

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.923.42

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.4-1/02>**Рудик А.В.**

Чернігівський національний технологічний університет

Пасов Г.В.

Чернігівський національний технологічний університет

ЗАЛЕЖНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ ЗРІЗІВ ВІД РЕЖИМІВ ПРИ ЗУСТРІЧНОМУ ТА ПОПУТНОМУ ШЛІФУВАННІ

Параметри зрізу визначають енергетичні та економічні показники процесу шліфування. Інтенсивність контактів різальних кромок абразивного інструмента із припуском відповідає закону Пуассона. Це дає змогу знайти елемент імовірності, а на його основі – математичне сподівання та дисперсію. Отже, можна моделювати закон зміни інтервалів часу між контактами за поворотом деталі та відсоток тих, де виконуються умови різання. З іншого боку, була отримана проекція на нормаль до поверхні інструмента відносно швидкості деталі. Це дає змогу знаходити нормальну швидкість відомих методів як для зустрічного, так і попутного напрямів подачі. Товщину зрізів знаходять як найбільшу відстань між сусідніми поверхнями різання. Враховані усі кінематичні складники та різне за висотою положення кромок щодо найбільш виступаючих.

У процес шліфування поверхонь обертання доповнений перелік параметрів зрізу, де поряд із товщиною зрізу необхідно вказувати інтервали часу між контактами кромок із припуском та відсоток різальних серед їх загальної кількості. Запропонована методика дає змогу враховувати усі кінематичні складники та відносну орієнтацію інструмента. Отримані теоретичні залежності параметрів зрізів від режиму шліфування. Побудовані графіки впливу режимних параметрів на параметри зрізів. У разі збільшення швидкості різання зменшуються інтервали між контактами, товщина зрізів, відсоток різальних кромок, що не суперечить відомим експериментальним даним. Методика дає змогу врахувати вплив зміни стану робочої поверхні круга та забірною конуса через зношення інструменту на енергетичну насиченість процесу.

Розрахунки доводять, що інтервали часу між контактами для зустрічної обробки є більшими, ніж для попутної, звідси і відповідна товщина зрізів. У разі збільшення швидкості різання зменшуються товщина зрізів та частка різальних кромок.

Ключові слова: нормальна швидкість, імовірність, математичне сподівання, дисперсія, товщина зрізу, інтервали часу між контактами, відсоток різальних кромок.

Постановка проблеми. Відомо, що рівняння товщини зрізу є основним у теорії шліфування [1–3; 5] та визначає низку параметрів процесу, таких як продуктивність, якість, силова та теплова напруженість, потужність, зношення інструмента.

До останнього часу універсальної просторової моделі, яка враховує розподіл товщини зрізів та умови переходу від пластичного деформування до різання, не існує, є лише плоска, яка спрощено може бути використаною для поздовжнього шліфування. Навіть для цих умов варто враховувати вплив утвореного зношенням забірною конуса на інструменті та, відповідно, поздовжньої подачі, що важливо, наприклад, для умов глибинного

шліфування. Це підкреслює актуальність досліджень.

Разом із товщиною зрізу доцільно визначати інтервали часу між контактами та відсоток різальних кромок серед тих, що контактують.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемою ефективного шліфування поверхонь займалися вітчизняні та радянські вчені, серед яких В.В. Гусев, Ю.В. Петраков, П.Р. Родин, Л.Н. Филимонов [1–5] та інші.

Постановка завдання. Метою статті є визначення параметрів зрізів (інтервалів часу, товщини та відсотка різальних кромок) для найбільш поширеного та дослідженого процесу шліфування

поверхонь обертання при зустрічному або попутному напрямках подачі.

Виклад основного матеріалу дослідження. З огляду на ординарність контактів різальних кромок із металом (по одній, а не парами), їхню імовірну кількість m за законом Пуассона із параметром a_k можна визначити як [2; 6]:

$$P(m, a_k) = \frac{a_k^m}{m!} \cdot e^{-a_k}, \quad (1)$$

де m – число різальних кромок, що вступило в контакт із металом. За відсутності контакту $m=0$:

$$P(0, a_k) = e^{-a_k}, \quad (2)$$

Параметр стаціонарного закону Пуассона a_k визначає число подій-контактів за проміжок деякого часу τ_k . Цей параметр знаходять множенням питомої кількості кромок $N(z_k)$ на одиниці довжини РПК глибиною, меншою z_k , на пройдений шлях $L = \tau_k \cdot v_{кр}$, де $v_{кр}$ – швидкість різання.

Для нестационарного потоку Пуассону параметр a_k^* є змінним за часом:

$$a_k^* \approx \tau_k \cdot v_{кр} \cdot \int_0^{\tau_k} N(x(\tau)) \cdot d\tau, \quad (3)$$

де $0 \leq x(\tau_k) \leq 1$ – відносна глибина проникнення металу щодо висоти профілю РПК:

$$x(\tau_k) = \frac{1}{H_n} \cdot \int_0^{\tau_k} V_n(\tau) \cdot d\tau, \quad (4)$$

де $V_n(\tau)$ – проекція вектора швидкості \vec{V} відносного руху заготовки виражена у функції часу τ на напрям нормалі \vec{n} до поверхні інструмента, H_n – висота профілю РПК, мкм. Інтегральна функція положення кромок за висотою H_n пов'язана з $N(x_k)$ співвідношенням [1]:

$$N(x(\tau_k)) = N_n \cdot F(x(\tau_k)), \quad (5)$$

де N_n – питома кількість кромок на одиниці довжини РПК (мм^{-1}).

Отже, імовірність того, що жодне зерно не вступило в контакт із металом, $m=0$ за час τ_k , що визначають:

$$P_0(\tau_k) = P(0, a_k^*) = e^{-a_k^*} = e^{-\tau_k \cdot v_{кр} \cdot \int_0^{\tau_k} N(x(\tau)) \cdot d\tau}, \quad (6)$$

Імовірну кількість кромок $N(z_k)$, які знаходяться на одиниці довжини РПК глибиною, не більшою z_k , можна, наприклад, визначити з рівняння [1] для закону бета-розподілення:

$$N(x_k) = N_n \cdot F(x_k) = N_n \cdot A_z \cdot \int_0^{x_k} t^{\gamma_z-1} (1-t)^{\eta_z-1} dt, \quad (7)$$

де $\gamma_z, \eta_z, A_z = \frac{\Gamma(\gamma_z + \eta_z)}{\Gamma(\gamma_z) \cdot \Gamma(\eta_z)}$ – параметри та постійний коефіцієнт для закону бета-розподілення [1], що характеризують число кромок за висотою z ; t – робоча змінна, x_k – безрозмірна глибина, $\Gamma(\eta_x)$ – гама функція.

Отже, імовірність відсутності контакту кромки з металом визначають:

$$P_0(\tau_k) = e^{-a_k} \approx \exp(-N_n \cdot \tau_k \cdot v_{кр} \cdot 10^3 \cdot A_z \cdot \int_0^{\tau_k} N(x_k) \cdot d\tau), \quad (8)$$

Із використанням стандартної функції пакету програм MathCAD це рівняння можна записати у вигляді:

$$P_0(\tau_k) = \exp(-N_n \cdot (\tau_k \cdot v_{кр} \cdot 10^3) \cdot pbeta(x_k)), \quad (9)$$

Для знаходження елементу імовірності та щільності розподілення варто провести диференціювання рівняння (9) за часом τ . Використовуючи правила похідної добутку та складної функції після спрощень, отримують:

$$\left. \frac{dP_0(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_k} = -P_0(\tau_k) \cdot N_n \cdot v_{кр} \cdot 10^3 \cdot \left\{ F(x(\tau_k)) + \tau_k \cdot f(x(\tau_k)) \cdot \frac{V_n(\tau_k)}{H_n} \right\}, \quad (10)$$

Тут $F(x)=pbeta(x)$; $f(x)=dbeta(x)$ – функція та щільність розподілення кромок за висотою РПК для закону бета-розподілення,

$$\frac{dX}{dz} = \frac{1}{H_n}, \quad \frac{dz}{d\tau} = V_n(\tau), \quad X(\tau_k) = \frac{\int_0^{\tau_k} V_n(\tau) \cdot d\tau}{H_n}, \quad \frac{V_n(\tau_k)}{H_n}$$

– відносна висота та нормальна швидкість, зараховані до висоти профілю H_n РПК; τ – деякий час у межах τ_k проходження кромкою області контакту.

Далі визначають математичне сподівання M_0 та дисперсію (або СКВ) інтервалів часу $\Delta\tau_k$ між контактами кромок за відомими правилами [7]:

$$m_{\Delta\tau}(\tau_k) = \int_0^{\tau_k} \tau \cdot \frac{\partial P_0(\tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau, \quad a$$

$$D_{\Delta\tau}(\tau_k) = \int_0^{\tau_k} \tau^2 \cdot \frac{\partial P_0(\tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau \quad (11)$$

Таким чином, ймовірність контакту із припуском є функцією від проміжку часу; проявляються статистичний (марка, стан РПК A_z, N_n, H_n) та кінематичний ($v_{кр}, v_n$) ефекти [1] (рис. 1).

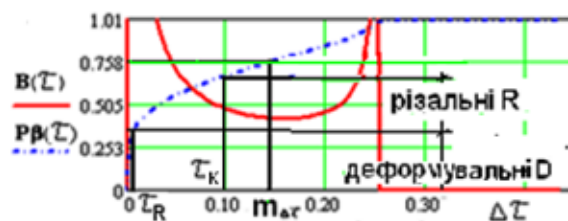


Рис. 1. Функція $PB(\tau)$ та щільність $B(\tau)$ розподілення інтервалів часу

Ці графіки побудовані для умов круглого поздовжнього шліфування з параметрами розсіювання $m_{\Delta\tau} = 15$ мкс, $\sigma_{\Delta\tau} = 0,16$ мкс.

На рисунку 2 представлені графіки наведених залежностей.

Виконання умов необхідних для переходу кромки від пластичного деформування до різання, за сучасними уявленнями, описують так званим визначальним рівнянням при існуванні

конкретних значень тиску на задніх поверхнях кромки, який дорівнює межі міцності оброблюваного матеріалу, однак ці умови автори не уточнюють.

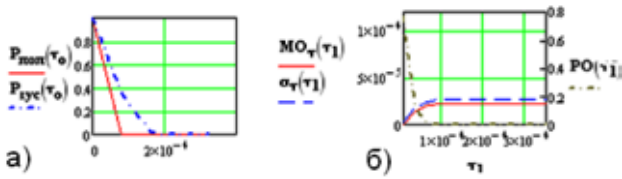


Рис. 2. Імовірності зникнення контакту (а) МО та СКВ інтервалів між контактами для зустрічного та попутного шліфування (б)

Під товщиною зрізу A_z [4] розуміють найбільшу відстань між сусідніми положеннями поверхонь різання, яку спрощено можна оцінити добутком $V_{n,max} \cdot m_{\Delta t}$. З точки зору інтенсивності обробки режими є еквівалентними, якщо ці відстані однакові. Нормальна швидкість, на думку авторів, – більш зручний показник інтенсивності, ніж питома продуктивність, бо враховує усі кінематичні складники та описує локальну інформацію.

У роботі [5] отримані рівняння для знаходження нормальної швидкості для зустрічної та попутної подач, отже:

$$A_z = V_{n,max} \cdot m_{\Delta t} + \Delta Z_{max}, \quad (12)$$

Додаткове заглиблення кромки щодо рівня найбільш виступаючих поверхонь, зумовлене їх різним положенням за висотою РПК, визначають за правилом математичного сподівання (МО):

$$\Delta z(x_k) = H_n \cdot \int_0^{x_k} t^* f(t) \cdot dt, \quad (13)$$

де $f(t) = A_x \cdot t^{\gamma_x-1} (1-t)^{\gamma_x-1} = dbeta(t)$ – щільність розподілення положення кромки за висотою РПК, t – робоча змінна.

Динаміка зміни заглиблення припуску вглиб РПК за кутом обертання деталі (без урахування впливу забірного конусу прилегло до торця з боку подачі) визначається скалярним добутком векторів нормалі та швидкості відносного руху [5], отже,

$$V_n(\theta) = \omega_\delta \cdot (R+r) \cdot \sin \theta \approx V_\delta \cdot \left[1 + \frac{R}{r}\right] \cdot \theta, \quad (14)$$

З урахуванням усіх кінематичних складників поздовжнього та урізного шліфування:

$$V_{n,ноз} = \omega_\delta \cdot \{(R+r) \cdot \theta_n + t_0 + S_0 \cdot \alpha\}, \quad (15)$$

де $\theta_n = \theta_2 - \theta_1 = \sqrt{\frac{2r \cdot t_0}{R + (R+r)}} + \frac{\alpha \cdot S_0}{R+r}$ – найбільше значення кута контакту круга з припуском та його межі, t_0, S_0 – радіальна та поздовжня подачі на оберт [3; 6], R, r – радіуси круга та деталі; α – кут профілю.

Визначимо величину проникнення кромки вглиб заготовки за час повороту деталі на деякий центральний кут ϕ_1 , в межах розмірів контакту ϕ_n . Використовуючи співвідношення $\tau_1 = \phi_1 / \omega_\delta$ та $d\tau = d\phi / \omega_\delta$ для зустрічної та попутної подач отримують: $z^{звч} = \int_{\phi_n}^{\phi_1} V_n(\tau) d\tau$. Для попутної обробки змінюються напрям обертання деталі і границі інтегрування:

$$z^{звч}(\phi_1) = \int_0^{\phi_1} \left[\omega_\delta \cdot (R+r) \cdot \left(\frac{r}{R} \cdot \phi\right) \right] \frac{d\phi}{\omega_\delta} = (R+r) \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{\phi_1^2}{2}, \quad (15)$$

$$z^{ноз}(\phi_1) = \int_{(\phi_n - \phi_1)}^{\phi_n} V_n d\phi = (R+r) \cdot \frac{r}{2 \cdot R} \cdot [2 \cdot \phi_n \cdot \phi_1 - \phi^2]$$

Вплив режимних параметрів на товщину зрізу для умов поздовжнього шліфування із зустрічною подачею наведений на рисунку 3.

Частку (або відсоток) різальних кромки серед тих, що контактують $\%_p$, визначають відношенням ординат (рис. 1). При цьому відношення інтегральних функцій збільшує до 100% частку тих кромки, які контактують. З огляду на прийняті позначення отримують:

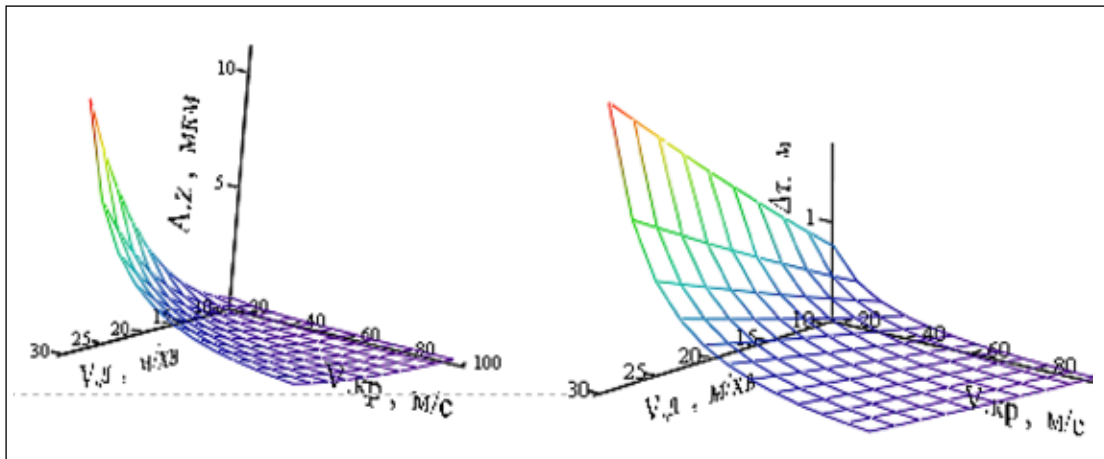


Рис. 3. Вплив режимів ($V_n, V_{кр}$) на товщину зрізів та інтервали часу між контактами для зустрічного шліфування

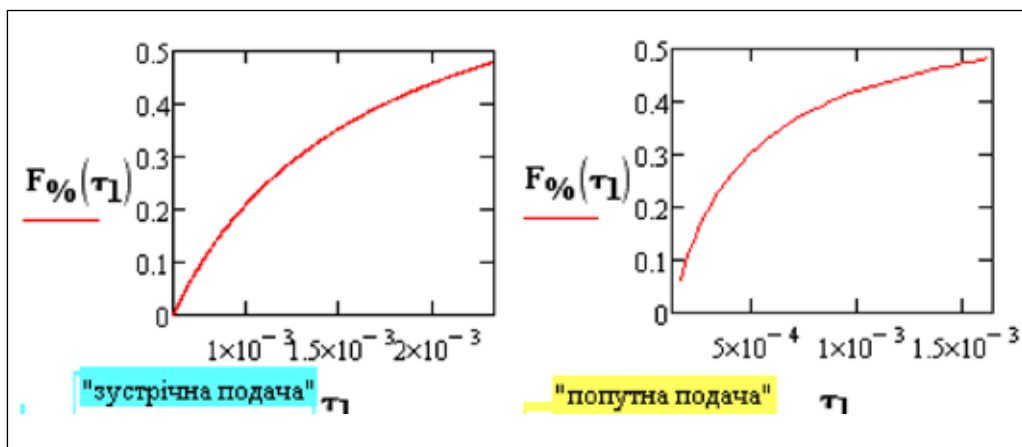


Рис. 4. Зміна відсотку різальних кромок для зустрічної (а) та попутної (б) подач протягом часу обробки

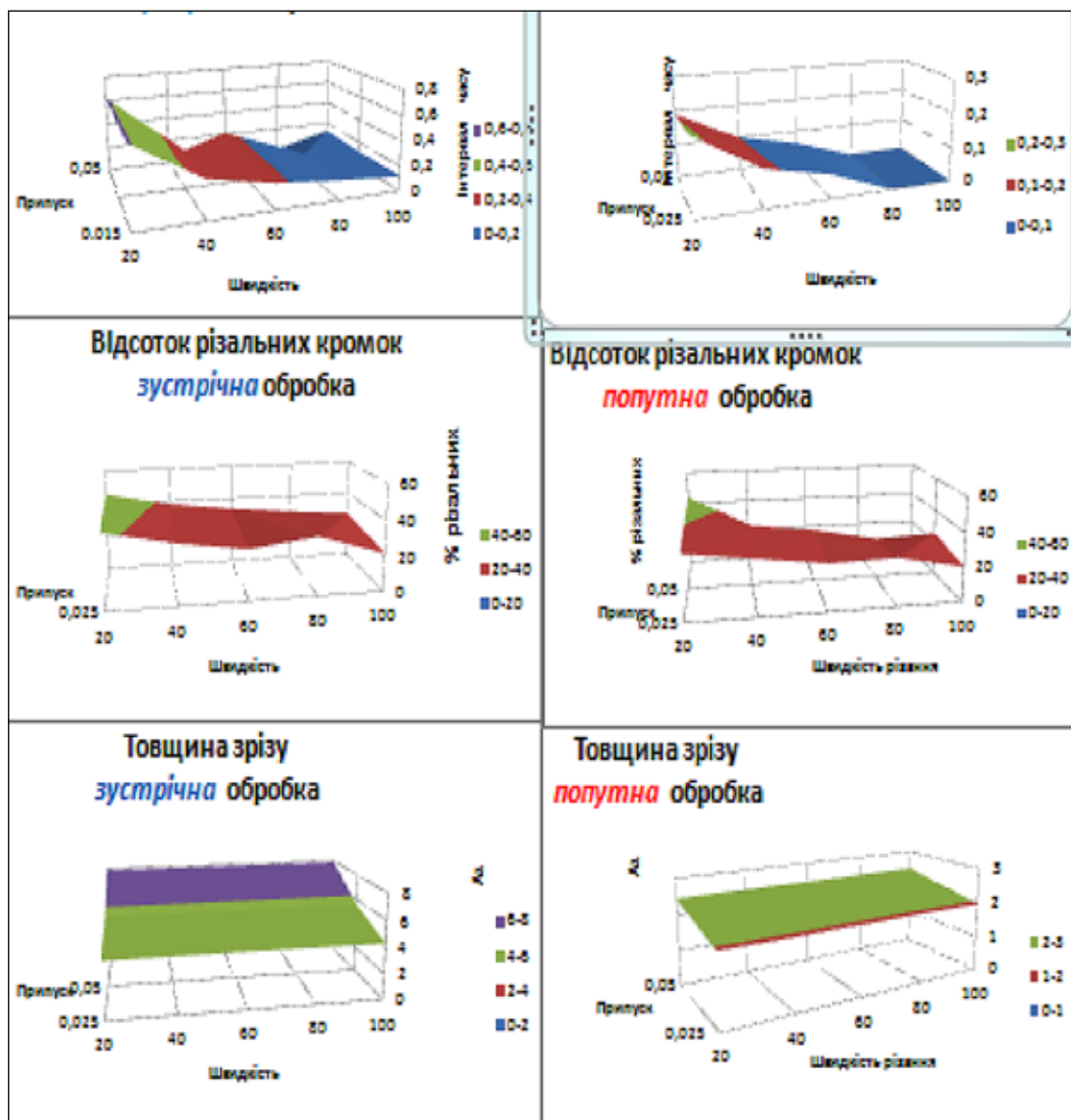


Рис. 5. Розрахунок зміни середнього часу між контактами, товщини зрізів та частки різальних кромок від глибини та швидкості різання для кругів марок 40СМ1 (б) у стані після правки

$$\%_p = 100 * (pbeta(\tau_k) - pbeta(\tau_R)) / pbeta(\tau_k),$$

або

$$\%_p = 100 * (1 - \frac{pbeta_\tau(\tau_R)}{pbeta_\tau(\tau_k)}), \quad (16)$$

Змінюючи біжучу межу τ_k можна знайти для різних напрямів подачі відсоток різальних кромок (рис. 4). Графіки наведені для режимних параметрів: круг марки 25СМ1 після правки, швидкості різання та подачі, відповідно, $V_{кр} = 50 \text{ м/с}$; $V_d = V_{кр}/60$; $t = 0,05 \text{ мм}$.

Як бачимо, характер залежності лишився той самий у разі зміни інтервалів між контактами.

Вплив режимів шліфування на параметри зрізаного шару наведений на рисунку 5.

Висновки. Результати розрахунків параметрів процесу шліфування не суперечать прийнятим науковим міркуванням. Результати розрахунків дають змогу визначати інтервали часу між контактами кромок за кутом повороту деталі, частку

різальних серед загальної їх кількості та товщину зрізів. Як вхідні дані враховані марка та стан РПК, глибина та швидкість різання, напрям подачі. Питання точного визначення часу tR переходу від деформування до початку різання значно впливає на перераховані показники, тому потребує подальшого уточнення.

Розрахунки доводять, що *інтервали часу між контактами* для зустрічної обробки є більшими, ніж для попутної, тому відповідна товщина зрізів є більшою. У разі збільшення швидкості різання v_k зменшується товщина a_z зрізів, частка різальних кромок, що не суперечить експерименту. Вплив забірного конуса через знос інструменту може бути врахованим.

Стан РПК при затупленні, або зернистість, зменшує висоту профілю, або відстані між кромками, що викликає зменшення часу між контактами, товщину зрізу, відсоток різальних кромок.

Список літератури:

1. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Львів : Машиностроение, 1979. 248 с.
2. Гусев В.В. О распределении параметров срезов при глубинном круглом шлифовании периферией круга. *Резание и инструмент в технологических системах*. 2003. № 65. С. 37–47.
3. Петраков Ю.В. Управление процессами шліфування. Київ : КПІ, 2018. 216 с.
4. Родін П.Р. Основи формоутворення поверхонь різанням. Київ : Вища школа, 1997. 192 с.
5. Рудик А.В., Венжега В.І. Продуктивність високоефективного поздовжнього та глибинного шліфування поверхонь обертання периферією та торцем орієнтованого абразивного інструменту. *Вісник ЧНТУ*. 2015. № 1(77). С. 59–64.
6. Рудик А.В. Визначення товщини зрізу кромкою круга із врахуванням стану поверхні інструмента та кінематики. *Вісник ЧНТУ*. 2016. № 1(3). С. 65–73.
7. Корн М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва : «Наука», 1985. 720 с.

Rudik A.V., Pasov G.V. DEPENDENCE OF CUTTING SURFACE PARAMETERS FROM SURFACE GRINDING MODES

The cutting parameters determine the energy and economic performance of the grinding process. The contact intensities of the cutting edges of the abrasive tool with an assumption are in accordance with the Poisson law. This allows us to find an element of probability, but based on it, mathematical expectation and variance.

So, you can simulate the law of changing the time intervals between contacts on the time of cutting and the percentage of those where the conditions of cutting are fulfilled. On the other side, a projection was obtained on the normal to the instrument surface relative speed of the workpiece. This allows us to find the normal speed of known methods for both associated filing directions. The cutting layer thickness is the largest distance between the adjacent cutting surfaces. The kinematic components and different positions of the edges are considered in relation to the most convex edges.

A list of cutting parameters is completed, with the thickness of the cut, it is necessary to specify the time intervals between the contacts of the edges with the allowance and the percentage of cutting ones among their total number Under rotation surfaces grinding. The proposed method allows to take into account all kinematic components and relative orientation of the tool. The theoretical dependences of the cut-off parameters on the grinding regime are obtained. Constructed graphs of influence regime parameters with section parameters. With increasing cutting speeds, the cutting layer thickness, the proportion of cutting edges are turn down. It does not contradict the known experimental data.

The method allows to take into account the influence of the change in the state of the working surface of the wheel and the cone through the wear of the instrument on the energy saturation of the process.

The calculations prove that the time intervals between the contacts for counter-processing are larger than for the adjacent, therefore the corresponding thickness of the sections. With increasing cutting speed decrease time intervals between contacts, the cutting layer thickness and the proportion of cutting edges.

Key words: normal speed, probability, mathematical expectation, variance, cutting layer thickness, time intervals between contacts, percentage of cutting edges.