

TOMASZ PACZKOWSKI

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

OBRÓBKA ECM POWIERZCHNI KRZYWOLINIOWYCH ELEKTRODĄ DRGAJĄCĄ

W pracy przedstawiono analizę teoretyczną obróbki elektrochemicznej elektrodą drgającą o zarysie krzywoliniowym. Zjawiska fizyczne występujące w szczelinie międzyelektrodowej opisano za pomocą układu równań różniczkowych cząstkowych wynikających z bilansu masy, pędu i energii przepływającego elektrolitu w szczelinie. Sformułowane w pracy równania opisujące ewolucję kształtu powierzchni obrabianej oraz przepływ elektrolitu (mieszanki cieczy i gazu) w szczelinie uproszczono, wprowadzając założenia dotyczące przepływu, rozkładu objętościowej koncentracji fazy gazowej oraz grubości szczeliny, a następnie rozwiązano częściowo analitycznie, częściowo numerycznie.

Słowa kluczowe: ECM, przepływ elektrolitu, powierzchnie krzywoliniowe

1. WSTĘP

Współczesna tendencja do szybkich działań innowacyjnych i częstego wprowadzania na rynek nowych produktów spowodowała powstawanie specjalistycznych modułów i niezależnych modelerów do projektowania obiektów opartych na modelowaniu swobodnych powierzchni krzywoliniowych, np. typu NURBS. Reprezentacja NURBS jest najbardziej uniwersalną formą reprezentowania krzywych i powierzchni we wszelkich zastosowaniach z dziedziny CAD-CAM [4].

Matematyczny opis tych powierzchni jest skomplikowany, gdyż są to powierzchnie krzywoliniowe. Stwarza to określone problemy w modelowaniu procesów zachodzących w obróbce elektrochemicznej (ECM).

Przy projektowaniu procesu technologicznego drążenia krzywoliniową elektrodą roboczą obok wyznaczenia geometrii elektrody roboczej istotny jest m.in. dobór składu elektrolitu i parametrów obróbki (elektrycznych, kinematycznych i hydrodynamicznych).

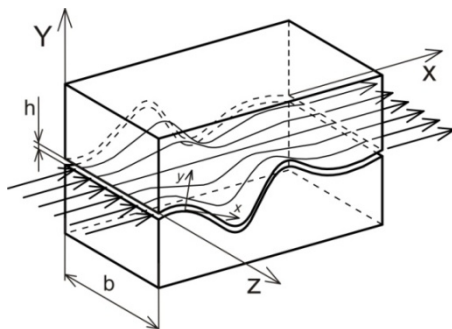
W procesie ciągłym elektroda robocza wykonuje najczęściej ruch postępowy w kierunku powierzchni obrabianej. Do szczeliny międzyelektrodowej (SM) podawany jest z dużą prędkością elektrolit, powodując odprowadzanie z przestrzeni międzyelektrodowej produktów roztwarzania.

Parametry hydrodynamiczne przepływu oraz właściwości ośrodka decydują o procesach wymiany masy, pędu i energii w szczelinie międzyelektrodowej. Prawidłowo dobrane zapobiegają: powstawaniu stref kawitacji, przepływu krytycznego, cyrkulacji, nadmiernemu wzrostowi temperatury elektrolitu i koncentracji objętościowej fazy gazowej [1, 2, 8]. Wymienione procesy są ze sobą ściśle sprzężone i mają istotny wpływ na kształt oraz własności użytkowe powierzchni obrabianej [6, 9, 10]. W celu poprawnego doboru warunków procesu ECM oraz wyznaczenia geometrii elektrod niezbędne jest matematyczne modelowanie zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej.

2. MODELOWANIE MATEMATYCZNE PROCESU ECM

Układ równań opisujący dwuwymiarowy przepływ mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej wynika z zasad zachowania masy i pędu [3].

Konfigurację pola przepływu elektrolitu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Obszar przepływu elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej

Wprowadzono następujące założenia:

- przepływ elektrolitu jest ustalony dwuwymiarowy, homogeniczny,
- ciśnienia $p_e = p_H = p$,
- objętościowa koncentracja fazy gazowej $\beta = \beta(x)$,
- grubość szczeliny jest mała w porównaniu z długością szczeliny międzyelektrodowej ($h \ll L$)

Układ równań ruchu mieszaniny w lokalnie ortogonalnym układzie współrzędnych X, Y związany z anodą (rys. 1) jest następujący:

$$\frac{\partial(\rho_e v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_e v_y)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_H v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_H v_y)}{\partial y} = j\eta_H k_H h^{-1} \quad (2)$$

$$\rho_e \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_e \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left((a + a_T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{j^2}{\rho_e c_p \kappa} \quad (4)$$

gdzie:

- η_H – wydajność prądowa wydzielania gazu,
- k_H – równoważnik elektrochemiczny wodoru,
- $a + a_T$ – współczynnik dyfuzyjności termicznej w ruchu laminarnym i turbulentnym [7],
- ρ_e, ρ_H – gęstość odpowiednio elektrolitu, wodoru.

Równania (1) ÷ (4) powinny spełniać następujące warunki brzegowe:

– dla prędkości

$$v_x, v_y = 0 \quad \text{dla} \quad y = 0$$

$$v_x = 0, \quad v_y = \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{dla} \quad y = h$$

– dla ciśnienia

$$p = p_z \quad \text{dla} \quad x = x_z$$

– dla temperatury:

$$\text{– na ściankach:} \quad T = T_s \quad \text{dla} \quad x \geq x_w \text{ i } y = 0 \text{ i } y = h$$

$$\text{– na wlocie} \quad T = T_w$$

gdzie:

x_z – współrzędna końca szczeliny międzyelektrodowej,

T_s – temperatura elektrod,

T_w – temperatura na wlocie.

2.1. Całki równań ruchu

Wprowadzając wielkości bezwymiarowe określone następującymi formułami:

$$\tilde{x} = \frac{x}{L_o}, \quad \tilde{y} = \frac{y}{h_o},$$

$$\tilde{v}_x = \frac{v_x}{v_o}, \quad \tilde{v}_y = \frac{v_y}{v_o} \frac{R_o}{h_o}, \quad \tilde{p} = \frac{ph_o}{\mu_e v_o} \frac{h_o}{L_o}$$

równania ruchu opisujące przepływ mieszaniny elektrolitu i wodoru można przedstawić w postaci:

$$\lambda \left(\tilde{v}_x \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v}_y \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \tilde{y}} \right) = - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial^2 \tilde{v}_x}{\partial \tilde{y}^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{y}} = 0 \quad (6)$$

Wielkości oznaczone indeksem „zero” są wielkościami średnimi w rozpatrywanym obszarze przepływu, $\lambda = Re \frac{h_o}{L_o}$ – zmodyfikowaną liczbą Reynoldsa.

W równaniu ruchu (5) zmodyfikowana liczba Reynoldsa jest tzw. małym parametrem układu. Można zatem jego rozwiązania poszukiwać w postaci szeregów potęgowych względem λ w postaci:

$$v_x = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i v_x^i, \quad v_y = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i v_y^i, \quad p = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i p^i \quad (7)$$

Podstawiając szeregi (7) do równania ruchu (5), oraz równania ciągłości przepływu (1), porządkując i grupując wyrazy względem tych samych potęg λ , dla przybliżenia liniowego w postaci wymiarowej otrzymano następujący ciąg równań:

$$\frac{\partial(\rho_e v_x^0)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_e v_y^0)}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho_H v_x^0)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_H v_y^0)}{\partial y} = j\eta_H k_H h^{-1} \quad (9)$$

$$0 = -\frac{\partial p^0}{\partial x} + \mu_e \frac{\partial^2 v_x^0}{\partial y^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho_e v_x^I)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_e v_y^I)}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

$$\rho_e \left(v_x^0 \frac{\partial v_x^0}{\partial x} + v_y^0 \frac{\partial v_x^0}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p^I}{\partial x} + \mu_e \frac{\partial^2 v_x^I}{\partial y^2} \quad (12)$$

Warunki brzegowe przyjmują teraz postać:

$$v_x^0 = 0, \quad v_y^0 = 0,$$

$$v_x^I = 0, \quad v_y^I = 0 \quad \text{dla } y=0 \quad (13)$$

$$v_x^0 = 0, \quad v_y^0 = \frac{\partial h}{\partial t},$$

$$v_x^I = 0, \quad v_y^I = 0 \quad \text{dla } y=h$$

$$p^0 = p_z, \quad p^I = 0 \quad \text{dla } x=x_z \quad (14)$$

Rozwiązując ciągi równań (8) ÷ (12), wykorzystując warunki brzegowe (13) i (14) uzyskano odpowiednio pole prędkości i ciśnienia w postaci:

$$v_x = \frac{6Q}{h^3} (hy - y^2) - \frac{13}{70} \frac{\rho_e}{\mu_e} \frac{QV}{h^2} (hy - y^2) + \frac{1}{10} \frac{\rho_e}{\mu_e} \frac{QV}{h^6} (21hy^5 - 12y^6 - 10h^2 y^4 + h^5 y) \quad (15)$$

$$v_y = \frac{V}{h^3} (3hy^2 - 2y^3) - \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\rho_e^2}{\mu_e} \left[\frac{13}{420} (2y^3 - hy^2) + -\frac{1}{2100} (420h^2 y^5 - 735hy^6 + 360y^7 - 110h^5 y^2) \right] \quad (16)$$

$$p = \frac{12\mu Q}{h^3} (x - x_z) + \frac{13}{35} \frac{\rho_e Q V}{h^2} (x - x_z) \quad (17)$$

Dla uwzględnienia przepływu turbulentnego w szczelinie międzyelektrodowej w lokalnie ortogonalnym układzie współrzędnych przyjęto zależności opisujące rozkłady prędkości w postaci:

$$v_x = v_{xmax} \left[1 - \left| \frac{h-2y}{h} \right| \right]^{\frac{1}{n}} \quad (18)$$

$$v_y = V \left(\frac{2y}{h} \right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (19)$$

gdzie: $v_{xmax} = \frac{n+1}{n} \frac{Q}{bh}$.

Wartości liczby Reynoldsa Re , przy której następuje przejście z przepływu laminarnego w turbulentny ($Re_{kr} = 2000$) [3] można wyznaczyć z formuły:

$$Re = \frac{v_{sr} 4r_h}{\nu}$$

gdzie: $r_h = \frac{bh}{2(b+h)}$, $v_{sr} = \frac{Q}{hb}$, $\nu = \nu_e(1 + 2,5\beta)$ $\beta \ll 1$.

Rozkład koncentracji gazu β wyznacza się z bilansu masy wodoru wydzielającego się na katodzie:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{T} \beta \right) = \frac{\eta_H k_H R}{\mu_H Q} j \quad (20)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \rho_{Ho} &= \frac{\mu_H P}{R_H T} && \text{– gęstość wodoru,} \\ R_H &&& \text{– stała gazowa wodoru,} \\ \mu_H &&& \text{– masa molowa wodoru.} \end{aligned}$$

2.2. Równanie ewolucji kształtu

Równanie roztrawiania elektrochemicznego powierzchni w kierunku ruchu posuwowego dla rozpatrywanego przypadku określa się zależnością [5]:

$$\frac{\partial Y_A}{\partial t} = k_v \kappa_0 \Phi_{TG}^{-1} \frac{U-E}{d_{min}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x} \right)^2} \quad (21)$$

$$\Phi_{TG} = \frac{1}{h} \left[\int_0^h \frac{dy}{(1 + \alpha_T (T - T_0))(1 - \beta)^{3/2}} \right] \quad (22)$$

gdzie:

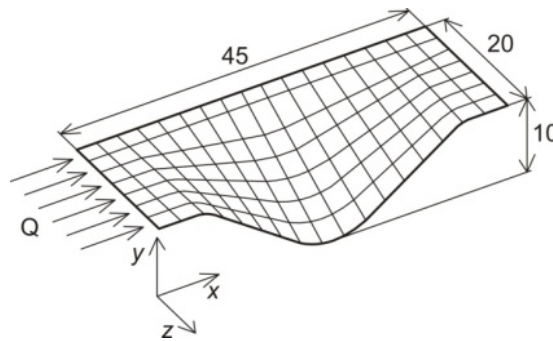
- k_v – współczynnik obrabialności elektrochemicznej,
- α_T – współczynnik temperaturowy konduktywności elektrycznej,
- κ_0 – konduktywność właściwa ośrodka.

3. PODSUMOWANIE

Obliczenia przeprowadzono dla elektrod kształtowych o cechach geometrycznych przedstawionych na rysunku 2. Jest to powierzchnia krzywoliniowa zakrzywiona również w kierunku osi z . Traktując zagadnienie jako płaskie, wymusza to poszukiwanie płaszczyzn przewodzenia obliczeń, określonych jako płaszczyzny normalne do powierzchni anody i jednocześnie ograniczone powierzchniami elektrod. Założono, że układ zasilania zapewnia stałe natężenie przepływu elektrolitu w SM. Obliczenia prowadzono do uzyskania stanu quasi-stacjonarnego, tzn. takiego, w którym zmiany grubości szczeliny ME i warunków fizycznych między elektrodami stają się periodyczne.

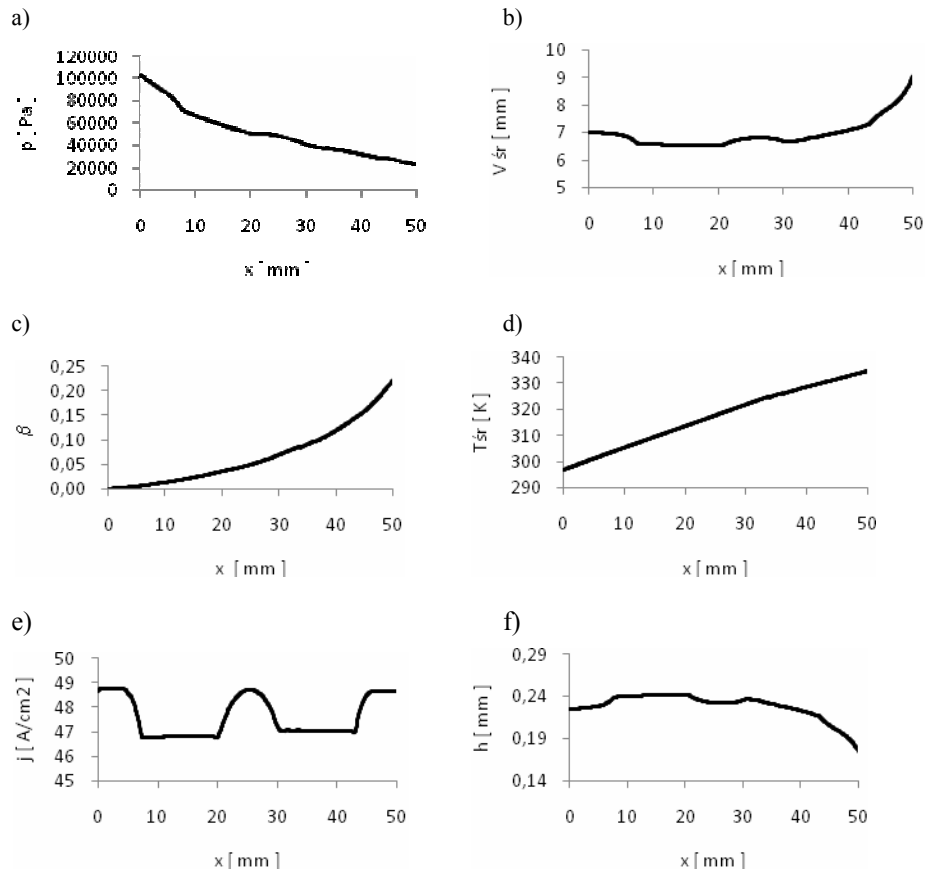
Ważniejsze parametry obróbki przyjęte do obliczeń:

- szczelina początkowa – 0,2 mm,
- prędkość ruchu posuwowego ER – 0,0125 mm/s,
- napięcie międzyelektrodowe – 15 V.



Rys. 2. Geometria elektrody roboczej

Na wykresach (rys. 3) przedstawiono rozkłady ciśnienia p , średniej prędkości przepływu elektrolitu v_{sr} , objętościowej koncentracji gazu β , średniej temperatury elektrolitu T , gęstości prądu j oraz grubości szczeliny ME h wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej.



Rys. 3. Rozkłady wzdłuż SM: a) ciśnienia p , b) średniej prędkości przepływu elektrolitu V_{sr} , c) koncentracji fazy gazowej β , d) średniej temperatury elektrolitu T_{sr} , e) gęstości prądu j , f) wysokości szczeliny ME h

Otrzymane wyniki obliczeń potwierdzają przewidywane tendencje zmian jakościowych wybranych parametrów:

- lokalne grubości szczeliny międzyelektrodowej (rys. 3f) zmieniają się; ma na to wpływ zmienność prędkości roztwarzania elektrochemicznego oraz kąt pochylenia profilu elektrody roboczej w stosunku do kierunku drażenia,
- nierównomierny rozkład grubości szczeliny międzyelektrodowej w znaczący sposób wpływa na rozkład ciśnienia oraz prędkości przepływu elektrolitu (rys. 3a-b),
- na zmienność warunków fizycznych wzdłuż przepływu ma wpływ wzrost objętościowej koncentracji fazy gazowej i temperatury elektrolitu (rys. 3c-d,); czynniki te wpływają na zmianę wartości takich wielkości fizycznych jak: lepkość, gęstość, konduktywność elektrolitu, a konsekwencji na prędkość roztwarzania elektrochemicznego i dokładność obróbki.

Dalsze badania symulacyjne oraz eksperymentalne pozwolą dokonać weryfikacji ilościowej przyjętego modelu matematycznego.

LITERATURA

- [1] Dąbrowski L., 1992. Podstawy komputerowej symulacji kształtowania elektrochemicznego. Prace Naukowe, Mechanika 154, Wyd. Politechniki Warszawskiej.
- [2] Dąbrowski L., Paczkowski T., 2005. Computer simulation of two-dimensional electrolyte flow in electrochemical machining. Russian Journal of Electrochemistry 41(1).
- [3] Gryboś R., 1998. Podstawy mechaniki płynów. PWN Warszawa.
- [4] Kiciak P., 2000. Podstawy modelowania krzywych i powierzchni. Zastosowania w grafice komputerowej. WNT Warszawa.
- [5] Kozak J., 1976. Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną bezstykową (ECM). Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika 41, Wyd. Politechniki Warszawskiej.
- [6] Kozak J., 1976. Mathematical Models for Computer Simulation of Electrochemical Machining Process. Journal of Materials Processing Technology 76.
- [7] Kozak J., 1999. Komputerowe wspomaganie technologii drążenia elektrochemicznego. Szkoła Naukowa Obróbek Erozyjnych SNOE 5, Warszawa.
- [8] Łubkowski K., 1996. Stany krytyczne w obróbce elektrochemicznej. Prace Naukowe Mechanika, 163, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa.
- [9] Paczkowski T., Sawicki J., 2006. Analysis of influence of physical conditions inside interelectrode gap on work piece shape evolution. Engineering Mechanics 13(2).
- [10] Paczkowski T., Sawicki J., 2008. Electrochemical machining of curvilinear surfaces. Journal of Machining Science and Technology 12(1).

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy (N503 022 32/3064).

ECM MACHINING OF CURVILINEAR SURFACES WITH THE OSCILLATING TOOL ELECTRODE

Summary

The paper presents the theoretical analysis of electrochemical machining with the oscillating tool electrode in curvilinear profile. Physical phenomena which occur in the interelectrode gap have been described with the set of partial differential equations resulting from the balance of the mass, momentum and the energy of the electrolyte flowing in the gap. The equations formulated in the paper, describing the evolution of the shape of the surface under machining and the electrolyte flow (mixtures of liquid and gas) in the gap, have been simplified by introducing assumptions of the flow, volumetric gaseous phase concentration distribution and the gap thicknesses, and then solved: partly analytically and partly numerically.

Keywords: curvilinear surfaces, ECM, electrolyte flow