

JERZY SAWICKI

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

## OBRÓBKA ELEKTROCHEMICZNA POWIERZCHNI OBROTOWYCH ELEKTRODĄ DRGAJĄCĄ

W pracy przedstawiono równanie opisujące ewolucję kształtu krzywoliniowej, obrotowej powierzchni obrabianej metodą drążenia elektrochemicznego oraz równania przepływu mieszaniny elektrolitu i gazu w szczelinie między krzywoliniowymi powierzchniami obrotowymi (elektrodą roboczą i anodą).

Dla założonych parametrów obróbki przeprowadzono obliczenia, przedstawiając wyniki obliczeń w przekroju wzdłużnym szczeliny międzyelektrodowej. Na wykresach przedstawiono rozkłady prędkości wzdłużnej przepływu elektrolitu, ciśnienia, temperatury oraz wybranych wielkości fizycznych obróbki elektrochemicznej (gęstości prądu, koncentracji objętościowej fazy gazowej).

Słowa kluczowe: obróbka elektrochemiczna, przepływ elektrolitu, model matematyczny

### 1. WSTĘP

Drążenie elektrochemiczne jest odmianą obróbki elektrochemicznej bezstykowej i należy do podstawowych i najbardziej rozpowszechnionych operacji technologii elektrochemicznej części maszyn i narzędzi [1, 4].

Obróbka elektrochemiczna ECM wymaga, aby do ujemnego bieguna stałego źródła prądu podłączyć elektrodę roboczą, a do bieguna dodatniego przedmiot obrabiany. Szczelina międzyelektrodowa wypełniona jest elektrolitem. Podczas procesu obróbki wymuszony różnicą ciśnień przepływ elektrolitu szczeliną powoduje wypłukiwanie z powierzchni elektrod produktów roztwarzania (cząsteczek wodoru oraz jonów roztworzonego metalu).

Można zatem przyjąć, że w szczelinie międzyelektrodowej powstaje mieszanina elektrolitu, cząsteczek wodoru oraz produktów roztwarzania elektrochemicznego.

O zjawiskach fizycznych, jakie występują w szczelinie międzyelektrodowej w trakcie obróbki ECM, decydują procesy wymiany masy, pędu i energii, co wpływa na dokładność operacji drążenia elektrochemicznego.

Projektując proces technologiczny drążenia należy wyróżnić następujące zadania [5, 6, 7]:

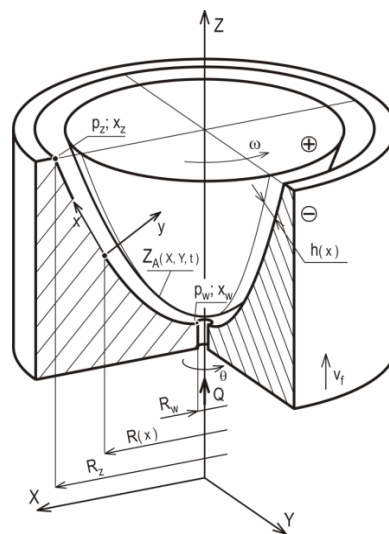
- dobór warunków procesu ECM (skład elektrolitu, parametry obróbki, wymogi technologiczne),
- wyznaczenie geometrii narzędzia – elektrody roboczej,
- analizę dokładności obróbki.

Należy zaznaczyć, że wymienione zadania są wzajemnie ściśle sprzężone, a rozwiązanie ich związane jest z wyznaczeniem ewolucji kształtu powierzchni obrabianej, tj. anody.

Celem niniejszej pracy jest modelowanie matematyczne procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych elektrodą drgającą skądnie, pozwalające wyznaczyć ewolucję kształtu powierzchni obrabianej oraz parametry fizyczne przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej.

## 2. MODELOWANIE MATEMATYCZNE PROCESU OBRÓBKI ECM

Obszar przepływu elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej (SM) między krzywoliniowymi powierzchniami osiowo-symetrycznymi przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Obszar przepływu elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej

Nieruchoma powierzchnia szczeliny niech będzie opisana funkcją  $R(x)$  oznaczającą promień tej powierzchni. Grubość szczeliny międzyelektrodowej  $h$  jest to odcinek poprowadzony wzdłuż normalnej do powierzchni nieruchomej, przecinający krzywiznę powierzchni ograniczającej szczelinę w przekroju osiowym.

Niech grubość szczeliny  $h(x)$  będzie mała w porównaniu z promieniem powierzchni nieruchomej  $R(x)$ , co można wyrazić formułą:

$$h(x) \ll R(x) \quad (1)$$

Ogólne równanie różniczkowe opisujące zmianę kształtu powierzchni obrabianej wskutek roztwarzania anodowego, zgodnie z teorią roztwarzania ECM, ma postać [5]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + k_v \vec{j}_A \text{grad} F = 0 \quad (2)$$

z warunkiem początkowym  $F(X, Y, 0) = F_0$

gdzie:

- $\vec{j}_A = \vec{j}(X_A, Y_A, t)$  – rozkład gęstości prądu na powierzchni obrabianej,
- $k_V$  – objętość materiału usuniętego przez roztworzenie anodowe przy przepływie jednostkowego ładunku elektrycznego,
- $F_0(A, 0) = 0$  – równanie opisujące wyjściową powierzchnię obrabianą,
- $F(A, t) = 0$  – równanie opisujące powierzchnię anody w chwili  $t$ .

Gęstość prądu wyznacza się z prawa Ohma [1]:

$$\vec{j} = -\kappa \text{gradu}|_A \quad (3)$$

gdzie:

- $u$  – potencjał pola elektrycznego między elektrodami,
- $\kappa$  – przewodność właściwa – konduktywność.

W układzie współrzędnych prostokątnych  $X, Y, Z$  związanych z nieruchomą anodą równanie powierzchni anody jest postaci [3]:

$$Z = Z_a(X, Y, t) \quad (4)$$

Wprowadzając równanie (13) do zależności (11) otrzymano [4]:

$$\frac{\partial Z_A}{\partial t} = k_V j_A \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_A}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_A}{\partial Y}\right)^2} \quad (5)$$

dla  $t = 0$   $Z_A = Z_0(X, Y)$ .

Zakładając, że rozkład potencjału wzdłuż odcinka normalnego do elektrody roboczej jest liniowy (często przyjmowany w obliczeniach technologicznych) funkcję gęstości prądu można wyrazić zależnością [4]:

$$j_A = \kappa_0 \Phi_{TG}^{-1} \frac{U - E}{h} \quad (6)$$

Funkcja  $\Phi_{TG}$  opisuje wpływ zmian konduktywności w szczelinie i wyznacza się następująco [2]:

$$\Phi_{TG} = \frac{1}{S} \left[ \int_0^h \frac{dy}{(1 + \alpha(T - T_0))(1 - \beta)^{3/2}} \right] \quad (7)$$

Dla zamknięcia układu równań (5), (6) i (7) konieczne jest wyznaczenie przyrostów temperatury  $\Delta T = T - T_0$  oraz rozkład koncentracji fazy gazowej  $\beta$ . Wymaga to określenia rozkładów ciśnienia, prędkości i temperatury w krzywoliniowej szczelinie międzyelektrodowej.

Modelowanie matematyczne przepływu elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej przeprowadzono w krzywoliniowym, lokalnie ortogonalnym układzie współrzędnych związanym z nieruchomą powierzchnią [12, 13, 14].

Przyjmując do rozważań model ośrodka dwufazowego równania ruchu wynikające z zasad: zachowania masy, pędu i energii w krzywoliniowym lokalnie ortogonalnym układzie współrzędnych mają następującą postać:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_e R v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_e v_y)}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

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

$$\rho_e \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_\theta^2 \frac{R'}{R} \right) = - \frac{\partial p_e}{\partial x} + \mu_e \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \quad (10)$$

$$\rho_e \left( v_x \frac{\partial v_\theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_\theta}{\partial y} - v_x v_\theta \frac{R'}{R} \right) = \mu_e \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial y^2} \quad (11)$$

$$0 = - \frac{\partial p_e}{\partial y} \quad (12)$$

$$\rho_H \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_\theta^2 \frac{R'}{R} \right) = - \frac{\partial p_H}{\partial x} + \mu_H \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \quad (13)$$

$$\rho_H \left( v_x \frac{\partial v_\theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_\theta}{\partial y} - v_x v_\theta \frac{R'}{R} \right) = \mu_H \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial y^2} \quad (14)$$

$$0 = - \frac{\partial p_H}{\partial y} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{v_\theta}{R} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = - \frac{p}{\rho_e c_p} \left[ \frac{1}{R} \frac{\partial(Rv_x)}{\partial x} + \frac{\partial v_\theta}{R \partial \theta} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right] + \\ & + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial x} \left( (a + a\tau) R \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( (a + a\tau) \frac{\partial T}{R \partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (a + a\tau) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\ & + \frac{\mu_e}{\rho_e c_p} \left\{ \begin{aligned} & 2 \left[ \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_\theta}{R \partial \theta} + v_x \frac{R'}{R} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 \right] \\ & \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial v_y}{\partial \theta} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \\ & \left( \frac{\partial v_x}{R \partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial x} \right)^2 + \left( -v_\theta \frac{R'}{R} \right)^2 - \frac{2}{3} \left[ \frac{1}{R} \frac{\partial(Rv_x)}{\partial x} + \frac{\partial v_\theta}{R \partial \theta} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right]^2 \end{aligned} \right\} + \frac{j^2}{\rho_e c_p \kappa} \end{aligned} \quad (16)$$

gdzie:

$v_x, v_\theta, v_y$	–	składowe wektora prędkości,
$p_e$	–	ciśnienie elektrolitu,
$p_H$	–	ciśnienie gazu,
$\rho_e = \rho_{e0}(1 - \beta)$	–	gęstość elektrolitu,
$\rho_H = \rho_{H0}\beta$	–	gęstość wodoru,
$\mu_e$	–	dynamiczny współczynnik lepkości elektrolitu,
$\mu_H$	–	dynamiczny współczynnik lepkości wodoru,
$\beta$	–	objętościowa koncentracja fazy gazowej,
$j, \eta_H, k_H$	–	odpowiednio gęstość prądu, wydajność prądowa wydzielania wodoru, równoważnik elektrochemiczny wodoru,
$T$	–	temperatura elektrolitu,
$c_p$	–	ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,
$R$	–	promień powierzchni nieruchomej.

Dodając równania ruchu obu faz stronami oraz zanedbując człony zawierające  $\rho_H/\rho_e$  jako pomijalnie małe, zakładając, że ciśnienia  $p_e = p_H = p$  równania przepływu (8)-(16) przyjmują postać:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_e R v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_e v_y)}{\partial y} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_H R v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_H v_y)}{\partial y} = j \eta_H k_H h^{-1} \quad (18)$$

$$\rho_e \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_\theta^2 \frac{R'}{R} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_e \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \quad (19)$$

$$\rho_e \left( v_x \frac{\partial v_\theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_\theta}{\partial y} - v_x v_\theta \frac{R'}{R} \right) = \mu_e \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial y^2} \quad (20)$$

$$0 = - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (21)$$

Pomijając dyssypację energii, uwzględniając wydzielane ciepło Joule'a spowodowane przepływem prądu elektrycznego, wymuszoną konwekcję ciepła wywołaną przepływem elektrolitu, wymianę ciepła przez elektrody równanie energii ma następującą postać:

$$v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial x} \left( (a + a_T) R \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (a + a_T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{j^2}{\rho_e c_p \kappa} \quad (22)$$

gdzie:

$a, a_T$	–	dyfuzyjność cieplna elektrolitu odpowiednio w przepływie laminarnym i turbulentnym,
$\kappa$	–	elektryczna konduktywność właściwa elektrolitu.

Sformułowany układ równań (17)-(22) stanowi podstawowy układ równań dla analizy osiowosymetrycznego przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej.

Rozwiązanie układu równań (17)-(22) pozwoli na określenie rozkładów prędkości, ciśnienia i temperatury w szczelinie międzyelektrodowej. Uzyskane formuły opisujące rozkład temperatury w szczelinie wykorzystane będą dla wyznaczenia ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (anody) na podstawie równania (5).

Rozwiązania równań (17)-(22) powinny spełniać warunki brzegowe odnośnie:

- składowych prędkości i ciśnienia:

$$\begin{aligned} v_x = v_y = 0 & \quad \text{dla } y = 0, \\ v_\theta = 0 & \quad \text{dla } y = 0, \\ v_\theta = \omega R(x) \varphi \cos(\omega t) & \quad \text{dla } y = h, \\ p = p_z & \quad \text{dla } x = x_z \end{aligned} \quad (23)$$

- dla temperatury:

- na ściankach:  $T = T_s$  dla  $x \geq x_w$  i  $y = 0$  oraz  $y = h$
- na wlocie:  $T = T_w$

tutaj:

- $p_z$  – ciśnienia na wylocie szczeliny międzyelektrodowej,
- $x_w, x_z$  – współrzędne położenia wlotu i wylotu ze szczeliny międzyelektrodowej,
- $T_s$  – temperatura elektrod,
- $T_w$  – temperatura elektrolitu na wlocie.

Wprowadzając do równań (17)-(21) wielkości bezwymiarowe określone następującymi formułami:

$$\tilde{x} = \frac{x}{R_o}, \quad \tilde{y} = \frac{y}{h_o}, \quad \tilde{R} = \frac{R}{R_o}, \quad \tilde{v}_x = \frac{v_x}{v_o}, \quad \tilde{v}_y = \frac{v_y}{v_o} \frac{R_o}{h_o}, \quad \tilde{v}_\theta = \frac{v_\theta}{v_o}, \quad \tilde{p} = \frac{p h_o}{\mu_e v_o} \frac{h_o}{R_o} \quad (24)$$

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

$$\lambda \left( \tilde{v}_x \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v}_y \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \tilde{y}} - \tilde{v}_\theta^2 \frac{\tilde{R}'}{\tilde{R}} \right) = - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial^2 \tilde{v}_x}{\partial \tilde{y}^2} \quad (25)$$

$$\lambda \left( \tilde{v}_x \frac{\partial \tilde{v}_\theta}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v}_y \frac{\partial \tilde{v}_\theta}{\partial \tilde{y}} - \tilde{v}_x \tilde{v}_\theta \frac{\tilde{R}'}{\tilde{R}} \right) = \frac{\partial^2 \tilde{v}_\theta}{\partial \tilde{y}^2} \quad (26)$$

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

W równaniach ruchu (25) i (26) zmodyfikowana liczba Reynoldsa jest tzw. małym parametrem układu, można zatem jego rozwiązania poszukiwać w postaci szeregów potęgowych względem  $\lambda$  w postaci:

$$v_x = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i v_x^i, \quad v_y = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i v_y^i, \quad v_\theta = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i v_\theta^i, \quad p = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i p^i \quad (27)$$

Podstawiając szeregi (27) do równań ruchu w postaci bezwymiarowej, porządkując i grupując wyrazy względem tych samych potęg  $\lambda$ , ograniczając się do przybliżenia liniowego otrzymano ciągi równań, które rozwiązano analitycznie uzyskując formuły określające prędkości i ciśnienia w szczelinie międzyelektrodowej. Dla przybliżenia uwzględniającego wpływ odśrodkowych sił bezwładności uzyskano formuły określające prędkości i ciśnienia w szczelinie międzyelektrodowej:

$$v_x = \frac{3Q}{\pi R h^3} (hy - y^2) + \frac{1}{240} \frac{\rho}{\mu} \frac{[\omega R(x) \varphi \cos(\omega t)]^2 R^3}{R h^2} (36h^2 y^2 - 10y^4 - 26h^3 y) \quad (28)$$

$$v_\theta = \omega R(x) \varphi \cos(\omega t) \frac{y}{h} \quad (29)$$

gdzie:

- $\varphi$  – kąt oscylacji,
- $\omega$  – częstość drgań,
- $t$  – czas.

$$p(x) = -\frac{6\mu_e Q}{\pi h^3} (A_x - A_z) + \frac{3}{10} \rho_e [\omega R(x) \varphi \cos(\omega t)]^2 (B_x - B_z) + p_z \quad (30)$$

gdzie:

$$A_x = \int \frac{dx}{R}, \quad B_x = \int R R' dx \quad (31)$$

Zależności (28)-(30) opisują rozkłady prędkości i ciśnienia w laminarnym przepływie mieszaniny elektrolit – gaz w szczelinie o dowolnym zarysie powierzchni ograniczających przepływ. Założenie szczególnej geometrii powierzchni osiowosymetrycznych prowadzi do określenia w sposób ścisły danych rozkładów prędkości i ciśnienia.

Dla uwzględnienia przepływu turbulentnego w szczelinie międzyelektrodowej między powierzchniami osiowosymetrycznymi przyjęto zależności opisujące rozkłady prędkości w postaci [3]:

– dla prędkości promieniowej:

$$v_x = v_{xmax} \left( \frac{2y}{h} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{gdy} \quad 0 \leq y \leq \frac{h}{2} \quad (32)$$

$$v_x = v_{xmax} \left[ 2 \left( 1 - \frac{y}{h} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad \text{gdy} \quad \frac{h}{2} \leq y \leq h \quad (33)$$

gdzie:  $v_{xmax} = \frac{n+1}{n} \frac{Q}{2\pi R h}$

– dla prędkości obwodowej:

$$v_{\theta} = k\omega R(x)\varphi\cos(\omega t)\left(\frac{2y}{h}\right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{gdy} \quad 0 \leq y \leq \frac{h}{2} \quad (34)$$

$$v_{\theta} = \omega R(x)\varphi\cos(\omega t)\left\{1 - (1-k)\left[2\left(1 - \frac{y}{h}\right)\right]^{\frac{1}{n}}\right\} \quad \text{gdy} \quad \frac{h}{2} \leq y \leq h \quad (35)$$

gdzie:

$k$  – stopień zawirowania cieczy w połowie szerokości ( $k \leq 0,5$ ).

– dla prędkości poprzecznej.

Wartości liczby Reynoldsa  $Re$ , przy której następuje przejście z przepływu laminarnego w turbulentny przy założeniu, że układ zasilany jest elektrolitem przy stałym strumieniu objętości, tj.  $Q = const.$ , można wyznaczyć z formuły [3]:

$$Re = \frac{v_{sr}r_h}{\nu}, \quad r_h = \frac{2\pi Rh}{2(2\pi R + h)}, \quad v_{sr} = \frac{Q}{2\pi Rh}, \quad \mu_e = \mu_o(1 + 5,5\beta)e^{-0,019(\Delta T)} \quad (36)$$

gdzie:

- $Re$  – liczba Reynoldsa,
- $r_h$  – promień hydrauliczny szczeliny,
- $v_{sr}$  – prędkość średnia,
- $\nu$  – kinematyczny współczynnik lepkości.

Rozkład koncentracji gazu  $\beta$  wyznacza się z bilansu masy wodoru wydzielającego się na katodzie [15].

Całkując równanie (18) w poprzek szczeliny:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_H R \int_0^h v_x dy \right) + \rho_H v_y \Big|_0^h = j\eta_H k_H \quad (37)$$

a następnie przyjmując założenie, że  $\beta = \beta(x)$ , po przekształceniach otrzymano:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p}{T} \beta \right) = \frac{2\pi\eta_H k_H}{\mu_H Q} jR \quad (38)$$

przy czym:

- $\beta$  – objętościowa koncentracja fazy gazowej,
- $\rho_{Ho} = \frac{\mu_H p}{R_H T}$  – gęstość wodoru,
- $\eta_H$  – wydajność prądowa wydzielania gazu,
- $k_H$  – równoważnik elektrochemiczny wodoru,
- $R_H$  – stała gazowa wodoru,
- $\mu_H$  – masa molowa wodoru.



Rozwiązanie równania ewolucji kształtu powierzchni obrabianej (5) oparto na metodzie kolejnych przybliżeń, dla wszystkich stosowanych schematów numerycznych, stosując jednocześnie metodę kroków czasowych [3, 8, 9, 10, 11].

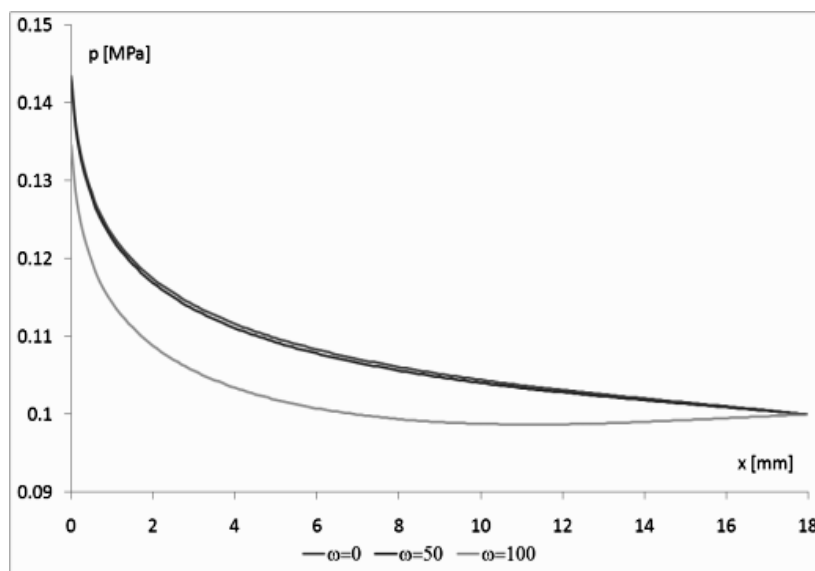
### 3. WYNIKI BADAŃ

Obliczenia ewolucji kształtu powierzchni obrabianej oraz rozkładów warunków fizyko chemicznych panujących w obszarze obróbki przeprowadzono dla elektrod kształtowych obrotowych o zarysie powierzchni kulistej. Układ zasilania zapewnia stałe natężenie przepływu elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej SM. Elektrolit jest pasywujący. Obliczenia prowadzono do uzyskania stanu ustalonego, tj. stanu, w którym następuje ustalenie w czasie rozkładu grubości SM.

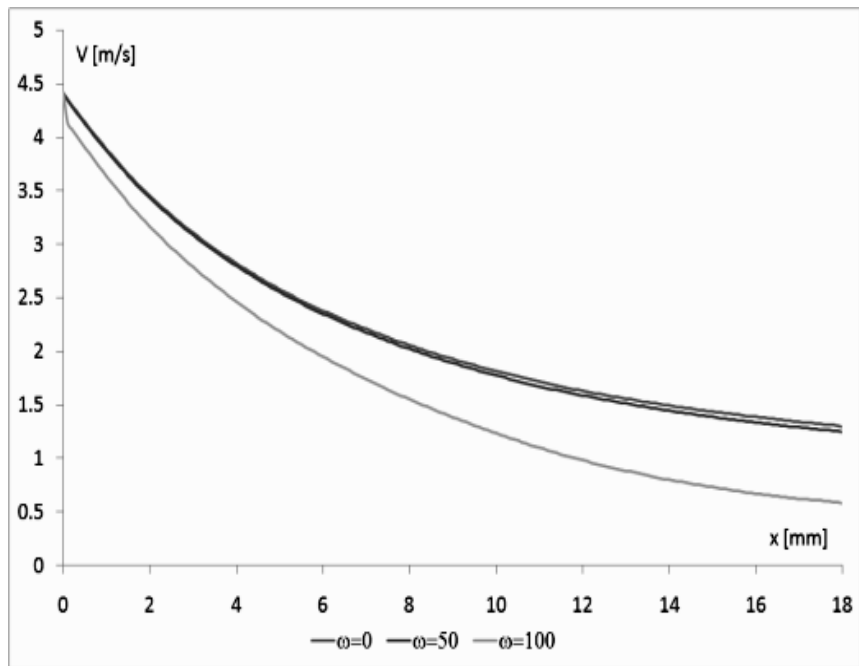
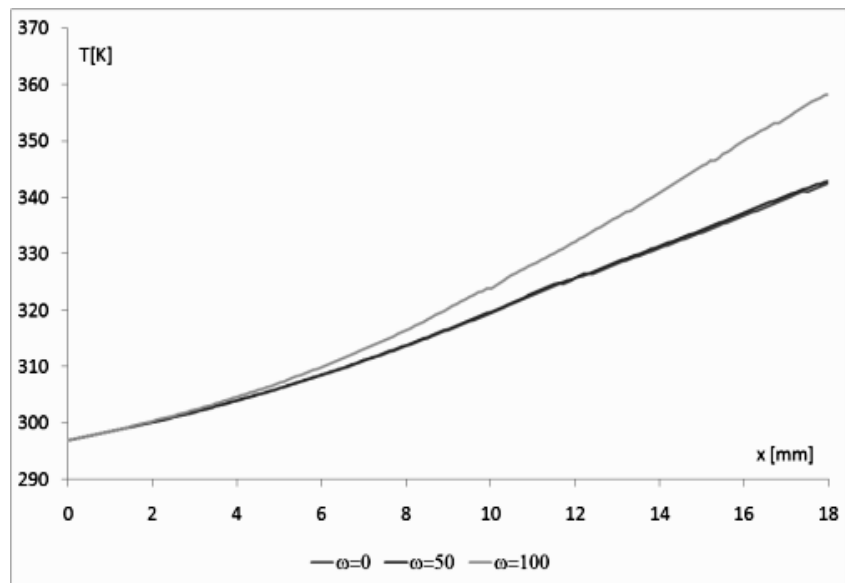
Do obliczeń przyjęto następujące ważniejsze parametry obróbki:

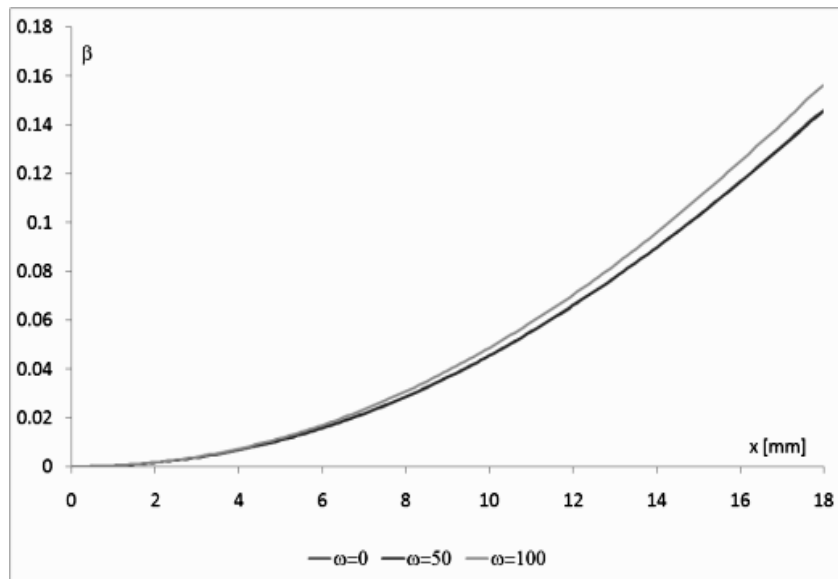
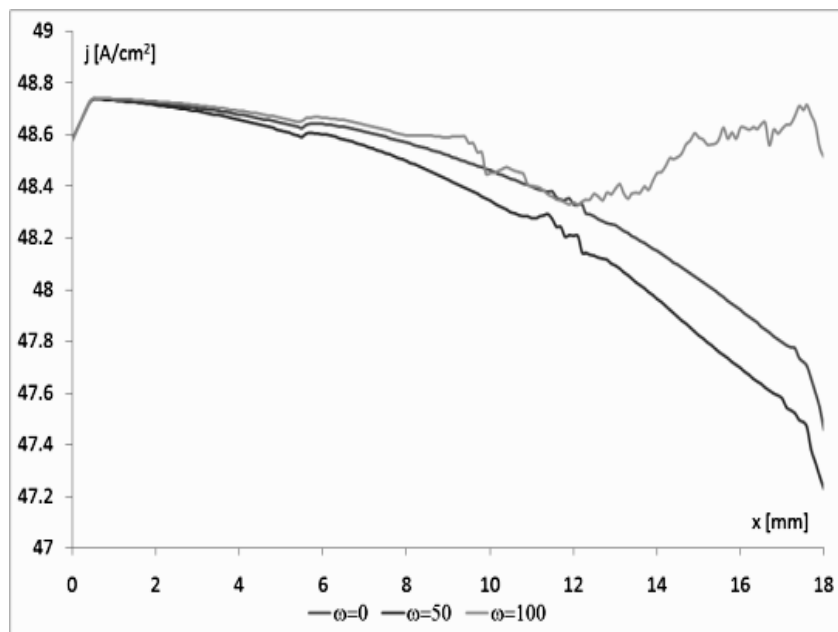
Szczelina początkowa SM	0,2	mm
Prędkość ruchu posuwowego ER	0,01	mm/s
Napięcie międzyelektrodowe U	15	V
Strumień objętości Q	3	l/min
Ciśnienie $p_z$	0,1	MPa
Częstość drgań $\omega$	0, 50, 100	1/s
Amplituda drgań $\varphi$	0°, 3°	

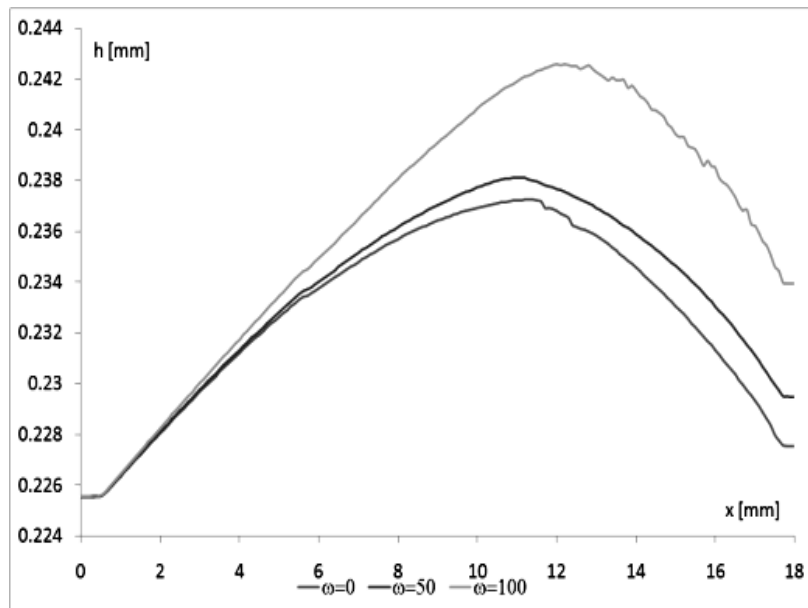
Otrzymane wyniki obliczeń przedstawiono graficznie na wykresach (rys. 2-7), określając jakościowe i ilościowe zmiany wybranych parametrów obróbki ECM.



Rys. 2. Rozkład ciśnienia  $p$  wzdłuż SM

Rys. 3. Rozkład prędkości średniej  $V_x$  wzdłuż SMRys. 4. Rozkład temperatury średniej  $T$  wzdłuż SM

Rys. 5. Rozkład koncentracji fazy gazowej  $\beta$  wzdłuż SMRys. 6. Rozkład gęstości prądu  $j$  wzdłuż SM

Rys. 7. Rozkład wysokości szczeliny  $h$  wzdłuż SM

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione powyżej wykresy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- rozkład temperatury elektrolitu wzdłuż długości SM zmienia się nieliniowo w zadanym czasie obróbki; ruch oscylacyjny PO powoduje stopniowy wzrost temperatury wzdłuż SM,
- rozkład koncentracji fazy gazowej (wodoru) wzdłuż SM rośnie nieznacznie ze wzrostem częstości oscylacji,
- lokalne zmiany grubości SM są skutkiem dynamicznie zmieniających się warunków fizycznych w szczelinie (lepkości, gęstości, konduktywności elektrolitu); grubość SM wyraźnie rośnie ze wzrostem częstości oscylacji PO,
- rozkłady ciśnienia, gęstości prądu i prędkości średniej wzdłuż szczeliny wynikają ze zmiany pola przekroju szczeliny i intensywnie zmieniających się parametrów fizycznych przepływu spowodowanych roztwarzaniem elektrochemicznym; oscylacje PO wyraźnie zmieniają rozkłady powyższych parametrów, zwłaszcza gęstości prądu.

Przeprowadzone symulacje komputerowe obróbki ECM krzywoliniowych powierzchni obrotowych pozwalają stwierdzić istotny wpływ oscylacji wywołanych drganiami skrętnymi PO na skutki roztwarzania elektrochemicznego.

## LITERATURA

- [1] Davydov A.D., Kozak J., 1990. Wysokoskorostnyje elektrochimizheskoje formo-obrazowanie. Nauka, Moskwa.
- [2] Dąbrowski L., 1992. Podstawy komputerowej symulacji kształtowania elektrochemicznego. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika 154, Wyd. Politechniki Warszawskiej.
- [3] Gryboś R., 1998. Podstawy mechaniki płynów. PWN Warszawa.
- [4] Kozak J., 1967. Zagadnienie geometrii elektrod w procesie kształtowania elektrochemicznego. Arch. Bud. Maszyn XIV(2).
- [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] Łubkowski K., 1996. Stany krytyczne w obróbce elektrochemicznej. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika 163, Wyd. Politechniki Warszawskiej.
- [8] Paczkowski T., Sawicki J., 2002. Modelowanie przepływu elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej w obróbce elektrochemicznej. National Conference with International Participation, Svratka, Czech Republic, Academy of Sciences of the Czech Republic.
- [9] Paczkowski T., Sawicki J., 2002. Symulacja komputerowa procesu ECM w oparciu o dwuwymiarowy model przepływu elektrolitu między płaskimi elektrodami. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Mechanika 53.
- [10] Paczkowski T., Sawicki J., 2003. Modelowanie ewolucji kształtu powierzchni łopaty w obróbce elektrochemicznej elektrodą drgającą roboczą. IX Międzynarodowa Konferencja „Przepływowe maszyny wirnikowe”, Rzeszów.
- [11] Paczkowski T., Sawicki J., 2003. Wpływ koncentracji wodoru w elektrolicie na ewolucję kształtu przedmiotu obrabianego. [w:] Wybrane zagadnienia obróbek skoncentrowaną wiązką energii. M. Styp-Rekowski (red.), Bydgoskie Towarzystwo Naukowe BTN Bydgoszcz.
- [12] Sawicki J., 1994. Influences of the inertial forces on the magnetic fluid flow in a gap between curvilinear surfaces of revolution. Mechanika Teoretyczna i Stosowana 4(32).
- [13] Sawicki J., 1996. Magneto-hydrodynamic flow of viscous fluid in a slot between curvilinear surfaces of revolution. Rozprawy Inżynierskie 44(1).
- [14] Sawicki J., 1996. Uogólnione równania ruchu cieczy niemagnetycznej i magnetycznej w szczelinach między wirującymi powierzchniami obrotowymi. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Mechanika 41.
- [15] Sawicki J., Paczkowski J., 2004. Obróbka elektrochemiczna krzywoliniowych powierzchni obrotowych. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Mechanika 54.

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

## ELECTROCHEMICAL MACHINING OF ROTATIONAL SURFACES WITH THE OSCILLATING TOOL ELECTRODE

### Summary

The paper presents an equation describing the shape evolution of the curvilinear rotational surface exposed to electromechanical drilling and the equations of electrolyte and gas mixture flow in the gap between curvilinear rotational surfaces (tool electrode and anode).

For the machining parameters assumed, calculations were made, presenting the results in longitudinal cut of the interelectrode gap. The figures present distributions of longitudinal velocity of the electrolyte flow, pressure, temperature and selected physical qualities of electrochemical machining (current density, volumetric gaseous phase concentration).

Keywords: electrochemical machining, electrolyte flow, mathematical model