

Известно, что при воздействии электрического поля на поверхность заготовки может происходить образование нерастворимых высокоомных пассивирующих пленок, сопровождающееся обильным газовыделением. В ряде электрохимических сред, таких как NaCl, KCl, пассивирующие пленки не образуются. В этом случае воздействие электрического поля приводит к анодному растворению материала. В исследованиях, выполненных ранее [1] показано, что при условиях, когда плотность тока достигает больших значений наступает электрический пробой межэлектродного промежутка (зазора МЭЗ), что вызывает изменение свойств межэлектродной среды. В течении действия импульса процесс анодного растворения прекращается и удаление материала осуществляется за счет эрозионного воздействия. В случае, когда при обработке применяются электролиты, образующие на поверхности заготовки пассивирующие пленки, анодное растворение при одновременном абразивном воздействии будет протекать на элементарных площадках заготовки, активизированных абразивными зернами, то есть в местах где пассивирующая пленка будет удалена абразивным воздействием.

Обильное газовыделение при образовании пассивирующих пленок и появление различных включений в МЭЗ приводит к тому, что образуются зоны свободные от электролита. В этом случае, когда напряженность электрического поля достигает некоторой критической величины, возникает электрический разряд, проходящий через межэлектродный промежуток и удаляющий материал на площади пропорциональной диаметру канала разряда. Съем материала за счет анодного растворения в пассивирующих средах на элементарной площадке за время t вычисляется по зависимости [2]:

$$\Delta Q_{\text{ЭХ}} = \frac{E_{\text{Э}} U Z_{\text{Э}} \eta}{\delta \gamma} \Delta t \exp[-\alpha(t - \tau)], \quad (2)$$

где: U – напряжение межэлектродного зазора; t – данный момент времени; $Z_{\text{Э}}$ – электропроводность электролита; τ – время активации поверхности заготовки; α – коэффициент пассивации; δ – межэлектродный зазор; γ – плотность материала заготовки, кг/м³; $E_{\text{Э}}$ – электрохимический эквивалент материала, кг/А.мин; η – выход по току; Δt – приращение времени обработки.

В исследованиях, проведенных Васильевым А.А., получено выражение для определения электропроводности электролита с учетом газовыделения:

$$Z_{\text{Э}} = Z_0 \exp\left(-\frac{\Theta_{\text{Г}} + \Theta_{\text{П}}}{\Theta_{\text{ЭЛ}}}\right), \quad (3)$$

где Z_0 – удельная электропроводность электролита без учета газовыделения; $\Theta_{\text{Г}}$, $\Theta_{\text{П}}$ – объем газа и пара соответственно, выделившихся в МЭП в единицу времени; $\Theta_{\text{ЭЛ}}$ – расход электролита в единицу времени.

Для расчета объема газа, выделившегося в МЭП предложена зависимость:

$$\Theta_{\text{Г}} = \eta \epsilon_{\text{Н}} \frac{U}{r}, \quad (4)$$

где $\epsilon_{\text{Н}}$ – объемный электрохимический эквивалент водорода $\epsilon_{\text{Н}} = 0.000007$ м³/А мин; r – сопротивление зазора.

Для условий шлифования алмазно-абразивным инструментом зависимость может быть представлена в виде:

$$\Theta_{\text{Г}} = \frac{\epsilon_{\text{Н}} U Z_0 \delta b \eta}{\Delta Z}. \quad (5)$$

Наряду с газовыделением в МЭЗ происходит образование водяного пара вследствие испарения электролита, объем которого может быть рассчитан по формуле, предложенной Липидесом Л.М.:

$$\Theta_{\text{П}} = \frac{0.24 U^2}{c_{\text{T}} \rho_{\text{П}} r}, \quad (6)$$

где c_{T} – скрытая теплота парообразования; $\rho_{\text{П}}$ – плотность водяных паров.

При обработке алмазно-абразивным инструментом зависимость для $\Theta_{\text{П}}$ примет вид:

$$\Theta_{\text{П}} = \frac{0.24 U^2 Z_0 \delta b}{c_{\text{T}} \rho_{\text{П}} \Delta Z}. \quad (7)$$

Расход электролита $\Theta_{\text{ЭЛ}}$ может быть вычислен по традиционной зависимости:

$$\Theta_{\text{ЭЛ}} = V_{\text{К}} \delta b. \quad (8)$$

На основании вышеизложенного запишем выражение для расчета электропроводности электролита:

$$Z_{\epsilon} = Z_O \exp \left[-\frac{UZ_O}{\Delta Z V_K} \left(\epsilon_H - \frac{0.24U}{c_T \rho_n} \right) \right]. \quad (9)$$

С учетом полученной зависимости для расчета Z_{ϵ} , выражение для вычисления съема материала, вызванного анодным растворением примет вид:

$$\Delta Q_{\Delta X} = \frac{\epsilon_{\Delta} U Z_O \Delta t}{\delta \gamma} \exp[-x - \alpha(t - \tau)], \quad (10)$$

где: $x = \frac{UZ_O}{\Delta Z V_K} \left(\epsilon_H + \frac{0.24U}{c_T \rho_n} \right)$; γ – плотность материала заготовки.

С учетом вышеизложенного выражение (2) примет вид:

$$\Delta Q_{\Delta X} = \frac{\epsilon_{\Delta} U Z_O \Delta t}{\delta \gamma} \exp(-x). \quad (11)$$

Для расчета съема материала, обусловленного электрохимическим процессом необходимо определить величину δ .

Согласно рисунку 1 величина δ складывается из δ_K – расстояния от касательной в точке $Z = 0$, проходящей через уровень связки до уровня связки, y_{β} – расстояние от наружной поверхности заготовки до некоторого уровня на котором рассчитывается вероятность удаления материала и разности между расстоянием от вершины наиболее выступающего зерна до уровня связки δ_{CB} и фактической глубиной резания t_{ϕ} :

$$\delta = \delta_K + y_{\beta} + \delta_{CB} - t_{\phi} \quad (12)$$

где $\delta_K = \frac{Z^2}{2R}$; Z – текущая координата $\{-L, L\}$; R – радиус круга.

Величина y_{β} (рисунок 2) на интервале $-L < z < L$, определяются через вероятность удаления материала при условии:

$$y_{\beta} = \begin{cases} 0, & \text{при } z \leq -L \\ f(a(y; z), & \text{при } -L < z < L \\ \Delta r, & \text{при } z \geq L \end{cases} \quad (13)$$

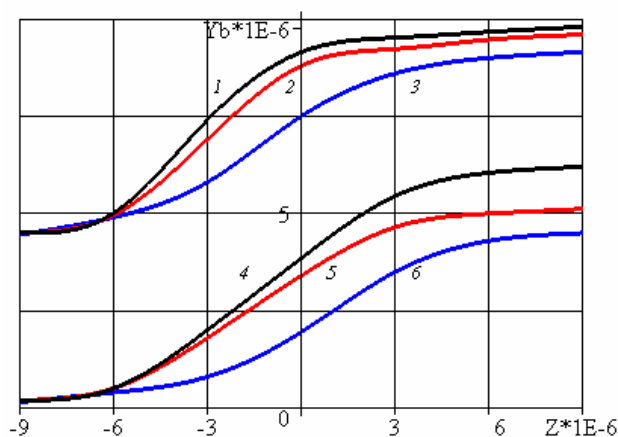


Рисунок 2 – Изменение величины y_{β} вдоль зоны контакта:

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

Выражение (13) позволяет рассчитывать величину МЭЗ для любой точки зоны контакта детали с кругом и проследить закономерность его изменения.

Численное решение уравнения выполнено на ЭВМ (рисунок 3).

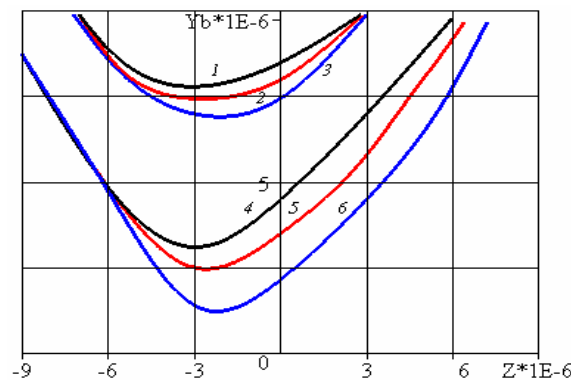


Рисунок 3 – Динамика изменения зазора вдоль зоны контакта:

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

Данные расчета показывают, что при прохождении зоны контакта круга с деталью расстояние от наружной поверхности заготовки до рассматриваемого уровня не постоянно, оно определяется режимами процесса и возрастает с увеличением координаты Z . Суммарный зазор между кругом и деталью также непостоянен и для каждой точки зоны контакта имеет определенное значение. Зазор зависит от режимов шлифования и от положения уровня связки круга (при координате Z) в зоне резания.

Для наиболее удаленного от центра круга элемента связки при его движении к основной плоскости, что соответствует увеличению Z , наблюдается уменьшение зазора, при $Z = (-0.4L) + (-0.2L)$ величина зазора принимает минимальное значение, после чего (по мере приближения к L) увеличивается и при $Z > L$ асимптотически приближается к бесконечности

Величину y_β в выражении (13) в интервале $-L < z < L$ можно определить через вероятность удаления материала.

$$P(M) = 1 - e^{-(a_0 - a(y))} = \beta_M, \quad (14)$$

где $a_0 = \ln \frac{y_\beta}{H}$ – показатель, характеризующий исходную шероховатость детали; $a(y)$ – показатель, определяющий изменение вероятности удаления материала; H – слой, в котором распределена шероховатость заготовки.

Показатель $a(y)$ для каждого прохода определяется выражением:

$$a(y) = K_C \bar{b}_3 \lambda, \quad (15)$$

где K_C – коэффициент стружкообразования; $\bar{b}_3$ – средняя ширина зерна на уровне y_β ; λ – число зерен, прошедших через уровень единичного сечения.

Ширина профиля зерна, соответствующая данному уровню, при моделировании профиля параболой вычисляется:

$$\bar{b}_3 = C_B \left(t_a - \frac{z^2}{D_K} - y_\beta - u \right)^m, \quad (16)$$

где C_B , m – коэффициент формы зерна; t_a – фактическая глубина микрорезания; u – расстояние от условной наружной поверхности инструмента до вершины зерна; D_K – диаметр шлифовального круга.

Через объем $\Delta U \Delta Z$ детали проходит $\Delta \lambda$ зерен инструмента:

$$\Delta \lambda = n_3 f(u) \frac{V_K + V_U}{V_U} \Delta Z \Delta U, \quad (17)$$

где n_3 – количество зерен в единице объема рабочего слоя инструмента.

Число зерен на рабочей поверхности изменяется с течением времени, что оказывает существенное влияние на выходные показатели процесса шлифования. Для расчета количества зерен содержащихся в единице объема рабочего слоя инструмента в любой заданный момент времени инструмента рассмотрим скорость износа вершины выступающего зерна $\frac{dh_{zu}}{d\tau}$, которая характеризуется зависимостью:

$$\frac{dh_{zu}}{d\tau} = Rv_k h_{отн} \cdot \int_0^{2\pi} P(\bar{M}) d\varphi, \quad (18)$$

где $h_{отн}$ – величина относительного износа зерна, $P(\bar{M})$ – вероятность неудаления материала, R – радиус круга, v_k – частота вращения круга.

В свою очередь скорость уменьшения S_n общего числа режущих кромок n_{zt} пропорциональна вероятности разрушения каждой из кромок P_p при единичном контакте обрабатываемой поверхности с абразивным кругом и числу таких контактов за единицу времени:

$$S_n = P_p \cdot n_{zt} \cdot v_k, \quad (19)$$

В то же время в процессе износа инструмента в работу с некоторой вероятностью могут вступать новые режущие кромок. Эта вероятность $P(\xi \leq u)$ определяется пределом отношения числа режущих кромок $n_3(u)$, находящихся в слое между уровнем u и наружной поверхностью инструмента, к общему числу зерен $n_3(H)$ участка поверхности S :

$$P(\xi \leq u) = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{n_3(u)}{n_3(H)}, \quad (20)$$

где H – рабочий слой инструмента, в пределах которого производится подсчет числа зерен; ξ – расстояние наружной поверхности инструмента до уровня u .

В предположении, что в работу вступают все абразивные зерна, лежащие в слое толщиной ΔR , равному износу инструмента, число режущих кромок на единицу его поверхности в момент времени t с учетом (19) может быть определено как:

$$n_{3\tau} = n_{30} - \int_0^t S_n d\tau + n_{30} \int_{t_f}^{t_f + \Delta R(t)} f(u) du. \quad (21)$$

В процессе работы круга вследствие износа зерен происходит изменение уровня u как вследствие износа наиболее выступающих $h_3(0)$, так и вследствие износа остальных зерен рассматриваемого слоя с рабочими кромками $h_3(u')$.

Для анализа влияния износа, на функцию распределения режущих кромок, выделим на поверхности круга после правки и после износа за время τ слой с одинаковым числом вершин режущих кромок. Для этого достаточно переместить условную наружную поверхность на величину износа наиболее выступающих зерен $h_3(0)$, а уровень u на величину износа кромок этого уровня $h_3(u')$.

Координату уровня от новой условной поверхности инструмента при этом обозначим u'

$$u' = u + h_3(u') - h_3(0). \quad (22)$$

Если разрушение зерен отсутствует, то функция плотности распределения не претерпевает изменения, т.е.

$$F_{\xi'}(u') = F_{\xi}(u). \quad (23)$$

Совместное использование (22) и (23) позволяет записать интегральную функцию плотности вероятности распределения режущих кромок в виде

$$F_{\xi'}(u') = F_{\xi}(u' + h_3(0) - h_3(u')). \quad (24)$$

Дифференциальную функцию плотности вероятности распределения зерен по глубине абразивного круга можно получить непосредственным дифференцированием зависимости (23) и после применения (24) к правой части полученного соотношения получить

$$f_{\xi'}(u') = f_{\xi}(u) \left[1 - \frac{d(h_3(u'))}{d(u')} \right]. \quad (25)$$

Если величина износа режущих кромок пропорциональна расстоянию $H - u'$, т.е. $h_3(u') = C_h(H - u')\tau$, а плотность распределения после правки моделируется степенной зависимостью вида:

$$f_{\xi}(u) = C_f [u' + C_h(H - u')\tau - h_3(0)]^{k-1} (1 + C_h\tau). \quad (26)$$

где C_h – коэффициент формы при аппроксимации ширины профиля изношенного зерна.

В соответствие (20) вероятность увеличения числа зерен в рабочем слое инструмента определится интегрированием по u' (26) в пределах от t_f до $t_f + \Delta R(\tau)$:

$$P(t_f) = \frac{C_f(1+C_h\tau)((t_f - C_h\tau(t_f - h_3(0) + H))^{\chi} - (t_f - C_h\tau(t_f + H) - h_3(0))^{\chi})}{(1-C_h\tau)\chi} =$$

$$= \frac{C_f(1+C_h\tau)((t_f + C_h\tau(\Delta r + h_3(0)))^{\chi} - (t_f - \Delta r C_h\tau - h_3(0))^{\chi})}{(1-C_h\tau)\chi}. \quad (27)$$

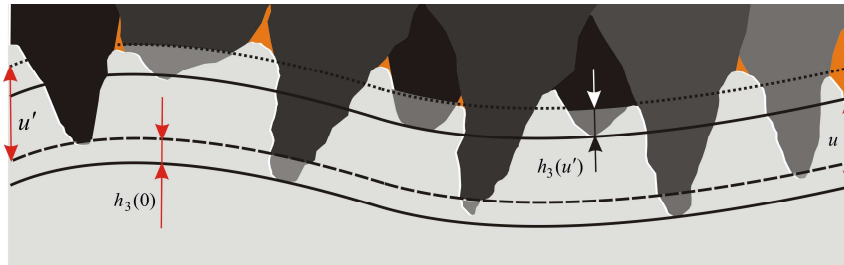


Рисунок 4 – Схема изменения состояния зерен круга в результате износа режущих кромок

Помножив $P(t_f)$ на n_{30} , получим выражение для расчета количества режущих кромок в рабочем слое инструмента:

$$n_{Sp} = \frac{n_{30}C_f(1+C_h\tau)((t_f - C_h\tau(t_f - h_3(0) + H))^{\chi} - (t_f - C_h\tau(t_f + H) - h_3(0))^{\chi})}{(1-C_h\tau)\chi} =$$

$$= \frac{n_{30}C_f(1+C_h\tau)((t_f + C_h\tau(\Delta r + h_3(0)))^{\chi} - (t_f - \Delta r C_h\tau - h_3(0))^{\chi})}{(1-C_h\tau)\chi}. \quad (28)$$

Скорость прироста числа зерен может быть определена непосредственным дифференцированием по времени соотношения (28):

$$S_p = (A_1^{\chi} - A_2^{\chi}) \left(A_3 \left(1 + \frac{(1+C_h\tau)}{(1-C_h\tau)} \right) + A_3(1+C_h\tau)(\chi A_1^{\chi-1}((A_2^{\chi-1}-1)\Delta r - h_3(0))) \right), \quad (29)$$

Где $A_1 = t_f + C_h\tau(h_3(0) - \Delta r)$; $A_2 = t_f - h_3(0) - \Delta r C_h\tau$; $A_3 = \frac{n_{30}(0)C_f C_h}{\chi(1-C_h\tau)}$; $\Delta r = t_f - H$

Общая скорость изменения числа зерен характеризуется системой дифференциальных уравнений вида.

$$\begin{cases} \frac{dn_z(\tau)}{d\tau} = S_p - S_n; \\ \frac{dh_{zu}}{d\tau} = Rv_k h_{omn} \cdot \int_0^{2\pi} P(\bar{M}) d\varphi \end{cases} \quad (30)$$

с начальными условиями $n_z(0) = n_{z0}$, $h_{zu} = 0$ при $\tau = 0$.

Вышеприведенные соотношения должны учитываться при построении циклов управления операциями в соответствии с методиками оценок динамических параметров технологических систем при обработке деталей шлифованием.

Обработкой экспериментальных данных были установлены зависимости коэффициента стружкообразования и коэффициента неровностей от глубины микрорезания

$$K_c = 0,66t_{\phi}^{0,38}; K_R = 1,25t_{\phi}^{0,27}; r_{Kct} = 0,44; r_{KRt} = 0,57.$$

Таким образом, пластические деформации при микрорезании приводят к снижению доли удаляемой части металла. С целью повышения точности при вычислениях вероятности удаления материала необходимо учитывать только ту часть сечения абразивного зерна, в пределах которой металл удаляется в виде стружки, для этого в первом приближении достаточно умножить размеры профилей вершины абразивных зерен на коэффициент стружкообразования K_c .

Граничная область материал – среда может быть задана уровнями равной вероятности удаления материала:

$$P(M) = \beta_M = const. \quad (31)$$

После преобразований после логарифмирования получим:

$$\ln(1-\beta_M) = \ln \frac{y_\beta}{H} - \frac{1.98\pi t_\phi^{0.38} \sqrt{2\rho_3 n_3 (V_K \pm V_U)(t_a - y_\beta)^2}}{8V_U H_U^{3/2}} \times \left[Z - \frac{2Z^3}{3Ly^2} + \frac{Z^5}{5Ly^4} + \frac{8}{15} Ly \right]. \quad (32)$$

Приведенные выше выражения позволяют рассчитывать величину МЭЗ для любой точки зоны контакта детали с кругом и проследить закономерность его изменения.

После суммирования по Z получим выражение для расчета электрохимической составляющей съема

$$Q_{ЭХ} = \sum_{Z=-Ly}^{Ly} \Delta Q_{ЭХ}. \quad (33)$$

При увеличении технологического напряжения создается условие для возникновения дуговых электрических разрядов $\delta < \delta_{кр}$. Для расчета съема материала при таких условиях необходимо иметь зависимость, описывающую электроэрозионную составляющую съема. Для ее ввода рассмотрим закономерности протекания единичного дугового разряда в МЭЗ.

Объем лунки, образованный эрозионным разрядом может быть определен по зависимости, предложенной Б.А. Артамоновым

$$V_{ЛЗ} = \frac{\beta_3(A_U - A_3)}{(\Delta H_p - \Delta H_0)\gamma}, \quad (34)$$

где β_3 – доля энергии разряда, переданная заготовке, в первом приближении $\beta_3 = 0.4$; ΔH_p , ΔH_0 – удельные энтальпии расплава и предварительно нагретой заготовки; A_3 – количество теплоты, отводимое вглубь заготовки за счет теплопроводности; A_U – энергия разряда.

Энергия единичного разряда при электроэрозионной обработке может быть рассчитана по зависимости:

$$A_U = U \int_0^{\tau_U} i dt. \quad (35)$$

Полагая, в первом приближении, что столб канала разряда имеет равномерную электропроводность, ток в канале разряда i можно вычислить по зависимости:

$$i = \pi r_k^2 Z_n E, \quad (36)$$

где r_k – радиус канала разряда; Z_n – электропроводность плазмы; E – напряженность электрического поля.

В свою очередь электропроводность плазмы может быть рассчитана по следующей зависимости:

$$Z_n = \frac{n_e l^2 v_e}{m_e V_{эср}}, \quad (37)$$

где n_e – концентрация электронов; l – заряд электрона; m_e – масса электрона; v_e – число столкновений электрона в канале разряда в единицу времени; $V_{эср}$ – средняя скорость электрона.

Для условий ЭШ выражение (35) может быть переписано в следующем виде:

$$A_U = \frac{U^2 F Z_n \tau_U}{\delta}, \quad (38)$$

где U – технологическое напряжение; $F = \pi r_k^2$ – площадь сечения канала разряда; δ – зазор между связкой круга и деталью; τ_U – время существования разряда.

Радиус канала разряда можно определить как (4):

$$r_k = 0.15 t^{3/4} \left(\beta_C U_i / \delta \right)^{1/4}, \quad (39)$$

где $t = t_{\phi K}$ – время, когда за фронтом ударной волны заканчивается образование канала разряда,

определяется как: $t_{\phi K} = 140 \beta_C \frac{U_i}{\delta} \times \left[\frac{K_U C_V}{\Delta W_{ион} K_T} \right]^2$ обычно $t_{\phi K} = 10^{-7} \div 10^{-6}$; U_i – энергия, поступающая

от генератора импульсов; $\beta_C \approx 1$ – доля мощности генератора импульсов, затраченная на сжатие жидкости при образовании канала разряда; K_T – коэффициент термического расширения; $\Delta W_{ион}$ – энергия ионизации атомов; C_V – удельная теплоемкость рабочей среды; K_U – коэффициент сжимаемости.

Плазменный канал разряда может быть создан не только пробоем МЭП. Благодаря вращению и подаче электрода-инструмента (ЭИ) в процессе ЭШ возможны контакты стружки со связкой шлифовального круга. Когда затем, при приложенном напряжении, участок связки удаляется от заготовки, между ними возникает электрический разряд. Разряд прекращается, когда электродные пятна на указанных участках благодаря вращению ЭИ удаляются друг от друга на сравнительно большие расстояния.

Таким образом, для формирования импульсов тока через МЭП в данном случае использована кинематическая особенность процесса. Поэтому для ЭШ отпадает необходимость в специальных генераторах импульса, а обработку можно вести при питании как от постоянных, так и от переменных источников тока. В случае источника постоянного тока время существования импульса может быть рассчитано как:

$$\tau_U = \frac{\Delta Z}{V_K \pm V_U}. \quad (40)$$

Электрическая энергия источника питания расходуется на плавление и удаление материала заготовки (примерно 40%), а также на нагревание обоих электродов, рабочей жидкости и др.

Энергия, отводимая теплоотводом вглубь заготовки рассчитывается:

$$A_3 = \int_0^{\tau_U} F q_{OTB} d\tau, \quad (41)$$

где F – площадь следа канала разряда; q_{OTB} – удельный тепловой поток в глубину электрода;

$$q_{OTB} = \sqrt{[\lambda_T C_T \gamma / \pi t]} \Theta_{ИСП}, \quad (42)$$

где C_T – удельная теплоемкость электрода; t – время воздействия импульса; $\Theta_{ИСП}$ – температура кипения материала электрода; γ – плотность вещества электрода; λ_T – коэффициент теплопроводности материала электрода.

После подстановки (42) в (41) и последующего интегрирования получим:

$$A_3 = r^2 \Theta_{ИСП} \sqrt{2 \lambda_T C_T \gamma \pi \tau_U}. \quad (43)$$

Для расчета объема лунки, образованной эрозионным разрядом необходимо иметь значения энтальпий расплава и предварительно нагретой заготовки, которые рассчитываются по известным зависимостям:

$$\begin{aligned} \Delta H_P &= C_T (\Theta_{ПЛ} - \Theta_0') + L_{ПЛ}, \\ \Delta H_0 &= C_T (\Theta_0' - \Theta_0), \end{aligned} \quad (43)$$

где $\Theta_{ПЛ}$, Θ_0' , Θ_0 , $L_{ПЛ}$ – температуры плавления нагретой заготовки, начальная температура заготовки и теплота плавления соответственно.

После подстановки выражений (39), (40), (42), (43) в (34) получим:

$$V_{ЛЗ} = \frac{\beta_3}{C_T (\Theta_{ПЛ} - \Theta_0') + L_{ПЛ} - C_T (\Theta_0' - \Theta_0) \gamma} \left(\frac{U^2 F Z_n \Delta Z}{\delta (V_K \pm V_U)} - r^2 \Theta_{ИСП} \sqrt{2 \lambda_T C_T \gamma \pi \frac{\Delta Z}{V_K \pm V_U}} \right). \quad (44)$$

Объем материала, удаленного с элементарного объема за счет электроэрозионной составляющей съема материала в процессе ЭШ может быть рассчитан по следующей зависимости:

$$\Delta Q_{ЭР}^V = V_{ЛЗ} f \Psi_M, \quad (45)$$

где Ψ_M – коэффициент, учитывающий количество импульсов не вызывающих эрозию; $f = \frac{V_K}{2\pi R}$ – частота следования импульсов.

Подставив (44) в (45) получим зависимость, описывающую электроэрозионную составляющую съема:

$$\Delta Q_{ЭР}^V = \frac{\Psi_M \beta_3}{[C_T (\Theta_{ПЛ} - \Theta_0') + L_{ПЛ} - C_T (\Theta_0' - \Theta_0) \gamma]} \times \left(\frac{U^2 F Z_n \Delta Z}{\delta (V_K \pm V_U)} - r_K^2 Q_{ИСП} \sqrt{2 \lambda_T C_T \rho_{ЭЛ} \pi \frac{\Delta Z}{V_K + V_U}} \right). \quad (46)$$

Разделив $\Delta Q_{ЭР}^V$ на площадь зоны воздействия электроэрозионного разряда, получим выражение для расчета линейного съема с элементарной площадки:

$$\Delta Q_{ЭР} = \frac{\Psi \beta_3}{[C_T (\Theta_{ПЛ} - \Theta_0') + L_{ПЛ} - C_T (\Theta_0' - \Theta_0) \gamma]} \times \left(\frac{U^2 F Z_n \Delta Z}{\delta (V_K \pm V_U)} - r_K^2 Q_{ИСП} \sqrt{2 \lambda_T C_T \rho_{ЭЛ} \pi \frac{\Delta Z}{V_K + V_U}} \right). \quad (47)$$

После суммирования по Z получим выражение для расчета эрозионной составляющей съема:

$$Q_{\Sigma m} = \sum_{Z=-L_y}^{L_y} \Delta Q_{\Sigma m}, \quad (48)$$

$$Q_{\Sigma p} = \sum_{Z=-L_y}^{L_y} \Delta Q_{\Sigma p} = \frac{\psi f \beta_3}{[C_T(\Theta_{\Pi\Pi} - \Theta_0) + L_{\Pi\Pi} - C_T(\Theta_0 - \Theta_0)]F\gamma} \times$$

$$\times \left(\frac{U^2 F Z_n \Delta Z}{8(V_K \pm V_U)} - r_K^2 Q_{\text{ИСП}} \sqrt{2\lambda_T C_T \rho_{\Sigma L} \pi \frac{\Delta Z}{V_K + V_U}} \right).$$

Вычисление съема материала за счет механического резания возможно на основании определения смещения уровня равной вероятности удаления металла до и после контакта участка поверхности заготовки с кругом.

Для случая обычного шлифования периферией круга эта зависимость имеет вид:

$$Q_{MIX} = \frac{K_C(V_K \pm V_U)n_3\sqrt{D\rho_3 t_a^2}}{1.478t_{\text{тм}} K_C(V_K \pm V_U)n_3\sqrt{D\rho_3} - 13.66V_U}. \quad (49)$$

После подстановки (48), (49), (10) в (1) получим выражение для расчета съема материала от механического, электрохимического и электроэрозионного воздействия.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о возможности повышения производительности финишной обработки материалов ЭШ в сравнении с традиционными методами обработки поверхностей, на которые наплавляются слои материала из твердых сплавов.

Рассмотренная математическая модель процесса комбинированного шлифования отражает и ряд наиболее важных физических процессов, возникающих в зоне контакта шлифовального круга и заготовки, в том числе процессов износа и разрушения единичных режущих кромок и инструмента в целом. Вместе с тем модель позволяет оценивать только некоторыми качественными параметрами. Для этого необходимо дополнить модель соответствующими зависимостями, что представляет собой дальнейшие перспективы исследований в данной области

Бібліографічний список використаної літератури

1. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч. 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке / А.В. Королев, Ю.К. Новосёлов. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. — 160 с.
2. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч. 1. Состояние рабочей поверхности инструмента / А.В. Королев, Ю.К. Новосёлов. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1987. — 160 с.
3. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новосёлов. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. — 232 с.

Поступила в редакцию 29.04.2011 г.

Братан С.М., Сидоров Д.Є., Ревенко Д.В. Моделювання знімання матеріалу при шліфуванні поверхонь з введенням в зону обробки додаткової електричної енергії

Розглядається математична модель процесу комбінованого шліфування, відбиває ряд най-більш важливих фізичних процесів, що виникають в зоні контакту шліфувального круга і заготовки, у тому числі процесів зносу і руйнування одиничних ріжучих крайок та інструменту в цілому.

Ключові слова: моделювання, обробка, шліфування, знос, абразивний інструмент.

Bratan S.M., Sidorov D.E., Revenko D.V. Modeling material removal during surface grinding with introduction of additional electric energy into the processing zone

The mathematical model of combined grinding reflecting a number of most important physical processes that emerge in the contact zone of the grinding wheel and a work piece, including the processes of wear and fracture of single cutting edges and tools as a whole, is considered.

Keywords: modeling, processing, grinding, abrasion, abrasive tools.