POLSKA AKADEMIA NAUK
KOMITET BUDOWY MASZYN
SEKCJA PODSTAW TECHNOLOGII

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
W BYDGOSZCZY
WYDZIAŁ MECHANICZNY

WSI - ATR
1951
BYDGOSZCZ

ECM, przepływ elektrolitu, komputerowa symulacja, drgająca elektroda

Tomasz PACZKOWSKI*

PROJEKTOWANIE KSZTAŁTOWEJ ELEKTRODY ROBOCZEJ W OBRÓBCE ECM

Drążenie elektrochemiczne profilową elektrodą roboczą (ECM.S) należy do podstawowych i najbardziej rozpowszechnionych operacji technologii elektrochemicznej części maszyn i narzędzi. W artykule przedstawiono metodę aproksymacji powierzchni krzywymi do projektowania elektrod oraz założono dwuwymiarowy model przepływu elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej. Przedstawiono również model numeryczny procesu oraz przykład wykonanych obliczeń dla powierzchni łopatki maszyny przepływowej.

1. WPROWADZENIE

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 typu NURBS. Reprezentacja NURBS jest najbardziej uniwersalną formą reprezentowania krzywych i powierzchni we wszelkich zastosowaniach z dziedziny CAD-CAM czy grafiki komputerowej [4].

Matematyczny opis tych powierzchni jest skomplikowany, gdyż są one krzywoliniowe. Stwarza to określone problemy wyznaczenia kształtu elektrody roboczej (ER) w obróbce elektrochemicznej (ECM).

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

---

* Katedra Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy

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.

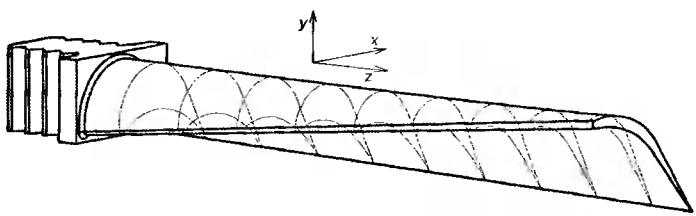
O procesach wymiany masy, pędu i energii w szczelinie międzyelektrodowej decydują parametry hydrodynamiczne przepływu oraz właściwości ośrodka. Prawidłowo dobrane zapobiegają powstawaniu stref kawitacji, przepływu krytycznego, cyrkulacji, nadmiernemu wzrostowi temperatury elektrolitu i koncentracji objętościowej fazy gazowej [7]. Wymienione procesy są ze sobą ściśle sprzężone i mają istotny wpływ na kształt oraz własności użytkowe powierzchni obrabianej [5].

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

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

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

Proces projektowania elektrody roboczej przedstawiono na przykładzie kształtowania powierzchni łopatki wirnikowej maszyny przepływowej (rys. 1).



Rys. 1. Łopatka wirnikowa
Fig. 1. Machine blades

2. MODELOWANIE MATEMATYCZNE PROCESU KSZTAŁTOWANIA ELEKTROCHEMICZNEGO

Modelowanie obróbki ECM polega na wyznaczeniu zmian grubości szczeliny międzyelektrodowej, ewolucji kształtu powierzchni obrabianej w czasie oraz rozkładów warunków fizykochemicznych panujących w obszarze obróbki, takich jak: rozkład ciśnienia statycznego, prędkości przepływu elektrolitu, temperatury i koncentracji objętościowej fazy gazowej.

Przyjęto dwuwymiarowy, dwufazowy pęcherzykowy przepływ elektrolitu w SM. Szczegółowe założenia oraz model matematyczny obróbki elektrochemicznej z drgającą elektrodą roboczą przedstawiono w pracach [2, 8, 9], poniżej przytoczono układ równań (1÷12) w końcowej postaci:

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

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

$$v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{Q}{\rho_e c_p} \tag{3}$$

$$p = p_z - 12\mu\, Q_{l'} \left(A(x) - Az\right) \tag{4}$$

$$v_x = \frac{6Q_{l'}}{h^3}\left(y^2 - yh\right) \tag{5}$$

$$v_y = \frac{V}{h^3}\left(2y^3 - 3hy^2\right) \tag{6}$$

$$V = \omega A \cos(\omega t) \tag{7}$$

$$\beta = \frac{\eta_H k_H R_H}{\mu_H} \frac{\kappa_0 \Phi_{TG}^{-1}(U-E)}{Q_{l'} h} \frac{T}{p} x \tag{8}$$

$$\mu = \mu_0 (1+\beta m) e^{-b(\Delta T)} \tag{9}$$

$$\rho_e = \rho_{eo}(1-\beta) \tag{10}$$

$$\rho_h = \rho_{ho}\beta \tag{11}$$

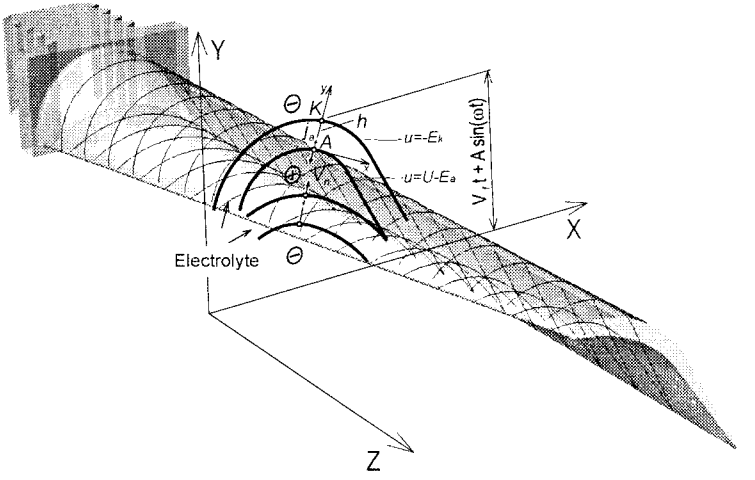
$$Q = \frac{j^2}{\kappa} \tag{12}$$

gdzie:

u – potencjał pola elektrycznego między elektrodami,
j – gęstość prądu,
κ – konduktywność,
k_v – współczynnik obrabialności elektrochemicznej,
ρ_e – gęstość elektrolitu,

ρ_h – gęstość wodoru,
v_x, v_y – składowe wektora prędkości przepływu elektrolitu,
k_H – równoważnik elektrochemiczny wodoru,
η_H – wydajność prądowa roztwarzania,
β – koncentracja objętościowa fazy gazowej,
p_H – ciśnienie gazu,
μ_e – dynamiczny współczynnik lepkości elektrolitu,
μ_H – dynamiczny współczynnik lepkości wodoru,
x_o – współrzędna końca szczeliny międzyelektrodowej,
T_0 – temperatura elektrod,
T – temperatura elektrolitu.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat obróbki elektrochemicznej łopatki z drgającą elektrodą roboczą.



Rys. 2. Schemat obróbki elektrochemicznej łopatki z drgającą elektrodą roboczą
Fig. 2. Scheme of electrochemical machining with a vibratory tool electrode

3. MODEL NUMERYCZNY PROCESU OBRÓBKI ELEKTROCHEMICZNEJ

Zagadnienie rozwiązano metodą kolejnych przybliżeń, dla wszystkich stosowanych schematów numerycznych, stosując jednocześnie metodę kroków czasowych. Współrzędną czasu t przedstawiono zbiorem punktów:

$$t_k = t_0 + k\,\Delta t \tag{13}$$

gdzie:

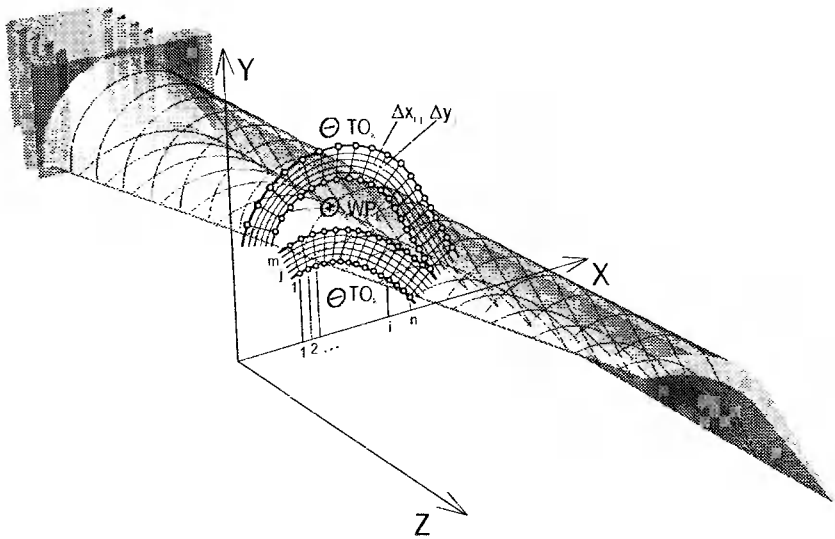
$k = 0, 1, 2, ..., K$

Wyznaczenie kształtu profilu powierzchni obrabianej w czasie opisuje równanie (1). Początkowy kształt powierzchni PO oraz ER zdefiniowany został w modelerze 3D jako powierzchnie swobodne typu NURBS. Niezbędną w obliczeniach numerycznych ich dyskretyzację dokonano poprzez aproksymację powierzchni krzywymi. Otrzymano w ten sposób zbiór par krzywych ER_k, PO_k, które w dalszym kroku z zadaną dokładnością w globalnym układzie współrzędnych opisano punktami (rys. 3):

$$x_i = \sum_{i=1}^{i} \Delta x_i \tag{14}$$

gdzie:

$i = 0, 1, 2, ..., I$



Rys. 3. Dyskretyzacja powierzchni elektrod i SM
Fig. 3. Discretization of electrode surfaces and IEG

Po dokonaniu dyskretyzacji czasu, ER i PO w danym kroku czasowym rozwiązanie podzielono na etapy:

- obliczanie minimalnej odległości (h_{min}) rozpatrywanego punktu A na PO_k od ER_k,
- dyskretyzację szczeliny międzyelektrodowej (rys. 3) wzdłuż wcześniej wyznaczonych h_{min}. W lokalnie ortogonalnym układzie współrzędnych w punkcie A mamy:

$$y_i = j\Delta y \tag{15}$$

gdzie:

$j = 0, 1, 2, ..., J$

$$\Delta y = \frac{h}{j}$$

- obliczanie pola gęstości prądu j_A,
- obliczanie pola prędkości przepływu w lokalnie ortogonalnym układzie współrzędnych,
- obliczanie pola temperatury w lokalnie ortogonalnym układzie współrzędnych. Równanie energii (3) rozwiązano numerycznie metodą różnic skończonych.

Obliczenia rozkładów temperatury wykonywane są w cyklu iteracyjnym, ponieważ w przyjętej metodzie wyznaczając $T_{(i,j)}$ potrzebna jest nieznana wartość $T_{(i,j-1)}$. Procedury iteracyjne powtarza się aż do uzyskania zadanego kryterium dokładności obliczanych rozkładów:

$$sub\ T_{(i,j)k} - T_{(i,j)k-1} < \varepsilon T_j \tag{16}$$

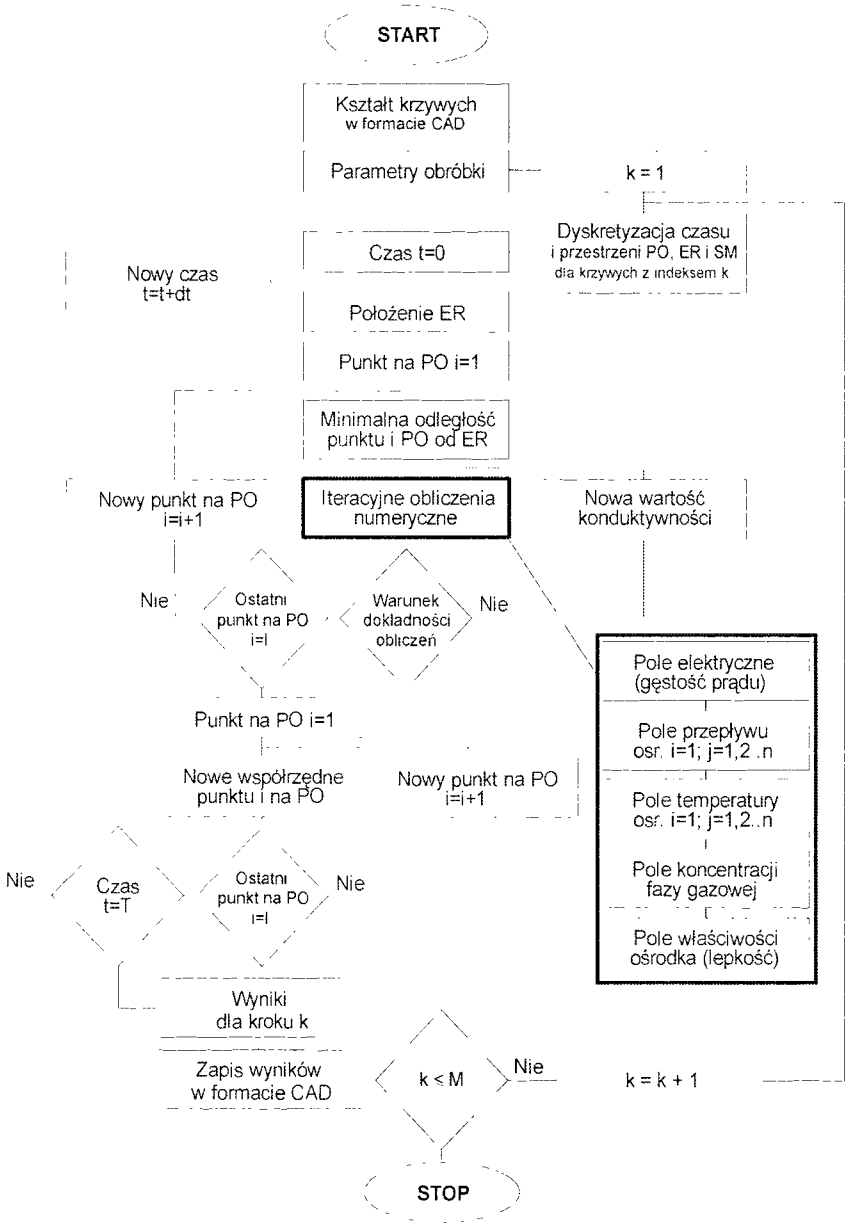
gdzie:

εT – założona dokładność obliczenia temperatury,

- obliczanie pola konduktywności $\kappa(x,y)$ elektrolitu dla aktualnych wartości temperatury,
- obliczanie koncentracji fazy gazowej $\beta(x)$ z bilansu masy,
- obliczanie pola właściwości ośrodka – lepkość $\mu(x,y)$ i gęstość $\rho(x,y)$,
- obliczanie nowych współrzędnych punktów PO w globalnym układzie współrzędnych prostokątnych,
- przejście do następnego kroku czasowego.

Obiektem analizy numerycznej są nieliniowe równania różniczkowe cząstkowe. Dla takich równań nie ma ścisłych metod badania stateczności rozwiązań, ani też ścisłych oszacowań błędu i dowodów zbieżności [3]. Powoduje to znaczne utrudnienia rozwiązań numerycznych. Ponadto przy wadliwie dobranych danych dotyczących procedur numerycznych, może wystąpić niestabilność obliczeń.

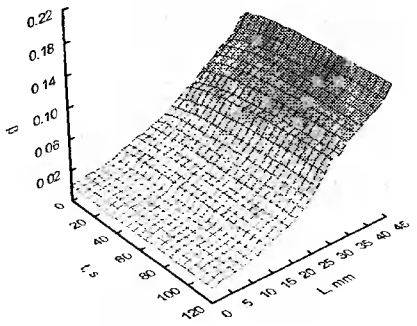
Uproszczony algorytm rozwiązania modelu matematycznego przedstawiono na rysunku 4.



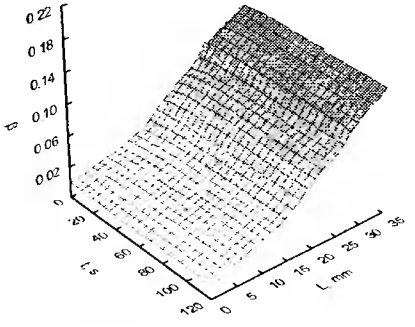
Rys. 4. Algorytm rozwiązania modelu matematycznego
Fig. 4. Schema of chart at simulation ECM

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe rozkłady wielkości fizycznych wyznaczonych zgodnie z zaprezentowanym modelem numerycznym procesu dla górnego i dolnego profilu łopatki.

a)

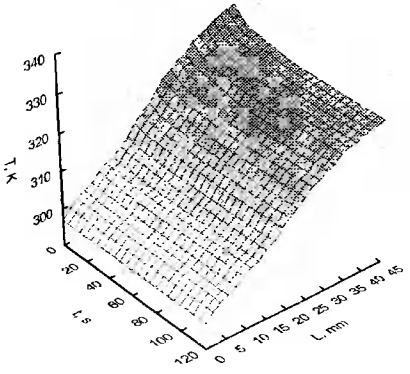


b)

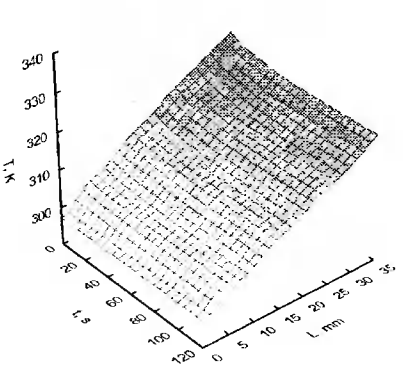


Rozkłady wypełnienia gazem β wzdłuż IEG

a)

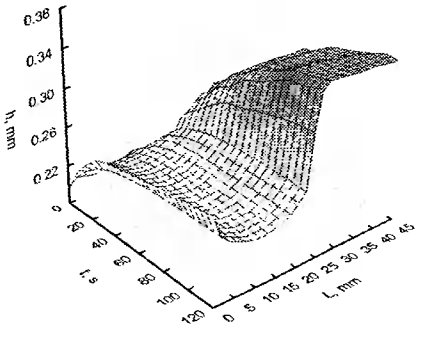


b)

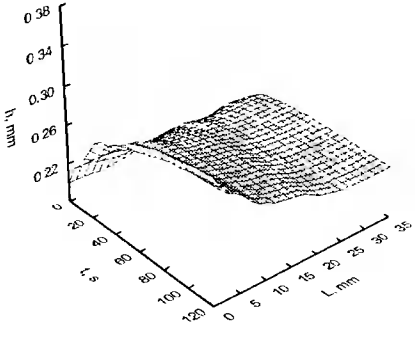


Rozkłady średniej temperatury T_{mean} wzdłuż TEG

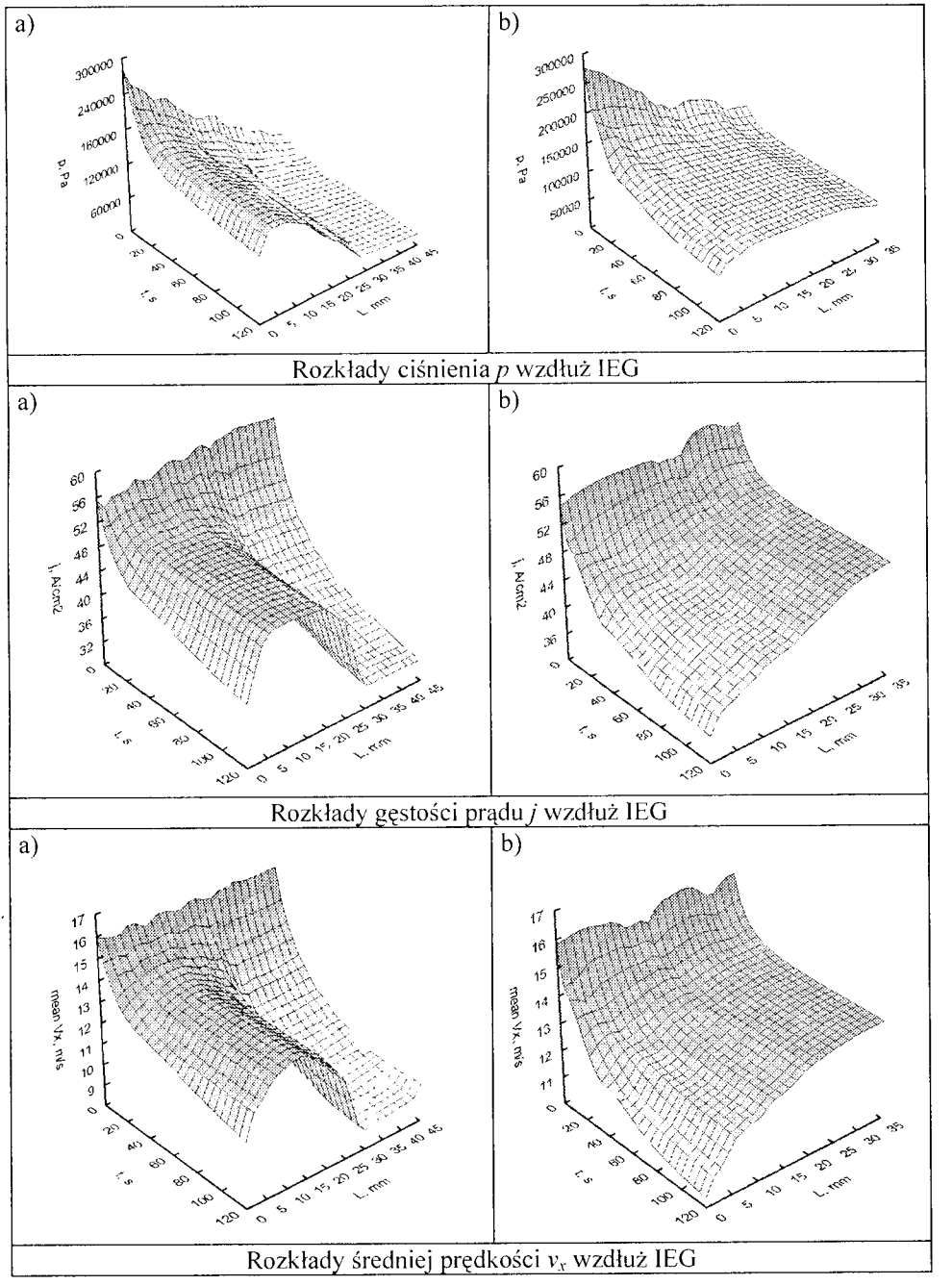
a)



b)



Rozkłady grubości h IEG wzdłuż jej długości



Rys. 5. Rozkłady wybranych wielkości fizycznych dla:
a) górnego profilu łopatki, b) dolnego profilu łopatki

Fig. 5. Distribution of selected physical quantities for:
a) upper profile of blade, b) lower profile of blade

Ważniejsze parametry obróbki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry i warunki obróbki
Table 1. Variables of a machining

Szczelina początkowa	0,2 [mm]
Prędkość ruchu posuwowego ER	0,0125 [mm/s]
Napięcie międzyelektrodowe	15 [V]
Materiał PO	WNL
Materiał ER	0H13N9

4. WYZNACZANIE GEOMETRII ELEKTRODY ROBOCZEJ

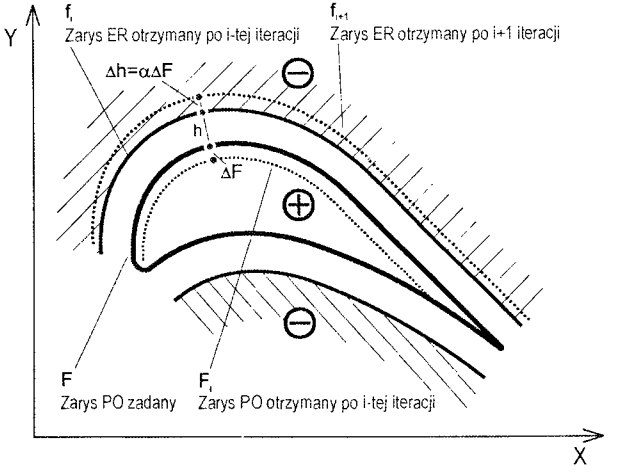
Przedstawiony powyżej model numeryczny procesu ECM umożliwia również na projektowanie kształtu elektrody roboczej przy zadanych kształtach początkowych ER_p i PO_p oraz końcowym PO. Cechą charakterystyczną tego zadania jest niejednoznaczność rozwiązania oraz konieczność stosowania metody kolejnych przybliżeń. Uzyskanie końcowego kształtu ER możliwe jest dzięki porównaniu wyników symulacji ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego z i-tej iteracji PO_{pi} z kształtem końcowym PO. W wyniku przeprowadzenia symulacji oblicza się rozkład odchyleń kształtu $\widetilde{F}$ od kształtu żądanego [1]:

$$\Delta\widetilde{F} = \widetilde{F}_i - F$$

Następnie modyfikuje się kształt elektrody roboczej ER_i, przesuwając w odpowiednim kierunku punkty jej zarysu (rys. 6):

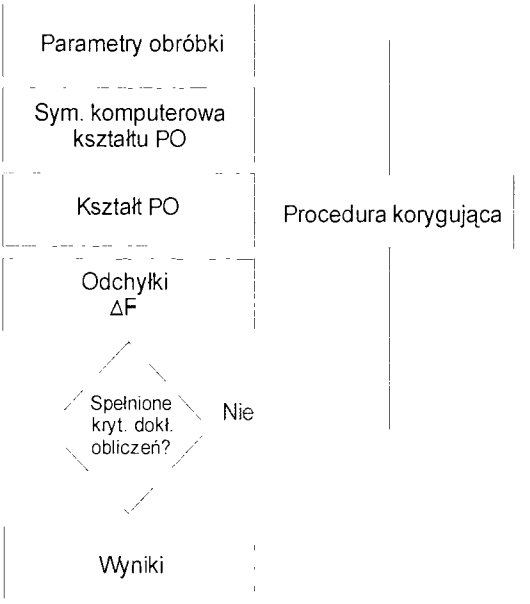
$$\Delta h = \alpha\Delta\widetilde{F}$$

gdzie: α – współczynnik warunkujący szybkość zbieżności procesu iteracji.



Rys. 6. Schemat korekcji elektrody roboczej
Fig. 6. Diagram of electrode correction

Procedurę powtarza się do uzyskania kryterium dokładności rozwiązania. Algorytm projektowania ER dla jednej pary krzywych przedstawiono na rysunku 7.

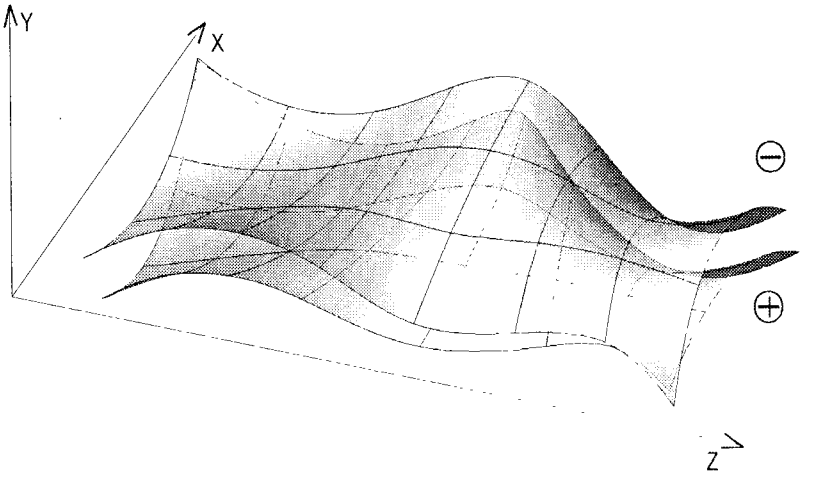


Rys. 7. Algorytm projektowania ER
Fig. 7. Design algorithm of electrode

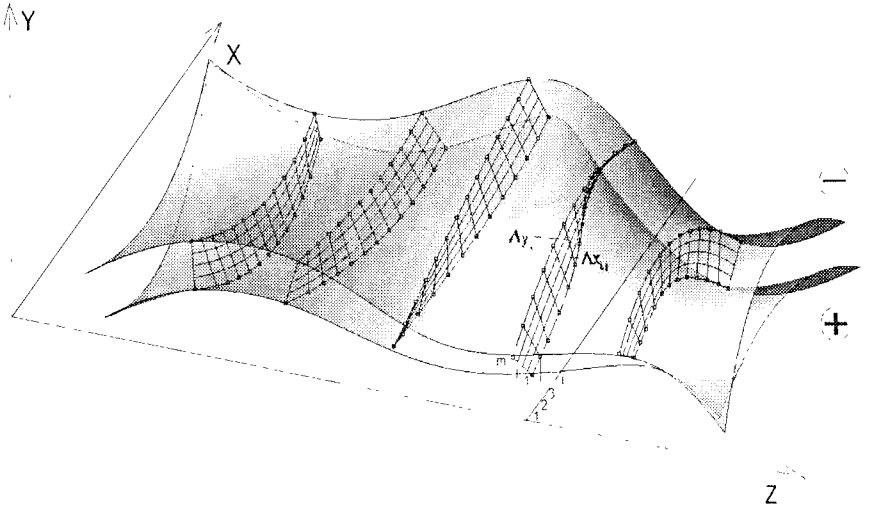
Przedstawiona metoda interpolacji seriami krzywych w obliczeniach ewolucji kształtu powierzchni elektrod w obróbce ECM pozwala, z pewnym przybliżeniem, na analizę dowolnych powierzchni. Metoda ta polega na wyznaczeniu serii krzywych wzdłuż trzeciego wymiaru, opisujących elektrodę roboczą ER, bazując na krzywych wynikających z przekrojów poprzecznych powierzchni przedmiotu obrabianego wzdłuż kierunku przepływu elektrolitu (rys. 8).

Wyznaczane krzywe powstają w wyniku przecięcia wektora normalnego do powierzchni poruszającego się po krzywych PO z powierzchnią ER. Krzywe wyznaczane są odpowiednio gęsto tak aby rozpięte na nich powierzchnie uzyskane w wyniku analizy jedno- lub dwuwymiarowej były opisane z zadaną dokładnością.

Przedstawiony model matematyczny oraz numeryczny drążenia ECM ma w tym przypadku zastosowanie przy założeniu, że analizowany będzie przepływ elektrolitu w płaszczyznach wyznaczonych przez poszczególne pary krzywych ER i PO. Na rysunku 9 przedstawiono dyskretyzację SM dla dowolnych powierzchni elektrod.



Rys. 8. Dowolne powierzchnie elektrod
Fig. 8. Arbitrary surfaces of electrodes

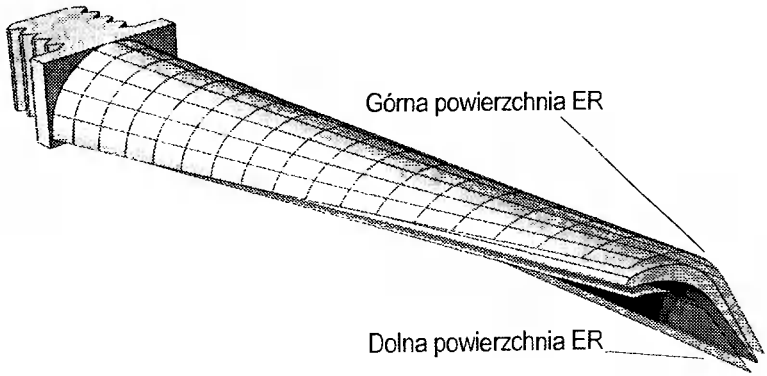


Rys. 9. Dyskretyzacja SM dla dowolnych powierzchni
Fig. 9. Discretization of interelectrode gap for arbitrary surface

5. WNIOSKI

W niniejszej pracy przedstawiono metodę projektowania złożonych powierzchni elektrod w obróbce ECM w oparciu o jej symulację komputerową.

Poniżej przedstawiono – na tle powierzchni wyjściowych opisujących kształt przedmiotu obrabianego (łopatki maszyny przepływowej) – powierzchnie opisujące kształt zaprojektowanych elektrod roboczych (rys. 10).



Rys. 10. Powierzchnie zaprojektowanych ER
Fig. 10. New surfaces of electrodes

Zaprezentowany sposób modelowania procesu ECM oraz metoda superpozycji uzyskanych rozwiązań dla poszczególnych przekrojów poprzecznych elektrod pozwoliła zwiększyć dokładność projektowania szczególnie elektrod o złożonych kształtach. Drążenie elektrochemiczne jest procesem bardzo złożonym, zatem komputerowe modelowanie procesu obróbki ECM pozwala również prawidłowo dobrać parametry obróbki, a tym samym uzyskać oszczędności czasu i kosztów.

LITERATURA

[1] Dąbrowski L., 1992. Podstawy komputerowej symulacji kształtowania elektrochemicznego. Prace Naukowe PW, 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), 91-98.

[3] Gryboś R., 1998. Podstawy mechaniki płynów. PWN Warszawa.

[4] Kiciak P., 2000. Podstawy modelowania krzywych i powierzchni. Zastosowania w grafice komputerowej. Wyd. 1. WNT Warszawa.

[5] Kozak J., 1976. Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną bezstykową (ECM). Prace Naukowe PW, 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 PW, Mechanika 163, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

[8] Paczkowski T., Sawicki J., 2003. Modelowanie ewolucji kształtu powierzchni łopatki w obróbce elektrochemicznej elektrodą drgającą roboczą, Przepływowe maszyny wirnikowe. Zbiór prac IX Konferencji pod red. E. Oczosia, Rzeszów, 2003.

[9] Paczkowski T., Sawicki J., 2003. Wpływ koncentracji wodoru w elektrolicie na ewolucję kształtu przedmiotu obrabianego, wybrane zagadnienia obróbek skoncentrowaną wiązką energii. Praca zbiorowa pod red. Michała Styp-Rekowskiego, BTN Bydgoszcz.

Recenzował: Dr hab. inż. Lucjan Dąbrowski, prof. PW

DESIGN PROCESS OF SHAPE ELECTRODE FOR ECM

Summary

Electrochemical machining with a shaped tool-electrode (ECM.S) belongs to the basic and most common methods used for electrochemical technology for machines and tools. In this paper, approximation method basing on curves is used for surfaces, for electrode design. Two dimensional electrolyte flow in the inter-electrode gap has been assumed. The numeric model of process is presented as well as example of performed calculations for a surface of the rotary flow machines.