

DOI 10.32820/2079-1747-2021-28-26-36

УДК 621.923

ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНІ 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

Зона контакту являє собою область взаємного проникнення різальних крайок в оброблюваний матеріал і виступів матеріалів в проміжки між зернами. До параметрів стану зони відносяться її розміри і форма, співвідношення зрізаної і незрізаної частин металу в кожній області зони, фізичні процеси формоутворення в тому числі: стружкоутворення, тепловиділення, пластичні деформації оброблюваного матеріалу, знос і руйнування інструментального матеріалу, фізичний і хімічний вплив на матеріали мастильно-охолоджувальної рідини.

В статті досліджено формування оброблюваної поверхні в умовах електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів в зоні резання. Розроблено фізичну модель зносу алмазного інструменту з урахуванням ерозійних процесів, що впливають на зв'язку круга. При побудові враховано розмірне зношування, процеси сколювання та викидання 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.

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

Strelchuk R. «Surface formation under the conditions of electroerosion grinding with variable polarity of electrodes»

The contact zone is the area of mutual penetration of the cutting edges into the processed material and the protrusions of the materials in the gaps between the grains. The parameters of the state of the zone include its size and shape, the ratio of cut and uncut parts of metal in each area of the zone, the physical processes of formation, including: chipping, heat generation, plastic deformation of the material, tool material wear and damage, physical and chemical effects on cooling lubricants.

The formation of the processed surface in the conditions of electroerosive diamond grinding with variable polarity of electrodes in the cutting zone is investigated in the article. A physical model of diamond tool wear has been developed considering the erosion processes affecting the wheel connection. The construction takes into account dimensional wear, processes of chipping and pulling out single abrasive grains from the bond, under the action of the components of cutting forces, considering the probability of grain contact with metal, the size of wear sites and the actual depth of microcutting.

The obtained ratios allow us to directly determine the probability of contact of the cut chips 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 lying in the working layer of the tool, it is also necessary to use the probability of the density distribution along the depth.

The type of the 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.

The obtained relations can be used in solving the corresponding problems of grinding the periphery of the circle, for example, round external grinding. With a clearer description of the process, it is necessary to directly apply the nonstationary representation, taking into account additional nonstationary ones, introduced by the trajectories of the cutting edges as a function of the angle of rotation of the circle and the part in the process of their interaction.

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

Вступ

Процес електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів (рис.1) дозволяє отримувати необхідні якісні та кількісні показники при значному зниженні питомої витрати алмазного круга і витрат різних видів енергії [1]. Це пояснюється тим, що зміна у часі на електродах полярності і відповідної частоти проходження імпульсів забезпечує стабільні умови процесу шліфування. Змінюючи частоту імпульсів, їх шпаруватість і потужність при зміні полярності електродів, можна регулювати безпосередньо сам процес, аж до рівноважного стану, забезпечивши рівнозначне прояв електрофізичних і електрохімічних (навіть при їх незначності) процесів щодо обох електродів при оптимальному межелектродному зазорі [2]. Зміна в часі на електродах полярності і відповідної



Рис. 1 – Процес електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів.

частоти проходження імпульсів забезпечує стабільні умови електроерозійного шліфування. Змінюючи електричні параметри при відповідній зміні полярності електродів, можна регулювати безпосередньо сам процес, аж до рівноважного стану, забезпечивши рівнозначне прояв електрофізичних і електрохімічних (навіть при їх незначності) процесів щодо обох електродів при оптимальному межелектродному зазорі.

Зона обробки при електроерозійному алмазному шліфуванні є місцем роботи ріжучих зерен круга в міжелектродному проміжку, де діють розряди. Електричні розряди в зоні шліфування діють на стружку, що зрізається, на поверхню оброблюваного матеріалу деталі і на шліфувальний круг □ на зв'язку в межзеренному просторі і побічно □ на зерна діелектрики

Дія розрядів на метал глибоко вивчено, проте в зоні електроерозійного шліфування вона має свої особливості. Стан зони різання і характер дії розрядів залежить від технологічних умов обробки і стану ріжучого рельєфу інструменту, від величини міжелектродного зазору (відстань між зв'язкою круга і поверхнею деталі) і від різних електричних параметрів. В технології електроерозійної обробки використовують розряди з енергією 5 ... 0,05 Дж (і менш) з частотою 400 ... 8 КГц, з тривалістю імпульсів 10000 ... 20 мкс (і менш). Розряди з тривалістю $<10^{-7}$ с вважають короткими (іскровими).

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Якщо між заготовлею та токопроводною зв'язкою інструменту існує деяка різниця потенціалів, то в зоні їх контакту можлива поява ерозійних розрядів. Теплова енергія, що виділяється при розряді, випаровує і плавить матеріал заготовки і зв'язки. В результаті цього впливу на поверхнях зв'язки алмазного круга та оброблювального матеріала деталі можуть утворюватися ерозійні лунки (рис.2.). При описі поверхні, сформованої розрядами, необхідно визначити розмір, форму і розподіл лунок в просторі. Для вирішення цього складного завдання розглянемо механізм виникнення розрядів в міжелектродному проміжку. У зоні контакту круга із заготовкою в місцях досягнення напруженості E електричного поля критичного значення $E_{кр}$ відбувається пробій міжелектродного проміжку і встановлення каналу ерозійного розряду. У роботах [3, 4] доведено, що найбільша ймовірність виникнення розряду спостерігається в місцях генерування абразивними зернами стружки. Це обумовлено тим, що зростаюча стружка скорочує відстань між електродами, а малий радіус кривизни вершин стружок визначає високу локальну напруженість електричного поля. Цим обумовлено допущення, що частка розрядів, що виникають випадково, в загальному обсязі незначна, та їй можна знехтувати.

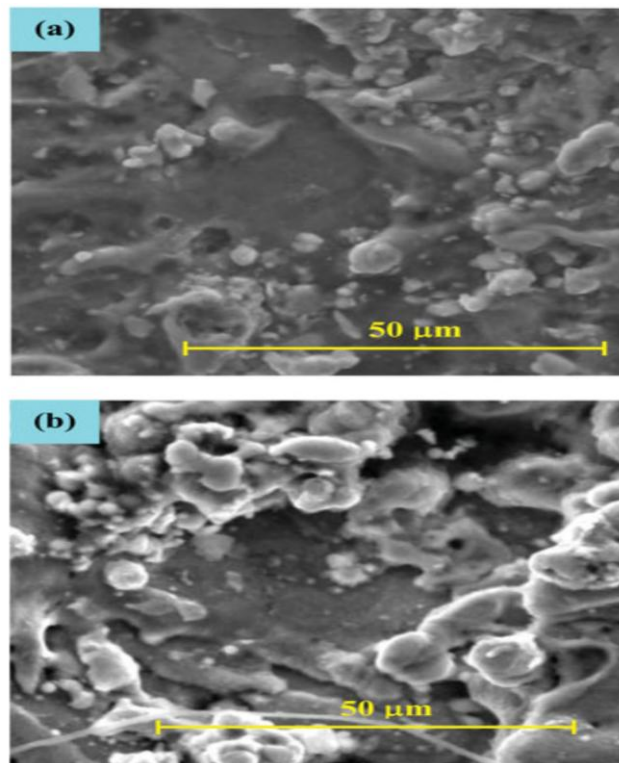


Рис. 2 – Ерозійні лунки:

(a) на поверхні зв'язки алмазного круга, (b) на поверхні оброблювального матеріала деталі

Побудова математичної моделі

У загальному випадку при обробці високоміцних матеріалів, наприклад спеціалізованої кераміки і твердих сплавів, застосовується електроерозійне шліфування зі змінною полярністю електродів, при якому з'їм припуску матеріалу, здійснюється за рахунок комбінації процесів мікрорізання-сколювання, крихкого об'ємного руйнування і ерозійного видалення матеріалу.

Для отримання математичної моделі, що дозволяє розраховувати з'їм припуску матеріалу при наявності процесів мікрорізання - сколювання, крихкого об'ємного руйнування і ерозійного видалення матеріалу, розглянемо процес взаємодії інструменту з заготовкою на мікрорівні. Видалення матеріалу в зоні контакту в результаті впливу мікрорізання - сколювання, крихкого об'ємного руйнування і ерозійного процесу можна розглядати як випадкове подія, характерне спільною ймовірністю видалення матеріалу заготовки хоча б одним з вищевказаних процесів. На поверхні заготовки можуть утворюватися сліди від ерозійних розрядів (рис.3).

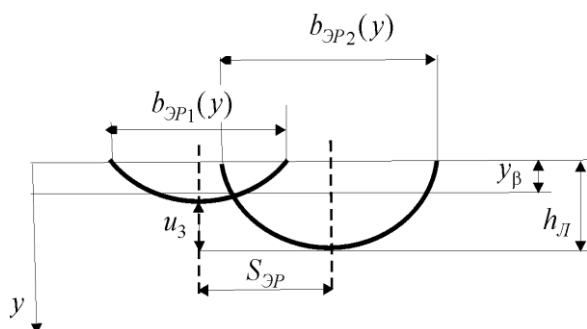


Рис. 3 – До розрахунку ймовірності видалення матеріалу заготовки ерозійними розрядами.

Якщо дві сусідні лунки перекривають один одного на рівні y_{β} , то матеріал між ними буде знищено повністю. Для будь-якого рівня ця умова можна записати:

$$0 < S_{\text{эп}} < 0,5(b_{\text{эп1}}(y) + b_{\text{эп2}}(y)) \quad (1)$$

де $S_{\text{эп}}$ – відстань між двома сусідніми лунками на поверхні зв'язки інструменту в перерізі; $b_{\text{эп1}}(y)$ і $b_{\text{эп2}}(y)$ – ширина двох сусідніх лунок на рівні y .

Якщо ширина лунок одного рівня y дорівнює, то умова перекриття лунок можна переписати:

$$0 < S_{\text{эп}} < b_{\text{эп}}(y).$$

Очевидно, що ймовірність ерозійного видалення матеріалу заготовки $P_3(y)$ на рівні y буде дорівнює ймовірності попадання випадкової величини $S_{\text{эп}}$ на відрізок від 0 до $b_{\text{эп}}(y)$. Якщо щільність розподілу ймовірності неперервної величини $S_{\text{эп}}$ позначити $f(S_{\text{эп}})$, то математичне сподівання видалення матеріалу з поверхні заготовки визначиться як:

$$P_3(y) = P(S_{\text{эп}} \leq b_{\text{эп}}(y)) = \int_{-\infty}^{b_{\text{эп}}(y)} f(S_{\text{эп}}) dS_{\text{эп}} = \int_0^{b_{\text{эп}}(y)} f(S_{\text{эп}}) dS_{\text{эп}}, \quad (2)$$

Розглядаючи виникнення розрядів в одному перерізі заготовки при проходженні одиничної ділянки круга можна відзначити, що ймовірність виникнення тієї чи іншої кількості розрядів на деякій ділянці перетину залежить тільки від довжини ділянки. Поява на поверхні заготовки лунок можна розглядати, як стаціонарний ординарний потік з обмеженою післядією. Результуючий за прохід інструменту потік розрядів в перерізі є сумою великого числа стаціонарних, ординарних потоків з обмеженою післядією. З теорії масового обслуговування слід, що його можна вважати як завжди близьким до найпростішого, а щільність розподілу будить відповідати наступному закону:

$$f(S_{\text{эп}}) = \lambda e^{-\lambda_{\text{лун}} S_{\text{эп}}}$$

Визначимо ймовірність видалення матеріалу заготовки:

$$P_3(y) = \int_0^{b_{\text{эп}}(y)} \lambda_{\text{лун}} \cdot e^{-\lambda_{\text{лун}} S_{\text{эп}}} \cdot dS_{\text{эп}} = 1 - e^{-\lambda_{\text{лун}} b_{\text{эп}}(y)} = 1 - e^{-a_3}, \quad (3)$$

де $\lambda_{\text{лун}}$ – середня кількість розрядів і утворених ними лунок на одиницю довжини перерізу.

Таким чином, ймовірність ерозійного видалення матеріалу заготовки на будь-якому з розглянутих рівнів y визначається шириною лунок, що утворюються та їх кількістю на одиницю довжини перерізу.

Тому відповідно до (3) отримаємо:

$$\Delta a_3 = \Delta \lambda_{\text{лин}} b_{\text{ЭР}} \quad (4)$$

Для фіксованого положення круга виділимо алмазне зерно, яке знімає стружку. У цьому місці виникає ерозійний розряд, який утворює в результаті теплового впливу лунку. Тривалість і потужність дуги визначають кількість тепла, яке надійшло на електрод, і розміри лунки відповідно. Ширину лунки $b_{\text{ЭР}}$ на рівні $y_{\text{ЭР}}$ від поверхні виникнення розряду (рис. 3) охарактеризуємо ступіневою залежністю:

$$b_{\text{ЭР}}(y) = C_{\text{ЭР}} \cdot (h_{\text{Л}} - y_{\text{ЭР}} - u_3)^r, \quad (5)$$

де $h_{\text{Л}}$ – глибина лунки, u_3 – поточна координата, що визначає положення ерозійних лунок від найбільш глибокої впадини залишеної ерозійним розрядом, $C_{\text{ЭР}}$ – коефіцієнт форми, r – показник ступені.

Ширина лунки в залежності від координати y (відстань від поверхні заготовки перед початком обороту) буде визначатися існуючим до моменту виникнення розряду значенням:

$$y_{\text{ЭР}} = y - y_{\beta}, \quad (5)$$

де $y_{\text{ЭР}}$ – відстань від зовнішньої поверхні заготовки до рівня, на якому матеріал вважається невиданим (шар видаленого матеріалу).

Наводячи залежність (5) до загальної системи координат, отримаємо:

$$\begin{aligned} b_{\text{ЭР}}(y) &= 0, \text{ за } y_{\beta} > y > y_{\beta} + h_{\text{Л}} \\ b_{\text{ЭР}}(y) &= C_{\text{ЭР}} (h_{\text{Л}} - y_{\text{ЭР}} - u_1)^r, \text{ за } y_{\beta} \leq y \leq y_{\beta} + h_{\text{Л}} \end{aligned} \quad (6)$$

З аналізу виразу (6) видно, що при розрахунку ерозійної складової знімання необхідно постійно враховувати величини y_{β} та $h_{\text{Л}}$. Перша величина визначає зону дії теплових розрядів. Визначення y_{β} при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів можливо лише при послідовному обчисленні її в усіх точках тимчасового простору. Друга величина визначає глибину лунки, що утворилася, розраховується виходячи з закону збереження енергії, вважаючи, що джерело теплоти рухається разом з кордоном розплаву:

$$h_{\text{Л}}(z) = \frac{\beta z_{\text{п}} U^2 \pi k_r^2}{\rho_3 [c_T (\Theta_{\text{пл}} - \Theta_0) + L_{\text{пл}} + 0.5 V_p^2]} + \frac{1}{(\pi k_r^2 + 2 V_{\text{СКЗ}} r_{\text{КСР}}) \delta}, \quad (7)$$

де U – напруга на електродах; $z_{\text{п}}$ – електропровідність плазми; $V_{\text{СКЗ}}$ – швидкість ковзання плями розряду по заготівлі; V_p – швидкість розльоту частинок; c_T – питома теплопровідність заготовки; $L_{\text{пл}}$ – теплота плавлення електрода; Θ_0 – початкова температура електрода; $\Theta_{\text{пл}}$ – температура плавлення електрода; ρ_3 – щільність заготовки; $r_{\text{КСР}}$ – радіус каналу розряду; k_r – коефіцієнт корекції радіусу каналу розряду; δ – міжелектродний зазор.

Аналіз цього виразу показує, що пропорційно часу існування дуги збільшується як кількість виділилася енергії, так і площа розподілу тепла. Тому величина лунки, що утворилася залежить більшою мірою від міжелектродного зазору, від робочої напруги (енергії імпульсів) і від полярності електродів при обробці.

Коефіцієнт β визначає частку енергії, що надходить на електрод. Він залежить від

умов теплообміну з зовнішнім середовищем і від значень щільності струму в каналі розряду.

З ростом радіуса каналу розряду пов'язано збільшення струму в стовпі, причому з плином часу існування розряду τ_p росте частка енергії іонного струму, а величина електричного струму досягає свого максимального значення при формуванні розряду. Це пов'язано з тим, що потрібно більше часу для розгону "холодних" іонів по порівнянню з "гарячими" електронами. По оцінкам [5] величина іонного струму досягає значення електронного при тривалості розряду $\tau \cdot 10^6$ с, а потім перевищує його.

Таким чином, коефіцієнт β є функцією від часу існування розряду і може бути записаний в наступному вигляді:

$$\beta = G\tau_p^x,$$

де G, x – коефіцієнти, які визначаються емпірично для різних груп матеріалів на прямий і зворотній полярності окремо.

Для знаходження коефіцієнтів G та x необхідне проведення однофакторного експерименту, в основі якого лежить визначення відносної ерозійної стійкості матеріалів зв'язки круга і заготовки. Для визначення величини міжелектродного зазору розглянемо схему представлену на рис. 4.

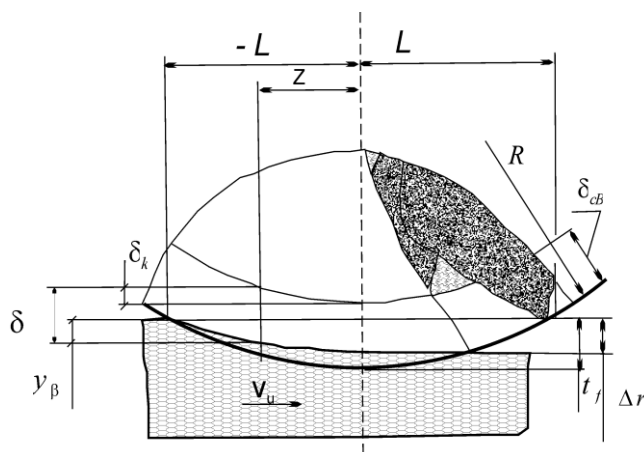


Рис. 4 – Схема до розрахунку міжелектродного зазору

Згідно малюнку, величина δ складається з δ_k – відстані від дотичної в точці $Z=0$, що проходить через рівень зв'язки до рівня зв'язки, y_β – відстань від зовнішньої поверхні заготовки до деякого рівня, на якому розраховується ймовірність видалення матеріалу, і різниці між відстанню від вершини найбільш виступаючого зерна до рівня зв'язки δ_{cb} і фактичної глибиною різання t_f ;

$$\delta = \delta_k + y_\beta + \delta_{cb} - t_f, \quad (8)$$

де $\delta_k = \frac{z^2}{D_3}$; z – поточна координата $\{-L, L\}$; D_3 – еквівалентний діаметр.

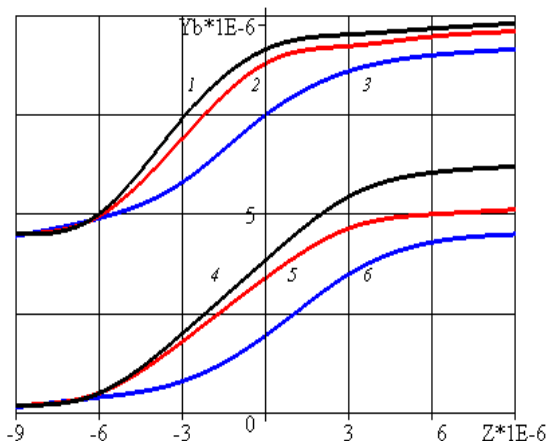


Рис. 5 – Зміна величини y_β уздовж зони

контакту: 1 – $V_k = 35 \text{ м/с}$, $\beta = 0,5$;

2 – $V_k = 25 \text{ м/с}$, $\beta = 0,5$;

3 – $V_k = 15 \text{ м/с}$, $\beta = 0,5$;

4 – $V_k = 35 \text{ м/с}$, $\beta = 0,99$;

5 – $V_k = 25 \text{ м/с}$, $\beta = 0,99$;

6 – $V_k = 15 \text{ м/с}$, $\beta = 0,99$.

Величина y_β на інтервалі $-L < z < L$, визначається через ймовірність видалення матеріалу за умови:

$$y_\beta = \begin{cases} 0, & \text{за } z \leq -L \\ f(a(y; z), & \text{за } -L < z < L \\ \Delta r, & \text{за } z \geq L \end{cases}$$

$$\ln(1 - \beta_M) = \ln \frac{y_\beta}{H} - \frac{3\pi K_c \sqrt{2\rho_3 n_3} (V_k \pm V_U)(t_f - y_\beta)^2}{8V_U H_U^{3/2}} \times$$

$$\times \left[Z - \frac{2Z^3}{3Ly^2} + \frac{Z^5}{5Ly^4} + \frac{8}{15} Ly \right], \quad \text{де } a_0 = \ln \frac{y_\beta}{H} -$$

показник, що характеризує вихідну шорсткість деталі; H – шар, в якому розподілена шорсткість заготовки; ρ_3 – радіус округлення вершини зерна; інші параметри відповідають раніше введеним позначенням.

Графічна інтерпретація результатів розрахунку приведена на рис. 5.

Вираз (8) дозволяє розраховувати величину міжелектродного зазору для різної точки зони контакту деталі з кругом і простежити закономірність його зміни. Чисельне рішення рівняння виконано в програмі Matlab, а графічна інтерпретація результатів представлена на рис. 6.

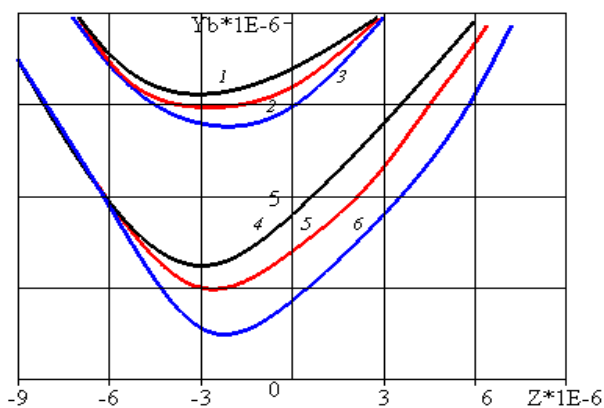


Рис. 6 – Динаміка зміни міжелектродного зазору уздовж зони контакту:

1 – $V_k = 35 \text{ м/с}$, $\beta = 0,5$;

2 – $V_k = 25 \text{ м/с}$, $\beta = 0,5$;

3 – $V_k = 15 \text{ м/с}$, $\beta = 0,5$;

4 – $V_k = 35 \text{ м/с}$, $\beta = 0,99$;

5 – $V_k = 25 \text{ м/с}$, $\beta = 0,99$;

6 – $V_k = 15 \text{ м/с}$, $\beta = 0,99$.

Дані розрахунку показують, що при проходженні зони контакту круга з деталлю відстань від зовнішньої поверхні заготовки до розглянутого рівня не постійно, вона визначається режимами процесу і зростає зі збільшенням координати Z . Сумарний зазор між кругом і деталлю також непостійний і для кожної точки зони контакту має певне значення. Зазор залежить від режимів шліфування і від положення рівня зв'язки круга (при координаті Z) в зоні різання. Для найбільш віддаленого від центру круга елемента зв'язки при його русі до основної площини, що відповідає збільшенню Z , спостерігається зменшення зазору, при $Z = (-0.4L) + (-0.2L)$ величина зазору приймає мінімальне значення, після чого (у міру наближення до L) збільшується і при $Z > L$ асимптотично наближається до нескінченності.

Після підстановки формули (8) в співвідношення (7) отримаємо вираз для розрахунку глибини одиначною ерозійної лунки:

$$h_L(z) = \frac{A}{\left(h + \frac{z^2}{D_3}\right)}, \quad (9)$$

$$\text{де } A = \frac{\beta z_{\text{пл}} U^2 \pi k_r^2}{\rho_3 [c_T (\Theta_{\text{пл}} - \Theta_0) + L_{\text{пл}} + 0.5 V_P^2] (\pi k_r^2 + 2 V_{\text{СК.З}} r_{\text{К.СР}})}, \quad h = \delta_{\text{СВ}} - t_{\phi} + y_{\beta}.$$

У зв'язку з тим, що електроерозійні розряди виникають в місцях формування стружок, то кількість виникаючих лунок безпосередньо залежить від числа ріжучих зерен і від будови інструменту. Для визначення ймовірності ерозійного руйнування заготовки при круглому і плоскому шліфуванні периферією розглянемо перетин деталі в зоні контакту.

За час $\Delta \tau$ перетин заготовки зміщується на відстань Δz , і через неї проходить ділянку круга з довжиною дуги рівній: $(V_k \pm V_u) \Delta \tau$, тут V_k – окружна швидкість круга; V_u – окружна швидкість заготовки.

Із загальної кількості ріжучих елементів на поверхні інструменту стружки можуть утворювати зерна, вершини яких розташовані в шарі круга $1 \cdot \Delta u (V_k \pm V_u) \Delta \tau$. Величина u змінюється в міру проходження кругом зони контакту і лежить в межах:

$$0 \leq u \leq t(z) - y_{\beta} \quad (10)$$

де $t(z)$ – глибина різання по довжині зони контакту.

Число вершин, що знаходяться в елементарному шарі інструменту, обчислюється по щільності їх розподілу $f_3(u)$ за формулою:

$$\Delta \lambda = n_3 f(u) \Delta u (V_k \pm V_u) \Delta \tau, \quad (11)$$

де n_3 – кількість зерен в одиниці об'єму робочого шару інструменту; V_k, V_u – окружна швидкість інструменту і заготовки; $f(u)$ – розподіл робочих зерен інструменту по координаті u .

Виниклі стружки створюють високу місцеву напруженість електричного поля і тим самим викликають появу ерозійного розряду. Однак дослідження [6, 7] показують, що не всі стружки здатні викликати пробою міжелектродного проміжку. Це пов'язано з тим, що між двома розрядами в одній точці простору необхідна наявність паузи тривалістю $t_{\text{П}}$ для деіонізації проміжку. Тривалість необхідної паузи визначається середовищем, що заповнює міжелектродний проміжок. Таким чином, приріст кількості розрядів, що виникають в зоні контакту від дії елементарної поверхні інструменту, визначимо:

$$\Delta N_{\text{ЭР}} = k_{\text{ЭР}} \Delta \lambda \quad (12)$$

де $k_{\text{ЭР}}$ – коефіцієнт, що враховує кількість стружок, які не викликають розряд.

Зміна параметра $a_3(y, \tau)$ визначимо, як приріст суми поперечних розмірів лунок $\Delta a_3 = \Delta \lambda_{\text{ЭР}} b_{\text{ЭР}}$ та обчислимо:

$$\Delta a_3(y, \tau) = k_c b_{\text{ЭР}}(y) \Delta N_{\text{ЭР}} = k_{\text{ЭР}} k_c n_3 b_{\text{ЭР}}(y) f_3(u) \Delta u (V_k \pm V_u) \Delta \tau, \quad (13)$$

Замінивши $\Delta \tau$ на z / V_u обчислимо значення показника $a_3(y, z)$ в точці z зони контакту:

$$a_3(y, z) = \int_{-L}^L \int_0^{t(z)-y_{\beta}(z)} k_{\text{ЭР}} \cdot k_c \cdot b_{\text{ЭР}}(y) \cdot n_3 \cdot f_3(u) \cdot \frac{V_k \pm V_{\text{П}}}{V_{\text{П}}} \cdot du \cdot dz. \quad (14)$$

Для моделювання розподілу алмазних зерен по глибині скористаємося залежністю:

$$f(u) = C_h u^{\chi-1}, \quad (15)$$

де C_h – коефіцієнт, який вираховується з умови рівності одиниці площі, обмеженої кривою розподілу.

Остаточно підставивши співвідношення (15), (5), (9) в формулу (14) отримаємо показник, що визначає ймовірність ерозійного видалення матеріалу заготовки в точці з координатою z зони контакту і на рівні y :

$$a_3(y, z) = \Theta \int_0^{t(z)-y_\beta(z)} \int_{-L}^L \left(\frac{A}{h + \frac{z^2}{D_3}} - u_3 - y_{\text{ЭП}} \right) \cdot u_3^{\chi-1} \cdot du_3 \cdot dz, \quad (16)$$

$$\text{де } \Theta = \frac{C_{\text{ЭП}} k_{\text{ЭП}} k_c n_3 (V_K \pm V_H) \chi}{V_H H_u^\chi}.$$

Після інтегрування по z і u отримаємо вираз для розрахунку показника $a_3(y, z)$:

$$a_3(y, z) = -C_{\text{ЭП}} B_3 L_y \left[\frac{(t_f - y_{\text{ЭП}})}{\chi + 1} - \frac{y_\beta}{\chi} \right] + \frac{B_3 A D_3}{\chi B_2} \left[\ln \left(\frac{L_y}{B_2} + 1 \right) - \ln \left(\frac{L_y}{B_2} - 1 \right) \right], \quad (17)$$

$$\text{де } B_3 = \Theta (t_f - y_{\text{ЭП}})^\chi, B_2 = \sqrt{h D_3}.$$

Після підстановки співвідношення (17) в формулу (2), отримаємо вираз для розрахунку ймовірності неудалення матеріалу з поверхні заготовки за рахунок теплового впливу ерозійних розрядів:

$$P_3(\bar{M}) = \exp \left\{ 2 B_3 L_y \left[\frac{(t_f - y_{\text{ЭП}})}{\chi + 1} - \frac{y_\beta}{\chi} \right] + \frac{B_3 A D_3}{\chi B_2} \left[\ln \left(\frac{L_y}{B_2} + 1 \right) + \ln \left(\frac{L_y}{B_2} - 1 \right) \right] \right\}. \quad (18)$$

Висновки

Таким чином, в статті досліджено формування оброблюваної поверхні в умовах електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів в зоні резання. Розроблено фізичну модель зносу алмазного інструменту 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 використаної літератури:

1. Лавриненко В. И. Электрошлифование инструментальных материалов / В. И. Лавриненко. – Київ : Наук. думка, 1993. – 156 с.
2. Effect of phase transition on micro-grinding-induced residual stress / Zishan Ding, Gaoxiang Sun, MiaoXian Guo // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – Vol. 281. – Pp. 63–72.
3. Пат. України на корисну модель №131894, МПК (2018.01) B24B 1/00. Спосіб електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів / Стрельчук Р. М., Узунян М. Д. – № u 201806851; заявл. 18.06.2018; опубл. 11.02.2019. – Бюл. № 3.
4. Probing the effect of grinding-heat on material removal mechanism of rail grinding / Pengfei Zhang, Wulin Zhang, Yongjie Yuan // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 147. – Pp. 131–139.
5. Gutsalenko Yu. Exploitative destruction features for detonation ultra-dispersed diamonds of initial metallic protection for abrasive powder grains to diamond-spark grinding tools / Yu. Gutsalenko, C. Iancu, S. Bratan // *Fiability & Durability*. – 2015. – Supplement No. 1 (14). – Pp. 3-8.
6. Кобзарь Л. Е. Прогрессивное алмазно-искровое шлифование / Л. Е. Кобзарь, В. А. Фадеев, Н. К. Беззубенко. – Харьков : ХГПУ – ХНПО «ФЭД», 1995. – 152 с.
7. Koshy P. Mechanism of Material Removal in Electrical Discharge Diamond Grinding / P. Koshy, V. K. Jain, G. K. Lal // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1996. – Vol. 36, Iss. 10. – Pp. 1173-1185

References

1. Lavrinenko, VI 1993, *Jelektroshlifovanie instrumentalnyh materialov*, Naukova dumka, Kiev.
2. Zishan Ding, Gaoxiang Sun & MiaoXian Guo 2020, 'Effect of phase transition on micro-grinding-induced residual stress', *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 281, pp. 63–72.
3. Strelchuk, RM & Uzunian, MD 2019, *Sposib elektroeroziinohoalmaznoho shlifuvannia zi zminnoiu poliarnistiu elektrodov*, UA Patent 131894.
4. Pengfei Zhang, Wulin Zhang & Yongjie Yuan 2020, Probing the effect of grinding-heat on material removal mechanism of rail grinding, *Tribology International*, vol. 147, pp. 131–139.
5. Gutsalenko, Yu, Iancu, C & Bratan, S 2015, 'Exploitative destruction features for detonation ultra-dispersed diamonds of initial metallic protection for abrasive powder grains to diamond-spark grinding tools', *Fiability & Durability*, Supplement no. 1 (14), pp. 3-8.
6. Kobzar, LE, Fadeev, VA & Bezzubenko, NK 1995, *Progressivnoealmazno-iskrovoe shlifovanie*, Harkovskij gosudarstvennyj politechnical universitet, HNPO FJeD, Harkov.
7. Koshy, P, Jain, VK & Lal, GK 1996, 'Mechanism of Material Removal in Electrical Discharge Diamond Grinding', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 36, iss. 10, pp. 1173-1185.

Стаття надійшла до редакції 15 листопада 2021 року