

XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Produkcji
STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
MECHANIKÓW POLSKICH – Koło Uczelniane UTP

85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7
tel. (0 52) 340-87-47, fax. (0 52) 340-82-45,
e-mail: tomasz.paczkowski@utp.edu.pl

Kalibrowanie i brzdowanie elektrochemiczne długich otworów

Electrochemical calibrating and shaping of long holes

JERZY KOZAK¹
GRZEGORZ SKRABALAK²
ANDRZEJ STWORA³

W artykule opisano konstrukcję modelu matematycznego procesu elektrochemicznego kształtowania długich otworów. Zaprezentowany model uwzględnia dotyczy operacji polerowania elektrochemicznego powierzchni otworu oraz operacji drażnienia kształtowego – brzdowania powierzchni wewnętrznej otworu, wykorzystujących ruchomą elektrodę. Opisane operacje znajdują zastosowanie m.in.: podczas produkcji luf i wymienników ciepła.

SŁOWA KLUCZOWE: wygładzanie elektrochemiczne, brzdowanie elektrochemiczne, modelowanie matematyczne.

The paper concerns electrochemical smoothing and shaping (barreling) of long holes. There is described mathematical model of ECM polishing and fissuring operations of internal surfaces of long holes. Described operations use travelling electrode as tool. ECM polishing and fissuring of long holes find its application in production of barrels and heat exchangers.

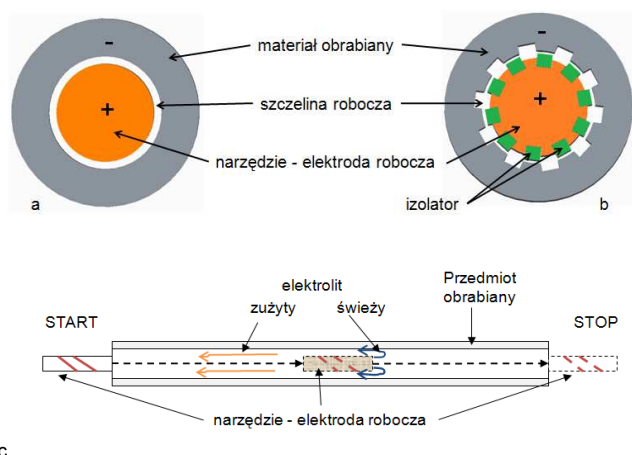
KEYWORDS: electrochemical polishing, electrochemical fissuring mathematical modeling.

Wprowadzenie

W procesie wytwarzania wyrobów z długimi otworami charakteryzujących się dużym stosunkiem L/d (długości do średnicy) stosowane są różne technologie kształtowania poszczególnych elementów. Jedną z efektywnych metod stosowanych w praktyce przemysłowej technologii wytwarzania wyrobów z długimi otworami, często w przemyśle

zbrojeniowym, jest elektrochemiczna obróbka ubytkowa (ECM-Electrochemical Machining), której pierwsze wdrożenie w praktyce przemysłowej (do wykonawstwa długich otworów) nastąpiło w latach 60-70 ubiegłego wieku.

Obróbka elektrochemiczna otworów należy do podstawowych i rozpowszechnionych operacji technologii elektrochemicznej części maszyn i narzędzi. Przykładem jest kalibrowanie oraz brzdowanie długich otworów w materiałach wysokowytrzymałych, przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat procesu polerowania elektrochemicznego (a), brzdowania elektrochemicznego (b) oraz kinematyki procesów obróbki (c)

Przy projektowaniu procesu technologicznego ECM można wyróżnić następujące zadania główne:

1. Dobór warunków procesu ECM, tj. składu elektrolitu i parametrów obróbki (elektrycznych, kinematycznych i hydrodynamicznych), w zależności od rodzaju

¹prof. dr hab. inż. Jerzy Kozak (jkozak64@wp.pl)

²dr inż. Grzegorz Skrabalak (grzegorz.skrabalak@ios.krakow.pl)

³mgr inż. Andrzej Stwora (andrzej.stwora@ios.krakow.pl)

- ju materiału i stawianych wymogów technologicznych.
- 2. Wyznaczenie geometrii narzędzia – elektrody roboczej.
- 3. Analiza dokładności obróbki.

Należy zaznaczyć, że wymienione zadania są ze sobą ściśle sprzężone, tj. otrzymane wyniki z danego zadania wpływają na wyniki pozostałych zadań. Przykładowo, wybór prędkości posuwu V_f decyduje o wymiarach narzędzia (ER), wpływa na dokładność i jakość powierzchni obrabianej oraz wpływa na dobór pozostałych parametrów obróbki. Jednocześnie podczas wyznaczania ER może wystąpić konieczność zmiany V_f lub innych parametrów. Rozwiązanie wymienionych zadań związane jest z wyznaczeniem ewolucji kształtu powierzchni obrabianej – anody (PO) w czasie oraz rozkładów warunków fizycznych panujących w obszarze obróbki, który w końcowej fazie przyjmuje postać szczeliny międzyelektrodowej. Z tych względów w systemie wspomaganego komputerowego ECM zasadniczym podprogramem jest program dla symulacji komputerowej procesu ECM, na podstawie której rozwiązywane są sformułowane zadania 1 – 3.

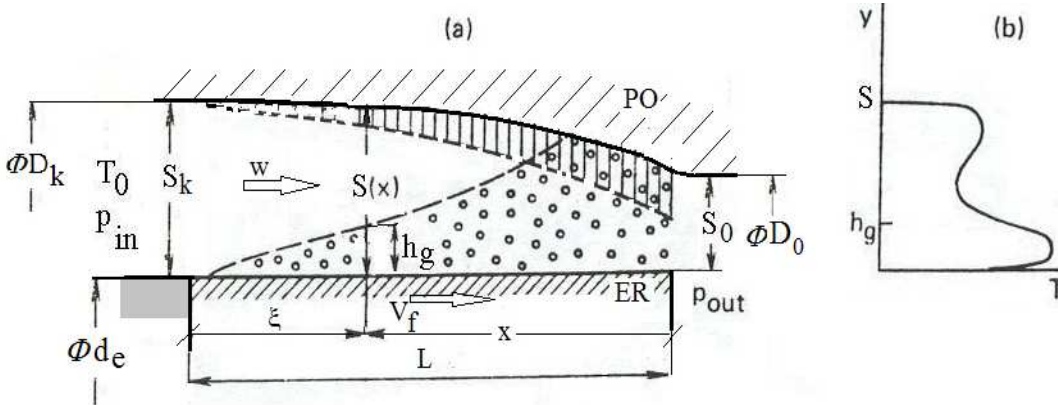
- prędkość posuwu – ruchu postępowego elektrody roboczej V_f ,
- początkowe położenie ER względem PO,
- napięcie robocze U ,
- charakterystyki elektrochemiczne układu materiał – elektrolit opisane funkcjami dotyczącymi współczynnika obrabialności elektrochemicznej $K_V = K_V(i)$ oraz sumarycznej polaryzacji elektrod $E = E(i)$.

Modelowanie matematyczne obróbki elektrochemicznej (ECM) przewodu lufowego elektrodą ruchomą.

Schemat obróbki elektrodą ruchomą przedstawiony jest na rys. 2.

Po przejściu elektrody roboczej o średnicy d_e , w wyniku roztwarzania elektrochemicznego uzyskuje się średnicę otworu (kalibrowanego) D_k równą:

$$D_k = d_e + 2S_k \quad (1)$$



Rys. 2. Schemat obróbki elektrochemicznej w czasie kalibrowania przewodu lufowego: a) szczelina robocza, b) rozkład temperatury wzdłuż grubości szczeliny

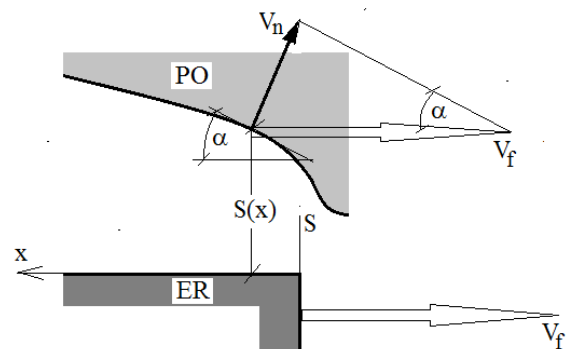
Modelowanie matematyczne procesu kształtowania elektrochemicznego

Zadanie matematyczne związane z symulacją kształtowania elektrochemicznego można sformułować następująco: dla zadanych warunków procesu ECM znaleźć kształt powierzchni obrabianej, rozkłady pól fizycznych w obszarze obróbki (w szczelinie między elektrodami), a mianowicie rozkłady ciśnienia statycznego p , prędkości przepływu elektrolitu w , temperatury T , koncentracji objętościowej fazy gazowej β oraz grubości warstwy dwufazowej h (rys. 2).

Zadane warunki obróbki opisane są zbiorem właściwości układu ER-E-PO (elektroda robocza – elektrolit – przedmiot obrabiany) oraz parametrami procesu, a mianowicie znane są:

- kształt (geometria elektrody roboczej ER – katody, oraz położenie i geometria wlotu elektrolitu),
- początkowy kształt powierzchni obrabianej – anody,
- elektryczna konduktywność elektrolitu na wlocie κ_0 ,
- temperatura na wlocie T_0 ,
- współczynnik temperaturowy konduktywności elektrycznej α_T ,
- gęstość właściwa elektrolitu ρ_e ,
- ciepło właściwe C_p ,
- lepkość kinematyczna ν_0 ,
- ciśnienie statyczne elektrolitu na wlocie p_0 lub średnia prędkość elektrolitu na wlocie w_0 ,

Z tych względów podstawowym celem modelowania i symulacji procesu kalibrowania elektrochemicznego jest wyznaczenie grubości szczeliny końcowej S_k . W obliczeniach przyjmuje się, że ma miejsce stan ustalony procesu ECM dla uśrednionych warunków wzdłuż grubości szczeliny. Warunkiem stanu ustalonego jest wystąpienie rozkładu prędkości roztwarzania jak na rys. 3, zapewniającego przemieszczanie się punktów anody ruchem równoległym do osi x , z prędkością posuwu elektrody roboczej V_f .



Rys. 3. Rozkład prędkości w warunkach stanu ustalonego ECM

Mając to na uwadze, że w stanie ustalonym prędkość roztwarzania anodowego na powierzchni PO (anody) równa jest:

$$V_n = V_f \sin \alpha \quad (2)$$

W warunkach ECM otworu lufy, nie popełniając istotnego błędu można przyjąć, że

$$\sin \alpha \cong \operatorname{tg} \alpha = \frac{dS}{dx}, \text{ stąd:}$$

$$V_n = V_f \frac{dS}{dx} \quad (3)$$

Na podstawie prawa Faradaya, prędkość roztwarzania elektrochemicznego V_n wynosi:

$$V_n = \eta \frac{k}{\rho_m} i \quad (4)$$

gdzie i jest gęstością prądu na anodzie w rozpatrywanym punkcie, η -wydajność prądowa procesu roztwarzania anodowego, k i ρ_m odpowiednio równoważnik elektrochemiczny i gęstość właściwa materiału obrabianego.

W obliczeniach procesu ECM wygodnym jest stosowanie pojęcia **współczynnika obrabialności elektrochemicznej** K_v , który równy jest objętości materiału roztworzonego anodowo przy przepływie jednostkowego ładunku elektrycznego i wyraża się zależnością:

$$K_v = \eta \frac{k}{\rho_m}$$

$$V_n = K_v i \quad (5)$$

Obrabialność elektrochemiczna (K_v) wyznacza się eksperymentalnie, przy czym zależy głównie od rodzaju elektrolitu i materiału obrabianego, gęstości prądu, temperatury elektrolitu, prędkości przepływu elektrolitu oraz aktualnej wartości stopnia pH . Wartość K_v . Podstawiając do zależności (1) prędkość z (5) oraz uwzględniając, że dla przyjętych założeń gęstość prądu na anodzie wynosi:

$$i = \kappa \frac{U - E}{S} \quad (6)$$

Równanie różniczkowe opisujące stacjonarny rozkład szczeliny, a więc kształt powierzchni obrabianej ma postać następującą:

$$\frac{dS}{dx} = \kappa \cdot K_v \frac{U - E}{S \cdot V_f} \quad (7)$$

Z warunkiem początkowym $S(x=0)=S_0$. Należy mieć na uwadze, że ze względu na zachodzące w szczelinie procesy wymiany masy, ładunku i energii, wartości κ, K_v, E zmieniają się wzdłuż przepływu czyli są funkcjami współrzędnej x . Całkując równanie (7) i uwzględniając warunek początkowy, po przekształceniach otrzymujemy:

$$S = \sqrt{S_0^2 + 2 \int_0^x \kappa \cdot K_v \frac{U - E}{V_f} dx} \quad (8)$$

Średnica otworu po kalibrowaniu elektrochemicznym wyniesie:

$$D_k = d_e + 2 \sqrt{S_0^2 + 2 \int_0^L \kappa \cdot K_v \frac{U - E}{V_f} dx} \quad (9)$$

Elektryczną konduktywność właściwą ośrodka dwufazowego wyznacza się zależności [2, 3]:

$$\kappa = \kappa_0 [1 + \alpha_T \Theta] \cdot (1 - \beta)^{3/2} \quad (10)$$

gdzie: $\Theta = T - T_0$, a κ_0 i α_T przyjmują wartości dla $T = T_0$.

Występujące w zależności (10), rozkłady temperatury i koncentracji objętościowej wydzielanego gazu(wodoru) uzyskuje się z modelowania procesu nagrzewania i wydzielania gazu, po uprzednich obliczeniach parametrów przepływu elektrolitu.

Rozwiązanie zagadnień kalibrowania oraz bruzdowania w oparciu o podany model matematyczny wymaga zastosowania metody kolejnych przybliżeń:

- w 1'szym przybliżeniu wyznacza się rozkład $S(x)$ przy założeniu stałości warunków fizycznych w szczelinie, a następnie oblicza się parametry hydrodynamiczne oraz termiczne;
- w następnych przybliżeniach koryguje się rozkłady wielkości fizycznych z uwzględnieniem zmiany warunków fizycznych opisanych w poprzedzającym kroku obliczeń.

Oszacowanie podstawowych parametrów kalibrowania elektrochemicznego elektrodą ruchomą.

W oszacowaniu przyjmuje się niezmiennosc warunków fizycznych w szczelinie międzyelektrodowej oraz w czasie procesu, przy czym parametry je opisujące uśrednia się. Model matematyczny procesu kalibrowania opisany jest wówczas następująco:

- średnica otworu po kalibrowaniu:

$$D_k = d_e + 2 \sqrt{S_0^2 + 2 \kappa \cdot K_v \frac{U - E}{V_f} L} \quad (11)$$

- średnia konduktywność elektryczna:

$$\kappa = \kappa_0 [1 + 0.5 \alpha_T \Delta T_m] \cdot (1 - \beta)^{3/2} \quad (12)$$

gdzie: ΔT_m maksymalny przyrost temperatury średniej w przekroju poprzecznym szczeliny (na wylocie), a κ_0 i α_T przyjmują wartości dla $T = T_0$.

- natężenie prądu w stanie ustalonym kalibrowania elektrochemicznego:

$$I_f = 0.25 \pi (D_k^2 - D_0^2) \frac{V_f}{K_v} \quad (13)$$

lub:

$$I_f = \pi D_s a \frac{V_f}{K_V} \quad (14)$$

gdzie $D_s = 0.5(D_o + D_k)$ oraz naddatek na obróbkę $a = 0.5(D_k - D_o)$.

Przy założeniu danego natężenia prądu roboczego I_m prędkość drążenia/kalibrowania wynosi:

$$V_f = \frac{4K_V I_m}{\pi(D_k^2 - D_o^2)} \quad (15)$$

Początkowa gęstość prądu (dla $x=0$):

$$i_0 = \kappa_0 \frac{U - E}{S_0} \quad (16)$$

Końcowa gęstość prądu (na powierzchni obrobionej):

$$i_k = \kappa_0 \frac{U - E}{S_k} \quad (17)$$

Przy przyjęciu warunku, że ze względu na chropowatość powierzchni obrobionej końcowa gęstość prądu winna wynosić i_w (tj. w chwili usunięcia naddatku a), wówczas początkową grubość szczeliny wynosi:

$$S_0 = \kappa_0 \frac{U - E}{i_w} - a \quad (18)$$

Natomiast średnica elektrody roboczej wyznacza zależność:

$$d_e = D_0 - 2S_0 = D_0 - 2\left(\kappa_0 \frac{U - E}{i_w} - a\right) \quad (19)$$

Długość elektrody roboczej przy kalibrowaniu elektrochemicznym może być wyznaczona z zależności:

$$L = \frac{S_k^2 - S_0^2}{2\kappa(U - E)K_V} V_f \quad (20)$$

Maksymalny przyrost temperatury średniej w przekroju poprzecznym szczeliny (na wylocie):

$$\Delta T_m = \frac{UI_m}{\rho_e C_e q_V} \quad (21)$$

gdzie q_V objętościowy wydatek elektrolitu.

Prędkość średnia elektrolitu w szczelinie S_k (rys.3)

$$w = \frac{4q_V}{(D_k^2 - d_e^2)} \quad (22)$$

Przy założeniu dopuszczalnej wartości przyrostu temperatury dT_{dop} objętościowy wydatek elektrolitu wynosi:

$$q_m = \frac{UI_m}{\rho_e C_e dT_{dop}} \quad (23)$$

Spadek ciśnienia na długości L elektrody roboczej wyraża się zależnością:

$$P_{in} - P_{out} = \lambda \frac{L}{2S_0} \frac{\rho w^2}{2} + \zeta_{in} \frac{\rho w_{in}^2}{2} + \zeta_{out} \frac{\rho w_{out}^2}{2} \quad (24)$$

Model matematyczny opisany zależnościami (11-24) pozwala oszacować poszukiwane parametry kalibrowania dla założonych danych wyjściowych.

Wiarygodność oszacowania zależy w szczególności od dokładności wyznaczonych doświadczalnie wartości współczynnika obrabialności elektrochemicznej K_V , sumarycznej polaryzacji elektrod.

LITERATURA

1. Kozak J.: Mathematical Models for Computer Simulation of Electrochemical Machining Processes. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 76, N.1-3, 1998.
2. Kozak J.: Kształtowanie powierzchni złożonych obróbką elektrochemiczną – bezstykową (ECM) Politechnika Warszawska. Prace naukowe –Mechanika-Nr 41, wyd.PW. 1976.
3. Brugemman A.G.: Physikalischer Konstanten von Heterogenen Substanzen. Ann.Phys. Leipzig, vol.24, 1935.