

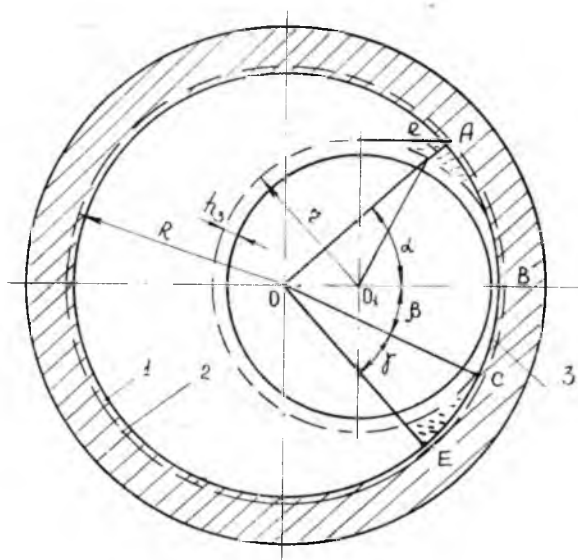
АБРАЗИВНО-АЛМАЗНАЯ ОБРАБОТКА

УДК 621.922.3:541.138

Ю.А.Копытин, В.Н.Трусов, Ф.П.Урьевский

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СЪЕМА МЕТАЛЛА ПРИ ВНУТРЕННЕМ ЭЛЕКТРОАБРАЗИВНОМ ШЛИФОВАНИИ

При круглом внутреннем электроабразивном шлифовании (ЭАШ) съем металла осуществляется за счет электрохимического растворения, электрэрозионного съема и механического резания абразивными зернами. Схематизируя этот процесс (рис.1) и приняв допущения, указанные в работах [1], [2], можно записать выражение для скорости электрохимического растворения в любой точке анодной поверхности:



Р и с. 1. Схема для расчета величины электрохимического съема припуска при внутреннем ЭАШ сплошным электропроводным кругом: 1 - обрабатываемая поверхность; 2 - поверхность, аппроксимируемая радиусом R ; 3 - поверхность, аппроксимируемая радиусом z

$$\frac{dR}{d\tau} = \eta C_{\nu} \frac{dI}{dS}, \quad (1)$$

где $\frac{dR}{d\tau}$ - скорость электрохимического растворения металла анода; η - выход по току; C_{ν} - объемный электрохимический эквивалент материала анода; $\frac{dI}{dS}$ - плотность тока в рассматриваемой точке.

При внутреннем круглом ЭАШ кругами со сплошной токопроводной периферией зону обработки можно разделить на три участка (см. рис. I). На участках АВ и СЕ происходит электрохимический сьем металла, а на участке ВС возможно сочетание электрохимического съема и механического резания. Увеличение радиуса внутренней поверхности обрабатываемого изделия за счет электрохимического растворения будет состоять из сумм стравленных слоев на участках АВ, ВС и СЕ:

$$\Delta R = \Delta R_{AB} + \Delta R_{BC} + \Delta R_{CE},$$

где ΔR - общая толщина стравленного слоя за один оборот изделия; ΔR_{AB} , ΔR_{BC} , ΔR_{CE} - толщина стравленного слоя на участках АВ, ВС и СЕ соответственно.

В целях упрощения участки АВ и СЕ аппроксимируем дугами окружности радиуса R , а участок ВС - дугой радиуса z .

Выражение (1) для участка АВ с учетом сделанных допущений можно записать в виде

$$\frac{dR_{AB}}{d\tau} = \eta C_{\nu} \frac{d(UG_{AB})}{d(BR\varphi)} = \eta \frac{C_{\nu}U}{BR} \frac{dG_{AB}}{d\varphi}, \quad (2)$$

где U - напряжение на электродах с учетом его падения в прианодной и прикатодной областях; G_{AB} - проводимость электролита на участке АВ; B - высота круга; φ - угол, соответствующий рассматриваемому сечению межэлектродного зазора.

Для элементарного слоя электролита на участке АВ проводимость будет выражаться зависимостью

$$dG_{AB} = \frac{BR}{\rho(\ell + h_3)} d\varphi, \quad (3)$$

где ρ - удельная электропроводность электролита; h_3 - высота выступания зерна из связи;

$$\ell = R - (R - z) \cos \varphi - \sqrt{(R - z)^2 \cos^2 \varphi + (2z - R)^2} \quad (4)$$

определяется из рис. I.

Тогда

$$\frac{dG_{AB}}{dy} = \frac{BR}{\rho(l+h_3)} \quad (5)$$

Так как

$$\tau = \frac{y}{\omega g}, \quad \text{то } d\tau = \frac{1}{\omega g} dy, \quad (6)$$

где ωg - угловая скорость вращения изделия.

С учетом формул (4), (5), (6) выражение (2) можно записать в виде

$$\frac{dR_{AB}}{dy} = \eta \frac{C_V U}{\omega g \rho R} \frac{1}{R(R-z)\cos\varphi - \sqrt{(R-z)^2\cos^2\varphi + (2z-R)^2} + h_3}$$

Разделяя переменные в последнем выражении и интегрируя его, можно получить величину радиального съема материала изделия за счет электрохимического растворения на участке АВ:

$$\int_{R_0}^{R_{\alpha}} dR_{AB} = \eta \frac{C_V U}{\omega g \rho R} \int_0^{\alpha} \frac{dy}{R - (R-z)\cos\varphi - \sqrt{(R-z)^2\cos^2\varphi + (2z-R)^2} + h_3}$$

Обозначив

$$m = \frac{h_3}{R} \quad \text{и} \quad k = \frac{z}{R}$$

и учитывая, что

$$\int_{R_0}^{R_{\alpha}} dR_{AB} = \Delta R_{AB},$$

выражение для определения величины электрохимического съема на участке АВ будет иметь вид

$$\Delta R_{AB} = \eta C_V \frac{U}{\omega g \rho R} \int_0^{\alpha} \frac{dy}{(1+m) - (1-k)\cos\varphi - \sqrt{(1-k)^2\cos^2\varphi + (2k-1)^2}} \quad (7)$$

Непосредственно взять интеграл в правой части выражения (7) не представляется возможным, поэтому его вычисление было проведено численным методом на ЭВМ. На рис.2 представлены графики зависимости изменения величины интеграла из выражения (7) от величины угла α для $m = 0,0005$ и $0,002$ при изменении k от $0,6$ до $0,8$.

Анализируя полученные зависимости, можно видеть, что основное изменение величины интеграла происходит при изменении угла α от 0 до $20 \dots 25^\circ$ независимо от соотношения величин диаметров шлифовального круга и изделия и зернистости шлифовального круга. Отсюда следует, что и основной электрохимический съем на участке АВ происходит в зоне электролитической ванночки, ограниченной центральными углами изделия от 0 до $20 \dots 25^\circ$. Дальнейшее увеличение размеров

электролитической ванночки не приводит к существенному увеличению электрохимического съема на данном участке.

Величина электрохимического съема металла на участке ВС определяется исходя из того, что межэлектродный зазор на этом участке постоянен и зависит только от высоты выступления зерен из связки:

$$\Delta R_{BC} = \eta C_{\nu} \frac{U}{\omega_{\nu} \rho h_3} \beta,$$

где β - угол контакта абразивного круга с изделием.

Определение величины угла контакта шлифовального круга с изделием приводится согласно зависимости (3):

$$\beta = \alpha \gamma \cos \left[1 - \frac{R}{2(R-2)} t \right],$$

где t - глубина резания.

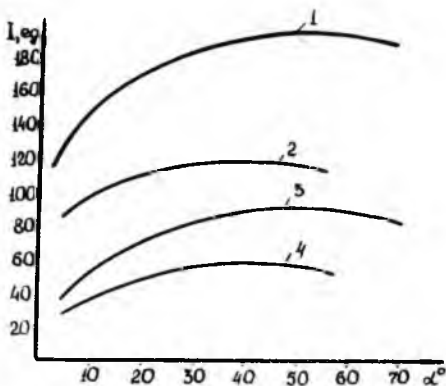
В таком случае

$$\Delta R_{BC} = \eta C_{\nu} \frac{U}{\omega_{\nu} \rho h_3} \alpha \gamma \cos \left[1 - \frac{R}{2(R-2)} t \right].$$

Толщина слоя металла, стравливаемого на участке СЕ, может быть определена из соображений, аналогичных принятым при рассмотрении участка АВ:

$$\Delta R_{CE} = \eta \frac{C_{\nu} U}{\omega_{\nu} \rho R} \int_{2\pi-\gamma}^{2\pi-(\beta+\gamma)} \frac{dy}{(1+m)-(1-k)\cos\varphi - \sqrt{(1-k)^2\cos^2\varphi + (2k-1)^2}}$$

Аналитическое определение центральных углов изделия α и γ , соответствующих максимальным уровням электролитических ванночек на участках АВ и СЕ, представляет собой сложную гидродинамическую задачу, решение которой в настоящее время не представляется возможным. Поэтому определение величин этих углов при различных режимах обработки было проведено экспериментально. Эксперименты показали, что при любых режимах обработки величина электрохимической ванночки больше, чем размер участка, на котором происходит основной съем материала анода с участков АВ и СЕ. Поэтому для инженерных расчетов толщины стравленного слоя с погрешностью 3...5% вполне достаточно



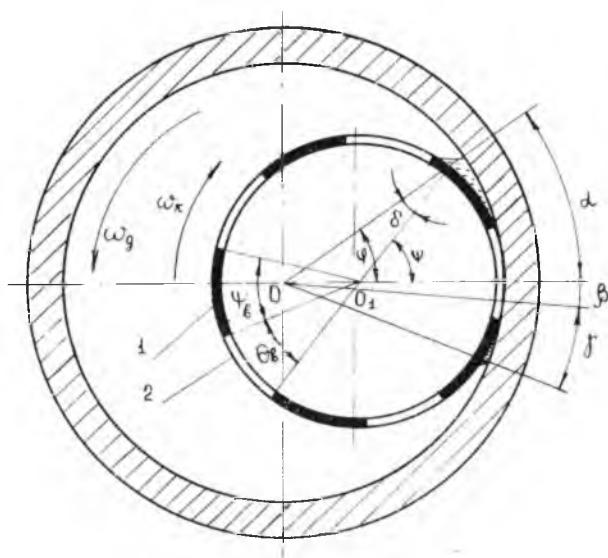
Р и с. 2. Зависимость изменения величины интеграла из выражения (7) от величины угла α : 1 - $K=0,8$; $m = 5 \cdot 10^{-4}$; 2 - $K = 0,6$; $m = 5 \cdot 10^{-4}$; 3 - $K = 0,8$; $m = 2 \cdot 10^{-3}$; 4 - $K = 0,6$; $m = 2 \cdot 10^{-3}$

принимать значение углов α и γ равными 30° .

Применение специальных композиционных кругов секторной конструкции [4] для электроабразивного шлифования позволяет производить правку инструмента обычным правящим инструментом, что может способствовать широкому применению процесса ЭАШ в производстве.

Однако в этом случае электрохимическое растворение анодной поверхности носит более сложный характер, чем при обработке сплошными электропроводными кругами.

Стравливание поверхностного слоя осуществляется прерывисто из-за ограниченных размеров электрохимической ванночки и дискретности токопроводящей части круга (рис.3).



Р и с. 3. Схема для расчета величины электрохимического съема припуска при внутреннем ЭАШ прерывистым шлифовальным кругом: 1 - токопроводный сектор; 2 - абразивный сектор

На основании вышесказанного скорость растворения анодной поверхности можно записать в виде

$$\frac{dR}{dt} = \zeta \frac{C_{\text{в}} U}{\rho} \frac{1}{l_{\text{г}}(\tau) + h_3} \times$$

$$\times \Phi_{\text{г}}(\tau) \Phi_{\text{к}}(\tau),$$

где $\Phi_{\text{г}}(\tau)$ - релейная функция, учитывающая прерывистость процесса за счет ограниченных размеров ванночки; $\Phi_{\text{к}}(\tau)$ - релейная функция, учитывающая прерывистость процесса из-за секторной конструкции шлифовального круга.

Ограничивая время процесса одним оборотом изделия, можно записать:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_{\text{г}}}$$

Тогда угол поворота элементарного участка обрабатываемой поверхности можно определить как $\gamma = \tau \omega_{\text{г}}$,

где $\tau \in [0; T]$.

Зависимость текущего значения длины элементарного слоя электролита $l_3(\varphi)$ от центрального угла изделия можно записать в виде

$$l_3(\varphi) = \begin{cases} R - (R - z) \cos \varphi - \sqrt{(R - z)^2 \cos^2 \varphi - (2z - R)}, & \text{если } \varphi \in [0; 2\pi - \beta] \\ 0 & \text{если } \varphi \in [2\pi - \beta; 2\pi] \end{cases}$$

Общий сьем материала изделия за счет электрохимического растворения за один оборот изделия можно записать в виде

$$\Delta R = z \frac{c_v U}{\rho} \int_0^{\tau_1} \frac{1}{l_3(\tau) + h_3} \varphi_g(\tau) \varphi_k(\tau) d\tau + z \frac{c_v U}{\rho h_3} \int_{\tau_1}^T \varphi_g(\tau) \varphi_k(\tau) d\tau, \quad (8)$$

где $\tau_1 = \frac{2\pi - \beta}{\omega_g}$, $\beta = a z c c \cos \left[1 - \frac{R}{z(R-z)} t \right]$.

Рассмотрим функцию $\varphi_g(\tau)$. Исходя из ранее сказанного, процесс электрохимического растворения происходит на участках, соответствующих центральным углам изделия α , β и γ . На других участках изделия процесс растворения отсутствует. Следовательно, эту функцию $\varphi_g(\tau)$ можно записать в виде

$$\varphi_g(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{если } \varphi_g \in [0; \alpha] \\ & [2\pi - (\beta + \gamma); 2\pi] \\ 0, & \text{если } \varphi_g \notin [0; \alpha] \\ & [2\pi - (\beta + \gamma); 2\pi]. \end{cases}$$

Рассмотрим теперь функцию $\varphi_k(\tau)$. Как уже было отмечено, процесс электрохимического растворения анода будет происходить только в том случае, когда нормаль к поверхности детали в рассматриваемой точке будет проходить через электропроводный сектор, т.е.

$$\psi \in [\psi_{нп}, \psi_{кп}], \quad (9)$$

где $\psi_{нп}$, $\psi_{кп}$ - центральные углы круга, соответствующие началу и окончанию n -го токопроводного сектора.

Из рассмотрения рис.3 можно записать

$$\psi = \varphi + \delta;$$

$$\sigma = \alpha z c \sin \frac{R-z-h_3}{z} \sin \varphi.$$

Откуда центральный угол шлифовального круга φ , соответствующий центральному углу детали для рассматриваемой элементарной площадки анодной поверхности φ , можно записать в виде

$$\varphi = \varphi + \alpha z c \sin \frac{R-z-h_3}{z} \sin \varphi.$$

Расположение токопроводных секторов в любой момент времени при встречном шлифовании можно определить следующим образом.

Начало первого сектора соответствует углу

$$\tilde{\psi}_{Н1} = \psi_0 - \omega_k \tau.$$

Для упрощения дальнейших расчетов принимается $\psi_0 = 0$.

Тогда выражение (8) можно переписать в виде

$$\tilde{\psi}_{Н1} = 2\pi - \left[\frac{1 - \omega_k \tau}{2\pi} \right] 2\pi - \psi_{Н1}.$$

Так как с течением времени угол $\tilde{\psi}_{Н1}$ периодически принимает одно и то же значение, то, приравняв целую часть значения угла в выражении (9) к нулю, получим значение угла начала первого электропроводного сектора в интервале $[0, 2\pi]$:

$$\tilde{\psi}_{Н1} = 2\pi - \psi_{Н1}.$$

Конец первого токопроводного сектора будет определяться углом

$$\tilde{\psi}_{К1} = 2\pi - \psi_{Н1} + \psi_\beta.$$

Угол начала второго сектора будет больше угла $\psi_{К1}$ на величину центрального угла абразивного сектора:

$$\tilde{\psi}_{Н2} = \psi_{К1} + \theta_\beta.$$

Выделяя, как и ранее, из величины $\tilde{\psi}_{Н2}$ целую часть периодов и приравнявая их к нулю, можно получить начало второго сектора в интервале углов $[0, 2\pi]$:

$$\tilde{\psi}_{Н2} = \left[\frac{2\pi - \psi_1 + (\psi_\beta + \theta_\beta)}{2\pi} \right] 2\pi + \psi_{Н2}.$$

Значение угла, соответствующего окончанию второго сектора, определяется из выражения

$$\tilde{\psi}_{К2} = \left[\frac{2\pi - \psi_1 + \psi_\beta + (\psi_\beta + \theta_\beta)}{2\pi} \right] 2\pi + \psi_{К2}.$$

Учитывая, что

$$(\psi_\beta + \theta_\beta) n = 2\pi,$$

где $n = 2, 3, 4, 5, \dots$ — число пар секторов в абразивном круге, можно записать значения углов, соответствующих началу и концу любого электропроводного сектора:

$$\tilde{\psi}_{нп} = \left[\frac{2\pi - \psi_1 + (n-1)(\psi_B + \theta_B)}{2\pi} \right] 2\pi + \psi_{нп};$$

$$\tilde{\psi}_{кп} = \left[\frac{2\pi - \psi_1 + \psi_B + (n-1)(\psi_B + \theta_B)}{2\pi} \right] 2\pi + \psi_{кп}.$$

Если целые части в полученных выражениях больше нуля, то, приравнявая их к нулю, получим положения начала и конца любого электропроводного сектора в произвольный момент времени.

Возвращаясь к выражению (9), можно записать функцию $\Phi_k(\tau)$ в виде

$$\Phi_k(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{если } \psi \in [\psi_{н1}, \psi_{к1}] \\ & [\psi_{н2}, \psi_{к2}] \\ & \dots \\ & [\psi_{нп}, \psi_{кп}] \\ 0, & \text{если } \psi \notin [\psi_{н1}, \psi_{к1}] \\ & [\psi_{н2}, \psi_{к2}] \\ & \dots \\ & [\psi_{нп}, \psi_{кп}]. \end{cases}$$

Анализ выражения (8) приводит к выводу о том, что величина электрохимического съема материала анода при неизменных параметрах процесса пропорциональна величине интегралов:

$$I_1 = \int_0^{\tau_1} \frac{1}{\zeta_2(\tau) + h_3} \Phi_2(\tau) \Phi_k(\tau) d\tau;$$

$$I_2 = \int_{\tau_1}^{\tau} \Phi_2(\tau) \Phi_k(\tau) d\tau.$$

Вычисление данных интегралов на ЭВМ показало, что максимальное значение I_1 достигает (для равновеликих секторов) при $n = 4$ и составляет 47% от значений интеграла при сплошном шлифовальном электропроводном круге.

Л и т е р а т у р а

1. Б е л я к о в С.М. Исследование процесса глубинного электроабразивного шлифования деталей авиационных двигателей: Автореф. канд.дис.-Казань: Казанский авиационный институт, 1973.
2. Т р у с о в В.Н. Исследование электроалмазного шлифования авиационных материалов с прямой и обратной полярностью технологического тока: Автореф.канд.дис.-Куйбышев: КуАИ, 1975.
3. М а с л о в Е.И. Теория шлифования материалов.-М.:Машиностроение, 1974.
4. К о п ы т и н Ю.А., Т р у с о в В.Н. Исследование динамики процесса внутреннего электромеханического шлифования стали 8Х4В9Ф2Ш композиционными кругами.-В сб.:Высокоэффективные методы обработки резанием жаропрочных и титановых сплавов-Куйбышев: КуАИ, 1982.

УДК 536.2.001.24

М.Е.Маркушин, В.М.Опарин

К РАСЧЕТУ УСТАНОВИВШИХСЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ
ПРИ КРУГЛОМ ШЛИФОВАНИИ С МАЛЫМ ЧИСЛОМ ПЕКЛЕ

Исследование стационарных температурных полей, возникающих в деталях при круглом шлифовании, приводит к интегрированию уравнения эллиптического типа

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \theta(z, \varphi) + \frac{1}{z} \frac{\partial}{\partial z} \theta(z, \varphi) + \frac{1}{z^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \theta(z, \varphi) - \alpha \frac{\partial}{\partial \varphi} \theta(z, \varphi) = 0 \quad (1)$$

с граничным условием

$$\left. \frac{\partial}{\partial z} \theta(z, \varphi) \right|_{z=1} = \begin{cases} q(\varphi), & \text{при } \varphi \in [0, \sigma] \\ -\mu \theta(1, \varphi), & \text{при } \varphi \in (\sigma, 2\pi). \end{cases} \quad (2)$$

Уравнение (1) и граничные условия (2) записаны в безразмерной форме: z, φ - полярные координаты, $z \in [0, 1], \varphi \in [0, 2\pi]$; $q(\varphi)$ - приведенный тепловой поток в деталь, $q(\varphi) \geq 0$; α - число Пекле, $\alpha > 0$; μ - приведенный коэффициент теплоотдачи, $\mu > 0$.