)$  (рис. 3,а), тобто зменшити величину  $B \cdot \Phi(y=b)$  до нуля й одержати гострокутну форму максимальної мікронерівності не представляється можливим. Навіть велика кількість зерен  $n$ , які беруть участь у процесі різання, однаково приведе не до нульового, а до кінцевого значення величини  $B \cdot \Phi(y=b)$ . Отже, максимальна величина мікронерівностей обробленої поверхні  $R_{max}$ , виходячи з даного геометричного подання, дорівнює величині  $b$ , а змінною величиною у відношенні  $R_{max}/R_a$  є параметр шорсткості поверхні  $R_a$ , тому що  $R_{max}=b$ . У дійсності механізм формування величини  $B \cdot \Phi(y=b)$  й відповідно параметра шорсткості поверхні  $R_{max}$  трохи інший. Як показує практика, у процесі абразивної обробки завжди утворюється повний профіль на обробленій поверхні, тобто функція  $\Phi(y)$  на рівні максимальної мікронерівності дорівнює нулю. Це пов'язане з тим, що під дією механічних навантажень, що виникають у процесі різання абразивними зернами, мікронерівності будуть руйнуватися з утворенням на них згладжених вершин (рис. 3,б), тобто теоретично неможливо одержати гострокутну форму максимальної мікронерівності. На її вершині буде утворюватися площадка певної довжини, яка, властиво, і буде визначати величину  $B \cdot \Phi(y=b)$ . Таким чином, обґрунтована можливість утворення на обробленій поверхні повного профілю від роботи абразивних зерен у результаті руйнування вершин мікронерівностей і утворення на них площадок. Чим міцніше оброблюваний матеріал, тим менша буде площадка на вершині мікронерівності й величина  $B \cdot \Phi(y=b)$ .

Виходячи із цього, параметр  $R_{max}$  повинен визначатися з умови міцності мікронерівностей обробленої поверхні й приймати значення  $R_{max} \leq b$ . Очевидно, цим можна пояснити те, що на практиці (наприклад, при шліфуванні) реалізуються значення  $R_{max}/R_a$ , які змінюються в межах 4...8. Не випадково й те, що відношення  $R_z/R_a$  у технології машинобудування прийнято

розглядати рівним 4. Оскільки по визначенню параметр  $R_{max}$  більший параметра  $R_z$ , то справедливо відношення  $R_{max}/R_a \geq 4$ .

З огляду на важливість визначення закономірностей руйнування вершин мікронерівностей оброблюваної поверхні при абразивній обробці, проведемо їх дослідження. Розглянемо розрахункову схему руйнування мікронерівності від дії сили  $P$ , прикладеної на відстані  $l$  від вершини мікронерівності (рис. 3,б). Будемо вважати, що руйнування мікронерівності відбувається шляхом зсуву матеріалу в умовній площині, розташованій під кутом  $\beta$  до напрямку дії сили  $P$  (рис. 3,в) від дії максимального дотичного напруження

$$\tau = \frac{P \cdot \cos \alpha}{r}, \quad (19)$$

де  $P$  – сила різання, яка приходить на одиницю ширини мікронерівності, Н/м;  $r$  – довжина площини зсуву, м;  $\alpha = 90^\circ - \beta$ ;  $2\gamma$  – кут при вершині мікронерівності.

Довжину  $r$  визначимо по теоремі синусів для косокутного трикутника:

$$\frac{r}{\sin 2\gamma} = \frac{l}{\sin(180^\circ - 2\gamma - \beta)}, \quad \text{звідки} \quad (20)$$

$$r = \frac{l \cdot \sin 2\gamma}{\sin(2\gamma + \beta)}. \quad (21)$$

Підставляючи залежність (21) в (19), маємо

$$\tau = \frac{P \cdot \sin \beta \cdot \sin(2\gamma + \beta)}{l \cdot \sin 2\gamma} = \frac{P \cdot [\cos 2\gamma - \cos(2\gamma + 2\beta)]}{2 \cdot l \cdot \sin 2\gamma}. \quad (22)$$

Максимальне дотичне напруження  $\tau$  досягається за умови:

$$\cos 2(\gamma + \beta) = -1, \quad \text{звідки} \quad (23)$$

$$\beta = 90^\circ - \gamma. \quad (24)$$

При  $\gamma = 45^\circ$  екстремальне значення кута  $\beta = 45^\circ$ . В результаті приходимо до рівнобедреного трикутника з кутом при вершині  $2\gamma = 90^\circ$ . Отже, руйнування мікронерівності відбувається в площині, паралельній площині  $y = b$  (рис. 3,б). Підставляючи (24) в (22), визначимо максимальне дотичне напруження:

$$\tau_{max} = \frac{0,5 \cdot P \cdot \operatorname{ctg} \gamma}{l}. \quad (25)$$

Руйнування матеріалу в площині зсуву відбудеться при досягненні максимальним дотичним напруженням межі міцності матеріалу на зсув  $\tau_{зсув}$ , тобто за умови  $\tau_{max} = \tau_{зсув}$ . Підкоряючи їй залежність (25), визначимо відстань  $l$  від вершини мікронерівності до площини зсуву матеріалу:

$$l = \frac{0,5 \cdot P \cdot \operatorname{ctg} \gamma}{\tau_{зсув}}. \quad (26)$$

Як видно, величина  $l$  тим більше, чим менше  $\tau_{зсув}$  й більше сила  $P$  і кут  $\gamma$ . Отже, більші площадки на вершинах мікронерівностей будуть досягатися при обробці менш міцних матеріалів, які характеризуються відносно

невеликими значеннями  $\tau_{зсув}$ . З іншого боку, зменшення міцності оброблюваного матеріалу приведе до зниження сили різання  $P$  й відповідно залежності (26) – до зменшення величини  $l$ . Таким чином, величина  $l$  в остаточному підсумку залежить від відношення  $P/\tau_{зсув}$ . Чим воно більше, тим більша величина  $l$  й довжина площадки руйнування вершини мікронерівності. Із цього випливає, що параметр  $R_{max}$  залежить від довжини площадки на вершині максимальної мікронерівності й відповідно від марки оброблюваного матеріалу. Отже, і значення  $\Phi(y=b)$  залежать від умов руйнування вершини максимальної мікронерівності й довжини площадки, яка утворюється на ній. Тому визначити величину  $R_{max}$  можна на основі знання  $\Phi(y=b)$  для конкретних умов обробки.

Таким чином показано, що існують два підходи до аналітичного опису закономірностей формування шорсткості поверхні при абразивній обробці. Перший полягає в кінематико-геометричному описі профілю поверхні з урахуванням імовірнісного накладення й перекриття проекцій зерен. У цьому випадку імовірнісна функція  $\Phi(y)$ , що описує частку невилученого матеріалу, на рівні максимальної мікронерівності не дорівнює нулю, що не дозволяє однозначно визначити параметр  $R_{max}$ . Другий підхід полягає в аналітичному описі профілю вершин мікронерівностей від їхнього руйнування під дією сил, що виникають у процесі різання абразивними зернами. У результаті на вершинах мікронерівностей утворюються площадки певної довжини. Тоді імовірнісна функція  $\Phi(y)$  на рівні максимальної мікронерівності й параметр  $R_{max}$  визначаються довжиною площадки. Це приводить у відповідність теорію й практику процесу обробки.

Відповідно до першого підходу, основною характеристикою шорсткості поверхні є відношення  $a/R_a$ , оскільки про параметр  $R_{max}$  можна говорити лише з певним ступенем наближення, тому що значення функції  $\Phi(y)$  на рівні максимальної мікронерівності невизначено. Установити значення  $R_{max}$  можна лише на основі другого підходу, у тому числі з використанням експериментальних даних. Таким чином, перший підхід дозволяє встановити  $a/R_a$ , а другий підхід –  $R_{max}/R_a$ . У підсумку формується досить повне уявлення про структуру шорсткуватого шару обробленої поверхні.

Для більш глибокого уявлення про співвідношення висотних параметрів шорсткості поверхні, розглянемо функцію  $\Phi(y)$  у вигляді прямої лінії, як це показано на рис. 4,а. Такий вигляд функція  $\Phi(y)$  буде мати місце при доведенні рівновіддаленими абразивними зернами без урахування їхнього перекриття (рис. 1,а). Такий же вигляд функції  $\Phi(y)$  можна одержати при різанні лезовими інструментами (наприклад, при точінні), якщо розглядати лише теоретичний профіль без урахування різного роду відхилень від нього у зв'язку з коливаннями в технологічній системі, окремими руйнуваннями мікронерівностей при обробці й т.д. Параметр  $a$  для даної функції  $\Phi(y)$



дорівнює  $a = 0,5 \cdot b = 0,5 \cdot R_{max}$ , а  $R_a = 0,25 \cdot R_{max}$ . Отже, відношення  $R_{max}/R_a = 4$ ; а  $R_a/a = 0,5$ .

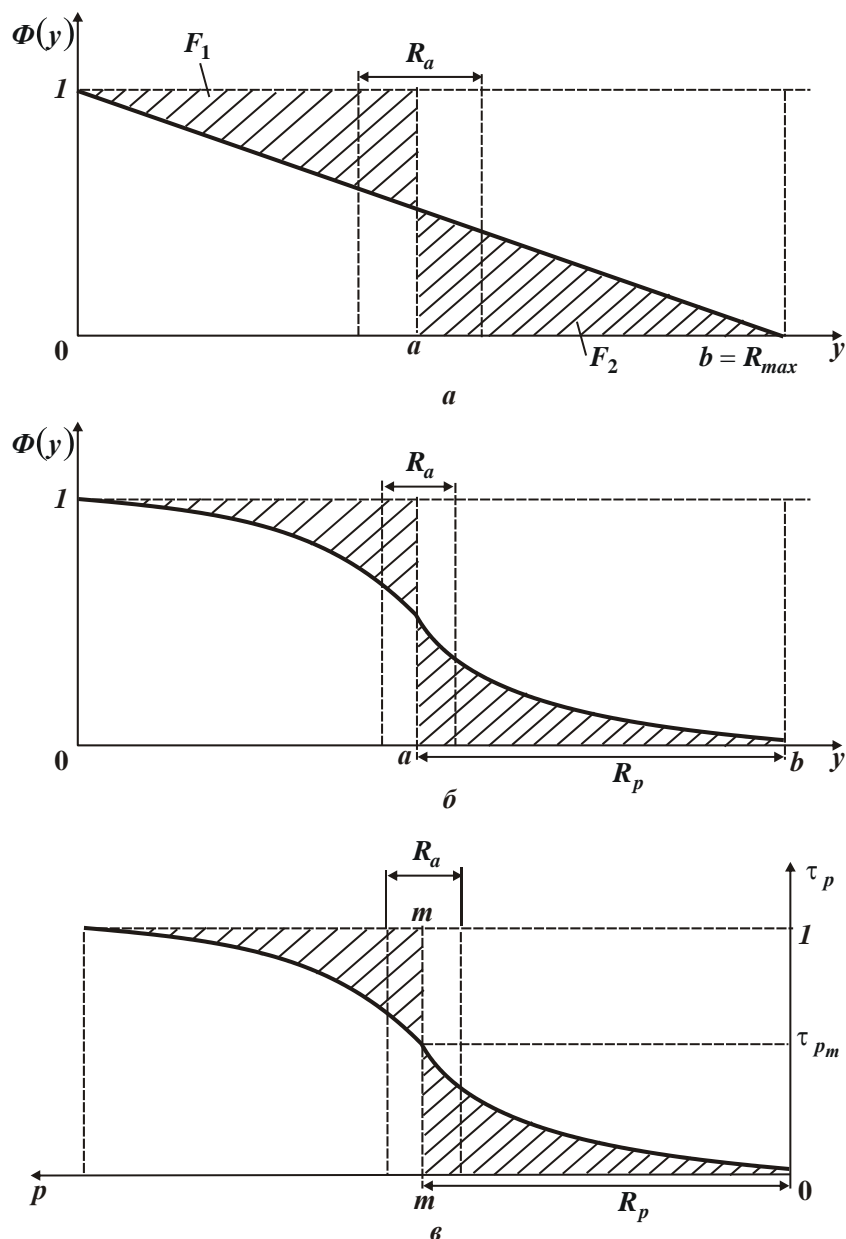


Рис. 4. Загальний вигляд функцій  $\Phi(y)$  і  $\tau_p$ .

Для функції  $\Phi(y)$ , описуваної залежністю (6) і графічно показаної на рис. 2, відношення  $R_a/a$  відповідно до залежності (16) дорівнює 0,734. Це свідчить про те, що в останньому випадку більша площа  $F_1 = F_2$ . Очевидно, якщо функція  $\Phi(y)$  буде приймати вигляд, показаний на рис. 4,б, то відношення  $R_a/a < 0,5$ . Таким чином, вигляд функції  $\Phi(y)$  визначає відношення  $R_a/a$ , яке, як показано вище, змінюється в широких межах.

Функція  $\Phi(y)$  визначає відносну опорну довжину профілю  $\tau_p$ , графічно показану на рис. 4,в. Координата  $p$  відповідає координаті  $y$  на рис. 4,б. Параметр  $\tau_{pm}$  визначає значення відносної опорної довжини профілю  $\tau_p$  на

рівні середньої лінії  $m-m$ . Установити параметр  $\tau_{p_m}$  можна з умови  $\tau_{p_m} = \Phi(y=a)$ . Для функції  $\Phi(y)$ , що описується залежністю (6) з урахуванням (12) параметр  $\tau_{p_m} = e^{-1} = 0,367$ . Як видно, у цьому випадку він менше 0,5, тоді як для функції  $\Phi(y)$ , показаної на рис. 4,а, параметр  $\tau_{p_m} = 0,5$ . Для функції  $\Phi(y)$ , показаної на рис. 4,б, він буде більше 0,5.

Знаючи величину  $a$ , можна визначити ще один висотний параметр шорсткості поверхні  $R_p$ , що дорівнює відстані від лінії виступів ( $y=b=R_{max}$ ) до середньої лінії ( $y=a$ ), тобто  $R_p=R_{max}-a$  (рис. 4,б). Тоді

$$\frac{R_p}{R_a} = \frac{R_{max} - a}{R_a} = \frac{R_{max}}{R_a} - \frac{a}{R_a}. \quad (27)$$

Для функції  $\Phi(y)$ , показаної на рис. 4,а, маємо  $R_{max}/R_a = 4$ ;  $R_a/a = 0,5$ . Отже, відношення  $a/R_a = 2$  і  $R_p/R_a = 2$ ;  $R_p/a = 1$ .

Для функції  $\Phi(y)$ , показаної на рис. 2, як установлено вище,  $R_{max}/R_a = 4 \dots 8$ ;  $R_a/a = 0,734$ . Отже, відношення  $R_p/R_a > 3$ , тобто в цьому випадку  $R_p/R_a$  більше, ніж у попередньому випадку. Відповідно  $R_p/a > 2,2$ .

Для функції  $\Phi(y)$ , показаної на рис. 4,б,  $R_{max}/R_a = 4 \dots 8$ ;  $R_a/a < 0,5$ . Тоді,  $a/R_a > 2$  і відношення  $R_p/R_a < 2 \dots 6$ . Відповідно  $R_p/a < 1 \dots 3$ . У табл. 2 наведені значення  $R_a/a$ ,  $R_{max}/R_a$  і  $R_p/R_a$  для трьох розглянутих випадків. Як видно, випадок 2 займає проміжне положення. З переходом від випадку 1 до випадку 3 відношення  $R_a/a$  однозначно зменшується, а відношення  $R_{max}/R_a$  проходить точку мінімуму, тому що в другому випадку приймає найменше значення, рівне 4. Таким чином, випадок 2 є свого роду границею, що розділяє випадки 1 і 3. Порівнюючи встановлені експериментальним або розрахунковим шляхом значення відношень  $R_a/a$ ,  $R_{max}/R_a$ ,  $R_p/R_a$  і  $R_p/a$  з відповідними значеннями для випадку 2, можна оцінити структуру шорсткуватого шару, що утворюється для конкретного методу обробки.

Таблиця 2

Розрахункові значення відношень  $R_a/a$ ,  $R_{max}/R_a$ ,  $R_p/R_a$  і  $R_p/a$

Найменування параметрів	Випадок 1 (рис. 2)	Випадок 2 (рис. 4,а)	Випадок 3 (рис. 4,б)
$R_a/a$	0,734	0,5	$< 0,5$
$R_{max}/R_a$	$> 4$	4	4...8
$R_p/R_a$	$> 3$	2	$< 2 \dots 6$
$R_p/a$	$> 2,2$	1	$< 1..3$

**Висновки.** У роботі одержав подальший розвиток теоретико-імовірнісний підхід до визначення параметрів шорсткості поверхні при абразивній обробці, заснований на урахуванні імовірнісного характеру участі зерен у різанні. Показано, що все різноманіття умов формування шорсткості

поверхні при абразивній обробці зводиться до трьох принципових структур шорсткуватого шару оброблюваних поверхонь, обумовлених різними імовірнісними законами накладення й перекриття проекцій зерен на оброблювану поверхню. Це дозволило провести класифікацію структур шорсткуватого шару й установити значення параметрів шорсткості поверхні, що відповідають кожній зі структур. Показано, що повний профіль утворюється в результаті руйнування вершин мікронерівностей від дії механічних навантажень, що виникають при обробці. Тому шорсткість поверхні є результатом як процесу різання, так і результатом процесу механічного руйнування вершин мікронерівностей. Це погодиться із практикою абразивної обробки.

**Список літератури:** 1. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с. 2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. 3. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с. 4. 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. 5. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с.

*Надійшла в редколегію 26.02.2013р.*