

DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-5-14

УДК 621.923

АНАЛІЗ ЯКОСТІ ОБРОБКИ В УМОВАХ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ШЛІФУВАННЯ ЗІ ЗМІННОЮ ПОЛЯРНІСТЮ ЕЛЕКТРОДІВ

© Стрельчук Р.М.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»***Інформація про автора:**

Стрельчук Роман Михайлович: ORCID: 0000-0002-7221-031X; r.m.strelchuk@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М. Ф. Семка; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна

Електроерозійне алмазне шліфування зі змінною полярністю електродів дозволяє обробляти важкооброблювані матеріали. Процес формування обробленої поверхні залежить, крім від електричних режимів обробки, ще й від матеріалу заготовки, від робочої рідини і т.д. Ці параметри не пов'язані, отже, кожен з них робить свій вплив на хід процесу. Тому аналіз якості обробки в залежності від електричних режимів обробки виконувався з використанням імовірно-статистичного моделювання.

У статті проведено імовірно-статистичне моделювання шорсткості поверхні деталі в процесі електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів. Встановлено взаємозв'язок між електричними режимами обробки і показниками якості обробленої поверхні деталі. Отримано вероятностну-статистичну модель шорсткості поверхні деталі, що формується при електроерозійному шліфуванні, яка встановлює взаємозв'язок між висотними параметрами поверхні та електричними режимами обробки.

Розроблена модель, дозволяє розрахувати висотні параметри шорсткості деталі в залежності від електричних режимів електроерозійного шліфування. Висота мікронерівностей визначається тими ж умовами обробки, що і глибина ерозійних лунок. Отримання низької шорсткості можливо при зниженні електричних режимів обробки.

Отримані співвідношення дозволяють безпосередньо визначити імовірність контактування нізрізаної від тіла заготовки стружки, утвореною різальною крайкою зерна, з поверхнею зв'язки шліфувального круга. При вирішенні задачі про імовірність контактування сукупності стружок, утворених сукупністю крайок зерен, котрі знаходяться в робочому шарі інструменту, необхідно також використовувати імовірність щільності розподілу по глибині.

Вид отриманих співвідношень безпосередньо показує, що значна частина стружок утворених різальними крайками, що контактують з шорсткою поверхнею заготовки, є короткими і не стикаються зі зв'язкою до відриву від тіла заготовки навіть без урахування їх усадки.

Ключові слова: зона обробки, ерозійні лунки, міжелектродний зазор, алмазний круг, деталь.

Strelchuk R. «Analysis of treatment quality in electrical discharge conditions grinding with changing polarity of electrodes»

Electrical discharge diamond grinding with changing polarity of electrodes allows processing difficult-to-process materials. The process of forming the treated surface depends, in addition to the electrical modes of processing, also on the material of the workpiece, the working fluid, etc. These parameters are not related, so each of them affects the process. Therefore, the analysis of the quality of processing depending on the electrical modes of processing was performed using probabilistic-statistical modeling.

The probabilistic-statistical modeling of roughness of a surface of a part in the course of electroerosive grinding with variable polarity of electrodes was conducted and is presented in the article. The interrelation between electric modes of processing and indicators of quality of the processed surface of a part was established. A probabilistic-statistical model of surface roughness of a part formed by electroerosive grinding was obtained, which establishes the relationship between the height parameters of the surface and the electrical modes of processing.

The developed model allows calculating height parameters of roughness of a part depending on electric modes of electroerosive grinding. The height of microroughnesses is determined by the same processing conditions as the depth of erosion holes. Obtaining low roughness is possible by reducing the electrical processing modes.

The obtained ratios allow determining directly the probability of contact of the cut chip cut from the body, formed by the cutting edge of the grain, with the bond surface of the grinding wheel. When solving the problem of the probability of contacting the set of chips formed by the set of edges of the grains that are in the working layer of the tool, it is also necessary to use the probability of depth distribution density.

The type of obtained ratios directly shows that a significant part of the chips formed by the cutting edges in contact with the rough surface of the workpiece are short and do not come into contact with the ligament until separation from the body of the workpiece, even without shrinkage.

Keywords: processing zone, erosion holes, interelectrode gap, diamond wheel, part.

Вступ

Процес електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів дозволяє отримувати необхідні якісні та кількісні показники при значному зниженні питомої витрати алмазного круга і витрат різних видів енергії [1, 2]. Це пояснюється тим, що зміна часу на електродах полярності та відповідної частоти проходження імпульсів забезпечує стабільні умови процесу шліфування. Змінюючи частоту імпульсів, їх шпаруватість і потужність при відповідній зміні полярності електродів, можна регулювати безпосередньо сам процес, аж до рівноважного стану, забезпечивши рівнозначний прояв електрофізичних та електрохімічних (навіть за їх незначності) процесів щодо обох електродів. Процес взаємодії різального інструменту з поверхнею оброблюваного матеріалу в умовах електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів не досліджений. У зв'язку з цим у роботі проведено аналіз якості обробки, та встановлені особливості та закономірності взаємодії різального інструменту з поверхнею оброблюваного матеріалу.

Взаємодія алмазного круга з поверхнею оброблюваного матеріалу при електроерозійному шліфуванні є складною електрофізичною системою [3,4]. Вона є одночасно місцем мікрорізання та дії розрядів у міжелектродному проміжку. При додатку напруги в цій зоні виникає електричний струм, який проходить через перемикаючі міжелектродний проміжок струмопровідні містки, робочу рідину, що має деяку електропровідність, і через розряду, що виникає, в період його дії.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Якість поверхні при електроерозійному шліфуванні досліджено у ряді робіт [5-7], але в умовах зміни полярності електродів у зоні різання практично не вивчена [8-10]. Відомо, що кращі умови мікрорізання алмазними зернами сприяють формуванню обробленої поверхні з малою шорсткістю поверхні, без мікротріщин і мікродефектів, а невелика теплонапруженість процесу забезпечує отримання приповерхневого шару з невеликими фазовими і структурними перетвореннями, порівняно з вихідним станом, і як правило зі сприятливими стискаючими залишковими напругами [11-13].

Умови електроерозійного шліфування з змінною полярністю електродів мають свої особливості, в основному пов'язані з дією в зоні формування обробленої поверхні високочастотних електричних розрядів, тобто при обробці матеріал відчуває дещо інші дії, ніж при звичайному шліфуванні. Електричні розряди забезпечують "гостроту" круга, підвищується виступання алмазних зерен. При дії електричних розрядів у зоні обробки істотно зменшується, а в більшості випадків усувається контактний-фрикційний вплив зв'язки на поверхню, що обробляється, тобто знижуються сили тертя і зменшується їх внесок у тепловий фактор. Поверхня формується гострим ріжучим рельєфом круга із збільшеним міжзеренним простором. Це сприяє деякому зниженню сил мікрорізання, кращого розміщення стружки в міжзеренному просторі і кращому проникненню мастильно-охолоджуючого технологічного середовища на контактні ділянки мікрорізання. При цьому кавітаційні явища, що ініціюються розрядами, сприяють інтенсифікації дії рідкого середовища. Якщо до того ж врахувати, що при електроерозійному шліфуванні різання здійснюється зернами, на яких можливе утворення додаткових мікро- та субмікрокромок, а також те, що мікрорізання відбувається з дещо більшими швидкостями і відповідно з меншим коефіцієнтом тертя, ніж при звичайному шліфуванні, то можна зробити висновок, що основні умови шліфування є сприятливими для формування якісного поверхневого шару.

Аналіз якості обробки зазвичай оцінюється точністю і шорсткістю поверхні деталі. Для визначення шорсткості поверхні виконувалось імовірісно-статистичне моделювання. При електроерозійному шліфуванні шорсткість оброблюваної поверхні формується в результаті утворення окремих лунок, що перекривають одна одну. Кожна лунка може бути представлена у вигляді шарового сегмента. Оскільки шаровий сегмент має геометричну симетрію щодо вертикальної осі, завдання утворення лунок розглядалося у двовірній постановці. Перетин лунки є: круговий сегмент, радіус дуги якого дорівнює радіусу шарового сегмента.

Методика дослідження і побудова математичної моделі

Зважаючи на стохастичний характер процесу утворення ерозійних лунок, для визначення шорсткості поверхні використовувався метод імовірісно-статистичного моделювання (метод Монте-Карло), який полягає в наступному [14]. Окрема вершина і впадина нерівностей поверхні, що обробляється, формуються при накладенні двох лунок (рис. 1), яке моделювалося багаторазово. Для цього розігрувалися за допомогою датчика випадкових чисел згідно із законом нормального розподілу значення геометричних параметрів лунок (d_l і h_l) та величини параметрів перетину лунок та виходили їх крайові значення.

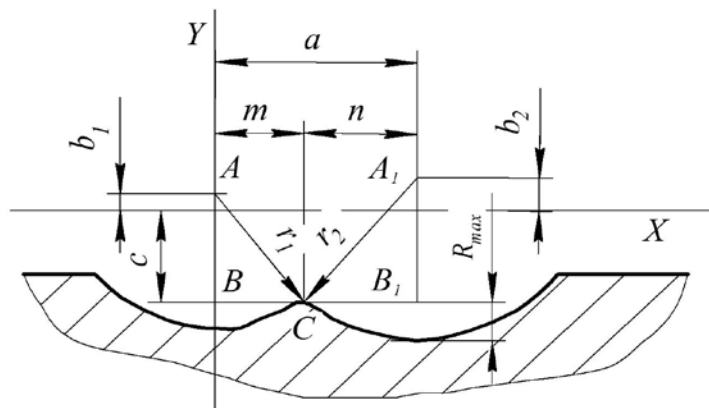


Рис. 1 – Схема розрахунку шорсткості обробленої поверхні

Шорсткість оброблюваної поверхні R_{max} розраховувалася за формулою:

$$R_{max} = r_{max} - b_{max} - c_{min} , \quad (1)$$

де r_{max} – найбільше значення радіусу дуги; b_{max} – найбільше значення відстані між віссю X та центром більшої дуги з усіх реалізацій; c_{min} – найменше значення відстані між точкою перетину дуг та віссю X із усіх реалізацій. Визначимо параметр c при перетині двох лунок. Відстань по осі X між центрами двох дуг a , що перетинаються, визначається з діапазону від a_{max} до a_{min} і може бути знайдено як

$$a = m + n , \quad (2)$$

де m – відстань між центром першої дуги та точкою перетину дуг; n – відстань між центром другої дуги та точкою перетину дуг.

З трикутників ABC та A_1B_1C маємо:

$$r_1^2 = m^2 + (b_1 + c)^2 , \quad (3)$$

$$r_2^2 = n^2 + (b_2 + c)^2 , \quad (4)$$

де r_1, r_2 – радіуси двох дуг, що перетинаються; b_1, b_2 – відстані між віссю X та центрами двох дуг.

Вирішуючи рівняння (3) та (4), отримаємо:

$$m = \sqrt{r_1^2 - (b_1 + c)^2} ,$$

$$n = \sqrt{r_2^2 - (b_2 + c)^2} .$$

Сумуючи m і n , маємо:

$$m + n = \sqrt{r_1^2 - (b_1 + c)^2} + \sqrt{r_2^2 - (b_2 + c)^2} . \quad (5)$$

З урахуванням (2) вираз (5) можна привести до вигляду:

$$\sqrt{r_1^2 - (b_1 + c)^2} + \sqrt{r_2^2 - (b_2 + c)^2} - a = 0 .$$

Параметр c не може бути знайдений у явному вигляді з отриманого виразу, тому для вирішення використовуємо чисельний метод [15].

Відомо [16], що співвідношення між глибиною та діаметром ерозійної лунки має вигляд:

$$\frac{d_l}{h_l} = 3 \dots 4 . \quad (6)$$

З трикутника ABC (рис. 2) маємо

$$r^2 = \left(\frac{d_l}{2} \right)^2 + k^2 \quad (7)$$

З іншого боку

$$r = k + h_l .$$

Звідси визначимо

$$k = r - h_{л}. \quad (8)$$

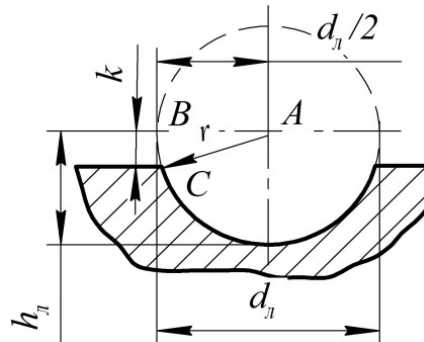


Рис. 2 – Схема розрахунку радіусу дуги електроерозійної лунки

З урахуванням (8) та (6) вираз (7) може бути представлений як

$$5h_{л}^2 - 2h_{л}r = 0.$$

Вирішуючи отримане рівняння, знаходимо залежність радіусу дуги r від глибини лунки $h_{л}$:

$$r = 2.5h_{л}. \quad (9)$$

Визначимо максимальну відстань a_{max} по осі X між центрами двох дуг, що перетинаються. При цьому точка перетину знаходиться на зовнішній оброблюваній поверхні (рис. 3).

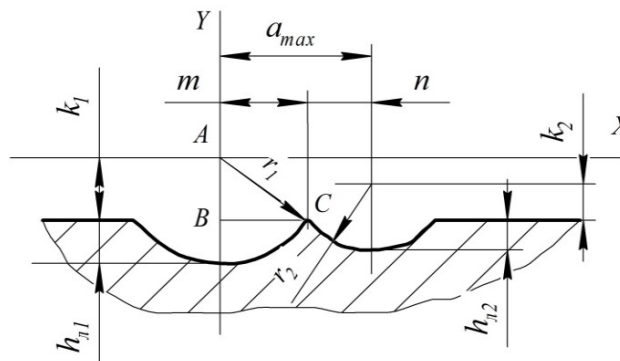


Рис. 3 – Схема визначення параметра a_{max}

З рівняння (9) виразимо $h_{л}$

$$h_{л} = 0.4r. \quad (10)$$

Підставляючи (10) до (8), отримаємо:

$$k = 0.6r. \quad (11)$$

Параметр a_{max} визначається як

$$a_{max} = m + n. \quad (12)$$

З трикутника ABC маємо:

$$r_1 = m^2 + k_1^2 .$$

Звідси

$$m = \sqrt{r_1^2 - k_1^2} .$$

З урахуванням співвідношення (11) отримаємо:

$$m = 0.8r_1 . \quad (13)$$

Аналогічно:

$$n = 0.8r_2 . \quad (14)$$

Підставляючи залежності (13) і (14) до рівняння (12), отримуємо остаточний вираз для визначення a_{max} :

$$a_{max} = 0.8(r_1 + r_2) . \quad (15)$$

Визначимо мінімальну відстань a_{min} по осі X між центрами двох дуг, що перетинаються. При цьому точка перетину двох дуг знаходиться на внутрішній поверхні оброблюваного матеріалу (рис. 4).

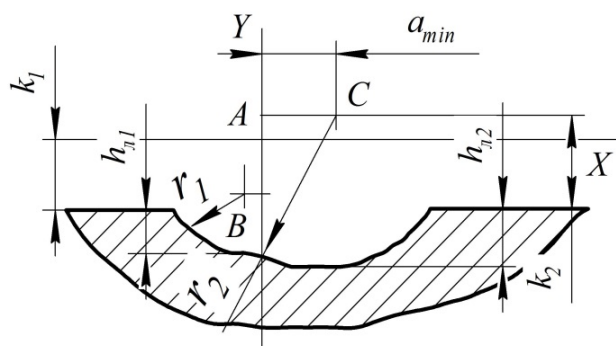


Рис. 4 – Схема визначення параметра a_{min}

З трикутника ABC маємо:

$$r_2^2 = (h_{11} + k_2)^2 + a_{min}^2 . \quad (16)$$

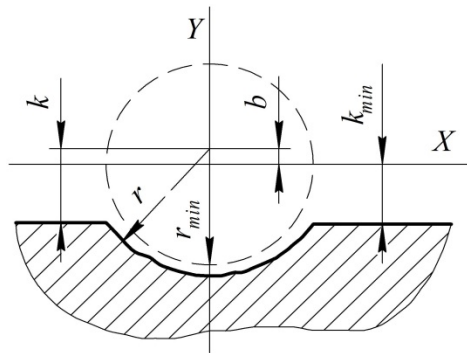
З урахуванням співвідношень (10) та (11) можна записати:

$$r_2^2 = 0.16r_1^2 + 0.48r_1r_2 + 0.36r_2^2 + a_{min}^2 . \quad (17)$$

Вирішуючи отримане рівняння щодо a_{min} отримаємо:

$$a_{min} = \sqrt{0.64r_2^2 - 0.48r_1r_2 - 0.16r_1^2} . \quad (18)$$

Вважатимемо, що центр дуги з мінімальним радіусом r_{min} знаходиться на осі X. Тоді, враховуючи співвідношення (6), центр дуги з великим радіусом буде перебувати вище по осі Y. Виходячи з цього, визначимо параметр b (рис. 5).

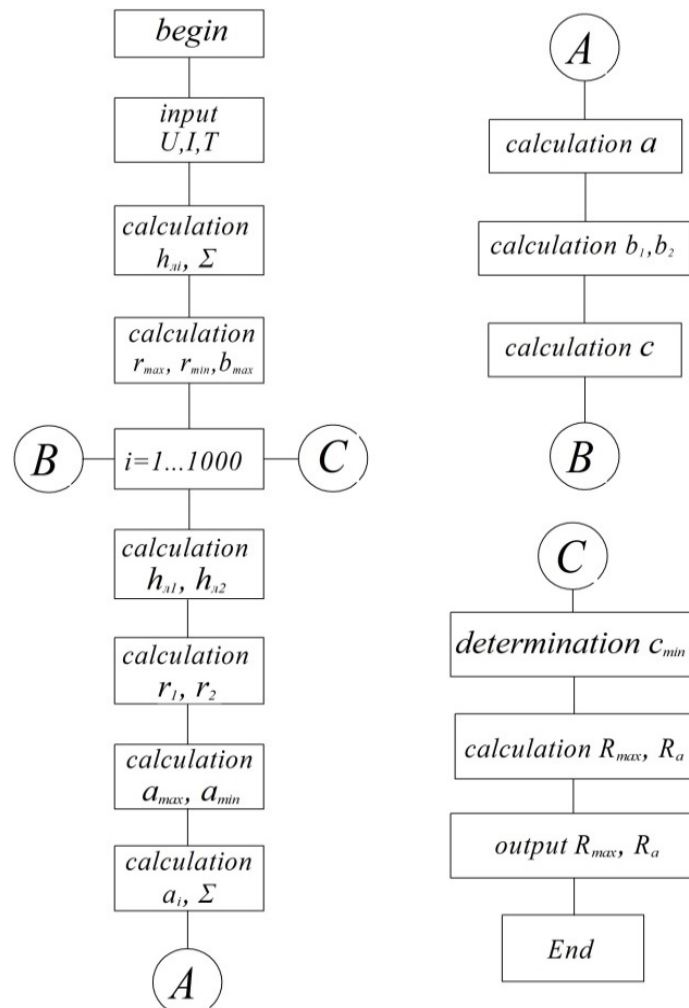
**Рис. 5** – Схема визначення параметра b

Виразимо b через k і k_{min} і, враховуючи (11), отримаємо:

$$b = 0.6(r - r_{min}). \quad (19)$$

Результати дослідження

Відповідно до наведеної методики було розроблено алгоритм розрахунку, схема якого наведена на рис. 6. Послідовність розрахунку наступна. Задаються значення електричних

**Рис. 6** – Схема алгоритму розрахунку параметрів шорсткості оброблюваної поверхні деталі

режимів: напруги U , сили струму I , тривалість зміни полярності електродів T . Потім розраховується математичне очікування глибини ерозійної лунки h_l і середньоквадратичне відхилення. Далі визначаються значення величин r_{max} , r_{min} , b_{max} . Після цього відбувається за допомогою датчика випадкових чисел розігрування згідно із законом нормального розподілу параметрів h_{l1} , h_{l2} , r_1 , r_2 , a , b_1 , b_2 , c . Кількість повторень приймається рівним 1000. Потім визначається c_{min} . Далі розраховуються параметри шорсткості поверхні: R_{max} , R_a , R_z .

Результати розрахунків за розробленою математичною моделлю були проведені у програмі *Matlab*. Візуалізація результатів розрахунків, тобто просторове положення ерозійних лунок та утворення мікронерівностей поверхні під дією електричних розрядів після електроерозійного шліфування на протязі різного часу обробки наведено на рис.7.

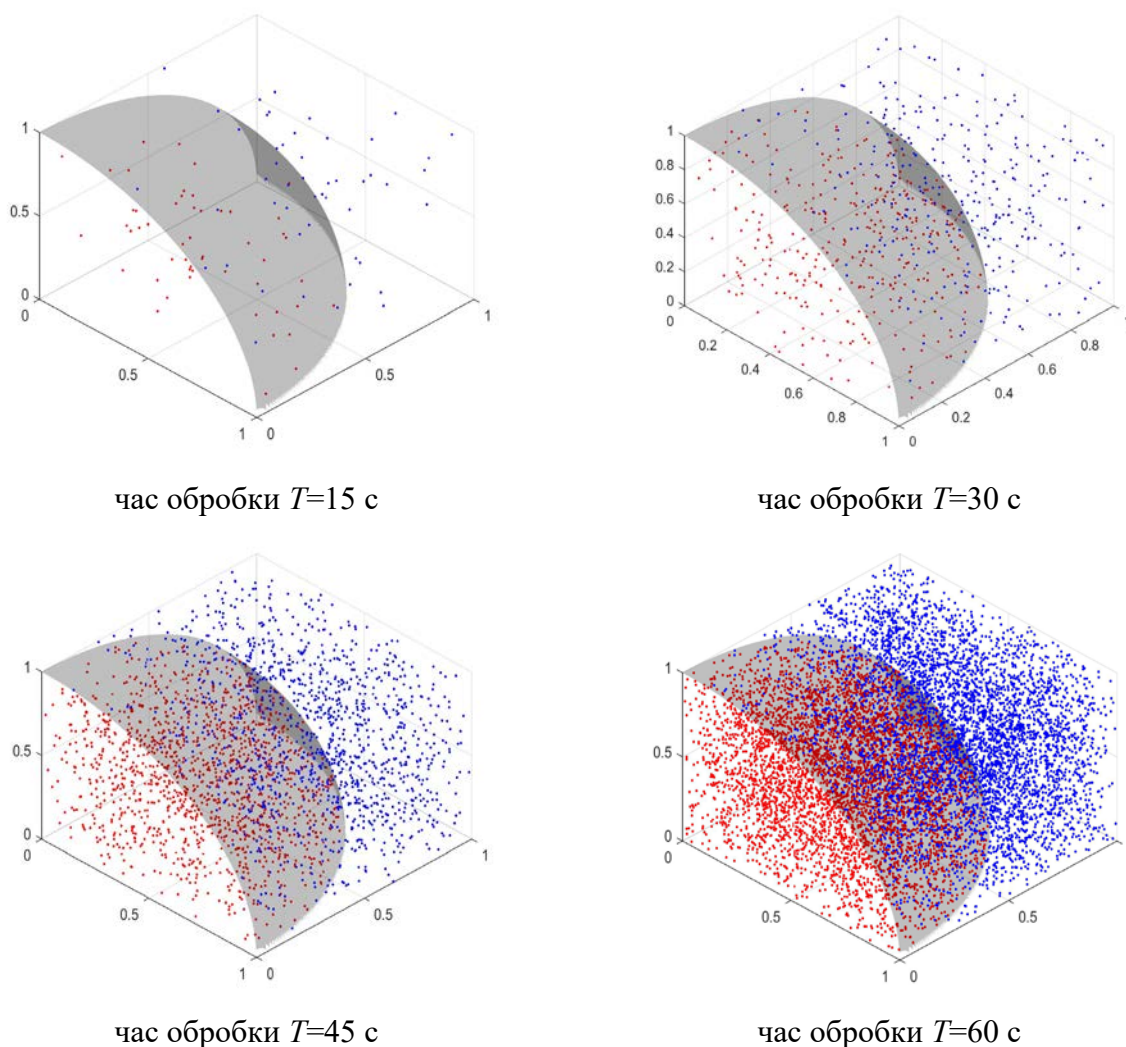


Рис. 7 – Візуалізація результатів розрахунків

Розроблена модель, що враховує просторове становище ерозійних лунок, їх статистичні розміри, дозволяє розраховувати параметри шорсткості поверхні деталі, які, зрештою, дають можливість прогнозувати довговічність деталі, що формується. Процес електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів дозволяє зменшити параметри шорсткості поверхні, що веде до збільшення довговічності і надійності роботи оброблюваної деталі.

Висновки

Таким чином, в статті досліджено формування шорсткості поверхні в умовах електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів в зоні резання. Розроблено математичну модель шорсткості поверхні з урахуванням ерозійних процесів, що впливають на зв'язку круга. При побудові враховано розмірне зношування, процеси сколювання та виривання поодиноких абразивних зерен із зв'язки, під дією складових сил різання, з урахуванням ймовірності контакту зерен з металом, величини майданчиків зносу та дійсної глибини мікрорізання.

Отримані співвідношення дозволяють безпосередньо визначити ймовірність контактування нізрізаної від тіла заготовки стружки, утвореною різальною крайкою зерна, з поверхнею зв'язки шліфувального круга. При вирішенні задачі про ймовірність контактування сукупності стружок, утворених сукупністю крайок зерен, що лежать в робочому шарі інструменту, необхідно також використовувати ймовірність щільності розподілу по глибині.

Вид отриманих співвідношень безпосередньо показує, що значна частина стружок утворених різальними крайками, що контактують з шорсткою поверхнею заготовки, є короткими і не стикаються зі зв'язкою до відриву від тіла заготовки навіть без урахування їх усадки.

Отримані співвідношення можуть бути використані і при вирішенні відповідних завдань шліфування периферією круга, наприклад, круглого зовнішнього шліфування. При більш чіткому описі процесу необхідно безпосередньо застосовувати нестационарне уявлення з урахуванням додаткових нестационарних, внесених траєкторіями різальних крайок як функцій кута повороту круга і деталі в процесі їх взаємодії.

Список використаних джерел:

1. Пат. України на корисну модель №131894, МПК (2018.01) B24B 1/00. Спосіб електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів / Р. М. Стрельчук, М. Д. Узунян. – № u 201806851 ; заявл. 18.06.2018 ; опубл. 11.02.2019. – Бюл. № 3.
2. Montes J. Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders / J. Montes, F. Cuevas, F. Reina // *Met. Mater. Int.* – 2020. – № 26. – P. 1045–1059.
3. Aurich J. C. Experimental investigation of burr formation in the surface grinding of tool steel / J. C. Aurich, H. Sudermann, O. Braun. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture.* – 2006. – № 220 (4). – P. 489–497.
4. Strelchuk R. M. Mathematical modeling of the surface roughness of the grinding wheel during straightening / R. M. Strelchuk, S. M. Trokhimchuk // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* – 2021. – № 1. – P. 53–59.
5. Strelchuk R. Optimization of the Interelectrode Gap in Electrical Discharge Grinding with Changing Electrode Polarity / R. Strelchuk, O. Shelkovi // *Lecture Notes in Mechanical Engineering* – 2021. – № 143. – P. 52.
6. Research of the Dependence of Geometric Parameters of Holes on Electroerosive Grinding Modes with a Changing Polarity of Electrode / R. Strelchuk [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2022. – № 1235(1):012023. – P. 1235-1241.
7. Surface integrity in material removal processes: Recent advances / I. Jawahir [et al.] // *CIRP Annals - Manufacturing Technology.* – 2011. – № 60 (2). – P. 603–626.
8. Analysis of the Material Behavior of Cemented Carbides (WC-Co) in Grinding by Single Grain Cutting Tests / F. Klocke [et al.] // *Procedia CIRP.* – 2016. – № 46. – P. 209–213.
9. Liu Xianbing Effects of Grinding Process on Residual Stresses in Nanostructured Ceramic Coatings / Liu, Xianbing, Bi Zhang // *Journal of Materials Science.* – № 37 (15). – P. 3229–3239.
10. Grinding Characteristics of CBN-WC-10Co Composites / Mao, Cong, Chang Liang, Yuchen Zhang, Mingjun Zhang, Yongle Hu, Zhuming Bi // *Ceramics International.* – 201. – № 43 (18). – P. 16539–16547.
11. YEffect of Electrode Material on Electrical Discharge Machining of Alumina / A. Muttamara [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2009. – № 209 (5). – P. 2545–2552.

12. Rahim M. Z. Electrical discharge grinding (EDG) of polycrystalline diamond – effect of machining polarity / M. Z. Rahim, S. Ding, J. Mo // *Advanced Materials Research*. – 2014. – № 1025–1026. – P. 628–632.
13. Rao X. Experimental investigation on electrical discharge diamond grinding of RB-SiC ceramics / X. Rao, F. Zhang, C. Li, Y. Li // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – № 94 (5–8). – P. 2751–2762.
14. Agrawal S. S. Modeling and prediction of material removal rate and surface roughness in surface-electrical discharge diamond grinding process of metal matrix composites / S. S. Agrawal, V. Yadava // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2013. – № 28 (4). – P. 381–389.
15. Kumar Singh Yadav Experimental study and parameter design of electro-discharge diamond grinding / Kumar Singh Yadav, S., V. Yadava, V. Lakshmi Narayana // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2008. – № 36 (1–2). – P. 34–42.
16. Shrivastava P. K. Electrical discharge machining-based hybrid machining processes: A review / P. K. Shrivastava, A. K. Dubey // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2014. – № 228 (6). – P. 799–825.

References

1. Strelchuk, RM & Uzunian, MD 2019, *Sposib elektroeroziinoho almaznoho shlifuvannia zi zminnoi poliarnistiu elektrodiv*, UA Patent 131894.
2. Montes, J, Cuevas, F & Reina, F 2020, 'Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders', *Met. Mater. Int.*, no. 26, pp. 1045-1059.
3. Aurich, JC, Sudermann, H & Braun, O 2006, 'Experimental investigation of burr formation in the surface grinding of tool steel', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, no. 220 (4), pp. 489-497.
4. Strelchuk, RM & Trokhimchuk, SM 2021, 'Mathematical modeling of the surface roughness of the grinding wheel during straightening', *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 1, pp. 53-59.
5. Strelchuk, R & Shelkovyi, O 2021, 'Optimization of the Interelectrode Gap in Electrical Discharge Grinding with Changing Electrode Polarity', *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, no. 143, pp. 52.
6. Strelchuk, R, Shelkovyi, O, Gutsalenko, Y, Iancu, C, Subbotina, V, Knyazev, S & Volkov, O 2022, 'Research of the Dependence of Geometric Parameters of Holes on Electroerosive Grinding Modes with a Changing Polarity of Electrodes', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, no. 1235 (1), pp. 1235-1241.
7. Jawahir, IS, Brinksmeier, E, M'Saoubi, R, Aspinwall, DK, Outeiro, JC, Meyer, D, Umbrello, D & Jayal, AD 2011, 'Surface integrity in material removal processes: Recent advances', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, no. 60 (2), pp. 603-626.
8. Klocke, F, Wirtz, C, Mueller, S & Mattfeld, P 2016, 'Analysis of the Material Behavior of Cemented Carbides (WC-Co) in Grinding by Single Grain Cutting Tests', *Procedia CIRP*, no. 46, pp. 209-213.
9. Liu, Xianbing, и Bi Zhang. 2002. «Effects of Grinding Process on Residual Stresses in Nanostructured Ceramic Coatings». *Journal of Materials Science* no. 37 (15), pp. 3229-3239.
10. Mao, Cong, Chang Liang, Yuchen Zhang, Mingjun Zhang, Yongle Hu & Zhuming Bi 2017, 'Grinding Characteristics of CBN-WC-10Co Composites', *Ceramics International*, no. 43 (18), pp. 16539-16547.
11. Muttamara, A, Fukuzawa, Y, Mohri, N & Tani, T 2009, 'Effect of Electrode Material on Electrical Discharge Machining of Alumina', *Journal of Materials Processing Technology*, no. 209 (5), pp. 2545-2552.
12. Rahim, MZ, Ding, S & Mo, J 2014, 'Electrical discharge grinding (EDG) of polycrystalline diamond – effect of machining polarity', *Advanced Materials Research*, no. 1025–1026, pp. 628-632.
13. Rao, X, Zhang, F, Li, C & Li, Y 2018, 'Experimental investigation on electrical discharge diamond grinding of RB-SiC ceramics', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no. 94 (5-8), pp. 2751-2762.
14. Agrawal, SS & Yadava, V 2013, 'Modeling and prediction of material removal rate and surface roughness in surface-electrical discharge diamond grinding process of metal matrix composites', *Materials and Manufacturing Processes*, no. 28 (4), pp. 381-389.
15. Kumar Singh Yadav, Yadava, SV & Lakshmi Narayana, V 2008, 'Experimental study and parameter design of electro-discharge diamond grinding', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no. 36 (1-2), pp. 34-42.
16. Shrivastava, PK & Dubey, AK 2014, 'Electrical discharge machining-based hybrid machining processes: A review', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, no. 228 (6), pp. 799-825.

Стаття надійшла до редакції 10 травня 2022 р.