

Аналіз формоутворення поверхні при електроерозійному алмазному шліфуванні зі змінною полярністю електродів

*Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»*

У роботі приведена методологія процесу формоутворення поверхні на основі математичного моделювання, характеру взаємодії ріжучого рельєфу круга з оброблюваним матеріалом. Це дозволило розкрити закономірності зміни фізичних і технологічних параметрів процесу і їх взаємозв'язок з продуктивністю і зносом кругів в різних умовах електроерозійного алмазного шліфування. Показано, що процес електроерозійного алмазного шліфування, забезпечує стійкий стан рельєфу алмазного круга, стабільні умови взаємодії його робочої поверхні з оброблюваним матеріалом. Це дозволило за допомогою математичної моделі встановити взаємозв'язок факторів та оптимізувати параметри, гарантувати достовірність і відтворюваність результатів. Для створення адекватної моделі розглянута схема процесу шліфування, в якій враховано, що алмазні зерна не мають регулярної геометрії, розташовані на робочій поверхні інструменту на різних рівнях, при роботі зношуються і руйнуються. На основі розглянутої схеми процесу електроерозійного шліфування розроблені залежності для обчислення ймовірності видалення матеріалу в будь-якій точці зони контакту з урахуванням декількох процесів формоутворення, що протікають одночасно. Вони дозволяють прогнозувати з'єм матеріалу, диференційовано оцінювати вплив окремих факторів на параметри якості деталі і швидкість протікання процесу. Відкрита структура моделі дає можливість удосконалювати її в міру уточнень параметрів, котрі входять до неї. Розроблено динамічну теоретико-імовірнісну модель формоутворення поверхні при електроерозійному алмазному шліфуванні зі змінною полярністю електродів. Ця модель враховує ерозійні процеси, що впливають на оброблюваний матеріал. При побудові враховані розмірний знос круга, процеси сколювання і викидання поодиноких алмазних зерен з зв'язки круга, величини майданчиків зносу і дійсної глибини мікрорізання. Для безпосереднього використання отриманих теоретичних результатів необхідні експериментальні дослідження по визначенню параметрів, що входять до складу моделі.

Ключові слова: форма алмазних крайок; глибина мікрорізання; видалення матеріалу.

Вступ

Процес електроерозійного алмазного 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 частоти проходження імпульсів забезпечує стабільні умови електроерозійного шліфування. Змінюючи електричні параметри при відповідній зміні полярності електродів, можна регулювати безпосередньо сам

процес, забезпечивши рівнозначне прояв електрофізичних і електрохімічних (навіть при їх незначності) процесів щодо обох електродів при оптимальному межелектродному зазорі.



Рис.1 Процес електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів

Зона обробки при електроерозійному алмазному шліфуванні є місцем роботи ріжучих алмазних 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 алмазні зерна-діелектрики.

Основний матеріал

Видалення матеріалу в зоні контакту в результаті впливу мікрорізання – сколювання, крихкого об'ємного руйнування та ерозійного процесу можна розглядати як випадкову подію, що характеризується спільною ймовірністю видалення матеріалу заготівлі хоча б одним із вищевказаних процесів.

Загальна можливість видалення визначається:

$$P(M) = 1 - P_1(\bar{M}) \cdot P_2(\bar{M}) \cdot P_3(\bar{M}), \quad (1)$$

де $P_1(\bar{M})$ – ймовірність того, що матеріал не видалений за рахунок мікрорізання; $P_2(\bar{M})$ – ймовірність того, що матеріал не видалений за рахунок об'ємного крихкого руйнування, $P_3(\bar{M})$ – ймовірність ерозійного неруйнування матеріалу.

Це рівняння також може бути представлене у вигляді аналогічному [161] у формі:

$$P(M) = 1 - \exp(-a_0 - a_1(y, \tau) - a_2(y, \tau) - a_3(y, \tau)), \quad (2)$$

де a_0 – показник, що визначає можливість видалення матеріалу на рівні y до входу поверхні до зони контакту деталі з кругом; $a_1(y, \tau)$ – показник, що визначають зміну можливості видалення матеріалу в зоні контакту деталі з

кругом за рахунок протікання процесів механічного різання; $a_2(y, \tau)$ – показник, що визначають зміну ймовірності видалення матеріалу в зоні контакту деталі з колом за рахунок протікання процесів крихкого об'ємного руйнування, $a_3(y, \tau)$ – показник, що визначають зміну ймовірності видалення матеріалу в зоні контакту деталі з кругом за рахунок перебігу процесів видалення ерозійного матеріалу; y – відстань від зовнішньої поверхні заготовки до рівня, що розглядається; τ – поточний момент часу.

Зміна Δa_1 при протіканні процесів мікрорізання для кожного обороту визначається виразом [3]:

$$\Delta a_1(y, \tau) = k_c b_3 \Delta \lambda, \quad (3)$$

де k_c – коефіцієнт стружкоутворення; $b_3(y, \tau)$ – ширина зерна на рівні y ; $\Delta \lambda$ – число алмазних зерен, що пройшли через одиничний переріз.

Для умов, коли шліфуються крихкі матеріали (різні види твердих сплавів), $k_c = 1$. У процесі шліфування певну кількість зерен здійснює мікрорізання поверхні заготовки, а інша частина зерен безпосередньо сколює матеріал. Тому при розрахунку показника Δa_1 , необхідно враховувати ті зерна, які можуть зрізати матеріал, тобто. від загальної кількості зерен треба відняти зерна, які виробляють сколювання.

Тоді:

$$\Delta a_1(y, \tau) = b_3 \lambda (1 - P_{ck}), \quad (4)$$

де P_{ck} – ймовірність об'ємного крихкого руйнування матеріалу заготівлі при взаємодії із зерном інструменту.

При апроксимації профілю зерна статечною залежністю отримуємо:

$$b_3 = C_b (t_f - y - u)^m, \quad (5)$$

де C_b , m – коефіцієнти форми зерна; t_f – фактична глибина мікрорізання; u – відстань від умовної зовнішньої поверхні інструменту до вершини зерна.

Через одиничний переріз $1 \cdot \Delta u \cdot \Delta \tau (V_k \pm V_u)$ проходить $\Delta \lambda$ зерен інструменту

$$\Delta \lambda = n_3 f(u) \Delta u (V_k \pm V_u) \Delta \tau, \quad (6)$$

де n_3 – кількість зерен в одиниці об'єму робочого шару інструменту; V_k, V_u – окружна швидкість інструменту та заготівлі; $f(u)$ – розподіл робочих зерен інструменту за координатою u , яке може бути апроксимовано залежністю [165]:

$$f(u) = C_h u^{\chi-1}, \quad (7)$$

де C_h – коефіцієнт, що обчислюється з умови рівності одиниці площі, обмеженою кривою розподілу

$$C_h = \frac{\chi}{H_u^\chi}, \quad (8)$$

де H_u – величина шару робочої поверхні круга, у межах якої

підраховується n_3 .

Після підстановки виразів (7,8) в у рівняння (6), а виразів (5,6) в у рівняння (4) та інтегрування по τ та по u , слідує:

$$a_1(y, \tau) = n_3 C_b \frac{\chi}{H_u^\chi} (V_k \pm V_u) \int_{t_0}^t \int_0^{t_\phi - y} (t_\phi - y - u)^m u^{\chi-1} (1 - P_{ck}) du d\tau. \quad (9)$$

Імовірність сколювання P_{ck} визначається режимом шліфування та розташування зерна в обсязі інструменту. Для її розрахунку можна використовувати залежності отримані у роботі [4], Вони отримані при аналізі процесу правки абразивного інструменту і дозволяють визначити ймовірність об'ємного руйнування зерен шліфувального круга. Процес правки абразивних кругів у певному сенсі подібний до процесу алмазного шліфування. Однак дані залежності складні для практичного використання. Тому бажано замінити їх наближеними так, щоб стало можливим аналітичне обчислення інтеграла (9). Для цього може бути використана залежність:

$$P_{ck} = P_0 \left[1 - \left(\frac{u}{t_f} \right)^\beta \right], \quad (10)$$

де P_0 – значення ймовірності сколювання є характеристикою конкретного матеріалу; β – показник ступеня залежить від конкретних умов шліфування. Зазначені параметри залежності (10) можуть бути розраховані за методикою [5].

Підставивши вираз (10) в у рівняння (9), отримаємо

$$\begin{aligned} a_1(y, z) = & n_3 \kappa_c (V_k \pm V_u) C_b \frac{\chi}{H_u^\chi} \int_{t_0}^t \int_0^{t_f - y} (t_f - y - u)^m u^{\chi-1} du d\tau - \\ & - n_3 \kappa_c (V_k \pm V_u) C_b \frac{\chi}{H_u^\chi} \int_{t_0}^t \int_0^{t_f - y} (t_f - y - u)^m u^{\chi-1} P_0 du d\tau + \\ & + n_3 \kappa_c (V_k \pm V_u) C_b \frac{\chi}{H_u^\chi} \int_{t_0}^t \int_0^{t_f - y} (t_f - y - u)^m u^{\chi-1} \left[P_0 \left(\frac{u}{t_f} \right)^\beta \right] du d\tau \end{aligned} \quad (11)$$

Обчислюючи інтеграл у формулі (11), який описує процес виходу алмазних зерен із зони контакту, отримаємо вираз:

$$\begin{aligned} a_1(y, \tau) = & \frac{n_3 \kappa_c C_b \chi (V_k \pm V_u) \Gamma(\chi) \Gamma(m+1) (t - t_0) (1 - P_0)}{\Gamma(m + \chi + 1) H_u^\chi} (t_f - y)^{m+\chi} + \\ & + \frac{n_3 \kappa_c C_b \chi (V_k \pm V_u) \Gamma(\chi + \beta) \Gamma(m+1) (t - t_0) P_0}{\Gamma(m + \chi + \beta + 1) H_u^\chi t_f^\beta} (t_f - y)^{m+\chi+\beta}. \end{aligned} \quad (12)$$

З урахуванням позначень

$$A_1 = \frac{n_3 \kappa_c C_b \chi (V_\kappa \pm V_u) \Gamma(m+1)(t-t_0)}{H_u^\chi} (t_f - y)^{m+\chi} \quad (13)$$

вираз (12) набуде вигляду:

$$a_1(y, \tau) = A_1 \left(\frac{\Gamma(\chi)(1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1)} + \frac{\Gamma(\chi+\beta)P_0}{\Gamma(m+\chi+\beta+1)t_f^\beta} (t_f - y)^\beta \right). \quad (14)$$

Після кожного обороту значення y змінюється на величину знімання Δr , звідси з урахуванням (14) отримано:

$$P_1(\bar{M}) = \exp \left[A_1 \left(\frac{\Gamma(\chi)(1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1)} + \frac{\Gamma(\chi+\beta)P_0}{\Gamma(m+\chi+\beta+1)t_f^\beta} (t_f - y - \Delta r)^\beta \right) \right]. \quad (15)$$

Імовірність видалення матеріалу за рахунок об'ємної крихкої руйнації згідно (2) запишеться як

$$P_2(M) = 1 - \exp[-a_2(y, \tau)]. \quad (16)$$

При протіканні процесу крихкого об'ємного руйнування ширина одиничної риски b_x , як результат взаємодії зерна інструменту з деталлю з твердого сплаву, більше його фактичної ширини b_3 .

Для апроксимації b_x використовується степенная зависимость:

$$b_x = C_{bx} (t_f - y - u + \Delta r_x)^{m_x}, \quad (17)$$

де Δr_x – величина збільшення знімання матеріалу в процесі крихкого руйнування твердого сплаву.

Аналогічно рішенням виразів (6–9) для випадку торцевого шліфування можна отримати показник ступеня a_2 :

$$a_2(y, \tau) = A_2 \left(\frac{\Gamma(\chi)}{\Gamma(m_x + \chi + 1)} - \frac{\Gamma(\chi + \beta)}{\Gamma(m_x + \chi + \beta + 1)t_f^\beta} (t_f - y - \Delta r_x)^\beta \right), \quad (18)$$

$$\text{де } A_2 = \frac{n_3 \kappa_c C_b \chi (V_\kappa \pm V_u) \Gamma(m_x + 1) P_0 (t - t_0)}{H_u^\chi} (t_f - y - \Delta r_x)^{m+\chi}.$$

Що дозволяє побудувати відповідно (2) вираз для ймовірності видалення матеріалу при торцевому шліфуванні тільки за рахунок об'ємного крихкого руйнування:

$$P_2(\bar{M}) = \exp \left[A_2 \left(\frac{\Gamma(\chi)}{\Gamma(m_x + \chi + 1)} - \frac{\Gamma(\chi + \beta)}{\Gamma(m_x + \chi + \beta + 1)t_f^\beta} (t_f - y - \Delta r_x)^\beta \right) \right]. \quad (19)$$

Для отримання відповідних залежностей для схем круглого та плоского шліфування проведемо заміну змінної τ на $\frac{z}{v_u}$ у виразі (11), отримаємо інтегральне рівняння, що визначає зміну параметрів ймовірності у зоні контакту деталі з кругом:

$$\begin{aligned}
a_1(y, z) = & \frac{n_3 \kappa_c (V_\kappa \pm V_u) C_b \chi}{V_u H_u^\chi} \int_{-L}^L \int_0^{t(z)-y} (t_f - y - u - \frac{z^2}{D_\vartheta})^m u^{\chi-1} du dZ - \\
& - \frac{n_3 \kappa_c (V_\kappa \pm V_u) C_b \chi}{V_u H_u^\chi} \int_{-L}^L \int_0^{t(z)-y} (t_f - y - u - \frac{z^2}{D_\vartheta})^m u^{\chi-1} P_0 du dZ + \\
& + \frac{n_3 \kappa_c (V_\kappa \pm V_u) C_b \chi}{V_u H_u^\chi} \int_{-L}^L \int_0^{t(z)-y} (t_f - y - u - \frac{z^2}{D_\vartheta})^m u^{\chi-1} \left[P_0 \left(\frac{u}{t_\phi} \right)^\beta \right] du dZ
\end{aligned} \quad (20)$$

де L – відстань від основної площини до перетину рівня y з траєкторією руху, найбільш віддаленої від центру ріжучої кромки; $t(z)$ – дійсна глибина різання; D_e – еквівалентний діаметр.

При зовнішньому круглому шліфуванні

$$D_e = \frac{dD}{d+D},$$

де d, D – діаметр заготівлі та шліфувального круга відповідно, а при плоскому шліфуванні периферією кола $D_e = D$.

Після інтегрування виразу (20) по u одержимо:

$$\begin{aligned}
a_1(y, z) = & \frac{n_3 \kappa_c C_b \chi (V_\kappa \pm V_u) \Gamma(\chi) \Gamma(m+1) (1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1) H_u^\chi V_u} \int_{-L}^L (t_f - y - \frac{z^2}{D_\vartheta})^{m+\chi} dz + \\
& + \frac{n_3 \kappa_c C_b \chi (V_\kappa \pm V_u) \Gamma(\chi+\beta) \Gamma(m+1)}{\Gamma(m+\chi+\beta+1) H_u^\chi V_u t_f^\beta} \int_{-L}^L (t_f - y - \frac{z^2}{D_\vartheta})^{m+\chi+\beta} dz
\end{aligned} \quad (21)$$

Подальше інтегрування рівняння (21) можливе лише за відомих значень m, χ та β . Вид залежності після інтегрування визначається їхньою сумою.

$$\begin{aligned}
a_1(y, z) = & \frac{n_3 \kappa_c C_b \chi (V_\kappa \pm V_u) \Gamma(\chi) \Gamma(m+1) (1-P_0) L}{\Gamma(m+\chi+1) H_u^\chi V_u} (B^2 - \frac{2BL^2}{3D_e} - \frac{L^4}{5D_e^2}) - \\
& - \frac{1,66 n_3 \kappa_c C_b \chi (V_\kappa \pm V_u) \Gamma(\chi+\beta) \Gamma(m+1) P_0 B^2}{\Gamma(m+\chi+\beta+1) H_u^\chi V_u t_f^\beta \sqrt{D_\vartheta}} (15D_e^3 B^3 \times
\end{aligned} \quad (22)$$

$$\times (-\ln(D_e B) + 2\ln(L+C)) + CL(66D_e^2 B^2 + 52L^2 D_e B + 16L^4))$$

при $m=0,5$, $\chi=1,5$ та $\beta=0,5$ отримаємо:

$$a_1(y, z) = \frac{n_3 \kappa_c \sqrt{2\rho} (V_\kappa \pm V_u)}{H_u^\chi V_u} \left[\frac{\pi(1-P_0)L}{8} (B^2 - \frac{2BL^2}{3D_e} - \frac{L^4}{5D_e^2}) - \frac{0,83 P_0 B^2}{\sqrt{D_e} t_f^\beta} \times \right.$$

$$\times (15D_{\text{э}}^3 B^3 (-\ln(D_e B) + 2\ln(L + C) + CL(66D_e^2 B^2 + 52L^2 D_e B + 16L^4))) \Bigg], \quad (23)$$

де $B = y - t_f$, $C = \sqrt{L^2 + D_e B}$.

Після підстановки формули (23) у вираз для розрахунку ймовірності отримаємо

$$P_1(\bar{M}) = \exp \left\{ -\frac{n_3 \kappa_c \sqrt{2\rho} (V_{\kappa} \pm V_u)}{H_u^{\chi} V_u} \left[\frac{\pi(1-P_0)L}{8} \left(B^2 - \frac{2BL^2}{3D_e} - \frac{L^4}{5D_e^2} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{0,83P_0 B^2}{\sqrt{D_e} t_f^{\beta}} \times (15D_e^3 B^3 \ln \frac{(L+C)^2}{(D_e B)} + CL(66D_e^2 B^2 + 52L^2 D_e B + 16L^4)) \right] \right\} \quad (24)$$

Перетворення аналогічні висновку залежності для розрахунку $a_1(y, z)$, при $m_x = 1$ приведуть до залежності:

$$a_2(y, z) = \frac{n_3 \kappa_c C_{bx} \chi (V_{\kappa} \pm V_u) \Gamma(\chi) \Gamma(m_x + 1) P_0 L}{\Gamma(m_x + \chi + 1) H_u^{\chi} V_u} \times \left(B_1^2 - \frac{2B_1 L^2}{3D_e} - \frac{L^4}{5D_e^2} \right) - \\ - \frac{n_3 \kappa_c C_{bx} \chi (V_{\kappa} \pm V_u) \Gamma(\chi + \beta) \Gamma(m_x + 1) P_0}{\Gamma(m_x + \chi + \beta + 1) H_u^{\chi} V_u t_f^{\beta}} \left(B_1^3 - \frac{B_1^2 L^3}{D_e} + \frac{3B_1 L^5}{5D_e^2} - \frac{L^7}{7D_e^3} \right) \quad (25)$$

або

$$a_2(y, z) = \frac{n_3 \kappa_c C_{bx} (V_{\kappa} \pm V_u) P_0}{4H_u^{\chi} V_u} \left[\left(B_1^2 L - \frac{2B_1 L^2}{3D_{\text{э}}} - \frac{L^5}{5D_{\text{э}}^2} \right) - \right. \\ \left. - \frac{1}{t_f^{\beta}} \left(B_1^3 - \frac{B_1^2 L^3}{D_{\text{э}}} + \frac{3B_1 L^5}{5D_{\text{э}}^2} - \frac{L^7}{7D_{\text{э}}^3} \right) \right] \quad (26)$$

де $t_f - y - \Delta r_x = -B_1$.

$$P_2(\bar{M}) = \exp \left\{ \frac{n_3 \kappa_c C_{bx} (V_{\kappa} \pm V_u) P_0}{4H_u^{\chi} V_u} \left[\left(B_1^2 L - \frac{2B_1 L^2}{3D_{\text{э}}} - \frac{L^5}{5D_{\text{э}}^2} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{t_f^{\beta}} \left(B_1^3 - \frac{B_1^2 L^3}{D_{\text{э}}} + \frac{3B_1 L^5}{5D_{\text{э}}^2} - \frac{L^7}{7D_{\text{э}}^3} \right) \right] \right\} \quad (27)$$

З огляду на те, що для зовнішньої поверхні деталі ($y = 0$), $P(\bar{M}) = \beta_0$ при множенні $P_{1,2}(\bar{M}) = P_1(\bar{M}) \cdot P_2(\bar{M})$, отримаємо залежності ймовірностей невидалення матеріалу для схем: торцевого шліфування:

$$1 - \beta_0 = \exp \left\{ -a_0 \left[A_1 \left(\frac{\Gamma(\chi)(1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1)} + \frac{\Gamma(\chi+\beta)P_0}{\Gamma(m+\chi+\beta+1)t_f^\beta} (t_f - y - \Delta r)^\beta \right) \right] + \right. \\ \left. + \left[A_2 \left(\frac{\Gamma(\chi)}{\Gamma(m_x+\chi+1)} - \frac{\Gamma(\chi+\beta)}{\Gamma(m_x+\chi+\beta+1)t_f^\beta} (t_f - y - \Delta r_x)^\beta \right) \right] \right\} \quad (28)$$

плоского та круглого зовнішнього шліфування:

$$1 - \beta_0 = \exp \left\{ -a_0 - \frac{n_3 \kappa_c \sqrt{2\rho} (V_k \pm V_u)}{H_u \chi V_u} \left[\left[\frac{\pi(1-P_0)L}{8} (B^2 - \frac{2BL^2}{3D_e} - \frac{L^4}{5D_e^2}) - \right. \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{0,83P_0B^2}{\sqrt{D_\exists} t_f^\beta} \times (15D_\exists^3 B^3 \ln \frac{(L+C)^2}{D_\exists B} + CL(66D_\exists^2 B^2 + 52L^2 D_\exists B + 16L^4)) \right] + \right. \\ \left. + 0,55P_0 \left[(B_1^2 L - \frac{2B_1 L^2}{3D_\exists} - \frac{L^5}{5D_\exists^2}) - \frac{1}{t_f^\beta} (B_1^3 - \frac{B_1^2 L^3}{D_\exists} + \frac{3B_1 L^5}{5D_\exists^2} - \frac{L^7}{7D_\exists^3}) \right] \right\} \quad (29)$$

Далі після логарифмування виразів (28) та (29) отримаємо для схем: торцевого шліфування:

$$\ln \frac{1}{1-\beta_0} - a_0 = \left\{ \left[A_1 \left(\frac{\Gamma(\chi)(1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1)} + \frac{\Gamma(\chi+\beta)P_0}{\Gamma(m+\chi+\beta+1)t_f^\beta} (t_f - y - \Delta r)^\beta \right) \right] + \right. \\ \left. + \left[A_2 \left(\frac{\Gamma(\chi)}{\Gamma(m_x+\chi+1)} - \frac{\Gamma(\chi+\beta)}{\Gamma(m_x+\chi+\beta+1)t_f^\beta} (t_f - y - \Delta r_x)^\beta \right) \right] \right\} \quad (30)$$

плоского та круглого зовнішнього шліфування:

$$\ln \frac{1}{1-\beta_0} - a_0 = \left\{ -\frac{n_3 \kappa_c \sqrt{2\rho} (V_k \pm V_u)}{H_u \chi V_u} \left[\left[\frac{\pi(1-P_0)L}{8} (B^2 - \frac{2BL^2}{3D_\exists} - \frac{L^4}{5D_\exists^2}) - \right. \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{0,83P_0B^2}{\sqrt{D_\exists} t_f^\beta} \times (15D_\exists^3 B^3 \ln \frac{(L+C)^2}{D_\exists B} + CL(66D_\exists^2 B^2 + 52L^2 D_\exists B + 16L^4)) \right] + \right. \\ \left. + 0,55P_0 \left[(B_1^2 L - \frac{2B_1 L^2}{3D_\exists} - \frac{L^5}{5D_\exists^2}) - \frac{1}{t_f^\beta} (B_1^3 - \frac{B_1^2 L^3}{D_\exists} + \frac{3B_1 L^5}{5D_\exists^2} - \frac{L^7}{7D_\exists^3}) \right] \right\} \quad (31)$$

Отримані формули (30) та (31) дозволяють знайти величину знімання матеріалу Δr відповідно для схеми торцевого, плоского та круглого зовнішнього шліфування. Для вирішення розглянутих рівнянь необхідно знати величину збільшення з'єму Δr_x , за рахунок крихкого руйнування в процесі розвитку

мікротріщин у поверхневому шарі. Одним із шляхів визначення Δr_x є імітаційне моделювання процесу тріщиноутворення у програмі Matlab.

Висновки

Створена адекватна модель та розглянута схема процесу шліфування, в якій враховано, що абразивні зерна не мають регулярні геометрії, розташовані на робочій поверхні інструменту на різних рівнях, при роботі зношуються і руйнуються. При аналізі процесу шліфування враховано, що радіус–вектори інструменту і заготовки випадкові, а їх центри обертання зміщуються відносно один одного не тільки внаслідок наявності подач, але і температурних, пружних деформацій.

На основі розглянутої схеми процесу шліфування і основних положень теорії абразивної обробки розроблені залежності для обчислення ймовірності видалення матеріалу в будь-якій точці зони контакту з урахуванням декількох одночасно протікають процесів формоутворення. Вони дозволяють прогнозувати знімання матеріалу, диференційовано оцінювати вплив окремих факторів на параметри якості деталі і швидкість протікання процесу. Відкрита структура моделі дає можливість удосконалювати її в міру уточнення залежностей, що входять до неї.

Список літератури

1. 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.
2. Arun, I., Yuvaraj, C., Jyothibabu, P. Influence of Silica on Microstructural Modification of Electrical Discharge Composite Coating and its Wear Performance // Silicon 12, p. 2375–2386 (2020).
3. Montes, J., Cuevas, F., Reina, F. Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders // Met. Mater. Int. 26, p. 1045–1059 (2020).
4. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов: Изд–во Саратов, ун–та, 1979. – 232 с.
5. Pandit S. M., Sathyanarayanan G. New approach to the analysis of wheel–workpiece interaction in surface grinding. 1981.C. 275–282.

References

1. Strelchuk, RM & Uzunian, MD 2019, Sposib elektroeroziinohoalmaznoho shlifuvannia zi zminnoi poliarnistiu elektrodov, UA Patent 131894.
2. Arun, I., Yuvaraj, C., Jyothibabu, P. Influence of Silica on Microstructural Modification of Electrical Discharge Composite Coating and its Wear Performance // Silicon 12, p. 2375–2386 (2020).
3. Montes, J., Cuevas, F., Reina, F. Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders // Met. Mater. Int. 26, p. 1045–1059 (2020).
4. Novoselov, Yu 1979, Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke, Izd–vo Saratov, un–ta, Saratov.

5. Pandit, S.M., Sathyanarayanan, G., 1981. New approach to the analysis of wheel-workpiece interaction in surface grinding. Presented at the Manufacturing Engineering Transactions, pp. 275–282.

Поступила в редакцію 15.02.2022, рассмотрена на редколлегии 15.02.2022.

Surface shaping analysis for electrical diamond grinding with changing electrode polarity

The paper presents the methodology of the process of surface shaping based on mathematical modeling, the nature of the interaction of the cutting relief of the circle with the material being processed. This made it possible to reveal the regularities of the configuration of the physical and technological characteristics of the process and their relationship with the productivity and wear of the wheels in different criteria for electroerosive diamond grinding. It is shown that the process of electroerosive diamond grinding provides a stable state of the diamond wheel relief, stable conditions for the interaction of its working surface with the material being processed. This made it possible, using a mathematical model, to establish the relationship of factors and optimize the parameters, guarantee the reliability and reproducibility of the results. To create an adequate model, a scheme of the grinding process is considered, which takes into account that diamond grains do not have a regular geometry, located on the working surface of the tool at different levels, wear out and break during operation. On the basis of the considered scheme of the electroerosive grinding process, dependences were developed for calculating the probability of material removal at any point of the contact zone, taking into account several shaping processes occurring simultaneously. They allow predicting the removal of material, differentially assessing the influence of individual factors on the quality parameters of the part and the speed of the process. The open structure of the model makes it possible to improve it as the parameters included in it are refined. A dynamic theoretical-probabilistic model of surface shaping during electroerosive diamond grinding with changing electrode polarity has been developed. This model takes into account erosion processes that affect the material being processed. When constructing, the dimensional wear of the wheel, the processes of chipping and pulling out of single diamond grains from the wheel bond, the size of the wear areas and the actual depth of microcutting are taken into account. For the direct use of the obtained theoretical results, experimental studies are needed to determine the parameters that make up the model.

Keywords: shape of diamond edges; depth of microcutting; material removal.

Анализ формообразования поверхности при электроэрозионном алмазном шлифовании с изменяющейся полярностью электродов

В работе приведена методология процесса формообразования поверхности на основе математического моделирования, характера взаимодействия режущего рельефа круга с обрабатываемым материалом. Это позволило раскрыть закономерности конфигурации физических и технологических характеристик процесса и их взаимосвязь с

производительностью и износом кругов в разных критериях электроэрозионного алмазного шлифования. Показано, что процесс электроэрозионного алмазного шлифования обеспечивает устойчивое состояние рельефа алмазного круга, стабильные условия взаимодействия его рабочей поверхности с обрабатываемым материалом. Это позволило с помощью математической модели установить взаимосвязь факторов и оптимизировать параметры, гарантировать достоверность и воспроизводимость результатов. Для создания адекватной модели рассмотрена схема процесса шлифования, в которой учтено, что алмазные зерна не имеют регулярной геометрии, расположенные на рабочей поверхности инструмента на разных уровнях, при работе изнашиваются и разрушаются. На основе рассмотренной схемы процесса электроэрозионного шлифования разработаны зависимости для вычисления вероятности удаления материала в любой точке зоны контакта с учетом нескольких протекающих одновременно процессов формообразования. Они позволяют прогнозировать съем материала, дифференцированно оценивать влияние отдельных факторов на параметры качества детали и скорость протекания процесса. Открытая структура модели дает возможность совершенствовать ее по мере уточнений входящих в нее параметров. Разработана динамическая теоретико–вероятностная модель формообразования поверхности при электроэрозионном алмазном шлифовании с изменяющейся полярностью электродов. Эта модель учитывает эрозионные процессы, влияющие на обрабатываемый материал. При построении учтены размерный износ круга, процессы скалывания и вырывания единичных алмазных зерен из связки круга, величины площадок износа и действительной глубины микрорезания. Для непосредственного использования полученных теоретических результатов необходимы экспериментальные исследования по определению параметров, входящих в состав модели.

Ключевые слова: форма алмазных кромок; глубина микрорезания; удаления материала.

Відомості про автора:

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

About the author:

Strelchuk Roman, Cand. of Tech. Sc., department of Integrated Technologies of Mechanical Engineering named after M.F. Semko, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: r.m.strelchuk@gmail.com; ORCID: 0000–0002–7221–031X.