

© Ю.Г. Кравченко¹, С.Т. Пацера¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

КІЛЬКІСТЬ АБРАЗИВНИХ ЗЕРЕН В КОНТАКТІ І ТОВЩИНА ЗРІЗУ ПРИ ШЛІФУВАННІ

© Yu. Kravchenko¹, S. Patsera¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

THE NUMBER OF ABRASIVE GRAINS IN THE CONTACT AREA AND CUTTING THICKNESS DURING A GRINDING PROCESS

Мета. Вивести розрахункові формули активної глибини рельєфу різальної поверхні круга, відносної опорної довжини профілю поверхні різання заготовки, кількості різальних зерен в зоні контакту шліфувального круга із заготовкою і товщини зрізу одиничним зерном.

Методика. Дослідження базується на застосуванні аналітико-ймовірнісних способів розрахунків активної глибини абразивного рельєфу різальної поверхні круга і відносної опорної довжини контактної поверхні різання заготовки. Вихідними даними служили параметри режиму шліфування (швидкість, подача і глибина) і рельєфу різальної поверхні шліфувального круга після правки: відносна опорна довжина і відстань між профілями зерен по глибині їх розподілів. Математичними моделями розподілів по відносній глибині є ступеневі функції відносної опорної довжини та відстані між профілями зерен. Аргументом вказаних функцій являється відносна глибина профілю від нульового рівня. При цьому введено природне обмеження на значення відносної глибини профілю, яка не повинна перевищувати величини 0,5.

Результати. Одержані формули визначення миттєвої товщини перетину зрізу кругом, активної глибини рельєфу різальної поверхні шліфувального круга, відносної опорної довжини профілю поверхні різання заготовки, кількості різальних зерен в контакті круг-заготовка і товщини зрізу на одиничне зерно.

Наукова новизна. Розроблені функціональні залежності для миттєвої товщини перетину зрізу кругом, відносної опорної довжини та відстані між профілями зерен в контакті круг-заготовка. Вказані залежності введені замість параметрів кінематики процесу шліфування (швидкості, подачі, глибини) і характеристики абразивного інструменту (зернистості, твердості, структури). Головним досягненням є запропоновані математичні моделі кількості абразивних зерен в контакті круг-заготовка і товщини зрізу на одиничне зерно.

Практична значимість. Результати досліджень дозволяють більш точно визначити кількість контактних абразивних зерен і товщину зрізу одиничним зерном при шліфуванні, які в якості вихідних даних необхідні при аналітичних розрахунках складових сили різання, температури шліфування, шорсткості обробленої поверхні і оптимальних умов процесу шліфування в цілому.

Ключові слова: абразивний рельєф, миттєва товщина, різальна поверхня, активна глибина, опорна довжина, кількість зерен, товщина зрізу.

Вступ. В основі процесу шліфування знаходиться робота дряпання-тертя абразивних зерен по оброблюваній поверхні з утворенням стружки.

Управління силою і температурою різання, періодом стійкості шліфувальних кругів, шорсткістю обробленої поверхні і продуктивністю процесу в цілому здійснюється через параметри абразивного рельєфу різальної поверхні круга (РПК) (сукупність зернистості, твердості, структури абразивного інструменту)

[1–3] і кінематики процесу (швидкість, поздовжню і поперечну подачу, глибину) шліфування [3].

Кількість вершин зерен після правки в контактні круг-заготовка і товщина зрізу на одиничне зерно є головними вихідними параметрами розрахунку показників і оцінки ефективності процесу шліфування.

Існують експериментальні і аналітичні способи визначення вихідних параметрів процесу шліфування.

Реєстрацією імпульсів від закладених в заготовці термопар С.Г. Редько [4] встановив, що в різанні беруть участь лише 10-12 % зерен від числа поверхневих.

Кількість активних зерен на РПК Ю.К. Новосолов [5] визначав способом прокатки шліфувального круга по тонкому паперу на шорсткій підложці.

Більш достовірні дані одержані В.В. Щипановим [6, 7] способом відстрілу від шліфувального круга дослідницького зразка зі слідами роботи різальних зерен.

Кількість зерен у вигляді конуса і товщина одиночного зрізу визначались О.Б. Федосєєвим [6, 7] теоретико-ймовірнісним моделюванням взаємодії поверхонь круга і заготовки за допомогою спеціальної безрозмірної функції зв'язку параметрів РПК і продуктивності процесу шліфування.

Для розрахунку товщини зрізу на одиничне зерно Є.Н. Маслов [8] запропонував формулу на основі схеми стружкоутворення з упорядоченим розташуванням зерен (відстань між вершинами зерен приймалася за 3,5 діаметри зерна), яка із-за помилкових вихідних допущень дає необґрунтовані і занижені результати.

Свою формулу на основі трьохмірної моделі зрізу запропонував Г.Б. Лур'є [9], який приймав форму зрізу у вигляді двох пірамід зі спільною основою без урахування різновисотного розподілу різальних зерен і ймовірного перекриття їх траєкторій руху в процесі шліфування.

Згідно розрахункам С.М. Корчака [10] для масштабної схеми взаємодії зерен круга із заготовкою ширина зрізу у 15 разів більша за його середню товщину.

В останні роки заслуговує уваги робота В.Л. Доброскока і Ю.К. Новосолова [11] по розподілу вершин зерен на робочій поверхні абразивного інструменту і підходу до визначення миттєвої товщини шару при шліфуванні, а також об'єму матеріалу, що зрізується одним зерном.

Аналіз приведених робіт показав розрізненість їх досліджень і відсутність визначення комплексного впливу характеристик абразивних кругів і режиму шліфування на головні параметри стружкоутворення, що є актуальним питанням в машинобудуванні, включно в технології гірничого машинобудування.

Мета роботи і постановка задачі

Кінцевим елементом складної системи стружкоутворення при шліфуванні є товщина зрізу a_z від одиничного абразивного зерна.

Для спрощення визначення товщини a_z були введені узагальнені параметри замість сукупності елементів режиму шліфування і характеристики абразивного інструменту.

1. Узагальненим параметром кінематики процесу шліфування прийнята товщина миттєвого перетину зрізу a_m .

2. Становище абразивного рельєфу РПК після правки визначалося відносною опорною довжиною t_p і відстанню між профілями зерен l_p по глибині p їх розподілу

$$\begin{cases} t_p = \varepsilon^\nu \cdot C_t \cdot n_z \\ l_p = \varepsilon^{-\lambda} \cdot C_l \cdot l_z \end{cases} \quad \varepsilon < 0,5 \quad (1)$$

на основі значень концентрації зерен $n_z = \frac{62-2 \cdot N}{100}$ (N – номер структури) і відстані між зернами $l_z = \frac{1}{z_l} = 0,204 \cdot \pi \cdot \frac{d_z}{n_z}$ (z_l – число зерен на одиниці довжини [2], $d_z = 1,105 \cdot d$ – розмір абразивного зерна, (d – номінальна величина зернистості, $d = 0,25$ мм відповідає номеру зернистості 50 в мешах) і відносної глибини профілю $\varepsilon = \frac{p}{d_z}$ (p – значення глибини від нульового рівня). Для умов правки електрокорундових кругів алмазом в оправі ($v_{\Pi} = 35$ м/с, $s_{\Pi} = 0,1$ мм/об, $t_{\Pi} = 0,01$ мм/подв. хід) показники степені при відносній глибині ε дорівнюють $\nu = 0,89$ і $\lambda = 0,55$.

Значення коефіцієнтів C_t і C_l , які враховують вплив твердості кругів, наведені в табл. 1 роботи [3].

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів C_t і C_l

| Позначення коефіцієнтів | Значення коефіцієнтів за твердістю відповідно ISO (у дужках наведені значення глибини лунки h , мм): | | | | |
|-------------------------|--|----------|----------|----------|----------|
| | $H(6,2)$ | $I(5,3)$ | $J(4,4)$ | $K(3,6)$ | $L(2,9)$ |
| C_t | 1,41 | 1,72 | 2,02 | 2,29 | 2,56 |
| C_l | 1,22 | 1,01 | 0,87 | 0,76 | 0,70 |

Діаметр перерізу (круга) приведенного зерна обчислюється через значення ширини (хорди)

$$b_{x\varepsilon} = t_p \cdot l_p = 0,641 \cdot \varepsilon^{\nu-\lambda} \cdot C_t \cdot C_l \cdot d_z \quad (2)$$

і дорівнює [2]

$$d_{к\varepsilon} = \frac{4}{\pi} \cdot b_{x\varepsilon} = 0,816 \cdot \varepsilon^{\nu-\lambda} \cdot C_t \cdot C_l \cdot d_z, \quad (3)$$

а площа круга відповідно дорівнює

$$S_{z\varepsilon} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{к\varepsilon}^2 = 0,523 \cdot (\varepsilon^{\nu-\lambda} \cdot C_t \cdot C_l \cdot d_z)^2. \quad (4)$$

Кількість зерен рельєфу РПК на одиниці площі визначається із відношення опорної площі $t_{S\varepsilon} = \varepsilon^\nu \cdot C_t \cdot n_z$ до площі перерізу зерна $S_{z\varepsilon}$ (4)

$$z_{S\varepsilon} = \frac{t_{S\varepsilon}}{S_{z\varepsilon}} = \frac{1,912 \cdot \varepsilon^{-\nu+2\lambda} \cdot n_z}{C_t \cdot C_l^2 \cdot d_z^2}. \quad (5)$$

Поетапні математичні переходи від товщини миттєвого перетину a_m , параметрів рельєфу РПК t_p і l_p до товщини зрізу одиничним зерном a_z складають алгоритм розрахункової моделі і є предметом даних досліджень.

Мета роботи полягає у виконанні аналітико-ймовірнісних розрахунків активної глибини рельєфу РПК, відносної опорної довжини профілю поверхні різання заготовки, кількості активних зерен в контакті круг-заготовка і товщини зрізу одиничним зерном.

Основна частина

Рішення поставленої задачі складається із чотирьох блоків.

1. Активна глибина абразивного рельєфу РПК (глибина взаємного проникнення вершин різальних зерен і гребішків оброблюваного матеріалу на поверхні різання)

Вона залежить від кінематики процесу різання (швидкостей подачі металу на площадці контакту і обертання шліфувального круга) і основних геометричних параметрів рельєфу РПК – опорної довжини t_p і відстані між профілями зерен l_p (1).

Швидкість подачі металу в напрямку центра круга на площадці контакту $l_k \times V$ дорівнює $\omega_k = 1000 \cdot s \cdot \sin \psi_k$ (рис. 1).

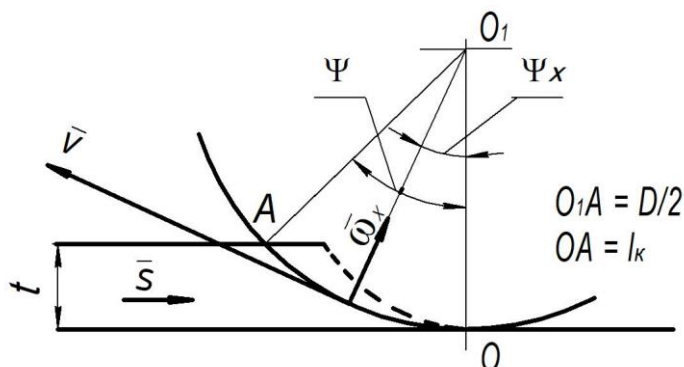


Рис. 1. Кінематична схема подачі металу в зоні контакту круга із заготовкою на прикладі плоского шліфування (v – швидкість, s – поздовжня подача, t – глибина шліфування)

З огляду на малість кута контакту ψ довжина дуги контакту виражається формулою $l_k = \sqrt{D \cdot t}$, а сам кут контакту приймається за $\psi = 2 \cdot \sqrt{\frac{t}{D}}$.

Середня швидкість подачі металу визначається інтегруванням функції ω в межах кута ψ :

$$\begin{aligned} \omega &= 1000 \cdot s \cdot \frac{1}{\psi} \cdot \int_0^{\psi} \sin \psi_x d \psi_x = \\ &= \frac{1000 \cdot s}{\psi} \cdot \int_0^{\psi} \psi d \psi = 1000 \cdot s \cdot \sqrt{\frac{t}{D}}. \end{aligned}$$

Тоді товщина миттєвого перетину зрізу кругом за час його повороту

$$\tau_K = \frac{\sqrt{D \cdot t}}{1000 \cdot v} \text{ на кут } \psi \text{ дорівнює}$$

$$a_M = \omega \cdot \tau_K = 1000 \cdot s \cdot \sqrt{\frac{t}{D}} \cdot \frac{\sqrt{D \cdot t}}{1000 \cdot v} = \frac{s \cdot t}{v}. \quad (6)$$

Стабільність процесу шліфування із заданою інтенсивністю зйому металу B контакту круга із заготовкою постійно перебивається перетином s_a регулярно підведеними в цю площину різальними зернами певного рівня p_a рельєфу РПК

$$s_M = a_M \cdot B = s_a. \quad (7)$$

Із схеми рис. 2 слідує, що площа s_i профіля елементарної смужки dp дорівнює добутку $s_i = f_i \cdot z_{pi}$ i -ої ділянки перетину абразивного зерна $f_i = b_{pi} \cdot dp$ і їх кількості $z_{pi} = \frac{B}{l_{pi}}$ на певному рівні профілю p_i .

Вираз сумарної площі на рівні p_i запишемо у вигляді $S_{pi} = \sum_{i=1}^n z_{pi} \cdot f_i$. Після підстановки $z_{pi} = \frac{1}{l_{pi}}$ (1), $b_{pi} = t_p \cdot l_p$ (1) і рішення інтегралу $\int_{p_{i-1}}^{p_i} b_{pi} dp$ одержуємо

$$\begin{aligned} S_{pi} &= \sum_{i=1}^n \frac{B}{\left(\frac{p}{d_z}\right)^{-\lambda} \cdot C_l \cdot d_z} \cdot C_t \cdot C_l \cdot l_z \cdot n_z \cdot \int_{p_{i-1}}^{p_i} \left(\frac{p}{d_z}\right)^{\nu-\lambda} \cdot dp = \\ &= \frac{B \cdot C_t \cdot n_z}{(d_z)^\nu \cdot (1 + \nu - \lambda)} \sum_{i=1}^n p^\lambda \cdot (p_i^{1+\nu-\lambda} - p_{i-1}^{1+\nu-\lambda}). \end{aligned}$$

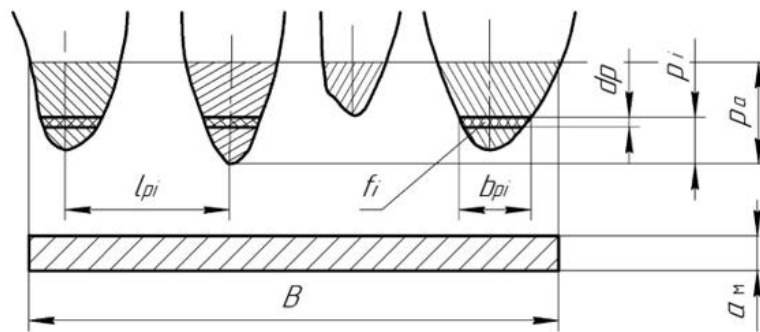


Рис. 2. Схема для розрахунку площі активного профіля рельєфу РПК

Наближено різницю при p_i замінюємо диференціалом. Так як $p_i - p_{i-1} \approx \approx \text{const}$ і $p_i - p_{i-1} \rightarrow 0$, то приріст функції $p_i^{1+\nu-\lambda} - p_{i-1}^{1+\nu-\lambda} =$

$$= y'(\xi) \cdot \Delta p_i = (1 + \nu - \lambda) \cdot p_i^{\nu-\lambda} \cdot \Delta p_i.$$

Перед інтегруванням для пошукового рівня p_a запишемо

$$s_a = \frac{B \cdot C_t \cdot n_z}{(d_z)^\nu} \int_0^{p_a} p_i^\lambda \cdot p_i^{\nu-\lambda} \cdot dp.$$

Остаточно маємо

$$s_a = \frac{B \cdot C_t \cdot n_z}{(d_z)^\nu \cdot (1+\nu)} \cdot p_a^{(1+\nu)}. \quad (8)$$

Порівнюючи s_m (7) та s_a (8), знаходимо вираз для розрахунку активної глибини рельєфу РПК

$$p_a = \left[\frac{a_m \cdot d_z^\nu \cdot (1+\nu)}{C_t \cdot n_z} \right]^{\frac{1}{1+\nu}}. \quad (9)$$

2. Відносна опорна довжина профілю шорсткості контактної поверхні різання заготовки

Представимо зону взаємодії активних зерен РПК з оброблюваним матеріалом поверхні різання у вигляді об'єму $l_k \cdot B \cdot p_a$. В залежності від глибини p_a (9) в зоні контакту круга із заготовкою будуть знаходитися $z_{sa} \cdot l_k \cdot B$ зерен, де z_{sa} – число активних зерен на одиниці площі по формулі (5).

Однак окрім кількості активних зерен велике значення мають реальні розміри шліфувальних рисок по ширині від дряпання-різання цими зернами на поверхні різання і фактична кількість рисок з урахування їх перекриття від накладання траєкторій руху зерен. В цьому зв'язку проведемо аналіз ймовірності зміни опорної довжини t_m поверхні різання за поворот круга на відстань довжини контакту l_k .

На відстані x від початкової лінії OO виділимо на площадці контакту смужку шириною dx (рис. 3) з $z_{sa} \cdot B \cdot dx$ активними зернами.

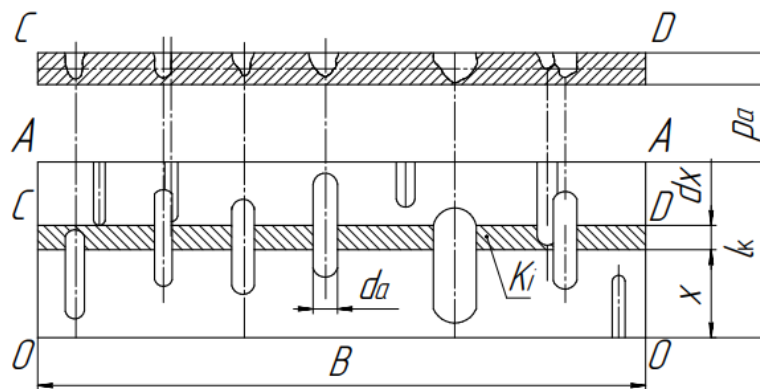


Рис. 3. Схема для ймовірнісного розрахунку опорної довжини профілю поверхні різання в зоні контакту круг-заготовка

Тому що ймовірність зрізання точки K_i на дискретній лінії CD однією різальною кромкою дорівнює $p_i = \frac{d_a}{B}$ (d_a – діаметр зерна (3) на рівні ϵ при глибині

p_a (9)), то відносна опорна довжина лінії CD від діяння всіх зерен на dx може бути представлена ступеневою залежністю

$$t_M(dx) = \left(1 - \frac{d_a}{B}\right)^{z_{sa} \cdot B \cdot dx}.$$

В початковий момент різання ($x = 0$) відносна опорна довжина лінії $O-O$ дорівнює 1. В процесі руху активних зерен в напрямку вектору швидкості круга опорна довжина t_M зменшується і на довжині x досягає значення $t_M(x)$.

З метою обґрунтування структури формули для $t_M(x)$ застосуємо метод малих варіацій зміни x на приріст Δx і порівняємо вирази $t_M(x)$ і $t_M(x + dx)$. Відсутність подій зміни t_M на довжині $x + dx$ означає відсутність подій як на довжині x , так і на довжині dx . Тоді по правилу множення ймовірностей знаходимо

$$t_M(x + dx) = t_M(x) \cdot \left(1 - \frac{d_a}{B}\right)^{z_{sa} \cdot B \cdot dx}. \quad (10)$$

Після розкладання правої частини функції (10) в ряд через ступінь різниці і обмеження його першим членом по аналогії із залежністю

$$(1 - x)^n = 1 - n \cdot x, \quad x < 1 \quad [12, \text{с. 164}]$$

маємо

$$\left(1 - \frac{d_a}{B}\right)^{z_{sa} \cdot B \cdot dx} = 1 - z_{sa} \cdot d_a \cdot dx. \quad (11)$$

Ліву частину рівняння (10) запишемо у вигляді суми

$$t_M(x + dx) = t_M(x) + \frac{dt_M(x)}{dx} \cdot dx. \quad (12)$$

Підставляючи вирази (11) і (12) у рівняння (10), одержуємо

$$\frac{dt_M(x)}{t_M(x)} = -z_{sa} \cdot d_a \cdot dx. \quad (13)$$

Інтегрування рівняння (13) дає

$$\ln t_M(x) = -z_{sa} \cdot d_a \cdot x + C,$$

звідки після потенціювання

$$t_M(x) = e^{-z_{sa} \cdot d_a \cdot x + C} = C_1 \cdot e^{-z_{sa} \cdot d_a \cdot x}.$$

Але так як на лінії OO $t_M(x) = 1$ при $x = 0$, то і $C_1 = 1$.

В результаті при $x = l_k$ знаходимо пошукову відносну опорну довжину профілю поверхні різання заготовки

$$t_M = e^{-z_{sa} \cdot d_a \cdot l_k}. \quad (14)$$

3. Кількість різальних (активних) зерен в контакті круг-заготовка

Для методів обробки з утворенням стружки, включно і при шліфуванні, відносна опорна довжина (або площа) мікронерівностей обробленої поверхні на

рівні середньої лінії зазвичай приймається близько $t_{Rp} = 0,5$ [13]. Рівень середньої лінії профілограми $m-m$ ($\varepsilon = 0,5$) вважається самою сталою величиною серед параметрів шорсткості поверхні.

Подібно визначенню t_{Rp} при $p_m = 0,5 \cdot R_z$ (p_m – значення рівня профілю до середньої лінії, R_z – висота нерівностей профілю по десяти точках) і у зв'язку з деякою невизначеністю t_p (1) на верхніх рівнях абразивного рельєфу при $p \rightarrow 0$, відносна довжина зрізів усередненого профілю шорсткості поверхні різання (простору між гребішками металу після перетину дискретної опорної лінії контурами різальних зерен) також приймається на рівні відповідної глибини профілю РПК

$$p_m = 0,5 \cdot p_a \left(\varepsilon = 0,5 \frac{p_a}{d_z} \right) \quad (15)$$

і дорівнює

$$t_3 = 1 - t_m. \quad (16)$$

Кількість різальних зерен в контакті, які безпосередньо беруть участь у формуванні рельєфу поверхні різання, визначаються із співвідношення довжини зрізів $B \cdot t_3$ до діаметра (ширини контуру зерен) d_a (3) при ε (15)

$$z_k = \frac{B \cdot t_3}{d_{a\varepsilon}}. \quad (17)$$

4. Середня товщина зрізу

Форма перетину зрізу по глибині одиничного зерна копіюється контуром його вершини.

Так як зрізання дискретної поверхні металу може здійснюватися всією шириною контуру або лівою, або правою стороною, то площу перетину радіального зрізу виразимо через ширину (хорду) зерна b_ε (2) (замість діаметра d_ε (3)) і глибини врізання вершини незношеного зерна в метал a_0

$$\begin{aligned} f_3 &= \int_0^{a_0} b_p \cdot dp = \frac{0,641 \cdot C_t \cdot C_l \cdot d_z}{d_z^{\nu-\lambda}} \cdot \int_0^{a_0} p^{\nu-\lambda} \cdot dp = \\ &= \frac{0,641 \cdot C_t \cdot C_l \cdot d_z^{1-\nu+\lambda}}{1+\nu-\lambda} \cdot a_0^{1+\nu-\lambda}. \end{aligned} \quad (18)$$

Середнє значення товщини зрізу визначається наступним розрахунком.

Об'єм металу, який приходить на одне різальне зерно, дорівнює

$$\omega_z = \frac{a_m \cdot l_k \cdot B}{z_k}. \quad (19)$$

З другої сторони цей об'єм можна визначити через середню площу перетину зрізу f_3 (18) і довжину різі l_{pk}

$$\omega_z = f_3 \cdot l_{pk}. \quad (20)$$

Довжина (шлях) різку визначається із геометричного обмеження

$$l_{pa} \leq l_{pk}, \quad (21)$$

де l_{pa} (1) при $\varepsilon = \frac{p_a}{d_z}$ – відстань між профілями зерен на верхніх рівнях p_a (9);

$$l_{pk} = \sqrt{D \cdot (t - p_a)} \quad (22)$$

– довжина дуги різку з уточненням на відсутність подачі металу (проковзування) в початковий момент врізання (рис. 1, точка 0, кут $\psi_x = 0$).

Із рівності ω_z (19) і ω_z (20) при z_k (17) і d_a (3) отримуємо

$$f_3 = \frac{a_m \cdot d_a \cdot l_k}{(1 - t_m) \cdot l_{pk}} = \frac{0,816 \cdot a_m \cdot p_a^{v-\lambda} \cdot C_t \cdot C_l \cdot d_z^{1-v+\lambda}}{(1 - t_m)} \cdot \frac{l_k}{l_{pk}}. \quad (23)$$

Після спільного рішення двох рівнянь f_3 (18) і f_3 (23) маємо

$$a_0 = \left[\frac{1,273 \cdot a_m \cdot (1+v-\lambda) \cdot p_a^{v-\lambda}}{(1 - t_m)} \cdot \frac{l_k}{l_{pk}} \right]^{\frac{1}{1+v-\lambda}}. \quad (24)$$

Величина зносу різальних зерен визначається через діаметр площадки зносу d_3 із виразу (3)

$$d_3 = 0,816 \cdot p^{v-\lambda} \cdot C_t \cdot C_l \cdot d_z^{1-v+\lambda}$$

і далі при $p = a_3$

$$a_3 = \left(\frac{d_3}{0,816 \cdot C_t \cdot C_l \cdot d_z^{1-v+\lambda}} \right)^{\frac{1}{v-\lambda}}. \quad (25)$$

Пошукова середня товщина зрізу дорівнює різниці a_0 (24) і a_3 (25)

$$a_z = a_0 - a_3. \quad (26)$$

Реалізація і аналіз

Алгоритм і результати розрахунків параметрів процесу абразивного шліфування приведені для прикладу в табл. 2.

Умови плоского шліфування: круг ПП, діаметр $D = 200$ мм, ширина $B = 20$ мм, характеристика круга 24А 60 J 8 V; швидкість $v = 35$ м/с, подача $s = 0,167$ м/с, глибина $t = 0,02$ мм/хід.

Вихідні дані абразивної матриці (1): розмір зернистості $d_z = 0,276$ мм; концентрація зерен $n_z = 0,46$; відстань між зернами $l_z = 0,385$ мм; коефіцієнти твердості $C_t = 2,02$ і $C_l = 0,87$; показники степені $v = 0,89$ і $\lambda = 0,55$. Діаметр зносу вершин зерен $d_3 = 0,04$ мм.

При даних умовах процесу шліфування кількість різальних зерен z_k (17) від числа наявних $z_{se} \cdot B \cdot l_k$ на РПК складає 79 %.

Ширина профілю приведенного зерна b_ε (2) перевищує товщину зрізу a_0 (24) у 70 разів.

Миттєва товщина зрізу a_m (6), товщина зрізу одиничним зерном a_0 (24) і активна глибина рельєфу p_a (9) складають ряд $\approx 1 : 10 : 60$.

Таблиця 2

Розрахункові значення геометричних параметрів процесу шліфування

| №№ п/п | Найменування параметрів процесу | Розрахункові значення |
|-----------|---|--------------------------|
| 1 | Миттєва товщина зрізу a_m (6), мм | 0,000095 |
| 2 | Активна глибина рельєфу p_a (9), мм | 0,0059 |
| 3 | Відносна глибина рельєфу ε (15) при $0,5p_a$ | 0,011 |
| 4 | Опорна довжина рельєфу t_a (1), мм | 0,016 |
| 5 | Відстань між профілями l_a (1), мм | 4,06 |
| 6 | Ширина профіля b_ε (2), мм | 0,066 |
| 7 | Діаметр перерізу d_ε (3), мм | 0,085 |
| 8 | Кількість зерен рельєфу $z_{s\varepsilon}$ (5), мм ² | 2,91 |
| 9 | Довжина контакту l_k , мм | 2,0 |
| 10 | Опорна довжина поверхні різання t_m (14) | 0,609 |
| 11 | Кількість різальних зерен z_k (17) | 91,9 |
| 12 | Відстань між профілями l_{pa} (21), мм | 2,80 |
| 13 | Довжина різання l_{pk} (22), мм | 1,68 |
| 14 | Товщина зрізу в початковий період a_0 (24), мм | 0,00093 |
| 15 | Радіальний знос зерен a_z (25), мм | 0,00032 |
| 16 | Товщина зрізу при зносі a_z (26), мм | 0,00061 |

Таким чином було здійснено перехід від плоскої радіальної моделі профілографування рельєфу РПК в координатах відстань між профілями абразивних зерен – глибина розподілу залягання їх вершин до об'ємної моделі визначення геометричних параметрів дискретного процесу стружкоутворення при шліфуванні в системі товщина – ширина – довжина зрізу одиничним різальним зерном.

В кінцевому підсумку це розширило шлях до аналітичного більш точного визначення складових сили різання, температури шліфування, шорсткості обробленої поверхні і на їх основі управління процесом шліфування в цілому.

Висновки

1. Методика визначення об'ємної геометрії зрізу одиничним зерном розроблена на основі трьох узагальнених вихідних параметрів кінематики процесу шліфування і рельєфу різальної поверхні абразивного круга: товщини миттєвого

перерізу зрізу, відносної опорної довжини і відстані між профілями зерен по глибині їх розподілу.

2. Введено новий розрахунковий параметр кінематики процесу шліфування і відносної опорної довжини рельєфу РПК – активну глибину рельєфу РПК.

3. Виконано аналітично-ймовірнісний розрахунок відносної опорної довжини профілю шорсткості контактної поверхні різання заготовки.

4. Кількість різальних зерен в зоні контакту шліфувальний круг – оброблювана заготовка розрахована із нової умови відношення опорної ширини зрізів до ширини (діаметру) різальних зерен.

5. Середня товщина зрізу на одиничне різальне зерно визначена у поєднанні з параметрами кінематики процесу шліфування і рельєфу РПК.

Перелік посилань

1. Кравченко, Ю.Г. (2000) Параметрирование абразивной матрицы шлифовальных кругов. *Сборник ХГПУ «Резание и инструмент в технологических системах»*, 57, 126-130.
2. Кравченко, Ю.Г. (2000) Строение исходного рельефа режущей поверхности шлифовальных кругов. *Збірник наук. праць ХДПУ «Високі технології в машинобудуванні»*, 1(3), 154-160.
3. Кравченко, Ю.Г. & Пацера, С.Т. (2019) Значення параметрів абразивного рельєфу різальної поверхні шліфувальних кругів. *Журнал «Судостроение и морская инфраструктура» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*, 1(11), 32 -39.
4. Редько, С.Г., (1960) Количество абразивных зерен шлифовального круга, участвующих в резании. *«Станки и инструмент»*, 12, 10-12.
5. Новоселов, Ю.К. (1979) *Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке*. Саратов: Саратовский ун-т.
6. Резников, А.Н., Федосеев, О.Б. & Щипанов, В.В. (1976) Теоретико-вероятностное описание режущего аппарата шлифовальных инструментов, толщины среза и усилия резания. *«Физика и химия обработки материалов»*, 4, 93-102.
7. Резников, А.Н., Федосеев, О.Б. & Щипанов, В.В. (1977) Процесс резания при шлифовании абразивным и алмазным инструментом. *Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник, под ред. А.Н. Резникова*. Москва: Машиностроение, 108-115.
8. Маслов, Е.Н. (1974) *Теория шлифования материалов*. Москва: Машиностроение.
9. Лурье, Г.Б. (1969) *Шлифование металлов*. Москва: Машиностроение.
10. Корчак, С.Н. (1974) *Производительность процесса шлифования стальных деталей*. Москва: Машиностроение.
11. Доброскок, В.Л. & Новосолов, ЮК. (2010) Процеси абразивної обробки. *Основи теорії різання матеріалів: Підручник під ред. М.П. Мазура*. Львів.: Новий світ 2000, 360-397.
12. Бронштейн, И.Н. & Семендяев, К.А. (1962) *Справочник по математике. Изд-ие 10*. Москва: ГИФМЛ.
13. Рыжов, Э.В., Суслов, А.Г. & Федоров, В.П. (1979) *Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин*. Москва: Машиностроение.

АННОТАЦИЯ

Цель. Вывести расчетные формулы активной глубины рельефа режущей поверхности круга, относительной опорной длины профиля поверхности резания заготовки, количества режущих зерен в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой и толщины среза единичным зерном.

Методика. Исследование базируется на применении аналитико-вероятностных способов расчетов активной глубины абразивного рельефа режущей поверхности круга и относительной опорной длины контактной поверхности резания заготовки. Исходными данными служили параметры режима шлифования (скорость, подача и глубина) и рельефа режущей поверхности шлифовального круга после правки: относительная опорная длина и расстояние между профилями зерен по глубине их распределений. Математическими моделями распределений по относительной глубине есть степенные функции относительной опорной длины и расстояния между профилями зерен. Аргументом указанных функций является относительная глубина профиля от нулевого уровня. При этом введено естественное ограничение на значения относительной глубины профиля, которая не должна превышать величины 0,5.

Результаты. Получены формулы определения мгновенной толщины сечения среза кругом, активной глубины рельефа режущей поверхности шлифовального круга, относительной опорной длины профиля поверхности резания заготовки, количества режущих зерен в контакте круг-заготовка и толщины среза на единичное зерно.

Научная новизна. Разработаны функциональные зависимости для мгновенной толщины сечения среза кругом, относительной опорной длины и расстояния между профилями зерен в контакте круг-заготовка. Указанные зависимости введены вместо параметров кинематики процесса шлифования (скорости, подачи, глубины) и характеристики абразивного инструмента (зернистости, твердости, структуры). Главным достижением является предложенные математические модели количества абразивных зерен в контакте круг-заготовка и толщина среза на единичное зерно.

Практическое значение. Результаты исследований позволяют более точно определить количество контактных абразивных зерен и толщину среза единичным зерном при шлифовании, которые в качестве исходных данных необходимы при аналитических расчетах, составляющих силы резания, температуры шлифования, шероховатости обработанной поверхности и оптимальных условий процесса шлифования в целом.

Ключевые слова: абразивный рельеф, мгновенная толщина, режущая поверхность, активная глубина, опорная длина, количество зерен, толщина среза.

ABSTRACT

Purpose. This article is supposed to determine the formulas for calculation of the active depth of the relief of the cutting surface of the grinding wheel, relative bearing length of the cutting surface pattern of the workpiece, number of cutting grains in the contact area between grinding wheel surface and workpiece, as well as the cutting thickness per single grain.

Methodology. The study is based on the application of analytical and probabilistic methods for calculation of the active depth of abrasive relief of the cutting surface of the grinding wheel and relative bearing length of the contact cutting surface of the workpiece. The initial data include the parameters of the grinding pattern (speed, feed and depth) and relief of cutting surface of the grinding wheel after dressing: relative bearing length and distance between the grain patterns depending on their distribution through depth. The mathematical models of distribution through relative depth are presented by the exponential functions of the relative bearing length and distance between the grain profiles. The relative depth of profile from the zero level is the argument of specified functions. At the same time, a natural constraint was introduced for the values of the relative depth of profile, which should not exceed the value of 0.5.

Findings. We obtained the formulas for determination of the instant thickness of the cross section being cut by the grinding wheel, active depth of the relief of the cutting surface of the grinding wheel, relative bearing length of the cutting surface pattern of the workpiece, number of cutting grains in the contact area between grinding wheel surface and workpiece, as well as the cutting thickness per single grain.

Originality. We developed a functional relationship for the instant thickness of the cross section being cut by the grinding wheel, relative bearing length and distance between the grain patterns in the contact area between grinding wheel surface and workpiece. The abovementioned functional relationships were introduced instead of parameters of grinding process kinematics (speed, feed and depth) and characteristics of the abrasive tool (graininess, hardness and structure). The chief accomplishment is the proposed mathematical models of the number of abrasive grains in the contact area between grinding wheel surface and workpiece, as well as the cutting thickness per single grain.

Practical implications. The findings of an investigation make it possible to elaborate the number of abrasive grains in the contact area and cutting thickness per single grain during a grinding process, which are necessary as initial data for analytical calculations constituting the cutting force grinding temperature, roughness of treated surface and optimum conditions of the overall grinding process.

Keywords: *abrasive relief, instant thickness, cutting surface, active depth, bearing length, number of grains, cutting thickness.*