

АНАЛІЗ СИЛ РІЗАННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОМУ ШЛІФУВАННІ ЗІ ЗМІННОЮ ПОЛЯРНІСТЮ ЕЛЕКТРОДІВ

© Стрельчук Р.М.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Інформація про автора:

Стрельчук Роман Михайлович (Strelchuk Roman): 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

Запропоновано методику розрахунку складових сили різання при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів, що сприяє вибору оптимальних режимів обробки за один установ поверхонь деталей машин. Наведено приклад розрахунку за даною методикою складових сили різання при плоскому врізному шліфуванні. Нормальну складову сили різання при цьому розраховують не тільки на торці, а й на периферії круга, враховуючи вплив різальних та деформуючих кромки. Проведено аналіз існуючих математичних залежностей для визначення сили різання при плоскому алмазному врізному шліфуванні. Значення сили різання, що діє при шліфуванні, є найважливішою характеристикою процесу обробки. Від неї залежать умови роботи верстата, інструменту та рівень точності деталі, що отримується. Розроблена методику визначення складових сили різання при шліфуванні враховує вплив не тільки різальних зерен, а й деформуючих, де сумарні нормальна та тангенціальна складові сили різання діють уздовж лінії контакту як на периферії, так і на торці шліфувального круга. Товщину шару, що зрізається, розрахована за умови рівності обсягів підведеного і зрізаного матеріалу, враховуючи податливість системи і переривчастість електричних разрядів за рахунок зміни полярності електродів. На базі розробленої методики виконано розрахунок складових сили різання при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів. Чорнове шліфування здійснювали торцем круга, напівчистове – перехідною радіусною кромкою, а чистове шліфування та калібрування – розвантаженою ділянкою периферії круга, що забезпечує його високу стійкість. Нормальна складова сили різання, яка має максимальне значення на торці круга, практично не впливає на точність формоутворення деталі, оскільки вона розташована паралельно до її осі. Дану методику можна використовувати для різних видів шліфування, а також для дослідження теплонапруженості процесу, оптимізації та продуктивності механічної обробки.

Ключові слова: зона обробки, нормальні та дотичні напруги, швидкість деформації та температури, круг, деталь.

Strelchuk R. «Analysis of cutting force in electrical discharge grinding with change polarity of electrodes»

A methodology for calculating the components of the cutting force during electroerosion grinding with variable electrode polarity is proposed, which helps to choose the optimal processing modes for one installation of the surfaces of machine parts. An example of calculating the components of the cutting force during flat mortise grinding using this method is given. In this case, the normal component of the cutting force is calculated not only on the end face, but also on the periphery of the circle, taking into account the influence of cutting and deforming edges. An analysis of the existing mathematical dependencies for determining the cutting force during flat diamond mortise grinding was carried out. The value of the cutting force acting during grinding is

the most important characteristic of the processing process. It depends on the working conditions of the machine, the tool and the level of accuracy of the obtained part. The developed methodology for determining cutting force components during grinding takes into account the effects of both cutting and deformable grains. Consequently, the total normal and tangential cutting force components act along the contact line, both at the periphery and the end of the grinding wheel. The thickness of the sheared layer is calculated on the condition that the volumes of the supplied and sheared material are equal, taking into account the flexibility of the system and the intermittence of electric discharges due to changing the polarity of the electrodes. Based on the developed methodology, the components of the cutting force were calculated during electroerosion grinding with variable electrode polarity. Rough grinding was performed with the end face of the wheel, semi-clean – with a transitional radius edge, and fine grinding and calibration – with an unloaded area of the wheel's periphery, which ensures its high stability. The normal component of the cutting force, which has a maximum value at the end of the circle, practically does not affect the accuracy of forming the part, since it is located parallel to its axis. This technique can be used for various types of grinding, as well as for the study of thermal stress of the process, optimization and productivity of mechanical processing.

Keywords: machining zone, normal and tangential stresses, strain rate and temperature, circle, detail.

Вступ

Характер взаємодії робочої поверхні круга з матеріалом в умовах електроерозійного алмазного шліфування з полярністю електродів, що змінюється, при обробці різних важкооброблюваних матеріалів не вивчений. У зв'язку з цим цікавий аналіз таких показників процесу, як сили різання. Вони відбивають процес різання у поступовій динаміці, вплив температурно-скоростного чинника, властивостей оброблюваного матеріалу, стан робочої поверхні круга. При великих значеннях сили P_z взаємодія абразивного інструменту з матеріалом ефективніше. Слід зазначити, що за умов пружного шліфування більшому значенню сили P_z відповідає краща ефективність процесу шліфування, оскільки тангенціальне зусилля визначається сумарним миттєвим перерізом зрізу. Для розрахунку інтенсивності видалення зв'язки круга та передзруйнованого шару оброблюваного матеріалу в результаті дії електричних розрядів необхідно мати силові залежності, що описують збільшення складових сил різання в часі, обумовлене зміною параметрів поверхні круга і деталі, та знати умови стійкого закріплення алмазного зерна у зв'язці.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Для досягнення найбільш раціональних режимів обробки часто використовуються залежності складових сили різання, які, у свою чергу, залежать не тільки від режиму різання, а й від багатьох інших факторів, серед яких дуже суттєвим є площа контакту шліфувального круга з поверхнею, що обробляється [1,2]. У роботах [3,4] визначено ступінь впливу площі контакту робочої поверхні круга для конкретних умов обробки на радіальну P_y та тангенціальну P_z складові сили різання, величина якої знаходиться в межах $n = 0,6-0,9$, що підтверджує значущість фактора, що розглядається.

Іноді за зміни площі контакту круга з деталлю щодо сил різання для більш об'єктивної оцінки розглядаються їх питомі складові, проте більшість технологічних завдань необхідне знання абсолютних значень. У роботі розглядається процес електроерозійного шліфування торцем круга за пружною схемою плоскої поверхні, ширина якої можна порівняти з шириною робочої поверхні круга, а контакт здійснюється в одній зоні різання за рахунок нахилу осі обертання шліфувального круга.

Методика дослідження

Сила різання на шліфувальному крузі являє собою суму сил на окремих зернах, що одночасно знаходяться в контакті з поверхнею деталі, у зв'язку з чим спочатку визначимо силу різання на одиничному зерні.

При визначенні рівнодіючої сили різання виходитимемо з рівноваги ряду активних (зовнішніх) сил, що діють на шар, що зрізається, і реактивних (внутрішніх) сил, що діють на алмазне зерно (рис.1). До цих сил належать: нормальна сила N , з якою передня поверхня діє на шар, що зрізається, сила тертя стружки по передній поверхні F , сила нормального тиску N_3 задньої поверхні на поверхню різання та сила тертя F_3 поверхні різання об задню поверхню зерна. Складаючись, сила N та F утворюють силу стружкоутворення R_s , нахилену до поверхні різання під кутом дії ω .

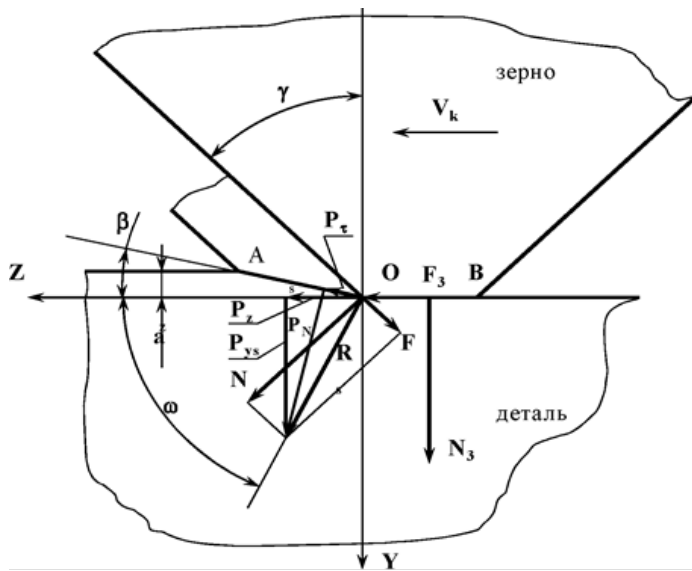


Рис. 1 – Схема дії сил при електроерозійному шліфуванні на шар, що зрізається

Розкладемо силу стружкоутворення R_s на дві: силу P_N , перпендикулярну умовній площині зсуву OA , та силу P_τ , діючу вздовж площини зсуву. Сила P_N стискає шар, що зсувається, а сила P_τ зрушує його вздовж умовної площини зсуву. При цьому зсувна деформація починається в тому випадку, коли напруга зсуву стає рівною межі плинності оброблюваного матеріалу на зсув τ_s [5]. Для визначення складових сили різання P_z та P_y сумісний початок координат з точкою O і розкладемо силу стружкоутворення на дві складові P_{zs} та P_{ys} , діють у напрямі осей Z та Y . Тоді отримаємо наступні залежності:

$$P_z = \sum_{i=1}^n P_{iz} = P_{zs} + F_3, \quad (1)$$

$$P_y = \sum_{i=1}^n P_{iy} = P_{ys} + N_3. \quad (2)$$

З рис. 1 можна визначити:

$$P_{zs} = R_s \cos \omega, \quad (3)$$

$$P_{ys} = R_s \sin \omega, \quad (4)$$

$$R_s = \sqrt{P_\tau^2 + P_N^2} \quad (5)$$

Таким чином, визначення P_z і P_y зводиться до знаходження P_τ , P_N , N_3 , F_3 та кута дії ω . Для розрахунку P_τ , P_N , N_3 , F_3 скористаємося законами розподілу нормальних та дотичних напруг в умовній площині зсуву OA та в зоні контакту поверхні різання із задньою поверхнею зерна. Базуючись на аналізі досліджень [6,7], розподіл нормальних та дотичних напруг уздовж умовної площини зсуву прийемо рівномірним із співвідношенням:

$$\frac{\sigma}{\tau_s} = 1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right), \quad (6)$$

а розподіл нормальних напруг вздовж майданчика контакту задньої поверхні зерна описуватимемо трьома законами: лінійним, комбінованим і рівномірним (рис.2).

Тоді середня величина нормальних напруг на майданчику контакту задньої поверхні може бути розрахована за формулою:

$$\sigma_{cp} = \kappa_3 \sigma, \quad (7)$$

де κ_3 – коефіцієнт, що враховує закон розподілу нормальних напруг на майданчику контакту задньої поверхні збіжжя з поверхнею різання. За лінійного закону розподілу $\kappa_3 = 0,5$; при комбінованому – $0,75$ та рівномірному – 1 .

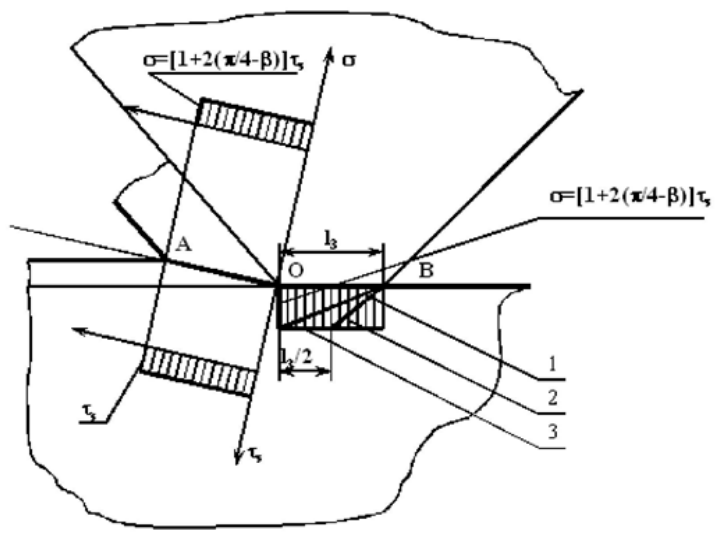


Рис. 2 – Закони розподілу нормальних та дотичних напруг вздовж умовної площини зсуву і в зоні контакту задньої поверхні з деталлю
1 – лінійний; 2 – комбінований;
3 – рівномірний

З рис.1 і рис.2 знайдемо співвідношення $P\tau, P_N$:

$$P_\tau = \tau_s OA = \frac{a_z b \tau_s}{\sin \beta}, \quad (8)$$

де a_z, b – товщина та ширина зрізу одиничним зерном.

$$P_N = \frac{a_z b}{\sin \beta} \sigma. \quad (9)$$

Тоді, з урахуванням відносин σ/τ_s :

$$P_N = \frac{a_z b}{\sin \beta} \left[1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) \right] \tau_s. \quad (10)$$

Підставляючи вирази (8) і (10) у залежність (5) отримаємо:

$$R_s = \frac{\sqrt{1 + \left[1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) \right]^2 a_z b}}{\sin \beta} \tau_s. \quad (11)$$

Визначимо кут між положенням рівнодіючої R_s та умовною площиною зсуву, використовуючи залежності (8) та (10):

$$\operatorname{tg}(\beta + \omega) = \frac{P_N}{P_\tau} = \left[1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) \right]. \quad (12)$$

Кут зсуву виразний через величину γ і коефіцієнт усадки стружки K_L [8,9]:

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma} \quad (13)$$

Кут дії ω розрахуємо, використовуючи залежності (12) та (13):

$$\omega = \operatorname{arctg} \left[1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) \right] - \operatorname{arctg} \frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma}. \quad (14)$$

Складові P_{zs} та P_{ys} визначимо за формулами (3), (4) з урахуванням (11):

$$P_{zs} = \frac{\sqrt{1 + \left[1 + 2\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right]^2} a_z b}{\sin \beta} \tau_s \cos \omega, \quad (15)$$

$$P_{ys} = \frac{\sqrt{1 + \left[1 + 2\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right]^2} a_z b}{\sin \beta} \tau_s \sin \omega. \quad (16)$$

Величину сили N_3 , з якою зерно майданчиком контакту діє поверхню різання, визначимо з урахуванням відносини σ/τ_s :

$$N_3 = \sigma_{cp} b l_3 = \kappa_3 \sigma b l_3 = \kappa_3 \left[1 + 2\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right] \tau_s \sigma b l_3. \quad (17)$$

Силу тертя F_3 на майданчику зносу розрахуємо з використанням коефіцієнта тертя задньої поверхні зерна μ по поверхні різання і величини сили нормального тиску N_3 :

$$F_3 = \mu N_3 = \kappa_3 \left[1 + 2\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right] \tau_s b l_3 \mu. \quad (18)$$

Сумарні тангенціальні та радіальні складові сили різання знайдемо, підставивши в (1) та (2) значення з (15), (16), (17), (18):

$$P_z = \left(\frac{\sqrt{1 + M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b \tau_s, \quad (19)$$

$$P_y = \left(\frac{\sqrt{1 + M^2} a_z \sin \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b \tau_s, \quad (20)$$

$$\text{де } M = 1 + 2\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right).$$

Результати дослідження

Сили різання, що діють на одиничне зерно, аналогічні наведеним, проте спрямовані у протилежний бік. Сили різання, що діють на шліфувальне коло, розрахуємо використовуючи значення сил на одиничному зерні, а також кількість різальних зерен, що одночасно перебувають у роботі в межах зони контакту деталі зі шліфувальним кругом:

$$P_{zk} = P_z z_p,$$

$$P_{yk} = P_y z_p.$$

Тоді підставивши в ці формули вирази (19) та (20) отримаємо наступні співвідношення:

$$P_{zk} = \left(\frac{\sqrt{1 + M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b \tau_s z_p, \quad (21)$$

$$P_{yk} = \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \sin \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b \tau_s z_p. \quad (22)$$

Вплив швидкості деформації та температури в умовах шліфування на τ_s врахуємо за допомогою модифікації наведеної в роботі [10];, перетворивши з урахуванням модифікації залежність мікротвердості оброблюваного матеріалу HV від температури, отриману при стандартних методах випробувань, та апроксимувавши залежність $HV=f(T)$ лінійною функцією [11]:

$$\tau_s = C - \alpha T, \quad (23)$$

де T – температура різання, °К; C, α – початкова ордината та кутовий коефіцієнт [12].

Тоді, після підстановки (23) (21) будемо мати:

$$P_{zk} = \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b z_p (C - \alpha T). \quad (24)$$

Температуру різання T визначимо як максимальну температуру на поверхні деталі под источником тепла [13,14]:

$$T_{max} = \frac{2qa}{\pi \lambda V_d} \sqrt{2\pi 2H}, \quad (25)$$

де q – щільність теплового потоку, Вт / (см); a – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, м/с; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м°К); V_d – швидкість деталі, м / с; H – безрозмірна півширина джерела.

Визначимо густину теплового потоку з формули (25):

$$q = \frac{\alpha_e P_{zk} V_k}{JS}, \quad (26)$$

де P_{zk} – тангенційна складова сили різання на шліфувальному колі, Н; V_k – швидкість шліфувального круга, м/с; S – площа зони контакту деталі із колом, м; α_e – коефіцієнт введення, що враховує частку тепла, що надходить у деталь; J – механічний еквівалент ($J = 1$). Після підстановки (26) (25), а потім (24) і відповідних перетворень, отримаємо:

$$P_{zk} = \frac{\left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b z_p C}{1 + \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b z_p \frac{4a\alpha V_k \sqrt{H} \alpha_e}{\sqrt{\pi} \lambda V_d S}}. \quad (27)$$

Складову сили різання P_{yk} отримаємо після підстановки значення τ_s з урахуванням (23), (25), (26):

$$P_{yk} = \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \sin \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b z_p \left(C - \frac{4a\alpha V_k \sqrt{H} \alpha_e}{\sqrt{\pi} \lambda V_d S} P_{zk} \right). \quad (28)$$

Для розрахунку складових сил різання на одиничному зерні, розділимо вирази (27) і (28) на кількість зерен, що одночасно працюють.

$$P_{zk} = \frac{\left(\frac{\sqrt{1+M^2 a_z \cos \omega}}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b C}{1 + \left(\frac{\sqrt{1+M^2 a_z \cos \omega}}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b z_p \frac{4a\alpha V_k \sqrt{H} \alpha_e}{\sqrt{\pi} \lambda V_\theta S}}, \quad (29)$$

$$P_{yk} = \left(\frac{\sqrt{1+M^2 a_z \sin \omega}}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b \left(C - \frac{4a\alpha V_k \sqrt{H} \alpha_e}{\sqrt{\pi} \lambda V_\theta S} P_{zk} \right). \quad (30)$$

Коректність формул (29), (30) при розрахунку складових сил різання в процесі плоского алмазного врізного шліфування сталі Р6М5 кругами з алмазів АС6 зернистістю 50/40, 100/80, 160/125 була підтверджена експериментально (рис.3). При цьому розбіжність теоретично розрахованих та певних експериментально величин складових сили різання знаходиться в межах 15-25%. Деяко більша розбіжність спостерігається при зіставленні величин складової P_y , особливо для круга зернистістю 50/40 (до 35%). Це зниженням профілю алмазного круга, що у найбільшій міру проявляється на дрібнозернистому крузі і чого не враховує розроблена методика розрахунку.

Project Name: test

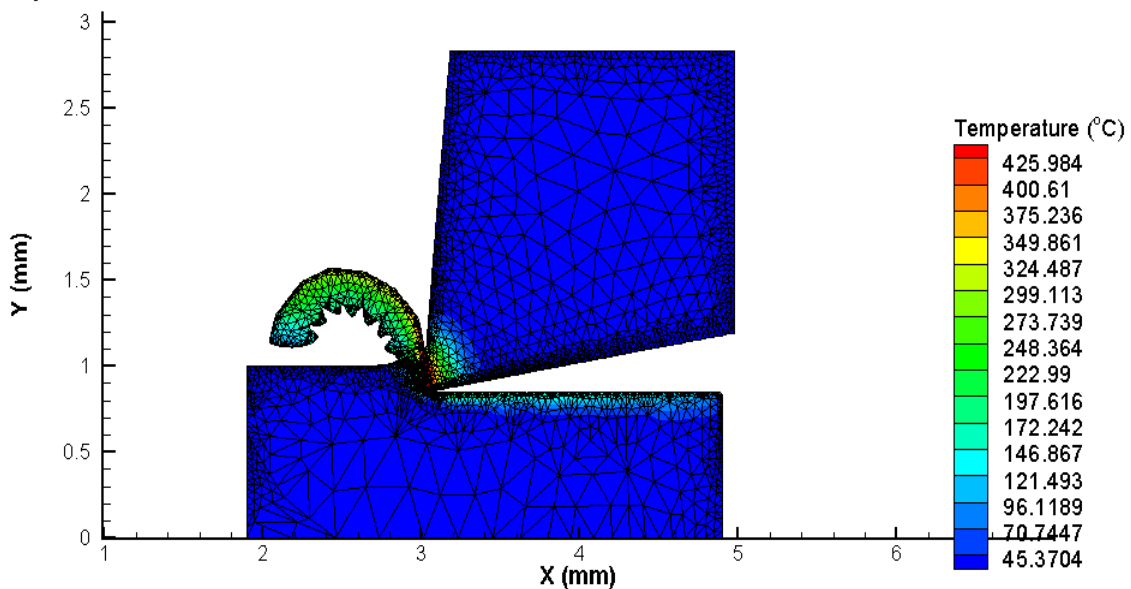


Рис. 3 – Експериментальні значення складових сил різання в процесі плоского врізного алмазного шліфування

Висновки

Проведено аналіз існуючих математичних залежностей для визначення сили різання при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів. Значення сили різання, що діє при шліфуванні, є найважливішою характеристикою процесу обробки. Від неї залежать умови роботи верстата, інструменту та рівень точності деталі, що отримується. Розроблено методику визначення складових сили різання при шліфуванні враховує вплив не тільки ріжучих зерен, а й деформуючих, де сумарні нормальна та тангенціальна складові сили різання діють уздовж лінії контакту як на периферії, так і на торці шліфувального круга. Товщину шару, що зрізається, розрахована з умови рівності обсягів підведеного і зрізаного матеріалу, враховуючи податливість системи і переривчастість круга. На базі розробленої методики виконано розрахунок складових сили різання при плоскому врізному шліфуванні. Чорнове шліфування здійснювали торцем круга, напівчистове – перехідною радіусною кромкою, а чистове шліфування та калібрування – розвантаженою ділянкою периферії круга, що забезпечує його високу стійкість. Нормальна складова сили різання, яка має максимальне значення на торці круга, практично не впливає на точність формоутворення деталі, оскільки вона розташована паралельно до її осі. Дану методику можна використовувати для різних видів шліфування, а також для дослідження теплонапруженості процесу, оптимізації та продуктивності механічної обробки.

Список використаної літератури:

1. Пат. 131894UA, МПК (2018.01) B24B 1/00. Спосіб електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів / Стрельчук Р. М., Узунян М. Д. – № у 201806851 ; заявл. 18.06.2018 ; опубл. 11.02.2019. – Бюл. № 3.
2. Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders / J. Montes, F. Cuevas, F. Reina [at al] // *Metals and Materials International*. – 2020. – № 7. – Pp. 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). – Pp. 489–497. doi: 10.1243/095440505X32706.
4. Strelchuk R. M. Mathematical modeling of the surface roughness of the grinding wheel during straightening / R. M. Strelchuk, S. M. Trokhimchuk // *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2021. – № 1. – Pp. 53–59. doi: 10.33271/nvngu/2021-1/053.
5. Strelchuk R. Optimization of the Interelectrode Gap in Electrical Discharge Grinding with Changing Electrode Polarity / R. Strelchuk, O. Shelkovi // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV : Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021, June 8–11, 2021, Lviv, Ukraine*. – 2021. – Vol. 1: Manufacturing and Materials Engineering. – Pp. 143–152. doi: 10.1007/978-3-030-77719-7_15.
6. Research of the Dependence of Geometric Parameters of Holes on Electroerosive Grinding Modes with a Changing Polarity of Electrodes / Strelchuk R., O. Shelkovi, Y. Gutsalenko, C. Iancu, V. Subbotina, S. Knyazev, O. Volkov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2022. – Pp. 1235–1241. doi: 10.1088/1757-899X/1235/1/012023.
7. Surface integrity in material removal processes: Recent advances / Jawahir, I. S., E. Brinksmeier, R. M'Saoubi, D. K. Aspinwall, J. C. Outeiro, D. Meyer, D. Umbrello, A. D. Jayal // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 2011. – № 60(2). – Pp. 603–626. doi: 10.1016/j.cirp.2011.05.002.
8. Analysis of the Material Behavior of Cemented Carbides (WC-Co) in Grinding by Single Grain Cutting Tests / Klocke, F., C. Wirtz, S. Mueller, P. Mattfeld // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 46. – Pp. 209–213. doi: 10.1016/j.procir.2016.03.209.
9. Xianbing L. Effects of Grinding Process on Residual Stresses in Nanostructured Ceramic Coatings / Liu, Xianbing, Bi Zhang // *Journal of Materials Science*. – 2002. – № 37(15). – Pp. 3229–3239. doi: 10.1023/A:1016174731658.
10. Grinding Characteristics of CBN-WC-10Co Composites / Mao, Cong, Chang Liang, Yuchen Zhang, Mingjun Zhang, Yongle Hu, Zhuming Bi // *Ceramics International*. – 2017. – № 43(18). – Pp. 16539–16547. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.09.040.
11. Effect of Electrode Material on Electrical Discharge Machining of Alumina / Muttamara, A., Y. Fukuzawa, N. Mohri, T. Tani // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – № 209(5). – Pp. 2545–2552. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.018.

12. Rahim M. Z. Electrical discharge grinding (EDG) of polycrystalline diamond – effect of machining polarity / Rahim, M. Z., S. Ding, J. Mo // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1025–1026. – Pp. 628–632. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.628.

13. Experimental investigation on electrical discharge diamond grinding of RB-SiC ceramics / Rao, X., F. Zhang, C. Li, Y. Li // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – № 94(5–8). – Pp. 2751–2762. doi: 10.1007/s00170-017-1102-7.

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). – Pp. 381–389. doi: 10.1080/10426914.2013.763678.

References:

1. Strelchuk, RM & Uzunian, MD 2019, *Sposib elektroeroziinoho almaznoho shlifuvannia zi zminnoiu poliarnistiu elektrodiv*, [Method of electrical discharge diamond grinding with alternating electrode polarity], UA Patent 131894.

2. Montes, J, Cuevas, F, Reina, F & at all 2020, 'Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders' *Metals and Materials International*, no 7, 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. doi: 10.1243/095440505X32706.

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. doi: 10.33271/nvngu/2021-1/053.

5. Strelchuk, R & Shelkovi, O 2021, 'Optimization of the Interelectrode Gap in Electrical Discharge Grinding with Changing Electrode Polarity' *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV* :

Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021, June 8–11, 2021, Lviv, Ukraine, Vol. 1: Manufacturing and Materials Engineering, Pp. 143–152. doi: 10.1007/978-3-030-77719-7_15.

6. Strelchuk, R, Shelkovi, 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*, Pp. 1235–1241. doi: 10.1088/1757-899X/1235/1/012023.

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. doi: 10.1016/j.cirp.2011.05.002.

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*, Vol. 46, Pp. 209–213. doi: 10.1016/j.procir.2016.03.209.

9. Xianbing, L & Zhang, L 2002, 'Effects of Grinding Process on Residual Stresses in Nanostructured Ceramic Coatings' *Journal of Materials Science*, no 37, Pp. 3229–3239. doi: 10.1023/A:1016174731658.

10. Cong, M, Liang, C, Zhang, Y, Zhang, M, Hu, Y & Bi, Z 2017, 'Grinding Characteristics of CBN-WC-10Co Composites' *Ceramics International*, no 43(18), Pp. 16539–16547. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.09.040.

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. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.018.

12. Rahim, MZ, Ding, S & Mo, J 2014, 'Electrical discharge grinding (EDG) of polycrystalline diamond – effect of machining polarity' *Advanced Materials Research*, Vol. 1025–1026, Pp. 628–632. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.628.

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. doi: 10.1007/s00170-017-1102-7.

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. doi: 10.1080/10426914.2013.763678.

Стаття надійшла до редакції 10 травня 2023 р.