



UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ROZPRAWY NR 164

Jerzy Sawicki

ANALIZA I MODELOWANIE PROCESU OBRÓBKI ELEKTROCHEMICZNEJ KRZYWOLINIOWYCH POWIERZCHNI OBROTOWYCH

BYDGOSZCZ – 2013

REDAKTOR NACZELNY
prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski

REDAKTOR DZIAŁOWY
dr hab. inż. Tomasz Piątkowski, prof. nadzw. UTP

OPINIODAWCY
dr hab. inż. Lucjan Dąbrowski, prof. nadzw. PW
dr hab. inż. Mieczysław Marciniak, prof. nadzw. PWSzZ

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Michał Górecki, mgr inż. Daniel Morzyński

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Bydgoszcz 2013

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany
ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych,
kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody
posiadacza praw autorskich.

ISBN 978-83-61314-55-4
ISSN 0209-0597

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl <http://www.wu.utp.edu.pl>

Wyd. I. Nakład 88 egz. Ark. aut. 9,53. Ark. druk. 10,25. Zamówienie nr 6/2013
Oddano do druku i druk ukończono w maju 2013
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	5
1. WPROWADZENIE	7
1.1. Uwagi ogólne	7
1.2. Charakterystyka procesu obróbki ECM	9
1.3. Stan zagadnienia	15
1.4. Cel i zakres pracy	20
2. OBRÓBKA ECM POWIERZCHNI KSZTAŁTOWYCH	24
2.1. Modelowanie procesu obróbki ECM powierzchni kształtowych.....	24
2.1.1. Ewolucja kształtu przedmiotu obrabianego w procesie obróbki ECM.....	26
2.1.2. Procesy fizykochemiczne w obróbce ECM	30
2.1.3. Równania ruchu ośrodka wielofazowego w szczelinie międzyelektrodowej	39
3. OBRÓBKA ECM KRZYWOLINIOWYCH POWIERZCHNI OBROTOWYCH.....	44
3.1. Wprowadzenie	44
3.2. Modelowanie matematyczne procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych	46
3.2.1. Równanie ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego dla powierzchni obrotowych	46
3.2.2. Konfiguracja pola przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej	50
3.2.3. Równania ruchu mieszaniny elektrolitu i wodoru w krzywoli- niowym układzie współrzędnych.....	53
3.2.4. Warunki brzegowe	58
3.2.5. Analiza pola koncentracji fazy gazowej w szczelinie między- elektrodowej	59
3.2.6. Metody rozwiązywania równań ruchu mieszaniny elektrolitu i wodoru	61
3.2.7. Całki równań ruchu – przepływ osiowosymetryczny	64
3.2.8. Całki równania ciągłości przepływu gazu w szczelinie między- elektrodowej	69
4. MODELOWANIE NUMERYCZNE PROCESU OBRÓBKI ECM POWIERZCHNI OBROTOWYCH	71
4.1. Metoda numeryczna rozwiązywania równania ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego	71
4.2. Metoda numeryczna rozwiązywania równania energii	73
4.3. Projektowanie geometrii elektrody roboczej	78
4.4. Ogólny algorytm symulacji procesu obróbki ECM	79
4.5. Algorytm projektowania elektrody roboczej metodą korekcji	83

5. OPIS PROGRAMU KOMPUTEROWEGO SYMULACJI PROCESU OBRÓBKİ ECM POWIERZCHNI OBROTOWYCH	86
6. SYMULACJE NUMERYCZNE OBRÓBKİ ECM POWIERZCHNI OBROTOWYCH	93
6.1. Obróbka ECM nieruchomej powierzchni obrotowej	95
6.1.1. Rozkłady wybranych parametrów obróbki elektrochemicznej.....	95
6.2. Obróbka ECM wirującej powierzchni obrotowej.....	99
6.2.1. Rozkłady wybranych parametrów obróbki elektrochemicznej.....	99
6.3. Obróbka ECM drgającej powierzchni obrotowej.....	102
6.3.1. Rozkłady wybranych parametrów obróbki elektrochemicznej.....	103
6.4. Obróbka ECM wirującej i drgającej powierzchni obrotowej.....	105
6.4.1. Rozkłady wybranych parametrów obróbki elektrochemicznej.....	105
6.5. Obróbka ECM drgającej skrętnie powierzchni obrotowej	107
6.5.1. Rozkłady wybranych parametrów obróbki elektrochemicznej.....	107
6.6. Analiza teoretyczna dokładności i wydajności obróbki ECM powierzchni obrotowych	110
6.7. Analiza numeryczna wpływu parametrów dyskretyzacji szczeliny międzyelektrodowej oraz czasu obróbki	112
7. BADANIA DOŚWIADCZALNE	114
7.1. Wprowadzenie i cel badań	114
7.2. Opis stanowiska badawczego	115
7.3. Cechy geometryczne i materiałowe elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego.....	122
7.4. Badania weryfikacyjne	123
8. PODSUMOWANIE.....	131
9. LITERATURA	135
10. ANEKS	147
Streszczenia	161

Wykaz ważniejszych oznaczeń

a	– współczynnik dyfuzyjności termicznej,
a_T	– współczynnik turbulentnej dyfuzyjności termicznej,
A	– amplituda drgań elektrody,
c_p	– ciepło właściwe,
E_A, E_K	– potencjały przedmiotu obrabianego i elektrody roboczej,
$\mathbf{g}$	– wektor siły masowej (siły grawitacji),
h	– grubość szczeliny międzyelektrodowej,
j	– gęstość prądu,
k_H	– równoważnik elektrochemiczny objętościowy wodoru,
k_V	– współczynnik obrabialności elektrochemicznej,
Ma	– liczba Macha,
p	– ciśnienie,
p_w	– ciśnienie elektrolitu na wlocie do szczeliny międzyelektrodowej,
p_z	– ciśnienie elektrolitu na wylocie ze szczeliny międzyelektrodowej,
Q	– natężenie objętościowe przepływu (strumień objętości),
$R(x)$	– promień powierzchni elektrody roboczej,
R_w	– promień powierzchni elektrody roboczej odniesiony do wlotu,
R_z	– promień powierzchni elektrody roboczej odniesiony do wylotu,
Re	– liczba Reynoldsa,
R_H	– stała gazowa wodoru,
t	– czas,
T	– temperatura,
U	– napięcie robocze między elektrodami,
u	– potencjał skalarny pola elektrycznego,
v_f	– prędkość ruchu posuwowego elektrody roboczej,
v_n	– prędkość roztwarzania normalna do powierzchni,
$\mathbf{V}$	– wektor prędkości przepływu elektrolitu,
v_x, v_y, v_θ	– składowe prędkości przepływu elektrolitu,
$\mathbf{W}$	– wektor prędkości przepływu gazu,
w_x, w_y, w_θ	– składowe prędkości przepływu gazu,
X, Y, Z	– kartezjański globalny układ współrzędnych,
R, θ, Z	– cylindryczny globalny układ współrzędnych,
x, θ, y	– krzywoliniowy układ współrzędnych,
x_w	– współrzędna położenia wlotu do szczeliny międzyelektrodowej,
x_z	– współrzędna położenia wylotu ze szczeliny międzyelektrodowej,
α	– cieplny współczynnik przewodności elektrycznej,
β	– koncentracja objętościowa gazu w elektrolicie,
η	– wydajność prądowa procesu roztwarzania,
κ	– przewodność elektryczna elektrolitu (konduktywność elektrolitu),
λ	– przewodność cieplna elektrolitu,
μ	– dynamiczny współczynnik lepkości,
ν	– kinematyczny współczynnik lepkości,
ρ	– gęstość,
τ	– naprężenie styczne wywołane przepływem ośrodka,
ω	– częstość kołowa drgań elektrody.

Indeksy dolne:

A	– dotyczy anody,
e	– dotyczy elektrolitu,
g	– dotyczy gazu,
H	– dotyczy wodoru,
i, j	– dotyczy katody,
o	– dotyczy tlenu,
p	– dotyczy produktów roztwarzania,
s	– dotyczy ścianki (powierzchni anody i katody),
w	– dotyczy wlotu do szczeliny,
z	– dotyczy wylotu ze szczeliny.

Indeksy górne:

O	– dotyczy wartości początkowych,
n, k	– dotyczy obliczeń iteracyjnych.

Skróty:

ECM	– obróbka elektrochemiczna,
ER	– elektroda robocza,
PO	– przedmiot obrabiany,
PR	– przybliżenie Reynoldsa,
PECM	– obróbka elektrochemiczna impulsowa,
SM	– szczelina międzyelektrodowa,
SK	– stan krytyczny,
SU	– stan ustalony,
WSO	– wpływ sił odśrodkowych,
WSOW	– wpływ sił odśrodkowych i wzdłużnych.

1. WPROWADZENIE

1.1. UWAGI OGÓLNE

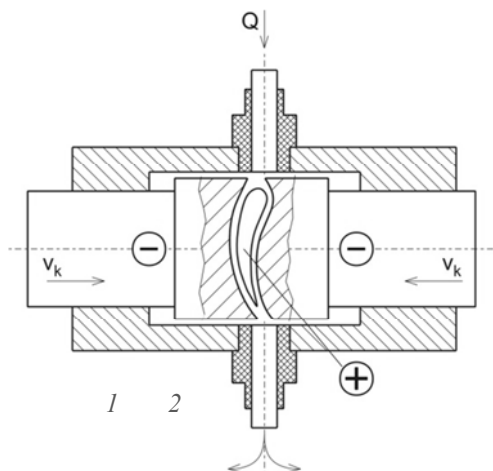
Gwałtowny rozwój cywilizacji pociąga za sobą dynamiczny rozwój nauki, techniki, przemysłu i technologii. Intensywny rozwój inżynierii materiałowej powoduje, że pojawiło się szereg materiałów o specjalnych właściwościach jak stopy: tytanu, żaroodporne oraz stale: narzędziowe, nierdzewne, węgliki spiekane, materiały kompozytowe itp. Są to tworzywa konstrukcyjne charakteryzujące się wysokimi właściwościami mechanicznymi (wytrzymałością doraźną i zmęczeniową, twardością, odpornością na ścieranie, odpornością na korozję, na działanie wysokich temperatur itp.). Wspólną cechą tych materiałów, jest ich wyjątkowo trudna obrabialność wynikająca z ich własności i właściwości [205].

Technologia obróbki takich materiałów jest zazwyczaj bardzo pracochłonna i zwykle bywa nieekonomiczna. Zastosowanie do ich obróbki konwencjonalnych narzędzi skrawających jednoostrzowych lub wielostrzowych nie pozwala na skuteczną obróbkę. Problem obróbki łagodzi zastosowanie w takich przypadkach narzędzi ściernych wykonanych z materiałów o wysokich właściwościach skrawnych (np. diamentu, sześciennego azotku boru), lecz go nie rozwiązuje. Wiąże się to z wysokimi kosztami wytworzenia odpowiednich narzędzi, co staje się nieekonomiczne.

Kłopoty z obróbką materiałów trudnoobrabialnych rozwiązuje zastosowanie niekonwencjonalnych metod obróbki, do których zalicza się obróbki erozyjne. Są to najskuteczniejsze i najbardziej efektywne metody obróbki materiałów trudnoobrabialnych. Zaletą ich jest wysoka wydajność zdejmowania nadmiaru obróbkowego.

Do grupy obróbek erozyjnych zalicza się obróbkę elektrochemiczną [4, 42, 105, 115, 162, 163]. Obróbka elektrochemiczna (ECM) jest efektywną metodą obróbki części o złożonych kształtach wykonywanych z materiałów trudnoskrawalnych (łopatek silników turbodoładowych, łopatek turbin parowych, dysków turbin i turbopomp, matryc, wykrojników zwłaszcza z węglików spiekanych, kokili, implantów chirurgicznych, pocisków artyleryjskich, itp.) [14, 16, 27, 28, 49, 70, 117, 148, 161, 189].

W obróbce elektrochemicznej kształtowanie materiałów odbywa się poprzez anodowe roztwarzanie [42, 104, 103, 115, 163]. Istota obróbki w ogólności polega na tym, że w procesie ECM przedmiot obrabiany (PO) jest elektrodą dodatnią (anodą), a narzędzie (ER) elektrodą ujemną (katodą). Przestrzeń między anodą a katodą wypełnia ośrodek przewodzący elektrycznie (elektrolit). Przepływ prądu między elektrodami wywołuje proces anodowego roztwarzania, powodując usuwanie materiału z anody (przedmiotu obrabianego) (rys. 1.1). Dobierając w procesie obróbki elektrochemicznej odpowiednio: materiał anody, katody, elektrolit i parametry obróbki można stworzyć takie warunki, które umożliwiają uzyskanie wysokiej wydajności procesu i gładkości powierzchni.



Rys. 1.1. Przykład obróbki elektrochemicznej (drażenie łopatki turbiny maszyny przepływowej):
1 – elektroda robocza (katoda), 2 – łopatka (anoda)

Obróbka elektrochemiczna ma szereg zalet, ale również niepozbawiona jest wad. [42, 115, 163] Wśród zalet obróbki elektrochemicznej należy wymienić przede wszystkim możliwość obróbki materiałów konstrukcyjnych bez względu na ich twardość, możliwość wytwarzania elementów o skomplikowanej geometrii, brak zużycia narzędzia (elektrody roboczej), dużą wydajność procesu, dobrą jakość powierzchni obrabianej oraz brak istotnych zmian w warstwie wierzchniej (obróbka niskotemperaturowa). Do wad obróbki należy zaliczyć wysoki koszt urządzenia (obrabiarki) i oprzyrządowania, wysoką energochłonność procesu, aspekty ekologiczne związane z utylizacją zużytych cieczy roboczych.

Obróbka elektrochemiczna bardzo często traktowana jako obróbka wykańczająca wykorzystywana jest dla poprawy makro-i mikrogeometrii części i elementów wstępnie wykonanych innymi metodami [2, 8, 22, 47, 111].

Zmiana kształtu i wymiarów przedmiotu obrabianego (PO) w procesie obróbki ECM jest spowodowana generowanym przez roztworzenie elektrochemiczne zmiennym polem: prędkości, ciśnienia, temperatury, gęstości prądu, koncentracji pojawiających się w szczeliny międzyelektrodowej gazów a także reakcjami chemicznymi oraz procesami elektrodowymi. Występujące w szczeliny międzyelektrodowej złożone procesy fizykochemiczne, skomplikowany często kształt obrabianych powierzchni powoduje, że proces obróbki ECM ma charakter procesu trójwymiarowego. Należy zauważyć, że w większości przypadków problem trójwymiarowości zagadnienia upraszcza się bądź do obróbki ECM traktowanej jako proces jednowymiarowy [20, 42, 163], ewentualnie dwuwymiarowy [10, 24, 39, 40, 197, 199]. Za pomocą takich modeli procesu obróbki ECM określa się kształt powierzchni elektrody roboczej, a następnie kształt przedmiotu obrabianego (PO) w zadanej płaszczyźnie (przekroju). Zakładając że obrabiany przedmiot jest przestrzennie złożonym elementem, przechodząc do kolejnych przekrojów wyznaczających pole obróbki jednowymiarowe, czasem dwuwymiarowe, świadomie pomija się zjawiska towarzyszące trzeciemu wymiarowi. Prowadzi to zazwyczaj do istotnych błędów tego typu symulacji. Efektem zatem są niezbędne korekty związane z projektowaniem elektrody roboczej, wydłużające proces obróbki ECM i w konsekwencji obniżenie wydajności procesu roztworzenia elektrochemicznego.

1.2. CHARAKTERYSTYKA PROCESU OBRÓBKİ ECM

Obróbkę elektrochemiczną można ogólnie podzielić na trzy charakterystyczne metody obróbki: elektrochemiczną bezstykową, elektrochemiczną-mechaniczną oraz tzw. obróbkę kombinowaną (elektro-fizykochemiczne) [163, 183]. Należy zaznaczyć, że dla zrealizowania obróbki elektrochemicznej we wszystkich wymienionych metodach obróbki możliwe jest zastosowanie zasilania układu elektroda-przedmiot obrabiany prądem stałym, tętniącym lub impulsowym, a także synchronizacja ruchu elektrod z zadanymi impulsami napięcia roboczego [65, 66-67, 154]. Dodatkowo na ruch posuwowy elektrody roboczej lub przedmiotu obrabianego (PO) nakłada się ruch drgający o zadanej amplitudzie i częstotliwości [97, 158, 164-166, 184, 185, 201].

Najbardziej rozpowszechnioną metodą obróbki ECM jest tzw. obróbka elektrochemiczna bezstykowa nazywana obróbką kształtową [4, 20, 39-40, 42, 84, 110, 163, 199]. Podstawowe sposoby obróbki elektrochemicznej bezstykowej to drażnienie elektrochemiczne wykonywane elektrodą kształtową, toczenie elektrochemiczne oraz frezowanie elektrochemiczne [30, 42, 54, 64, 74, 85-89, 90-102, 110, 118-119, 131-142, 148, 163, 171-182].

Obróbka elektrochemiczna opatentowana została przez W.N. Gusiewa już w 1928 roku [55], a więc długo przed II wojną światową. Należy jednak podkreślić, że pierwsze próby przemysłowe zastosowania patentu Gusiewa miały miejsce dopiero po II wojnie światowej. Już wówczas podejmowano próby skutecznego rozwiązywania problemów obróbki materiałów trudnoobrabialnych.

Rozwój i zastosowanie obróbki elektrochemicznej bezstykowej (ECM) wymagał szczegółowego poznania i opanowania procesu. Pierwsze prace na temat ECM znane są od ponad 50 lat [1, 4-5, 43-45, 82-84, 106, 119, 120, 127, 129, 193-195, 203]. Początkowo sprowadzały się do określenia zasadniczych charakterystycznych wskaźników, parametrów obróbki, bez analizy zjawisk fizycznych charakteryzujących ten proces [120]. Z początkiem lat 70 ubiegłego stulecia nastąpił okres intensywnych badań obejmujących zagadnienia konstrukcyjne i technologiczne ECM [77, 106, 115, 203]. Wprawdzie początkowo prace odnosiły się zazwyczaj do konkretnych rozwiązań technologicznych, co owocowało dużą ilością patentów opisujących konstrukcje przyrządów, obrabiarek, sposobu obróbki ECM, to należy również zauważyć zainteresowanie problematyką ECM na poziomie naukowym. Pojawiło się szereg prac o charakterze poznawczym, dotyczących procesu ECM. Najważniejszym zagadnieniem pozwalającym na rozwój ECM było i jest wnikliwe poznanie natury zjawisk fizycznych zachodzących podczas obróbki elektrochemicznej tak, aby uzyskać w istocie żądany kształt przedmiotu obrabianego (PO), minimalizować rozrzut odchylek, a także zwiększać stopień powtarzalności wskaźników użytkowych obróbki.

Na podstawie badań doświadczalnych ECM prowadzonych przez szereg lat można wysnuć wniosek, że proces obróbki elektrochemicznej stwarza wiele problemów niewystępujących w obróbkach klasycznych. Problemy te zauważa się zwłaszcza, gdy wnika się w fizykę zjawisk generowanych przez proces ECM (zmienne własności i właściwości elektrolitu, procesy elektrodowe, przenoszenie ładunku elektrycznego, wymianę masy i energii, hydrodynamikę przepływu elektrolitu). Zatem nadal prowadzone badania teoretyczne i doświadczalne procesu ECM dają szansę na optymalny dobór wartości parametrów, które mogą zapewnić wysokie wskaźniki użytkowe i ekonomiczne, uniemożliwiając pojawienie się tzw. stanów krytycznych (SK), w których następuje przerwanie obróbki i najczęściej zniszczenie elektrody roboczej.

Proces obróbki ECM z uwagi na wskaźniki użytkowe prowadzony jest przy dużych wartościach gęstości prądu (najczęściej powyżej $10 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$) i niskim napięciu (8-20 V). Wyjątkiem może być drażnienie głębokich otworów w wodnych roztworach kwasów. Wtedy napięcie dochodzi nawet do kilkuset woltów. Uzyskanie skutecznego, wydajnego roztwarzania elektrochemicznego wymaga zastosowania, mając na uwadze rodzaj elektrolitu, jego przewodność elektryczną, małych szczelin między elektrodami (najczęściej poniżej 0,5 mm). Stabilność procesu ECM wymusza konieczność intensywnego przepłukiwania szczeliny międzyelektrodowej (SM). Oznacza to, że przepływ elektrolitu realizowany jest w sposób wymuszony, albo przy zachowaniu stałej wartości różnicy ciśnień między wlotem a wylotem, albo stałej wartości natężenia przepływu. Zbyt mała szczelina międzyelektrodowa (poniżej 0,1 mm) w procesie ciągłym ECM stwarza problemy z usuwaniem produktów roztwarzania. Możliwość zmniejszenia grubości szczeliny istnieje, gdy obróbka ECM odbywa się poprzez zasilanie impulsowe (PECM), tj. gdy napięcie podawane jest w postaci impulsów o zadanych kształtach, amplitudach, czasie trwania impulsu, czasie przerw. Czas przerwy, a także odpowiednia kinematyka elektrod pozwala na efektywne usuwanie produktów roztwarzania elektrochemicznego [34, 35, 157, 158, 185].

Cechą charakterystyczną procesu ECM jest zdolność do samoregulacji. Oznacza to, że po pewnym czasie obróbki proces ECM stabilizuje się samoistnie. Ustalają się: kształt przedmiotu obrabianego (PO) i parametry pól fizycznych tego procesu.

Problemy wymagające rozwiązania przez technologię procesu to:

- dobór elektrolitu,
- dobór właściwego kształtu elektrody roboczej,
- dobór parametrów obróbki.

Obróbka ECM to proces wielowymiarowy, wieloparametrowy, stąd nadal istnieje konieczność doskonalenia badań zarówno doświadczalnych, jak i teoretycznych tego problemu.

Dobór parametrów obróbki wymaga przeprowadzenia symulacji komputerowych, aby określić zarówno czas niezbędny do ustabilizowania się obróbki ECM (uzyskania stanu ustalonego-stacjonarnego obróbki), jak i sprawdzić czy zaprojektowany kształt elektrody roboczej odpowiada oczekiwanemu profilowi przedmiotu obrabianego (PO) [20, 29, 78, 56-58, 80-81, 84, 98, 110, 121-122, 125, 145, 152-153, 155, 186, 188, 194]. Proces obróbki ECM wymaga także określenia podstawowych charakterystyk procesu roztwarzania, tj. współczynnika obrabialności k_V lub sprawności prądowej oraz polaryzacji elektrod E_A i E_K zależnych od parametrów obróbki. Znana jest metodyka badań doświadczalnych pozwalających określić powyższe współczynniki [12, 13, 76, 112].

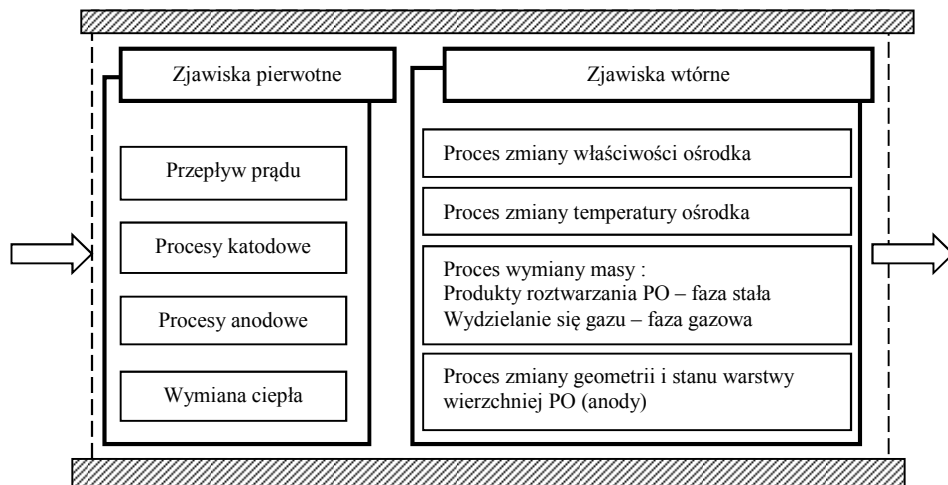
Struktura wewnętrzna procesu ECM obejmuje zjawiska fizyczne zachodzące w szczelinie międzyelektrodowej powiązane ściśle z układem katoda-elektrolit-anoda [20, 42, 84, 110, 160, 163].

Na strukturę wewnętrzną procesu ECM mają wpływ:

- procesy elektrodowe,
- mechanika przepływu ośrodka (elektrolitu i wodoru oraz produktów roztwarzania),
- procesy wymiany masy (produkty roztwarzania, wydzielający się gaz),
- procesy przenoszenia ładunku elektrycznego,
- procesy cieplne,
- procesy zmiany właściwości ośrodka, procesy zmiany geometrii i stanu warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego (PO).

Schemat struktury wewnętrznej przedstawiono na rysunku 1.2.

Obróbka elektrochemiczna to proces, w którym - doprowadzona z zewnątrz do układu - katoda-elektrolit-anoda energia elektryczna zamienia się w energię chemiczną przy znaczących wartościach gęstości prądu. Powoduje to roztrawianie anody, tworzenie się tlenków i wodorotlenków metalu usuwanych przez przepływający elektrolit.



Rys. 1.2. Schemat struktury wewnętrznej ECM

Istotne w obróbce elektrochemicznej są tzw. procesy elektrodowe (reakcje zachodzące na elektrodach), które obejmują:

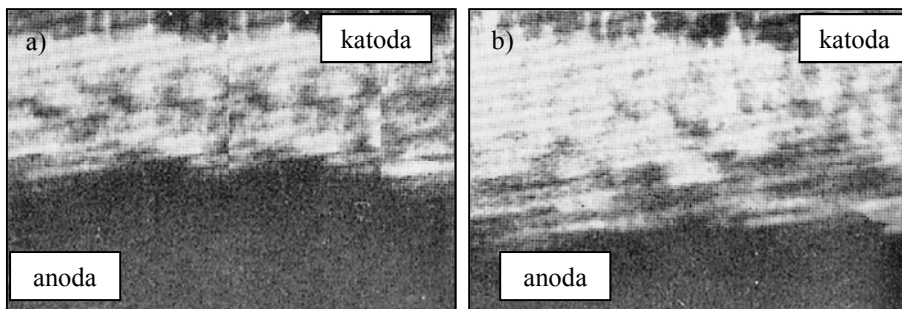
- roztrawianie i tworzenie się warstw tlenkowych i wydzielanie gazów na anodzie,
- wydzielanie się gazów i produktów stałych na katodzie,
- spadek potencjału w warstwach przeelektrodowych,
- wydzielanie ciepła w pojawiających się warstwach tlenkowych.

Dla konkretnego zestawu metal-elektrolit, procesy elektrodowe opisują dwa charakterystyczne parametry: współczynnik obrabialności elektrochemicznej k_V lub sprawność prądowa η oraz współczynniki polaryzacji elektrod E_A i E_K .

Złożoność procesu fizycznego ECM utrudnia teoretyczne wyznaczenie lub prognozowanie cech danego układu metal-elektrolit [17, 20, 83, 105, 110]. Najczęściej wyznaczenie charakterystyk i współczynników odbywa się metodami eksperymentalnymi [61, 62].

Wymuszony przepływ elektrolitu pozwala na odprowadzanie z obszaru szczeliny międzyelektrodowej produktów obróbki (cząsteczek H_2 z powierzchni katody, jony metalu, czasem cząsteczki O_2 , a także nieroztworzone cząstki metalu z powierzchni anody). Bywa czasem, że w warunkach wrzenia powierzchniowego również pęcherzyki pary wodnej. Można powiedzieć, że w szczelinie międzyelektrodowej powstaje przepływ wielofazowy (ciecz, produkty roztrawiania elektrochemicznego: wodór, tlen, para wodna, jony i cząstki metalu). Ponadto przepływ taki jest trójwymiarowy o zmiennych w czasie i przestrzeni współczynnikach ośrodka. Strukturę wielofazowego przepływu ośrodka w szczelinie międzyelektrodowej przedstawił J. Kozak w pracy [84] stwierdzając, że teoretycznie można tego rodzaju przepływy opisać jedynie, czyniąc istotne uproszczenia.

Można powiedzieć, że spostrzeżenia J. Kozaka nadal są aktualne. Poniżej pokazano zdjęcia wykonane w poprzek szczeliny międzyelektrodowej przedstawiające strukturę przepływu w różnych jego obszarach przepływu [120].



Rys. 1.3. Struktura przepływu mieszaniny elektrolitu i gazu w obróbce ECM: a) 20 mm od wlotu do SM, b) 180 mm od wlotu do SM, grubość SM – 0,75 mm, elektrolit – chlorek sodu, napięcie $U = 10$ V

Przepływ w szczelinie międzyelektrodowej może mieć charakter zarówno laminarny, jak i turbulentny. Rozpatrując przepływ elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej można w obszarze przepływu wyróżnić [84]:

- przepływ z oderwaniem (wzrasta prędkość elektrolitu, spada ciśnienie, najczęściej do ciśnienia wrzenia w danej temperaturze elektrolitu i pojawia się kawitacja),
- oderwanie w płaszczyźnie prostopadłej (tzw. rozdzielanie taflí elektrolitu na poszczególne strugi wynikające najczęściej ze źle dobranego przekroju wlotowego elektrolitu),
- rezonans hydrodynamiczno-elektrochemiczny (zjawisko opisane przez J. Kozaka a polegające na sprzężeniu pól hydrodynamicznych z procesami dyfuzji i roztwarzania ECM).

Wszystkie te zjawiska są powodem pogorszenia się powierzchni przedmiotu obrabianego (PO). Na skutek kawitacji na powierzchni obrabianej pojawiają się charakterystyczne wżery. W przypadku źle dobranych przekrojów wlotów elektrolitu powstają charakterystyczne garby, tzw. ślady hydrodynamiczne. Rezonans hydrodynamiczno-elektrochemiczny powoduje, że na powierzchni obrabianej tworzy się struktura fałowa (garby, wgłębienia zarówno w kierunku poprzecznym jak i wzdłużnym do przepływu). Opisane zjawiska zwiększają prawdopodobieństwo wystąpień wyładowań iskrowych spowodowanych lokalnymi zmianami grubości szczeliny międzyelektrodowej.

Rzeczywiste warunki obróbki ECM powodując powstawanie gazów i produktów roztwarzania anody są źródłem dodatkowych zakłóceń procesu.

Pojawiający się na katodzie wodór po przesyleniu tworzy pęcherzyki gazu. Tuż przy katodzie powstaje strefa przepływu dwufazowego (elektrolit+pęcherzyki gazu). Strukturę takiego przepływu oraz mechanizm tworzenia się fazy gazowej przedstawiono w pracach [84, 110, 120, 196]. Powstanie fazy gazowej zdecydowanie pogarsza charakterystyki technologiczne procesu. Powodem są zmiany właściwości ośrodka, a w szczególności zmniejszenie przewodności elektrycznej. Z przeprowadzonych badań wizualizacyjnych przepływu elektrolitu i gazu [115, 204] wynika, że przy znacznych prędkościach przepływu ze wzrostem gęstości prądu średnice pęcherzyków gazu maleją, na-

tomiast przy małych prędkościach ze wzrostem gęstości prądu, średnice pęcherzyków rosną. W licznych pracach [84, 87, 110, 204] stwierdzono, że strefa przepływu dwufazowego ma postać klina, który na pewnej długości styka się z anodą. Należy podkreślić, że rzeczywista koncentracja gazu w strefie dwufazowej nie jest jednoznacznie określona. Maksymalna koncentracja gazu, zdaniem autorów [20, 84, 86, 110] wynosi 0,3-0,5. Dalszy wzrost koncentracji gazu prowadzi do wzrostu temperatury w pobliżu katody powodując wrzenie powierzchniowe [20, 84, 106, 110]. Tego typu zjawiska wywołują zwarcia i przerwanie obróbki (SK).

Jony metalu anody na skutek reakcji chemicznych powodują powstawanie w roztworze elektrolitu nierozpuszczalnych wodorotlenków, które tworzą galaretkowatą zawiesinę (tzw. szlam). Częsteczki zawiesiny koagulują, tworząc większe skupiska o rozbudowanej powierzchni. Prędkość koagulacji zależy od koncentracji szlamu w elektrolicie i jego prędkości przepływu. Wzrost koncentracji szlamu powoduje: niewielkie zmiany przewodności elektrycznej elektrolitu, wzrost lepkości, zmniejszenie prędkości przepływu, zmniejszenie przewodnictwa cieplnego a tym samym wzrost temperatury elektrolitu oraz elektrod [1]. Występujący zbyt duży spadek prędkości przepływu elektrolitu powoduje zaleganie szlamu na powierzchniach elektrod. Jest to zjawisko niekorzystne, zwłaszcza gdy szczeliny obróbkowe są długie. Istnieje niebezpieczeństwo zatrzymania przepływu elektrolitu. Krytyczne koncentracje szlamu, przy których nastąpiło zatrzymanie przepływu podano w pracach [1,110]. Koagulujące cząsteczki szlamu mogą tworzyć przewodzące lub nieprzewodzące tzw. mostki będące przyczyną lokalnych zwarc elektrod (SK).

Istotnym parametrem procesu roztwarzania elektrochemicznego przedmiotu obrabianego (PO) tj. anody jest rozkład prędkości roztwarzania, który na mocy prawa Faradaya wyznacza zależność [42, 48, 115, 163]

$$v_n = k_V j_A \quad (1.1)$$

gdzie:

- k_V – współczynnik roztwarzania elektrochemicznego,
- j_A – gęstość prądu w punkcie A na powierzchni anody.

Znajomość prędkości roztwarzania pozwala na kontrolę procesu obróbki, a tym samym na symulację tego procesu.

Do wyznaczenia prędkości roztwarzania anody konieczna jest znajomość rozkładów potencjałów pola elektrycznego między elektrodami a także przewodności elektrycznej ośrodka.

Rozkład gęstości prądu na powierzchniach elektrod w trakcie obróbki elektrochemicznej ma charakter zmienny w czasie.

Zewnętrzne pole elektryczne powoduje przepływ prądu między elektrodami, a co za tym idzie wydzielanie się ciepła Joule'a. Ciepło Joule'a powoduje przyrost temperatury ośrodka i powierzchni elektrod [3, 20, 84, 110, 199]. Można powiedzieć, że to procesy wymiany masy, pędu i energii oraz geometria szczeliny decydują o polu temperatury w obszarze ograniczonym powierzchniami elektrod. Proces ECM istotnie zależy od rozkładu temperatury, bowiem to właściwości fizyczne ośrodka oraz kinetyka procesów elektrodowych są funkcjami temperatury. W przypadku wysokiej polaryzacji elektrod wzrasta temperatura powierzchni elektrod powodując tzw. wrzenie powierzchni, niestabilności termokinetyczne [37, 52, 75]. Wzrost z kolei temperatury ośrodka (np.

NaNO_3) dla przypadku, gdy współczynnik obrabialności elektrochemicznej k_V maleje może doprowadzić do zwarć, a więc tzw. stanów krytycznych (SK). Rozkład temperatury w szczelinie międzyelektrodowej wynika z zasady zachowania energii i sprowadza się w konsekwencji do rozwiązania równania przewodnictwa cieplnego [74, 84, 110].

Bardzo istotnym problemem charakterystycznym dla obróbki elektrochemicznej jest zdolność do samoregulacji procesu. Samoregulacja procesu wiąże się ze spadkiem prędkości roztwarzania, gdy szczelina międzyelektrodowa rośnie i odwrotnie. W przypadku rzeczywistego procesu ECM prędkość roztwarzania anody w zależności od grubości szczeliny międzyelektrodowej ma charakter nieliniowy i niemonotoniczny [18, 20, 84, 110]. Przyczyną nieliniowości i niemonotoniczności są niestabilności termodynamiczne procesu ECM. Utrata samoregulacji prowadzi do wzrostu temperatury elektrolitu, powodując jego wrzenie, zwarcia i w konsekwencji przerwanie procesu obróbki. Zagadnienia stabilności procesu ECM przedstawiono w pracach [84, 110].

Obróbkę elektrochemiczną charakteryzują także wyładowania elektryczne oraz zwarcia elektrod. Główną przyczyną wyładowań elektrycznych jest utrata przewodnictwa elektrycznego elektrolitu. Podczas obróbki mogą powstawać warstwy parowogazowe, nieprzewodzące błonki tlenkowe, wywołując przy odpowiednio dużym natężeniu wyładowania iskrowe lub łukowe. Zwarcia w procesie ECM zazwyczaj poprzedzone są wyładowaniami elektrycznymi. Mogą występować jako mechaniczne zetknięcia elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego (PO) lub poprzez przewodzące produkty roztwarzania nieusunięte ze szczeliny międzyelektrodowej.

Znane są liczne prace w których autorzy badają doświadczalnie zjawiska wyładowań i zwarć w szczelinie międzyelektrodowej [15, 108-109, 159]. Analiza tych prac prowadzi do wniosku, że pojawienie się wyładowania wiąże się ściśle z powstaniem błonki gazowej na katodzie. Przekroczenie pewnej krytycznej wartości gęstości prądu inicjuje zjawiska charakterystyczne dla przepływu prądu przez gazy [109]. Szczegółowo zjawisko wyładowań elektrycznych i zwarć w szczelinie międzyelektrodowej opisuje praca [110].

Dynamika procesu ECM wymusza zastosowanie komputerowego systemu projektowania i sterowania obróbką. Zasadniczym elementem systemu komputerowego jest algorytm oparty na analizie i teoretycznym modelowaniu procesu obróbki elektrochemicznej.

Analiza teoretyczna kształtowania powierzchni w obróbce ECM obejmuje następujące zagadnienia:

- analizę zmiany kształtu przedmiotu obrabianego (PO) w czasie,
- wyznaczenie kształtu końcowego przedmiotu obrabianego (PO),
- wyznaczenie geometrii elektrody roboczej dla uzyskaniażądanego kształtu przedmiotu obrabianego (PO),
- optymalizację warunków procesu ze względu na minimalizację błędów kształtu przedmiotu obrabianego PO,
- poszukiwanie nowych sposobów umożliwiających poprawę dokładności obróbki.

Rozwiązanie powyższych zagadnień wymaga więc kompleksowej analizy zjawisk fizycznych, jakie występują w procesie kształtowania elektrochemicznego powierzchni obróbką ECM. Znaczna liczba parametrów sterujących procesem ECM, zakłócających ten proces, a także bardzo często wzajemnie zależnych utrudnia sformułowanie ogólnej uwzględniającej rzeczywiste warunki fizyczne procesu teorii obróbki ECM.

1.3. STAN ZAGADNIENIA

Obecnie można wyróżnić dwa kierunki rozwoju metod obróbki elektrochemicznej [199]:

- elektrochemiczną bezstykową,
- elektrochemiczną hybrydową tj. elektrochemiczno-mechaniczną lub elektro-fizykochemiczną.

Najbardziej rozpowszechnioną odmianą obróbki elektrochemicznej jest obróbka elektrochemiczna bezstykowa (tzw. drażnienie elektrochemiczne). Kształt końcowy obrabianego przedmiotu uzyskiwany jest poprzez odwzorowanie kształtu i wymiarów elektrody roboczej. Obróbka elektrochemiczna krzywoliniowych powierzchni obrotowych jest klasycznym przykładem drażnienia elektrochemicznego. Z uwagi na wzajemny ruch elektrody roboczej (ER) i przedmiotu obrabianego (PO) wyróżnia się trzy odmiany obróbki elektrochemicznej bezstykowej [42, 163, 183]:

- z ruchem postępowym katody lub anody (obróbka łopatek wirników silników lotniczych, drażnienie matryc, form i kokili, wykonywanie otworów czy wgłębień),
- z ruchem obrotowym katody lub anody (obróbka powierzchni czołowych i bocznych przedmiotów obrotowych, szlifowanie elektrochemiczne),
- z elektrodami nieruchomymi (usuwanie zadziórów, kalibrowanie otworów, wygładzanie powierzchni).

Analiza literatury dotyczy prac, których autorzy rozważają problematykę obróbki elektrochemicznej bezstykowej. Na podstawie analizy krajowych i zagranicznych prac dotyczących badań teoretycznych i doświadczalnych procesu obróbki ECM, należy stwierdzić, że liczba dostępnych prac podejmujących problematykę badania procesu obróbki elektrochemicznej bezstykowej jest dość duża.

Dostępne autorowi prace można podzielić biorąc pod uwagę:

- stopień skomplikowania wykorzystanych w procesie modelowania matematycznego modeli obróbki ECM na prace oparte na wykorzystaniu modelu:
 - idealnego obróbki ECM tzn. bez uwzględniania zmiennych właściwości ośrodka wypełniającego szczelinę międzyelektrodową,
 - z uwzględnieniem częściowym właściwości ośrodka wypełniającego szczelinę międzyelektrodową lub innych parametrów,
 - z uwzględnieniem właściwości ośrodka wypełniającego szczelinę międzyelektrodową, przewodności elektrycznej ośrodka wielofazowego, polaryzacji a także wydajności prądowej.
- wymiarowość zaproponowanych modeli obróbki ECM w aspekcie przepływu ośrodka na prace oparte na wykorzystaniu modelu:
 - jednowymiarowego przepływu elektrolitu,
 - dwuwymiarowego przepływu elektrolitu,
 - trójwymiarowego przepływu elektrolitu,
- wymiarowość zaproponowanych modeli obróbki ECM w aspekcie zdefiniowanego równania ewolucji kształtu na:
 - zagadnienie dwuwymiarowe,
 - zagadnienie trójwymiarowe.
- założony rodzaj przepływu ośrodka w szczelinie międzyelektrodowej na:
 - laminarny,

- turbulentny,
- mieszany tzn. w pewnych obszarach szczeliny laminarny lub turbulentny.
- wzajemny ruch elektrody roboczej (ER) i przedmiotu obrabianego(PO):
 - z ruchem postępowym katody lub anody,
 - z ruchem obrotowym katody lub anody,
 - z ruchem drgającym katody lub anody,
 - z elektrodami nieruchomymi.

Historycznie, pierwsze prace, w których podjęto rozważania teoretyczne związane z modelowaniem obróbki ECM to prace wykorzystujące urządzenia analogowe, tzw. analizatory polowe [21, 82, 83]. Urządzenia analogowe, za pomocą których otrzymywane wyniki budziły wątpliwości, wyparły metody oparte na wykorzystaniu technik komputerowych.

Metody komputerowe stosowane do symulacji procesu obróbki ECM w latach 70. i 80. ubiegłego stulecia najczęściej wykorzystywano do rozwiązania tzw. modelu idealnego procesu obróbki ECM, tzn. zakładano niezmienność zarówno warunków obróbki jak i właściwości ośrodka wielofazowego w szczelinie międzyelektrodowej [107]. Bazując na modelu idealnym obróbki ECM dla wyznaczenia kształtu elektrod roboczych wykorzystywano sformułowane przez Tiptona prawo cosinusa lub sinusa (zależało to od definicji kąta między normalną lub styczną do powierzchni anody a kierunkiem ruchu elektrody roboczej) [194, 195]. Wykorzystanie modelu idealnego do wyznaczenia kształtu elektrod nie pozwalało na poprawne ich określenie. Wielu autorów chcąc precyzyjniej wyznaczyć kształt elektrod rozwiązywało tzw. odwrotne zagadnienie brzegowe dla równania Laplace’a, co prowadziło do korzystniejszych wyników [123,127].

Pojawiło się szereg prac poświęconych analizie obróbki ECM, w której autorzy definiując warunki stacjonarności procesu obróbki, a więc warunki praktycznego ustalenia się procesu ECM prowadzą rozważania na podstawie idealnego modelu procesu wyznaczając kształt elektrod [51, 82-84, 112, 123]. Uzyskane wyniki nie pozwalały niestety na wykorzystanie ich w praktyce, bowiem z uwagi na nieuwzględnienie warunków rzeczywistych panujących w szczelinie międzyelektrodowej budziły wątpliwości.

Liczne zastosowania obróbki ECM, konieczność precyzyjnego przygotowania produkcji, w tym projektowania elektrod dla obróbki ECM, wymusiło potrzebę opracowania bardziej dokładnych modeli obróbki ECM. Tę dokładność próbowano poprawić, uwzględniając w obliczeniach przybliżone warunki rzeczywiste panujące w szczelinie międzyelektrodowej. Pojawiły się prace uwzględniające w obliczeniach przewodność ośrodka wielofazowego, polaryzację, a także wydajność prądową [20-25, 85, 88, 90, 93, 95, 101]. W cytowanych pracach uwzględniano bądź przewodność elektryczną, bądź polaryzację elektrod lub wydajność prądową. Nieuwzględnianie wszystkich parametrów prowadziło również do istotnych niedokładności przyjętych do rozważań modeli obróbki ECM. W pracach [84, 108, 162] autorzy wzięli pod uwagę jedynie przewodność elektryczną ośrodka wielofazowego, natomiast prace [77, 123] pomijają przewodność ośrodka bądź to polaryzację, bądź wydajność prądową.

W literaturze istnieje szereg prac, w których autorzy podejmują próby przedstawienia tematyki komputerowego wspomaganie projektowania obróbki ECM najczęściej bardzo ogólnie, nie precyzując zastosowanych modeli fizycznych obróbki i przedstawiając bardzo często mało precyzyjne schematy blokowe dla proponowanych programów obliczeń [2, 9, 10, 116].

Na uwagę zasługują prace naukowe realizowane na Politechnice Warszawskiej zespołu pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Jerzego Kozaka [20-25, 82-102, 110, 111]. W szczególności prace monograficzne prof. dr hab. inż. Jerzego Kozaka [84], dr hab. inż. Lucjana Dąbrowskiego prof. PW [20], dr hab. inż. Konrada Łubkowskiego [110], w których przedstawiono podstawy teoretyczne kształtowania elektrochemicznego.

W pracy [84] przedstawiono zagadnienia teoretyczne geometrii powierzchni przedmiotu obrabianego (PO) i elektrody roboczej (ER), formułując modele matematyczne ECM, a ponadto wybrane zagadnienia impulsowej obróbki elektrochemicznej (PECM). Autor przedstawił algorytm precyzujące rozwiązanie modelu idealnego obróbki ECM uwzględniając zmiany temperatury, koncentracji fazy gazowej, a także polaryzacji elektrod. Wyprowadził uproszczone zależności opisujące pola temperatury, koncentracji fazy gazowej uściślające warunki fizyczne w szczelinie międzyelektrodowej. Sformułował funkcje kryterialne dla optymalizacji obróbki ECM. Analizując obróbkę impulsową (PECM), autor określił kryteria doboru czasu impulsu roboczego, rozkłady koncentracji fazy gazowej, temperatury, ciśnienia oraz gęstości prądu w czasie prostokątnego impulsu napięcia roboczego. Oszacowano siły dynamiczne działające na elektrody podczas obróbki impulsowej (PECM). Na uwagę zasługuje podany przez autora w pracy model procesu roztwarzania elektrochemicznego, uwzględniający niestacjonarną strukturę podwarstwy lepkiej pozwalający wyjaśnić fizyczne przyczyny powstawania w niekorzystnych warunkach obróbki defektów powierzchni obrobionej.

W pracy [20] rozpatrzono podstawowe zagadnienia obróbki ECM, obejmujące powiązania geometrii powierzchni obrabianej i elektrody roboczej oraz warunków procesu obróbki. Dla rozwiązania problemu użyto metod numerycznych kształtowania elektrochemicznego powierzchni formułując jednowymiarowe modele matematyczne procesu ECM uwzględniające zmiany właściwości ośrodka (gęstości i lepkości), konduktywności elektrycznej, polaryzację oraz wydajność prądową obróbki. Na podstawie przeprowadzonych analiz stworzono podstawy symulacji komputerowej obróbki ECM różnych operacji i odmian obróbki. W pracy zawarto wyniki symulacji komputerowej drążenia powierzchni walcowych i osiowosymetrycznych, wyrównywania elektrochemicznego nierówności powierzchni oraz obróbki elektrodą wirującą. Przedstawiono pakiet oprogramowania komputerowego obejmującego bazę danych i możliwe symulacje procesu ECM. Dla wybranych symulacji przeprowadzono weryfikację doświadczalną obróbki ECM stwierdzając, że odchyłki kształtu między wynikami symulacji komputerowych a wynikami doświadczeń są w granicach wymagań stawianych aktualnie w praktyce ECM.

Praca [110] poświęcona jest obróbce elektrochemicznej prądem stałym ECM i impulsowym (PECM) z parametrami obróbki prowadzącymi do występowania tzw. stanów krytycznych charakteryzujących się występowaniem wyładowań elektrycznych i zwarć elektrod. Opracowano modele fizyczne i matematyczne oraz program symulacji procesów. Do analizy badanych procesów sformułowano model jednowymiarowy, traktując przepływ elektrolitu jako homogeniczny o właściwościach uśrednionych w poprzek szczeliny międzyelektrodowej (SM) podobnie jak w pracach [20, 84] oraz model dwuwymiarowy, wykorzystując znane postaci zależności określających rozkłady prędkości w dwuwymiarowym homogenicznym przepływie laminarnym i turbulentnym w szczelinie, które następnie wykorzystano dla wyznaczenia rozkładu temperatury w poprzek i wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM). W modelu dwuwymiarowym uwzględniono przy obliczaniu temperatury przenoszenie ciepła pulsacjami turbulent-

nymi cieczy. W pracy przeprowadzono badania doświadczalne podstawowych charakterystyk obróbki, strat hydraulicznych przepływu, wylądowań elektrycznych w elektrolicie, doprowadzenie obróbki do wystąpienia stanów krytycznych. Na uwagę zasługuje wykrycie przez autora zjawiska występowania na powierzchni obrabianej strefy „przedzwarciowej” z charakterystyczną strukturą trudną obecnie do identyfikacji.

Prace [87, 89, 94] to prace zespołu prof. Kozaka, w których rozwijane są modele matematyczne obróbki ECM, algorytmy obliczeń i symulacje komputerowe. Autorzy przeprowadzają analizę wpływu wybranych parametrów na ewolucję kształtu przedmiotu obrabianego (PO). Metodologia modelowania zbliżona jest do opublikowanej w pracach [20, 84, 110].

Odminną grupę prac poświęconych modelowaniu obróbki ECM stanowią publikacje [39, 40, 78]. Autorzy tych prac podejmują trud modelowania obróbki ECM w ujęciu dwuwymiarowym. Opierając się na zasadach zachowania masy, pędu i energii w pracach tych przedstawiono uśrednione w poprzek szczeliny międzyelektrodowej układy równań opisujące przepływ ośrodka wielofazowego dla każdej z faz, tj. ciekłej i gazowej. Dokonując uproszczeń stosownych dla przepływów w cienkich warstwach, sformułowano równania ruchu mieszaniny cieczy i gazu. Do rozwiązania układu równań metodą różnic skończonych zastosowano schemat McCormacka. Wyniki obliczeń zilustrowano na wykresach rozkładów prędkości, ciśnienia, temperatury, koncentracji fazy gazowej w płaszczyźnie powierzchni obrabianych. Otrzymane wyniki porównano z wynikami badań eksperymentalnych. W pracy [40] przeprowadzono modelowanie jednowymiarowego przepływu ośrodka wielofazowego z rozdzieleniem faz, badając wpływ poślizgu między fazami na rozkłady parametry fizyczne przepływu.

W pracy [10, 11] autorzy uwzględniając zmienne warunki w szczelinie międzyelektrodowej (SM) podczas obróbki ECM, analizując występujące tam zjawiska podejmują próbę zaprojektowania elektrody roboczej. Do rozważań zakładają odpowiednio przepływ ośrodka traktując go jako przepływ pęcherzykowy dwufazowy, jednowymiarowy oraz jednofazowy, dwuwymiarowy. Obliczenia przeprowadzono zakładając przepływ laminarny. Wyniki zilustrowano na wykresach rozkładu koncentracji fazy gazowej, grubości szczeliny międzyelektrodowej (SM), ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO).

W pracy [197] rozpatrywano przepływ ośrodka wielofazowego w szczelinie międzyelektrodowej (SM) podczas obróbki elektrochemicznej. Rozważono jednowymiarowy przepływ mieszaniny zarówno stacjonarny jak i niestacjonarny, zakładając możliwość zmiany kierunku przepływu. Zagadnienie rozwiązano numerycznie metodą Godunowa. Opracowano algorytm rozwiązania zadania Riemanna pozwalający określić strumienie masy, pędu i energii poprzez granice siatki obliczeniowej. Dla określenia warunków brzegowych wykorzystano równanie Bernoulliego. Wyniki modelowania przedstawiono na wykresach rozkładów prędkości, ciśnienia, w funkcji czasu obróbki oraz rozkłady gęstości prądu wzdłuż krawędzi płaszczyzny obróbki.

W publikacji [198] przedstawiono analizę dwuwymiarowego przepływu mieszaniny w przestrzennych kanałach złożonej postaci. W takich przypadkach proces obróbki ECM może być stacjonarny lub niestacjonarny. Autor podobnie jak w pracy [197] wykorzystuje metodę Godunowa dla rozwiązania zagadnienia. Strumienie masy, pędu i energii określa poprzez jednowymiarowe rozwiązanie zadania Riemanna. Wyniki obliczeń przedstawia pokazując pole prędkości przepływu mieszaniny oraz ciśnienia i temperatury na powierzchni łopatki o zadanym zarysie.

W pracy [200] przedstawiono model kształtowania elektrochemicznego powierzchni o skomplikowanym kształcie. Do obliczeń wykorzystano metodę numeryczną opartą na schemacie upwind zastosowaną do metody objętości skończonych. Powierzchnię elektrody roboczej pokryto siatką trójkątnych elementów skończonych. Sformułowano równanie ewolucji kształtu powierzchni obrabianej dla rozważanej powierzchni a wyniki symulacji numerycznej przedstawiono, pokazując powierzchnię w widoku od góry i z boku przed i po obróbce. Należy podkreślić, że w modelowaniu tak skomplikowanej powierzchni nie uwzględniono hydrodynamiki przepływów ośrodków wielofazowego w szczelinie międzyelektrodowej (SM).

Przedmiotem pracy [199] są podstawy teoretyczne i metody analizy obróbki elektrochemicznej w ujęciu trójwymiarowym. W pracy sformułowano modele matematyczne i metody analizy ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO) w ujęciu dwu- i trójwymiarowym. Przeprowadzono analizę procesów fizykochemicznych charakterystycznych dla obróbki ECM powierzchni o skomplikowanych kształtach. Opracowano model i metodykę obliczeń dla obróbki impulsowej (PECM) powierzchni o skomplikowanych kształtach. Wyniki analiz teoretycznych i eksperymentalnych przedstawiono w postaci programów obróbki ECM, takich elementów jak stemple, form wtryskowe, itp. Należy podkreślić, że praca [199] jest wynikiem realizacji programu rosyjskich grantów dotyczących fundamentalnych rozwiązań problemów w obszarze budowy maszyn.

Praca [151] przedstawia zastosowanie metody elementów brzegowych (BEM) dla wyznaczenia ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO), (anody) w ujęciu trójwymiarowym. Bazując na modelu idealnym procesu obróbki ECM i wykorzystując metodę "marker" i BEM autorzy przedstawiają wyniki symulacji w postaci rozkładów gęstości prądu wzdłuż anody i katody, ostatecznego kształtu profilu przedmiotu obrabianego (PO). Zaznaczają, że od właściwej dyskretyzacji powierzchni zależy dokładność uzyskanego rozwiązania (kształtu przedmiotu obrabianego).

W kolejnej pracy [7] przedstawiono zdaniem autorów przyjazny software 3D ECM wykorzystujący sposób modelowania obróbki podobny jak w pracy [151] tzn. w obliczeniach zastosowano zarówno metodę elementów brzegowych BEM, jak i metodę elementów skończonych FEM, pokazując: okno programu z obiektem poddanym obróbce, okno przedstawiające naniesioną na przedmiot obrabiany (PO) i elektrodę siatkę obliczeniową, okno pokazujące wprowadzone warunki brzegowe oraz wynik symulacji, tj. przedmiot obrabiany (PO) po obróbce, a także rozkład gęstości prądu. Autorzy zaznaczają, że przedstawiony software 3D ECM jest kompatybilny z pakietem SolidWorks.

Zagadnienia modelowania obróbki ECM powierzchni obrotowych kształtowych opisują prace [20, 84, 119, 171-182]. Praca [20] zawiera analizę obróbki ECM powierzchni kształtowej osiowosymetrycznej opierając się na przybliżonym modelu przepływu jednowymiarowego zastosowanym do zagadnienia dwuwymiarowego, jakim jest przepływ osiowosymetryczny. W wyniku analizy otrzymano rozkłady ciśnienia statycznego, prędkości średniej, temperatury, koncentracji fazy gazowej oraz grubości szczeliny międzyelektrodowej (SM). W pracy [129] rozważa się na podstawie modelu idealnego obróbki ECM drażenie elektrodą wirującą, segmentową oraz drgającą. Prace [171-182] zawierają analizę obróbki ECM powierzchni osiowosymetrycznych z uwzględnieniem warunków rzeczywistych panujących w szczelinie międzyelektrodowej (SM). Wykorzystując równanie ewolucji kształtu, wyznacza się rozkłady grubości

szczeliny międzyelektrodowej (SM) po obróbce, parametry fizyczne obróbki ECM dla szczególnych przypadków ruchu elektrod ograniczających przepływ elektrolitu w szczelinie.

Podsumowując analizę literatury można zauważyć, że mimo dużej liczby prac dotyczących obróbki ECM bezstykowej, liczba prac odnoszących się do obróbki ECM powierzchni obrotowych jest niewielka. Niektóre dostępne publikacje opisują zagadnienie jedynie w ujęciu jednowymiarowym, co powoduje, że uzyskane wyniki badań są mało precyzyjne, nie uwzględniają bowiem występujących w warunkach rzeczywistych aspektów fizycznych, kinematycznych i dynamicznych. Zastosowanie modelowania obróbki elektrochemicznej bezstykowej powierzchni obrotowych w ujęciu dwuwymiarowym, czy też quasi trójwymiarowym pozwala na pełną, kompleksową analizę tej obróbki.

1.4. CEL I ZAKRES PRACY

Obróbka elektrochemiczna kształtowa ECM wymusza opracowanie systemu projektowania i sterowania obróbką. Możliwość prowadzenia symulacji obróbki ECM na teoretycznie, znacznie przyspiesza proces projektowania narzędzi do obróbki ECM [31-33].

Należy zaznaczyć, że głównym elementem systemu komputerowego jest algorytm obliczeń oparty na analizie i modelowaniu procesu obróbki elektrochemicznej.

Analiza teoretyczna obróbki elektrochemicznej kształtowej ECM obejmuje następujące zagadnienia:

- analizę zmiany kształtu przedmiotu obrabianego (PO) w czasie,
- wyznaczenie kształtu końcowego przedmiotu obrabianego (PO),
- wyznaczenie geometrii elektrody roboczej dla uzyskaniażądanego kształtu przedmiotu obrabianego (PO),
- optymalizację warunków procesu ze względu na minimalizację błędów kształtu przedmiotu obrabianego (PO),
- poszukiwanie nowych sposobów umożliwiających poprawę dokładności obróbki.

Rozwiązanie zatem powyższych zagadnień wymaga poznania podstawowych procesów fizycznych, jakie występują w procesie kształtowania elektrochemicznego powierzchni obróbką ECM. Przedstawiona w podrozdziale 1.2 charakterystyka obróbki elektrochemicznej pozwala stwierdzić, że duża liczba parametrów sterujących procesem ECM, zakłócających ten proces, a także bardzo często wzajemnie zależnych, utrudnia sformułowanie ogólnej, uniwersalnej uwzględniającej rzeczywiste warunki fizyczne procesu teorii obróbki ECM.

Mimo iż istnieje wiele prac analizujących teoretycznie i doświadczalnie problematykę opisu procesu obróbki elektrochemicznej, co przedstawiono w podrozdziale 1.3, nie można ich uznać za wyczerpujące rozważaną problematykę.

Monografia jest próbą kompleksowej analizy i modelowania procesu obróbki elektrochemicznej bezstykowej powierzchni obrotowych, w ogólności powierzchni o dowolnych krzywoliniowych kształtach w różnych układach kinematycznych ruchu elektrody roboczej.

Głównym celem pracy jest opracowanie modelu matematycznego procesu obróbki elektrochemicznej bezstykowej powierzchni obrotowych o dowolnych krzywoliniowych kształtach, pozwalającego na przeprowadzanie symulacji komputerowych dla

uzyskania oczekiwanego kształtu powierzchni przedmiotu obrabianego (PO) w zadanym polu tolerancji (odchylek kształtu i wymiarów).

Cel ten realizowany jest poprzez:

- opracowanie uogólnionego modelu teoretycznego procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych,
- opracowanie uproszczonych modeli teoretycznych procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych,
- zastosowanie odpowiednich metod analitycznych i numerycznych, które pozwalają na przeprowadzenie badań symulacyjnych,
- opracowanie algorytmów wykorzystujących zastosowane metody obliczeń,
- przeprowadzenie symulacji teoretycznych procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych dla opracowanych modeli teoretycznych w różnych konfiguracjach kinematycznych ruchu elektrody roboczej (ER) i przedmiotu obrabianego (PO),
- weryfikację doświadczalną procesu obróbki ECM, pozwalającą na analizę dokładności modelu teoretycznego.

Realizacja założonych celów pracy wymagała przeprowadzenia szeregu analiz teoretycznych rozważanego problemu w celu kompleksowego przedstawienia zagadnienia obróbki ECM powierzchni obrotowych, w ogólności powierzchni o dowolnych krzywoliniowych kształtach w różnych układach kinematycznych ruchu elektrody roboczej.

Praca podzielona została na osiem rozdziałów. Rozdział pierwszy zawiera ogólne uwagi odnoszące się do obróbki materiałów trudnoobrabialnych, metod ich obróbki. Przedstawiono ogólnie istotę obróbki elektrochemicznej, jej zalety i wady, a następnie dokonano szczegółowej charakterystyki procesu obróbki elektrochemicznej, w szczególności obróbki elektrochemicznej bezstykowej (kształtowej). W rozdziale tym przedstawiono również stan badań w zakresie obróbki elektrochemicznej powierzchni kształtowych oraz sformułowano cel i zakres pracy.

Rozdział drugi, to modelowanie procesu obróbki ECM. Przeprowadzono rozważania odnoszące się do obróbki ECM powierzchni kształtowych, w szczególności do procesu drążenia elektrochemicznego profilową elektrodą roboczą. Zwrócono uwagę na etapy projektowania procesu obróbki ECM oraz przedstawiono istotę modelowania matematycznego procesu obróbki ECM powierzchni kształtowych zaznaczając, iż proces obróbki ECM może być opisany za pomocą modelu cybernetycznego. W obszarze związanym z modelowaniem obróbki przedstawiono opis ewolucji kształtu przedmiotu w zależności od formy opisu powierzchni, a następnie zaproponowano opis matematyczny ewolucji kształtu powierzchni obrotowych o dowolnym krzywoliniowym zarysie. Ponadto opisano procesy fizykochemiczne w procesie obróbki (procesy związane z przepływem ładunku, hydrodynamiczne, cieplne, elektrodowe) oraz przedstawiono układ równań wynikający z zasad zachowania masy, pędu, energii opisujący w ogólności przepływ ośrodka wielofazowego w szczelinie międzyelektrodowej (SM). Dokonano odpowiednich uproszczeń, formułując ostateczną postać wektorową układu równań ruchu mieszanki elektrolitu i wodoru opisującego przepływ ośrodka podczas procesu obróbki ECM.

Rozdział trzeci obejmuje modelowanie procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych. Sformułowano warunki procesu obróbki ECM określone zbiorem właściwości układu: elektroda robocza-elektrolit-przedmiot obrabiany oraz parametrami procesu, założenia do modelu matematycznego procesu obróbki powierzchni obrotowych, a następnie równania: ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO) dla powierzchni

obrotowych w postaci jawnej, zwracając uwagę, na różnice wynikające z faktu, że elektroda robocza (ER) w ogólności może różnić się od półfabrykatu z którego wykonany ma być przedmiot obrabiany (PO). (modelowanie ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO) w dwóch fazach). Przedstawiono konfigurację pola przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej (SM), dla którego sformułowano w krzywoliniowym lokalnie ortogonalnym układzie współrzędnych równania ruchu odpowiednio, dla przepływu laminarnego i turbulentnego. Sformułowany układ równań ruchu mieszaniny słuszny dla przepływu trójwymiarowego uproszczono do postaci opisującej przepływ osiowosymetryczny. W obszarze przepływu laminarnego wyróżniono dwie klasy oszacowań odniesione do składowych prędkości i ciśnienia na podstawie których, przedstawiono układy równań ruchu opisujące stosowne klasy przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru. Przepływ turbulentny opisano za pomocą uśrednionego układu równań Naviera-Stokesa zwanego układem równań Reynoldsa, dokonując stosownych uproszczeń charakterystycznych dla przepływów w cienkich warstwach. Dla przedstawionych równań sformułowano warunki brzegowe. W omawianym rozdziale przedstawiono charakterystykę metod analitycznych i numerycznych rozwiązań przedstawionych równań ruchu mieszaniny elektrolitu i wodoru. Sformułowano całki równań ruchu dla przepływu laminarnego i turbulentnego, przedstawiając rozkłady prędkości i ciśnienia w szczelinie międzyelektrodowej (SM). Ponadto sformułowano całki równania ciągłości przepływu wodoru, określając funkcję koncentracji objętościowej wodoru.

W rozdziale czwartym przedstawiono analizę numeryczną procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych. Dla rozwiązania równania ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO) zaproponowano metodę numeryczną Eulera, zastępując pochodne występujące w równaniu ewolucji prostymi wyrażeniami różnicowymi. Sformułowane równania różnicowe pozwalają w postępujących po sobie kolejnych iteracjach czasowych Δt , na wyznaczenie nowych współrzędnych punktów anody (PO) w globalnym układzie kartezjańskim R, Z . Ponadto przedstawiono sposób rozwiązania numerycznego równania wynikającego z zasady zachowania energii. Biorąc pod uwagę dokładność i stabilność schematu numerycznego dla rozwiązania problemu zastosowano metodę Cranka-Nicholsona, zastępując pochodne występujące w równaniu odpowiednimi wyrażeniami różnicowymi. Przybliżone równanie różnicowe rozwiązano metodą iteracji. W rozdziale zawarto opis metodyki projektowania geometrii elektrody roboczej. Korekcja geometrii elektrody roboczej jest analogiczna do korekcji elektrody uzyskanej w wyniku kolejnych prób doświadczalnych. W literaturze metodyka wyznaczenia geometrii elektrody roboczej metodą korekcji nosi nazwę zagadnienia odwrotnego w procesie ECM. Opracowano algorytmy symulacji komputerowej procesu obróbki elektrochemicznej i projektowania elektrody roboczej metodą korekcji. W rozdziale przedstawiono ogólny algorytm komputerowy procesu symulacji obróbki ECM powierzchni obrotowych oparty na wykorzystaniu metody kolejnych przybliżeń. Wykorzystując do rozwiązania równania ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO) metodę kroków czasowych omówiono i przedstawiono algorytm rozwiązania tego równania.

W rozdziale piątym przedstawiono opis programu komputerowego symulacji obróbki elektrochemicznej powierzchni obrotowych Sym_ECM/CAM_2.0. W rozdziale zawarto informacje o możliwościach zaproponowanej aplikacji.

Rozdział szósty obejmuje symulacje numeryczne procesu obróbki ECM powierzchni kształtowych osiowosymetrycznych. Analizie numerycznej poddano proces

kształtowania elektrochemicznego dla trzech charakterystycznych powierzchni obrotowych wyznaczających szczelinę międzyelektrodową (SM): stożkowych, w kształcie czaszy kulistej i o dowolnym zarysie krzywoliniowym. Analizę przeprowadzono, zakładając w obszarze przepływu laminarnego uproszczenia typu: przybliżenie Reynoldsa, przybliżenie uwzględniające wpływ efektów bezwładności przepływu wywołanych oddziaływaniem odśrodkowych sił bezwładności oraz przybliżenie uwzględniające wpływ efektów bezwładności przepływu wywołane oddziaływaniem wzdłużnych i odśrodkowych sił bezwładności., zaś w obszarze przepływu turbulentnego przybliżenie uwzględniające wpływ efektów bezwładności przepływu wywołanych oddziaływaniem odśrodkowych sił bezwładności. W rozdziale przedstawiono symulacje numeryczne dla różnych konfiguracji kinematycznych ruchu elektrody roboczej (ER) i przedmiotu obrabianego (PO).

Rozdział siódmy przedstawia własne badania doświadczalne. W rozdziale opisano zaproponowane stanowisko badawcze dostosowane do badań eksperymentalnych procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych, przeprowadzono badania weryfikacyjne. Badania weryfikacyjne procesu obróbki ECM przeprowadzono dla przypadku obróbki elektrochemicznej kształtowej elektrodą wirującą zadaną prędkością obrotową n i drgającą ruchem harmonicznym o zadanej amplitudzie A oraz częstotliwości drgań ω zgodnie z ruchem posuwowym v_f . Uwagę skierowano na badania weryfikujące wariant obróbki ECM o złożonym ruchu przedmiotu obrabianego (PO) i elektrody roboczej (ER). Badania weryfikacyjne polegały na porównaniu kształtu przedmiotu obrabianego (PO) zmierzonego po obróbce elektrochemicznej w zadanym czasie obróbki z wynikami symulacji komputerowej przy takich samych parametrach obróbki.

W zakończeniu (rozdział ósmy) przedstawiono podsumowanie przeprowadzonych w pracy badań teoretycznych i doświadczalnych oraz sformułowano przewidywane możliwości dalszych badań w zakresie podjętego tematu monografii.

2. OBRÓBKA ECM POWIERZCHNI KSZTAŁTOWYCH

2.1. MODELOWANIE PROCESU OBRÓBKİ ECM POWIERZCHNI KSZTAŁTOWYCH

Podstawowym zadaniem modelowania procesu obróbki ECM powierzchni kształtowych jest wyprowadzenie i rozwiązanie równań pozwalających uzyskać informacje o kształcie przedmiotu obrabianego (PO) po obróbce ECM elektrodą o danym zarysie w określonym czasie lub po ustabilizowaniu się procesu ECM [2, 20, 43, 45, 84, 87, 110, 197, 199].

Znajomość kształtu przedmiotu obrabianego (PO) po obróbce ECM pozwala na analizę tzw. zagadnienia odwrotnego, tj. określenia takiego kształtu elektrody roboczej, aby po obróbce ECM skorygowanym profilem elektrody roboczej możliwym było otrzymanie oczekiwanego profilu przedmiotu obrabianego (PO) [20, 142, 143].

Zatem głównym celem modelowania matematycznego obróbki elektrochemicznej bezstykowej jest uzyskanie oczekiwanego kształtu powierzchni przedmiotu obrabianego (PO) w zadanym polu tolerancji (odchyłek kształtu i wymiarów).

Osiągnięcie tak określonego celu możliwe jest przez aktywne sterowane oddziaływanie elektrochemiczne na przedmiot obrabiany (PO) w wyniku symulacji komputerowej [5, 6, 20, 86, 87, 88, 94, 110, 144, 146, 175].

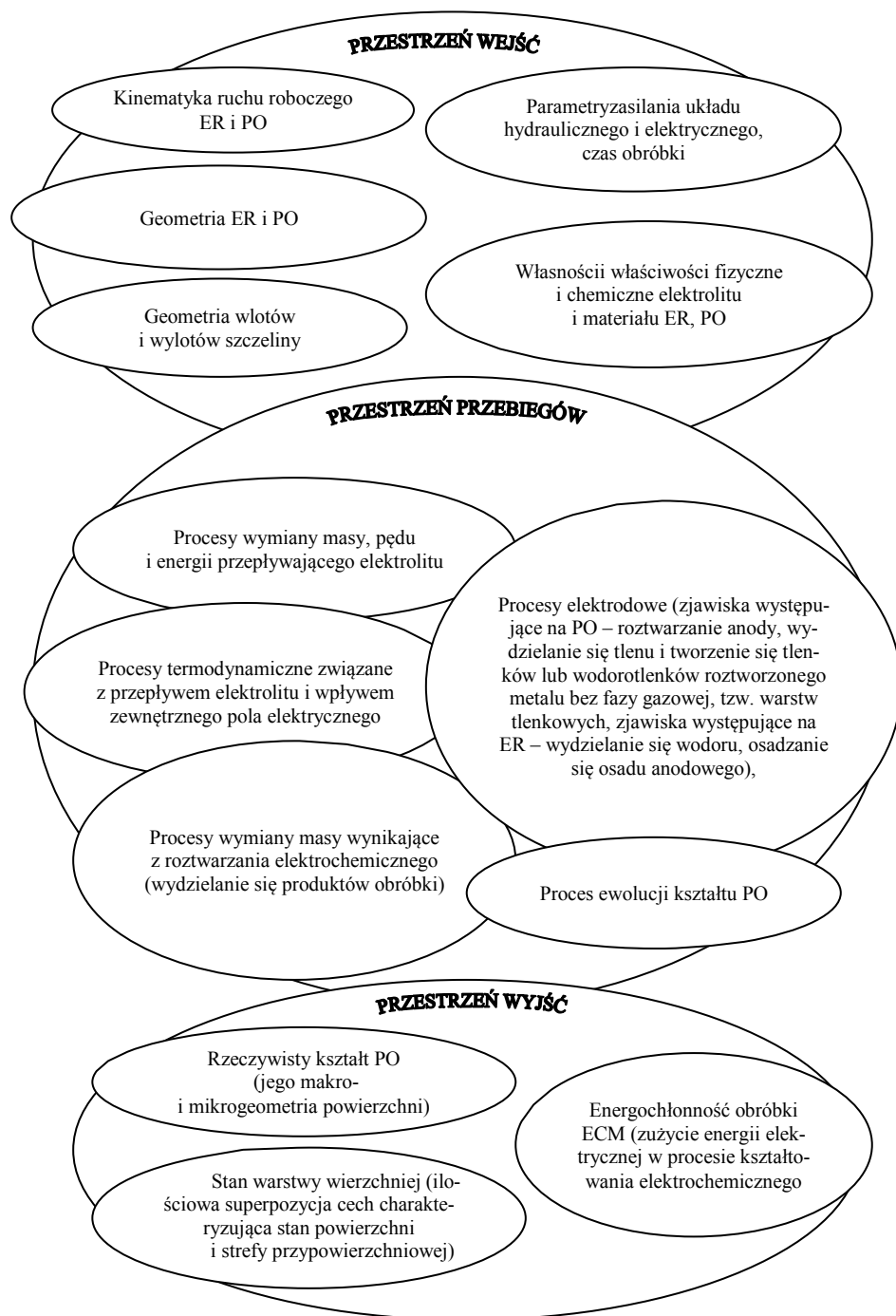
Proces obróbki elektrochemicznej bezstykowej (kształtowej) można przedstawić w postaci modelu cybernetycznego, tj. modelu, który realizuje zaplanowany proces obróbki ECM (rys. 2.1) [82, 84].

W takim modelu cybernetycznym wyróżnia się:

- przestrzeń wejść,
- przestrzeń przebiegów,
- przestrzeń wyjść.

Przestrzeń wejść to zbiór sygnałów, określonych jako:

- czynniki sterowalne przed i w czasie obróbki,
- czynniki niesterowalne.
- Do czynników sterowalnych zalicza się:
 - kinematykę ruchu roboczego elektrody roboczej lub przedmiotu obrabianego (PO),
 - napięcie zasilające,
 - parametry układu zasilania szczeliny międzyelektrodowej (SM) elektrolitem (ciśnienia na wlocie i wylocie – gdy zasilanie szczeliny określone jest stałą różnicą ciśnień lub strumień objętości – gdy zasilanie szczeliny zrealizowano przy stałym natężeniu przepływu elektrolitu),
 - ukształtowanie geometrii wlotów i wylotów szczeliny,
 - temperaturę na wlocie do szczeliny,
 - geometrię elektrody roboczej,
 - geometrię przedmiotu obrabianego (PO), (półfabrykatu),
 - własności fizyczne i chemiczne elektrolitu oraz jego skład,
 - czas obróbki.



Rys. 2.1. Schemat struktury przestrzeni wejść, przebiegów, wyjść i ich wzajemnych powiązań

Czynniki niesterowalne to:

- materiał obrabiany (skład chemiczny, własności fizyczne i mechaniczne, struktura, stan naprężeń, stan zgniotu itp.),
- obrabiarka (typ, parametry techniczne obrabiarki),
- zakłócenia losowe i niemierzalne zakłócenia systematyczne.

Przestrzeń przebiegów określa strukturę wewnętrzną procesu obróbki elektrochemicznej bezstykowej (obejmuje zmienne w czasie warunki fizyczne panujące w szczelinie międzyelektrodowej).

Na warunki fizyczne panujące w szczelinie międzyelektrodowej (SM) mają wpływ:

- procesy wymiany masy, pędu i energii przepływającego elektrolitu (hydrodynamika przepływu elektrolitu),
- procesy termodynamiczne związane z przepływem elektrolitu i wpływem zewnętrznego pola elektrycznego (wymiana ciepła),
- procesy wymiany masy wynikające z roztwarzania elektrochemicznego (wydzielanie się produktów obróbki – wodoru i produktów roztwarzania elektrochemicznego),
- procesy elektrodowe (zjawiska występujące na anodzie – roztwarzanie anody, wydzielanie się tlenu i tworzenie się tlenków lub wodorotlenków roztworzonego metalu bez fazy gazowej, tzw. warstw tlenkowych, zjawiska występujące na katodzie – wydzielanie się wodoru, osadzanie się osadu anodowego),
- proces zmiany w czasie kształtu przedmiotu obrabianego (PO).

Przestrzeń wyjść określa:

- rzeczywisty kształt przedmiotu obrabianego (PO), (jego makro- i mikrogeometria powierzchni),
- stan warstwy wierzchniej (ilościowa superpozycja cech charakteryzująca stan powierzchni i strefy przypowierzchniowej),
- wydajność obróbki,
- energochłonność obróbki (zużycie energii elektrycznej w procesie kształtowania elektrochemicznego powierzchni).

Analiza przedstawionego powyżej modelu cybernetycznego (modelu obiektu sterowania obróbką ECM jako układu powiązań przestrzeni wejść, przebiegów i wyjść) pozwala stwierdzić, że jest to model o parametrach rozłożonych, wielowymiarowy, dynamiczny, o zmiennych w czasie i przestrzeni własnościach ze wzajemnie powiązanymi zjawiskami fizykochemicznymi.

Oznacza to, że model cybernetyczny procesu ECM opisuje układ nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych ze stosownymi warunkami początkowymi i brzegowym.

2.1.1. Ewolucja kształtu przedmiotu obrabianego w procesie obróbki ECM

Powierzchnie elektrody roboczej (ER) i przedmiotu obrabianego (PO) w procesie obróbki elektrochemicznej mogą być różne. Bywa, że elektroda robocza (ER) istotnie różni się od półfabrykatu z którego wykonany ma być przedmiot obrabiany (PO). W takich przypadkach w szczelinie międzyelektrodowej (SM) tworzą się trójwymiarowe pola fizyczne, znacznie utrudniające modelowanie zjawisk fizycznych decydujących o ewolucji kształtu (PO).

Należy jednak zaznaczyć, że często powierzchnie elektrod przygotowane są wstępnie w taki sposób, że różnią się nieznacznie lub wręcz istnieje geometryczna ich zgodność. Wtedy możliwa jest prosta dyskretyzacja szczeliny międzyelektrodowej (SM). Ponadto zagadnienie opisu matematycznego procesu ECM w takiej szczelinie staje się prostsze (zazwyczaj można proces potraktować jako jedno lub dwuwymiarowy).

W przypadku powierzchni elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego (PO) znacznie różniących się kształtem, modele ewolucji kształtu PO w obróbce ECM oparte są na opisie Lagrange’a i Eulera. Takie podejście prowadzi do nieliniowych równań różniczkowych ewolucji kształtu pierwszego rzędu [199]. Do opisu ewolucji kształtu takich powierzchni wymagane jest:

- zadanie kształtu powierzchni obrabianej (parametrycznie, w postaci jawnej lub niejawnej),
- wykorzystanie układów współrzędnych: nieruchomego, związanego z PO lub ruchomego związanego z ER.

W zależności od formy opisu powierzchni, można zatem sformułować dziewięć różnych modeli matematycznych opisu ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO) [199].

Tabela 1. Modele matematyczne opisu ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego

Układ współrzędnych	Postać opisu powierzchni	Model matematyczny
Nieruchomy	parametrycznie	$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = \mathbf{n}V_n + V_{PO}$
	w postaci jawnej	$\frac{\partial z}{\partial t} + V_n(1 + \nabla Z ^2)^{1/2} + V_{PO}(1 + \nabla Z) = 0$
	w postaci niejawnej	$\frac{\partial F}{\partial t} + V_n \nabla F + V_{PO}\nabla F = 0$
Związany z elektrodą roboczą	parametrycznie	$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = \mathbf{n}V_n + V_{PO} + V_{ER}$
	w postaci jawnej	$\frac{\partial z}{\partial t} + V_n(1 + \nabla Z ^2)^{1/2} - (V_{PO} + V_{ER})(1 + \nabla Z) = 0$
	w postaci niejawnej	$\frac{\partial F}{\partial t} + V_n \nabla F - (V_{PO} + V_{ER})\nabla F = 0$
Związany z przedmiotem obrabianym	parametrycznie	$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = \mathbf{n}V_n$
	w postaci jawnej	$\frac{\partial z}{\partial t} + V_n(1 + \nabla Z ^2)^{1/2} = 0$
	w postaci niejawnej	$\frac{\partial F}{\partial t} + V_n \nabla F = 0$

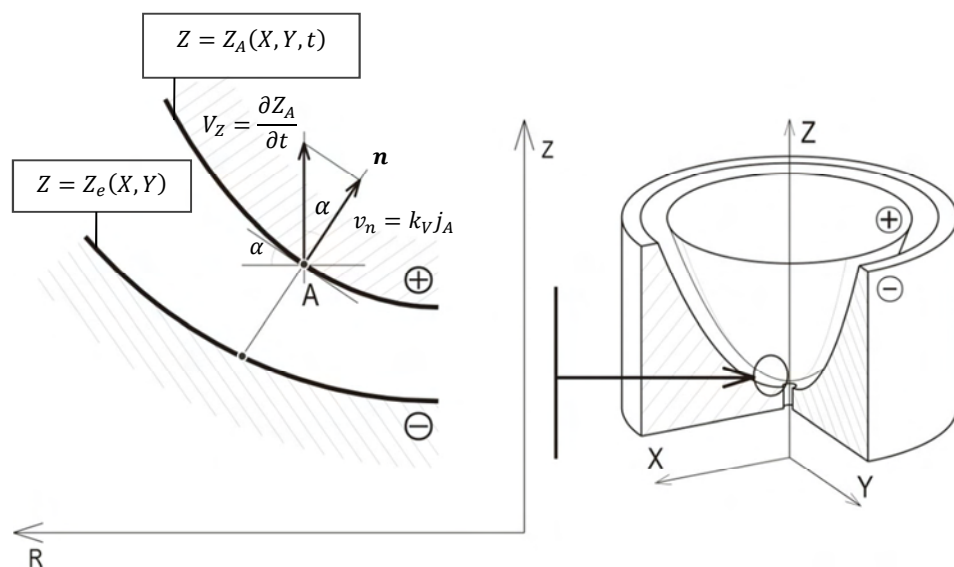
Szczegółowy opis modeli zawartych w tablicy 1 przedstawiono w pracy [199].

W zawartych w tablicy modelach matematycznych wektor $\mathbf{n}$, to wektor jednostkowy wewnętrzny normalny do powierzchni PO, V_{PO} , V_{ER} odpowiednio prędkości anody i katody.

Najprostszą postać równania ewolucji kształtu PO ma równanie zapisane w układzie współrzędnych związanych z przedmiotem obrabianym (PO), (anodą). W przypadku powierzchni gładkich, procesu idealnego, rozwiązanie równania ewolucji kształtu nie sprawia trudności. Trudności pojawiają się, gdy powierzchnia początkowa przedmiotu obrabianego (PO) jest niegładka (posiada np. wypusty, wpusty, nieciągłości itp.), a proces obróbki jest procesem rzeczywistym. Wtedy powstają problemy wynikające między innymi z osobliwości polegającej na nieokreśloności wektora normalnego do PO. Opis ewolucji kształtu w takich przypadkach możliwy jest za pomocą modeli parametrycznych [199].

Gdy powierzchnie elektrod przygotowane są wstępnie tak, że różnią się nieznacznie, tzn. istnieje zgodność geometryczna powierzchni, modelowanie ewolucji kształtu PO w takim przypadku zależy od sposobu opisu szczeliny międzyelektrodowej (SM), tj. od wyboru kierunku normalnej do powierzchni albo anody, albo katody oraz przyjęcia układu współrzędnych związanych bądź z katodą (podejście Eulera), bądź to z anodą (podejście Lagrange'a) [122].

W pracy analiza i modelowanie procesu obróbki ECM opiera się na wykorzystaniu postaci równania ewolucji kształtu PO w układzie współrzędnych związanych z przedmiotem obrabianym (PO), (anodą) (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Rozkład prędkości w procesie drążenia elektrochemicznego

Zatem równanie opisujące ewolucję kształtu powierzchni obrabianej wskutek roztwarzania anodowego w postaci niejawnej jest następujące [84, 87, 131-143, 171-182]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + v_n |\nabla F| = 0 \quad (2.1)$$

gdzie:

- v_n – prędkość roztwarzania anodowego,
- $F_0(A, 0) = 0$ – równanie opisujące wyjściową powierzchnię przedmiotu obrabianego (PO), (anody),
- $F(A, t) = 0$ – równanie opisujące powierzchnię przedmiotu obrabianego (PO), (anody) w chwili t .
- A – zbiór współrzędnych punktów na przedmiocie obrabianym (anodzie).

Warunek początkowy dany jest równaniem:

$$F(X, Y, 0) = F_0 \quad (2.2)$$

Jeżeli w układzie współrzędnych prostokątnych X, Y, Z związanych z anodą (PO) równanie powierzchni obrabianej jest w postaci:

$$Z = Z_A(X, Y, t) \quad (2.3)$$

prędkość przemieszczania się punktów anody w kierunku osi Z określa zależność:

$$V_z = \frac{v_n}{\cos \alpha} \quad (2.4)$$

prędkość roztwarzania elektrochemicznego (roztwarzania anodowego) wyrażona jest formułą wynikającą z prawa Faradaya [20, 87, 182]:

$$v_n = k_V j_A \quad (2.5)$$

cosinus kierunkowy normalnej do powierzchni anody $Z = Z_A(X, Y, t)$ wynosi:

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_A}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_A}{\partial Y}\right)^2}}$$

to równanie ewolucji kształtu powierzchni obrabianej w układzie współrzędnych związanych z przedmiotem obrabianym (PO) można zapisać następująco:

$$\frac{\partial Z_A}{\partial t} = k_V j_A \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_A}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_A}{\partial Y}\right)^2} \quad (2.6)$$

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

tutaj:

- k_V – współczynnik roztwarzania elektrochemicznego (współczynnik obrabialności dla danej relacji metal-elektrolit),
- j_A – gęstość prądu w punkcie $A(X_A, Y_A)$ na powierzchni obrabianej.

Równanie (2.6) jest równaniem opisującym prędkość przemieszczania się punktu A anody opisanej jawnie funkcją $Z_A = Z(X, Y)$ wskutek roztwarzania elektrochemicznego.

Współczynnik roztwarzania elektrochemicznego (współczynnik obrabialności dla danej relacji metal-elektrolit) określa formuła:

$$k_V = \frac{\eta K}{\rho} \quad (2.7)$$

gdzie:

- η – wydajność (sprawność) prądowa roztwarzania elektrochemicznego,
- K – teoretyczny równoważnik elektrochemiczny,
- ρ – gęstość elektrolitu.

2.1.2. Procesy fizykochemiczne w obróbce ECM

Jak wspomniano podrozdziale 1.2. w szczeliny międzyelektrodowej (SM) zachodzą bardzo złożone procesy fizyko-chemiczne. Procesy te ściśle związane są z przepływem mieszaniny wielofazowej między elektrodami ER i PO.

Do dokładnego wyznaczenia rozkładów prędkości, ciśnienia, temperatury w SM, konieczne jest zastosowanie do opisu tego rodzaju przepływów rozbudowanych modeli matematycznych szczegółowo uwzględniających zjawiska w nich zachodzące. Modelowanie matematyczne procesów zachodzących w obróbce ECM, w szczególności w SM, opiera się na wykorzystaniu zasad zachowania masy, pędu i energii. Złożoność zjawisk fizycznych występujących w szczeliny międzyelektrodowej, ich wzajemne powiązania powoduje, że sformułowane na podstawie zasad zachowania równania opisujące proces obróbki elektrochemicznej nie stanowią w ogólności zamkniętego układu równań, zatem w takiej postaci nie pozwalają na symulację procesu ECM. Trudności z opisem matematycznym fazy gazowej mieszaniny elektrolitu zwłaszcza w pobliżu elektrod [114] w tzw. warstwie lepkiej (warstwie dyfuzyjnej) powoduje, że modelowanie procesu ECM wymaga stosowania pewnych uproszczeń. Najczęściej, ponieważ grubość warstwy dyfuzyjnej w porównaniu z grubością szczeliny międzyelektrodowej (SM) jest wielokrotnie mniejsza, procesy tam zachodzące rozpatruje się oddzielnie. Elementem łączącym występujące tam zjawiska są zazwyczaj warunki brzegowe.

Procesy związane z przepływem ładunku elektrycznego

Podstawowe procesy fizykochemiczne występujące w szczeliny międzyelektrodowej (SM) to procesy związane z: przepływem ładunku elektrycznego, przepływem wielofazowym mieszaniny gazów i cieczy, intensywną wymianą ciepła na skutek przepływu prądu elektrycznego.

Pole elektromagnetyczne wywołane przepływem prądu między elektrodami w ogólności opisują równania Maxwella [113]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j}, \quad \nabla \mathbf{D} = \rho_E \quad (2.8)$$

oraz zależności:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu_M \mathbf{H} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{j} = F \sum_{k=1}^n z_k \mathbf{J}_k, \quad \rho_E = F \sum_{k=1}^n z_k C_k$$

gdzie:

- $\mathbf{E}$ – wektor natężenia pola elektrycznego,
- $\mathbf{B}$ – wektor indukcji magnetycznej,
- $\mathbf{D}$ – wektor indukcji elektrycznej,
- $\mathbf{j}$ – wektor gęstości prądu,
- ρ_E – gęstość objętościowa ładunku,
- ε – przenikalność elektryczna,
- μ_M – przenikalność magnetyczna,
- F – liczba Faradaya,
- z_k, C_k – ładunek, koncentracja molarna k-tego typu jonu,
- J_k – strumień molarly k-tego typu jonu.

Zakładając, że rozkład ładunków elektrycznych w czasie obróbki ECM nie zmienia się, indukowane w szczelinie międzyelektrodowej (SM) pole magnetyczne nie zmienia natężenia pola elektrycznego, a więc jest pomijalne, można zatem równania Maxwella uprościć do postaci:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad \nabla \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j}, \quad \nabla \mathbf{D} = F \sum_{k=1}^n z_k C_k \quad (2.10)$$

Z pierwszego równania układu równań (2.10) wynika, że pole elektryczne jest bezźródłowe, tzn. istnieje pole skalarne nazywane polem potencjalnym dla którego:

$$\mathbf{E} = -\nabla u \quad (2.11)$$

gdzie: u – jest skalarnym potencjałem pola elektrycznego.

Wprowadzając do ostatniego równania układu równań (2.10) równanie (2.11) otrzymano równanie opisujące pole elektryczne w obróbce ECM:

$$\nabla (\varepsilon \nabla u) = F \sum_{k=1}^n z_k C_k \quad (2.12)$$

Niech gęstość objętościową ładunku określa tzw. długość Debye'a [113, 199]:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon RT}{F^2 \sum_{k=1}^n z_k^2 C_k}} \quad (2.13)$$

gdzie: R – uniwersalna stała gazowa, T – temperatura elektrolitu.

Dla elektrolitów o małej koncentracji, długość Debye'a jest rzędu $10^{-4} \mu\text{m}$, zatem:

$$\sum_{k=1}^n z_k C_k = 0 \quad (2.14)$$

Równanie (2.12) upraszcza się z postaci równania Poissona do równania Laplace'a:

$$\nabla (\varepsilon \nabla u) = 0 \quad (2.15)$$

Poza warstwą lepką (dyfuzyjną) obowiązuje w szczelinie międzyelektrodowej (SM) prawo Ohma w postaci [84, 113, 199]:

$$j = -\kappa \nabla u \quad (2.16)$$

Zgodnie z prawem zachowania ładunku elektrycznego (pole wektorowe gęstości prądu jest bezźródłowe):

$$\nabla j = 0 \quad (2.17)$$

zatem rozkład potencjału elektrycznego opisuje równanie:

$$\nabla (\kappa \nabla u) = 0 \quad (2.18)$$

W przypadku, gdy powierzchnie elektrod przygotowane są wstępnie w taki sposób, że różnią się nieznacznie, linie pola elektrycznego są liniami w przybliżeniu prostymi. Zakłada się wówczas jednorodność pola elektrycznego, co pozwala zastąpić gradient potencjału elektrycznego zależnością:

$$\nabla u = \frac{U - (E_A + E_K)}{h} \quad (2.19)$$

gdzie:

- U – napięcie zasilania,
- $(E_A + E_K)$ – spadek potencjału elektrycznego w warstwach przyelektrodowych,
- h – grubość szczeliny międzyelektrodowej (SM).

Zatem wpływ zjawisk dyfuzyjnych uwzględnia się przez wprowadzenie związanych z nimi spadków potencjału do warunków brzegowych [84].

Grubość warstwy dyfuzyjnej w przypadku procesu ciągłego obróbki ECM można pominąć, ponieważ ze względu na duży przepływ jest ona o kilka rzędów mniejsza od wielkości szczeliny międzyelektrodowej (SM).

Zastąpienie gradientu potencjału elektrycznego algebraiczną zależnością (2.19) upraszcza proces modelowania ECM.

W pracy [83] wyznaczono błąd linearyzacji gradientu potencjału dla elektrod płaskich, walcowych i sferycznych. Z badań tych wynika, że dla przypadku elektrod płaskich nierównoległych (kąt pochylenia mniejszy od 30°), walcowych oraz sferycznych (stosunek grubości szczeliny do promienia walca lub sfery mniejszy od 0,1) błąd względny nie przekracza 5%.

Procesy hydrodynamiczne

Zjawiska fizyczne zachodzące w procesie obróbki elektrochemicznej analizowane są od dawna. Należy jednak podkreślić, że dopiero w latach 20. naszego stulecia W.H. Gusiew i Ł.P. Rożkow [77], wprowadzając do obróbki ECM nowe elektrolity, dzięki którym wielokrotnie wzrosła wydajność procesu, zaproponowali nową metodę obróbki ECM, tzw. wymiarową obróbkę elektrochemiczną. Zagadnienia hydrodynamiczne w procesie obróbki ECM, ich istota i ważność z uwagi na dokładność procesu roztwarzania spowodowały, że bardzo często obróbkę ECM przed laty nazywano obróbką hydro-anodową [199]. Ścisłe wyznaczenie rozkładów prędkości, ciśnienia, temperatury

w szczelinie międzyelektrodowej (SM) jest zagadnieniem niezwykle złożonym. Wymaga bowiem analizy rozbudowanych modeli matematycznych, dla których na obecnym etapie rozwoju metod analitycznych i numerycznych rozwiązanie nie jest możliwe.

Struktura ośrodka wypełniającego szczelinę międzyelektrodową (SM) jest ściśle związana z przepływem ośrodka w takiej szczelinie. Liczne eksperymenty potwierdzają, że jest to przepływ wielofazowy, którego składnikami są ciecz, gaz i produkty roztrawiania elektrochemicznego (tzw. mieszanina wieloskładnikowa). Ciecz stanowi rozpuszczalnik o strukturze molekularno-jonowej. Fazą gazową jest w ogólności mieszanina wodoru i tlenu.

Analiza przepływu tego typu ośrodków opiera się na wykorzystaniu znanych w mechanice płynów i mechanice ośrodków ciągłych metod opartych na zasadach zachowania. Należy podkreślić, że sformułowanie równań opisujących przepływy wielofazowe wymaga określenia równań dla wszystkich faz.

To przepływ ośrodka w szczelinie międzyelektrodowej (SM), jego struktura, ruch poszczególnych faz, wielkość pęcherzyków wodoru, deformacje na granicy faz itp. w istotny sposób wpływa na transport produktów roztrawiania i jego usuwanie ze szczeliny międzyelektrodowej (SM). Badania doświadczalne pozwalają zauważyć, że istotnym jest prawidłowe określenie parametrów technologicznych obróbki ECM, w celu skutecznego usuwania produktów roztrawiania elektrochemicznego [115, 124, 147, 191].

Najczęściej opis ruchu ośrodka wielofazowego w szczelinie międzyelektrodowej (SM) w ogólności opiera się na wykorzystaniu równania Naviera-Stokesa dla cieczy nieściśliwej [50, 53, 149, 150]. Nie uwzględnia się struktury wielofazowej. Ponadto zakłada się, że właściwości ośrodka nie zmieniają się, co pozwala w prosty sposób wyznaczyć rozkłady prędkości, ciśnienia i temperatury w szczelinie międzyelektrodowej (SM) za pomocą metod analitycznych lub numerycznych [26, 126]. Takie podejście zbliżone jest do analizy idealnego procesu obróbki ECM.

Złożoność opisu przepływu ośrodka wielofazowego, nierównomierne rozkłady faz rozproszonych, różne ich wielkości i kształty oraz często złożona geometria przepływu w szczelinie międzyelektrodowej (SM) powodują, że niemożliwy jest ścisły opis matematyczny tych przepływów. Zmusza to do stosowania zastępczych modeli przepływu. Powszechnie stosowanym w modelowaniu przepływów wielofazowych jest model pseudohomofazowy. Podstawowym założeniem modelu jest to, że w dowolnie małej objętości współistnieją zawsze wszystkie fazy w określonych proporcjach. Zatem w dowolnym punkcie w szczelinie międzyelektrodowej (SM) można określić koncentrację każdej fazy, której miarą jest udział objętościowy lub masowy danej fazy. Przyjęcie takiego modelu umożliwia zastosowanie zasad zachowania do opisu matematycznego przepływu. Podstawowe założenie modelu przepływu pseudohomofazowego upraszcza opis. Często koniecznym są dalsze uproszczenia związane z opisem powiązania przepływu poszczególnych faz.

W modelowaniu procesu obróbki elektrochemicznej najczęściej wykorzystuje się model przepływu wielofazowego oparty na tzw. przepływie bezpoślizgowym. W takim przypadku zakłada się, że wszystkie fazy poruszają się z jednakową prędkością. Udziały fazy rozproszonej o charakterze statycznym są równe odpowiednim udziałom o charakterze dynamicznym. Założenie przepływu pseudohomofazowego bezpoślizgowego również zwanego homogenicznym, w którym składniki mieszaniny wielofazowej wymieszane stanowią ośrodek ciągły, pozwala zaniedbać zjawiska na poziomie molekularnym.

larnym czy też atomowym. Przybliżenie oparte na modelu ośrodka homogenicznego pozwala na podstawie zasady zachowania masy określić rozkład koncentracji fazy gazowej a także fazy produktów roztwarzania elektrochemicznego [18, 44, 147, 195] a w konsekwencji uwzględniać zmienne właściwości mieszaniny.

Procesy cieplne

Obróbce elektrochemicznej towarzyszy intensywne wydzielanie się ciepła. [3, 52, 75, 100]. Jest to przede wszystkim ciepło Joule'a, które pojawia się podczas przepływu prądu elektrycznego między elektrodami oraz ciepło wynikające z reakcji chemicznych w procesie ECM na powierzchniach elektrod. Należy podkreślić, że rozkład temperatury w szczelinie międzyelektrodowej (SM) ma istotny wpływ na własności i właściwości fizyko-chemiczne ośrodka (gęstość, lepkość, przewodność cieplna, przewodność elektryczna, przenikalność elektryczna itp.). Temperatura również istotnie wpływa na strukturę warstw przyelektrodowych oraz intensywność reakcji chemicznych na powierzchniach elektrod. Liczne badania [79, 84, 105, 110, 206] dowodzą, że pomijalnie mały wpływ na rozkład temperatury (temperaturę średnią w szczelinie międzyelektrodowej) ma dyssypacja energii mechanicznej przepływu. Wydzielanie się ciepła na skutek tarcia wewnętrznego można zatem pominąć.

Równanie opisujące przepływ ciepła w szczelinie międzyelektrodowej (SM) wynika z zasady zachowania energii. Ogólna postać równania energii jest następująca:

$$\frac{d}{dt}(\rho c_p T) = \nabla^2(\lambda T) + \phi + q_v \quad (2.20)$$

gdzie:

- ρ – gęstość ośrodka,
- c_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,
- T – temperatura,
- ϕ – dyssypacja energii mechanicznej,
- q_v – ciepło wydzielane wewnątrz szczeliny międzyelektrodowej (SM) wskutek reakcji chemicznych procesu elektrochemicznego,
- λ – przenikalność cieplna ośrodka.

Złożoność opisu przepływu ośrodka wielofazowego, procesów przyelektrodowych powoduje, że trudno w sposób ścisły określić rozkład temperatury w procesie ECM. Podczas obróbki ECM wydzielające się ciepło przenika przez przepływający wielofazowy ośrodek, powierzchnie elektrod do otoczenia, tj. nagrzewa elementy przestrzeni obróbkowej obrabiarki. Globalny bilans cieplny stanowi zatem wyjątkowo złożone zagadnienie. Należy zauważyć, że w modelowaniu procesu ECM zazwyczaj bilans cieplny zawęża się do strefy przepływu ośrodka w szczelinie między elektrodami, a więc do szczeliny międzyelektrodowej (SM). Najczęściej zakłada się stałą temperaturę na powierzchniach elektrod ograniczających przepływ. Wynika to z faktu wielokrotnie większej przewodności cieplnej metalu od przewodności cieplnej ośrodka wielofazowego. Takie założenie słuszne jest w przypadku obróbki ECM w tzw. komórkach obróbkowych, w których istnieje możliwość intensywnego przepływania szczeliny międzyelektrodowej (SM) przepływającym ośrodkiem.

W rzeczywistości część ciepła odprowadzana jest przez elektrody. Oznacza to, że w pewnych przypadkach należałoby uwzględnić wydzielanie się ciepła na powierzchniach elektrod [41].

Procesy elektrodowe

Procesy elektrodowe związane są ściśle z ewolucją kształtu przedmiotu obrabianego (PO) [17, 19, 61, 84, 110, 156]. Występujące na granicy między powierzchnią elektrody i ośrodkiem procesy decydują między innymi o prędkości roztwarzania elektrochemicznego. Prędkość roztwarzania elektrochemicznego jest na ogół różna w różnych punktach powierzchni obrabianej, co powoduje nierównomierne roztwarzanie elektrochemiczne.

Analiza procesu obróbki ECM wymaga zatem analizy procesów elektrodowych. Procesy elektrodowe decydują także o wydajności, energochłonności, jakości warstwy wierzchniej oraz dokładności wymiarowo-kształtowej.

Reakcje zachodzące na elektrodach w istocie obejmują zjawiska zachodzące na anodzie (roztwarzanie elektrochemiczne, tworzenie warstw tlenkowych, wydzielanie gazów) oraz katodzie (wydzielanie gazów i osadzanie produktów stałych roztwarzania). Zjawiska te powodują spadek potencjału w warstwach przyelektrodowych, a także wydzielanie ciepła w tzw. warstwach tlenkowych i gazowych.

Procesy katodowe powodują, że podczas obróbki główną reakcją dla większości wodnych elektrolitów jest wydzielanie się wodoru [73, 104, 105]. Wydzielanie wodoru na katodzie zależne jest od rodzaju materiału katody. Na katodzie wykonanej z Cu lub Fe wydzielanie wodoru jest małe, natomiast na katodzie wykonanej z Cr lub Ni – wysokie. Należy podkreślić, że wydzielanie wodoru zmniejsza się, gdy elektrolit zawiera kationy Li, Na, NH_4 . Rodzaj materiału przedmiotu obrabianego (PO) również może wpływać na wydzielanie się wodoru podczas obróbki. Okazuje się, że w pewnych przypadkach następuje osadzanie się tzw. osadu anodowego na katodzie, który wpływa na sprawność prądową oraz polaryzację katody [203]. Procesy katodowe mogą być przyczyną wystąpienia podczas obróbki elektrochemicznej wyładowań elektrycznych, przyrostu temperatury katody doprowadzając do tzw. wrzenia powierzchniowego a następnie wyładowań łukowych.

Procesy anodowe powodują, że podczas obróbki w zależności od rodzaju elektrolitu może wystąpić np. dla roztworu NaCl – roztwarzanie metalu ze 100% sprawnością prądową, dla roztworu NaNO_3 roztwarzanie metalu i wydzielanie się tlenu [61, 62, 63 110]. Należy zauważyć, że w większości przypadków obróbki ECM, tlen na skutek reakcji wtórnych tworzy tlenki lub wodorotlenki roztwarzanego metalu bez fazy gazowej. Roztwarzanie metalu anody zachodzi przez tzw. błonkę powierzchniową powstałą w wyniku polaryzacji metalu [112]. Prędkość roztwarzania elektrochemicznego jest to prędkość usuwania błonki powierzchniowej lub prędkość przenoszenia jonów przez tego typu błonkę. Szczegółowy opis tworzenia się błonki powierzchniowej powstającej w czasie obróbki opisano w pracy [110]. Błonki różnią się znacznie grubością, składem chemicznym, strukturą, właściwościami elektrycznymi (oporność, konduktywność, pojemność elektryczna). Wielu autorów [63, 112,] twierdzi, że błonki powierzchniowe to tlenki metali (przykładowo przy obróbce żelaza Fe_2O_3 lub Fe_3O_4). Istnieje wiele prac, których autorzy prowadzili badania doświadczalne roztwarzania, najczęściej żelaza i stali w różnych elektrolitach [110], podając w postaci wykresów lub tabel zależności definiujące sprawność prądową i polaryzację elektrod w funkcji parametrów obróbki.

Z analizy i formułowanych wniosków autorzy powyższych badań twierdzą, że polaryzacji anody nie można określać wprost za pomocą równania Tafela [84], lecz należy dla różnych zestawów metal elektrolit wykonać własne badania w celu wyznaczenia polaryzacji elektrod i współczynnika obrabialności elektrochemicznej.

Procesy anodowe są przyczyną wielu zaburzeń występujących w trakcie obróbki elektrochemicznej, wynikających z niepełnej znajomości zmian takich wielkości, jak: właściwości elektrolitu, współczynnika obrabialności elektrochemicznej, sprawności prądowej i innych. Powoduje to, że w wielu przypadkach może dochodzić do niekorzystnych zjawisk takich np. jak:

- intensywne parowanie lub wrzenie na powierzchniach elektrod lub w objętości elektrolitu,
- kawitacja,
- występowanie przepływów krytycznych,
- niestabilności procesu ECM (utrata zdolności do samoregulacji, pulsacje elektrolitu, oscylacje prądu elektrycznego itp.).

Modelując procesy elektrodowe dla konkretnego zestawu metal - elektrolit określa się dwie podstawowe charakterystyki opisujące: polaryzację elektrod oraz współczynnik obrabialności elektrochemicznej lub sprawność prądową.

Znane są dwa sposoby opisu procesów elektrodowych. Pierwszy opiera się na wykorzystaniu równania Butlera-Volmera [199], lub równania Tafela [84, 110].

Polaryzacja katody w szerokim zakresie gęstości prądu (10^{-7} – $10^2 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$) opisywana równaniem Tafela ma postać [87, 110, 131]:

$$E_k = a_k + b_k \log(j) \quad (2.21)$$

gdzie:

a_k – współczynnik zależny od materiału katody i rodzaju elektrolitu,
 $b_k = 0,11\text{--}0,12 \text{ V}$,

Polaryzację opisaną zmodyfikowanym równaniem Tafela uwzględniającym wpływ temperatury można zapisać w postaci [110]:

$$E_k = T(A_k + B_k) \log(j) \quad (2.22)$$

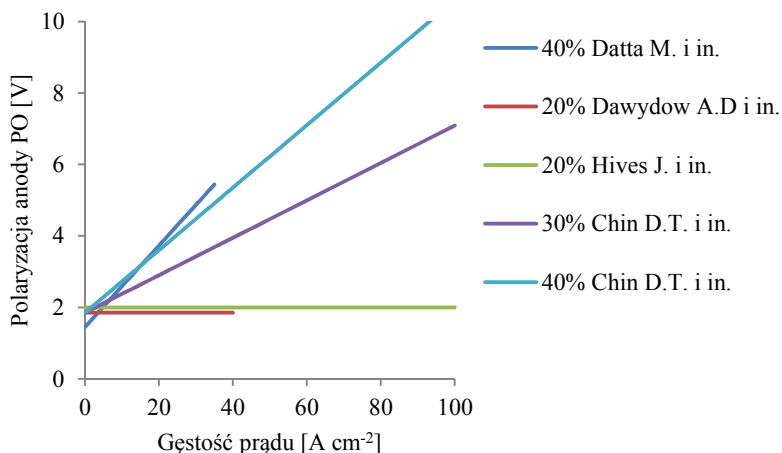
gdzie: A, B – stałe.

Takie podejście jest możliwe, gdy znane są wartości parametrów kinetyki procesu.

W pracach [104, 115] zależności $E_k = f(j)$ i $\eta = f(j)$ zilustrowano graficznie oraz przedstawiono tabelarycznie.

Drugi sposób opisu procesów elektrodowych ma charakter czysto doświadczalny i polega na wyznaczeniu krzywych polaryzacyjnych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych procesu ECM [76].

Podstawowe charakterystyki można wyznaczyć eksperymentalnie na stanowisku z tzw. wirującą elektrodą lub w specjalnych komórkach szczelinowych, w których panują warunki zbliżone do rzeczywistej obróbki ECM [115, 163]. Na rysunku 2.3 przedstawiono krzywe polaryzacyjne dla stali 45 w wodnym roztworze NaNO_3 wg różnych autorów [110].



Rys. 2.3. Krzywe polaryzacyjne dla stali 45 w wodnym roztworze NaNO_3 wg różnych autorów [110]

Łatwo zauważyć jak różne wyniki uzyskano podczas tego typu badań. Dlatego najczęściej w praktyce wykonuje się własne badania dla konkretnych zestawów metal-elektrolit.

Istotną wielkością w procesie obróbki ECM jest wydajność obróbki określona przez sprawność prądową η lub tzw. współczynnik obrabialności k_v [84]. Właściwością procesu elektrolizy jest przenoszenie masy wraz z ładunkiem elektrycznym, którą określa prawo Faradaya:

$$m = \eta K I t \quad (2.23)$$

Wydajność prądowa wynika wprost z zależności (2.23):

$$\eta = \frac{m}{K I t} \quad (2.24)$$

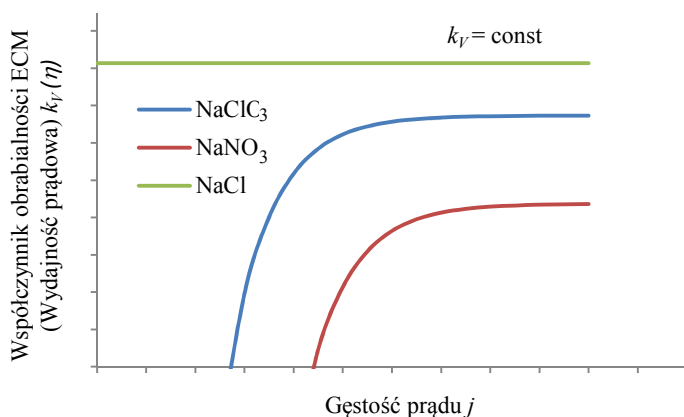
gdzie:

- m – masa rozтворzonego metalu,
- K – równoważnik elektrochemiczny,
- I – natężenie prądu,
- t – czas obróbki.

natomiast współczynnik rozтворzania elektrochemicznego określa formuła (2.7).

Dobłą dokładność wymiarowo-kształtową osiąga się, gdy η lub k_v jest rosnącą funkcją anodowej gęstości prądu [110]. Wiedząc z badań doświadczalnych, że gładkość powierzchni po obróbce ECM rośnie wraz ze wzrostem gęstości prądu, dobrze jest, aby charakterystyka $k_v = f(j)$ przebiegała stromo dla wyższych wartości prądu.

Typowe charakterystyki η lub k_v w funkcji gęstości prądu przedstawiono na rysunku 2.5.



Rys. 2.4. Charakterystyka $k_v = f(j)$ dla różnych elektrolitów [110]

Według autora pracy [110] można wyróżnić trzy charakterystyczne wielkości wydajności w zależności od parametrów obróbki:

- obróbka w wodnym roztworze NaCl – $\eta = \text{const.}$ (wydajność niezależna od gęstości prądu, temperatury, prędkości przepływu elektrolitu oraz rodzaju obrabianego metalu),
- obróbka w wodnym roztworze NaNO_3 – $\eta < 1$ (wydajność zależna od relacji metal elektrolit i parametrów obróbki j, T, v_{sr}),
- obróbka stopów żaroodpornych – $\eta > 1$ (wydajność zależna od relacji stop-elektrolit, parametrów obróbki j, T, v_{sr}).

Istnieje wiele prac, w których autorzy badali roztwarzanie elektrochemiczne stali i żelaza w różnych elektrolitach [18, 63, 104]. Bogaty dorobek w zakresie badań i symulacji obróbki ECM opisany został w pracach pracowników Zakładu Obróbek Wykańczających i Erozyjnych Instytutu Technologii Maszyn Politechniki Warszawskiej [20, 84, 110].

Bardzo ważnym czynnikiem jest właściwy dobór do obróbki ECM elektrolitu. Znaczenie elektrolitów jako ośrodka obróbczego w kształtowaniu elektrochemicznym przedstawiono w pracy [205]. Mając na uwadze własności chemiczne, elektrolity dzieli się na:

- aktywne (niepasywujące),
- pasywujące.

Do pierwszej grupy zalicza się wodny roztwór chlorku sodowego (NaCl). Elektrolit ten pozwala osiągnąć większą wydajność obróbki [63, 205], co wynika z depasywującego działania oraz wysokiej konduktywności. Zastosowanie takich elektrolitów pogarsza jakość powierzchni, sprzyja korozji obrabiarki. Drugą grupę stanowią elektrolity, których głównym składnikiem jest azotan sodu (NaNO_3). Elektrolity zawierające azotany i azotyny charakteryzują się dużą zdolnością do pasywacji powierzchni, zapewniając w ten sposób małą jej chropowatość. Do elektrolitów dodawane są dodatki stabilizujące pH, koagulatory oraz inhibitory korozji [205]. Proces obróbki elektrochemicznej na skutek zachodzących reakcji chemicznych i elektrochemicznych powoduje, że własności i właściwości elektrolitu ulegają w czasie dynamicznym zmianom [41].

Należy zaznaczyć, że idealnym elektrolitem będzie elektrolit, który pozwala na roztwarzanie wszystkich faz materiału przedmiotu obrabianego (PO), (anody). Taki elektrolit powinien ponadto zapewniać:

- wysoką lokalizację obróbki (wysokie k_V w miejscach dużych wartości gęstości prądu, niskie k_V w strefach małych gęstości np. na ściankach bocznych),
- wysoką jakość powierzchni obrobionej,
- uniemożliwianie pojawiania się nierozpuszczonych substancji na powierzchniach elektrod.

Wymagania stawiane elektrolitom i ich dobór przedstawiono w licznych publikacjach [18, 63, 104, 110, 199]. Aktualnie w obróbce ECM wykorzystywane są głównie wodne roztwory soli, np. NaCl, NaNO₃, NaClO₃ lub ich mieszaniny [18, 112].

2.1.3. Równania ruchu ośrodka wielofazowego w szczelinie międzyelektrodowej

Model matematyczny oznacza układ równań opisujący w przybliżeniu obraz rzeczywisty procesu obróbki ECM. Równania ruchu ośrodka wielofazowego w szczelinie międzyelektrodowej (SM) wynikają z bilansu masy, pędu i energii oraz równań zamknięcia w postaci równań algebraicznych lub równań różniczkowych [187]. Do równań zamknięcia najczęściej zalicza się tzw. równania konstytutywne zawierające związki wynikające z ogólnych praw fizycznych wyrażonych za pomocą wybranych zmiennych zależnych opisujących układ wielofazowy (np. równania stanu). Charakterystyczną grupą równań zamknięcia są równania topologiczne Boure [53]. Równania zamknięcia typu równań topologicznych poza zmiennymi jak gęstość, prędkość, ciśnienie itp. zawierają związki (zależności) odnoszące się do powierzchni międzyfazowej tzn. do rodzaju struktury przepływu dwufazowego.

Zakładając ogólnie przepływ ośrodka wielofazowego (ciecz, gaz: wodór + tlen, produkty roztwarzania elektrochemicznego) równania zachowania masy przyjmują postać:

- równania ciągłości przepływu:

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla(\rho_e \mathbf{V}) = j \rho k_p k_V h^{-1} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial \rho_H}{\partial t} + \nabla(\rho_H \mathbf{W}) = j \eta_H k_H h^{-1} \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial \rho_o}{\partial t} + \nabla(\rho_o \mathbf{W}) = j \eta_o k_o h^{-1} \quad (2.27)$$

$$\rho_e = (1 - \beta) \rho_e^0, \quad \rho_H = \beta \rho_H^0, \quad \rho_o = \beta \rho_o^0 \quad (2.28)$$

gdzie:

- | | |
|--------------------------------------|---|
| $\rho_e^0, \rho_H^0, \rho_o^0, \rho$ | – odpowiednio gęstość cieczy, wodoru, tlenu i szlamu, |
| $\mathbf{V}, \mathbf{W}$ | – wektory prędkości cieczy i gazu, |
| η_H, η_o | – wydajności prądowe wydzielania odpowiednio wodoru i tlenu, |
| $k_H,$ | – równoważnik elektrochemiczny wodoru, |
| k_p | – współczynnik określający stosunek masy szlamu do masy roztworzonego metalu (według [4, 110] $k_p = 1,5 \div 2,5$), |
| j | – gęstość prądu. |

– równania pędu:

$$\rho_e \frac{dV}{dt} = \rho_e \mathbf{g} + \mathbf{f}_{ge} - (1 - \beta) \nabla p_e + \nabla(\mu_e \nabla V) \quad (2.29)$$

$$\rho_g \frac{dW}{dt} = \rho_g \mathbf{g} + \mathbf{f}_{eg} - \beta \nabla p \nabla p_g + \nabla(\mu_g \nabla V) \quad (2.30)$$

$$\rho_e \frac{dV}{dt} = \rho_e \left[\frac{\partial V}{\partial t} + (\nabla V) V \right] \quad (2.31)$$

$$\rho_g \frac{dW}{dt} = \rho_g \left[\frac{\partial W}{\partial t} + (\nabla W) W \right] \quad (2.32)$$

gdzie:

- $\rho_g = \beta(\rho_H + \rho_o)$,
- $\mathbf{V}, \mathbf{W}$ – wektory prędkości odpowiednio cieczy i gazu,
- p_e, p_g – ciśnienie odpowiednio fazy ciekłej i gazowej,
- $\mathbf{g}$ – siła grawitacji,
- $\mathbf{f}_{ge} = -\mathbf{f}_{eg}$ – siły wzajemnego oddziaływania między fazami.
- μ_e – dynamiczny współczynnik lepkości elektrolitu,
- μ_g – dynamiczny współczynnik lepkości gazu,
- β – koncentracja objętościowa fazy gazowej.

– równania stanu dla tlenu:

$$\frac{p_o}{\rho_o^0} = \frac{RT}{\mu_o} \quad (2.33)$$

gdzie: R, μ_o – odpowiednio, uniwersalna stała gazowa, masa molowa tlenu.

– równanie stanu dla wodoru:

$$\frac{p_H}{\rho_H^0} = \frac{RT}{\mu_H} \quad (2.34)$$

gdzie: R, μ_H – odpowiednio, uniwersalna stała gazowa, masa molowa wodoru.

– równania wynikające z zasady zachowania energii:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \nabla^2(\lambda T) + \phi + q_V \quad (2.35)$$

gdzie:

- ρ – gęstość ośrodka,
- c_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,
- T – temperatura,
- ϕ – dyssypacja energii mechanicznej,
- q_V – ciepło wydzielane wewnątrz szczeliny międzyelektrodowej (SM) wskutek reakcji chemicznych procesu elektrochemicznego (ciepło Joule’a),
- λ – przenikalność cieplna ośrodka.

Ciśnienie mieszaniny gazu wynika z prawa Daltona

$$p_g = p_o + p_H = \frac{R\rho_o^0 T}{\mu_m} \quad (2.36)$$

$$\frac{1}{\mu_g} = \frac{1}{\mu_o} + \frac{\rho_H^0}{\rho_o^0} \frac{1}{\mu_H} \quad (2.37)$$

gdzie: μ_g – masa molowa mieszaniny.

Układ równań (2.25-2.32) opisujący przepływ ośrodka wielofazowego z uwzględnieniem wyszczególnionych faz w przepływie ośrodka w szczelinie międzyelektrodowej z uwagi na trudności związane z uzyskaniem rozwiązania, wymaga wprowadzenia uproszczeń.

Dodatkowo wprowadzono następujące założenia:

- niech temperatura cieczy (elektrolitu), gazu (wydzielającego się wodoru i tlenu) przyjmuje tę samą wartość:

$$T = T_e = T_g$$

Przyjęcie stałej temperatury elektrod ($T = T_s = const$) wynika z faktu, że najczęściej nagrzewanie przedmiotu obrabianego (PO) i elektrody roboczej (ER) w procesie obróbki jest nieznaczne. Nagrzewanie się elektrod możliwe jest podczas obróbki części cienkościennych, przy znacznych gęstościach prądu.

- niech ciśnienia elektrolitu i gazu są sobie równe:

$$p = p_e = p_g$$

Założenie to wynika z pominięcia napięcia powierzchniowego. Uwzględnienie napięcia powierzchniowego wymaga znajomości rozmiarów pęcherzyków gazowych oraz ich rozkładu w szczelinie międzyelektrodowej (SM). Liczne badania cytowane w pracy [84] wykazały pojawianie się w danym przekroju SM pęcherzyków o różnych średnicach, – od kilku do kilkudziesięciu μm . Mniejsze skupione są w pobliżu powierzchni elektrod, a większe w jądrze przepływu. Średnica pęcherzyków zależy od parametrów hydrodynamicznych (prędkości i ciśnienia) i elektrycznych (gęstości prądu). Dla najczęściej statystycznie występujących średnic pęcherzyków gazu wpływ napięcia powierzchniowego może być pominięty [84].

Dodając stronami równania (2.29) i (2.30), pomijając człony zawierające stosunek gęstości gazu do cieczy jako znacznie mniejszy od jedności ($\frac{\rho_g}{\rho_e} \ll 1$) otrzymano wektorowe równanie pędu mieszaniny w postaci:

$$\rho_e \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + [\nabla(\rho_e \mathbf{V})]\mathbf{V} = \rho_e \mathbf{g} - \nabla p + \nabla(\mu_e \nabla \mathbf{V}) \quad (2.38)$$

W połączeniu z układem równań ((2.25-2.27), równaniem zachowania energii (2.20) oraz równaniem stanu (2.36-2.37) równanie (2.38) przedstawia opis przepływu wielofazowego ośrodka w szczelinie międzyelektrodowej (SM) podczas obróbki ECM.

Powyższe równania dalej będą podstawą analizy zjawisk przepływowych, jakie występują podczas procesu obróbki ECM.

Oszacowując liczbę Strouhala [150]:

$$Str = \frac{v \cdot t}{L}$$

gdzie:

v – prędkość przepływu,

t – charakterystyczny czas roztwarzania,

L – charakterystyczny wymiar szczeliny (długość SM),

można zauważyć, że dla procesu ciągłego ECM, liczba $Str \gg 1$, zatem w równaniach (2.25-2.32) pochodne lokalne można pominąć traktując przepływ jako stacjonarny.

Układ równań (2.25-2.27), (2.38) opisujący stacjonarny przepływ ośrodka można zapisać jako:

$$\nabla(\rho_e \mathbf{V}) = j \rho k_p k_V h^{-1} \quad (2.39)$$

$$\nabla(\rho_H \mathbf{W}) = j \eta_H k_H h^{-1} \quad (2.40)$$

$$\nabla(\rho_o \mathbf{W}) = j \eta_o k_o h^{-1} \quad (2.41)$$

$$\rho_e = (1 - \beta) \rho_e^0, \quad \rho_H = \beta \rho_H^0, \quad \rho_o = \beta \rho_o^0$$

$$[\nabla(\rho_e \mathbf{V})] \mathbf{V} = \rho_e \mathbf{g} - \nabla p + \nabla(\mu_e \nabla \mathbf{V}) \quad (2.42)$$

Należy jednak podkreślić, że w przypadku obróbki impulsowej (PECM), zwłaszcza przy zastosowaniu krótkich czasów impulsu i małych prędkości ośrodka, założenie stacjonarności przepływu może prowadzić do znacznych błędów.

Pomijając wydzielanie gazu (tlenu) na anodzie (znacznie mniejsze niż na katodzie), zakładając przepływ pseudohomofazowy bezpoślizgowy, równania (2.39-2.42) można zapisać następująco:

$$\nabla(\rho_e \mathbf{V}) = j \rho k_p k_V h^{-1} \quad (2.43)$$

$$\nabla(\rho_H \mathbf{V}) = j \eta_H k_H h^{-1} \quad (2.44)$$

$$\rho_e = (1 - \beta) \rho_e^0, \quad \rho_H = \beta \rho_H^0,$$

$$[\nabla(\rho_e \mathbf{V})] \mathbf{V} = \rho_e \mathbf{g} - \nabla p + \nabla(\mu_e \nabla \mathbf{V}) \quad (2.45)$$

Pomijając wydzielanie produktów roztwarzania elektrochemicznego oraz tlenu na anodzie (PO), siłę grawitacji, układ równań uprosi się do postaci:

$$\nabla(\rho_e \mathbf{V}) = 0 \quad (2.46)$$

$$\nabla(\rho_H \mathbf{V}) = j\eta_H k_H h^{-1} \quad (2.47)$$

$$[\nabla(\rho_e \mathbf{V})]\mathbf{V} = -\nabla p + \nabla(\mu_e \nabla \mathbf{V}) \quad (2.48)$$

$$\rho_e = (1 - \beta)\rho_e^0, \quad \rho_H = \beta\rho_H^0,$$

Występujące w obszarze SM dopuszczalne zanieczyszczenie w postaci szlamu wynosi od 8-16 g/l [84]. Stosunek wagowy wydzielających się na elektrodach produktów roztwarzania-wodorotlenków metalu i gazu-tlenu do masy przepływającego elektrolitu jest zatem znikomy.

Układ równań (2.46-2.48) uzupełnia równanie energii (2.35), w którym pomija się ciepło powstające w wyniku dyssypacji sił mechanicznych w przepływie jako wielokrotnie mniejsze w porównaniu z ciepłem Joule'a [84], powstającym wskutek przepływu prądu elektrycznego w szczelinie międzyelektrodowej (SM).

Pomijając zatem w równaniu (2.35) pochodną lokalną temperatury oraz dyssypację energii mechanicznej otrzymano:

$$\rho_e c_p (\mathbf{V} \nabla) T = \nabla(\lambda \nabla T) + q_V \quad (2.49)$$

Układ równań (2.46-2.49) zamyka równanie stanu (2.34). Należy nadmienić, że proces obróbki ECM, mimo uproszczeń wynikających z przyjętych założeń opisuje układ nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych.

3. OBRÓBKA ECM KRZYWOLINIOWYCH POWIERZCHNI OBROTOWYCH

3.1. WPROWADZENIE

Powierzchnie kształtowe o tworzącej krzywoliniowej (wewnętrzne lub zewnętrzne powierzchnie obrotowe, których kierownicą jest linia krzywa) spotyka się bardzo często. Rzadziej występują otwory kształtowe o powierzchniach wewnętrznych krzywoliniowych. Metody obróbki tego typu powierzchni opierają się najczęściej na zasadach obróbki kopiowej powierzchni brył obrotowych. Jeśli jednak obróbka dotyczy materiałów trudnoskrawalnych, z pomocą przychodzi obróbka elektrochemiczna kształtowa (drążenie elektrochemiczne, toczenie elektrochemiczne, frezowanie elektrochemiczne).

Analiza i modelowanie matematyczne procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych wymaga, aby dla zadanego czasu oraz warunków obróbki ECM wyznaczyć kształt przedmiotu obrabianego (PO), zmiany grubości szczeliny międzyelektrodowej (SM) oraz rozkłady parametrów fizykochemicznych w obszarze obróbki, takich jak: rozkład prędkości przepływu, ciśnienia, temperatury, gęstości prądu i koncentracji objętościowej fazy gazowej w szczelinie międzyelektrodowej (SM).

Warunki procesu obróbki ECM dane są zbiorem właściwości układu: elektroda robocza – elektrolit – przedmiot obrabiany oraz parametrami procesu.

Praktycznie oznacza to, że znane są:

- materiał, z którego wykonane są elektrody,
- geometria elektrody roboczej (ER),
- początkowe położenie elektrody roboczej (ER) względem przedmiotu obrabianego (PO),
- początkowy kształt przedmiotu obrabianego (anody) (PO),
- położenie i geometria wlotu elektrolitu,
- rodzaj elektrolitu (właściwości i właściwości fizyczne i chemiczne):
- gęstość elektrolitu ρ_e^0 ,
- dynamiczny współczynnik lepkości μ_o lub kinematyczny współczynnik lepkości ν_o ,
- ciepło właściwe elektrolitu c_p ,
- konduktywność właściwa elektrolitu na wlocie κ_o ,
- współczynnik temperaturowy konduktywności elektrycznej elektrolitu α_T ,
- temperatura elektrolitu na wlocie T_w ,
- ciśnienie elektrolitu na wlocie do szczeliny międzyelektrodowej (SM) p_w lub strumień objętości przepływu elektrolitu (natężenie objętościowe przepływu elektrolitu) Q ,
- ciśnienie elektrolitu na wylocie ze szczeliny międzyelektrodowej (SM) p_z ,
- prędkość posuwu (ruchu postępowego) elektrody roboczej V_f ,
- napięcie robocze między katodą (ER) i anodą (PO),
- amplituda i częstość drgań przedmiotu obrabianego (PO), A , ω ,
- prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego (PO) n
- charakterystyki elektrochemiczne układu materiał – elektrolit, określone współczynnikiem obrabialności elektrochemicznej $k_V = k_V(j, v, T)$ oraz sumarycznej polaryzacji elektrod $E = E(j, v, T)$,

Model matematyczny procesu obróbki (ECM) powierzchni kształtowych obrotowych oparty jest na następujących podstawowych założeniach:

- w szczelinie międzyelektrodowej (SM) zakłada się dwufazowy pseudohomogeniczny, bezpoślizgowy przepływ ośrodka ciągłego (ciecz-elektrolit, gaz-wodór),
- ośrodek dwufazowy wypełnia szczelinę na całej długości. Rozkład fazy gazowej wynika z intensywności procesu obróbki i określony jest koncentracją objętościową wodoru wyznaczoną z bilansu masy dla wodoru. Przyjmuje się, że średni udział fazy gazowej zmienia się wzdłuż przepływu $\beta(x)$,
- pomija się fazę produktów roztwarzania metalu anody (tzw. szlamu),
- pomija się fazę wydzielającego się tlenu na anodzie (zakłada się wydajność prądową tlenu równą zeru),
- zakłada się, że temperatura i ciśnienie gazu w pęcherzykach jest równe temperaturze i ciśnieniu jego otoczenia tj. elektrolitu,
- dla wyznaczenia parametrów hydrodynamicznych zakłada się stacjonarny (ustalony), dwuwymiarowy (osiowosymetryczny) przepływ mieszaniny elektrolitu i wodoru traktowanego jako ośrodek ciągły opisany równaniami (2.47-2.49),
- ośrodek dwufazowy opisują następujące właściwości fizyczne:
 - zastępcza gęstość ośrodka:

$$\rho = (1 - \beta)\rho_e^0 + \beta\rho_H^0 \quad (3.1)$$

ponieważ:

$$\rho_e^0 \gg \rho_H^0, \frac{\rho_H^0}{\rho_e^0} < 1 \quad (3.2)$$

dalej przyjmuje się zastępczą gęstość ośrodka w postaci:

$$\rho = \rho_e \cong (1 - \beta)\rho_e^0 \quad (3.3)$$

- zastępczy dynamiczny współczynnik lepkości:

$$\mu = \mu_0(1 + m\beta)e^{-b\Delta T} \quad (3.4)$$

gdzie: $m = 5,5$, $b = 0,019 K^{-1}$ [20]

- zastępcza przewodność ośrodka [20]:

$$\kappa = \kappa_0(1 + \alpha_T\Delta T)(1 - \beta)^{\frac{3}{2}} \quad (3.5)$$

gdzie: $\Delta T = T - T_0$, κ_0 i α_T – wartości określone dla $T = T_0$,

- prędkość dźwięku w ośrodku dwufazowym [20, 110]:

$$v_{dz} = \sqrt{\frac{p}{2,5\rho_e\beta(1-\beta)}} \quad (3.6)$$

- do wyznaczenia rozkładu gęstości prądu j ekstrapoluje się prawo Ohma na całą grubość szczeliny h . Kinetykę procesów elektrodowych uwzględnia się, wprowadzając

dzając wartość sumarycznej polaryzacji $E = E_a - E_c$ do warunków brzegowych. Polaryzacja katody E_k określona jest z równania Tafela (2.21), dla którego współczynniki a i b przyjmują wartości dla elektrody wykonanej z miedzi odpowiednio $a = 0,8 V$, $b = 0,11 V$. Polaryzację anody E_a wyznacza się z zależności:

$$E_a = \Delta U - E_k \quad (3.7)$$

- pomija się zakłócenia pola elektrycznego w pobliżu krawędzi elektrod zakładając w poprzek szczeliny międzyelektrodowej (SM) liniowy rozkład potencjału pola elektrycznego. Spadek omowy w szczelinie międzyelektrodowej (SM) jest równy:

$$U = U_{el} - \Delta U \quad (3.8)$$

- wpływ procesów dyfuzji i kinetyki elektrodowej uwzględnia się na podstawie funkcji opisujących zmiany współczynnika roztwarzania elektrochemicznego k_v , wydajności prądowej wydzielania gazu oraz polaryzacji elektrod E_a i E_k ,
- dla wydzielającego się w strefie przykatodowej gazu zakłada się, że wydajność prądowa wodoru nie zmienia się $\eta_H = const.$,
- na podstawie badań doświadczalnych określa się dla danego zestawu anoda – elektrolit – katoda (przedmiot obrabiany - elektrolit - elektroda robocza) współczynnik roztwarzania elektrochemicznego k_v , (w ogólności $k_v = f(j, v_{sr}, T)$ lub $k_v = f(j)$ dla elektrolitów pasywujących).
- nieznane parametry procesu obróbki elektrochemicznej: prędkość przepływu ośrodka, ciśnienie, temperatura, grubość szczeliny po obróbce, koncentracja objętościowa fazy gazowej, gęstość prądu, konduktywność ośrodka, dynamiczny współczynnik lepkości i inne są w ogólności funkcjami czasu i położenia. Dla obróbki ECM prądem stałym dla zadanej „chwili czasowej” przepływ w szczelinie międzyelektrodowej możemy traktować jako stacjonarny [20, 84, 110].

Powyższe założenia uzasadniono szczegółowo w rozdziale 2 pracy.

Inne założenia wymagane dla przeprowadzenia modelowania procesu obróbki ECM, a wynikające np. z geometrii przepływu mieszaniny elektrolitu i gazu w szczelinie międzyelektrodowej (SM), dalszych uproszczeń równań ruchu mieszaniny itp., zostaną przedstawione w dalszej części pracy.

3.2. MODELOWANIE MATEMATYCZNE PROCESU OBRÓBKİ ECM POWIERZCHNI OBROTOWYCH

3.2.1. Równanie ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego dla powierzchni obrotowych

Do analizy procesu obróbki ECM w niniejszej pracy ewolucję kształtu przedmiotu obrabianego (PO) opisuje w ogólności równanie (2.6) przedstawione w postaci jawnej w podrozdziale 2.1.1.

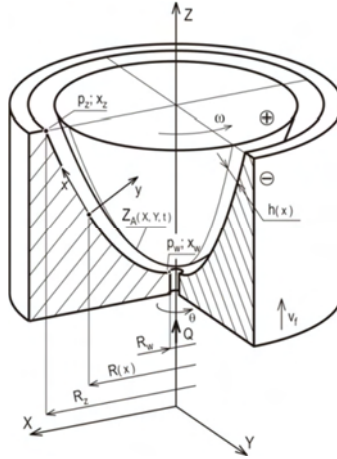
Jeżeli w układzie współrzędnych prostokątnych X, Y, Z lub układzie walcowym R, θ, Z związanych anodą (PO) (rys. 3.1) równanie obrotowej powierzchni obrabianej dane jest zależnością:

$$Z = Z_A(X, Y, t) \text{ lub } Z = Z_A(R, t) \quad (3.9)$$

to równanie ewolucji kształtu powierzchni obrabianej (2.6) można zapisać w postaci:

$$\frac{\partial Z_A}{\partial t} = k_V j_A \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_A}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_A}{\partial Y}\right)^2} \text{ lub } \frac{\partial Z_A}{\partial t} = k_V j_A \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_A}{\partial R}\right)^2} \quad (3.10)$$

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



Rys. 3.1. Szczelina międzyelektrodowa (SM)

Zakładając, że rozkład potencjału wzdłuż odcinka normalnego do elektrody roboczej jest liniowy (często przyjmowany w obliczeniach technologicznych) funkcję gęstości prądu można wyrazić zależnością [84]:

$$j_A = \kappa_0 \Phi_{TG}^{-1} \frac{U-E}{h} \quad (3.11)$$

gdzie:

- h – najmniejsza grubość szczeliny międzyelektrodowej (SM),
- U – napięcie robocze między elektrodami,
- E – sumaryczna polaryzacja elektrod.

Najmniejsza grubość szczeliny międzyelektrodowej (SM) to odległość punktu leżącego na anodzie PO od punktu na powierzchni elektrody roboczej ER opisanej zależnością:

$$Z_e(R, t) = f(R_e) + A \sin(\omega t) + v_f t$$

gdzie:

- A – amplituda drgań PO,
- ω – częstość kołowa drgań PO.

Funkcja Φ_{TG} opisuje zmiany konduktywności w szczelinie międzyelektrodowej (SM) wywołane zmiennym polem temperatury oraz koncentracją objętościową fazy gazowej i wyznacza się następująco [84]:

$$\Phi_{TG} = \frac{1}{h} \left[\int_0^h \frac{dy}{(1+\alpha_T \Delta T)(1-\beta)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (3.12)$$

gdzie:

α_T – temperaturowy współczynnik przewodności elektrycznej,
 ΔT – przyrost temperatury mieszaniny.

Powierzchnie elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego w procesie obróbki elektrochemicznej mogą być różne. Często elektroda robocza (ER) istotnie różni się od półfabrykatu, z którego wykonany ma być przedmiot obrabiany (PO). W takich przypadkach modelowanie ewolucji kształtu najczęściej odbywa się w dwóch fazach [87].

Faza I

W pierwszej, początkowej fazie obróbki ECM, gdy elektroda robocza (ER) istotnie różni się od półfabrykatu pomija się wpływ zmian konduktywności elektrolitu.

W tej fazie obróbki gęstość prądu na anodzie wyznacza się z prawa Ohma w postaci:

$$j_A = \kappa |\nabla u|_A \quad (3.13)$$

Rozkład gradientu potencjału opisuje zgodnie z równaniem (2.15) równanie Laplace'a:

$$\Delta u = 0 \quad (3.14)$$

dla którego warunki brzegowe przyjmują postać:

$$u(f) = 0, \text{ gdy } Z = f(X, Y) = Z(R) \quad (3.15)$$

$$u(F) = U - E \text{ gdy } Z = Z_A(X, Y, t) = Z_A(R, t)$$

Przyjmując, podobnie jak w obliczeniach technologicznych liniowość rozkładu potencjału wzdłuż odcinków normalnych do ER gęstość prądu określa formuła:

$$j_A = \kappa \frac{U-E}{h_{min}} \quad (3.16)$$

gdzie:

h_{min} – najmniejsza odległość punktu anody (np. punktu A) wyznaczona wzdłuż normalnej do katody (ER).

Równanie ewolucji przedmiotu obrabianego (PO) w pierwszej fazie obróbki, tzn. gdy elektroda robocza (ER) istotnie różni się od półfabrykatu ma postać:

$$\frac{\partial Z_A}{\partial t} = k_V \kappa \frac{U-E}{h_{min}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_A}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_A}{\partial Y}\right)^2} = k_V \kappa \frac{U-E}{h_{min}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_A}{\partial R}\right)^2} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} h_{min} &= \min\{(X - X_e)^2 + (Y - Y_e)^2 + [Z_A - f(X_e, Y_e)]^2\}^{\frac{1}{2}} \\ &= \min\{(R - R_e)^2 + [Z_A - f(R_e)]^2\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (3.18)$$

gdzie: $X_e, Y_e, f(X_e, Y_e) = R_e, f(R_e)$ – współrzędne punktów elektrody roboczej odpowiadające najmniejszej odległości h_{min} .

Gdy kształt anody (PO) przyjmuje postać geometryczną zbliżoną do katody (ER), wówczas między elektrodą roboczą i przedmiotem obrabianym (PO) powstaje szczelina międzyelektrodowa (SM) o zmiennej grubości (wysokości).

Należy zauważyć, że w takim przypadku warunki fizyczne znacznie różnią się od panujących w początkowej fazie obróbki.

Jako kryterium rozpoczęcia drugiej fazy obróbki przyjmuje się moment czasu, gdy [90]:

$$\sup[h_{min}] = \kappa_0 k_V j_{kV} \frac{U-E(j_{kV})}{v_f} \delta \quad (3.19)$$

gdzie:

- j_{kV} – gęstość prądu, przy której k_V jest maksymalne,
- δ – współczynnik warunkujący moment zakończenia pierwszej fazy obróbki (na podstawie eksperymentów $\delta > 1$)

Faza II

Faza druga procesu obróbki ECM nazywana jest często obróbką ECM.S (Electrochemical Machining Sinking). Z uwagi na dokładność symulacji wymaga, aby w maksymalnym stopniu uwzględnić rzeczywiste warunki roztwarzania elektrochemicznego. W tej fazie obróbki powierzchnie elektrod różnią się nieznacznie lub wręcz istnieje geometryczna ich zgodność.

Analiza różnych postaci równań opisujących ewolucję kształtu przedmiotu obrabianego (PO) pozwala stwierdzić, że adekwatność modelu matematycznego procesu roztwarzania elektrochemicznego wyraźnie zależy od dokładności opisu rozkładu gęstości prądu na anodzie (PO).

W tej fazie obróbki funkcja gęstości prądu opisana jest zależnością (3.11).

Jeżeli założyć w szczelinie międzyelektrodowej (SM) trzy strefy kształtowania się przepływu ośrodka dwufazowego, a mianowicie strefę przepływu jednofazowego, przykatodową strefę dwufazową o grubości h_k mniejszej od grubości szczeliny h , w której średnia koncentracja objętościowa fazy gazowej jest stała oraz dwufazową strefę elektrolit-wodór wypełniającą szczelinę całkowicie, w której koncentracja objętościowa fazy gazowej zmienia się wzdłuż przepływu, funkcja Φ_{TG} opisująca wpływ temperatury oraz koncentracji objętościowej fazy gazowej na konduktywność mieszaniny w szczelinie międzyelektrodowej (SM) przyjmuje odpowiednio postać [90]:

– w strefie pierwszej:

$$\Phi_{TG} = \frac{1}{h} \left[\int_0^h \frac{dy}{(1+\alpha_T \Delta T)} \right] \quad (3.20)$$

– w strefie drugiej:

$$\Phi_{TG} = \frac{1}{h} \left[\frac{1}{(1-\beta_k)^{1,5}} \int_0^{h_k} \frac{dy}{(1+\alpha_T \Delta T)(1-\beta)^{\frac{3}{2}}} + \int_{h_k}^h \frac{dy}{(1+\alpha_T \Delta T)} \right] \quad (3.21)$$

gdzie:

β_k – średnia koncentracja fazy gazowej wyznaczona z bilansu masy dla wodoru i wynosi:

$$\beta_k = \beta \frac{h}{h_k} \quad (3.22)$$

– w strefie trzeciej:

$$\Phi_{TG} = \frac{1}{h} \left[\int_0^h \frac{dy}{(1+\alpha_T \Delta T)(1-\beta_k)^{1,5}} \right] \quad (3.23)$$

Równanie ewolucji przedmiotu obrabianego (PO) w fazie drugiej obróbki ECM, tzn. gdy elektroda robocza (ER) istotnie różni się od półfabrykatu ma postać:

$$\frac{\partial Z_A}{\partial t} = k_V \kappa_0 \Phi_{TG} \frac{U-E}{h_{min}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_A}{\partial R} \right)^2} \quad (3.24)$$

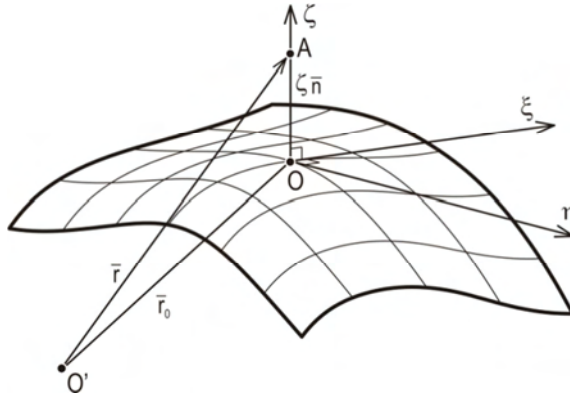
dla $t = 0$ $Z_A = Z_A(R)$.

Układ równań (3.17-3.18, 3.20-3.24) nie jest układem zamkniętym. Dla zamknięcia układu niezbędne jest wyznaczenie rozkładów temperatury w szczelinie międzyelektrodowej (SM), grubości h i koncentracji fazy gazowej β . Określenie rozkładów temperatury w szczelinie międzyelektrodowej (SM) wymaga analizy przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie. Równania opisujące przepływ mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej (SM) przedstawiono w podrozdziale 2.3.3.

3.2.2. Konfiguracja pola przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej

Modelowanie matematyczne przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej (SM) rozważa się w krzywoliniowym, lokalnie ortogonalnym układzie współrzędnych związanym z wprowadzoną do rozważań powierzchnią zakrzywioną ograniczającą przepływ [167-170].

Na rysunku 3.2 przedstawiono element rozpatrywanej powierzchni, na którym zaznaczono liniami $\xi = const$, $\eta = const$ ortogonalną siatkę.



Rys. 3.2. Element powierzchni krzywoliniowej

Równanie wektorowe takiej powierzchni można wyrazić zależnością:

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_0(\xi, \eta) \quad (3.25)$$

Określenie dowolnego punktu przestrzeni, leżącego w odległości ζ mierzonej wzdłuż normalnej, jednoznacznie wyznacza wektor przedstawiony w postaci:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0(\xi, \eta) + \zeta \mathbf{n}(\xi, \eta) \quad (3.26)$$

Kwadrat elementu długości w ortogonalnym układzie współrzędnych ξ, η, ζ jest równy:

$$ds^2 = (dr)^2 = \left(\frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial \xi} + \zeta \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \xi} \right)^2 d\xi^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial \eta} + \zeta \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \eta} \right)^2 d\eta^2 + d\zeta^2 \quad (3.27)$$

Zakładając, że współrzędne ξ i η pokrywają się z liniami powierzchni zakrzywionej, wykorzystując wzory Rodriguesa [167]:

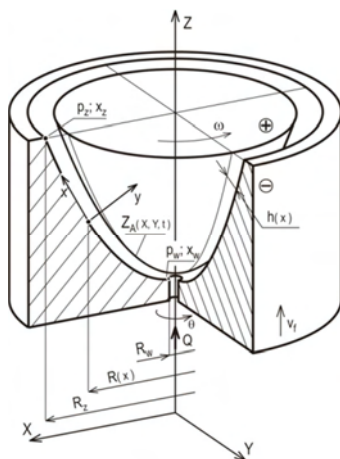
$$\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \xi} = \frac{1}{R_1} \frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial \xi} \quad ; \quad \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \eta} = \frac{1}{R_2} \frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial \eta} \quad (3.28)$$

kwadrat elementu długości można przedstawić następująco:

$$ds^2 = \left(\frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial \xi} \right)^2 \left(1 + \frac{\zeta}{R_1} \right)^2 d\xi^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial \eta} \right)^2 \left(1 + \frac{\zeta}{R_2} \right)^2 d\eta^2 + d\zeta^2 \quad (3.29)$$

przy czym: R_1, R_2 – oznaczają odpowiednio promienie krzywizny powierzchni.

Obszar przepływu mieszanki elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej (SM) między krzywoliniowymi powierzchniami obrotowymi przedstawiono na rysunku 3.3.



Rys. 3.3. Obszar przepływu elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej (SM)

Powierzchnię elektrody roboczej opisuje funkcja $R(x)$, oznaczająca promień tej powierzchni. Grubość szczeliny międzyelektrodowej h jest to odcinek poprowadzony wzdłuż normalnej do powierzchni elektrody roboczej (ER), przecinający krzywiznę powierzchni anody (PO) w przekroju osiowym.

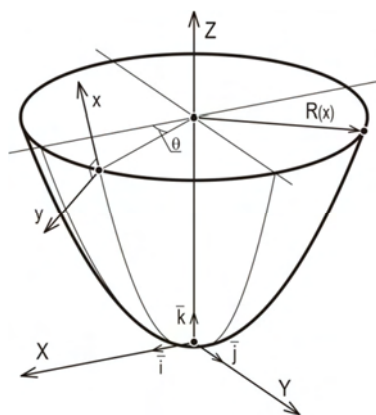
Zakłada się, że grubość szczeliny $h(x)$ będzie mała w porównaniu z promieniem powierzchni $R(x)$, co można wyrazić formułą:

$$h(x) \ll R(x) \quad (3.30)$$

Chcąc równania przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru przedstawić w krzywoliniowym ortogonalnym układzie współrzędnych należy wyznaczyć współczynniki Lamego.

Dla powierzchni obrotowej (osiowosymetrycznej) przedstawionej na rysunku 3.4, równanie wektorowe przyjmuje postać [175]:

$$r_0 = i R(x) \cos(\theta) + j R(x) \sin(\theta) + k Z(x) \quad (3.31)$$



Rys. 3.4. Kształt powierzchni osiowosymetrycznej

Podstawiając (3.31) do równania (3.29) i przyjmując:

$$\xi = x, \eta = \theta, \zeta = y \quad (3.32)$$

otrzymano:

$$ds^2 = \left(1 + \frac{y}{R_1}\right)^2 dx^2 + R^2(x) \left(1 + \frac{y}{R_2}\right)^2 d\theta^2 + dy^2 \quad (3.33)$$

przy czym $R_1, R_2 \geq R(x)$.

Uwzględniając, że $y \leq h$ przy założeniu (3.30) kwadrat elementu liniowego w układzie współrzędnych x, θ, y można zapisać w następującej postaci:

$$ds^2 = dx^2 + R^2(x)d\theta^2 + dy^2 \quad (3.34)$$

Stąd współczynniki Lamego są równe:

$$L_x = 1, \quad L_\theta = R(x), \quad L_y = 1 \quad (3.35)$$

Stosując wyznaczone współczynniki Lamego w równaniach ruchu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej (SM) (3.17-3.18, 3.20-3.24) otrzymano układ równań ruchu mieszaniny w przyjętym krzywoliniowym układzie współrzędnych.

3.2.3. Równania ruchu mieszaniny elektrolitu i wodoru w krzywoliniowym układzie współrzędnych

Układ równań mieszaniny elektrolitu i wodoru (2.46-2.49), opisuje przepływ zarówno laminarny, jak i turbulentny [150]. Po to, aby wyznaczyć rozwiązanie układu równań (2.46-2.49) dla przepływu turbulentnego, nie można jednak wprowadzić żadnego założenia upraszczającego, prowadzącego do zmniejszenia liczby zmiennych niezależnych. Dotychczas nie udało się rozwiązać analitycznie układu równań (2.46-2.49) bez uproszczeń [53, 187].

Przepływ laminarny

Stosując do układu równań (3.17-3.18, 3.20-3.24) ogólnie znane formuły dla poszczególnych operacji wektorowych, wykorzystując wyznaczone współczynniki Lamego, równania przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru w krzywoliniowym lokalnie ortogonalnym układzie współrzędnych x, θ, y przyjmują postać:

- równania ciągłości przepływu mieszaniny:
 - dla elektrolitu:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_e R v_x)}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_e v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho_e v_y)}{\partial y} = 0 \quad (3.36)$$

- dla wodoru:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_H R v_x)}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_H v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho_H v_y)}{\partial y} = j \eta_H k_H h^{-1} \quad (3.37)$$

- równania pędu:

$$\rho_e \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{v_\theta}{R} \frac{\partial v_x}{\partial \theta} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_\theta^2 \frac{R'}{R} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial x} \mu \left\{ 2R \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \left[\frac{\partial(Rv_x)}{\partial x} \right] + \frac{1}{R} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right\} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \mu \left[\left(\frac{1}{R} \frac{\partial v_x}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial x} - v_\theta \frac{R'}{R} \right) - 2 \left(\frac{1}{R} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_x \frac{R'}{R} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \quad (3.38)$$

$$\rho_e \left(v_x \frac{\partial v_\theta}{\partial x} + \frac{v_\theta}{R} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_y \frac{\partial v_\theta}{\partial y} + v_x v_\theta \frac{R'}{R} \right) = -\frac{1}{R} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial x} R^2 \mu \left(\frac{1}{R} \frac{\partial v_x}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial x} - v_\theta \frac{R'}{R} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \mu \left\{ \left(\frac{1}{R} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_x \frac{R'}{R} \right) - \frac{2}{3} \left[\frac{\partial(Rv_x)}{\partial x} \right] + \frac{1}{R} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{1}{R} \frac{\partial v_y}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial y} \right) \quad (3.39)$$

$$\rho_e \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{v_\theta}{R} \frac{\partial v_y}{\partial \theta} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial x} R \mu \left(\frac{1}{R} \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \mu \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left\{ 2 \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \left[\frac{\partial(Rv_x)}{\partial x} \right] + \frac{1}{R} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right\} \quad (3.40)$$

- równanie energii:

$$\rho_e c_p \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{v_\theta}{R} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda R \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \frac{\partial T}{R \partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{j^2}{\kappa} \quad (3.41)$$

tutaj:

v_x, v_θ, v_y	– składowe wektora prędkości,
p	– ciśnienie mieszaniny elektrolitu i wodoru,
$\rho_e = (1 - \beta) \rho_e^0$	– zastępcza gęstość elektrolitu,
$\rho_H = \beta \rho_H^0$	– zastępcza gęstość wodoru,
μ_e	– dynamiczny współczynnik lepkości elektrolitu,
κ	– zastępcza konduktywność mieszaniny,
j, η_H, k_H	– to odpowiednio gęstość prądu, wydajność prądowa wydzielania wodoru, równoważnik elektrochemiczny wodoru,
T	– temperatura mieszaniny,
c_p	– ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,
R	– promień powierzchni elektrody roboczej (ER), $R' = \frac{\partial R}{\partial x}$.

Przedstawiony układ równań (3.36-3.41) opisuje trójwymiarowy, ustalony przepływ mieszaniny elektrolitu i wodoru w krzywoliniowym lokalnie ortogonalnym układzie współrzędnych x, θ, y w przypadku braku współosiowości elektrody roboczej (ER) i przedmiotu obrabianego (PO). Należy zauważyć, że równania (3.36-3.41) na obecnym etapie wiedzy nie są możliwe do rozwiązania w szczególności przy użyciu metod analitycznych.

Jeżeli w procesie obróbki ECM zachowa się współosiowość elektrody roboczej (ER) i przedmiotu obrabianego (PO), tzn. $\frac{\partial}{\partial \theta} \equiv 0$, wówczas przepływ mieszaniny elektrolitu i wodoru staje się przepływem osiowosymetrycznym.

Chcąc uwzględnić w przepływie ośrodka dwufazowego wpływ efektów bezwładności rozważono dwie klasy oszacowań odniesione do składowych prędkości i ciśnienia, a mianowicie:

I klasę oszacowań [167]:

$$v_x = O(v_0), v_\theta = O(v_0), v_y = O\left(v_0 \frac{h_0}{R_0}\right), p = O\left(\frac{\mu v_0 R_0}{h_0}\right) \quad (3.42)$$

II klasę oszacowań [167]:

$$v_x = O\left(v_0 \frac{h_0}{R_0}\right), v_\theta = O(v_0), v_y = O\left(v_0 \frac{h_0^2}{R_0^2}\right), p = O\left(\frac{\mu v_0}{h_0}\right) \quad (3.43)$$

W zależnościach (3.42) i (3.43) odpowiednio symbolami oznaczono:

v_0 – średnia prędkość przepływu,

h_0 – średnia grubość szczeliny międzyelektrodowej,

R_0 – średni promień powierzchni elektrody roboczej (ER).

Wprowadzając zależności (3.42-3.43) do układu równań (3.36-3.41) oraz pomijając składniki małe wyższych rzędów otrzymano uproszczone formy równań ruchu dla obu przyjętych do rozważań klas przepływu ośrodka dwufazowego.

I klasa przepływów:

- równania ciągłości przepływu:
 - dla elektrolitu:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_e R v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_e v_y)}{\partial y} = 0 \quad (3.44)$$

- dla wodoru:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_H R v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_H v_y)}{\partial y} = j \eta_H k_H h^{-1} \quad (3.45)$$

- równania pędu:

$$\rho_e \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_\theta^2 \frac{R'}{R} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \quad (3.46)$$

$$\rho_e \left(v_x \frac{\partial v_\theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_\theta}{\partial y} + v_x v_\theta \frac{R'}{R} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial y} \right) \quad (3.47)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.48)$$

- równanie energii:

$$v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{j^2}{\rho_e c_p \kappa} \quad (3.49)$$

gdzie: $a = \frac{\lambda}{\rho_e c_p}$ – dyfuzyjność cieplna mieszaniny elektrolitu i wodoru.

II klasa przepływów:

- równania ciągłości przepływu:
 - dla elektrolitu:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_e R v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_e v_y)}{\partial y} = 0 \quad (3.50)$$

- dla wodoru:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_H R v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_H v_y)}{\partial y} = j \eta_H k_H h^{-1} \quad (3.51)$$

- równania pędu:

$$\rho_e v_\theta^2 \frac{R'}{R} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \quad (3.52)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial y} \right) \quad (3.53)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.54)$$

- równanie energii:

$$v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{j^2}{\rho_e c_p \kappa} \quad (3.55)$$

Sformułowane układy równań (3.44)-(3.55) stanowią dwa niezależne układy równań analizy osiowosymetrycznego, ustalonego i laminarnego przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczeliny międzyelektrodowej (SM).

Rozwiązanie układów równań (3.44-3.49) lub (3.50-3.55) pozwoli wyznaczyć rozkłady prędkości, ciśnienia i temperatury w szczeliny międzyelektrodowej (SM). Uzyskane formuły, opisujące rozkład temperatury w szczeliny wykorzystane będą dla wyznaczenia ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO) na podstawie równania (3.24).

Przepływ turbulentny

Dla uzyskania postaci równań, które wykazywałyby specyficzną odmienną ruchu turbulentnego, zgodnie z hipotezą Reynoldsa zakłada się, że chwilowe wartości wszystkich charakteryzujących przepływ wielkości fizycznych traktowane są jako sumy wielkości średnich (uśrednianie w czasie [36, 53, 150] oraz odpowiednich wielkości fluktuacyjnych:

$$v_x = \bar{v}_x + v'_x, \quad v_\theta = \bar{v}_{\theta x} + v'_{\theta}, \quad v_y = \bar{v}_y + v'_y \quad (3.56)$$

$$p = \bar{p} + p', \quad \rho = \bar{\rho} + \rho'$$

Wprowadzając związki (3.56) do równań ciągłości (3.44-3.45), pędu (3.46-3.48) oraz dokonując uśredniania w czasie, przy założeniach [36, 71, 72]:

- przepływ uśredniony jest ustalony,
- linie prądu są równoległe do ścianek ograniczających przepływ,
- rozkłady prędkości są w przybliżeniu takie same, jak dla dwóch stykających się pośrodku szczeliny międzyelektrodowej (SM) warstw przyściennych, zastępczy dynamiczny współczynnik lepkości mieszaniny $\mu = \mu(x)$,
- pewne składowe pełnego układu równań są pomijalnie małe (oszacowania równań analogiczne do równań Prandtla dla laminarnej warstwy przyściennej)

otrzymamy równania ruchu turbulentnego dla przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczeliny międzyelektrodowej (SM) w postaci:

- równania ciągłości przepływu mieszaniny:
 - dla elektrolitu:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\bar{\rho}_e R \bar{v}_x)}{\partial x} = 0 \quad (3.57)$$

- dla wodoru:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\bar{\rho}_H R \bar{v}_x)}{\partial x} = j \eta_h k_h h^{-1} \quad (3.58)$$

- równania pędu:

$$\frac{R'}{R} (\bar{v}_x^2 + \bar{v}_\theta^2) = -\frac{1}{\bar{\rho}_e} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{1}{\bar{\rho}_e} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad (3.59)$$

$$\bar{v}_x \left(\frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial x} + \bar{v}_\theta \frac{R'}{R} \right) = \frac{1}{\bar{\rho}_e} \frac{\partial \tau_{y\theta}}{\partial y} \quad (3.60)$$

$$0 = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \quad (3.61)$$

$$\frac{1}{\bar{\rho}_e} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = \frac{\mu}{\bar{\rho}_e} \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y} (-\overline{v'_x v'_y}) \quad (3.62)$$

$$\frac{1}{\bar{\rho}_e} \frac{\partial \tau_{y\theta}}{\partial y} = \frac{\mu}{\bar{\rho}_e} \frac{\partial^2 \bar{v}_\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y} (-\overline{v'_\theta v'_y}) \quad (3.63)$$

- równanie energii:

$$\bar{v}_x \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left[(a + a_T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{j^2}{\bar{\rho}_e c_p x} \quad (3.64)$$

Sformułowany układ równań (3.57)-(3.64) jest układem pozwalającym na analizę osiowosymetrycznego, ustalonego i turbulentnego przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczeliny międzyelektrodowej (SM).

Rozwiązanie układu równań (3.57)-(3.64) pozwoli wyznaczyć rozkłady prędkości, ciśnienia i temperatury w szczeliny międzyelektrodowej (SM) w warunkach przepływu turbulentnego. Uzyskane formuły opisujące rozkład temperatury w szczeliny wykorzystane będą dla wyznaczenia ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO), na podstawie równania (3.24).

Należy zaznaczyć, że równania (3.57-3.64) nie uwzględniają odcinka wstępnego na wlocie do szczeliny.

3.2.4. Warunki brzegowe

Przepływ laminarny

Rozwiązania równań (3.44-3.49) i (3.50-3.55) powinny spełniać warunki brzegowe odpowiednio dla składowych prędkości i ciśnienia:

- składowych prędkości:

$$\begin{aligned} v_x &= v_y = 0 \text{ gdy } y = 0 \\ v_x &= 0, v_y = \frac{\partial h}{\partial t} \text{ gdy } y = h \\ v_\theta &= 0 \text{ gdy } y = 0 \\ v_\theta &= \omega R(x) \text{ gdy } y = h \end{aligned} \quad (3.65)$$

- ciśnienia:

$$p = p_z + \zeta_z \frac{\rho_e(1-\beta_z)v_{xsr}^2}{2} \text{ dla } x = x_z \quad (3.66)$$

Wartość współczynnika ζ_z w przepływie laminarnym przyjmuje wartość zbliżoną do jedności [53, 150].

- dla temperatury:

– na ściankach:

$$T = T_s \text{ dla } x \geq x_w \text{ i } y = 0 \text{ oraz } y = h \quad (3.67)$$

– na wlocie, czyli gdy $x = x_w$

$$T = T_w$$

gdzie:

- p_z – ciśnienia na wylocie szczeliny międzyelektrodowej,
- $V = \frac{\partial h}{\partial t}$ – prędkość liniowa powierzchni drgającej,
- x_w, x_z – współrzędne położenia wlotu i wylotu ze szczeliny międzyelektrodowej,
- T_s – temperatura elektrod,
- T_w – temperatura elektrolitu na wlocie.

Przepływ turbulentny

Rozwiązania równań (3.57-3.64) powinny spełniać warunki brzegowe odpowiednio dla składowych prędkości i ciśnienia:

- składowych prędkości:

$$\begin{aligned} \bar{v}_x &= 0 \text{ dla } y = 0 \\ \bar{v}_x &= 0, \text{ dla } y = h \\ \bar{v}_\theta &= 0 \text{ dla } y = 0 \\ \bar{v}_\theta &= \omega R(x) \text{ dla } y = h \end{aligned} \quad (3.68)$$

- ciśnienia:

$$\bar{p} = \bar{p}_z + \zeta_z \frac{\rho_e(1-\beta_z)\bar{v}_{xsr}^2}{2} \text{ dla } x = x_z \quad (3.69)$$

Wartość współczynnika ζ_z w przepływie turbulentnym zmniejsza się ze wzrostem liczby Reynoldsa i przyjmuje wartość w przedziale od 0,2 do 0,8 [53, 150].

- dla temperatury:
 - na ściankach:

$$T = T_s \text{ dla } x \geq x_w \text{ i } y = 0 \text{ oraz } y = h \quad (3.70)$$

- na wlocie, czyli gdy $x = x_w$

$$T = T_w$$

3.2.5. Analiza pola koncentracji fazy gazowej w szczelinie międzyelektrodowej

Oddziaływanie pola koncentracji fazy gazowej, w szczególności wodoru, na proces obróbki ECM spowodowane jest przede wszystkim zmianą wartości ciśnienia statycznego wzdłuż szczeliny wypełnionej ośrodkiem dwufazowym, przewodnictwa elektrycznego elektrolitu oraz temperatury ośrodka dwufazowego [73, 84].

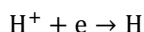
Pojawienie się fazy gazowej w szczelinie międzyelektrodowej (SM) spowodowane jest wydzielaniem:

- kationów (H^+) na elektrodzie roboczej (ER),
- anionów (Cl^- , O^-) na powierzchni przedmiotu obrabianego (PO).

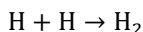
Czasami przy powierzchniach elektrod mogą pojawiać się pęcherze, warstwy gazowe prowadzące do intensywnego parowania. Przy dużych prędkościach fazy gazowej może również wystąpić kawitacja.

Głównym i zazwyczaj jedynym źródłem pojawienia się fazy gazowej jest proces wydzielania się kationów wg mechanizmu reakcji Volmera-Tafela.

Zgodnie z reakcją wyładowania [84]:



oraz rekombinacji



wydzielający się na anodzie gaz natychmiast bierze udział w reakcjach wtórnych. Jedynie przy dużych potencjałach polaryzacji mogą pojawiać się pęcherzyki gazu. Wspomniane procesy powodują przesycenie elektrolitu gazem atomowym i w efekcie powstawanie pęcherzyków gazu, które razem z fazą ciekłą, czyli elektrolitem tworzą ośrodek dwufazowy. W pracy [91] stwierdzono, że w przepływie ośrodka można wyróżnić warstwę przyelektrodową pęcherzyków ślizgających się po powierzchni, lub do niej przyczepionych oraz warstwę pęcherzyków poruszających się z fazą ciekłą.

Proces powstawania ośrodka dwufazowego zależny jest od wielu czynników np.:

- ilości gazu rozpuszczonego w cieczy,
- adsorpcji gazu na powierzchni elektrod,
- chropowatości elektrod,
- własności fizykochemicznych cieczy i powierzchni,
- kąta brzegowego i jego zależności od potencjału elektrycznego powierzchni,

- napięcia powierzchniowego,
- rodzaju i ilości substancji powierzchniowo aktywnych,
- wzajemnym oddziaływaniem pęcherzyków,
- hydrodynamiką przepływu,
- geometrią szczeliny.

Wpływ tak dużej liczby czynników na powstawanie ośrodka dwufazowego pozwala sądzić, że proces ten ma charakter probabilistyczny.

Istnieje wiele prac opisujących proces wydzielania się pęcherzyków gazu w procesie obróbki ECM [84].

Uproszczone analizy wpływu wydzielania się gazu w procesie ECM prowadzą do uśredniania koncentracji objętościowej fazy gazowej w określonym przekroju wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM) lub w poprzek strefy dwufazowej. W pracy [83,84] zakłada się, że średnia koncentracja objętościowa niewiele zmienia się aż do momentu wypełnienia całej szczeliny przepływem dwufazowym. Takie założenie pozwala na przybliżone określenie grubości strefy dwufazowej w zadanym przekroju.

Uwzględnienie strefy dwufazowej w szczelinie międzyelektrodowej (SM) określa się z bilansu masy gazu, w tym przypadku bilansu masy wodoru.

Dla określenia koncentracji objętościowej fazy gazowej (wodoru) przyjmuje się następujące założenia upraszczające:

- wydzielająca się na elektrodach całkowita masa gazu zawarta jest w pęcherzykach,
- ciśnienia i temperatury fazy gazowej zawartej w pęcherzykach i fazy ciekłej są takie same,
- takie same są prędkości fazy ciekłej i gazowej (tzw. przepływ bezpoślizgowy).

Autor pracy [84] zauważa, że waga poszczególnych błędów wynikających z poczynionych uproszczeń jest różna. Zależy od parametrów wyjściowych obróbki i obrabianych kształtów powierzchni. Okazuje się, że przy małych długościach szczelin błąd pierwszego założenia będzie duży w porównaniu ze szczelinami długimi. Wynika to z faktu, iż proces powstawania pęcherzyka wymaga określonego czasu. Drugie założenie wynika z faktu pominięcia napięcia powierzchniowego. Uwzględnienie napięcia powierzchniowego wymaga z kolei znajomości wymiarów pęcherzyków i ich probabilistycznego rozkładu. Liczne badania [4, 73, 105, 115, 203] pozwalają stwierdzić, że dla najczęściej występujących średnic pęcherzyków gazu wpływ napięcia powierzchniowego może być pominięty. Ocena koncentracji objętościowej gazu w warstwie dwufazowej zależy od różnic prędkości obu faz, a więc od ich wzajemnego poślizgu. Brak jest danych doświadczalnych tego zjawiska w warunkach obróbki elektrochemicznej ECM.

Należy zauważyć, że pojawiający się w procesie obróbki ECM gaz nie tylko pogarsza dokładność tej obróbki, ale wyraźnie zmienia przebieg procesu. Obróbka ECM dużych powierzchni, długich otworów, gdzie koncentracja fazy gazowej jest duża może powodować, że pojawiać się będą nieciągłości przepływu wynikające z łączenia się pęcherzyków gazu w większe. Efektem tego są powstające, tzw. korki gazowe zmieniające strukturę przepływu. Przepływ taki staje się przepływem korkowym. Prowadzi to często do lokalnego przerywania procesu roztwarzania elektrochemicznego (np. zwarcia).

Bardzo niekorzystnym efektem wynikającym z pojawienia się fazy gazowej w przepływie ośrodka jest, tzw. przepływ krytyczny. Przepływ krytyczny występuje, gdy koncentracja objętościowa fazy gazowej osiąga wartość $\beta = 0,5$. W takich warunkach

przepływu prędkość dźwięku osiąga wartości minimalne, co powoduje gwałtowny wzrost strat hydraulicznych, a gdy liczba Macha Ma zbliża się do jedności dodatkowo zaczynają pojawiać się fale uderzeniowe. Zjawiska takie mogą już występować przy prędkościach przepływu rzędu $15\text{--}20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [15]. Prowadzi to do niestabilności przepływu ośrodka dwufazowego w szczelinie międzyelektrodowej (SM) powodując stany awaryjne.

Przedstawione uwagi dotyczące pojawienia się w przepływie elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej (SM) fazy gazowej wymuszają konieczność wyznaczenia analitycznie, bądź numerycznie rozkładu koncentracji objętościowej fazy gazowej w szczelinie międzyelektrodowej (SM). Jest to niezbędne dla przeprowadzenia poprawnej analizy dokładności, przy projektowaniu elektrody roboczej (ER), a także dla właściwego doboru warunków obróbki.

Biorąc pod uwagę poczynione wcześniej założenia, równanie pozwalające wyznaczyć rozkład koncentracji objętościowej fazy gazowej przedstawione w podrozdziale 3.2.2. wynika z bilansu masy dla wodoru i ma postać równania (3.37) w warunkach przepływu laminarnego lub (3.58), gdy przepływ jest turbulentny.

3.2.6. Metody rozwiązania równań ruchu mieszaniny elektrolitu i wodoru

Przedstawione w poprzednim punkcie równania ruchu mieszaniny elektrolitu i wodoru (3.44-3.49) stanowią układ równań zbliżony do układu równań, tzw. warstwy przyściennej Prandtla [53, 150]. Metody rozwiązywania tych równań można podzielić na [68, 149, 150]:

- metody analityczne,
- metody numeryczne.

Do typowych metod analitycznych rozwiązywania równań warstwy przyściennej zalicza się [167]:

- metodę samopodobieństwa,
- metodę małego parametru,
- metodę przybliżeń asymptotycznych,
- metodę uśrednionej bezwładności,
- metodę przybliżeń całkowych, (momentów).

Metoda samopodobieństwa należy do tzw. metod efektywnych i szeroko stosowana jest do analizy przepływów jednofazowych newtonowskich, najczęściej przepływów o stałych współczynnikach [150, 167]. Istotą metody jest wyznaczenie transformacji zmiennych zapewniających samopodobieństwo. Metoda ma pewne ograniczenia, bowiem transformacja zmiennych nakłada ograniczenia odnośnie kształtów powierzchni ograniczających przepływ. Oznacza to, że rozwiązania samopodobne mogą mieć miejsce tylko dla ściśle zadanych kształtów szczelin, a tym samym powierzchni ograniczających przepływ. Transformacja zmiennych pozwala zastąpić równania różniczkowe cząstkowe równaniami różniczkowymi zwyczajnymi, których rozwiązanie wymaga zastosowania metod analitycznych przybliżonych lub metod numerycznych.

Metoda małego parametru, to metoda oparta na rozwinięciu w szereg względem tzw. małego parametru [190]. Istnienie takiego parametru, który spełnia w postaci bezwymiarowej warunek:

$$\lambda < 1$$

pozwała na przewidywanie rozwiązań w postaci nieskończonych szeregów potęgowych względem znalezionej wartości parametru. Metoda małego parametru prowadzi do linearyzacji nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych. Metoda ta nie narzuca ograniczeń jak wspomniana wyżej metoda oparta na tzw. samopodobieństwie przepływów.

Metoda przybliżeń asymptotycznych polega na podwójnym uśrednianiu składników bezwładnościowych i pozwala uzyskać asymptotyczne rozwiązania metodą kolejnych iteracji [150, 167]. Uzyskane rozwiązania są zbliżone do rozwiązań otrzymanych metodą małego parametru.

Metoda uśrednionej bezwładności zaproponowana przez Targa [167] jest efektywna w odniesieniu do przepływów między nieruchomymi powierzchniami obrotowymi. Metoda poprzez uśrednianie wartości składników bezwładnościowych w równaniach ruchu pozwala z dużą dokładnością określić rozkłady ciśnień w szczelinie.

Metoda przybliżeń całkowych nazywana metodą momentów pozwala na dokładne określenie rozkładów ciśnienia w szczelinie [150, 167]. Istota metody polega na wykorzystaniu rozkładów prędkości przepływu w szczelinie, otrzymanych dla przybliżenia Reynoldsa, a następnie na ich wykorzystaniu w równaniach uwzględniających człony bezwładnościowe do wyznaczenia rozkładów ciśnienia za pomocą tzw. przybliżeń całkowych pędu i energii.

Metody numeryczne, za pomocą których możliwe jest rozwiązanie układów równań (3.44-3.49) i (3.57-3.64) to [38]:

- metoda różnic skończonych MRS,
- metoda elementów skończonych,
- metoda objętości skończonych,
- metoda elementów brzegowych,
- metody bezsiatkowe.

Metoda różnic skończonych polega na zastąpieniu operatorów różniczkowych, występujących w równaniach różniczkowych cząstkowych na stosowne operatory różnicowe, określone na dyskretnym zbiorze punktów [150]. Zbiór takich punktów wyznacza siatkę przepływu. Dzięki aproksymacji funkcji i jej pochodnych, zagadnienie opisane równaniem różniczkowym cząstkowym lub układem równań różniczkowych cząstkowych sprowadzone zostaje do układu równań algebraicznych. Niewiadomymi są dyskretne wartości poszukiwanej funkcji (prędkości, ciśnienia, gęstości, temperatury itp.). Klasyczna MRS generuje trudności związane z dyskretyzacją warunków brzegowych, kiedy brzeg obszaru obliczeń jest krzywoliniowy. Znacznie większe możliwości daje uogólniona wersja MRS. Wersja uogólniona rozpatruje nieregularne siatki węzłów, wprowadza się tzw. gwiazdy, które służą do zbudowania określonych operatorów różnicowych.

Metoda elementów skończonych polega na podziale obszaru przepływu na skończoną liczbę tzw. elementów skończonych, łączących się w węzłach [53]. Elementy skończone mogą mieć kształt odcinka (np. gdy zagadnienie jest jednowymiarowe), płaskich figur, często trójkątnych lub czworokątnych (gdy zagadnienie jest dwuwymiarowe),

a także brył przestrzennych w postaci czworościanów lub graniastosłupów (gdy zagadnienie jest trójwymiarowe). Poszukiwane funkcje, które są rozwiązaniem zagadnienia brzegowo-początkowego interpolowane są za pomocą wartości węzłowych poszukiwanej funkcji rozwiązania oraz funkcji interpolacyjnych (tzw. funkcji kształtu). Taka aproksymacja zagadnienia brzegowo-początkowego powoduje, że równania różniczkowe

we nie są dokładnie spełnione. Błędem aproksymacji jest reszta (tzw. residuum). Warunkiem poprawnej dyskretyzacji jest, aby residuum było jak najmniejsze. Metoda MES umożliwia praktycznie przyjmowanie dowolnego kształtu obszaru, rozmieszczenia węzłów oraz rodzajów warunków brzegowych.

Metoda czasoprzestrzennych elementów skończonych jest szczególnym wariantem MES, skierowanym do zagadnień nieustalonych [53]. Czas w metodzie czasoprzestrzennych elementów skończonych traktowany jest jako czwarty wymiar czasoprzestrzeni i podlega takiej samej dyskretyzacji jak zmienne przestrzenne.

Metoda objętości skończonych lub objętości kontrolnych (tzw. obszarów kontrolnych) opiera się na zasadzie osłabienia warunków opisujących rozwiązywane równanie różniczkowe [53]. Zamiast spełnienia warunku w dowolnym punkcie obszaru żąda się, aby został on spełniony w sposób całkowity w małym obszarze kontrolnym. Duża dowolność kształtowania tych obszarów powoduje łatwość generowania odpowiednich równań wyznaczających wartości węzłowe poszukiwanej funkcji. Metody objętości skończonych coraz bardziej wypierają w zastosowaniach praktycznych metodę różnic skończonych i metod elementów skończonych zwłaszcza, gdy zagadnienie odnosi się do problematyki przepływów płynów i ciepła.

Metoda elementów brzegowych polega na transformacji zagadnienia brzegowo-początkowego do układu tzw. brzegowych równań całkowych, które określone są tylko na brzegu obszaru [190]. Istotą tych równań jest osłabienie jąderek całek brzegowych. Transformacja tylko do brzegu zmniejsza wymiar zagadnienia o jeden rząd. Równania całkowite opisujące dane zagadnienie po takiej transformacji określone są tylko na brzegu obszaru. Oznacza to, że dyskretyzacja problemu wymaga tylko dyskretyzacji brzegu. Zatem brzeg dzielony jest na skończoną liczbę elementów brzegowych. W przypadku zagadnień jednowymiarowych elementy brzegowe redukują się do punktów. Dla zagadnień dwuwymiarowych elementy brzegowe są w postaci odcinków prostoliniowych lub zakrzywionych. Gdy zagadnienie jest przestrzenne, elementy brzegowe mają postać trójkątnych lub czworokątnych płatów powierzchniowych (płaskich lub zakrzywionych). Aproksymację funkcji na elemencie wykonuje się podobnie jak w MES. Taka aproksymacja brzegowych równań całkowych prowadzi do układu równań algebraicznych. Rozwiązanie pozwala określić wszystkie nieznane funkcje na brzegu. Znajomość wszystkich funkcji na brzegu umożliwia w następnym etapie obliczenie nieznanymi funkcji w tych punktach wewnętrznych obszaru, w których jest to konieczne bez konieczności dyskretyzacji tego obszaru.

Metody bezsiatkowe (ang. meshless methods) są specjalną grupą metod numerycznych pozwalającą na symulację zjawisk fizycznych, poprzez rozwiązanie zagadnienia brzegowo-początkowego [190]. W odróżnieniu od przedstawionych powyżej metod, których istotą jest dyskretyzacja równań lub obszaru, metody bezsiatkowe konstruowane są na tzw. „chmurze” punktów rozrzuconych wewnątrz obszaru, na których szuka się rozwiązania przez zastosowanie różnych sposobów aproksymacji. Istnieje wiele odmian tej klasy metod, np. MFD (Meshless Finite Difference Method), SPH (Smooth Particle Hydrodynamics), MLSA (Moving Least Square Approximation), PUM (Partition of Unity Methods).

W celu rozwiązania równań opisujących proces obróbki ECM powierzchni obrotowych zastosowano dwie metody:

- do wyznaczenia rozkładów prędkości i ciśnienia w szczelinie międzyelektrodowej (SM) – metodę małego parametru,
- do wyznaczenia rozkładu temperatury w szczelinie międzyelektrodowej (SM) – metodę różnic skończonych (MRS).

3.2.7. Całki równań ruchu – przepływ osiowosymetryczny

Przepływ laminarny

Wprowadzając do równań (3.44-3.49) charakterystyczne zmienne bezwymiarowe, określone następującymi formułami:

$$\begin{aligned}\tilde{x} &= \frac{x}{R_o}, \quad \tilde{y} = \frac{y}{h_o}, \quad \tilde{R} = \frac{R}{R_o}, \quad \tilde{Q}_e = \frac{Q_e}{Q_e^0} \\ \tilde{v}_x &= \frac{v_x}{v_o}, \quad \tilde{v}_y = \frac{v_y R_o}{v_o h_o}, \quad \tilde{v}_\theta = \frac{v_\theta}{v_o}, \quad \tilde{p} = \frac{p h_o}{\mu v_o} \frac{h_o}{R_o}\end{aligned}\quad (3.71)$$

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

$$\frac{1}{\tilde{R}} \frac{\partial(\tilde{p}_e R \tilde{v}_x)}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial(\tilde{p}_e \tilde{v}_y)}{\partial \tilde{y}} = 0 \quad (3.72)$$

$$\lambda \left(\tilde{v}_x \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \tilde{x}} + v_y \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \tilde{y}} - \tilde{v}_\theta^2 \frac{\tilde{R}'}{\tilde{R}} \right) = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial^2 \tilde{v}_x}{\partial \tilde{y}^2} \quad (3.73)$$

$$\lambda \left(\tilde{v}_\theta \frac{\partial \tilde{v}_\theta}{\partial \tilde{x}} + v_y \frac{\partial \tilde{v}_\theta}{\partial \tilde{y}} - \tilde{v}_x \tilde{v}_\theta \frac{\tilde{R}'}{\tilde{R}} \right) = \frac{\partial^2 \tilde{v}_\theta}{\partial \tilde{y}^2} \quad (3.74)$$

$$0 = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{y}} \quad (3.75)$$

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

W równaniach ruchu (3.72) i (3.74) zmodyfikowana liczba Reynoldsa jest tzw. małym parametrem układu.

Można zatem jego rozwiązania poszukiwać w postaci szeregów potęgowych względem λ w postaci:

$$\tilde{v}_x = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i \tilde{v}_x^i, \quad \tilde{v}_y = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i \tilde{v}_y^i, \quad \tilde{v}_\theta = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i \tilde{v}_\theta^i, \quad \tilde{p} = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i \tilde{p}^i \quad (3.76)$$

Podstawiając szeregi (3.76) do równań ruchu (3.73) i (3.74) oraz równania ciągłości przepływu (3.72), porządkując i grupując wyrazy względem tych samych potęg λ , ograniczając się do przybliżenia liniowego oraz wracając do postaci wymiarowej otrzymano następujący ciąg równań:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_e R v_x^0)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_e v_y^0)}{\partial y} = 0 \quad (3.77)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_H R v_x^0)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_H v_y^0)}{\partial y} = j \eta_H k_H h^{-1} \quad (3.78)$$

$$0 = -\frac{\partial p^0}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial v_x^0}{\partial y} \right) \quad (3.79)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial v_\theta^0}{\partial y} \right) \quad (3.80)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(\rho_e R v_x^1)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_e v_y^1)}{\partial y} = 0 \quad (3.81)$$

$$\rho_e \left[v_x^0 \frac{\partial v_x^0}{\partial x} + v_y^0 \frac{\partial v_x^0}{\partial y} - (v_\theta^0)^2 \frac{R'}{R} \right] = -\frac{\partial p^1}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial v_x^1}{\partial y} \right) \quad (3.82)$$

$$\rho_e \left(v_x^0 \frac{\partial v_\theta^0}{\partial x} + v_y^0 \frac{\partial v_\theta^0}{\partial y} - v_x^0 v_\theta^0 \frac{R'}{R} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial v_\theta^1}{\partial y} \right) \quad (3.83)$$

Warunki brzegowe dla układu równań (3.77-3.83) przyjmują w tym przypadku postać:

- dla prędkości:
 - gdy $y = 0$ (na powierzchni elektrody roboczej (ER)):

$$\begin{aligned} v_x^0 &= 0, \quad v_y^0 = 0, \quad v_\theta^0 = 0 \\ v_x^1 &= 0, \quad v_y^1 = 0, \quad v_\theta^1 = 0 \end{aligned} \quad (3.84)$$

- dla $y = h$ (na powierzchni przedmiotu obrabianego (PO)):

$$\begin{aligned} v_x^0 &= 0, \quad v_y^0 = \frac{\partial h}{\partial t}, \quad v_\theta^0 = \omega R \\ v_x^1 &= 0, \quad v_y^1 = 0, \quad v_\theta^1 = 0 \end{aligned} \quad (3.85)$$

- dla ciśnienia:

$$p^0 = p_z + \zeta_z \frac{\rho_e (1 - \beta_z) v_{xst}^2}{2}, \quad p^1 = 0 \quad \text{gdy } x = x_z \quad (3.86)$$

Rozwiązując uzyskane ciągi równań, wykorzystując warunki brzegowe (3.84-3.86) otrzymano odpowiednio dla I klasy przepływów pole prędkości i ciśnienia w szczelinie międzyelektrodowej (SM) w postaci:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{3Q}{\pi R h^3} (hy - y^2) + \frac{\rho}{\mu} \left(\frac{27}{140} \frac{Q^2 R'}{\pi^2 R^3 h^2} + \frac{27}{140} \frac{QV}{\pi R h^2} + \frac{3}{20} \omega^2 R R' \right) (y^2 - hy) + \\ &+ \frac{\rho}{\mu} \left[\frac{3}{120} \frac{Q^2 R'}{\pi^2 R^3 h^6} (6hy^5 - 5h^2 y^4 - 2y^6 + h^5 y) + \frac{1}{20} \frac{QV}{\pi R h^6} (15h^2 y^4 - 24hy^5 + \right. \\ &\left. + 8y^6 + h^6 y) - \frac{1}{12} \frac{\omega^2 R R'}{h^2} (y^4 - h^3 y) \right] \end{aligned} \quad (3.87)$$

$$v_\theta = \omega R \frac{y}{h} + \frac{1}{20} \frac{\rho}{\mu} \left[\frac{2Q\omega R'}{\pi R h^4} (5hy^4 - 3y^5 - 2h^4 y) + \frac{\omega R V}{h^4} (5hy^4 - 2y^5 - 3h^4 y) \right] \quad (3.88)$$

$$v_y = \frac{V}{h^3} (3hy^2 - 2y^3) - \frac{1}{\rho_e R} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\rho}{\mu} \left(\frac{27}{140} \frac{Q^2 R'}{\pi^2 R^3 h^2} + \frac{27}{140} \frac{QV}{\pi R h^2} + \frac{3}{20} \omega^2 R R' \right) (y^2 - hy) + \right. \\ \left. + \frac{\rho}{\mu} \left[\frac{3}{20} \frac{Q^2 R'}{\pi^2 R^3 h^6} (6hy^5 - 5h^2 y^4 - 2y^6 + h^5 y) + \frac{1}{20} \frac{QV}{\pi R h^6} (15h^2 y^4 - 24hy^5 + \right. \right. \\ \left. \left. - 8y^6 + h^6 y) - \frac{1}{12} \frac{\omega^2 R R'}{h^2} (y^4 - h^3 y) \right] \right\} \quad (3.89)$$

$$p(x) = -\frac{6\mu Q}{\pi h^3} (A_x - A_z) + \frac{27}{70} \frac{\rho Q^2}{\pi^2 h^2} (B_x - B_z) + \frac{27}{70} \frac{\rho QV}{\pi h^2} (A_x - A_z) + \frac{3}{20} \rho \omega^2 (R^2 - R_z^2) + \\ + p_a \quad (3.90)$$

tutaj:

$$v_x^0 = \frac{3Q}{\pi R h^3} (hy - y^2) \quad (3.91)$$

$$v_x^1 = \frac{\rho}{\mu} \left(\frac{27}{140} \frac{Q^2 R'}{\pi^2 R^3 h^2} + \frac{27}{140} \frac{QV}{\pi R h^2} + \frac{3}{20} \omega^2 R R' \right) (y^2 - hy) + \frac{\rho}{\mu} \left[\frac{3}{20} \frac{Q^2 R'}{\pi^2 R^3 h^6} (6hy^5 + \right. \\ \left. - 5h^2 y^4 - 2y^6 + h^5 y) + \frac{1}{20} \frac{QV}{\pi R h^6} (15h^2 y^4 - 24hy^5 + 8y^6 + h^6 y) + \right. \\ \left. - \frac{1}{12} \frac{\omega^2 R R'}{h^2} (y^4 - h^3 y) \right] \quad (3.92)$$

$$v_\theta^0 = \omega R \frac{y}{h} \quad (3.93)$$

$$v_\theta^1 = \frac{1}{20} \frac{\rho}{\mu} \left[\frac{2Q\omega R'}{\pi R h^4} (5hy^4 - 3y^5 - 2h^4 y) + \frac{\omega R V}{h^4} (5hy^4 - 2y^5 - 3h^4 y) \right] \quad (3.94)$$

$$v_y^0 = \frac{V}{h^3} (3hy^2 - 2y^3) \quad (3.95)$$

$$v_y^1 = \\ - \frac{1}{\rho_e R} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\rho}{\mu} \left(\frac{27}{140} \frac{Q^2 R'}{\pi^2 R^3 h^2} + \frac{27}{140} \frac{QV}{\pi R h^2} + \frac{3}{20} \omega^2 R R' \right) (y^2 - hy) + \right. \\ \left. - \frac{\rho}{\mu} \left[\frac{3}{20} \frac{Q^2 R'}{\pi^2 R^3 h^6} (6hy^5 - 5h^2 y^4 - 2y^6 + h^5 y) + \frac{1}{20} \frac{QV}{\pi R h^6} (15h^2 y^4 - 24hy^5 + \right. \right. \\ \left. \left. + 8y^6 + h^6 y) \pm \frac{1}{12} \frac{\omega^2 R R'}{h^2} (y^4 - h^3 y) \right] \right\}, \quad (3.96)$$

$$p^0(x) = -\frac{6\mu Q}{\pi h^3} (A_x - A_z) + p_a, \quad (3.97)$$

$$p^1(x) = \frac{27}{70} \frac{\rho Q^2}{\pi^2 h^2} (B_x - B_z) + \frac{27}{70} \frac{\rho QV}{\pi h^2} (A_x - A_z) + \frac{3}{20} \rho \omega^2 (R^2 - R_z^2) \quad (3.98)$$

gdzie:

$$A_x = \int \frac{dx}{R}, B_x = -\frac{1}{2R^2}, C_x = \int \frac{dx}{R^2} dx, D_x = \int \rho_e R R' dx, V = \frac{\partial h}{\partial t} = A_n \omega \cos(\omega t),$$

$$A_n = A \cos(\alpha),$$

α – kąt między wektorem normalnym do PO a wektorem prędkości v_f ,

$$A_z = A(x_z), B_z = B(x_z), C_z = C(x_z), C_z = C(x_z).$$

Rozwiązując równania (3.50-3.54) opisujące II kasę przepływów, wykorzystując warunki brzegowe (3.65-3.66), otrzymano:

$$v_x = \frac{3Q}{\pi R h^3} (hy - y^2) + \frac{\rho}{\mu} \left(\frac{3}{20} \omega^2 R R' \right) (y^2 - hy) + \frac{\rho}{\mu} \left[\frac{1}{12} \frac{\omega^2 R R'}{h^2} (y^4 - h^3 y) \right] \quad (3.99)$$

$$v_\theta = \omega R \frac{y}{h} \quad (3.100)$$

$$v_y = \frac{V}{h^3} (3hy^2 - 2y^3) - \frac{1}{\rho_e R} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\rho}{\mu} \left(\frac{3}{20} \omega^2 R R' \right) (y^2 - hy) + \frac{\rho}{\mu} \left[-\frac{1}{12} \frac{\omega^2 R R'}{h^2} (y^4 + -h^3 y) \right] \right\} \quad (3.101)$$

$$p(x) = -\frac{6\mu Q}{\pi h^3} (A_x - A_z) + \frac{3}{20} \rho \omega^2 (R^2 - R_z^2) + p_a \quad (3.102)$$

gdzie: $A_x = \int \frac{dx}{R}$, $A_z = A(x_z)$.

Jeżeli w zależnościach (3.87-3.102) zamiast prędkości obrotowej ωR podstawimy się prędkość Ω określoną formułą:

$$\Omega = \varphi R \omega_o \cos(\omega_o t) \quad (3.103)$$

gdzie:

- φ – kąt obrotu,
- ω_o – częstość drgań skrętnych,
- t – czas,

to zależności te opisują pole fizyczne przepływu uwzględniające drgania skrętne przedmiotu obrabianego (PO)

Zależności (3.87-3.90) przedstawiają rozkłady prędkości i ciśnienia w laminarnym przepływie mieszaniny elektrolit – gaz w szczelinie o dowolnym zarysie powierzchni ograniczających przepływ uwzględniając efekty bezwładności przepływu wynikające z oddziaływania wzdłużnych i odśrodkowych sił bezwładności. Zależności (3.99-3.102) opisują rozkłady prędkości i ciśnienia w laminarnym przepływie mieszaniny elektrolit – gaz w szczelinie o dowolnym zarysie powierzchni ograniczających przepływ uwzględniając efekty bezwładności wywołane przepływem obwodowym.

Z uzyskanych rozwiązań analitycznych określonych dla I klasy przepływów można wyróżnić tzw. przybliżenie Reynoldsa, określone zależnościami v_x^0 , v_θ^0 , v_y^0 . Założenie szczególnej geometrii powierzchni osiowosymetrycznych prowadzi do określenia w sposób ścisły danych rozkładów prędkości i ciśnienia.

Przepływ turbulentny

Przybliżone rozwiązanie układu równań (3.57-3.63) można otrzymać, zakładając określone rozkłady prędkości w przekroju poprzecznym szczeliny międzyelektrodowej (SM) [64]. Rozkłady prędkości $\bar{v}_x(y)$ i $\bar{v}_\theta(y)$ wzajemnie na siebie oddziałują. Rozkład prędkości wzdłuż szczeliny $\bar{v}_x(y)$ będzie różny od rozkładu symetrycznego w zależności od grubości szczeliny oraz stosunku prędkości obwodowej do średniej prędkości wzdłuż szczeliny.

Dla analizy przepływu turbulentnego mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej (SM) rozkład prędkości $\bar{v}_x(y)$ można aproksymować zależnościami:

– dla prędkości wzdłużnej

$$\bar{v}_x = \bar{v}_{xmax} \left(\frac{2y}{h} \right)^{\frac{1}{n}} \text{ gdy } 0 \leq y \leq \frac{h}{2} \quad (3.104)$$

$$\bar{v}_x = \bar{v}_{xmax} \left[2 \left(1 - \frac{y}{h} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \text{ gdy } \frac{h}{2} \leq y \leq h \quad (3.105)$$

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

– dla prędkości obwodowej:

$$\bar{v}_\theta = k\omega R \left(\frac{2y}{h} \right)^{\frac{1}{n}} \text{ gdy } 0 \leq y \leq \frac{h}{2} \quad (3.106)$$

$$\bar{v}_\theta = \omega R \left\{ 1 - (1-k) \left[2 \left(1 - \frac{y}{h} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \right\} \text{ gdy } \frac{h}{2} \leq y \leq h \quad (3.107)$$

gdzie:

$$k = \frac{(\bar{v}_\theta)_{y=\frac{h}{2}}}{\omega R} \leq 0,5 \quad (3.108)$$

jest stopniem zawirowania cieczy w połowie szerokości szczeliny.

Mnożąc obie strony równania (3.51) przez dy i całkując w granicach $0-h/2$ i $h/2-h$ oraz uwzględniając (3.104-3.107), a następnie dodając stronami i całkując powtórnie w granicach od R do R_z otrzymano funkcję ciśnienia:

$$\begin{aligned} \bar{p} = p_a + \frac{(n+1)^2}{n(n+2)} \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{2\pi R_z h} \right)^2 \left[\left(\frac{R_z}{R} \right)^2 - 1 \right] + \frac{\rho\omega^2}{2} (R_z^2 - R^2) \frac{1+kn+kn^2+k^2n^2}{(n+1)(n+2)} + \\ - \frac{\rho}{h} \int_R^{R_z} (\tau_{\omega R} + \tau_{nR}) dx \end{aligned} \quad (3.109)$$

$$\text{gdzie: } \tau_{nR} = (\tau_{yx})_{y=0}, \tau_{\omega R} = (\tau_{yx})_{y=h}.$$

Naprężenia τ_{nR} i $\tau_{\omega R}$ wyznaczono, wykorzystując potwierdzoną doświadczalnie metodę zastosowaną przez [71] do obliczeń przepływów we wzdłużnych szczelinach pierścieniowych.

W wyniku otrzymano:

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{h} \int_R^{R_z} (\tau_{\omega R} + \tau_{nR}) dx = \rho c_z^2 \alpha \frac{n+1}{n-1} Re_z^{-\frac{2}{n+1}} \frac{R_z}{h} \left[\left(\frac{R_z}{R} \right)^{\frac{n-1}{n+1}} - 1 \right] \times \\ \left[1 + \frac{n^2(n-1)^2}{4(n+1)^3(3n+5)} (1 - 2k + 2k^2) N_z^2 \frac{1 - \frac{R}{R_z} \frac{3n+5}{n+1}}{\left(\frac{R_z}{R} \right)^{\frac{n-1}{n+1}} - 1} - \frac{n^3(n-1)^2(n+3)}{24(n+1)^5(5n+7)} \times (1 - 3k + \right. \\ \left. + 3k^2) N_z^3 \frac{1 - \left(\frac{R}{R_z} \right)^{\frac{5n+7}{n+1}}}{\left(\frac{R_z}{R} \right)^{\frac{n-1}{n+1}} - 1} \right] \end{aligned} \quad (3.110)$$

$$\text{gdzie: } Re_z = \frac{\rho e Q}{\pi R_z \mu}, N_z = \frac{\omega R_z}{c_z}.$$

Formuły (3.104-3.110) opisują rozkłady prędkości i ciśnienia w turbulentnym 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.

3.2.8. Całki równania ciągłości przepływu gazu w szczelinie międzyelektrodowej

Przepływ laminarny

Rozkład koncentracji gazu (wodoru) β w warunkach przepływu laminarnego wyznaczono z bilansu masy wodoru wydzielającego się na katodzie.

Całkując równanie (3.37) w poprzek szczeliny

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_H R \int_0^h v_x dy \right) + \rho_H v_y \Big|_0^h = j \eta_H k_H \quad (3.111)$$

a następnie wykorzystując założenie uwzględniające zmianę koncentracji objętościowej fazy gazowej jedynie wzdłuż szczeliny tzn. przyjmując, że $\beta = \beta(x)$ po przekształceniach, otrzymano:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{T} \beta \right) = \frac{2\pi \eta_H k_H}{\mu_H Q} j R \quad (3.112)$$

przy czym:

- β – koncentracja objętościowa fazy gazowej,
- $\rho_{H0} = \frac{\mu_H p}{R_H T}$ – gęstość wodoru,
- η_H – wydajność prądowa wydzielania gazu,
- k_H – równoważnik elektrochemiczny wodoru,
- R_H – stała gazowa wodoru,
- μ_H – masa molowa wodoru.
- p, T – ciśnienie i temperatura w przepływie laminarnym.

Warunek brzegowy dla koncentracji objętościowej fazy gazowej, przyjmuje postać:

$$\beta = 0, \text{ gdy } x = x_w \quad (3.113)$$

Oznacza to, że na wlocie do szczeliny międzyelektrodowej (SM) faza gazowa nie występuje.

Całkując równanie (3.87) otrzymano rozkład koncentracji objętościowej fazy gazowej wzdłuż szczeliny w warunkach przepływu laminarnego:

$$\beta(x) = \frac{2\pi \eta_H k_H}{\mu_H Q} \frac{T(x)}{p(x)} \int_{x_w}^x j(x) R dx \quad (3.114)$$

Przepływ turbulentny

W warunkach przepływu turbulentnego, rozkład koncentracji objętościowej gazu (wodoru) β wyznaczono z bilansu masy wodoru wydzielającego się na katodzie z równania (3.58).

Całkując równanie (3.58) w poprzek szczeliny

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_H R \int_0^h \bar{v}_x dy \right) = j \eta_H k_H \quad (3.115)$$

a następnie podobnie jak w przepływie laminarnym wykorzystując założenie, że $\beta = \beta(x)$ po przekształceniach, otrzymano:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{p}}{\bar{T}} \beta \right) = \frac{2\pi \eta_H k_H}{\mu_H Q} j R \quad (3.116)$$

gdzie:

- $\bar{p}$ – ciśnienie w warunkach przepływu turbulentnego,
- $\bar{T}$ – temperatura w przepływie turbulentnym

Po scałkowaniu równania (3.116) uzyskano rozkład koncentracji objętościowej fazy gazowej wzdłuż szczeliny w warunkach przepływu turbulentnego:

$$\beta(x) = \frac{2\pi \eta_H k_H}{\mu_H Q} \frac{\bar{T}(x)}{\bar{p}(x)} \int_{x_w}^x j(x) R dx \quad (3.117)$$

4. MODELOWANIE NUMERYCZNE PROCESU OBRÓBKİ ECM POWIERZCHNI OBROTOWYCH

Symulacje komputerowe zwykle wiążą się ze sformułowaniem i rozwiązaniem numerycznym określonego równania lub układu równań. Łatwo zauważyć, mając na uwadze przeprowadzone w rozdziale 2 i 3 analizy procesu obróbki elektrochemicznej powierzchni w ogólności o zarysie krzywoliniowym, że opis matematyczny procesu ECM jest złożony i mimo poczynionych tam uproszczeń, nadal stopień złożoności nie pozwala na proste rozwiązanie problemu. Brak jest metod analitycznych za pomocą których zagadnienie obróbki elektrochemicznej może być kompleksowo rozwiązane. Połączenie metod analitycznych i numerycznych stwarza możliwości przeprowadzenia symulacji procesu ECM. Chcąc uzyskać informację o ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO), istnieje konieczność numerycznego rozwiązania równania (3.10).

Dla wyznaczenia rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym i wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM) konieczne jest także rozwiązanie numeryczne równania wynikającego z zasady zachowania energii (3.49, 3.64). Zachodzi zatem potrzeba zastosowania odpowiednich metod numerycznych w celu rozwiązania wspomnianych powyżej równań. Wymaga to przeprowadzenia dyskretyzacji stosownych równań. Najbardziej podstawową i szeroko stosowaną metodą numeryczną dla rozwiązania równań różniczkowych zwyczajnych i cząstkowych jest metoda różnic skończonych. Koniecznym jest więc dyskretyzacja zarówno zmiennych czasopodobnych, jak i zmiennych przestrzennopodobnych.

4.1. METODA NUMERYCZNA ROZWIĄZANIA RÓWNAŃ EWOLUCJI KSZTAŁTU PRZEDMIOTU OBRABIANEGO

Równania ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO):

$$\frac{\partial z_A}{\partial t} = k_V j_A \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_A}{\partial R}\right)^2} \quad (4.1)$$

można scałkować na siatce czasowej między punktami czasowymi t^n a t^{n+1} w przedziale czasu Δt następująco:

$$z_A^{n+1} = z_A^n - \int_{t^n}^{t^{n+1}} \left(k_V j_A \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_A}{\partial R}\right)^2} \right) dt \quad (4.2)$$

$$\Delta t = t^{n+1} - t^n \quad (4.3)$$

Sposób aproksymacji w odniesieniu do całkowania po czasie prawej części równania (4.3) pozwala wybrać stosowną metodę [149]. Metody całkowania równania typu (4.1) można podzielić na:

- metodę Eulera,
- metodę punktu środkowego,
- metodę dwustopniową,
- metodę pośrednią,
- metodę Adamsa-Bashfortha.

Przedstawione metody różnią się sposobem aproksymacji całki równania (4.2).

W pracy dla numerycznego rozwiązania równania (4.1) zastosowano metodę Eulera [149]. Jest to metoda bezpośrednia, wystarczająco dokładna w odniesieniu do wyrazów pierwszego rzędu ze względu na krok w czasie Δt .

Czas t przedstawiono na siatce czasowej w postaci zbioru punktów:

$$t^n = t^0 + n\Delta t \quad (4.4)$$

gdzie: $n = 0, 1, 2, 3 \dots N$,

Dokonano dyskretyzacji elektrody roboczej (ER) i przedmiotu obrabianego (PO) w globalnym układzie współrzędnych walcowych zachowując stosownie dla brył obrotowych osiową symetrię czyli przyjmując, że:

$$R_i = R_0 + i\Delta R \quad (4.5)$$

gdzie: $i = 0, 1, 2, 3 \dots I$, $\Delta R = \frac{R_z - R_w}{I}$.

Zastępując pochodne występujące w równaniu (4.1) prostymi wyrażeniami różnicowymi [161], indeks A wybranego punktu na anodzie (PO) indeksem i , otrzymano następujący ciąg równań algebraicznych postaci:

gdy $i = 0$:

$$Z_i^{n+1} = Z_i^n - \left[k_V j_A \sqrt{1 + \left(\frac{Z_i^n - Z_{i+1}^n}{\Delta R} \right)^2} \right] \Delta t \quad (4.6)$$

gdy $0 < i < I$

$$Z_i^{n+1} = Z_i^n - \left[k_V j_A \sqrt{1 + \left(\frac{Z_{i-1}^n - Z_{i+1}^n}{2\Delta R} \right)^2} \right] \Delta t \quad (4.7)$$

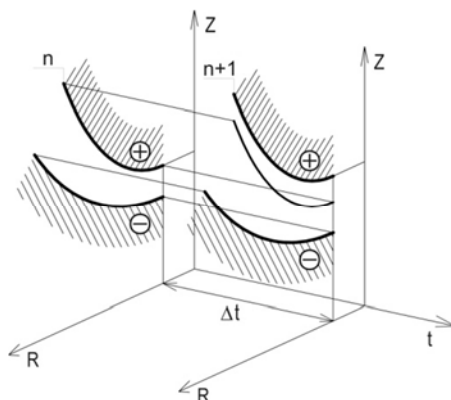
gdy $i = I$

$$Z_i^{n+1} = Z_i^n - \left[k_V j_A \sqrt{1 + \left(\frac{Z_{i-1}^n - Z_i^n}{\Delta R} \right)^2} \right] \Delta t \quad (4.8)$$

Równania różnicowe (4.6-4.8) pozwalają, w postępujących po sobie kolejnych iteracjach czasowych Δt , na wyznaczenie nowych współrzędnych punktów anody (PO) w globalnym układzie kartezjańskim Z, R (rys. 4.1).

Należy jednak zaznaczyć, że aby wyznaczyć nowe współrzędne punktów anody (PO) należy przeprowadzić obliczenia pozwalające otrzymać niezbędne dla wyznaczenia gęstości prądu j_i następujące parametry wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM): prędkości przepływu ośrodka v_x, v_θ, v_y , ciśnienie p , koncentrację fazy gazowej β , temperaturę T .

Ponadto zwróćmy uwagę, że czas t w omawianym sposobie rozwiązania równania ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO) spełnia rolę parametru, – pojawia się ciąg zadań z tzw. „zamrożonym” rozkładem grubości szczeliny międzyelektrodowej (SM) dla danej chwili t^n .



Rys. 4.1. Schemat warstw czasowych w obróbce kształtowej ECM

4.2. METODA NUMERYCZNA ROZWIĄZANIA RÓWNIANIA ENERGII

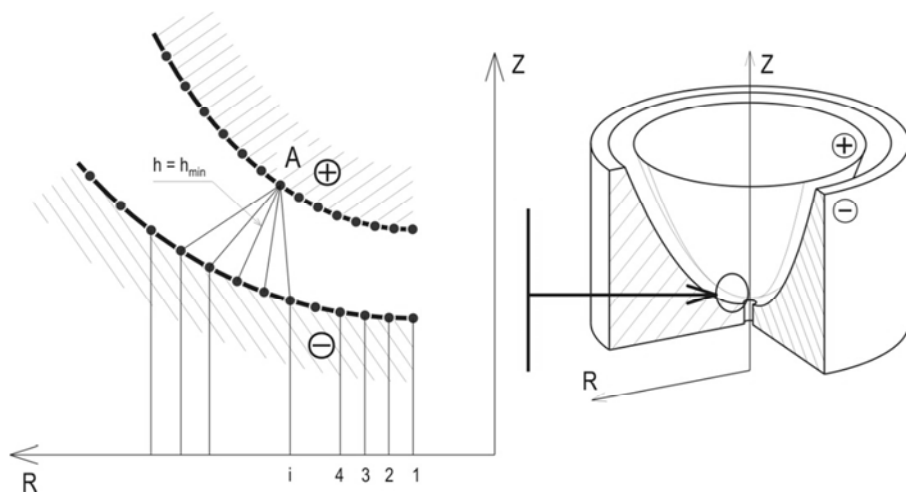
Równanie wynikające z zasady zachowania energii jest równaniem parabolicznym, dla którego stosuje się w ogólności takie same zasady podejścia różnicowego jak w przypadku równań hiperbolicznych. Inne są jednak konkretne algorytmy dające zadowalające rezultaty. Metody numerycznego rozwiązania równania energii oparte na dyskretyzacji różnicowej, dla przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru można podzielić na [149]:

- bezpośrednią metodę pierwszego rzędu,
- metodę Cranka-Nicholsona,
- metodę punktu środkowego,
- metodę Duforta-Frankla.

Biorąc pod uwagę dokładność i stabilność schematu numerycznego dla rozwiązania problemu zastosowano metodę Cranka-Nicholsona [53, 149, 187].

Po to aby wykonać obliczenia parametrów przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru należy zbudować siatkę numeryczną przepływu ośrodka w szczelinie międzyelektrodowej (SM).

W tym celu dla danego czasu t^n wyznacza się minimalną odległość każdego punktu A_i na anodzie (PO) od katody (ER). Wyznaczenie minimalnej odległości rozpatrywanego punktu A_i polega na numerycznym porównaniu odległości między punktem A_i i wszystkimi punktami elektrody roboczej po dyskretyzacji (rys.4.2).



Rys. 4.2. Graficzny sposób wyznaczenia minimalnej grubości szczeliny międzyelektrodowej (SM)

Następnie pokrywa się obszar przepływu ośrodka dwufazowego siatką linii, wykorzystując wyznaczone minimalne odległości między punktami anody (PO) i katody (ER) (rys. 4.3).

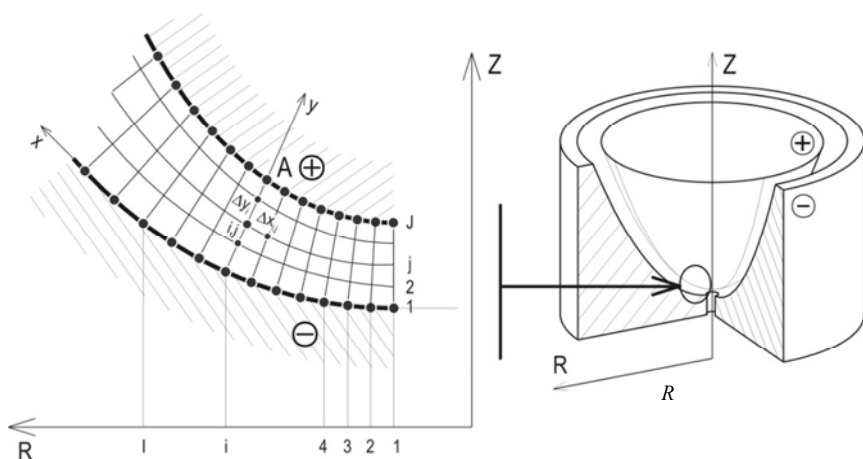
Zatem niech:

$$x_i = i\Delta x \quad (4.9)$$

$$y_j = j\Delta y \quad (4.10)$$

gdzie: $i = 0, 1, 2, 3 \dots I, j = 0, 1, 2, 3 \dots J, \Delta x = \frac{x_z - x_w}{I}, \Delta y = \frac{h}{J}$.

Punkty przecięcia linii to węzły, a wielkości Δx i Δy są krokami siatki.



Rys. 4.3. Siatka numeryczna obszaru przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru

Zastępując pochodne występujące w równaniu (3.49) wyrażeniami różnicowymi postaci:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{\Delta x_{i,j}} \quad (4.11)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{i,j} = \frac{T_{i-1,j} - T_{i-1,j-1}}{\Delta y_i} \quad (4.12)$$

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right|_{i,j} = \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{2\Delta y_i^2} + \frac{T_{i-1,j+1} - 2T_{i-1,j} + T_{i-1,j-1}}{2\Delta y_i^2} \quad (4.13)$$

$$\left. \frac{\partial(a+a_T)}{\partial y} \right|_{i,j} = \frac{a_{i,j} + a_{T_{i,j}} - (a_{i,j-1} + a_{T_{i,j-1}})}{\Delta y_i} \quad (4.14)$$

otrzymano postać dyskretną równania (3.49), z którego można obliczyć wartość temperatury w kolejnych węzłach siatki:

$$T_{i,j}^k = \frac{T_{i-1,j} + \gamma_1 (T_{i-1,j+1} - 2T_{i-1,j} + T_{i-1,j-1} + T_{i,j+1}^{k-1} + T_{i,j-1}^{k-1})}{1 + 2\gamma_1} + \frac{\gamma_2 (T_{i-1,j}^{k-1} - T_{i-1,j-1}) - \frac{v_{y,i,j} \Delta x_{i,j}}{v_{x,i,j} \Delta y_i} (T_{i-1,j}^{k-1} - T_{i-1,j-1}) + \gamma_3}{1 + 2\gamma_1} \quad (4.15)$$

gdzie:

$$\gamma_1 = \frac{(a_{i,j} + a_{T_{i,j}}) \Delta x_{i,j}}{2v_{x,i,j} \Delta y_j^2}, \gamma_2 = \frac{(a_{T_{i,j}} - a_{T_{i,j-1}}) \Delta x_{i,j}}{v_{x,i,j} \Delta y_j^2}, \gamma_3 = \frac{j_i^2}{\rho_i c_p \alpha_{i,j} v_{x,i,j}} \quad (4.16)$$

indeks k – numer kolejnej iteracji.

Współczynnik dyfuzyjności termicznej w warunkach przepływu laminarnego określa formuła:

$$a_{i,j} = \frac{\lambda}{\rho c_p}, \quad \lambda = \lambda_0 (1 - \beta) \quad (4.17)$$

Współczynnik turbulentnej dyfuzyjności termicznej uwzględniający przenoszenie ciepła poprzez pulsacje turbulentne określony jest zależnością Taylora-Prandtla [84, 110]

$$a_{T_{i,j}} = l^2 \left| \frac{dv_x}{dy} \right| \quad (4.18)$$

gdzie: l – tzw. droga mieszania określona zależnością [53, 110, 150]

$$l = 0,41y \left| 1 - e^{\left(-\frac{yv^*}{102\nu} \right)^{\frac{n}{2}}} \right| \quad (4.19)$$

gdzie:

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{0,108 v_x^2 Re^{0,25}} - \text{prędkość dynamiczna,}$$

n – wykładnik potęgowy charakterystyczny dla przepływu turbulentnego.

Zagadnienie intensywnej, burzliwej wymiany ciepła, zwłaszcza w tzw. cienkich warstwach analogicznych do szczeliny międzyelektrodowej (SM) nie jest nadal dostatecznie zbadany. Niestety współczynniki turbulentnej dyfuzyjności określane na podstawie różnych hipotez zamykających równania ruchu (np. Prandtla, Karmana, Deisslera) znacznie różnią się od siebie. W pracy przyjęto zależność opartą na hipotezie Prandtla podobnie jak w pracach [84, 110].

Określone formułą (4.15) przybliżone równanie różnicowe rozwiązano metodą iteracji. Założono początkowe wartości $T_{i,j}^k$, a następnie do obliczenia w kolejnych iteracjach nowych wartości $T_{i,j}^k$ użyto formuły (4.15). Obliczenia iteracyjne powtarzane są do uzyskania założonego warunku dokładności obliczeń:

$$\sup |T_{i,j}^k - T_{i,j}^{k-1}| \leq \varepsilon_T \quad (4.20)$$

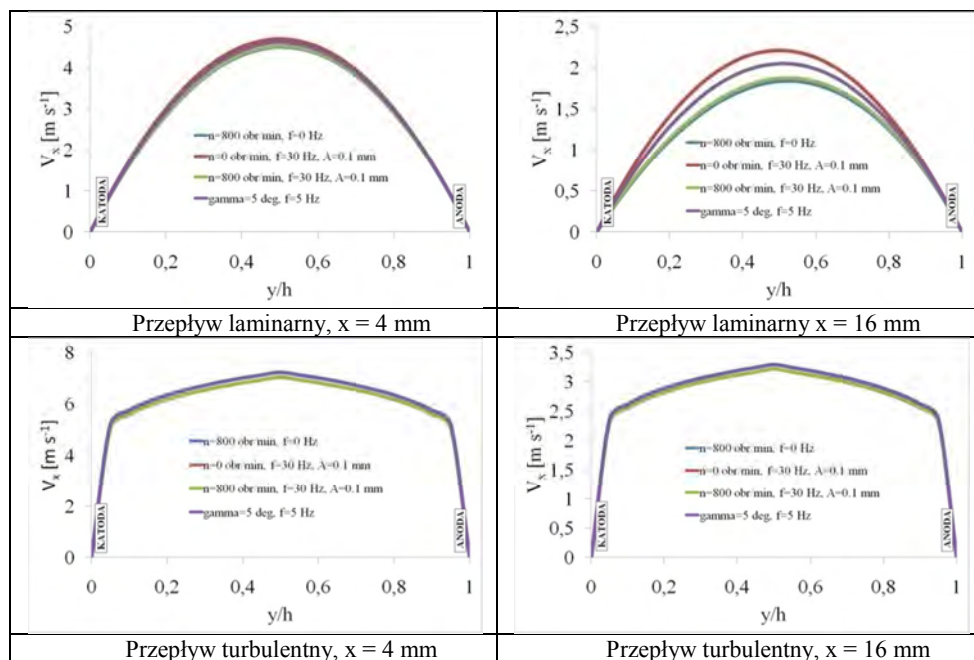
Dokładność rozwiązania numerycznego pogarsza się z powodu dwóch charakterystycznych źródeł błędów. Pierwsze z nich to błędy metody wynikające z aproksymacji równań różniczkowych równaniami różnicowymi. Błędy tego rodzaju zależą od wielkości przedziałów siatki w przestrzeni lub na płaszczyźnie. Drugie źródło błędów, to tzw. błędy zaokrąglania związane z dokładnością z jaką zmienna zapisana jest w pamięci komputera. Współczesne komputery pozwalają na znaczące liczby bitów w jednym słowie informacji, a tym samym umożliwiają uwzględnienie wielu miejsc dziesiętnych. Oznacza to, że kumulujący się błąd zaokrąglania jest zazwyczaj nieznaczny.

Zastosowana metoda jest zbieżna i stabilna dla dowolnego $a \frac{\Delta x}{\Delta y} > 0$, jeżeli współczynnik $a = \text{const}$. Liczne eksperymenty numeryczne wykazały, że metoda jest stabilna także wtedy gdy współczynnik $(a + a_T) \neq \text{const}$ [120].

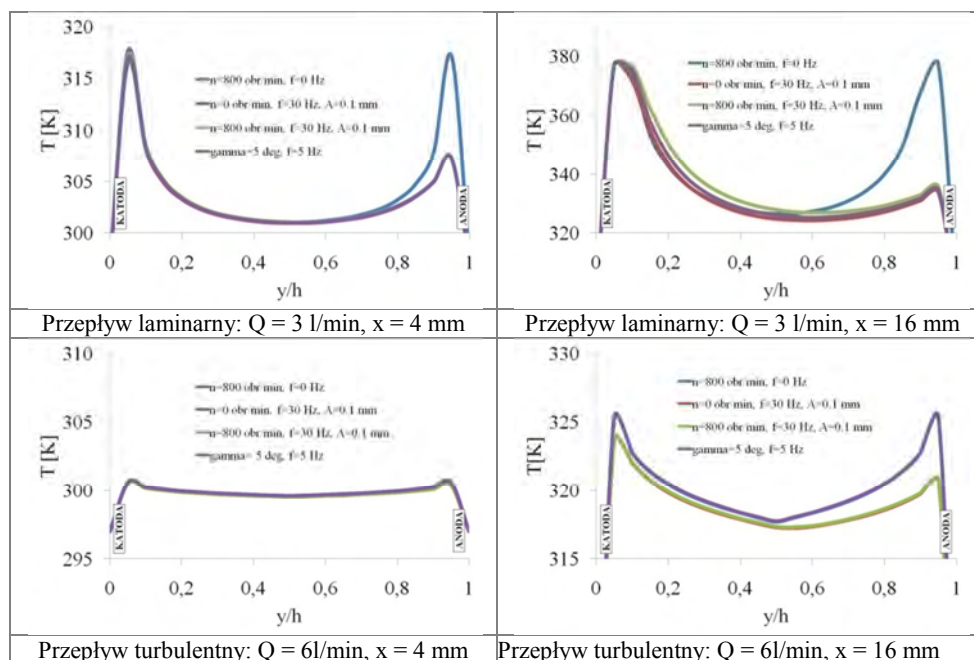
Przykładowe wyniki obliczeń rozkładów prędkości v_x i temperatury T w poprzek szczeliny międzyelektrodowej (SM) w pobliżu wlotu i wylotu ze szczeliny dla przypadku przepływu laminarnego i turbulentnego przedstawiono na rysunkach 4.4 i 4.5. Przyjęte do obliczeń parametry sformułowano w rozdziale 6.

Na podstawie przedstawionych poniżej rozkładów obliczana jest prędkość średnia przepływu v_{xsr} wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM). Z przedstawionych wykresów rozkładów prędkości $v_x(x, y)$ wynika, że zwłaszcza w przypadku przepływu laminarnego istotny wpływ na rozkład prędkości mają charakterystyczne dla danego sposobu obróbki parametry kinematyczne, jak prędkość obrotowa, częstotliwość i amplituda drgań anody. Prowadzi to do deformacji rozkładu prędkości, co wpływa w istotny sposób na rozkład temperatury w poprzek szczeliny międzyelektrodowej (SM).

Na podstawie rozkładów temperatury $T(x, y)$ obliczany jest rozkład temperatury średniej T_{sr} wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM).



Rys. 4.4. Rozkłady prędkości v_x w poprzek SM dla wybranych sposobów obróbki ECM powierzchni obrotowych w kształcie czaszy kulistej



Rys. 4.5. Rozkłady temperatury T w poprzek SM dla wybranych sposobów obróbki ECM powierzchni obrotowych w kształcie czaszy kulistej

Przedstawione na rysunku 4.5 rozkłady temperatury $T(x, y)$ pokazują wyraźnie jak parametry kinematyczne obróbki oraz wpływ zmieniającej się wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM) koncentracji objętościowej wodoru deformują profile temperatury. W przypadku przepływu laminarnego występuje istotna asymetria profilu temperatury i znaczące różnice temperatury. W przepływie turbulentnym różnice temperatury maleją. Należy zauważyć, że przepływ laminarny może być niebezpieczny z uwagi na wysokie temperatury w strefie przykatodowej (dwufazowej), co może prowadzić do wystąpienia stanów krytycznych SK.

4.3. PROJEKTOWANIE GEOMETRII ELEKTRODY ROBOCZEJ

W procesie obróbki elektrochemicznej ECM bardzo ważnym jest takie zaprojektowanie elektrody roboczej (ER), aby po obróbce ECM przedmiot obrabiany (PO) spełniał warunki dotyczące tolerancji jego wykonania. W praktyce przemysłowej bardzo często, aby wykonać elektrodę roboczą stosuje się metodę kolejnych korekcyj. Istota tego typu korekcji polega na obróbce elektrochemicznej danej powierzchni elektrodą roboczą (ER) o kształcie przybliżonym do oczekiwanego kształtu przedmiotu obrabianego (PO), po czym przeprowadza się pomiar geometrii tego przedmiotu. Poprzez pomiar geometrii przedmiotu określa się odchyłki wykonanego detalu odżądanego kształtu przedmiotu obrabianego (PO). Znajomość odchyłek pozwala na przeprowadzenie korekty elektrody roboczej (ER). Korekta taka najczęściej polega na usunięciu z powierzchni elektrody nadkładu lub naniesieniu na powierzchnię elektrody metalu w zależności od znaku i rozkładu odchyłek. Po wykonaniu korekcji elektrody roboczej (ER) ponownie przeprowadza się drążenie elektrochemiczne, po czym znowu dokonuje się pomiarów geometrii przedmiotu obrabianego (PO). Korekcje powtarzane są tak długo, aż przedmiot obrabiany (PO) będzie spełniał narzucone w procesie warunki dotyczące zadanego pola tolerancji. Łatwo zauważyć, że opisana metoda korekcji elektrody roboczej w obróbce ECM jest pracochłonna i kosztowna.

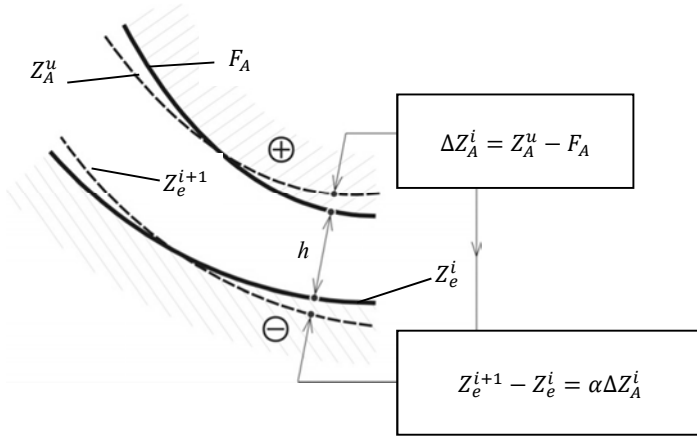
Symulacje komputerowe obróbki ECM, oparte na modelowaniu matematycznym procesu drążenia elektrochemicznego, pozwalają na projektowanie elektrody roboczej (ER) dzięki wykorzystaniu informacji o ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO).

W literaturze metodyka wyznaczenia geometrii elektrody roboczej nosi nazwę zagadnienia odwrotnego w procesie ECM [10, 11, 31, 32, 69, 87, 202].

Istota korekcji geometrii elektrody jest analogiczna do opisanej powyżej korekcji elektrody roboczej uzyskanej w wyniku kolejnych prób doświadczalnych.

Zagadnienie odwrotne polega zatem na porównaniu wyników symulacji komputerowej ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego PO po kolejnej iteracji lub po zakończeniu procesu obróbki tj. gdy zostanie osiągnięty stan ustalony (SU) z określonym ostatecznym kształtem przedmiotu obrabianego.

Oznacza to, że po przeprowadzeniu symulacji komputerowej porównuje się geometrię anody po obliczeniach Z_A^u z geometrią zadanego przedmiotu po obróbce F , określając odchyłki kształtu (rys. 4.6).



Rys. 4.6. Schemat korekcji elektrody roboczej

Niech Z_A^u będzie zbiorem punktów anody (PO_s) po przeprowadzonej symulacji, F_A zbiorem punktów zadanego przedmiotu (PO_z) po obróbce.

Zatem rozkład odchyłek kształtu można określić następująco:

$$\Delta Z_A^i = Z_A^u - F_A \quad (4.21)$$

Jeżeli:

$$\sup |\Delta Z_A^i| \leq \delta_E \quad (4.22)$$

gdzie:

δ_E – dopuszczalna odchyłka kształtu anody po symulacji komputerowej od kształtu zadanego anody,

uzyskane przybliżenie obliczeń jest zadawalające.

Jeżeli warunek (4.22) nie jest spełniony, przeprowadza się korekcję kształtu, wykorzystując zależność korekcyjną [76], a mianowicie:

$$R_e^{i+1} = R_e^i \quad (4.23)$$

$$Z_e^{i+1} = Z_e^i + \alpha \Delta Z_A^i \quad (4.24)$$

gdzie:

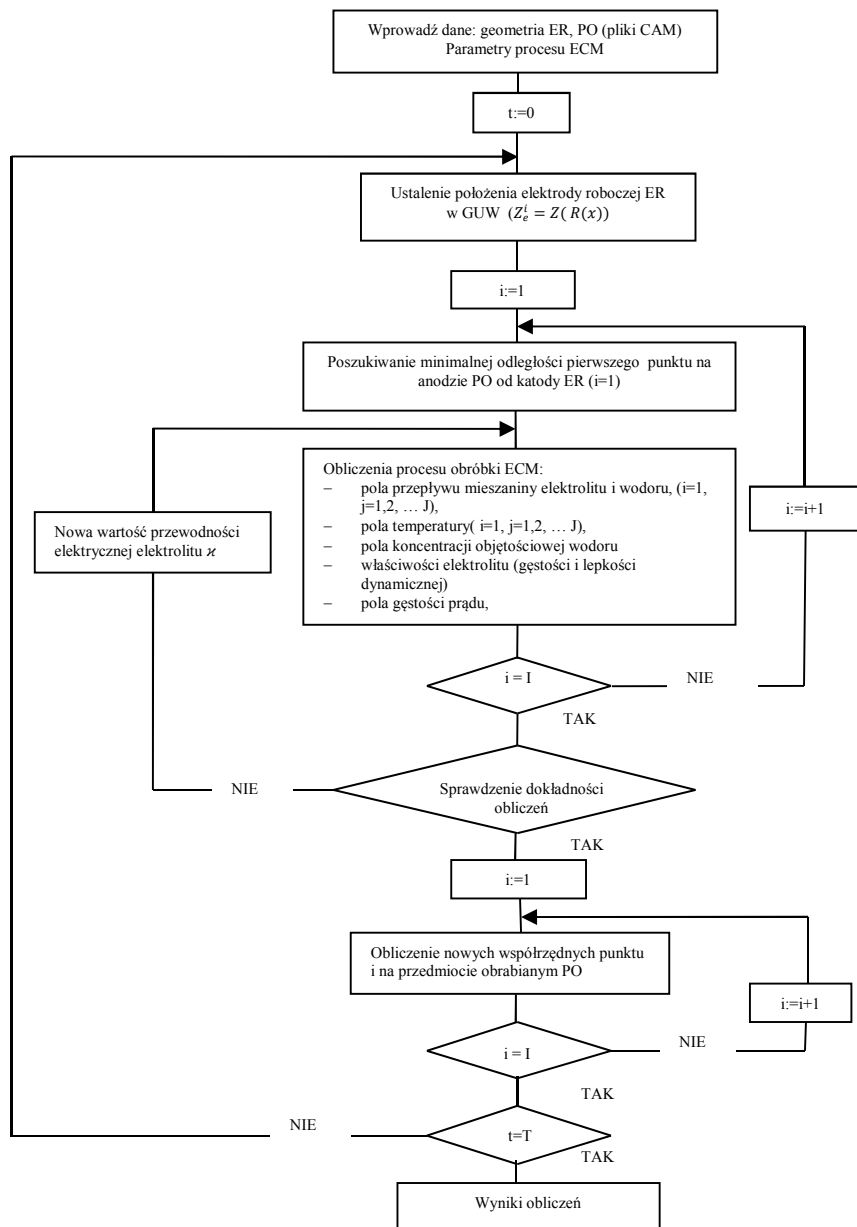
$0 < \alpha < 1$ – współczynnik korekcji wpływający na czas obliczeń po którym osiągnąca jest zbieżność.

Wartość współczynnika wynika z eksperymentu numerycznego podczas testowania procedury korekcji.

Należy zaznaczyć, że procedura korekcji kończy obliczenia po spełnieniu warunku (4.22).

4.4. OGÓLNY ALGORYTM SYMULACJI PROCESU OBRÓBKİ ECM

Ogólny algorytm komputerowy symulacji procesu obróbki ECM powierzchni kształtowych obrotowych (osiowosymetrycznych) oparty jest na wykorzystaniu metody kolejnych przybliżeń (rys. 4.7).



Rys. 4.7. Ogólny algorytm symulacji procesu ECM (oznaczenia: i, I – bieżący i ostatni punkt krzywej opisującej PO)

Niezależnie od zastosowanych metod obliczeniowych pól prędkości, ciśnień, temperatury, gęstości prądu do rozwiązania równania ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO) zastosowano metodę kroków czasowych.

Proces obliczeń wymaga, aby na początku wczytać pliki CAM zawierające informacje o geometrii zdyskretyzowanych elektrod: anody PO i katody ER. Następnie należy wczytać parametry procesu obróbki ECM (tzw. dane wejściowe). Na początku obliczeń, tj. dla czasu $t = 0$, następuje ustalenie w globalnym układzie odniesienia Z, R położenia elektrody roboczej, po czym dokonywane są obliczenia minimalnej odległości pomiędzy PO i ER dla punktu $i=1$ na przedmiocie obrabianym PO. Po wyznaczeniu minimalnych odległości między anodą PO a katodą ER program dokonuje dyskretyzacji obszaru szczeliny międzyelektrodowej (SM) wzdłuż wyznaczonych h_{min} .

Kolejne etapy algorytmu obliczeń to, tzw. obliczenia ECM wykonywane dla poszczególnych punktów anody PO:

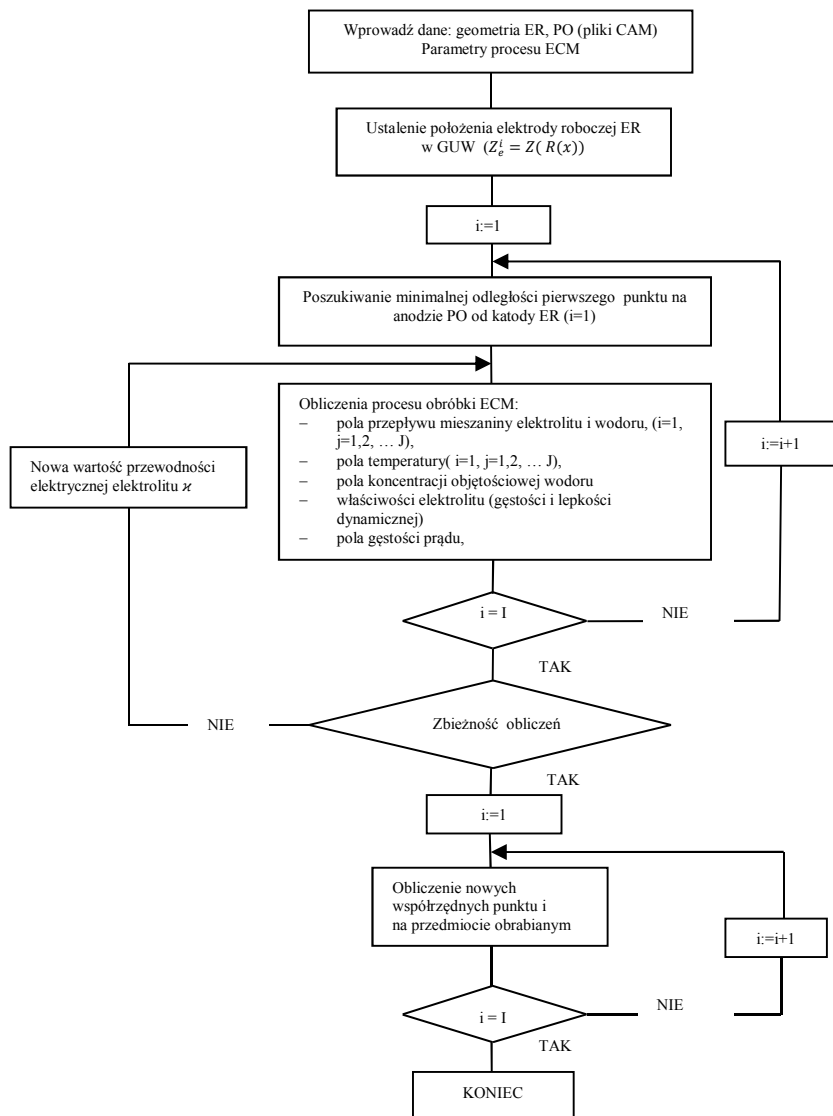
- pola gęstości prądu j w rozpatrywanych punktach PO przy założonej polaryzacji katody opisanej równaniem Tafela,
- pola ciśnień i prędkości przepływu w lokalnie ortogonalnym układzie współrzędnych,
- pola temperatury w lokalnie ortogonalnym układzie współrzędnych metodą różnic skończonych,
- pola konduktywności elektrolitu dla aktualnych średnich wartości temperatury,
- koncentracji objętościowej fazy gazowej,
- gęstości i lepkości.

Po realizacji ciągów obliczeń ECM w danym punkcie następuje sprawdzenie, czy obliczenia przeprowadzono dla ostatniego punktu PO. Jeżeli warunek nie został spełniony następuje przejście do następnego punktu PO. Jeżeli warunek zaś został spełniony sprawdza się dokładność obliczeń, po czym określa się nowe współrzędne punktu i na PO z równania ewolucji kształtu. Po tym następuje przejście do następnego kroku czasowego.

Następnie algorytm obliczeń polega na powtórzeniu czynności opisanych powyżej. Komputerowy proces symulacji kończy się, gdy osiągnięty został zadany czas obróbki $t = T$.

Schemat blokowy rozwiązania równania ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO) przedstawiono na rysunku 4.8.

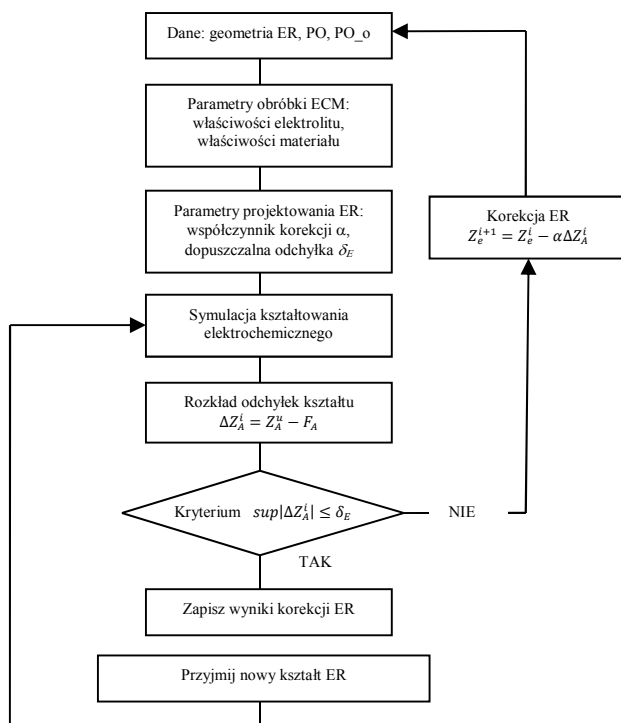
Algorytm rozwiązania równania ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO) przedstawiono dla danego kroku czasowego. Należy zauważyć, że czas w ogólnym algorytmie obliczeń zakłada się, że jest parametrem. Obliczenia przedstawione na schemacie blokowym algorytmu rozwiązania równania ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO) stanowią ciąg zdarzeń przy „zamrożonym” czasie, a więc przy ustalonym rozkładzie grubości szczeliny dla danego kroku czasowego.



Rys. 4.8. Algorytm rozwiązania równania ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO) (oznaczenia: i, I – bieżący i ostatni punkt krzywej opisującej PO)

4.5. ALGORYTM PROJEKTOWANIA ELEKTRODY ROBOCZEJ METODĄ KOREKCJI

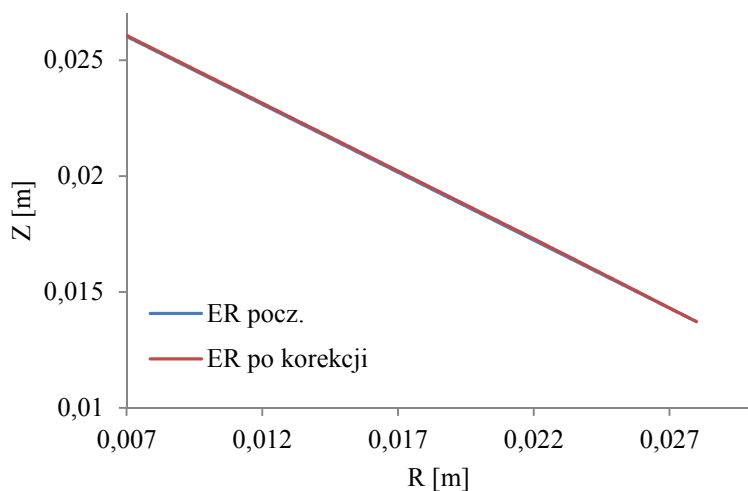
Opracowany program symulacji procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych Sym_ECM/CAD_2.0 pozwala także na projektowanie elektrody roboczej ER. Projektowanie elektrody roboczej ER opisano w podrozdziale 4.3 pracy. Na podstawie przedstawionego sposobu projektowania elektrody metodą korekcji opracowano algorytm projektowania elektrody roboczej ER (rys. 4.9). Należy zauważyć, że dla poprawnego zaprojektowania elektrody roboczej ER konieczne są informacje o geometrii elektrod: anody PO początkowej (żądaney w wyniku obróbki ECM) i końcowej, tj. po przeprowadzonej symulacji komputerowej procesu ECM oraz katody ER, którą przeprowadzono drażnienie elektrochemiczne przedmiotu obrabianego (PO). Otrzymany kształt przedmiotu obrabianego po symulacji procesu obróbki ECM oraz znany żądany kształt przedmiotu obrabianego (oczekiwany kształt (PO) określony wymaganym polem tolerancji wykonania) są podstawą dla wyznaczenia rozkładu odchylek pozwalających na korekcję elektrody roboczej (ER).



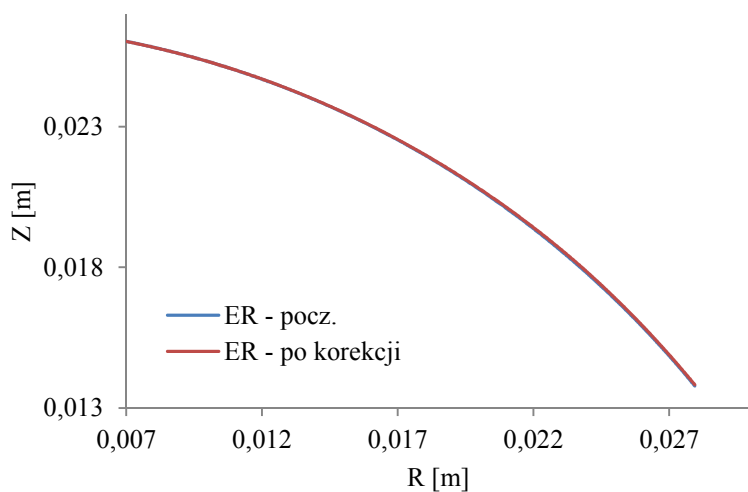
Rys. 4.9. Algorytm projektowania elektrody roboczej metodą korekcji

Istotnym parametrem decydującym o dokładności i zbieżności procesu projektowania elektrody ER jest współczynnik α (tzw. współczynnik korekcji).

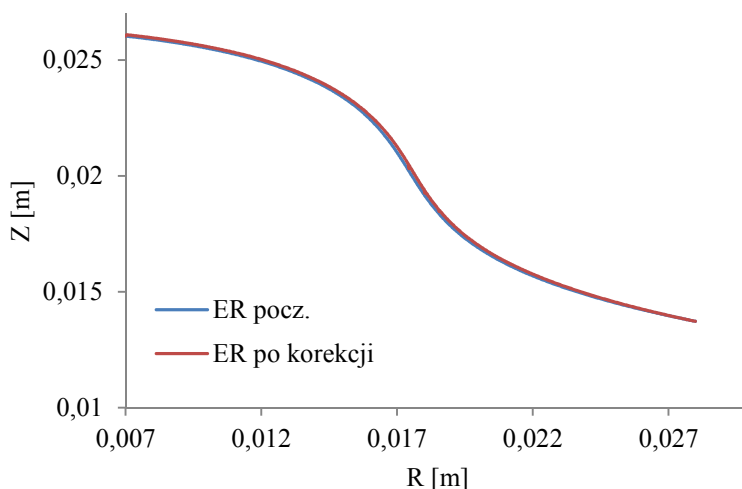
Przykładowe obliczenia kształtu elektrody roboczej ER po korekcji dla trzech różnych powierzchni: stożkowej, w kształcie czaszy kulistej oraz o zarysie krzywoliniowym przedstawiono na rysunkach 4.10-4.12.



Rys. 4.10. Tworzące elektrody roboczej stożkowej ER początkowe i po korekcji ($n = 800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 30 \text{ Hz}$, $A = 0,1 \text{ mm}$)



Rys. 4.11. Tworzące elektrody roboczej ER w kształcie czaszy kulistej początkowe i po korekcji ($n = 800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 30 \text{ Hz}$, $A = 0,1 \text{ mm}$)



Rys. 4.12. Tworzące elektrody roboczej ER zakrzywionej początkowe i po korekcji ($n = 800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 30 \text{ Hz}$, $A = 0,1 \text{ mm}$)

Obliczenia wykonano dla przypadku złożonego tj. gdy anoda PO wiruje zadaną prędkością obrotową n i jednocześnie drga z zadaną częstotliwością f i amplitudą A do momentu ustalenia się procesu ECM (osiągnięcia stacjonarności procesu).

Z przedstawionych rysunków (tworzących elektrody roboczej ER podanych w globalnym układzie współrzędnych Z, R) wynika, że największe zmiany kształtu zauważalne są w przypadku projektowania elektrody roboczej o zakrzywionej powierzchni. Największe zmiany wymiarów ER występują w obszarze zmiany krzywizny z krzywej wypukłej w krzywą wklęsłą (rys. 4.12). W przypadku elektrody roboczej stożkowej ER korekcja uwidacznia się już za wlotem elektrolitu do szczeliny międzyelektrodowej (SM) (rys. 4.10), zaś w przypadku elektrody w kształcie czaszy kulistej zauważalny obszar korekcji powierzchni przypada na odcinek bliski wylotu cieczy ze szczeliny międzyelektrodowej (SM) (rys. 4.11). Należy zauważyć, że wyznaczony kształt elektrody roboczej (ER) zależy zarówno od żądanej geometrii powierzchni obrabianej, jak i warunków obróbki, a więc technologii procesu ECM. Niedokładności w miejscach dużych krzywizn na powierzchni elektrody roboczej (ER) wynikają ze wzrostu błędów linearyzacji potencjału [20, 157, 186, 194].

5. OPIS PROGRAMU KOMPUTEROWEGO SYMULACJI PROCESU OBRÓBKİ ECM POWIERZCHNI OBROTOWYCH

Na podstawie przedstawionych w podrozdziałach 4.5 i 4.6 pracy algorytmów symulacji obróbki ECM utworzono w języku Delphi 7.0 aplikację do symulacji obróbki elektrochemicznej powierzchni obrotowych. Aplikacja umożliwia obliczenia:

- ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego (PO),
- projektowanie elektrody roboczej,
- parametrów fizycznych procesu obróbki bezstykowej ECM (elektrycznych i hydrodynamicznych).

Menu programu zbudowane jest z zakładek, które pokazano na rysunku 5.1 z rozwiniętą zakładką **Wprowadź dane**.

The screenshot shows the 'Sym_ECM / CAD 2.0' application window with the 'Wprowadź dane' tab selected. The interface includes the following sections:

- Geometria PO i ER:** Fields for PO, POK, and ER file paths.
- Parametry kinematyczne obróbki:** Fields for V_f (0.01 mm/s), A (0.1 mm), ω (0 1/s), n (0 obr/min), and radio buttons for γ_o (15°) and ω_{osc} (20).
- Parametry SM:** Fields for h_o (0.2 mm), R_w (7 mm), R_z (27.89 mm), x_z (31.64 mm), and x (12.88 mm).
- Parametry przepływu mieszanki cieczy i gazu:** Fields for V_{xst} (0.95 m/s), a (50.02 m/s), and Re (1142.54).
- Dyskretyzacja PO, ER, SM, t:** Fields for PO: m (616), SM: n (20), ER: m (300), Δt (100), and 'Liczba iteracji T' (10).
- Parametry procesu ECM:** Fields for 'Napiecie robocze U' (15 V), 'Czas obróbki t' (60 s), and 'Rodzaj elektrolitu' (niepasywujący or pasywnujący).
- Modelowanie oparte na:** Radio buttons for PR, WSO (selected), and WSOW.
- Parametry fizyczne wodoru:** Fields for R_H (4127 J/kg·K), K_H (1.25), ρ_H (0.002 kg/mol), and η_H (0.2).
- Współczynnik obrabialności ECM:** Fields for k_{Vo} (1.59), ϵ_1 (2.563), and ϵ_2 (0.112).
- Sposób zasilania SM elektrolitem:** Radio buttons for $Q=const$ (selected) and $\Delta p=const$.
- Bottom controls:** Checkboxes for 'Zapisuj do pliku' (12), 'Projektowanie ER', and 'Praca krokowa' (5 %). Buttons for 'START', 'STOP', 'ZAKOŃCZ', 'Krok', and 'Wynik'.

Rys. 5.1. Program Sym_ECM/CAD_2.0 z aktywną zakładką **Wprowadź dane**

Zakładka **Wprowadź dane** pozwala na wprowadzenie do programu niezbędnych danych dla symulacji obróbki ECM powierzchni obrotowych (rys. 5.1):

- geometrii kształtu przedmiotu obrabianego (PO) i elektrody roboczej (ER) w formie plików tekstowych definiujących:
 - kształt elektrody roboczej (ER),
 - kształt przedmiotu obrabianego (PO) – początkowy,
 - kształt przedmiotu obrabianego (PO) – żądany (oczekiwany po obróbce),
- parametrów szczeliny międzyelektrodowej (SM):
 - grubość szczeliny początkowej h_0 ,
 - promień wlotu do szczeliny międzyelektrodowej R_w ,
 - promień wylotu ze szczeliny międzyelektrodowej R_z ,
- parametrów dyskretyzacji:
 - przedmiotu obrabianego (PO),
 - szczeliny międzyelektrodowej (SM),
 - elektrody roboczej (ER),
 - czasu Δt ,
 - liczbę iteracji w danym kroku czasowym dla numerycznego wyznaczenia rozkładu temperatury,
- parametrów równania Tafela: $E_K = k_1 + k_2 \log(j)$: k_1, k_2 ,
- współczynników funkcji opisującej polaryzację anody: a_1, a_2 ,
- parametrów procesu obróbki ECM:
 - napięcie robocze U ,
 - czas obróbki t ,
- rodzaj elektrolitu (niepasywujący lub pasywujący) i parametry początkowe:
 - gęstość ρ_0 ,
 - konduktywność elektryczna κ_0 ,
 - dynamiczny współczynnik lepkości μ_0 ,
 - temperaturę T_0 ,
 - współczynnik przewodności cieplnej λ_0 ,
 - ciepło właściwe elektrolitu c_p ,
 - cieplny współczynnik przewodności elektrycznej α ,
 - współczynnik obrabialności elektrochemicznej k_{V0} oraz wykładniki ϵ_1, ϵ_2
- parametrów fizycznych wodoru:
 - stałą gazową wodoru R_H ,
 - równoważnik elektrochemiczny wodoru K_H ,
 - masę molową wodoru μ_H ,
 - wydajność prądową roztwarzania η_H ,
- parametrów układu zasilania SM elektrolitem:
 - dla układu zasilania stałym natężeniem przepływu $Q = const$:
 - strumień objętości Q ,
 - ciśnienie na wylocie SM p_z ,
 - dla układu zasilania stałą różnicą ciśnień $\Delta p = const$:
 - ciśnienie na wlocie SM p_w ,
 - ciśnienie na wylocie SM p_z ,

- parametrów kinematycznych obróbki:
 - prędkości ruchu posuwowego v_f ,
 - amplitudy drgań wymuszonych A ,
 - częstości kątowej drgań wymuszonych ω zgodnych z kierunkiem prędkości ruchu posuwowego v_f ,
 - kąta obrotu drgań skrętnych wymuszonych γ ,
 - częstości drgań skrętnych wymuszonych ω_{osc} ,

Zakładka **Wprowadź dane** ma możliwość wyboru sposobu modelowania przepływu elektrolitu w obszarze przepływu laminarnego opierając się na:

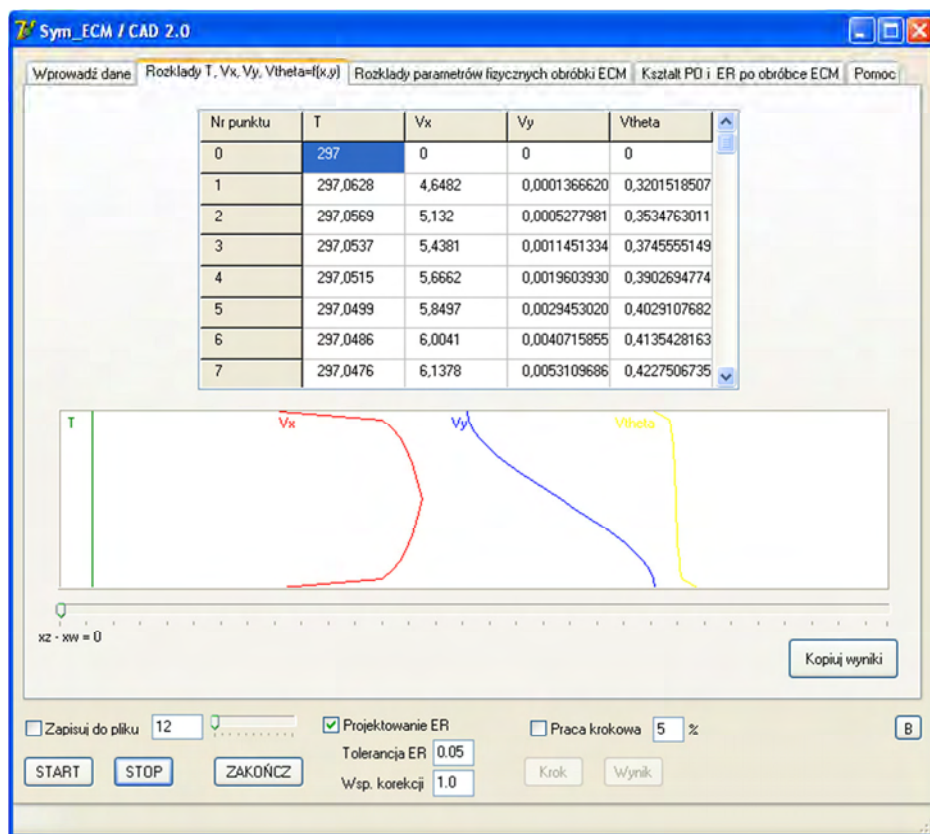
– tzw. przybliżeniu Reynoldsa PR,
 – przybliżeniu uwzględniającemu wpływ sił odśrodkowych WSO,
 – rozwiązaniu uwzględniającemu wpływ sił odśrodkowych i wzdłużnych sił bezwładności WSOw.

Zakładka **Wprowadź dane** zawiera także okno wizualizacji kinematyki ruchu elektrod podczas procesu obróbki ECM.

Po to aby przeprowadzić symulację obróbki ECM należy, po wprowadzeniu w zakładce **Wprowadź dane** zdefiniowanych powyżej parametrów procesu obróbki ECM, nacisnąć przycisk START. Przyciskiem STOP można proces symulacji obróbki zatrzymać w dowolnym momencie czasu i przeprowadzić analizę otrzymanych wyników. Przycisk ZAKOŃCZ pozwala na zakończenie symulacji i zatrzymanie procesu obliczeń numerycznych. W prawym dolnym rogu zakładki **Wprowadź dane** znajdują się: pasek sygnalizujący dynamicznie procent zaawansowania obliczeń, suwak umożliwiający ich spowolnienie (możliwa jest dokładniejsza obserwacja symulacji). Ponadto u dołu ekranu znajduje się przycisk wyboru – Projektowanie ER, tj. projektowanie elektrody roboczej oraz okna wprowadzania danych procesu projektowania elektrody roboczej: tolerancji ER, współczynnika korekcji.

Zakładka **Rozkłady T, v_x, v_y, v_θ** (rys. 5.2) pozwala na obserwację dynamicznie zmieniających się rozkładów: prędkości v_x, v_y, v_θ i temperatury T .

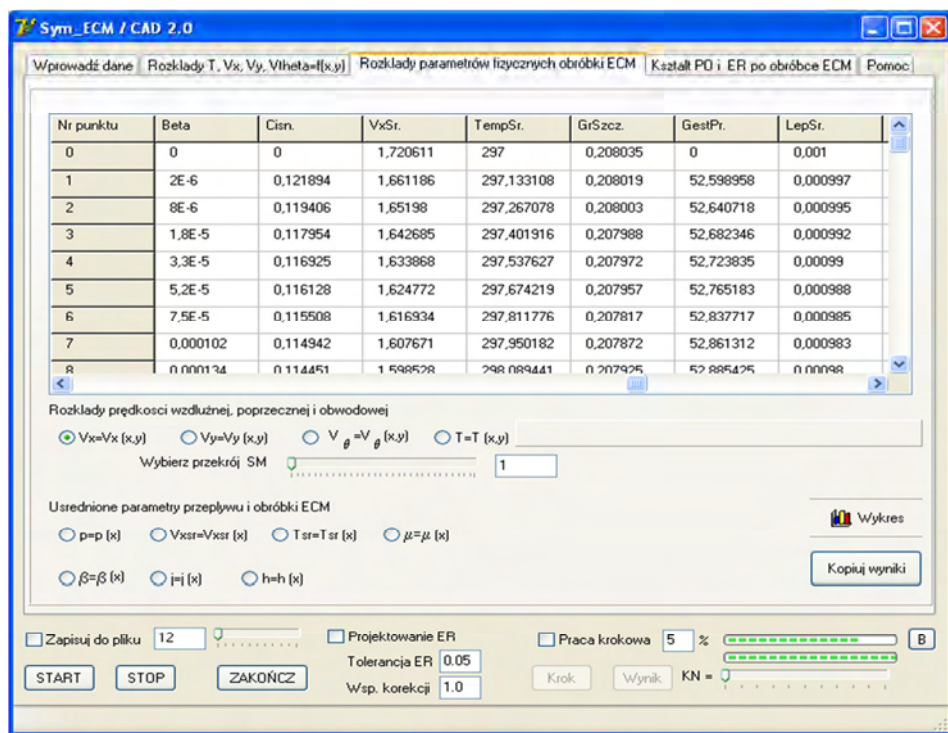
Za pomocą suwaka można prowadzić obserwację rozkładów: prędkości wzdłużnej, prędkości poprzecznej i obwodowej przepływu elektrolitu oraz temperatury wzdłuż długości szczeliny międzyelektrodowej (SM) w ujęciu dwuwymiarowym. Zakładka ma także okno wyświetlania tabeli, w której pokazano wartości liczbowe temperatury, prędkości wzdłużnej, prędkości poprzecznej i obwodowej przepływu elektrolitu. Suwakiem pionowym można przewijać tabelę wyników, obserwując rozkład wartości parametrów hydrodynamicznych w poprzek szczeliny międzyelektrodowej (SM), natomiast za pomocą suwaka poziomego przewija się tabelę, wyświetlając wartości temperatury, prędkości wzdłużnej, prędkości poprzecznej i obwodowej przepływu elektrolitu w kolejnych przekrojach wzdłuż długości szczeliny międzyelektrodowej (SM). Za pomocą przycisku – Kopiuj wyniki, aplikacja umożliwia kopiowanie tabeli wyników do innych programów – Microsoft Excel, Statistica, itp.



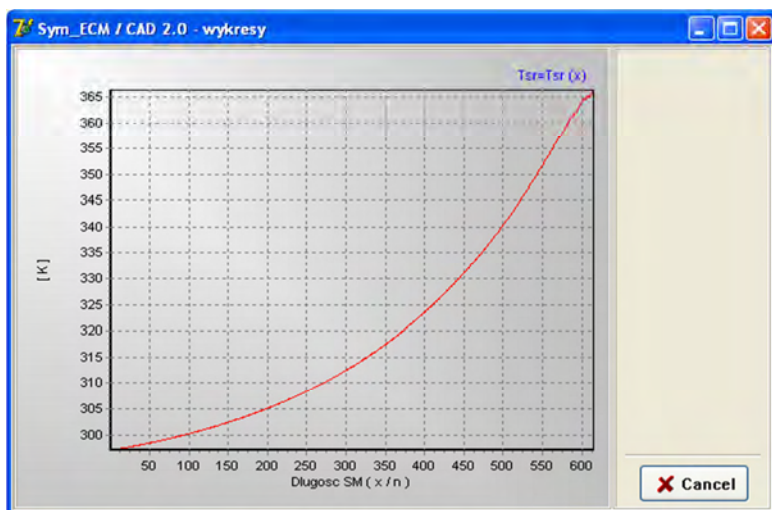
Rys. 5.2. Program Sym_ECM/CAD_2.0 z aktywną zakładką **Rozkłady T , v_x , v_y , v_θ**

Zakładka **Rozkłady parametrów fizycznych obróbki ECM** (rys. 5.3) umożliwia, za pomocą przycisku wyboru, wskazanie wybranego parametru obróbki ECM, np: prędkości wzdłużnej v_x , poprzecznej v_y , obwodowej v_θ , temperatury T elektrolitu, a za pomocą przycisku – **Wykres** edytować rozkład wybranego parametru w poprzek szczeliny międzyelektrodowej (SM). Przesuwając poziomy suwak można edytować rozkład wybranego parametru również wzdłuż długości szczeliny międzyelektrodowej (SM). Wybierając za pomocą przycisku wyboru dowolny parametr procesu obróbki ECM tj: koncentrację objętościową fazy gazowej β , ciśnienie p , prędkość średnią elektrolitu v_{xsr} , wartość średnią temperatury T_{sr} , grubość szczeliny h , gęstość prądu j oraz wartość średnią dynamicznego współczynnika lepkości μ_{sr} , można edytować ich rozkład wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM) (rys. 5.4). Za pomocą przycisku **Kopiuj wyniki** aplikacja umożliwia również w tej zakładce kopiowanie tabeli wyników do innych programów np. Microsoft Excel, Statistica, itp.

Zakładka **Rozkłady parametrów fizycznych obróbki ECM** pozwala także poza edycją tabeli rozkładów wybranych parametrów na obserwację wykresu wybranego przez użytkownika (rys. 5.4).

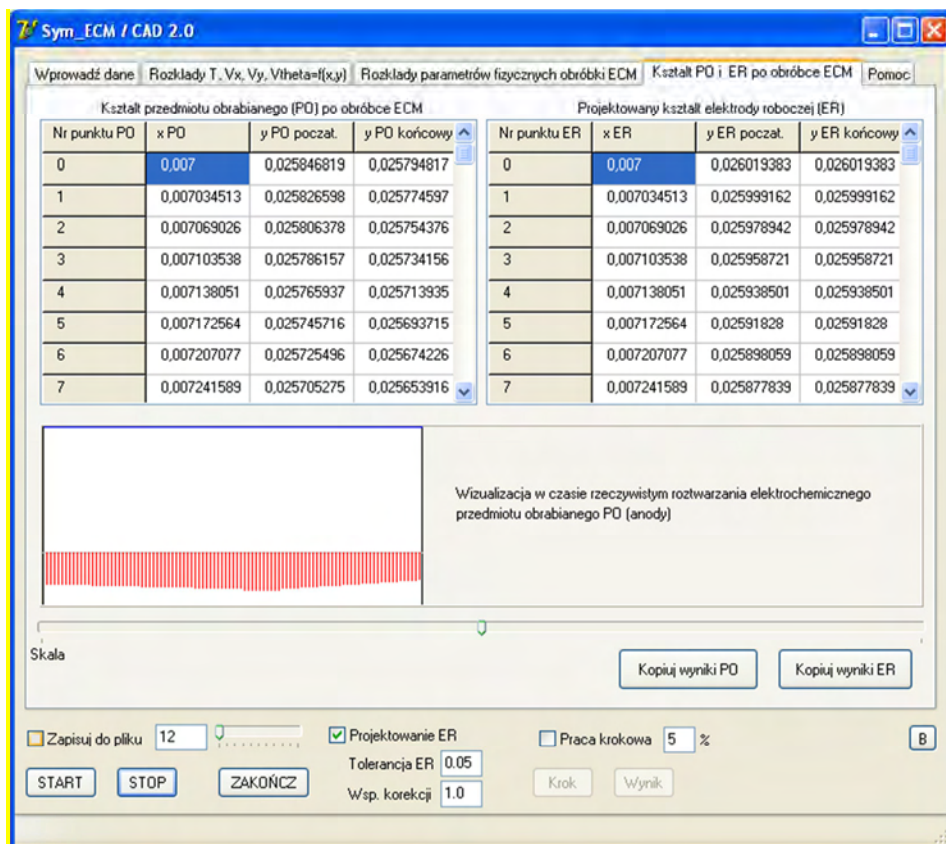


Rys. 5.3. Program Sym_ECM/CAD_2.0 z aktywną zakładką **Rozkłady parametrów fizycznych obróbki ECM**



Rys. 5.4. Program Sym_ECM/CAD_2.0 z aktywną zakładką **Rozkłady parametrów fizycznych obróbki ECM** (wykres rozkładu temperatury T_{sr} wzdłuż szczeliny SM)

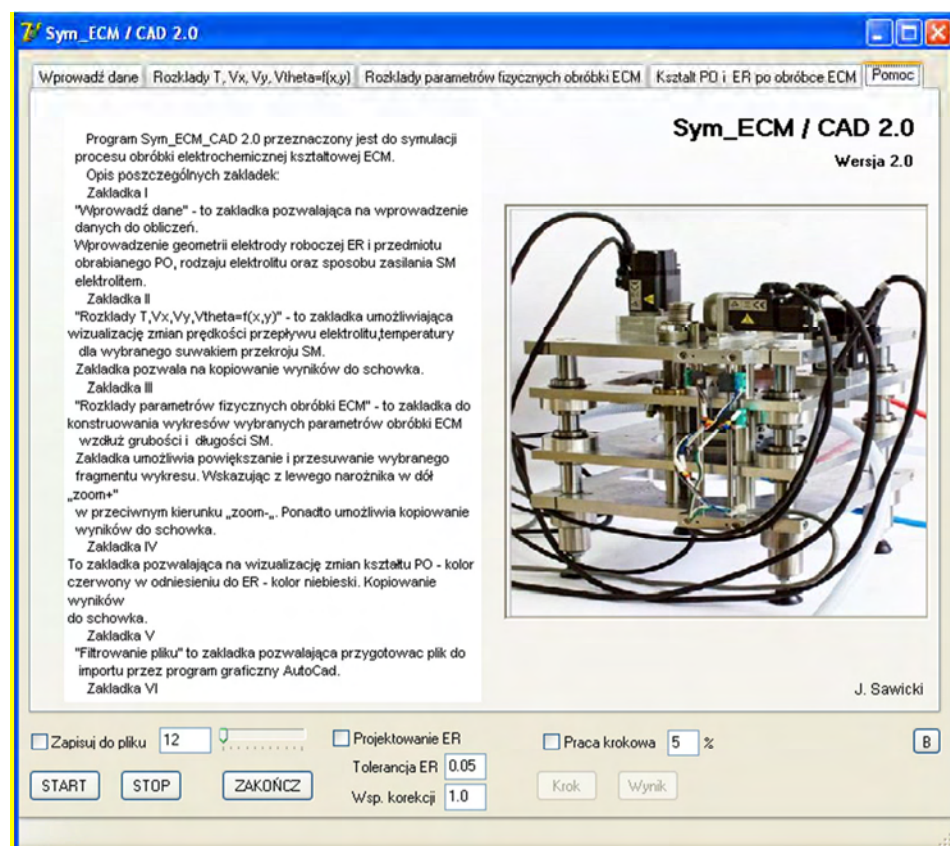
Zakładka **Kształt PO i ER po obróbce ECM** pozwala na wizualizację zmian kształtu przedmiotu obrabianego (PO) (linie oznaczone kolorem czerwonym) (rys. 5.5). Zakładka **Kształt PO i ER po obróbce ECM** przedstawia ponadto okno edycji tabeli współrzędnych przedmiotu obrabianego (PO) oraz elektrody roboczej ER po zakończeniu procedury projektowania w układzie globalnym RZ.



Rys. 5.5. Program Sym_ECM/CAD_2.0 z aktywną zakładką **Kształt PO po obróbce ECM** (wizualizacja zmian kształtu PO)

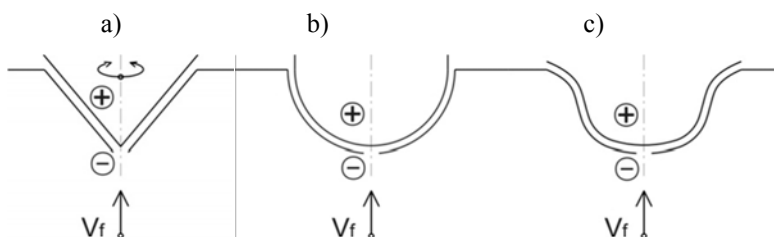
Za pomocą suwaka poziomego można przeskalować wykres zmiany kształtu przedmiotu obrabianego (PO).

W kolejnej zakładce programu symulacji obróbki ECM **POMOC** przedstawiono odpowiednio szczegółowo informacje o sposobie posługiwania się programem (rys.5.6).

Rys. 5.6. Program Sym_ECM/CAD_2.0 z aktywną zakładką **POMOC**

6. SYMULACJE NUMERYCZNE OBRÓBKİ ECM POWIERZCHNI OBROTOWYCH

W niniejszym rozdziale pracy, wykorzystując sformułowane w rozdziale 3 równania: ewolucji kształtu powierzchni obrabianej, energii oraz całki równań ruchu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej (SM), poddano analizie numerycznej proces kształtowania elektrochemicznego powierzchni obrotowych wyznaczających szczelinę międzyelektrodową (SM) w kształcie czaszy kulistej (rys. 6.1.b). Symulacje numeryczne dla pozostałych dwóch powierzchni wyznaczających szczelinę międzyelektrodową (SM), tj. powierzchni stożkowych i zakrzywionych (rys. 6.1. a,c) przedstawiono w aneksie pracy.



Rys. 6.1. Schemat obróbki elektrochemicznej elektrodą kształtową obrotową: a) stożkową, b) o kształcie czaszy kulistej, c) zakrzywioną

Należy zauważyć, że przedstawione w rozdziale 3 całki równań ruchu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej (SM) w warunkach przepływu laminarnego opisane I klasą przepływów, po uproszczeniu prowadzą do II klasy przepływów, a po dalszych uproszczeniach do tzw. przybliżenia Reynoldsa.

Oznacza to, że analizie numerycznej kształtowania elektrochemicznego w obszarze przepływu laminarnego poddano następujące przypadki:

- przybliżenie Reynoldsa,
- przybliżenie uwzględniające wpływ efektów bezwładności przepływu wywołanych oddziaływaniem odśrodkowych sił bezwładności (tzw. II klasa przepływów),
- przybliżenie uwzględniające wpływ efektów bezwładności przepływu wywołane oddziaływaniem wzdłużnych i odśrodkowych sił bezwładności (tzw. I klasa przepływów).

W obszarze przepływu turbulentnego analizę numeryczną przeprowadza się na podstawie sformułowanych w rozdziale 3 pracy formuł opisujących pole prędkości i ciśnienia w szczelinie międzyelektrodowej (SM).

Dyskutując nad wpływem kinematyki ruchu przedmiotu obrabianego (PO) i elektrody roboczej ER rozważa się następujące przypadki obróbki:

- obróbka ECM nieruchomej powierzchni obrotowej (PO), przy posuwie wgłębnym elektrody roboczej (ER),
- obróbka ECM wirującej powierzchni obrotowej (PO), przy posuwie wgłębnym elektrody roboczej (ER),
- obróbka ECM drgającej powierzchni obrotowej (PO), przy posuwie wgłębnym elektrody roboczej (ER),

- obróbka ECM wirującej i drgającej powierzchni obrotowej (PO), przy posuwie wgłębnym elektrody roboczej (ER),
- obróbka ECM drgającej skrętnie powierzchni obrotowej (PO), przy posuwie wgłębnym elektrody roboczej (ER),

Po to aby móc efektywnie porównać uzyskane wyniki symulacji komputerowej obróbki elektrochemicznej przedstawionych powyżej przypadków wynikających z analizy sformułowanych w rozdziale 3 całek równań ruchu mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej (SM), do obliczeń zakłada się następujące dane ogólne:

- szczelina początkowa $h_0 = 0,2 \text{ mm}$
- współrzędna wlotu mieszaniny elektrolitu i wodoru $x_w = 7 \text{ mm}$
- prędkość ruchu posuwowego elektrody $v_f = 1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- napięcie robocze $U = 15 \text{ V}$
- natężenie objętościowe przepływu (strumień objętości) $Q = 3 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
- czas obróbki $t = 66,67 \text{ s}$

Elektrolit pasywnujący o parametrach początkowych:

- gęstość elektrolitu $\rho_0 = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- dynamiczny współczynnik lepkości $\mu_0 = 0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- temperatura elektrolitu $T_0 = 290 \text{ K}$
- konduktywność elektryczna $\kappa_0 = 10 \text{ A} \cdot (\text{Vm})^{-1}$
- współczynnik przewodności cieplnej $\lambda_0 = 0,59 \text{ W} \cdot (\text{mK})^{-1}$
- ciepło właściwe $c_p = 3800 \text{ J} \cdot (\text{kgK})^{-1}$
- cieplny współczynnik przewodności elektrycznej $\alpha_T = 0,0211 \text{ K}^{-1}$

Parametry fizyczne wodoru:

- stała gazowa $R_H = 4127 \text{ J} \cdot (\text{kg K})^{-1}$
- równoważnik elektrochemiczny wodoru $K_H = 1,25 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot (\text{As})^{-1}$
- masa molowa wodoru $\mu_H = 0,002 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$
- wydajność prądowa roztwarzania $\eta_H = 0,2$

Współczynniki równania Tafela

$$k_1 = 1, k_2 = 0,12$$

Współczynniki krzywej polaryzacji anody

$$a_1 = 1,9, a_2 = 0,044$$

Współczynnik obrabialności elektrochemicznej

$$k_V = k_{V0}(1 - e^{\epsilon_1 - \epsilon_2 j}),$$

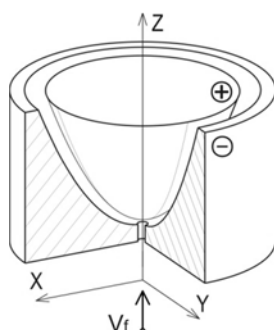
gdzie: $k_{V0} = 1,59 \text{ mm}^3 \cdot (\text{Amin})^{-1}$, $\epsilon_1 = 2,563$, $\epsilon_2 = 0,112$

Należy zauważyć, że aby przeprowadzić symulację obróbki wprowadza się kształt początkowy przedmiotu obrabianego (PO) i elektrody roboczej ER, a także żądany kształt powierzchni obrabianej umożliwiający obliczenia pozwalające na projektowanie elektrody roboczej ER.

Przedstawione powyżej dane będą uzupełnione stosownie do rozważanego przypadku kształtowania elektrochemicznego powierzchni.

6.1. OBRÓBKA ECM NIERUCHOMEJ POWIERZCHNI OBROTOWEJ

Na rysunku 6.2 przedstawiono schemat obróbki elektrochemicznej elektrodą o kształcie czaszy kulistej. Przedmiot obrabiany (PO), (anoda) jest nieruchomy, a elektroda robocza (ER) wykonuje ruch posuwowy wgłębny z zadaną prędkością $v_f = \text{const}$. Szczelina międzyelektrodowa (SM) wypełniona jest elektrolitem, którego przepływ wymuszony jest stałym natężeniem przepływu $Q = \text{const}$.

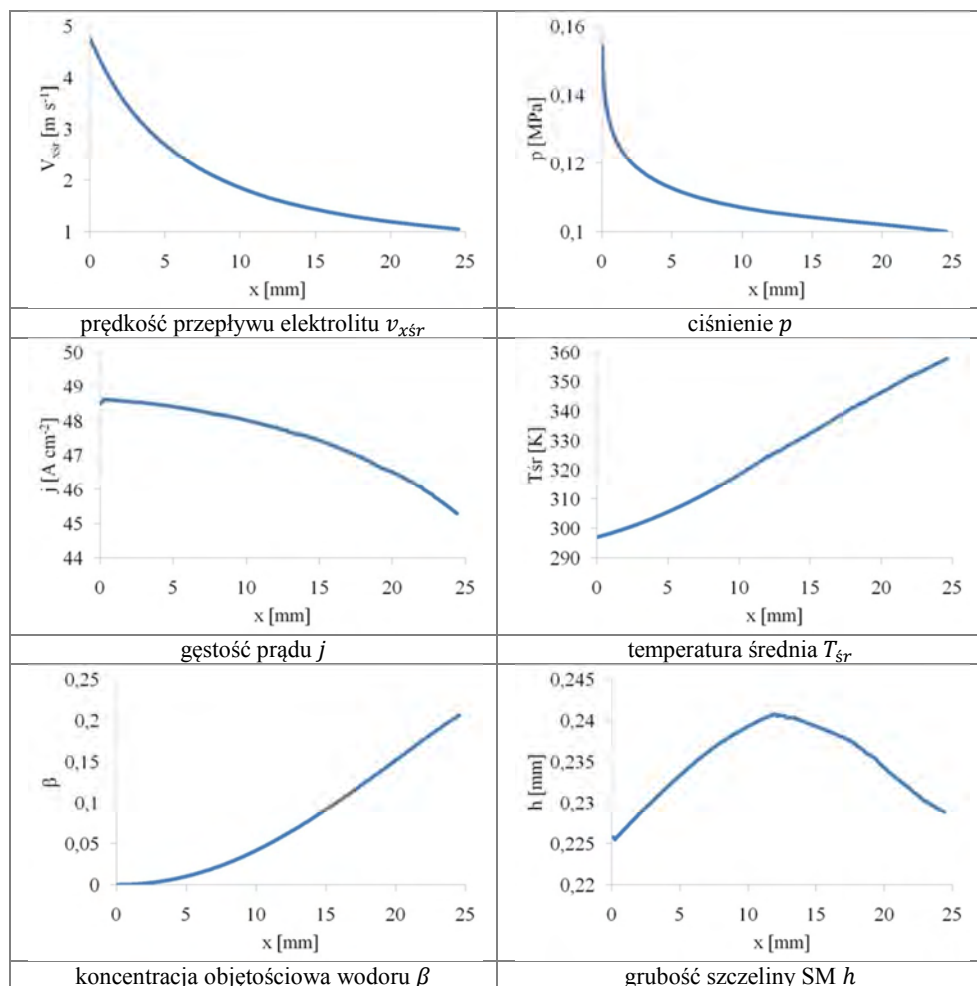


Rys. 6.2. Schemat obróbki elektrochemicznej elektrodą kształtową obrotową (PO nieruchomy, ER wykonuje ruch posuwowy z zadaną prędkością $v_f = \text{const}$)

Dane wejściowe sformułowano w rozdziale 6. Wyniki obliczeń zilustrowano na wykresach rozkładów parametrów fizycznych obróbki elektrochemicznej, tj. rozkładów prędkości średniej v_{xsr} , ciśnienia p , gęstości prądu j , temperatury T_{sr} , koncentracji fazy gazowej β oraz grubości szczeliny międzyelektrodowej h .

6.1.1. Rozkłady wybranych parametrów obróbki elektrochemicznej

Rozkłady parametrów fizycznych obróbki ECM dla rozważanego przypadku przedstawiono na wykresach (rys. 6.3).



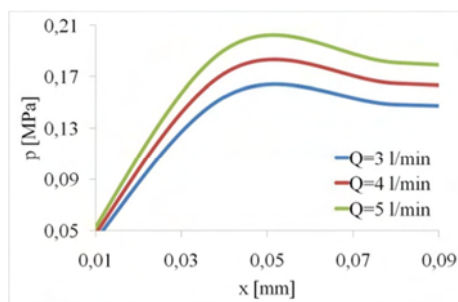
Rys. 6.3. Rozkłady parametrów obróbki wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

Na rysunku 6.3 i rysunkach zamieszczonych w aneksie (10.1 i 10.6), przedstawiono rozkłady charakterystycznych parametrów obróbki ECM dla trzech różnych geometrycznie powierzchni poddanych obróbce: w kształcie czaszy kulistej (rys. 6.3), stożkowych (rys. 10.1) oraz zakrzywionych (rys. 10.6). Na ich podstawie można sformułować następujące wnioski:

- Rozkłady prędkości średniej v_{sr} , ciśnienia p , temperatury T_{sr} i gęstości prądu j wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM) wynikają z wyraźnej zmiany pola przekroju SM jak również intensywnie zmieniających się parametrów fizycznych przepływu spowodowanych roztwarzaniem elektrochemicznym. Maksymalna prędkość w szczelinie tuż za wlotem do SM nie przekracza prędkości dźwięku w ośrodku dwufazowym. Minimalna wartość ciśnienia w obszarze SM jest znacznie większa od ciśnienia pary nasyconej. Z rozkładu temperatury średniej T_{sr} wynika wyraźny jej przyrost na wylocie z SM. Jest to spowodowane wzrostem objętościowej koncen-

tracji fazy gazowej β na końcu szczeliny oraz gwałtownym spadkiem prędkości i ciśnienia wzdłuż SM.

- Rozkład koncentracji fazy gazowej (wodoru) wzdłuż SM rośnie nieliniowo. Maksymalna wartość $\beta = 0,35$ na wylocie ze szczeliny jest znacznie mniejsza od wartości granicznej, powyżej której przepływ pęcherzykowy przechodzi w tzw. przepływ korkowy. Według Gryfitha i Snydera wartość krytyczna wynosi $\beta_{gr} = 0,5$,
- Minimalna grubość szczeliny występuje na wlocie do SM. Lokalne zmiany jej wysokości są spowodowane dynamicznie zmieniającymi się warunkami fizycznymi w szczelinie (zmienną lepkością, gęstością, konduktywnością elektrolitu, a także wyraźnie zmieniającą się prędkością przepływu oraz ciśnieniem). Należy zaznaczyć, że w otoczeniu wlotu SM ciśnienie zmienia się od wartości bardzo małych na krawędzi wlotu do wartości maksymalnych dla założonego stałego natężenia przepływu Q tuż za wlotem (rys. 6.4).

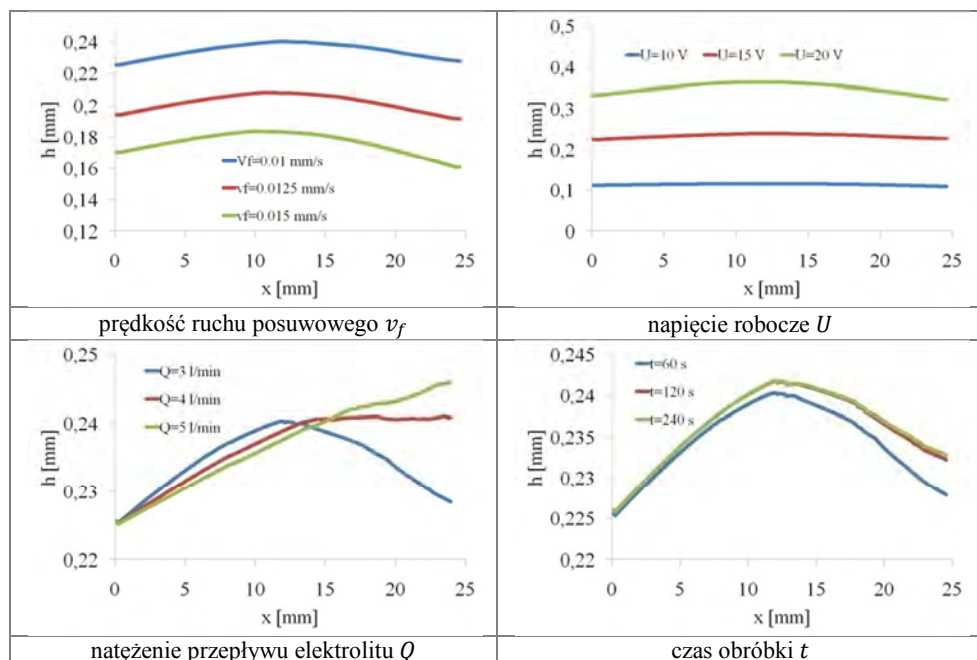


Rys. 6.4. Rozkłady w otoczeniu wlotu do szczeliny międzyelektrodowej (SM)

Z rysunku 6.4 wynika, że rozkład ciśnienia stabilizuje się do wartości maksymalnej na bardzo krótkim odcinku SM nie przekraczającym 0.01 mm dla różnych wartości natężenia objętościowego przepływu Q . Niskie wartości ciśnienia na krawędzi wlotu do SM mogą być przyczyną pojawienia się kawitacji. Po to aby uniknąć takiej sytuacji, stosuje się zasilanie SM odwrotne, tzn. obwodem zewnętrznym zamiast otworem centralnym o małej średnicy. Można także uniknąć kawitacji przez podwyższenie na wylocie elektrolitu ze SM ciśnienia statycznego (zastosowanie komory hermetycznej).

Łatwo zauważyć, że kształt obrabianych powierzchni obrotowych przedstawionych na rysunku 6.3, 10.1 oraz 10.6 istotnie wpływa przede wszystkim na rozkłady gęstości prądu j , koncentrację objętościową wodoru β oraz grubość szczeliny SM po obróbce. Wiąże się to z wyraźnie zmieniającą się grubością SM na powierzchniach zakrzywionych zarówno wklęsłych, jak i wypukłych. Z tego też względu zauważalne są także różnice prędkości przepływu elektrolitu v_{xsr} , ciśnienia p , temperatury średniej T_{sr} , choć różnice te są niewielkie.

Wpływ wybranych parametrów obróbki ECM: napięcia roboczego U , prędkości ruchu posuwowego v_f , natężenia objętościowego przepływu elektrolitu Q oraz czasu obróbki t na rozkład grubości szczeliny międzyelektrodowej (SM) przedstawiono na rysunku 6.5.



Rys. 6.5. Wpływ wybranych parametrów obróbki ECM na rozkład grubości szczeliny między-elektrodowej (SM)

Z przedstawionych wykresów wpływu wybranych parametrów obróbki ECM na rozkład grubości szczeliny międzyelektrodowej (SM) wynika, że:

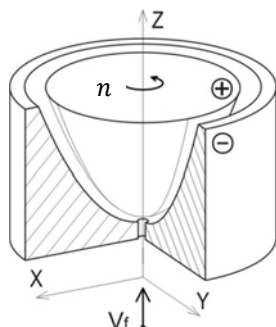
- wzrost prędkości ruchu posuwowego elektrody roboczej ER w istotny sposób wpływa na efektywność drażenia elektrochemicznego. Ze wzrostem prędkości ruchu posuwowego v_f rośnie grubość szczeliny (SM). Należy jednak zauważyć, że niewłaściwie ustalona prędkość ruchu posuwowego może doprowadzić do przedwczesnych stanów krytycznych (SK),
- wzrost napięcia roboczego U wpływa na wzrost grubości szczeliny (SM) w tym samym czasie obróbki. Wzrost napięcia powoduje jednak wzrost gęstości prądu, co może powodować przy jednoczesnym wzroście koncentracji fazy gazowej powstawanie niepożądanych stanów krytycznych (SK),
- wzrost natężenia objętościowego przepływu Q wyraźnie zmienia charakter krzywych opisujących grubość szczeliny (SM) po obróbce. Związane jest to ze zwiększeniem stopnia przepływania szczeliny, zmniejszeniem się koncentracji fazy gazowej i w efekcie poprawą roztwarzania elektrochemicznego zwłaszcza na wylocie elektrolitu ze szczeliny,
- wzrost czasu obróbki ECM powoduje wzrost grubości szczeliny (SM). Z wykresu wynika, że po przekroczeniu charakterystycznej wartości proces obróbki stabilizuje się, a krzywe rozkładu grubości SM zbliżają się do siebie, potwierdzając stacjonarność tego procesu.

Należy zaznaczyć, że wpływ wybranych parametrów (v_f , U , Q , t) na rozkłady grubości SM dla obróbki ECM powierzchni osiowosymetrycznych elektrodą kształtową

nieruchomą jest zbliżony jakościowo dla wszystkich pozostałych układów kinematycznych analizowanych w niniejszej pracy.

6.2. OBRÓBKA ECM WIRUJĄCEJ POWIERZCHNI OBROTOWEJ

Na rysunku 6.6. przedstawiono schemat obróbki elektrochemicznej elektrodą kształtową obrotową. Przedmiot obrabiany (PO) (anoda) obraca się z zadaną prędkością obrotową n , a elektroda robocza (ER) (katoda) wykonuje ruch posuwowy wgłębny z zadaną prędkością $v_f = \text{const}$. Szczelina międzyelektrodowa (SM) wypełniona jest elektrolitem, którego przepływ wymuszony jest stałym natężeniem przepływu $Q = \text{const}$.



Rys. 6.6. Schemat obróbki elektrochemicznej elektrodą kształtową obrotową (PO wiruje ze stałą prędkością obrotową n , ER wykonuje ruch posuwowy z zadaną prędkością $v_f = \text{const}$)

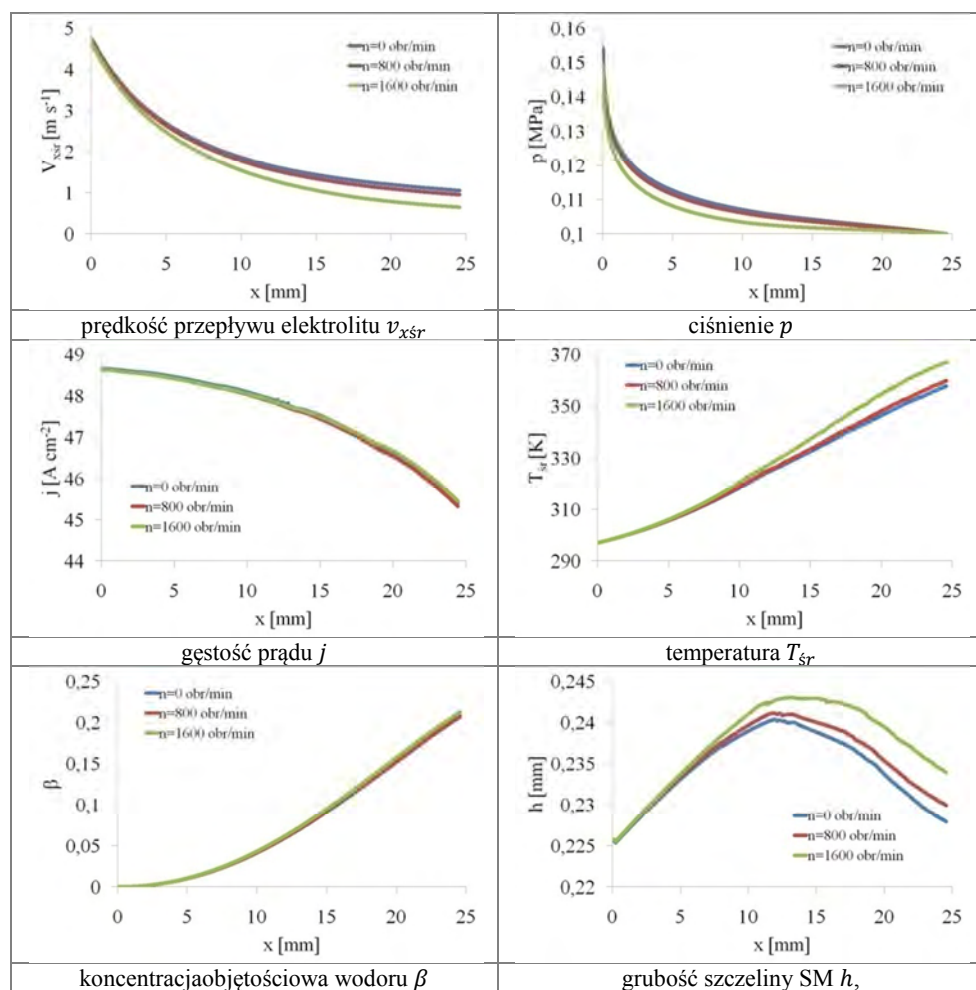
Niech prędkość obrotowa anody wynosi odpowiednio $n = 800, 1600 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$.

6.2.1. Rozkłady wybranych parametrów obróbki elektrochemicznej

Dla danych sformułowanych w rozdziale 6 oraz podrozdziale 6.2 przeprowadzono obliczenia przedstawiając otrzymane wyniki na wykresach (rys. 6.7).

Z przedstawionych na rysunku 6.7 i rysunkach zamieszczonych w aneksie (10.2 i 10.7) rozkładów parametrów obróbki ECM wynika, że zastosowanie ruchu obrotowego jednej z elektrod istotnie wpływa na warunki obróbki. Wzrost prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego (PO) powoduje:

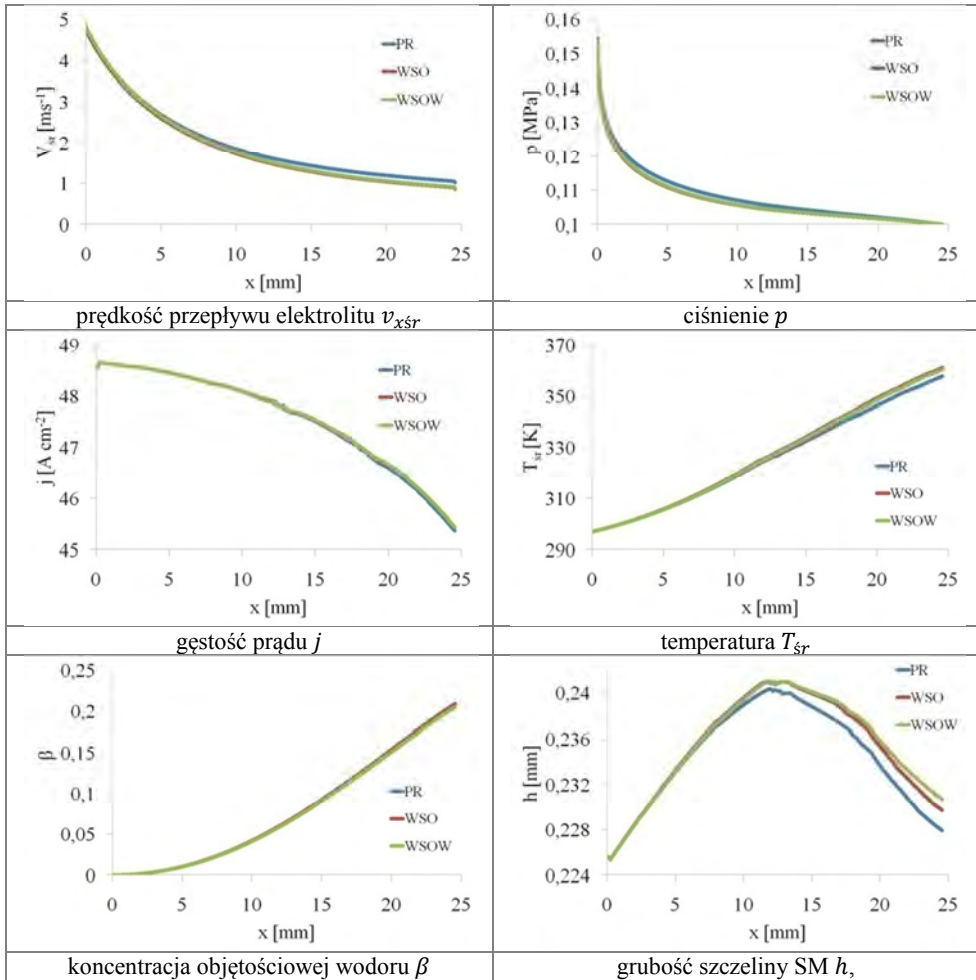
- spadek prędkości v_{xsr} wzdłuż szczeliny (SM) zwłaszcza u wylotu ze szczeliny. Wiąże się to z wpływem na wartości tej prędkości, prędkości obwodowej przepływu elektrolitu v_θ wywołanej ruchem obrotowym PO,
- spadek ciśnienia wzdłuż szczeliny (SM), co może przy znaczących prędkościach obrotowych i zbyt małych natężeniach przepływu elektrolitu Q doprowadzić do niebezpiecznych podciśnień, w skrajnych przypadkach umożliwiających powstanie stanów krytycznych (SK),



Rys. 6.7. Wpływ prędkości obrotowej n na rozkłady parametrów obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

- wzrost gęstości prądu j , co jest wynikiem zarówno spadku prędkości przepływu elektrolitu, jak również spadku ciśnienia. Wzrost gęstości prądu j wyraźnie jest widoczny w pobliżu wylotu ze szczeliny (SM),
- wzrost temperatury średniej u wylotu ze szczeliny (SM), który wynika ze wzrostu w tej części szczeliny (SM) gęstości prądu j ,
- niewielki wzrost koncentracji objętościowej wodoru β , przy jednoczesnym wzroście gęstości prądu powoduje wzrost grubości szczeliny (SM). Oznacza to lepsze roztrawianie elektrochemiczne powierzchni przedmiotu obrabianego (PO).

Na rysunku 6.8. przedstawiono wpływ uproszczonych rozwiązań w obszarze przepływu laminarnego mieszaniny elektrolitu i wodoru, tj. przybliżenia Reynoldsa PR (tzw. przybliżenia zerowego), przybliżenia charakterystycznego dla II klasy przepływów WSO (przybliżenia uwzględniającego wpływ odśrodkowych sił bezwładności) oraz przybliżenia określonego I klasą przepływów WSOW (przybliżenia, które uwzględnia wpływ wzdłużnych i odśrodkowych sił bezwładności – przybliżenie linio-we) na parametry fizyczne obróbki ECM.



Rys. 6.8. Rozkłady parametrów obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

Przeprowadzona analiza wpływu sposobu rozwiązania równań ruchu oparta na uproszczeniach wynikających z rozwiązania układu równań opisujących przepływ mieszaniny elektrolitu i wodoru w szczelinie (SM) pozwala sformułować następujące wnioski:

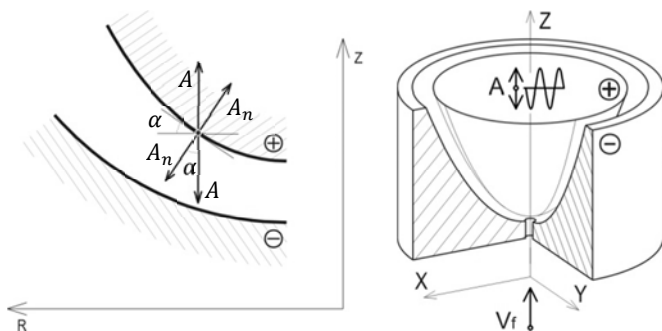
- rozwiązanie oparte na przybliżeniu Reynoldsa PR uniemożliwia uwzględnienie wpływu sił odśrodkowych i sił wzdłużnych przepływu elektrolitu wynikających

- z bezwładności ruchu mieszaniny cieczy i gazu w szczelinie (SM). Przedstawione na rysunku 6.8 rozkłady parametrów obróbki ECM opisują rozkłady analogiczne jak w przypadku obróbki ECM, gdy powierzchnie elektrod ER i PO nie obracają się,
- rozwiązanie oparte na przybliżeniu charakterystycznym dla II klasy przepływów WSO pozwala uwzględnić w analizie przepływu ruch obrotowy jednej z elektrod (w tym przypadku ruch obrotowy przedmiotu obrabianego (PO)), co przedstawiono na rysunku 6.8 analizując wpływ prędkości obrotowej (PO) na parametry obróbki,
 - rozwiązanie oparte na wykorzystaniu tzw. I klasy przepływów, tj. przybliżenia, które uwzględnia wpływ wzdłużnych i odśrodkowych sił bezwładności WSOW jest rozwiązaniem nieliniowych równań ruchu przepływu mieszaniny cieczy i gazu w szczelinie (SM), co prowadzi do skomplikowanych analitycznych formuł określających pole przepływu mieszaniny, tj. pole prędkości i ciśnień. Analiza powyższego przybliżenia na przykładzie przedstawionym na rysunku 6.8 pozwala stwierdzić, że wpływ wzdłużnych sił bezwładności na rozkłady parametrów obróbki ECM jest nieznaczny w odniesieniu do charakterystyk opisanych przybliżeniem wynikającym z zastosowania II klasy przepływów. Zastosowanie dużych wartości natężeń przepływu elektrolitu, przekraczających znacznie przyjęte do symulacji wartości natężeń (o rząd wielkości i większe) daje zauważalny wpływ efektów wynikających z wpływu wzdłużnych sił bezwładności przepływu. Można zatem w analizie procesu ECM powierzchni obrotowych pominąć wpływ wzdłużnych sił bezwładności.

Oznacza to, że symulacje obróbki ECM dla poszczególnych przypadków kinematycznych będą dalej oparte na przybliżeniu II, tj. przybliżeniu uwzględniającym wpływ odśrodkowych sił bezwładności.

6.3. OBRÓBKA ECM DRGAJĄCEJ POWIERZCHNI OBROTOWEJ

Na rysunku 6.9 przedstawiono schemat obróbki elektrochemicznej elektrodą kształtową obrotową. Przedmiot obrabiany (PO) wykonuje ruch drgający harmoniczny o zadanej amplitudzie A i częstotliwości drgań ω , a elektroda robocza (ER) ruch posuwowy wgłębny z zadaną prędkością $v_f = \text{const}$. Szczelina międzyelektrodowa (SM) wypełniona jest elektrolitem, którego przepływ wymuszony jest stałym natężeniem przepływu $Q = \text{const}$.



Rys. 6.9. Schemat obróbki elektrochemicznej elektrodą kształtową obrotową (A – amplituda drgań zgodnych z v_f , A_n – rzut amplitudy na kierunek normalny do anody PO)

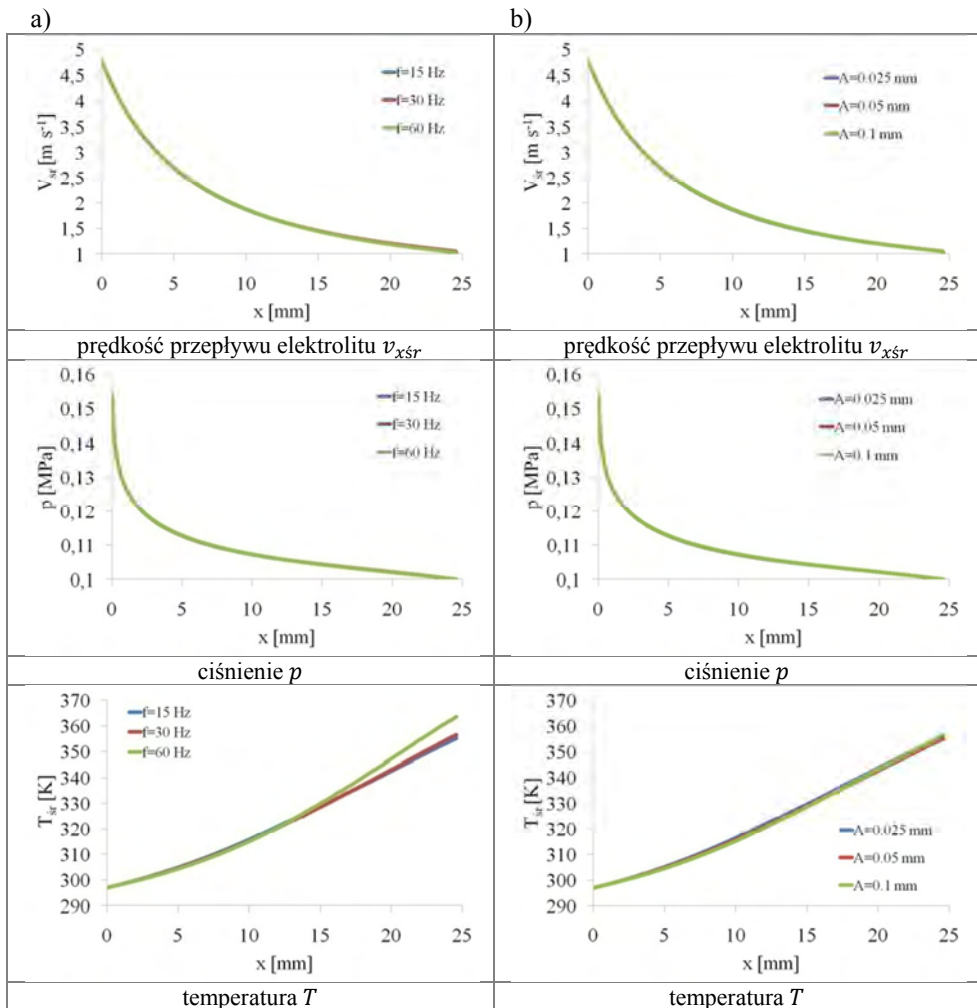
Przyjęto następujące parametry ruchu drgającego przedmiotu obrabianego (PO):
 amplituda drgań $A = 0,025, 0,05; 0,1 \text{ mm}$
 częstość kołowa $\omega = 94,248; 188,496; 376,991 \text{ s}^{-1}$

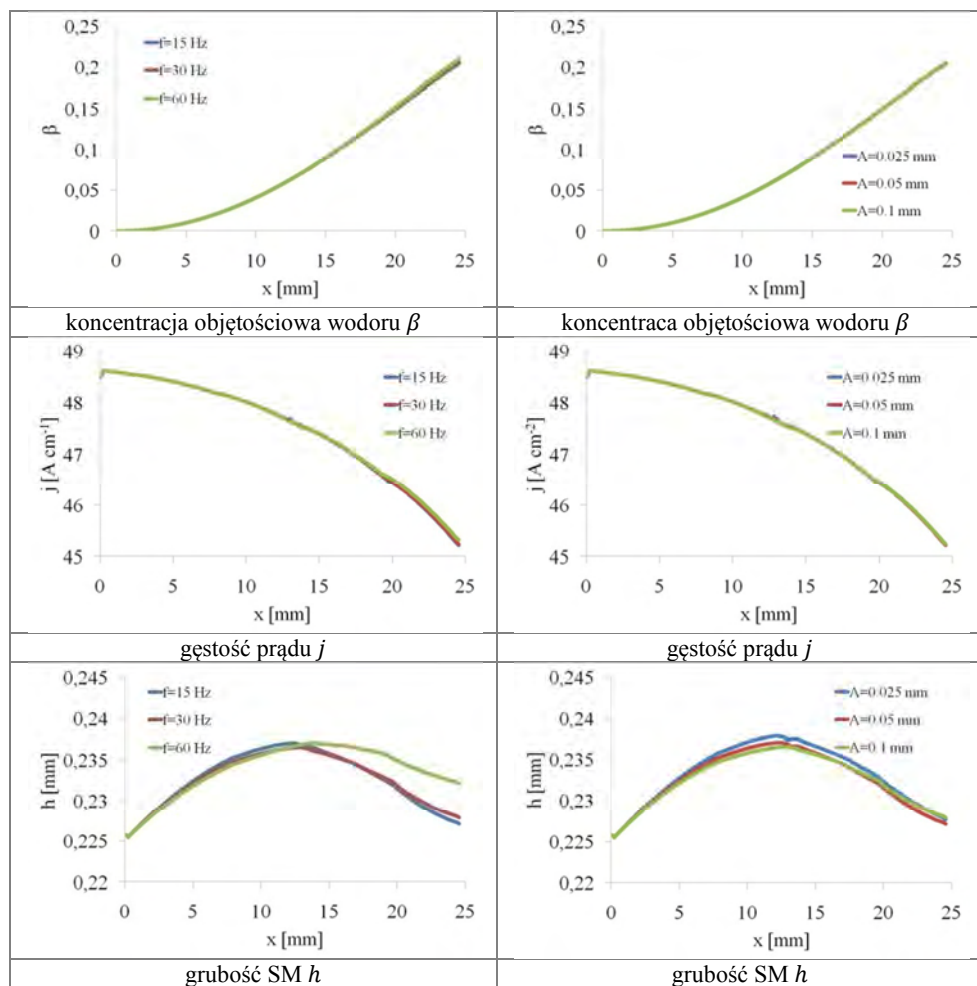
Założone częstości drgań odpowiadają częstotliwościom drgań anody PO równym

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 15, 30; 60 \text{ Hz} \quad (6.1)$$

6.3.1. Rozkłady wybranych parametrów obróbki elektrochemicznej

Dla danych przedstawionych w rozdziale 6 oraz podrozdziale 6.3 przeprowadzono obliczenia ilustrując otrzymane wyniki na wykresach, na których przedstawiono wpływ amplitudy drgań A i częstości drgań f (częstości drgań ω) na parametry obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM) (rys. 6.10).





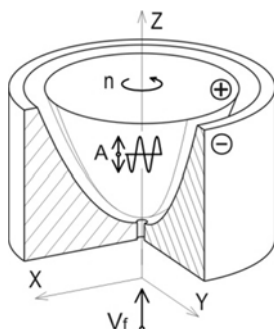
Rys. 6.10. Wpływ: a) częstotliwości drgań f ($A = 0,1$ mm), b) amplitudy A ($f = 30$ Hz) na rozkłady parametrów obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

Z przedstawionych na rysunku 6.10 i rysunkach zamieszczonych w aneksie (10.3 i 10.8) rozkładów parametrów obróbki ECM wynika, że zastosowanie drgań jednej z elektrod zmienia warunki obróbki. Wpływ drgań elektrody roboczej ER na parametry obróbki ECM przedstawiono za pomocą dwóch wielkości: amplitudy A i częstotliwości drgań f elektrody roboczej ER. Należy podkreślić, że dane wprowadzone do obliczeń dostosowano tak, aby po zakończeniu procesu symulacji obróbki w zadanym czasie była możliwość porównania otrzymanych charakterystyk z pozostałymi przypadkami szczególnymi rozważanymi w pracy. Oznacza to, że całkowity czas obróbki przyjęto równy krotności okresu drgań dla zadanej częstotliwości drgań elektrody roboczej ER. Analiza wykresów rozkładu prędkości średniej przepływu i rozkładu ciśnień potwierdza przyjęte założenie. Zarówno częstotliwość, jak i amplituda drgań nie zmienia rozkładów tych parametrów. Wpływ częstotliwości drgań ER jest zauważalny na rozkładach gęsto-

ści prądu j , koncentracji objętościowej wodoru β oraz grubości szczeliny (SM) h . Zwiększanie częstotliwości drgań powoduje wzrost koncentracji objętościowej wodoru β , gęstości prądu j , temperatury średniej elektrolitu T_{sr} oraz znacząco wpływa na rozkład grubości szczeliny (SM) h zwłaszcza u wylotu elektrolitu ze szczeliny (SM). Wzrost amplitudy drgań wpływa znikomo na parametry fizyczne obróbki ECM w porównaniu z wpływem częstotliwości drgań. Zwiększenie amplitudy drgań poprawia warunki hydrodynamiczne oraz sprawia, że mamy lepsze przepłukiwanie szczeliny (SM), lecz pogarsza się roztwarzanie elektrochemiczne powierzchni obrabianych.

6.4. OBRÓBKA ECM WIRUJĄCEJ I DRGAJĄCEJ POWIERZCHNI OBROTOWEJ

Na rysunku 6.11 przedstawiono schemat obróbki elektrochemicznej elektrodą kształtową obrotową. Przedmiot obrabiany (PO) (anoda) obraca się zadaną prędkością obrotową n i wykonuje ruch drgający harmoniczny o zadanej amplitudzie A i częstotliwości drgań ω , a elektroda robocza (ER) ruch posuwowy wgłębny zadaną prędkością $v_f = const$. Szczelina międzyelektrodowa (SM) wypełniona jest elektrolitem, którego przepływ wymuszony jest stałym natężeniem przepływu $Q = const$. Analizowany przypadek to przypadek obróbki ECM przy złożonym kinematycznie ruchu elektrod (anody PO i katody ER).



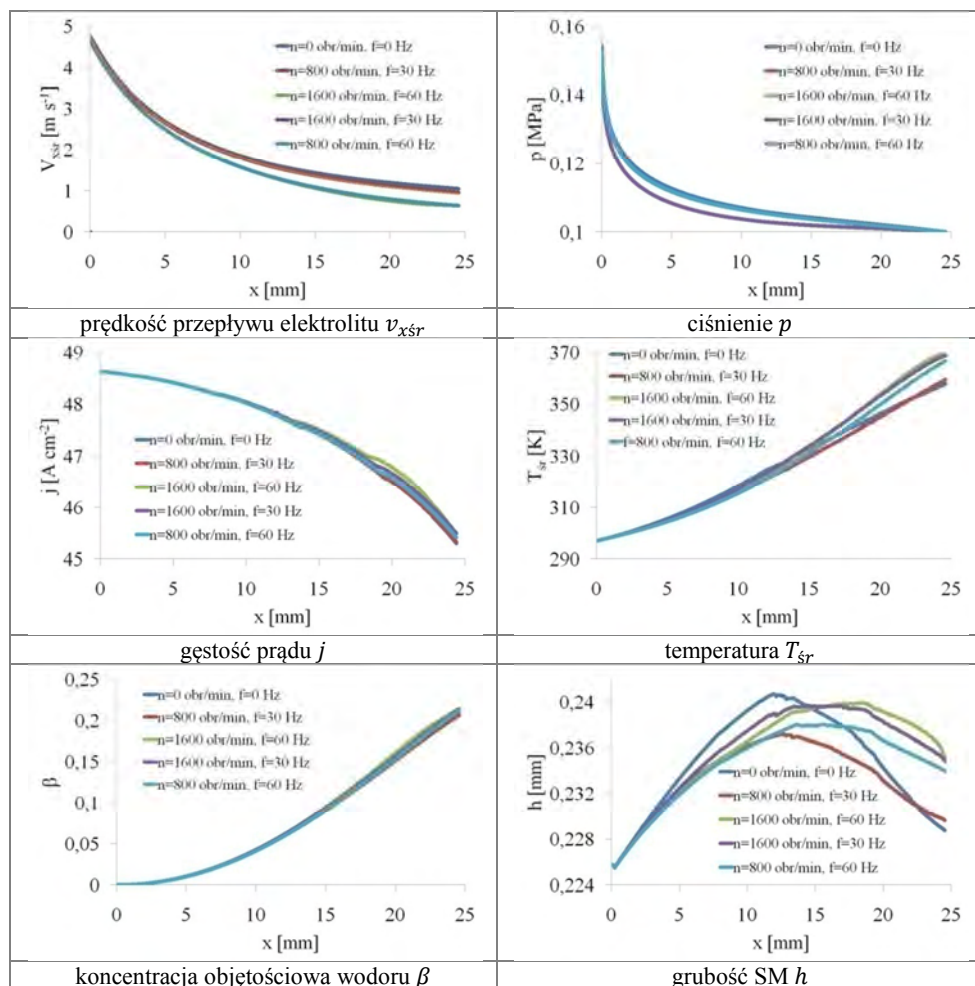
Rys. 6.11. Schemat obróbki elektrochemicznej elektrodą kształtową obrotową (PO wiruje ze stałą prędkością obrotową n i drga zgodnie z ruchem posuwowym ER)

Przyjęto następujące parametry ruchu drgającego przedmiotu obrabianego (PO):

amplituda drgań	$A = 0,1 \text{ mm}$
częstość kołowa	$\omega = 188,496; 376,991 \text{ s}^{-1}$
prędkość obrotowa anody	$n = 800, 1600 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$

6.4.1. Rozkłady wybranych parametrów obróbki elektrochemicznej

Dla danych przedstawionych w rozdziale 6 i podrozdziale 6.4 wykonano obliczenia, a otrzymane wyniki zilustrowano na wykresach, przedstawiając wpływ prędkości obrotowej n i częstotliwości drgań f (częstości drgań ω) na parametry obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM) (rys. 6.12).



Rys. 6.12. Wpływ częstotliwości drgań f , prędkości obrotowej n dla zadanej wartości amplitudy $A = 0,1$ mm na parametry obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

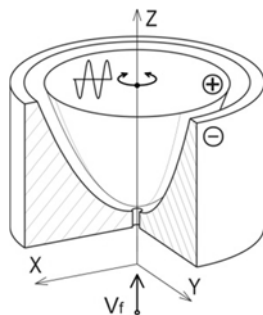
Z przedstawionych na rysunku 6.10 i rysunkach zamieszczonych w aneksie pracy (10.4 i 10.9) rozkładów parametrów obróbki ECM wynika, że przy złożonym kinematycznie ruchu elektrod istotne zmiany zauważa się przede wszystkim na rozkładach temperatury i grubości szczeliny międzyelektrodowej (SM). Zastosowanie ruchu obrotowego jednej z elektrod oraz drgań zgodnych z posuwem elektrody roboczej ER istotnie wpływa warunki obróbki. Wprowadzenie prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego (PO) oraz drgań elektrody roboczej w odniesieniu do obróbki elektrodami nieruchomymi powoduje:

- spadek prędkości v_{xsr} wzdłuż szczeliny (SM) zwłaszcza u wylotu ze szczeliny. Wiąże się to z wpływem na wartości tej prędkości, prędkości obwodowej przepływu elektrolitu v_{θ} wywołanej ruchem obrotowym PO,

- spadek ciśnienia wzdłuż szczeliny (SM), co jest spowodowane prędkością obrotową PO,
- niewielki wzrost gęstości prądu j , co jest wynikiem zarówno spadku prędkości przepływu elektrolitu, jak również spadku ciśnienia. Wzrost gęstości prądu j wyraźnie jest widoczny w pobliżu wylotu ze szczeliny (SM),
- wzrost temperatury średniej u wylotu ze szczeliny (SM), który wynika ze wzrostu w tej części szczeliny (SM) gęstości prądu j ,
- wzrost koncentracji objętościowej wodoru β jest niewielki. Wynika to z oddziaływania wprowadzonych drgań pozwalających na chwilowe dużo lepsze przepłukiwanie szczeliny (SM).

6.5. OBRÓBKA ECM DRGAJĄCEJ SKRĘTNIE POWIERZCHNI OBROTOWEJ

Na rysunku 6.13 przedstawiono schemat obróbki elektrochemicznej elektrodą kształtową obrotową. Przedmiot obrabiany (PO) (anoda) wykonuje ruch drgający skrętny o zadanej amplitudzie γ i częstotliwości drgań skrętnych ω_{osc} , a elektroda robocza (ER) ruch posuwowy wgłębny z zadaną prędkością $v_f = \text{const}$. Szczelina międzyelektrodowa (SM) wypełniona jest elektrolitem, którego przepływ wymuszony jest stałym natężeniem przepływu $Q = \text{const}$.



Rys. 6.13. Schemat obróbki elektrochemicznej elektrodą kształtową obrotową

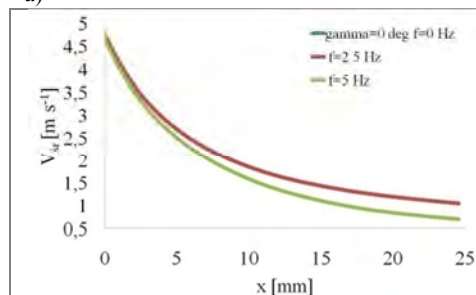
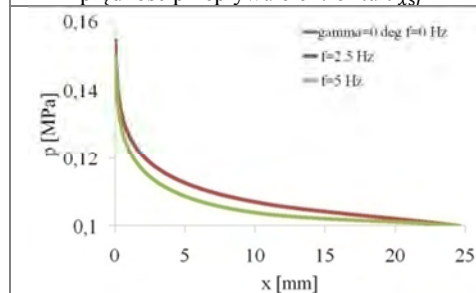
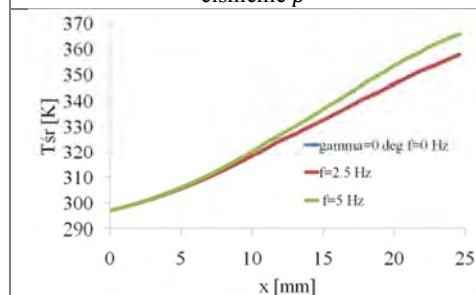
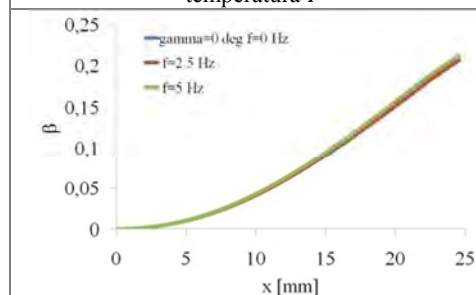
Parametry ruchu drgającego przedmiotu obrabianego (PO) są następujące:

amplituda drgań skrętnych	$\gamma = 2,5; 5 \text{ deg}$
częstość kołowa	$\omega_{osc} = 15,708; 31,416 \text{ s}^{-1}$

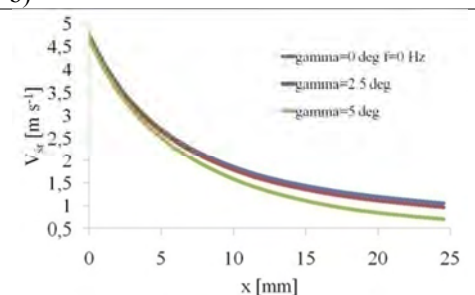
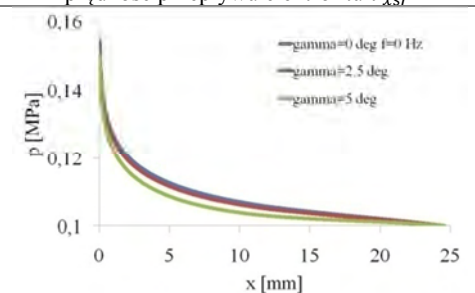
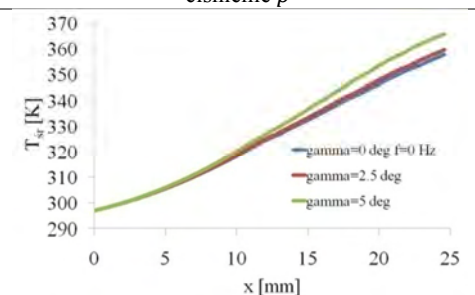
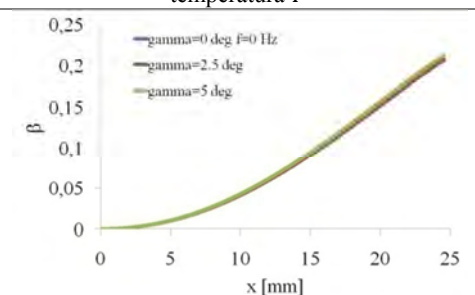
6.5.1. Rozkłady wybranych parametrów obróbki elektrochemicznej

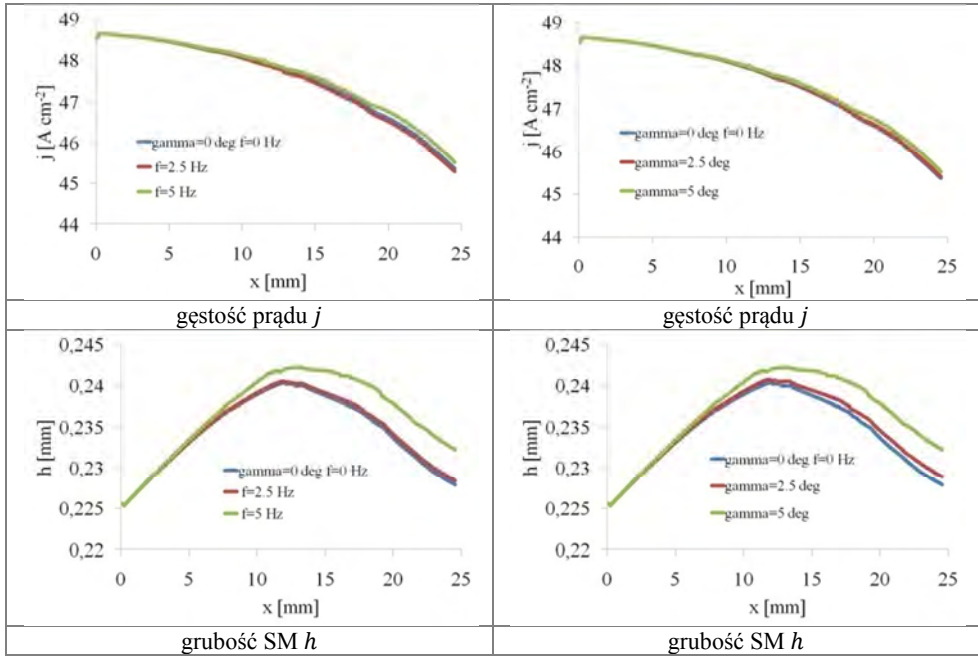
Dla danych przedstawionych w rozdziale 6 i podrozdziale 6.5 wykonano obliczenia, a otrzymane wyniki zilustrowano na wykresach, na których przedstawiono wpływ amplitudy drgań A i częstotliwości drgań ω na parametry obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM) (rys. 6.14).

a)

prędkość przepływu elektrolitu v_{xsr} ciśnienie p temperatura T koncentracja objętościowa wodoru β

b)

prędkość przepływu elektrolitu v_{xsr} ciśnienie p temperatura T koncentracja objętościowa wodoru β



Rys. 6.14. Wpływ: a) częstotliwości drgań f ($\gamma = 5$ deg), b) amplitudy γ ($f = 5$ Hz) na rozkłady parametrów obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

Z przedstawionych na rysunku 6.14 i rysunkach zamieszczonych w aneksie (10.5 i 10.10) rozkładów parametrów obróbki ECM wynika, że wprowadzenie drgań skrętnych przedmiotu obrabianego (PO) o zadanej częstotliwości i amplitudzie wyraźnie zmienia rozkłady parametrów fizycznych obróbki ECM w szczelinie (SM). Zarówno amplituda drgań skrętnych γ , jak i częstotliwość drgań f powodują:

- wyraźny spadek prędkości przepływu mieszaniny elektrolitu i wodoru wzdłuż szczeliny (SM). Wynika to z faktu, że wprowadzone drgania skrętne deformują uśrednioną składową prędkości wzdłużnej $v_{x\ \bar{s}r}$,
- spadek ciśnienia wzdłuż szczeliny (SM) wynikający z wpływu obu parametrów na składową prędkości wzdłużnej $v_{x\ \bar{s}r}$, która istotnie wpływa na rozkład ciśnienia w szczelinie,
- niewielki wzrost średniej temperatury w szczelinie (SM) zwłaszcza w pobliżu wylotu mieszaniny cieczy i gazu,
- niewielki wzrost koncentracji objętościowej wodoru β , co powoduje lepsze roztrawianie elektrochemiczne powierzchni zwłaszcza u wylotu mieszaniny ze szczeliny (SM),
- wzrost gęstości prądu wzdłuż szczeliny (SM) wyraźnie widoczny w pobliżu wylotu. Poprawia to intensywność roztrawiania elektrochemicznego powierzchni,
- przyrost grubości szczeliny (SM) po obróbce ECM będący wynikiem wyższych wartości gęstości prądu, nieznacznym przyrostem koncentracji objętościowej wodoru β , a także średniej temperatury w szczelinie (SM).

6.6. ANALIZA TEORETYCZNA DOKŁADNOŚCI I WYDAJNOŚCI OBRÓBKİ ECM POWIERZCHNI OBROTOWYCH

Dokładność obróbki ECM powierzchni obrotowych zależy od wzajemnie powiązanych czynników:

- geometrii elektrody roboczej,
- parametrów obróbki,
- czasu obróbki,
- własności i właściwości elektrochemicznych elektrolitu i ich stabilności podczas procesu obróbki,
- początkowej geometrii powierzchni przedmiotu obrabianego (PO).

Doświadczenia eksploatacji obrabiarek elektrochemicznych pozwalają zauważyć, że na błąd wypadkowy obróbki składają się błędy:

- ustawienia elektrod (10-20)%,
- wywołane zmianami parametrów elektrolitu na wlocie do szczeliny międzyelektrodowej (SM) (30-40)%,
- wywołane zmianami własności elektrolitu podczas obróbki na długości szczeliny międzyelektrodowej (SM) (15-20)%,
- powstające w wyniku zmiennych warunków hydrodynamicznych przepływu (15-20)%,
- związane z odkształceniami sprężystymi i termicznymi (10-15)%.

Analizę teoretyczną dokładności i wydajności obróbki ECM powierzchni obrotowych przeprowadzono, dokonując porównania zaproponowanych w pracy sposobów obróbki ECM powierzchni obrotowych w kształcie czaszy kulistej. Dane do obliczeń przedstawiono w rozdziale 6 pracy.

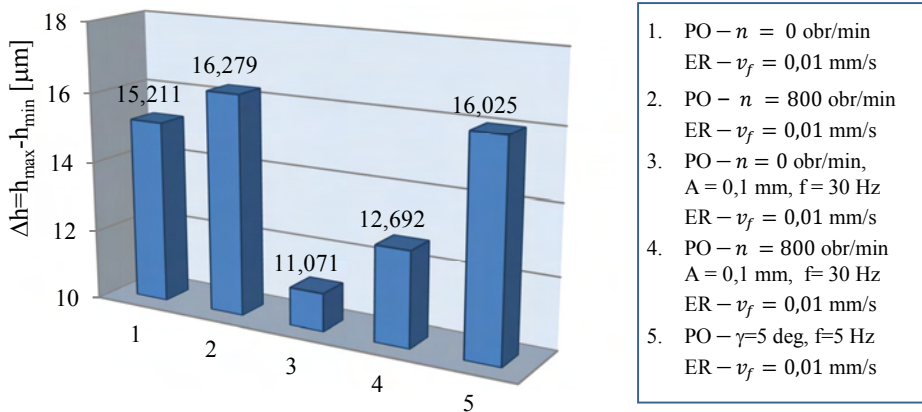
Za miarę niedokładności przyjęto wartość różnicy między grubością maksymalną i minimalną szczeliny międzyelektrodowej (SM) po obróbce ECM.

$$\Delta h = h_{max} - h_{min} [\mu m] \quad (6.1)$$

gdzie:

- h_{max} – maksymalna grubość szczeliny międzyelektrodowej (SM) po obróbce ECM,
- h_{min} – minimalna grubość szczeliny międzyelektrodowej (SM) po obróbce ECM,

Na rysunku 6.15 przedstawiono na podstawie zależności (6.1) niedokładności Δh dla wszystkich analizowanych w pracy sposobów obróbki ECM.

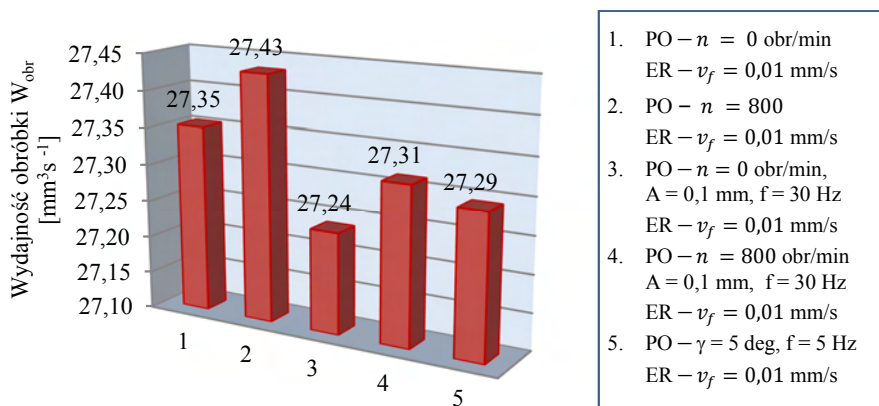


Rys. 6.15. Rozkład niedokładności dla wybranych sposobów obróbki ECM powierzchni obrotowych

Z przeprowadzonych obliczeń oraz załączonego wykresu rozkładu niedokładności Δh wynika, że przyjęta w taki sposób miara niedokładności obróbki pozwala zauważyć, co następuje:

- najmniejszą niedokładność obróbki ECM osiąga się, przeprowadzając obróbkę elektrodami obrotowymi, z których przedmiot obrabiany (PO) drga zadaną częstotliwością i amplitudą, a elektroda robocza (ER) wykonuje ruch posuwowy wgłębny,
- największa niedokładność w badanym czasie obróbki, a więc w stanie przejściowym występuje, gdy przedmiot obrabiany (PO) wykonuje ruch obrotowy, bądź obrotowo skrętny (PO), a elektroda robocza (ER) ruch posuwowy wgłębny,
- obróbka przy ruchu złożonym (ruch drgający (PO) zgodny z ruchem posuwowym (ER) plus ruch obrotowy (PO)) powiększa niedokładność obróbki ECM w porównaniu z przypadkiem 3. Niedokładność obróbki ECM jest zdecydowanie mniejsza w porównaniu z przypadkiem 2 i 5,
- obróbka ECM nieruchomego przedmiotu obrabianego (PO) daje mniejsze niedokładności w porównaniu z przypadkami obróbki 2 i 5. Należy jednak zauważyć, że brak ruchu obrotowego, w przypadku obróbki powierzchni obrotowych spowoduje powstanie zdecydowanie większych asymetrii powierzchni w porównaniu z pozostałymi sposobami obróbki,
- należy sądzić, że optymalnym sposobem obróbki powierzchni obrotowych jest sposób obróbki przy założeniu, że przedmiot obrabiany (PO) wiruje z zadaną prędkością obrotową i wykonuje drgania zgodne z kierunkiem posuwu elektrody roboczej ER.

Wydajność obróbki ECM powierzchni obrotowych jest ważnym wskaźnikiem użytkowym obróbki. Na rysunku 6.16 przedstawiono graficznie wydajność obróbki ECM w zadanym czasie obróbki dla wszystkich opisanych w pracy sposobów obróbki.



Rys. 6.16. Wydajności wybranych sposobów obróbki ECM powierzchni obrotowych

Wydajność obróbki określono jako objętość usuniętego materiału w zadanym czasie obróbki. Oznacza to, że tak rozumiana wydajność obróbki określa zależność:

$$W_{obr} = \frac{V}{t} [\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.2)$$

Ograniczając analizę wydajności obróbki do porównania wybranych sposobów obróbki tych samych powierzchni obrotowych (powierzchni w kształcie czaszy kulistej) zaproponowanych w pracy można zauważyć, że przy tych samych parametrach obróbki największą wydajność osiąga się sposobem drugim, tj. gdy wiruje przedmiot obrabiany (PO), a elektroda robocza (ER) wykonuje ruch posuwowy. Minimalna wydajność obróbki ma miejsce, gdy przedmiot obrabiany (PO) wykonuje ruch drgający, a elektroda robocza (ER) wykonuje ruch posuwowy. Wprowadzenie drgań powoduje dynamicznie zmieniającą się grubość szczeliny, co jest powodem istotnych zmian gęstości prądu. Zmiany wartości gęstości prądu przy różnych grubościach szczeliny (SM) w zadanym czasie obróbki są powodem cyklicznie zmieniającego się roztwarzania powierzchni przedmiotu obrabianego (PO), może to być przyczyną niskiej wydajności procesu ECM.

6.7. ANALIZA NUMERYCZNA WPLYWU PARAMETRÓW DYSKRETYZACJI SZCZELINY MIĘDZYELEKTRODOWEJ ORAZ CZASU OBRÓBK

Analizę numeryczną wpływu parametrów dyskretyzacji szczeliny międzyelektrodowej (SM) oraz czasu przeprowadzono na podstawie analizy obróbki elektrochemicznej ECM powierzchni w kształcie czaszy kulistej przyjmując, że przedmiot obrabiany (PO) (anoda) obraca się z zadaną prędkością obrotową n a elektroda robocza ER (kатода) wykonuje ruch posuwowy wgłębny z zadaną prędkością $v_f = \text{const}$.

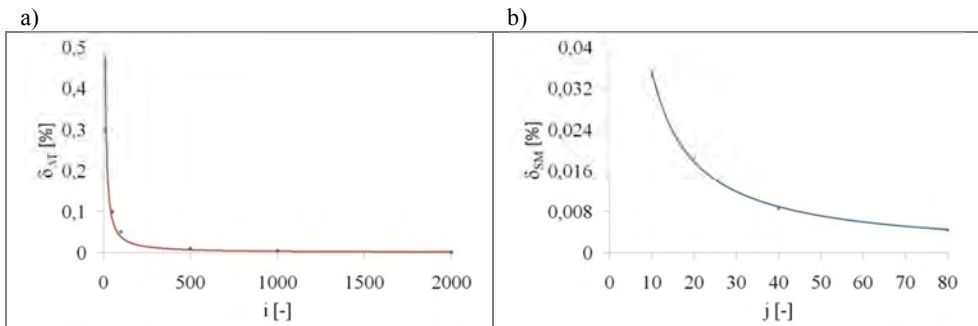
Dla oceny dokładności dyskretyzacji szczeliny (SM) i czasu t oszacowano odpowiednio średni błąd względny grubości roztwarzanej warstwy materiału przedmiotu obrabianego (PO) $\delta_{\Delta t}$ i δ_{SM} :

$$\delta_{\Delta t \max} = \left| \frac{\Delta Z_m^{i=10} - \Delta Z_m^{i=10000}}{\Delta Z_m^{i=10000}} \right|_{\max} \cdot 100\%, \quad (6.3)$$

$$\delta_{SM} = \left| \frac{\Delta Z_m^{j=10} - \Delta Z_m^{j=100}}{\Delta Z_m^{j=100}} \right|_{\max} \cdot 100\% \quad (6.4)$$

Obliczenia przeprowadzono, wykorzystując dane przedstawione w rozdziale 6 pracy. Niech prędkość obrotowa anody PO wynosi $n = 800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$.

Na rysunku 6.17 przedstawiono rozkłady błędów względnych: $\delta_{\Delta t}$ – wpływu dyskretyzacji czasu całkowitego obróbki ECM t oraz δ_{SM} – wpływu dyskretyzacji grubości szczeliny międzyelektrodowej (SM) na grubość roztwarzanej warstwy materiału przedmiotu obrabianego (PO), (zdejmowany poprzez roztwarzanie elektrochemiczne naddatek).



Rys. 6.17. Wpływ a) dyskretyzacji czasu całkowitego obróbki ECM t b) dyskretyzacji grubości szczeliny międzyelektrodowej SM na wartości grubości szczeliny międzyelektrodowej SM h po obróbce,

Z przedstawionych wykresów wynika, że zdefiniowany powyżej błąd względny dyskretyzacji czasu $\delta_{\Delta t}$ oraz dyskretyzacji grubości szczeliny międzyelektrodowej (SM) asymptotycznie zmierza do minimum.

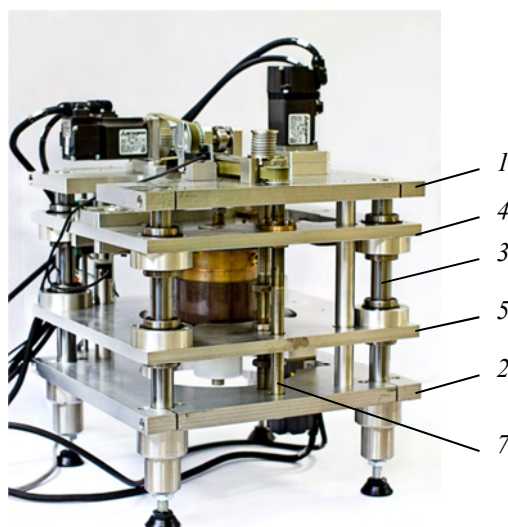
Oznacza to, że wystarczająca dokładność symulacji możliwa jest przy dyskretyzacji czasu obróbki rzędu $i = 200$. Z wartości błędu dyskretyzacji grubości szczeliny (SM) należy wnosić, że zadawalającą dokładność symulacji uzyska się zakładając podział wysokości szczeliny (SM) już na 20 węzłów siatki numerycznej ($j = 20$).

Przedstawione w rozdziale 6 wyniki analizy dyskretyzacji czasu obróbki i wysokości szczeliny (SM) są zbliżone jakościowo i ilościowo dla pozostałych wariantów powierzchni wyznaczających szczelinę międzyelektrodową (SM).

7. BADANIA DOŚWIADCZALNE

7.1. WPROWADZENIE I CEL BADAŃ

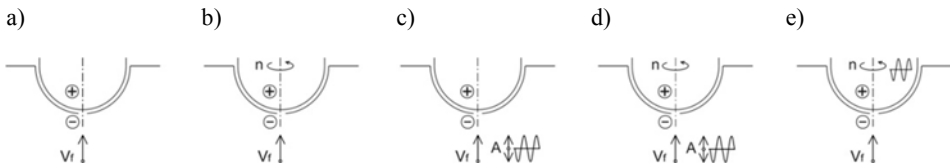
Weryfikacja uzyskanych na drodze teoretycznej wyników symulacji komputerowych obróbki elektrochemicznej powierzchni obrotowych możliwa jest jedynie doświadczalnie, bądź to przez wykorzystanie dostępnej obrabiarki elektrochemicznej i stosownego oprzyrządowania, bądź też na stanowisku badawczym, którego konstrukcja dostosowana jest do potrzeb danego eksperymentu. W ramach projektu badawczego nr N 503 022 32/3064 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego zrealizowanego przez zespół badawczy, którego współautorem jest autor niniejszej pracy zaprojektowano i skonstruowano oraz wykonano stanowisko badawcze umożliwiające badania doświadczalne w zakresie obróbki elektrochemicznej kształtowej powierzchni obrotowych (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze umożliwia realizację eksperymentów ECM odpowiednio do przeprowadzonych symulacji komputerowych obróbki ECM powierzchni obrotowych dla przypadków gdy (rys.7.2):

- a) katoda (ER) wykonuje ruch posuwowy wglębny, anoda (PO) jest nieruchoma,
- b) katoda (ER) wykonuje ruch posuwowy wglębny, anoda (PO) wiruje ze stałą prędkością obrotową,
- c) katoda (ER) wykonuje ruch posuwowy wglębny, anoda (PO) ruch drgający,
- d) katoda (ER) wykonuje ruch posuwowy wglębny, anoda (PO) wiruje i wykonuje ruch drgający,
- e) katoda (ER) wykonuje ruch posuwowy wglębny, anoda (PO) wykonuje drgania skrętne.



Rys. 7.2. Kinematyka ruchu powierzchni obrotowych

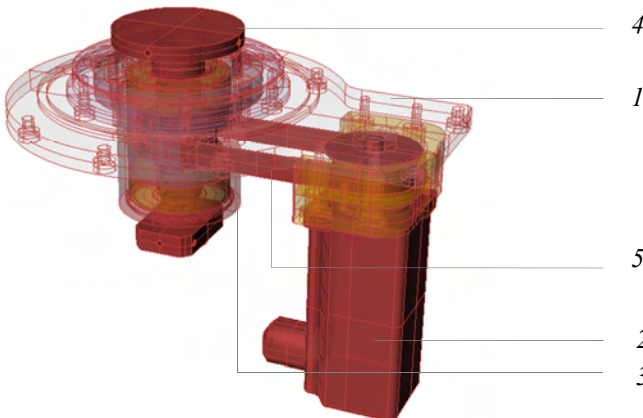
Celem badań doświadczalnych jest weryfikacja eksperymentalna wybranego spośród przeprowadzonych symulacji komputerowych wariantu obróbki ECM, odpowiadającego symulacji komputerowej obróbki anodą (PO) wirującą zadaną prędkością obrotową n oraz drgającą ruchem harmonicznym o zadanej amplitudzie A i częstotliwości drgań ω (częstotliwości drgań f) zgodnie z ruchem posuwowym (ER). Taki wariant obróbki ECM jest obróbką o złożonym ruchu przedmiotu obrabianego (PO).

7.2. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

Stanowisko badawcze jest konstrukcją składającą się z kilku podstawowych zespołów (rys. 7.1).

Zasadniczym zespołem stanowiska jest jego korpus. Korpus stanowi zespół składający się z dwóch płyt nieruchomych 1 i 2, oraz dwóch płyt ruchomych 4 i 5. Płyty połączone są ze sobą za pomocą czterech słupów prowadzących 3. Płyty ruchome wyposażone są w liniowe łożyska typu LM20UU. Płyty ruchome stanowią platformę do zamocowania elektrod. W korpusie zamocowano odpowiednio układy napędowe umożliwiające ruch elektrod (anody i katody).

Dla realizacji obróbki ECM powierzchni obrotowych z wirującą i drgającą anodą (PO) zastosowano układ przedstawiony na rysunkach 7.3 i 7.4.

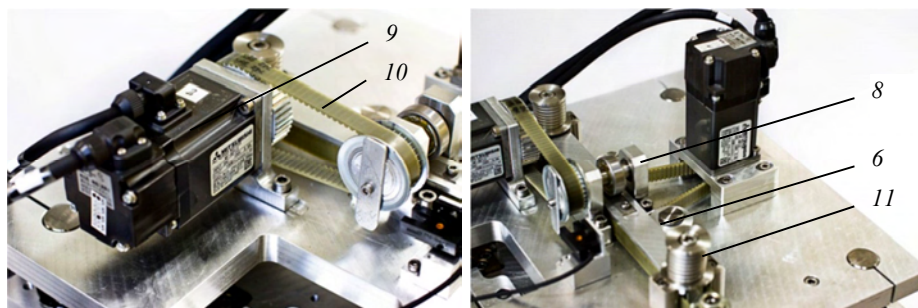


Rys. 7.3. Zespół wywołujący ruch obrotowy przedmiotu obrabianego PO

Ruch obrotowy anody (PO) umożliwia układ napędowy wrzeciona elektrody obrotowej, który składa się z płyty bazowej 1, do której zamocowano serwo-silnik 2 oraz

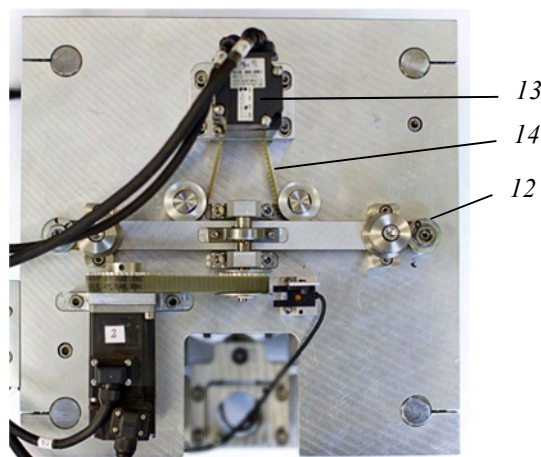
tuleję 3. W tulei 3 osadzono poprzez łożyska toczne wrzeciono 4 napędzane przekładnią pasową 5 (rys. 7.3).

Zespół napędowy wywołujący drgania przedmiotu obrabianego (PO) zgodnie z kierunkiem posuwu głównego (rys. 7.4) składa się z płyty ruchomej 5, osadzonej na słupach prowadzących za pomocą tulei tocznych (rys. 7.1). Płyta ruchoma połączona jest z belką 6 za pomocą popychaczy 7. Belka 6 styka się z symetryczną krzywką (mimośrodkowym elementem konstrukcyjnym) 8 napędzaną serwo-silnikiem 9 za pomocą przekładni pasowej zębatej 10. Sprężyny 11 zapewniają stały docisk belki 6 do krzywki. Ruch obrotowy symetrycznej krzywki wywołuje ruch drgający płyty ruchomej 5.



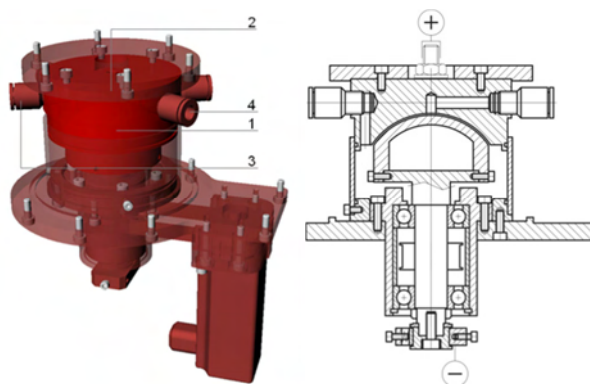
Rys. 7.4. Zespół wywołujący drgania przedmiotu obrabianego (PO) zgodnie z kierunkiem posuwu głównego

Zespół napędowy posuwu głównego umożliwia ruch postępowy elektrody roboczej ER (rys. 7.5). Moduł składa się z płyty ruchomej 4 (rys. 7.1) prowadzonej się za pomocą tulei tocznych po słupach prowadzących. Do płyty ruchomej zamocowano nakrętki 12 sprzężone ze śrubami pociągowymi. Ruch płyty ruchomej 4 wywołany jest przez obrót śrub pociągowych napędzanych serwo-silnikiem 13 za pomocą przekładni pasowej zębatej 14.



Rys. 7.5. Zespół napędowy posuwu głównego

Podstawowym elementem wyposażenia stanowiska badawczego jest tzw. komórka obróbkowa (rys. 7.6).



Rys. 7.6. Komórka obróbkowa

Komórka obróbkowa jest zespołem składającym się z korpusu, w którym umocowane są elektrody: anoda (PO) z układem napędowym i katoda (ER). Elektrolit doprowadzony jest do komórki kanałem 3, natomiast odprowadzany kanałami 4. Po to aby zapewnić osiowosymetryczny przepływ elektrolitu, otwór zasilający umiejscowiono w osi symetrii powierzchni obrotowej – w elektrodzie roboczej ER. Komórkę obróbkową uszczelniono, wykorzystując typowe uszczelnienia typu o-ring. Połączenia elektryczne, tj. doprowadzenie do elektrod napięcia prądu stałego wykonano odpowiednio:

- dla elektrody roboczej ER (katody) – przewód elektryczny połączony bezpośrednio w osi symetrii elektrody (połączenie nierozłączne),
- dla przedmiotu obrabianego (PO) (anody) – przewód elektryczny połączony do szczepek ślizgacza.

Komórkę obróbkową stanowi tarcza bazująca wykonana z płyty Alcoa, do której umocowano silnik z przekładnią pasową oraz tuleję z ułożyskowanym wrzecionem elektrody (anody) – rysunek 7.7a. Tuleję wykonano z tworzywa sztucznego nieprzewodzącego prądu elektrycznego z uwagi na sposób zasilania elektrody. Napięcie elektryczne doprowadzone jest do elektrody (anody) poprzez wrzeciono.

a)



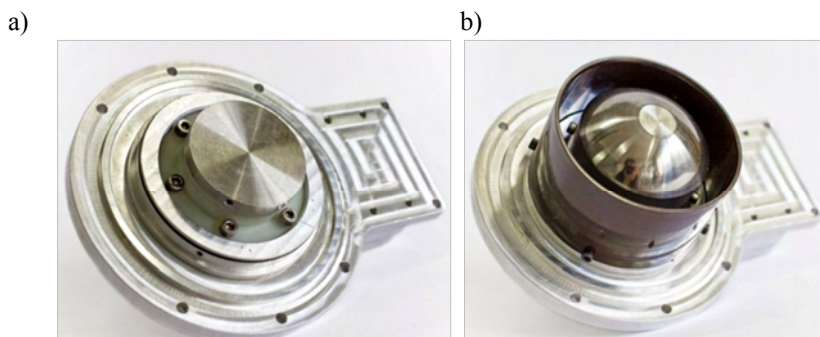
b)



Rys. 7.7. Elementy komórki obróbkowej

Istotnymi elementami komórki obróbkowej są elektrody (anoda i katoda). Na rysunku 7.7b przedstawiono elektrodę roboczą (ER). Elektroda robocza jest elementem korpusu w którym zamocowana jest tuleja korpusowa. W elektrodzie roboczej ER znajdują się otwory, którymi doprowadzany i odprowadzany jest elektrolit ze strefy obróbki.

Na rysunku 7.8a przedstawiono odizolowane elektrycznie wrzeciono elektrody za pomocą elementów wykonanych z tworzywa sztucznego. Rysunek 7.8b przedstawia tuleję korpusową zamocowaną na wrzecionie elektrody (PO).



Rys. 7.8. Elementy komórki obróbkowej a) wrzeciono elektrody zamocowane do tarczy bazującej, b) przedmiot obrabiany z zamocowaną do tarczy bazującej tuleją korpusową

Po złożeniu elementów komórki obróbkowej, tj. po zamocowaniu na wrzecionie przedmiotu obrabianego (PO), na tarczy bazującej tulei korpusowej, a następnie elektrody roboczej ER otrzymuje się hermetycznie zamkniętą komórkę obróbkową przygotowaną do badań (rys. 7.9).



Rys. 7.9. Komórka obróbkowa po złożeniu

Stanowisko badawcze (rys. 7.1), aby mogło spełniać funkcję laboratoryjnej obrabiarzki elektrochemicznej wymaga uzupełnienia o następujące urządzenia dodatkowe:

- zasilacz prądu stałego,
- agregat hydrauliczny sterujący przepływem elektrolitu,
- system kontroli parametrów procesu.

Zasilacz prądu stałego jest urządzeniem tyrystorowym prądu stałego firmy Elkor 30V/500A (rys. 7.10). Zaletą zasilacza firmy Elkor jest możliwość płynnej nastawy

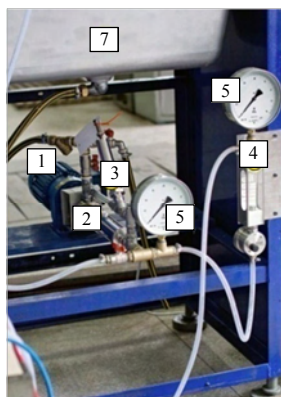
napięcia roboczego w zakresie 0÷30 V oraz maksymalnego prądu roboczego w zakresie 0÷500 A.



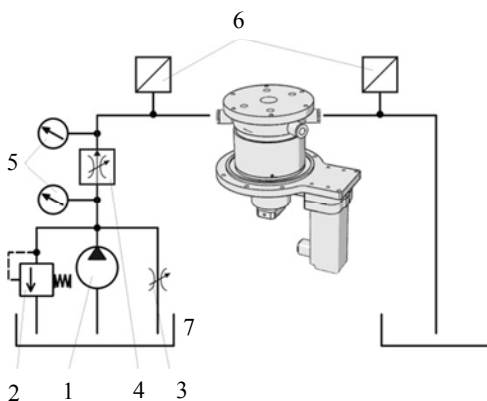
Rys. 7.10. Zasilacz prądu stałego firmy Elkor

Zastosowany agregat hydrauliczny składa się z pompy hydraulicznej śrubowej (pompa wyporowa typ JP-7115 2) 1, zaworu bezpieczeństwa 2, dławika 3, regulatora stałego natężenia przepływu (VLK-3KA-D 4) 4 oraz zbiornika bezciśnieniowego wypełnionego elektrolitem (pojemność – 80 l) 7 (rys. 7.11).

a)



b)

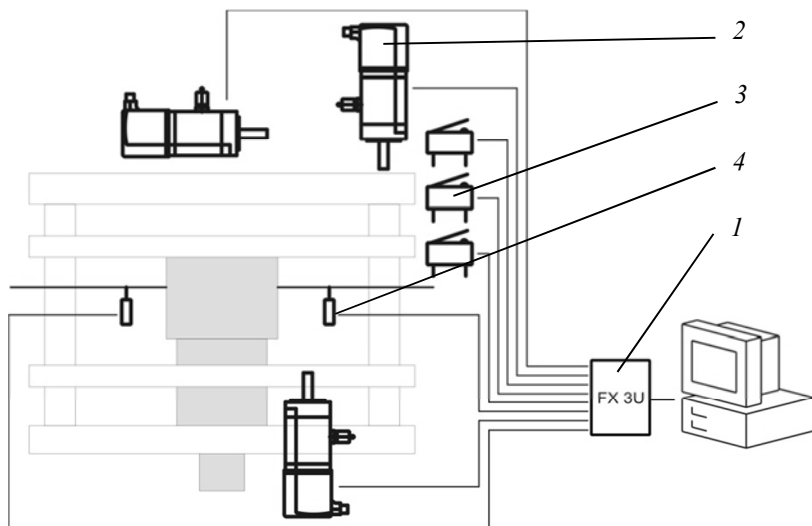


Rys. 7.11. Układ hydrauliczny zasilania komórki obróbkowej elektrolitem: a) widok agregatu hydraulicznego, b) schemat hydrauliczny agregatu

Zastosowanie w agregacie hydraulicznym regulatora stałego natężenia przepływu umożliwia uzyskanie stałej wartości natężenia objętościowego przepływu elektrolitu (strumienia objętości) $Q = \text{const}$ niezależnie od obciążenia odbiornika, jakim jest komórka obróbkowa [192]. Zadaniem wbudowanego w układ hydrauliczny agregatu dławika jest ograniczenie natężenia objętościowego przepływu na wejściu do regulatora przepływu, a tym samym do komórki obróbkowej. W układzie hydraulicznym zasilania komórki obróbkowej elektrolitem wbudowano czujniki ciśnienia 6 pozwalające na rejestrację ciśnienia panującego przed i za komórką obróbkową. Dodatkowo układ hydroau-

liczny wyposażono w manometry zegarowe 5 przed i za regulatorem stałego natężenia przepływu. Układ hydrauliczny zapewnia ciśnienie tłoczenia elektrolitu w zakresie od 0,1 do 1,2 MPa, natężenie objętościowe przepływu od 1 do 10 l · min⁻¹.

System kontroli parametrów procesu oparto na sterowniku Mitsubishi FX 3U oraz komputerze klasy PC. Na rysunku 7.12 przedstawiono schemat ideowy systemu sterowania i kontroli parametrów obróbki.



Rys. 7.12. System sterowania i kontroli parametrów procesu: 1 – sterownik, 2 – silnik prądu stałego, 3 – łącznik krańcowy, 4 – czujnik ciśnienia elektrolitu

Zastosowane serwonapędy Mitsubishi umożliwiają pracę w dwóch trybach:

- ze stałą prędkością posuwową,
- ze stałym obciążeniem.

Oba tryby pracy mają zastosowanie w obróbce elektrochemicznej.

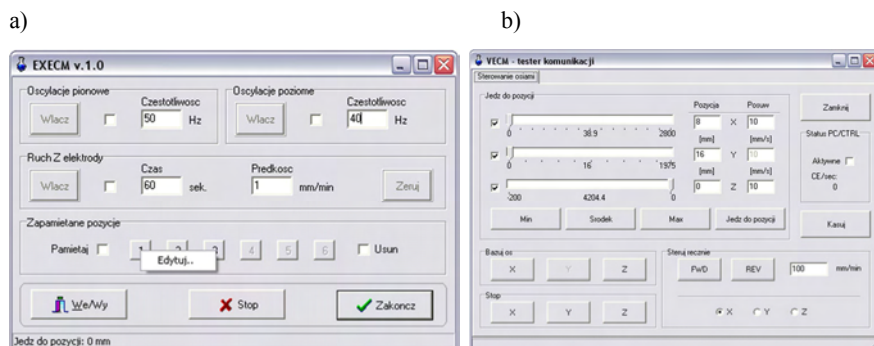
Sterowanie parametrami procesu zrealizowano za pomocą programu obsługi sterownika Mitsubishi FX 3U dostosowanego dla potrzeb stanowiska badawczego – komputera klasy PC.

Za pomocą opracowanego programu można realizować założone ruchy odpowiednich zespołów stanowiska badawczego (rys. 7.13a).

Są to:

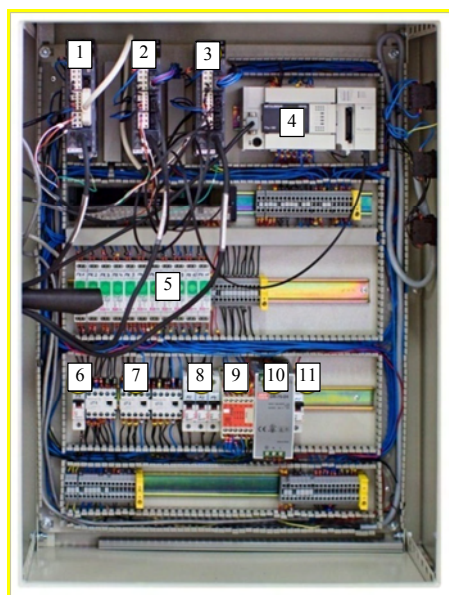
- bazowanie silników (przycisk Zeruj),
- zadanie wartości oraz wywołanie ruchu posuwu głównej elektrody roboczej ER (katody),
- zadanie wartości oraz wywołanie drgań zgodnych z posuwem głównym przedmiotu obrabianego (PO) (anody),
- zadanie wartości prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego (PO), (katody),
- możliwość edytowania i zapamiętania sześciu położeń silników,
- możliwość testowania komunikacji między komputerem PC a serwo-silnikami (przycisk We/Wy).

Wygląd testera komunikacji przedstawiono na rysunku 7.13b. Program utworzono w celu poszerzenia możliwości testowania dokładności geometrycznej i kinematycznej stanowiska.



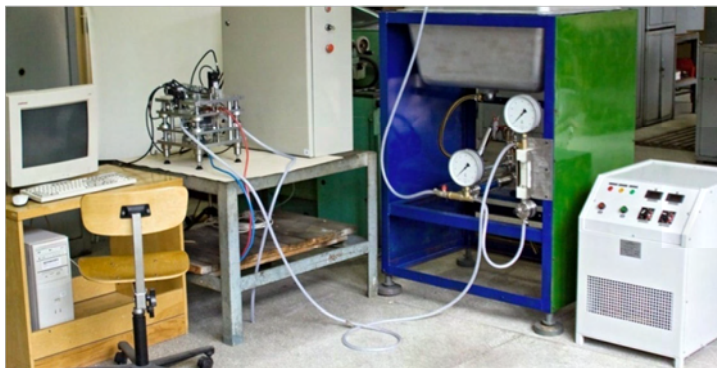
Rys. 7.13. Program obsługi stanowiska badawczego: a) program EXECM do sterowania serwo-silnikami, b) program VECM do testowania komunikacji z serwo-silnikami

Sterownik FX 3U wraz z niezbędnymi elementami sterującymi oraz zabezpieczającymi układ zabudowano w szafie sterowniczej (rys. 7.14).



Rys. 7.14. Szafa sterownicza systemu sterowania i kontroli parametrów procesu: 1, 2, 3 – serwa dla poszczególnych osi, 4 – sterownik Mitsubishi FX 3U wraz z modulem we/wy FX 3U-232-BD, 5 – przekaźniki VS 116K dla układu we/wy, 7 – styczniki, 8 – bezpieczniki przeciążeniowe osi, 9 – przekaźnik bezpieczeństwa, 10 – zasilacz 24V DR 75-24, 11 – zabezpieczenie zasilacza.

Na rysunku 7.15 przedstawiono przygotowane do badań eksperymentalnych kompletne stanowisko badawcze z układami zasilania oraz sterowania.

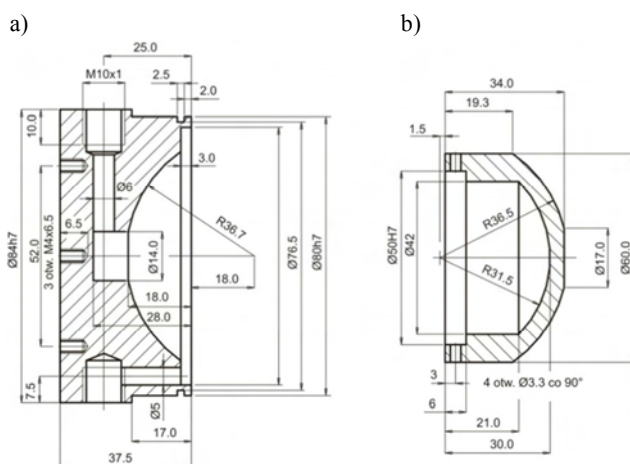


Rys. 7.15. Stanowisko badawcze wraz z układami sterowania i zasilania

Stanowisko badawcze zostało poddane identyfikacji dynamicznej metodą opartą na badaniu charakterystyk ruchu układu. Wyniki badań przedstawiono w raporcie końcowym opracowanym w ramach realizacji projektu badawczego nr N 503 022 32/3064 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

7.3. CECHY GEOMETRYCZNE I MATERIAŁOWE ELEKTRODY ROBOCZEJ I PRZEDMIOTU OBRABIANEGO

Cechy geometryczne próbek (przedmiotu obrabianego (PO) i elektrody roboczej (ER)) przedstawiono na rysunku 7.16. Próbki (przedmiot obrabiany (PO) i elektrodę roboczą (ER)) wykonano na tokarce sterowanej numerycznie według zadanego programu.



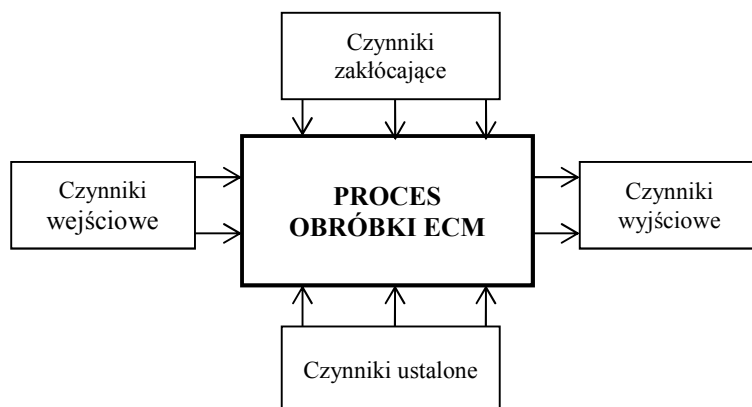
Rys. 7.16. Cechy geometryczne próbek: a) dla elektrody roboczej ER, b) dla przedmiotu obrabianego (PO)

Próbki do obróbki elektrochemicznej wykonane zostały ze stali stopowej narzędziowej do pracy na gorąco o symbolu 2312. Próbki ulepszono cieplnie do twardości 32 HRC (wg PN-76/H-84030). Wybór stali stopowej narzędziowej do pracy na gorąco o symbolu 2312 można uzasadnić jej szerokim zastosowaniem na matryce obrabiane elektrochemicznie.

7.4. BADANIA WERYFIKACYJNE

Dokładność wykonania wymiaru i kształtu, a także uzyskanie powierzchni o określonej jakości warstwy wierzchniej to w istocie kryteria technicznej oceny procesu obróbki elektrochemicznej. Wydajność obróbki, wpływająca na koszt wytwarzania stanowi kryterium ekonomiczne, a jakość użyteczna powierzchni obrabianej kryterium konstrukcyjne, które zależy nie tylko od dokładności wykonania wymiaru i kształtu, ale również od jakości warstwy wierzchniej.

Proces obróbki elektrochemicznej jako proces wytwórczy (technologiczny) w podrozdziale 2.3 przedstawiono za pomocą cybernetycznego modelu badań. Uproszczony schemat blokowy procesu obróbki elektrochemicznej przedstawiono na rysunku 7.17.



Rys. 7.17. Schemat blokowy procesu obróbki ECM

Przestrzeń wejść, przebiegów i wyjść szczegółowo opisano w podrozdziale 2.3. Należy podkreślić, że cechy fizyczne procesu obróbki ECM, ich wzajemne powiązania sprawiają, że obróbka elektrochemiczna należy do bardzo złożonych układów sterowania.

Badania weryfikacyjne procesu obróbki ECM wykonane w ramach badań własnych przeprowadzono dla przypadku obróbki elektrochemicznej kształtowej elektrodą wirującą z zadaną prędkością obrotową n i drgającą ruchem harmonicznym o zadanej amplitudzie A oraz częstości drgań ω zgodnie z ruchem posuwowym v_f . Uwagę skierowano na badania weryfikujące wariant obróbki ECM o złożonym ruchu przedmiotu obrabianego (PO) i elektrody roboczej (ER).

Jako czynniki stałe w badaniach weryfikacyjnych przyjęto:

- napięcie międzyelektrodowe 15 V
- rodzaj elektrolitu NaNO_3 15%
- temperatura elektrolitu 293 K
- zasilanie SM przy $Q = \text{const.}$ $Q = 3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, $p_z = 0,1 \text{ MPa}$
- grubość początkowa szczeliny (SM) 0,2 mm

Do badanych czynników zmiennych zakwalifikowano:

- częstości ω (częstotliwości f) drgań przedmiotu obrabianego (PO) zgodnie z kierunkiem posuwu głównego,
- prędkości obrotowe przedmiotu obrabianego (PO) n .

Przyjęte do badań weryfikacyjnych wartości tych parametrów przedstawiono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Wartości parametrów ω , f i n

Próba	Drgania PO zgodne z kierunkiem posuwu głównego ER			Obroty PO
	A [mm]	ω [s^{-1}]	f [Hz]	n [obr $\cdot$ min^{-1}]
I	0,1	188,196	30,0	800,0
II	0,1	376,991	60,0	1600,0

Do czynników zakłócających proces ECM można zaliczyć np.:

- zmiany właściwości elektrolitu w czasie obróbki,
- indukowane pola magnetyczne itp.

Czynniki wyjściowe stanowiące przestrzeń wyjść to:

- rzeczywisty kształt przedmiotu obrabianego (jego makro – i mikrogeometria powierzchni),
- stan warstwy wierzchniej (ilościowa superpozycja cech charakteryzująca stan powierzchni i strefy przypowierzchniowej),
- wydajność obróbki,
- energochłonność obróbki (zużycie energii elektrycznej w procesie kształtowania elektrochemicznego powierzchni).

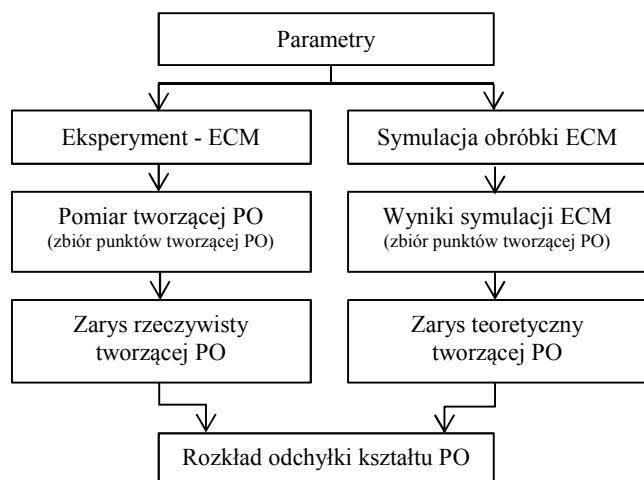
Należy podkreślić, że na dokładność obróbki ECM mają wpływ także inne parametry, takie jak, np. napięcie robocze U , szybkość posuwowa ER v_f natężenie objęściowe elektrolitu Q , a tym samym ciśnienie elektrolitu na wlocie i wylocie ze szczeliny międzyelektrodowej (SM) p_w , p_z , wydajność prądowa wydzielania się wodoru, a także długość szczeliny międzyelektrodowej x . Z uwagi jednak na charakter pracy, jej główny cel tj. opracowanie modelu matematycznego procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych, badania eksperymentalne ograniczono do analizy wpływu częstości drgań elektrody oraz jej prędkości obrotowej na rzeczywisty kształt przedmiotu obrabianego (PO) po obróbce.

Obróbkę elektrochemiczną prowadzono w roztworze wodnym azotanu sodu (NaNO_3) o stężeniu 15%. Wybór takiego elektrolitu wynika z szerokiego zastosowania tego czynnika w obróbce elektrochemicznej. Pomiary profili elektrod roboczych (ER) oraz

przedmiotu obrabianego (PO) po obróbce wykonano metodą skaningu punkowego na współrzędnościowej maszynie pomiarowej MISTRAL 070705 z głowicą PH10M.

Badania weryfikacyjne polegały na porównaniu kształtu przedmiotu obrabianego (PO) zmierzzonego po obróbce elektrochemicznej kształtową elektrodą wirującą z zadaną prędkością obrotową n i drgającą ruchem harmonicznym o zadanej amplitudzie A oraz częstości drgań ω zgodnie z ruchem posuwowym v_f w zadanym czasie obróbki z wynikami symulacji komputerowej przy takich samych parametrach obróbki.

Na rysunku 7.18 przedstawiono schemat blokowy badań weryfikacyjnych.



Rys. 7.18. Schemat blokowy badań weryfikacyjnych procesu ECM

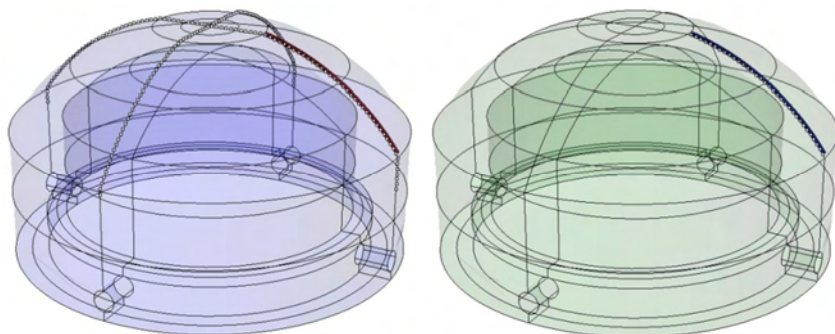
Na maszynie pomiarowej MISTRAL 070705 z głowicą PH10M rejestrowano punkty z ustalonym na drodze pomiarowej krokiem równym 0,1 mm. Pomiaru wykonano w dwóch wzajemnie prostopadłych przekrojach próbki.

W ten sposób otrzymano zbiór punktów, które wykorzystano do utworzenia krzywej będącej odzwierciedleniem tworzącej powierzchni przedmiotu obrabianego (PO) po obróbce (powierzchni rzeczywistej PO). Powierzchnię teoretyczną przedmiotu obrabianego (PO) otrzymano z punktów obliczonych w wyniku symulacji komputerowej procesu ECM.

Na rysunku 7.19 na tle punktów przedstawiono tworzące powierzchni uzyskane w wyniku obróbki i w wyniku symulacji komputerowej.

Dla oceny dokładności zastosowanego modelu matematycznego obróbki elektrochemicznej kształtowej przyjęto następujące kryteria:

- δ – rozkład odchyłki kształtu PO obliczony na podstawie symulacji komputerowej procesu (symulacji teoretycznej) i rozkład odchyłki kształtu PO otrzymany po obróbce ECM,
- δ_{max} – odchyłkę maksymalną.



Rys. 7.19. Tworzące powierzchni przedmiotu obrabianego (PO): a) po obróbce ECM, b) w wyniku symulacji komputerowej

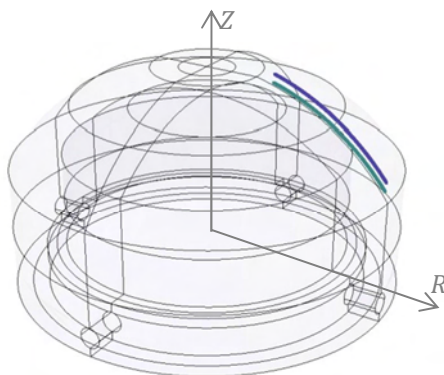
Na podstawie rozkładu odchyłki kształtu δ , dla każdej próbki wyznaczono odchylenie standardowe odchyłki kształtu δ określone formułą:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}{n-1}} \quad (7.1)$$

gdzie:

- δ_i – kolejne wartości odchyłki kształtu,
- $\bar{\delta}$ – średnia arytmetyczna odchyłki kształtu w danej próbce,
- n – liczba elementów w próbce (punktów pomiarowych).

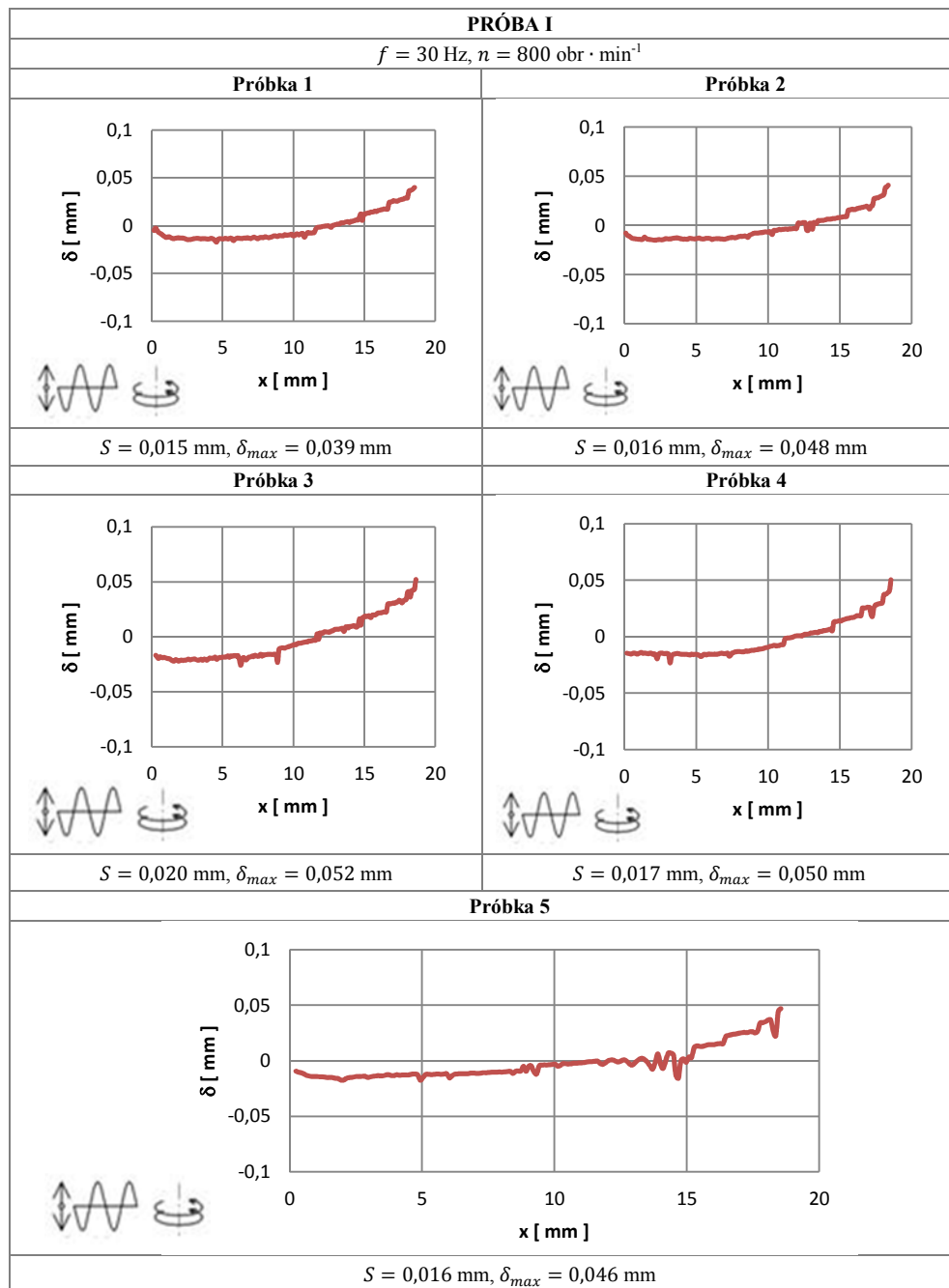
Na rysunku 7.20 przedstawiono przyjęty do analizy układ tworzących dla rozważanych próbek.



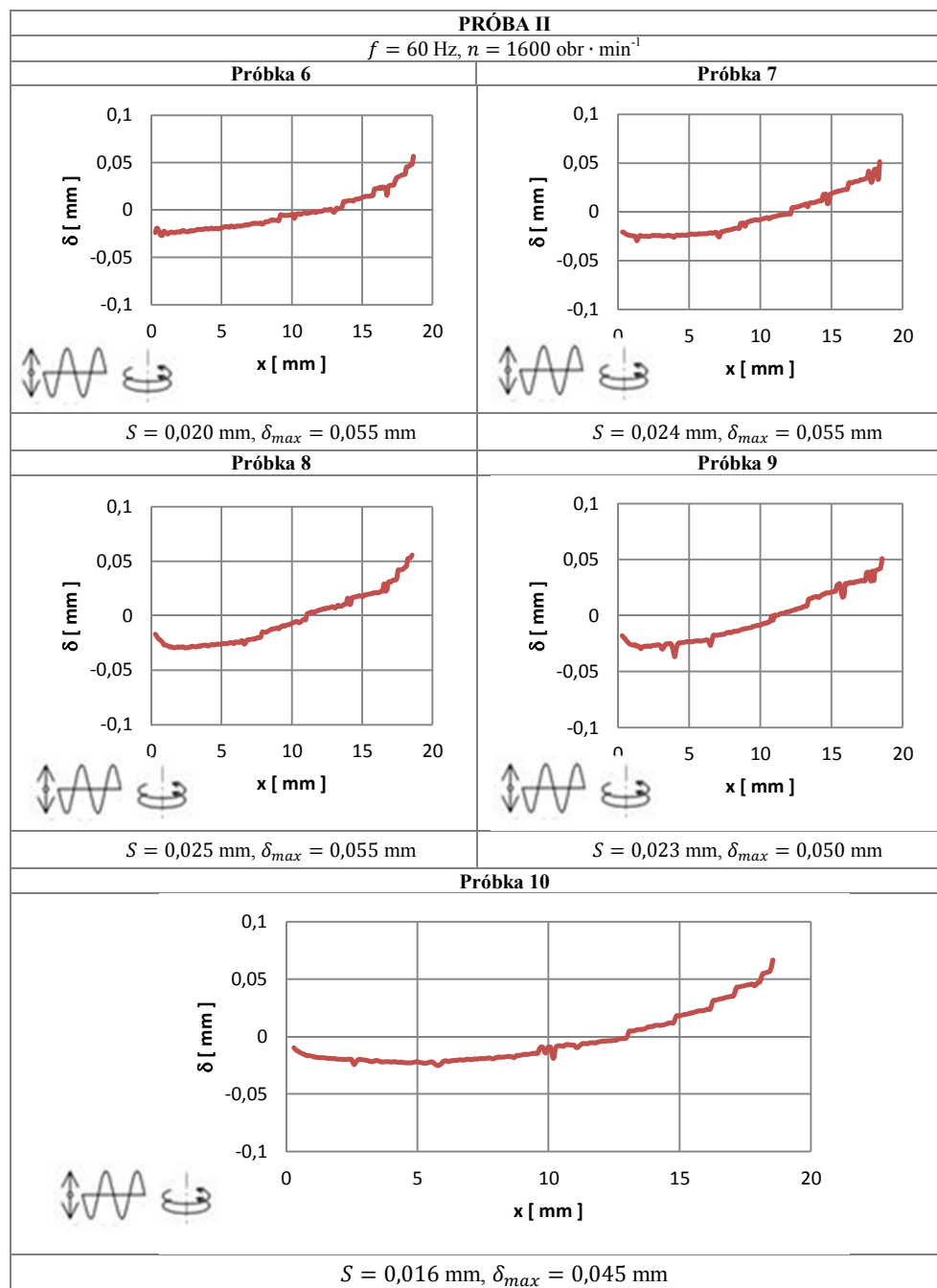
Rys. 7.20. Układ tworzących dla analizy rozkładu odchyłek kształtu

Otrzymane tworzące tak długo przesuwano wzajemnie do siebie wzdłuż osi Z, aż wartość odchylenia standardowego S osiągnęła wartość minimalną. Takie podejście pozwoliło wyznaczyć rozkład odchyłki kształtu δ mierzony wzdłuż normalnej do powierzchni PO względem kształtu otrzymanego z symulacji komputerowej obróbki ECM.

Na wykresach (rys. 7.21-7.22) przedstawiono rozkłady odchyłki kształtu δ (linia czerwona) wzdłuż długości tworzącej x oraz przyjęte do oceny kryteria dokładności.



Rys. 7.21. Rozkład odchyłki kształtu δ wzdłuż długości tworzącej x oraz kształt tworzącej elektrody roboczej (PRÓBA I)



Rys. 7.22. Rozkład odchyłki kształtu δ wzdłuż długości tworzącej x oraz kształt tworzącej elektrydy roboczej (PRÓBA II)

Badania weryfikacyjne przeprowadzono jak pokazano powyżej, wykonując dwie próby (PRÓBA I i PRÓBA II). Do każdej próby użyto pięć próbek (Próbka 1 ÷ Probka 5). Badania eksperymentalne wykonano wykorzystując elektrody (anodę i katodę) w kształcie czaszy kulistej (rys. 7.16), zakładając odpowiednio parametry stałe i zmienne stosownie do wykonanych w rozdziale 6 symulacji komputerowych. Weryfikacja wyników symulacji komputerowej obróbki ECM polegała na porównaniu kształtu przedmiotów obrabianych (PO) otrzymanych w wyniku obliczeń z wynikami obróbki ECM na stanowisku badawczym. Porównywano ze sobą tworzące dla powierzchni uzyskanej w wyniku symulacji i obróbki na stanowisku badawczym.

Łatwo zauważyć, że największe odchyłki wystąpiły zawsze pod koniec szczeliny (SM). Jest to wynikiem nagromadzenia tam dużej ilości gazu oraz produktów roztwarzania elektrochemicznego, co można tłumaczyć znaczną czynną powierzchnią obrabianą.

Przeprowadzane badania pozwoliły zauważyć, że dla mniejszych częstotliwości drgań ($f = 30$ Hz) uzyskano mniejsze wartości odchyłek kształtu w porównaniu z wyższymi częstotliwościami (w tym przypadku, gdy $f = 60$ Hz) (rys. 7.1 i 7.2). Oznacza to, że wraz ze wzrostem częstotliwości drgań odchyłki kształtu rosną, a dokładność badanego modelu analityczno-numerycznego pogarsza się. Należy jednak zauważyć, że ze wzrostem częstotliwości drgań elektrody, istotnego znaczenia nabierają zjawiska dynamiczne związane ze sztywnością stanowiska badawczego a także z samym przepływem mieszaniny elektrolitu i wodoru [46].

Badania dynamiczne stanowiska badawczego przeprowadzono realizując projekt badawczy nr N 503 022 32/3064 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w którym dokonano identyfikacji dynamicznej układu kinematycznego stanowiska dla rozpoznania charakteru rzeczywistych drgań elektrod wymuszanych układem krzywek napędzanych poprzez przekładnie pasowe. Badania wykonano w warunkach rzeczywistego obciążenia stanowiska, tj. podczas próby eksploatacyjnej. Dla zadanych wymuszeń drgań i prędkości obrotowych elektrody, dokonano identyfikacji drgań stanowiska badawczego za pomocą komputerowego analizatora diagnostycznego KSD 400 firmy PUP SENSOR. Przeprowadzona analiza potwierdziła poprawność układu kinematycznego stanowiska badawczego [130].

Na rysunku 7.23 przedstawiono fotografię powierzchni próbek z charakterystycznymi dla obróbki elektrochemicznej kształtowej śladami obróbki ECM oraz pojawiającymi się stanami krytycznymi SK. Występujące na powierzchni obrabianej próbki defekty są wynikiem sprzężenia pól hydrodynamicznych z procesami dyfuzji i roztwarzania elektrochemicznego w warstwie przyściennej przy anodzie, a także czasami efektem występowania przepływu krytycznego (tzw. struktury falowej na powierzchni anody). Zjawiska o których mowa, bardzo często powodują utratę przewodnictwa elektrycznego elektrolitu. Pojawiają się w szczelinie międzyelektrodowej (SM) nieprzewodzące pęcherze, warstwy parowo-gazowe bądź nieprzewodzące błonki tlenkowe. Wynikiem jest znaczące zmniejszenie grubości szczeliny międzyelektrodowej (SM), a tym samym groźba wyładowań iskrowych.

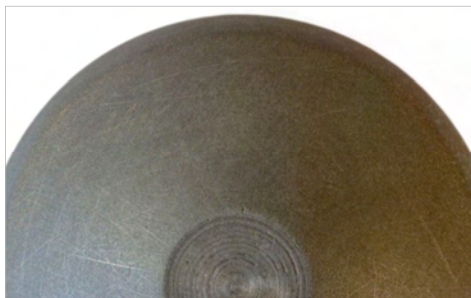


Rys. 7.23. Próbką z widocznymi śladami obróbki

Charakterystyczną przyczyną defektów powierzchniowych jest inne zjawisko, które może występować w szczelinie międzyelektrodowej (SM), zwłaszcza w obszarach występowania dużych prędkości przepływu elektrolitu, a mianowicie kawitacja. Na rysunku 7.24 przedstawiono próbkę, gdzie na wlocie do szczeliny międzyelektrodowej (SM) zaobserwowano defekty wywołane kawitacją. Zjawisko to związane jest między innymi z nierównomiernością warunków hydrodynamicznych w tym obszarze. W okolicach wlotu elektrolitu do szczeliny międzyelektrodowej (SM) występuje gwałtowna zmiana ciśnienia wynikająca z pojawienia się na wlocie pierścieniowej kurtynki o powierzchni $2\pi R_w h$ stanowiącej element dławiący. Należy zauważyć, że poza otoczeniem w pobliżu wlotu elektrolitu do szczeliny międzyelektrodowej (SM), pozostały fragment powierzchni przedmiotu obrabianego (PO) został obrobiony poprawnie. Po to aby uniknąć występowania dużych prędkości w pobliżu wlotu elektrolitu, do szczeliny międzyelektrodowej (SM) stosuje się zasilanie odwrotne, tj. doprowadzenie elektrolitu do obszaru obróbki obwodem zewnętrznym.



Rys. 7.24. Próbką z widocznymi śladami kawitacji



Rys. 7.25. Próbką I

Przedstawione na rysunkach 7.23 i 7.24 ślady (defekty) pojawiające się na powierzchni przedmiotu obrabianego (PO), występowały w fazie badań wstępnych na zaprojektowanym i wykonanym stanowisku badawczym.

Przykład próbki uzyskanej w badaniach weryfikujących model matematyczny obróbki ECM przedstawiono na rysunku 7.25.

8. PODSUMOWANIE

Praca jest próbą kompleksowego opracowania zagadnienia projektowania procesu obróbki elektrochemicznej kształtowych powierzchni obrotowych o dowolnym krzywo liniowym zarysie. Współczesne projektowanie technologii obróbki ECM części maszyn i narzędzi, z uwagi na cybernetyczny charakter procesu, wymaga zastosowania symulacji komputerowych obróbki.

Symulacje komputerowe można zrealizować opierając się na analizie i modelowaniu procesu obróbki ECM – w tym przypadku na podstawie analizy i modelowania procesu obróbki ECM powierzchni kształtowych obrotowych.

W pracy analiza teoretyczna obróbki elektrochemicznej kształtowej ECM w ogólności obejmowała następujące zagadnienia:

- analizę zmiany kształtu przedmiotu obrabianego (PO) w czasie,
- wyznaczenie kształtu końcowego przedmiotu obrabianego (PO),
- wyznaczenie geometrii elektrody roboczej dla uzyskaniażądanego kształtu przedmiotu obrabianego (PO),
- weryfikację doświadczalną procesu obróbki ECM, pozwalającą na analizę dokładności modelu matematycznego obróbki ECM.

Realizację powyższych zagadnień oparto na sformułowanym przez autora pracy uogólnionym quasi 3D modelu teoretycznym procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych. Wykorzystując dla ośrodka wielofazowego (elektrolit, gaz, produkty roztwarzania elektrochemicznego) podstawowe zasady zachowania: zasadę zachowania masy, pędu i energii sformułowano układ równań rządzący ruchem ośrodka w szczelinie międzyelektrodowej (SM). Podkreślając trudności związane z rozwiązaniem zaproponowanych równań dokonano uproszczeń wynikających z poczynionych założeń, formułując dla celów analizy i modelowania równania opisujące przepływ ośrodka jako przepływ pseudohomofazowy, bezpoślizgowy. Tak określony układ równań stanowił podstawę do analizy procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych. Po wyznaczeniu współczynników Lame’go przedstawiono układy równań we współrzędnych krzywoliniowych dla przepływu laminarnego i turbulentnego w szczelinie międzyelektrodowej (SM). W obszarze przepływu laminarnego wyróżniono dwie klasy przepływów, wynikające z oszacowań charakterystycznych dla przepływów w wąskich szczelinach (tzw. cienkich warstwach), dla których sformułowano układy równań opisujące tego typu przepływy. Uśredniając równania masy, pędu i energii sformułowano równania ruchu turbulentnego ośrodka w szczelinie międzyelektrodowej (SM), które są podstawą analizy przepływu turbulentnego ośrodka (mieszaniny elektrolitu i wodoru). Dla określenia rozkładów prędkości i ciśnienia w obszarze przepływu laminarnego zastosowano metodę małego parametru, definiując mały parametr jako tzw. zmodyfikowaną liczbę Reynoldsa. Linearyzując równania ruchu ośrodka w SM, otrzymano rozwiązania charakterystyczne dla I i II klasy przepływów. Szczególnym rozwiązaniem w obszarze przepływu laminarnego jest rozwiązanie wynikające z tzw. przybliżenia zerowego I klasy przepływów – przybliżenie Reynoldsa. Przybliżenie Reynoldsa nie uwzględnia wpływu sił bezwładności przepływu na rozkłady prędkości i ciśnienia. W pracy przeprowadzono symulacje obróbki ECM, wykorzystując w celu zamodelowania przepływu laminarnego w szczelinie wyniki charakterystyczne dla I klasy przepływów (to rozwiązanie uwzględnia wpływ sił bezwładności przepływu wynikający zarówno z ruchu obrotowe-

go elektrody, jak i ruchu promieniowego ośrodka), II klasy przepływów (uwzględnia się wpływ odśrodkowych sił bezwładności przepływu) oraz wspomnianego przybliżenia Reynoldsa. W obszarze przepływu turbulentnego rozkłady prędkości i ciśnienia są wynikiem rozwiązania uproszczonego równania Reynoldsa.

W zależności od formy opisu przedmiotu obrabianego (PO) (rodzaju układu współrzędnych: nieruchomego, związanego z ER, związanego z PO, postaci opisu powierzchni: parametrycznie, w postaci jawnej, w postaci niejawnej) proces zmiany kształtu powierzchni obrabianej można przedstawić, formułując dziewięć różnych modeli równania ewolucji kształtu. W pracy analiza i modelowanie procesu obróbki ECM opiera się na wykorzystaniu postaci niejawnej równania ewolucji kształtu PO w układzie współrzędnych związanych z przedmiotem obrabianym (PO), (anodą). Równanie ewolucji kształtu w postaci jawnej rozwiązano metodą kolejnych przybliżeń, wykorzystując metodę tzw. kroków czasowych. Dla rozwiązania równania wynikającego z zasady zachowania energii, zastosowano metodę różnic skończonych dokonując dyskretyzacji różnicowej metodą Cranka-Nicholsona. Metodę tę cechuje dobra dokładność i stabilność schematu numerycznego.

Opracowano algorytmy obliczeń, na podstawie których zbudowano system obliczeniowy obróbki ECM powierzchni kształtowych obrotowych Sym_ECM/CAD 2.0, za pomocą którego przeprowadzono symulacje komputerowe procesu ECM. Analizie numerycznej poddano następujące przypadki obróbki ECM kształtowych powierzchni obrotowych:

- obróbka nieruchomej powierzchni obrotowej (PO) przy posuwie wglębnym elektrody roboczej (ER),
- obróbka wirującej powierzchni obrotowej (PO) przy posuwie wglębnym elektrody roboczej (ER),
- obróbka drgającej powierzchni obrotowej (PO) przy posuwie wglębnym elektrody roboczej (ER),
- obróbka wirującej i drgającej powierzchni obrotowej (PO) przy posuwie wglębnym elektrody roboczej (ER),
- obróbka drgającej skrętnie powierzchni obrotowej (PO) przy posuwie wglębnym elektrody roboczej (ER).

Przeprowadzone symulacje pozwalają otrzymać niezbędne informacje o przebiegu procesu obróbki, a w szczególności dane o parametrach fizycznych procesu. Otrzymane z symulacji komputerowej parametry fizyczne i geometryczne to:

- rozkład ciśnienia wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej,
- rozkłady prędkości przepływu wzdłuż i w poprzek szczeliny międzyelektrodowej,
- rozkład temperatury wzdłuż i w poprzek szczeliny międzyelektrodowej,
- rozkład koncentracji objętościowej fazy gazowej wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej,
- rozkład gęstości prądu wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej,
- rozkład grubości szczeliny (SM) wzdłuż długości szczeliny międzyelektrodowej.

Wnioski szczegółowe wynikające z przeprowadzonych symulacji przedstawiono w rozdziale 6.

Opierając się na tzw. zagadnieniu odwrotnym obróbki ECM zaproponowano algorytm projektowania elektrody roboczej. Projektowanie komputerowe ER pozwala wyznaczyć kształt elektrody roboczej dla zadanego zarysu powierzchni przedmiotu obrabianego (PO). Wynikiem modelowania i symulacji jest tablica wyników w postaci

współrzędnych nowo projektowanej elektrody roboczej w układzie globalnym. Przykładowe obliczenia kształtu elektrody roboczej (ER) po korekcy, przedstawiono dla trzech różnych powierzchni obrotowych: stożkowej, w kształcie czaszy kulistej oraz o zarysie krzywoliniowym na tle tworzącej elektrody roboczej (ER) przed korekcją, w podrozdziale 4.5.

Otrzymane wyniki symulacji dla wybranych przypadków obróbki ECM zweryfikowano doświadczalnie na zbudowanym stanowisku badawczym.

Z analizy i modelowania procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych, przeprowadzonych symulacji komputerowych różnych wariantów (sposobów obróbki i kształtów obrabianych powierzchni – patrz aneks), a także badań doświadczalnych można sformułować następujące wnioski o charakterze ogólnym:

- opracowane modele matematyczne umożliwiają symulację procesu ECM powierzchni obrotowych zarówno wtedy, gdy przepływ w szczelinie międzyelektrodowej (SM) ma charakter laminarny, jak i turbulentny,
- opracowane modele matematyczne umożliwiają pełną analizę wpływu drgań zgodnych z ruchem posuwowym elektrody roboczej ER jak również drgań wynikających z ruchu skrętnego przedmiotu obrabianego (PO) na proces ECM,
- opracowane modele matematyczne pozwalają na badanie wpływu ruchu obrotowego przedmiotu obrabianego (PO) na proces obróbki ECM,
- opracowane modele matematyczne umożliwiają przeprowadzenie symulacji obróbki ECM w warunkach złożonego ruchu elektrod (ruch obrotowy PO i drgający zgodnie z ruchem posuwowym ER),
- opracowane modele matematyczne pozwalają, dzięki możliwości przeprowadzenia symulacji, na badanie procesu ECM między nieruchomymi powierzchniami obrotowymi,
- dla każdego wariantu obróbki istnieje możliwość projektowania elektrody roboczej ER,
- przeprowadzone badania weryfikacyjne dla przypadku obróbki elektrochemicznej kształtowej elektrodą wirującą zadaną prędkością obrotową n i drgającą ruchem harmonicznym o zadanej amplitudzie A oraz częstotliwości drgań ω zgodnie z ruchem posuwowym v_f , a więc dla przypadku obróbki o złożonym ruchu przedmiotu obrabianego (PO) i elektrody roboczej ER wykazały poprawność zaproponowanego do analizy modelu matematycznego. Należy podkreślić, że analiza poszczególnych przybliżeń rozwiązań w obszarze przepływu laminarnego potwierdziła wystarczającą dokładność modelu matematycznego opartego na tzw. II klasie przepływów,
- zbudowane stanowisko badawcze opisane w punkcie 7 pracy umożliwia dzięki komputerowemu systemowi sterowania pełną analizę doświadczalną w zakresie badań modelowych procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych.

Przeprowadzona analiza i modelowanie procesu obróbki, badania doświadczalne, uzyskane wyniki oraz zgromadzone doświadczenie pozwalają na sformułowanie wniosków do dalszych badań w prezentowanej problematyce:

- konieczne są badania doświadczalne, dla pełnego określenia struktury przepływu ośrodka wielofazowego w poprzek i wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM), zwłaszcza w otoczeniu wlotów do szczeliny i obszarów w pobliżu wylotów ze szczeliny (SM), (zastosowanie nowoczesnych metod wizualizacji tego typu przepływów w warunkach rzeczywistej obróbki ECM),
- na podstawie uzyskanej struktury przepływu wielofazowego, wybór optymalnego modelu matematycznego przepływu ośrodka wielofazowego, być może przepływu

z rozdzieleniem faz, dla uściślenia procesów fizycznych towarzyszących obróbce ECM,

- zastosowanie w procesie modelowania matematycznego zwłaszcza do analizy przepływów wielofazowych turbulentnych metod numerycznych, w tym np. metody elementów skończonych MES, metody objętości skończonych MOS, metody elementów brzegowych MEB, czy też metod bezsiatkowych MM,
- przeprowadzenie precyzyjnych badań doświadczalnych z monitoringiem parametrów hydraulicznych w szczelinie międzyelektrodowej (SM), dla wyznaczenia wartości współczynników strat hydrodynamicznych na wlocie i wylocie oraz strat spowodowanych tarciem w przepływie wielofazowym w warunkach rzeczywistych procesu obróbki ECM,
- rozszerzenie badań teoretycznych i doświadczalnych obróbki powierzchni obrotowych w warunkach braku symetrii obu powierzchni. Określenie błędów wynikających z braku wspólnej osi symetrii obu powierzchni (zagadnienie 3D),
- uwzględnienie w procesie modelowania obróbki ECM powierzchni o znacznych krzywiznach tzn. rezygnacja z metody linearyzacji rozkładu potencjału wzdłuż grubości szczeliny międzyelektrodowej (SM),
- rozszerzenie modelowania procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych niegładkich (powierzchni posiadających np. wypusty, wpusty, nieciągłości itp.),
- włączenie programu symulacji komputerowej procesu obróbki ECM do algorytmów sterowania adaptacyjnego obrabiarek elektrochemicznych.

9. LITERATURA

- [1] Aleksandrow M.W., Filipowicz W.G., 1976. O toczności elektrochemicznej obróbki detali w protocznym elektrolicie. Elektrochemическая Обработка, Труды Куйбышевского Авиационного Института Куйбышев.
- [2] Altma H., 2000. Precision ECM by process characteristic modeling. Ph.D. Thesis Glasgow Caledonian University.
- [3] Amatore C., Berthou M., Hebert S., 1998. Fundamental principles of electrochemical ohmic heating of solutions. J. of Electroanalytical Chemistry 457, 191-203.
- [4] Bannard J., 1977. Electrochemical machining-review. J. of Applied Electrochemistry 7, 1-21.
- [5] Bhattacharyya B., Malapati M., Munda J., Sarkar A., 2007. Influence of tool vibration on machining performance in electrochemical micro-machining of copper. Inter. J. of Machine Tools and Manufacture 47, 335-342.
- [6] Blue J.L., 1980. Efficient Calculation of Current Flow in Electroplating Cells. Bell Syst. Tech. 59(2), 49-62.
- [7] Bortels L., Purcar, M., Van den Bossche, B., Deconinck, J., 2004. A userfriendly simulation software tool for 3D ECM. J. of Materials Processing Technology 149(1-3), 486-492.
- [8] Budzyński A., Sroka S., 1982. Badania honowania elektrochemicznego jednokierunkowego wzdłużnego. Mat. EM-82, Bydgoszcz, 152-161.
- [9] Bullock J.S., Giles G., Gary L.J., 1990. Simulation of an Electrochemical Plating Process. Topics in BEM, ed. Brebbia CA 7 Berlin.
- [10] Chang C.S., Hourng, L.W., 2001. Two-dimensional two-phase numerical model for tool design in electrochemical machining. J. of Applied Electrochemistry 31(2), 145-154.
- [11] Chang C.S., Hourng, L.W., Chung, C.T., 1999. Tool design in electrochemical machining considering the effect of thermal-fluid properties. J. of Applied Electrochemistry 29 (3), 321-330.
- [12] Chin D.T., Mao K.W., 1974. Transpassive dissolution of mild steel in NaNO_3 electrolytes. J. of Applied Electrochemistry 4, 155-161.
- [13] Chin D.T., Wallace A.J., 1973. Anodic current efficiency and dimensional control in electrochemical machining. J. Electrochem. Soc. 120(11), 1487-1493.
- [14] Chrysosouris G., Wollowitz M., 1984. Electrochemical hole making. Annals CIRP. 33(1), 99-103.
- [15] Crichton I.M., McGeough J.A., 1984. Theoretical, experimental and computational aspects of the electrochemical arc machining process. Annals. CIRP 33(2), 42-431.
- [16] Datta M., Romankiv L.T., 1989. Application of chemical and electrochemical micromachining in the electronics industry. J. of Electrochem. Soc., 136(6), 285-292.
- [17] Davydov A., 1980. Ob izmerenijach potencjałow pri isledowanijach procesow elektrochemического растворения металлов с высокими плотностями тока. Электронная Обработка Материалов 3, 25-30.
- [18] Davydov A., Kozak J., 1990. Wysokoskorostnyje elektrochemичесkoje formoobrazowanie. Izdatielstwo Nauka Moskwa.
- [19] Dąbrowski L., 1989. Projektowanie elektrod roboczych do ECM w stanie ustalonym. Materiały Szkoły Naukowej Obróbek Erozyjnych, PAN KBM Warszawa, 93-102.

- [20] Dąbrowski L., 1992. Podstawy komputerowej symulacji kształtowania elektrochemicznego. *Prace Naukowe, Mechanika* 154, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej.
- [21] Dąbrowski L., Kozak J., 1981. Electrochemical Machining of Complex Shape Parts and Holes (Mathematical Modeling and Experiments). *Proc. 22th Mach. Tool Design and Research Conf.*, Manchester, 385-392.
- [22] Dąbrowski L., Kozak J., Łubkowski K., 1992. Electrochemical finishing of machine parts. *Proc. ISEM-X, Magdeburg*, 529-535.
- [23] Dąbrowski L., Paczkowski T., 2004. 2D computer simulation of phenomena occurring in the inter-electrode gap during electrochemical machining with vibrating electrode. *The Archive of Mechanical Engineering* 4, Polish Academy of Sciences Committee of Machine Design, 491-513.
- [24] Dąbrowski L., Paczkowski T., 2005. Computer simulation of two-dimensional electrolyte flow in electrochemical machining. *Russian J. of Electrochemistry* 41(1), 91-98.
- [25] Dąbrowski L., Paczkowski T., 2005. Theoretical analysis of electrochemical machining. *Advances In Manufacturing Science And Technology* 29(3), Committee of Mechanical Engineering Polish Academy of Sciences, IPPT PAN, 85-103.
- [26] Deconinck J., 1992. *Current Distributions and Electrode Shape Changes in Electrochemical Systems*. Springer-Verlag Berlin.
- [27] De Silva A.K.M., Altena H.S.J., McGeough J.A., 2000. Precision ECM by process characteristic modeling. *Annals CIRP* 49, 151-155.
- [28] De Silva A.K.M., McGeough J.A., 1989. The production of full die shapes by ECAM. *Mat. ISEM-9, Nagoya*, 107-110.
- [29] De Silva, A.K.M., McGeough, J.A., 2000. Computer applications in unconventional machining. *J. of Materials Processing Technology* 107(1-3), 276-282.
- [30] Dietz H., Gunther K.G., Otto K., Stark G., Rosenkranz W., 1979. Electrochemical turning considerations on machining notes which can be obtained. *Annals CIRP* 28, 93-97.
- [31] Domanowski P., Kozak J., 2000. Direct and inverse problems of shaping by electrochemical generating machining. *J. of Materials Processing Technology* 107(1-3), 300-306.
- [32] Domanowski P., Kozak, J., 2001. Inverse problems of shaping by electrochemical generating machining. *J. of Materials Processing Technology* 109, 347-353.
- [33] Dukovic J. O., 1990. Computation of Current Distribution in Electrodeposition a Review. *IBM J. Res. Develop.* 34(5), 51-59.
- [34] Ebeid S.J., Hewidy M.S., El-Taweel T.A., Youssef A. H., 2003. ECM assisted by low-frequency vibrations. [In:] *Proc. of the 20th Inter. Manufacturing Conference (IMC-20)*, Cork, Ireland, 541-549.
- [35] Ebeid S.J., Hewidy M.S., El-Taweel T.A., Youssef A.H., 2004. Towards higher accuracy for ECM hybridized with low-frequency vibrations using the response surface methodology *J. Materials Processing Technology* 149, 432-438.
- [36] Elsner J., 1987. *Turbulencja przepływów* PWN Warszawa.
- [37] Engelgardt G.R., Dikumar A.I., 1986. Thermokinetic instability of electrode processes. Part I. Theoretical analysis. *J. Electroanalytical Chemistry* 207(1), 1-9.
- [38] Ferziger J.H., Peré M., 1999. *Computational methods for fluid dynamics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- [39] Filatov E.I., 2000. The numerical investigation of the influence of electrolyte dynamics on ECM shaping. MMSS 2000, Kraków, 62-70.
- [40] Filatov E.I., 2001. The numerical simulation of the unsteady ECM process. J. of Materials Processing Technology 109(3), 327-332.
- [41] Filipowicz W.G. i dr., 1976. Opriedielienie temperatury powierzchni elektrodow pri elektrochimizheskoj obrabotke w protocznom elektrolitie. [W]: Elektrochimizheskaja Obrabotka, Trudy Kujbyszewskogo awiacjonnoho instituta, Kujbyszew, 24-26.
- [42] Filipkowski R, Marciniak M., 2000. Techniki obróbki mechanicznej i erozyjnej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [43] Fitz-Gerald J. M., McGeough J. A., 1969. Mathematical theory of electrochemical machining 1. Anodic smoothing, J. Inst. Maths. Applics. 5, 387- 408.
- [44] Fluerenbroek F., Zerkle R.D., 1976. Thorpe J.F. Verification of a one-dimensional two-phase flow model of the frontal gap in electrochemical machining. Trans. of the ASME. Ser. B: J. Engineering for Industry, 98(2), 431-437.
- [45] Forsyth Jr P., Rasmussen H., 1979. Solution of Fine Depend Electrochemical Machining Problems by a Coordinate Transformation. J. Inst. Math. Applic. 24, 234-242.
- [46] Giergiel J., Uhl T., 1990. Identyfikacja układów mechanicznych. PWN Warszawa.
- [47] Gieworkian G., Landau Y., 1989. Electrochemical machining in case of automated production of parts. Proc. ISEM-9, Nagoya, 175-178.
- [48] Glasston S. 1956. Podstawy elektrochemii. PWN Warszawa.
- [49] Glew D.A., 1980. Fine hole drilling with ECM. Mat. ISEM-6, Kraków, 309-312.
- [50] Godunow S.K., 1975. Równania fizyki matematycznej. WNT Warszawa.
- [51] Gorjala G.B., Rajurkar K.P., Jain V.K., 1991. Computer Modeling and Graphical Simulation of ECM Tool Design. Transactions of NAMRI, ASME, proc. NAMRC IX, Rolla-Missouri.
- [52] Grafov B.M., 1998. Heat of formation of the surface and the Gibbs-helmholtz equation. J. of Electroanalytical Chemistry 450, 3-6.
- [53] Gryboś R., 1998. Podstawy mechaniki płynów. Cz. 1 i 2. PWN Warszawa.
- [54] Gurusaran, Batra I.L., Jain V.K., 1989. Computer Aided Process Planning for ECM. Proc. 10th ICPR Conf., Nottingham, 1-10.
- [55] Gusiew W.N., 1928. British Pat. 335003.
- [56] Hardisty H., Mileham A.R., 1999. Finite Element Simulation of the Electrochemical Machining Process for a parabolically shaped moving tool eroding an arbitrarily shaped workpiece. Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part B. J. of Engineering Manufacture 213(B8), 787-798.
- [57] Hardisty H., Mileham A.R., Shirvarni H., 1993. Finite Element Simulation of the Electrochemical Machining Process. CIRP Annals 42(1), 123-138.
- [58] Hardisty H., Mileham A.R., Shirvarni H., 1997. Theoretical and computational investigation of the electrochemical machining process for characteristic cases of a stepped moving tool eroding a plane surface. Proceedings Institution of Mechanical Engineers, Part B, J. of Engineering Manufacture 211(B3), 197-210.
- [59] Hewidy M.S., 2005. Controlling of metal removal thickness in ECM process. J. of Materials Processing Technology 160(3), 348-353.

- [60] Hewidy M.S., Ebeid S.J., El-Taweel T.A., Youssef A.R., 2007. Modelling the performance of ECM assisted by low frequency vibrations. *J. of Materials Processing Technology* 189, 466-472.
- [61] Hives J., Rousar I., 1993. Measurement of anode potentials at high current interruption method for metals used in aviation technology. *J of Applied Electrochemistry* 4, 1263-1267.
- [62] Hives J., Rousar I., 1994. Measurement of anode potentials at high current densities in NaNO_3 and NaClO_3 media by the current interruption method for metals used in aviation technology. *J. of Applied Electrochemistry* 24, 798-802.
- [63] Hoare J.P., 1970. Oxide film studies on iron in electrochemical machining electrolytes. *J. Electrochem. Soc.* 117(1), 142-145.
- [64] Hofstede A., van Den Berkel W.M., 1970. Some remarks on electrochemical turning. *Annals CIRP*, 93-106.
- [65] Hocheng H., Sun, Y.H., Lin, S.C., Kao P.S., 2003. A material removal analysis of electrochemical machining using flat-end cathode. *J. of Materials Processing Technology* 140, 264-268.
- [66] Hourng L.W., Chang C.S., 1993. Numerical simulation of electrochemical drilling. *J. of Applied Electrochemistry* 23(4), 316-321.
- [67] Hourng L.W., Chang C.S., 1994. Numerical simulation of two-dimensional fluid flow in electrochemical drilling. *Journal of Applied Electrochemistry* 24(11), 1170-1175.
- [68] Hunt R. 1986. The Numerical Solution of Elliptic Free Boundary Problems Using Multigrid Techniques, *J. of Computational Physics* 65(P), 448-461.
- [69] Jain V.K., Rajurkar K.P., 1991. An Integrated Approach for Tool Design in ECM. *Precision Engineering* 13(2), 111-123.
- [70] Janssen J.W., 1991. Stem drilling applications for gas turbine blades. *Proc. Nontraditional Machining Symposium, Orlando*, 23-33.
- [71] Jędrał W., 1981. Turbulentny przepływ cieczy w hydraulicznie gładkich szczelinach poprzecznych. *Archiwum Budowy Maszyn* 28(1), 39-53.
- [72] Jędrał W., 2005. The pressure distribution In turbulent liquid flow within a conical axial clearance. *The Archive of Mechanical Engineering* 12(4), 394-407.
- [73] Kabanov V., 1966. *Elektrochimija metali i adsorbcija*, Izdatielstwo Nauka.
- [74] Karimov A.H., Klovov V.V., Filatov J.I., 1990. *Metody rasčeta elektrochimického formoobrazovanija*. Univ. Kazań.
- [75] Kharkats Yu.I., Bakr F.H., Wedin R. 1998. On the theoretical aspects of thermal effects in electrochemical cells. *J. of Electroanalytical Chemistry* 450(1), 37-45.
- [76] Kisielew P.S., Saparpulkin M.M., 1979. Ustanowka dla sniatija poliarizacyjnych kriwych pri ECHO niepodwiznym katodom s bolszymi plotnostiami toka. *Elektronnaja Obrabotka Matieriałow* 1, 83-84.
- [77] Klovov V.V., 1984. *Elektrochimiczeskoje formoobrazowanie*. Univ. Kazań.
- [78] Klovov V.V., Filatov E.I., Frisov A.G., Tikhonov A. S., 1999. The complex computer simulation of the ECM blades shaping. 15 Inter. Conf. on Computer-Aided Production Engineering CAPE'99, 123-136.
- [79] Klugman I.J., 1997. Wiazkost wodnych pastworow cilnych elektrolitow tipa 1:1. *Elektrochimija* 33(3), 337-345.

- [80] Kotlyar L.M., Minazetdinov N.M., 2004. Evolution of the shape of the anode boundary under electrochemical dimensional machining of metals, *J. of Applied Mechanics and Technical Physics* 45(4), 461-465.
- [81] Kotlyar L.M., Minazetdinov N.M., 2009. Two-dimensional problem of electrochemical metal machining. ISSN 0015-4628, *Fluid Dynamics* 44(5), 740-747.
- [82] Kozak J., 1967. Zagadnienie geometrii elektrod w procesie kształtowania elektrochemicznego, *Archiwum Budowy Maszyn* 14(2), 239-256.
- [83] Kozak J., 1969. Geometria elektrod w procesie kształtowania elektrochemicznego. Politechnika Warszawska, (niepublikowana).
- [84] Kozak J., 1976. Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną bezstykową. *Prace Naukowe, Mechanika* 41, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej.
- [85] Kozak J., 1997. Analiza procesu obróbki elektrochemicznej elektrodą drgającą. *Mat. konf. EM'97, Bydgoszcz, Golub Dobrzyń*, 204-212.
- [86] Kozak J., 1998. Mathematical models for computer simulation of electro chemical machining processes, *J. of Materials Processing Technology* 76(1-3), 170-175.
- [87] Kozak J., 1999. Komputerowe wspomaganie technologii drążenia elektrochemicznego. *SNOE 5, Warszawa*, 53-80.
- [88] Kozak, J., 2001. Computer simulation system for electrochemical shaping. *Journal of Materials Processing Technology* 109(3), 354-359.
- [89] Kozak J., Budzyński A., Engelgardt G.R., Davydov A.D., 1989. Mathematical modelling of ECM. *Proc. ISEM-9, Nagoya*, 130-134.
- [90] Kozak J., Dąbrowski L., 1992. Computer aided system for ECM. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 6, 243-255.
- [91] Kozak J., Dąbrowski L., Gawryś M., Łubkowski K., 1986. Frezowanie elektrochemiczne powierzchni kształtowych. *Mat. EM-86, Bydgoszcz*, 85-91.
- [92] Kozak J., Dąbrowski L., Łubkowski K., Rozenek M., 1990. Oprogramowanie dla wspomagania komputerowego projektowania technologii ECM. *Mat. Międzynarodowej Konf. Electromachining EM' 90, Bydgoszcz*, 58-67.
- [93] Kozak J., Dąbrowski L., Łubkowski K., Rozenek M., 1992. Computer Aided Electrochemical Machining. *Proc. of Inter. Symposium on Electro-Machining ISEM-I0. Magdeburg*, 466-475.
- [94] Kozak J., Dąbrowski, L., Łubkowski, K., Rozenek, M., Slawinski, R., 2000. CAE-ECM system for electrochemical technology of parts and tools. *Journal of Materials Processing Technology* 107(1-3), 293-299.
- [95] Kozak J., Dąbrowski L., Osman H., Rajurkar K.P., 1991. Computer modelling of electrochemical machining with a rotating electrode. *Proc. 7th Inter. Conf. on Computer-Aided Production Engineering, Elsevier*, 159-167.
- [96] Kozak J., Dąbrowski L., Rozenek M., 1989. Computer Design of Working Electrodes for ECM and Anode Shape Evolution by Means of Microcomputer. *Proced. ISEM-9, Nagoya*, 139-141.
- [97] Kozak J., Gulbinowicz Z., Rozenek M., 2010. Selected problems of pulse electrochemical machining, *Proc. of the 16th Inter. Symposium on Electromachining, ISEM XVI, Shanghai*, 299-305.
- [98] Kozak J., Łubkowski K., 1988. A computational of physical conditions and geometry of the gap in the steady state of electrochemical machining. *Proc. 27 MATA-DOR Conf., Manchester*, 269-274.

- [99] Kozak J., Łubkowski K., Dąbrowski L., 1986. Razmiernaja elektrochimizskaja obrabotka wraszczajuszczimsia katodom instrumentom složnoj formy. *Mat. ISEM-8*, Moskwa, 140-145.
- [100] Kozak, J., Rajurkar, K., Łubkowski, K., 1997. The study of thermal limitation of electrochemical machining process. *Transactions of the NAMRI/SME XXV*, 159-164.
- [101] Kozak J., Rajurkar K.P., Malicki S., 2000. Study of electrochemical machining utilizing vibrating tool electrode. [In:] *Proc. of the 16th Inter. Conf. on Computer Aided Production Engineering CAPE*, Edinburgh, UK, 173-181.
- [102] Kozak J., Rajurkar K.P., Ross R.F., 1991. Computer simulation of pulse electrochemical machining. *J. of Materials Processing Technology* 28(1-2), 149-157.
- [103] Kramer D., Moisan A., Ebeid S.J., 1980. Electrochemical broaching. *Mat. ISEM-6*, Kraków, 368-370.
- [104] Kryłow W.S., 1983. Elektrodnnye prociessy. *Sztiinca Kisziniew*.
- [105] Kryłow W.S. i in., 1983. Elektroprowodnyje processy i procesy pierenosa pri elektrochimizskoj razmernoj obrabotke metalłow. *Akademia Nauk Mołdawskiej SSR*.
- [106] Kryłow W.S., Dawydow A.D., Kozak J., 1975. Problemy teorii elektrochimizskogo formo obrazowania i tocznosti elektrochimizskiej obrbotki. *Elektrochimija* 11(8), 1155-1179.
- [107] Lawrence P., 1981. Computer aided design for ECM. *Inter. J. Mach. Tool Des. Res.* 21, 379-383.
- [108] Loutrel S.P., Cook N.H., 1973. High rate electrochemical machining. *Trans. ASME. J. of Eng. For Industry*, 992-996.
- [109] Łazarienko B.R., Łazarienko N.I., 1979. Miechanizm prochożdienija elektryczeskogo toka czierz elektrolit. *Elektronnaja Obrabotka Materiałow* 1, 5-11.
- [110] Łubkowski K., 1996. Stany krytyczne w obróbce elektrochemicznej. *Prace naukowe, Mechanika* 163. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [111] Łubkowski K., Dąbrowski L., Kozak J., Rozenek M., 1990. Obrabiarki elektrochemiczne do wygładzania powierzchni i usuwania zadziorów. *Mat. EM-90*, Bydgoszcz, 78-86.
- [112] Mao K.W., 1971. ECM study in a closed-cell system. *J. Electrochem., Soc.* 118(11), 1870-1879.
- [113] Matusiak R., 1976. *Teoria pola elektromagnetycznego*. WNT Warszawa.
- [114] McClennan J., Alder G., Sherlock A., Mill F., Clifton D., 2006. Two dimensional tool design for two-dimensional equilibrium electrochemical machining die-sinking using a numerical method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B-, J. of Engineering Manufacture* 220(5), 637-645.
- [115] McGeough J.A., 1974. *Principles of Electrochemical Machining*. Chapman and Hall, London, 255.
- [116] McGeough J.A., Rasmussen H., 1981. Theoretical analysis of the electroforming process. *J. Mechanical Engineering Science* 23(3), 113-120.
- [117] Minazetdinov N.M., 2009. Simulation of fabrication for gas turbine blade turbulent cooling hole in ECM based on FEM. *J. of Materials Processing Technology* 209, 1747-1751.

- [118] Minazetdinov N.M., 2010. One scheme of electrochemical machining of metals by a curvilinear electrode tool. *J. of Applied Mechanics and Technical Physics* 51(2), 288-292.
- [119] Mirozozjev R.A., 1970. Issledovanije elektrodnych processov i svojstv priel-ektrodnych slojow pri razmiemoj elektrochimičeskoj obrabotkie. Dysertacja na stopień kandydata nauk chem. Moskwa.
- [120] Moroz I.I., 1977. Osnovy powyszenia tocznosti elektrochimizeskogo formoob-razowania. Akademia Nauk Mołdawskoj SSR.
- [121] Mount A., Clifton D., Howarth P., Sherlock A., 2003. An integrated strategy for materials characterization and process simulation in electrochemical machining. *J. of Materials Processing Technology* 138, 449-454.
- [122] Naizhang Y., Xu J., Yangxin T., 1989. Investigation on application of electro-chemical contour evolution machining. *Proc. ISEM-9. Nagoya*, 143-145.
- [123] Narayanan O.H., Hinduja S., Noble C.F., 1986. Design of Tools for ECM by Boundary Element Method. *Proc. Inst. Mech. Eng.* 200(C2), 195-205.
- [124] Ngoya F.N., 1983. A hydrodynamic model for mass transfer at gas evolving electrodes. *Electrochimica Acta* 28(12), 1865-1868.
- [125] Nied H.A., Lamphere M.S., 1995. Electrochemical machining simulation using the BEM. *Proceed. Int. Symp. for ElectroMachining ISEM-11, Lozanna*, 187-198.
- [126] Nied H.A., Perry E.M., 1990. Finite Element Simulation of the ECM Process. *ASME, MD-Vol. 20, Computer Modelling and Simulation of Manufacturing Processes* 20, 223-237.
- [127] Nilson R.H., Tsuel Y.G., 1976. Free boundary problem for Laplace equation with application to ECM tool design. *Trans. ASME* 98, 54-58.
- [128] Noot M.J., Telea A.C., Jansen J.K.M., 1998. Real time numerical simulation and visualization of electrochemical drilling. *Computing and Visualization in Science* 1(2), 105-111.
- [129] Noble C.F., 1976. Studies in electrochemical machining. University of Manches-ter, PhD thesis, Mechanical Engineering Dept.
- [130] Osiński Z., 1980. Teoria drgań. PWN Warszawa.
- [131] Paczkowski T., 2002. Badania teoretyczne i doświadczalne obróbki elektroche-micznej elektrodą drgającą, Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszaw-skiej, (pr. niepublikowana).
- [132] Paczkowski T., 2009. Modelowanie obróbki ECM powierzchni o zarysie krzy-woliniowym, *Inżynieria Maszyn* 12(2-3), 64-73.
- [133] Paczkowski T., 2009. Obróbka ECM powierzchni krzywoliniowych elektrodą drgającą. *Zagadnienia Mechaniki Stosowanej. T.2. Wyd. Uczeln. UTP, Byd-goszcz*, 97-104.
- [134] Paczkowski T., 2010. Modelowanie obróbki ECM powierzchni o zarysie krzy-woliniowym elektrodą drgającą w dwóch kierunkach. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 30(4). KBM PAN Poznań, 57-67.
- [135] Paczkowski T., 2011. Theoretical analysis of electromechanical machining ECM using tool electrode with complex translatory motion. *Advances In Manufacturing Science and Technology* 35(1). Committee of Mechanical Engineering Polish Academy of Sciences, 41-54.

- [136] Paczkowski T., Sawicki J., 2002. Symulacja komputerowa procesu ECM w oparciu o dwuwymiarowy model przepływu elektrolitu między płaskimi elektrodami, Zesz. Nauk. ATR, Mechanika 53, Wyd. Uczeln. ATR Bydgoszcz, 171-180.
- [137] Paczkowski T., Sawicki J., 2003. Theoretical analysis of electrochemical machining with a vibrating electrode. *Advances in Manufacturing Science and Technology* 27(4). Committee of Mechanical Polish Academy of Sciences, IPPT PAN, 46-63.
- [138] 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*, 62-69.
- [139] Paczkowski T., Sawicki J., 2004. Theoretical analysis of hydrodynamic machine blade electrochemical machining. *Advances in Manufacturing Science and Technology* 28(3). Committee of Mechanical Polish Academy of Sciences, IPPT PAN, 57-71.
- [140] Paczkowski T., Sawicki J., 2006. Analysis of influence of physical conditions inside interelectrode gap on work piece shape evolution, *Inter. Journal for Theoretical and Applied Mechanics, Engineering Mechanics* 13(2). Czech Republic, 93-100.
- [141] Paczkowski T., Sawicki J., 2007. Zagadnienie odwrotne w modelowaniu obróbki elektrochemicznej kształtowej. *Zagadnienia Mechaniki Stosowanej*, T. 1. Wyd. Uczeln. UTP, Bydgoszcz, 83-95.
- [142] Paczkowski T., Sawicki J., 2008. Electrochemical machining of curvilinear surfaces. *J. LMST: Machining Science and Technology* 12(1), Philadelphia, 33-52.
- [143] Paczkowski T., Zdrojewski J., 2005. Computer aided electrode design in ECM. *Inter. J. for Manufacturing Science and Technology* 7(2), 5-14.
- [144] Paczkowski T., Zdrojewski J., 2009. System komputerowy dla obróbki ECM krzywoliniowych powierzchni kształtowych. *Inżynieria Maszyn* 2-3, 74-81.
- [145] Pajak P.T., van Tijum R., Altena H., Visser C.R., 2010. Virtual design of the shaving cap ECM process by multiphysics simulation approach. *Proc. of the 16th International Symposium on Electromachining, ISEM XVI, Shanghai*, 693-697.
- [146] Pang Guibing, Xu Wenji, Zhai Xiaobing, Zhou Jinjin, 2004. Forecast and control of anode shape in electrochemical machining using neural network. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg LNCS* 3174, 262-268.
- [147] Petrow J.N., Korcagin G.N., Zajdman G.N., Sauskin B.P., 1977. *Osnovy powyszenija tocznosti elektrochimiczeskogo formoobrazowanija*. Stinca Kiszinev, 152.
- [148] Pott P.G., 1989. Modern electrochemical machining in practice. *Proc. ISEM-9, Nagoya*, 146-150.
- [149] Potter D., 1977. *Metody obliczeniowe fizyki*. PWN Warszawa.
- [150] Prosnak W.J., 1970. *Mechanika płynów T.1*. PWN Warszawa.
- [151] Purcar M., Borteis L., Van den Bossche B., Deconinck J., 2004. 3D electrochemical machining computer simulations. *J. of Materials Processing Technology* 149, 472-478.

- [152] Purcar M., Dorochenko A., Borteis L., Deconinck J., Van den Bossche B., 2008. Advanced CAD integrated approach for 3D electrochemical machining simulations. *J. of Materials Processing Technology* 203, 58-71.
- [153] Rajurkar K.P., Wei B., Kozak J., 1995. Modelling and monitoring Interelectrode Gap in Pulse Electrochemical Machining. *Annals of the CIRP* 44 (1), 177-180.
- [154] Rajurkar K.P., Zhu D., McGeough, J. A., Kozak, J., De Silva A., 1999. New developments in electro-chemical machining. *Annals of the CIRP*. 48(2), 567-579.
- [155] Rayu K.R., Jain V.K., Lal G.K., 1988. Cathode Design in ECM two dimensional analyses. *ASME Symposium on Research and Technological Advances In Non-traditional Machinery*, v. PED-34, 89-106.
- [156] Risko D.G., 1991. ECM-current and coming capabilities. *Proc. Nontraditional Machining Symposium*. Orlando, 89-97.
- [157] Rozenek M., 2009. Badania doświadczalne obróbki elektrochemicznej z zastosowaniem milisekundowych impulsów roboczych. *Inżynieria Maszyn* (2-3). Wrocław, 106-113.
- [158] Rozenek M., 2009. Wpływ czasu impulsów roboczych na lokalizację roztwarzania w impulsowej obróbce elektrochemicznej, *Inżynieria Maszyn* 2-3. Wrocław 2009, 114-121.
- [159] Rumyantsev E.M., Davydov A.D., 1984. *Technologia elektrochimizjeskoj obrabotki metallov*. Wydawnictwo Szkoła Wyższa. Moskwa, 159.
- [160] Ruszaj A., 1978. Badania wpływu wybranych parametrów na proces elektrochemicznej obróbki bezstykowej. *Prace IOS* 63 Kraków.
- [161] Ruszaj A., 1988. Application of ECM machining in the Polish industry. *Mat. SECM-88*, Lubniewice, 247-283.
- [162] Ruszaj A., 1989. Procesy obróbek elektrochemicznej i elektroerozyjnej w różnych odmianach kinematycznych. *Prace IOS* 76 Kraków.
- [163] Ruszaj A., 1999. Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi. *IOS* Kraków, 297.
- [164] Ruszaj A., Czekaj J., Zybura-Skrabalak M., Chuchro M., Skoczypiec S., Dąbrowski S., 2003. Zastosowanie drgań ultradźwiękowych do wspomagania procesu drążenia elektroerozyjnego. *Mat. Konf. EM'03, Bydgoszcz-Rydzyna*, 261-268.
- [165] Ruszaj A., Zybura-Skrabalak M., Skoczypiec S., Zurek R., 2001. Electrochemical machining supported by electrode ultrasonic vibrations. *Proc. of the 13th Inter. Symposium of Electromachining ISEM XIII(2)*. Bilbao, Hiszpania, 953-964.
- [166] Ruszaj A., Zybura-Skrabalak M., Zurek R., Skoczypiec S., Skrabalak G., 2003. Electrochemical drilling supported by electrode ultrasonic vibrations. *Postępy Technologii Maszyn* 27(1), 41-53.
- [167] Sawicki J., 1986. Wpływ sił bezwładności na przepływ cieczy lepkiej niemagnetycznej i magnetycznej w szczelinach między wirującymi powierzchniami obrotowymi. *Wydział Maszyn Roboczych i Pojazdów Politechniki Poznańskiej*, (pr. niepublikowana).
- [168] Sawicki J., 1990. Laminarny magnetohydrodynamiczny przepływ cieczy lepkiej w szczelinie między krzywoliniowymi wirującymi powierzchniami obrotowymi. *Rozprawy Inżynierskie* 38(3-4). PAN-IPPT, 507-528.

- [169] 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), 753-786.
- [170] Sawicki J., 1996. Magnetohydrodynamic flow of viscous fluid in a slot between curvilinear surfaces of revolution. *Rozprawy Inżynierskie* 44 (1). PAN-IPPT, 113-140.
- [171] Sawicki J., 2008. Obróbka ECM powierzchni kształtowych osiowo symetrycznych. *Prace naukowe SNOE* 14, PAN, KBM, Sekcja Podstaw Technologii. Warszawa, 81-91.
- [172] Sawicki J., 2008. Wpływ efektów bezwładności na profile prędkości w laminarnym przepływie elektrolitu podczas obróbki elektrochemicznej kształtowej powierzchni osiowosymetrycznych. *Scientific Session Applied Mechanics*, 46-47.
- [173] Sawicki J., 2009. Modelowanie obróbki ECM powierzchni obrotowych. *Inżynieria Maszyn*, (2-3), 88-98.
- [174] Sawicki J., 2009. Obróbka elektrochemiczna powierzchni obrotowych elektrodą drgającą. *Zagadnienia Mechaniki Stosowanej*. T.2, Wyd. Uczeln. UTP Bydgoszcz, 98-105.
- [175] Sawicki J., 2009. Modelowanie matematyczne obróbki ECM powierzchni kształtowych obrotowych. *Prace naukowe SNOE* 15, PAN, KBM, Sekcja Podstaw Technologii Warszawa, 79-88.
- [176] Sawicki J., 2010. Obróbka ECM krzywoliniowych powierzchni obrotowych. *Archiwum Technologii i Automatyzacji* 30(2), Komitet Budowy Maszyn PAN Oddział w Poznaniu, 39-50.
- [177] Sawicki J., 2010. ECM machining of curvilinear rotary surfaces by a shaping tool electrode performing composite motion. *Advances in Manufacturing Science and Technology* 34(2), 79-92.
- [178] Sawicki J., 2010. ECM machining of curvilinear rotary surfaces. *Journal of Polish CIMAC* 5(3), 88-98.
- [179] Sawicki J., 2011. Analysis of influence of electrolyte flow volume rate in interelectrode gap on physical and geometric parameters of electro-chemical machining. *J. of Polish CIMAC* 6(3), 84-94.
- [180] Sawicki J., 2011. Wpływ efektów bezwładności przepływu elektrolitu na ewolucję kształtu przedmiotu obrabianego ECM. *Zagadnienia Mechaniki Stosowanej* T.3., Wyd. Uczeln. UTP, Bydgoszcz.
- [181] Sawicki J., Paczkowski T., 2006. Obróbka elektrochemiczna krzywoliniowych powierzchni kształtowych. *Zagadnienia Konstrukcyjne i Technologiczne Niekonwencjonalnych Technik Wytwarzania*, Wyd. Uczeln. ATR Bydgoszcz.
- [182] Sawicki J., Paczkowski T., 2008. Shaping electrochemical machining of axisymmetric surfaces – constructional aspects. *Developments in Machinery Design and Control – Nowogród*, 71-72.
- [183] Skoczypiec S., 2006. Badania wspomaganego drganiami ultradźwiękowymi procesu obróbki elektrochemicznej elektroda uniwersalna, Politechnika Krakowska, (pr. niepublikowana).
- [184] Smets N., 2009. Towards economic simulations in pulse Electrochemical Machining. *Vrije Universiteit Brussel*.

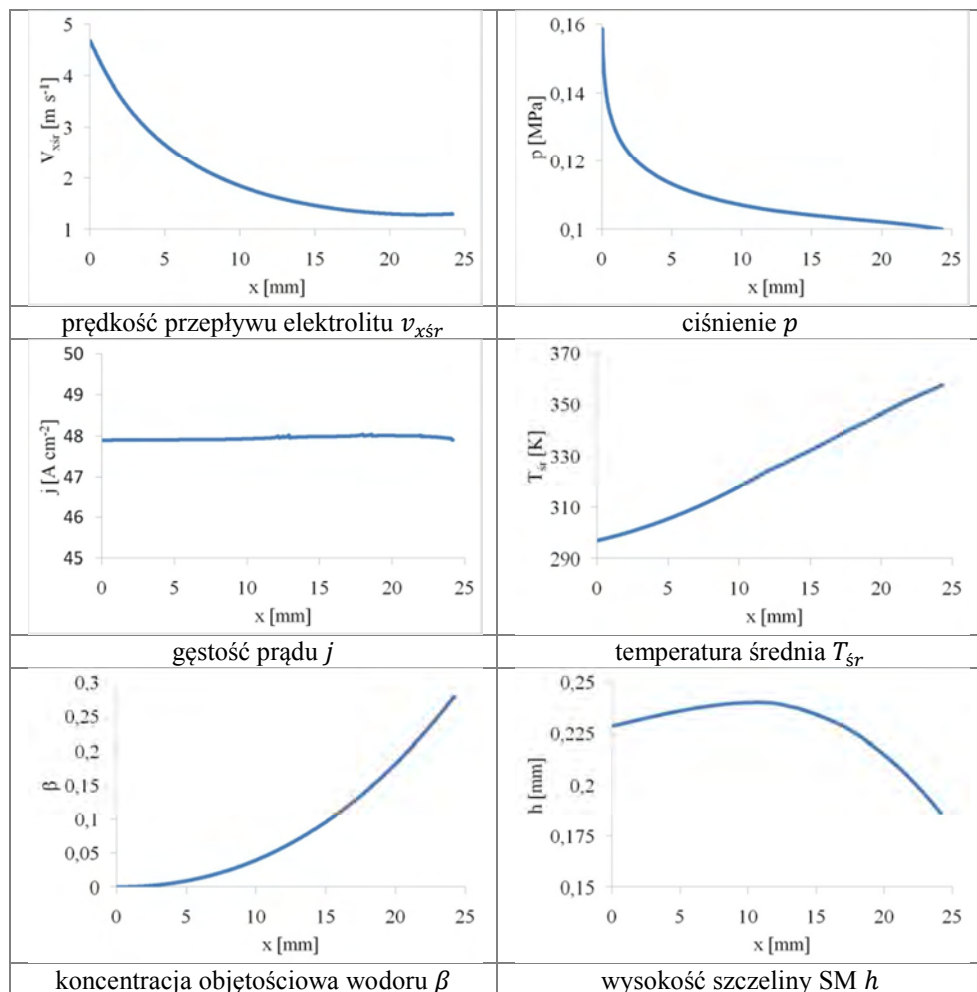
- [185] Smets N., Van Damme S., De Wilde D., Weyns G., Deconinck J., 2007. Calculation of temperature transients in pulse electrochemical machining (PECM). *J. of Applied Electrochemistry* 37, 315-324.
- [186] Sorkhel S.K., Bhattacharyya B., 1989. Computer-aided design of tool in ECM for accurate job machining. *Proc. ISEM-9, Nagoya*, 240-243.
- [187] Spurk J.H., 1997. *Fluid mechanics*. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- [188] Sun Chunhua, Di Zhu, Zhiyong Li, Lei Wang, 2006. Application of FEM to tool design for electrochemical machining freeform surface. *Science Direct Finite Elements in Analysis and Design* 43, 168-172.
- [189] Szmaniew W.A., 1986. *Tiechnologia elektrochimizjeskoj obrabotki dietaliej w awiadwigatieliestrowenii*. Maszynostrowenie, Izdatielstwo Moskiewskij Uniwersitet.
- [190] Steinhaus H., 1971. *Elementy nowoczesnej matematyki dla inzynierow*. PWN Warszawa-Wroclaw.
- [191] Stephan K., Vogt H., 1979. A model for Correlating Mass Transfer Data at Gas Evolving Electrodes. *Electrochimica Acta* 24(1), 11-18.
- [192] Stryczek S., 1990. *Naped hydrostatyczny, T.1 i T.2*, WNT Warszawa.
- [193] Thorpe J.F., Zerkle R.D. 1969. Analytical Determination of the Equilibrium Electrode Gap in Electrochemical Machining. *Inter. J. Mach. Tool Des. and Res.* 9(2), 131-144.
- [194] Tipton H., 1968. The determination of tool shape for ECM. *Machinery and Production Eng.* 2, 325-328.
- [195] Tipton H., 1971. Calculation of tool shape for ECM in fundament of Electrochemical Machining. (Edited by C.I. Faust). *Electrochemical Society Softbound Symposium Series, Princeton*, 98-111.
- [196] Vogt H., 1984. The rate of gas evolution at electrodes. *Electrochimica Acta* 29, 167-180.
- [197] Wołgin V.M., 1998. Modelirowanie tieczenii gazorzidkostnyh crjed pri eljetrohimiczjeskom formoobrazobanii. I. Odnomiernyje tieczenija. *Sbornik Trudow, Priokskoje Kniznoje Izdatielstwo Tuła Rosja*.
- [198] Wołgin V.M., 1998. Modelirowanie tieczenii gazorzidkostnyh crjed pri eljetrohimiczjeskom formoobrazobanii. II. Dwumjernyje tieczenija. *Sbornik Trudow, Priokskoje Kniznoje Izdatielstwo Tuła Rosja*.
- [199] Wołgin V.M., 1999. *Teoriczieskije osnovy i mietody analiza triechniarnowo elektrochimizjeskowo fonnoobrazowania*. Tulskij Gosudarstwiennyj Uniwersytet, *Dissertacija soiskanie uczenoj stiepienia doktora techniczieskich nauk Tuła Rosja*.
- [200] Wołgin V.M., Lyubimov V.V., 2001. Numerical Simulation of the Electrolyte Flow at Three-Dimensional Electrochemical Machining. *Mat. konf. APE'2001, Warszawa*, 299-308.
- [201] Wang Z., Zhu Y., Fan Z., Yun N., 2010. Mechanism and Process Study of Ultrasonical Vibration Combined Synchronizing Pulse Electrochemical Micro-Machining. *Proc. of the 16th Inter. Symposium on Electromachining, ISEM XVI, Shanghai*, 351-355.
- [202] Westley J.A., Atkinson J. Duffield A., 2004. Generic aspects of tool design for electrochemical machining, *J. of Materials Processing Technology* 149, 384-392.

- [203] Wilson J.F., 1971. Practice and Theory of Electrochemical Machining. New York Wiley.
- [204] Yu C.Y., Hou Z.Y., Yao X.K., Yang Y.S., 1985. The experimental investigations on gas bubble distribution in electrochemical machining gap. Proc. ISEM-7, Birmingham, 393-403.
- [205] Zaborowski S., 2000. Elektrochemiczna intensyfikacja obróbki ścierniej materiałów trudno obrabialnych. Prace Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Seria: Monografie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 206.
- [206] Zaime D., Rimshans J., Guseynov S., 2008. Analytical and Numerical Solutions of Temperature Transients in Electrochemical Machining. Studies in Computational Intelligence (SCI), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 179-186.

10. ANEKS

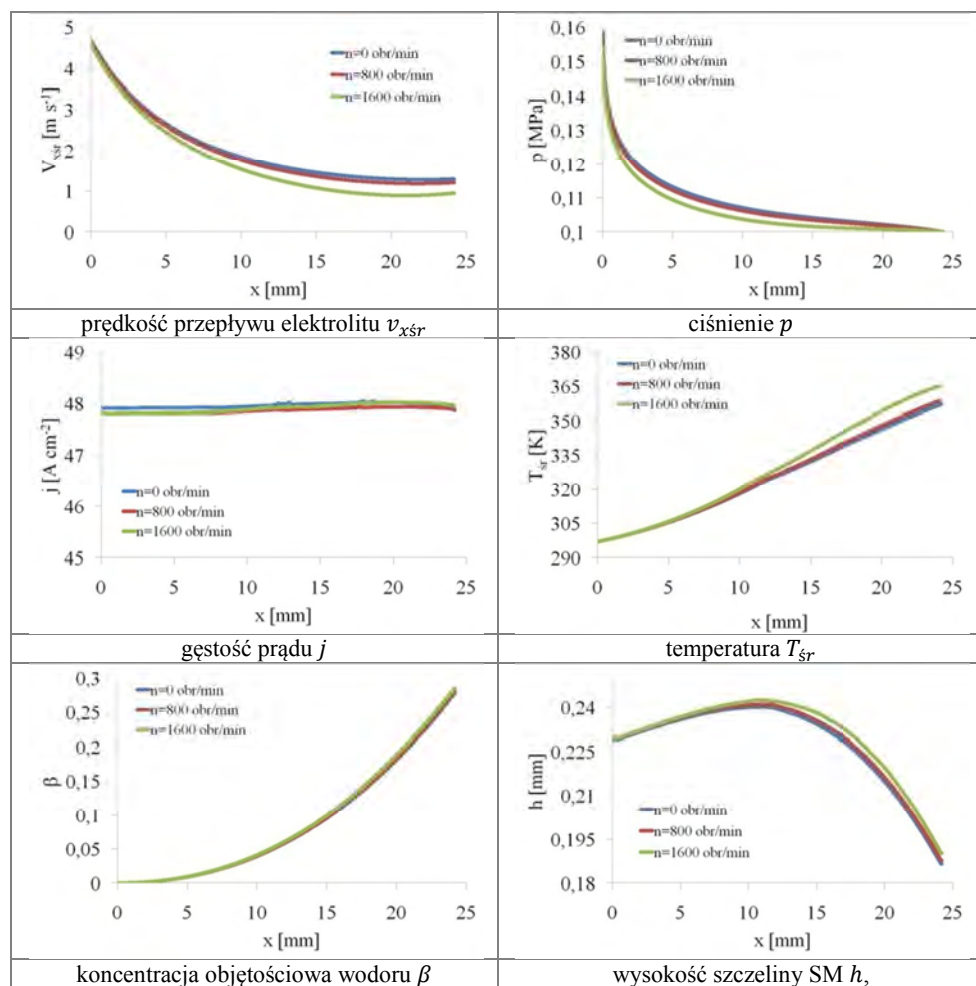
10.1. ROZKŁADY PARAMETRÓW OBRÓBKİ ECM POWIERZCHNI OBROTOWYCH STOŻKOWYCH

10.1.1. Obróbka ECM nieruchomej powierzchni obrotowej



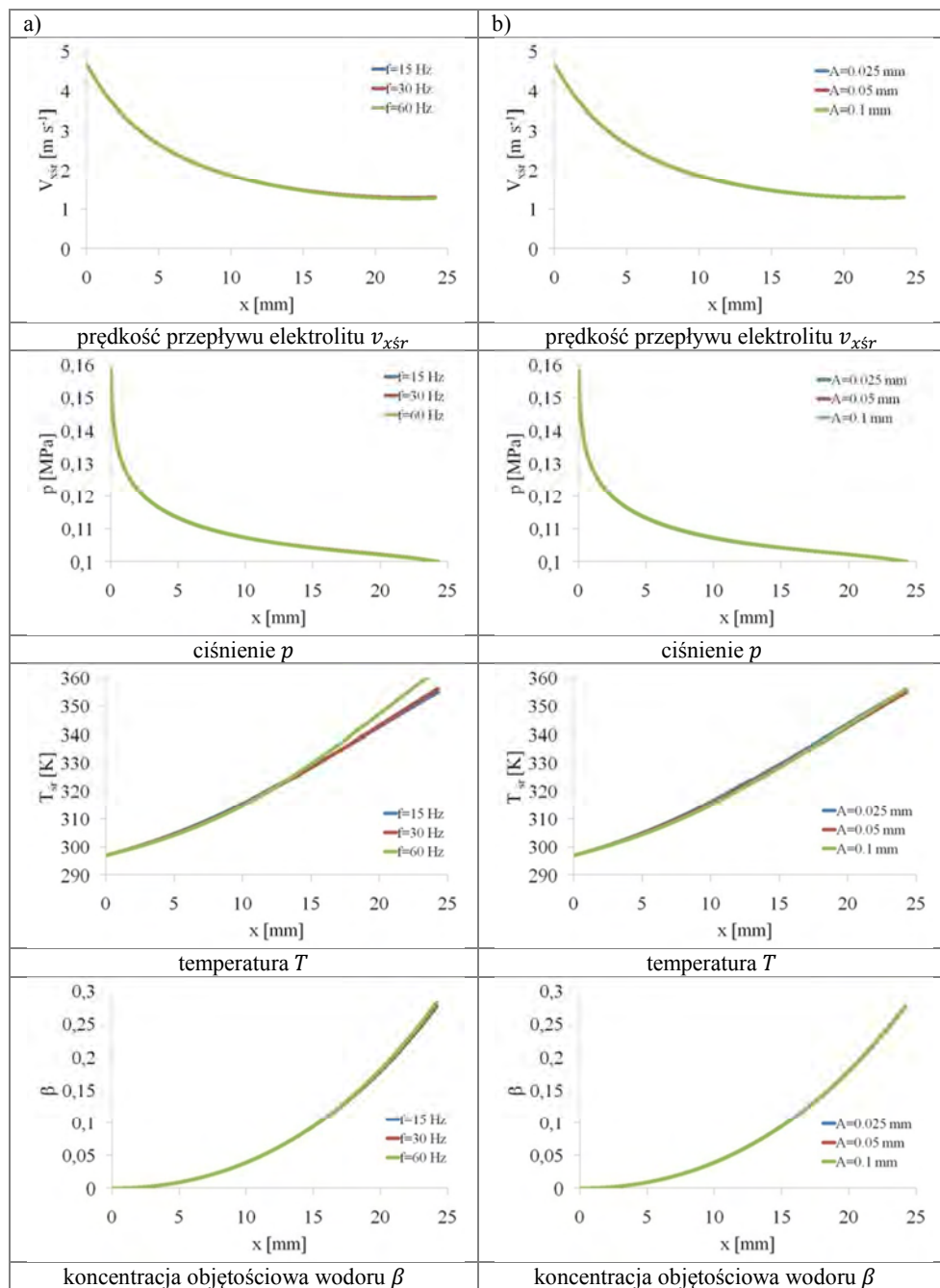
Rys. 10.1. Rozkłady parametrów obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

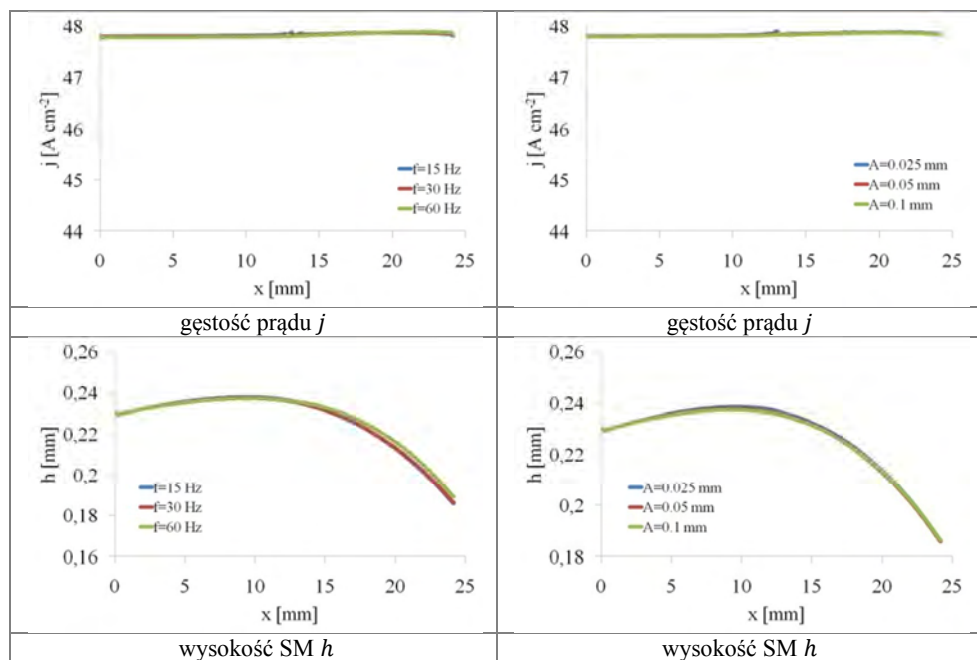
10.1.2. Obróbka ECM wirującej powierzchni obrotowej



Rys. 10.2. Wpływ prędkości obrotowej n na rozkłady parametrów obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

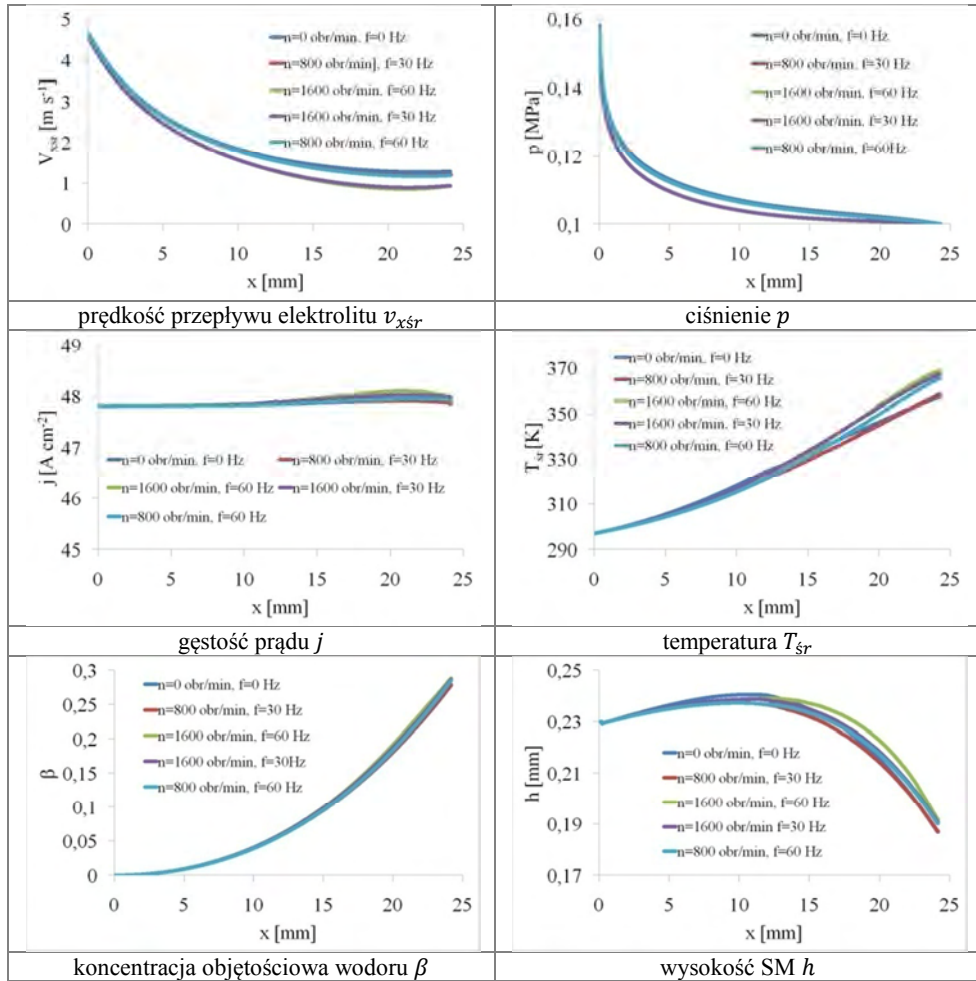
10.1.3. Obróbka ECM drgającej powierzchni obrotowej





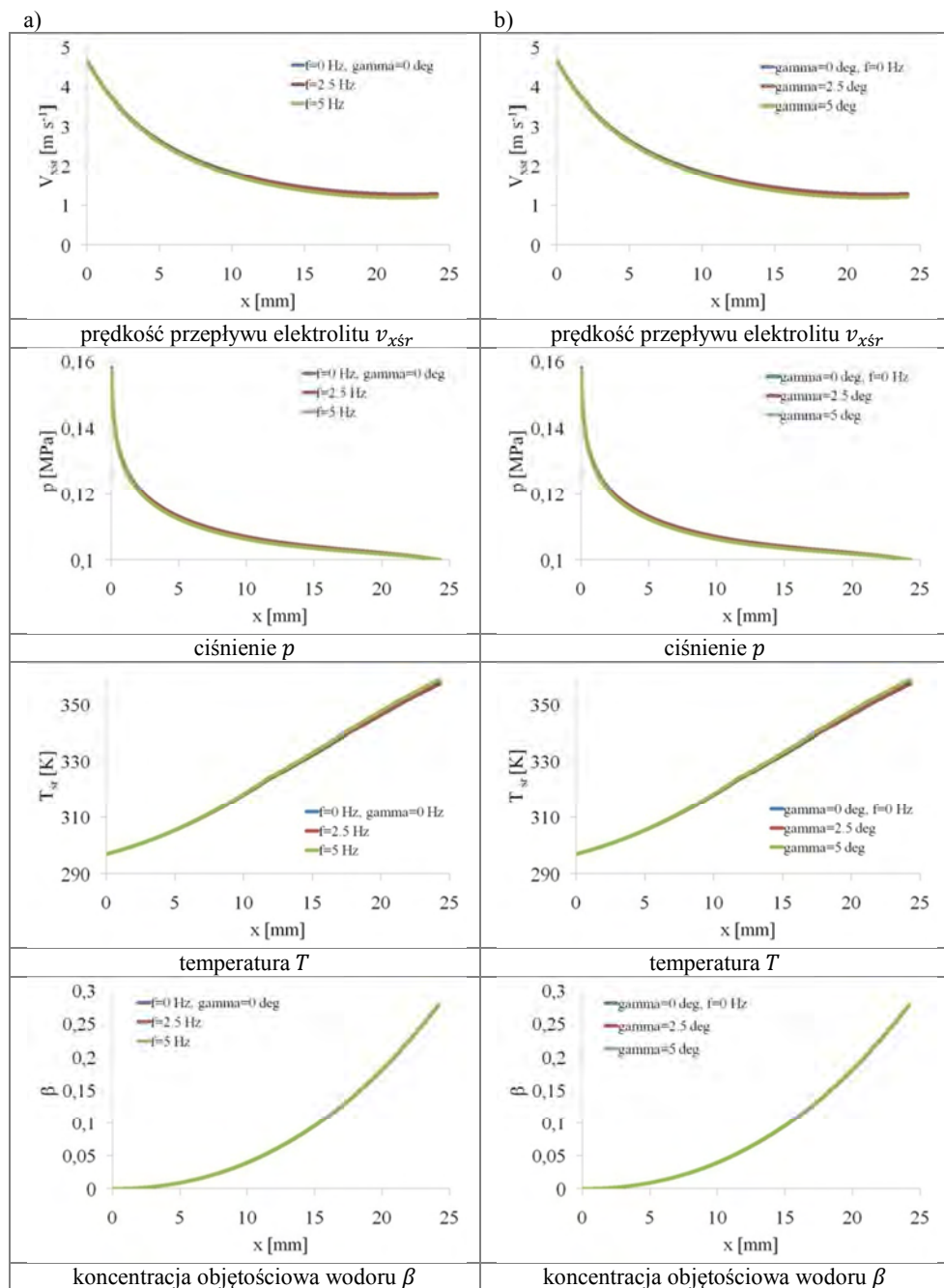
Rys. 10.3. Wpływ: a) częstotliwości drgań f ($A = 0,1$ mm), b) amplitudy A ($f = 30$ Hz) na rozkłady parametrów obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzelektrodowej (SM)

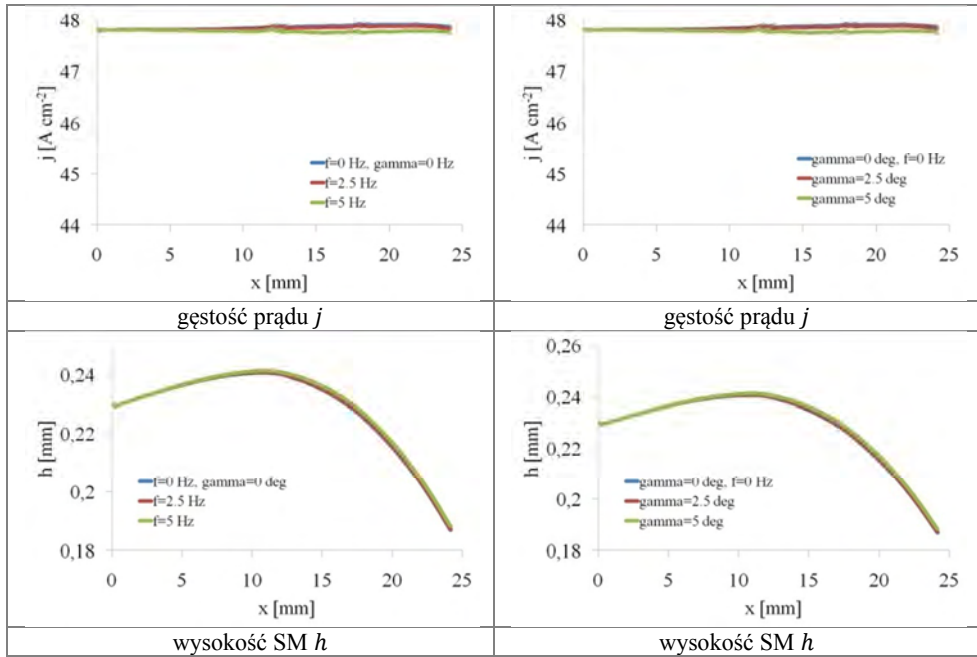
10.1.4. Obróbka ECM wirującej i drgającej powierzchni obrotowej



Rys. 10.4. Wpływ częstotliwości drgań f ($A = 0,1$ mm), prędkości obrotowej n na parametry obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

10.1.5. Obróbka ECM drgającej skrętnie powierzchni obrotowej

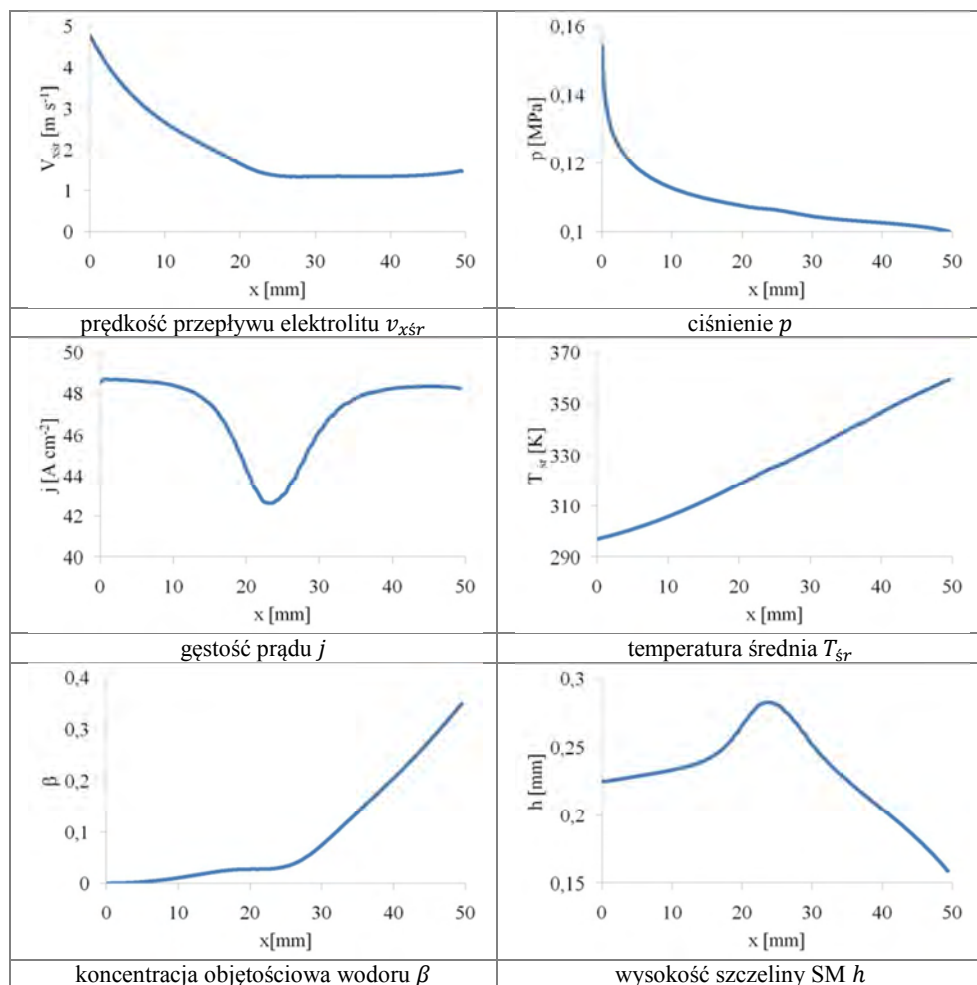




Rys. 10.5. Wpływ: a) częstotliwości drgań f ($\gamma = 5$ deg) b) amplitudy γ ($f = 5$ Hz) na rozkłady parametrów obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

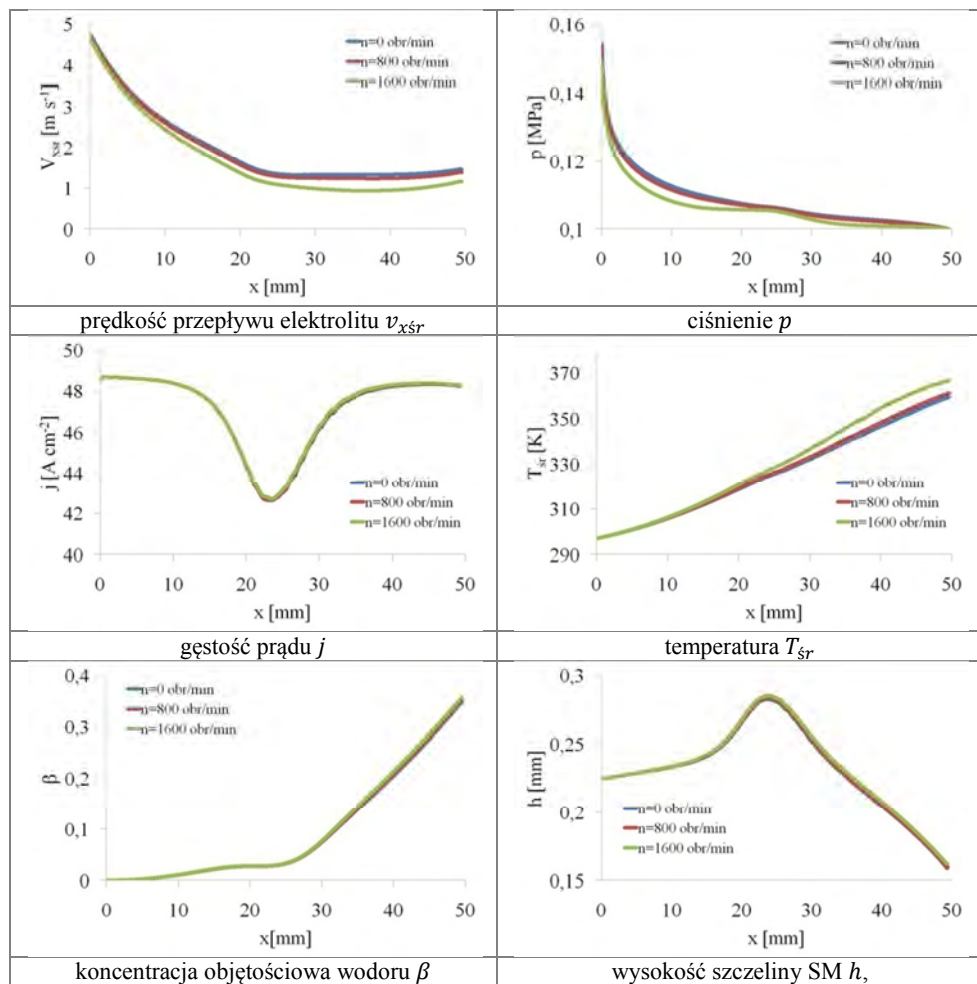
10.2. ROZKŁADY PARAMETRÓW OBRÓBKİ ECM POWIERZCHNI OBROTOWYCH ZAKRZYWIONYCH

10.2.1. Obróbka ECM nieruchomej powierzchni obrotowej



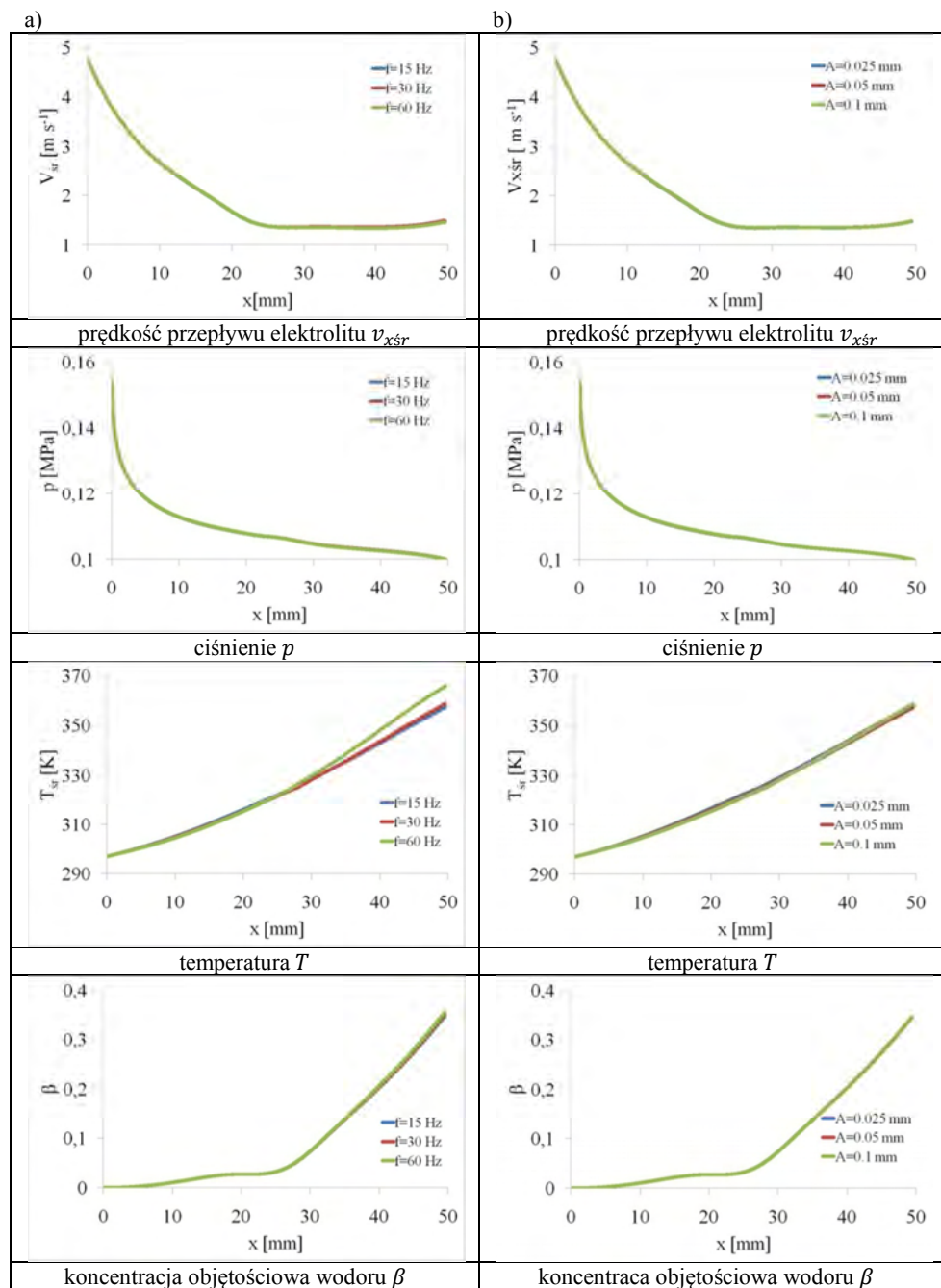
Rys. 10.6. Rozkłady parametrów obróbki wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

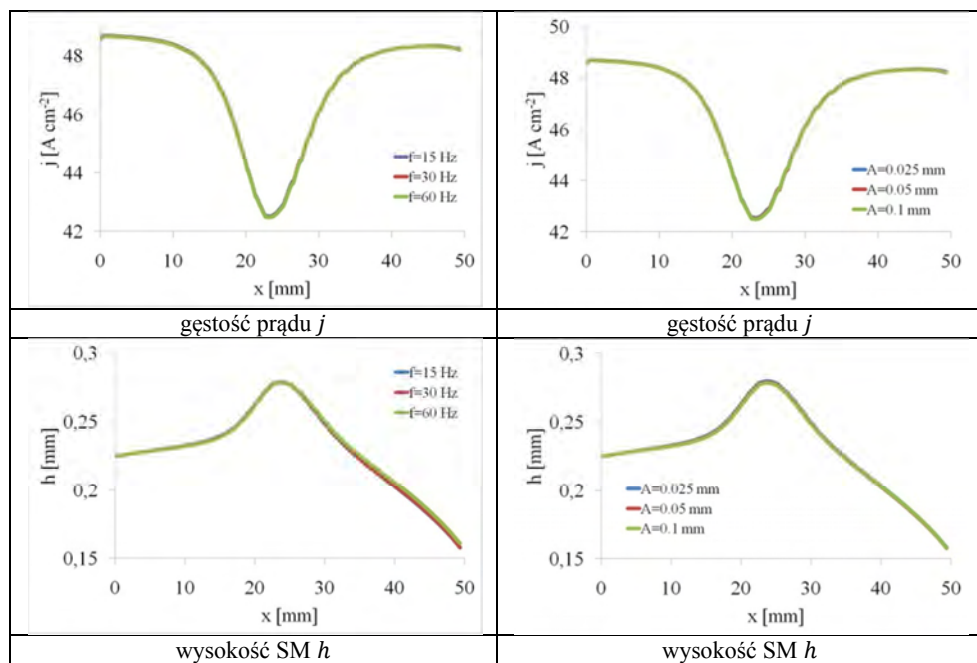
10.2.2. Obróbka ECM wirującej powierzchni obrotowej



Rys. 10.7. Wpływ prędkości obrotowej n na rozkłady parametrów obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

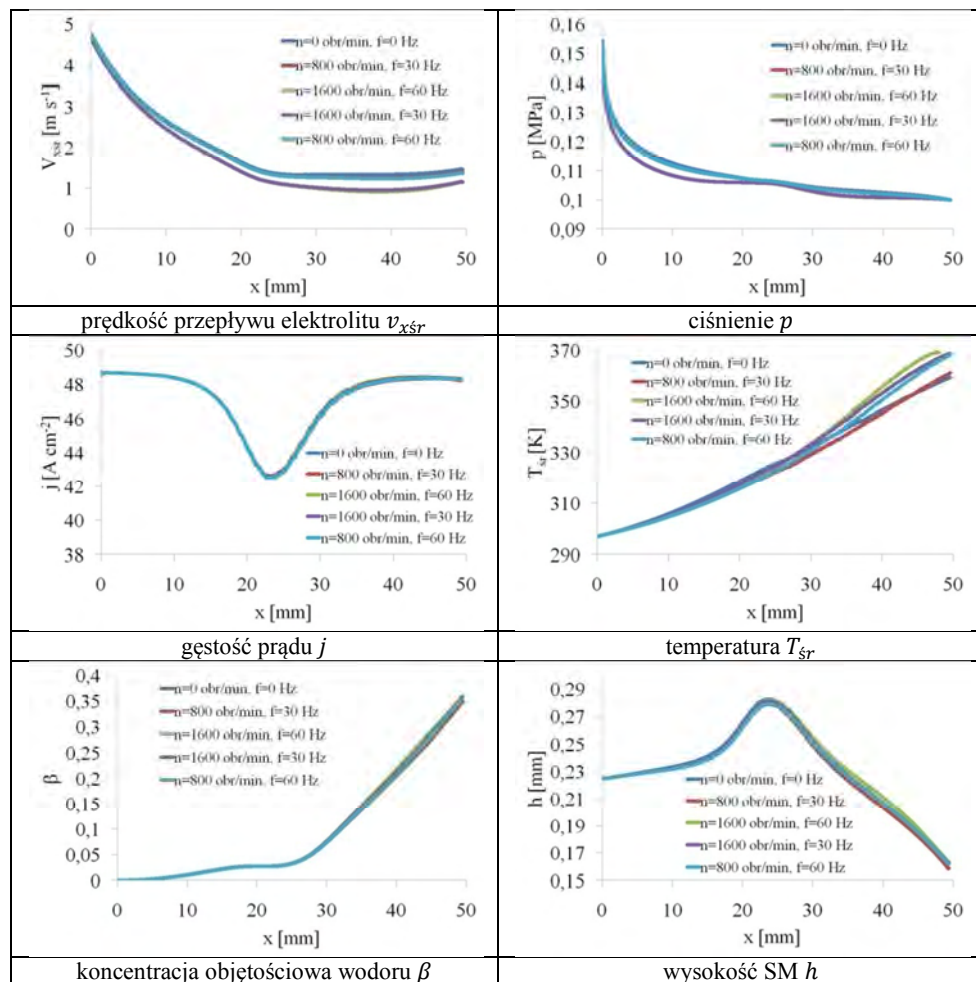
10.2.3. Obróbka ECM drgającej powierzchni obrotowej





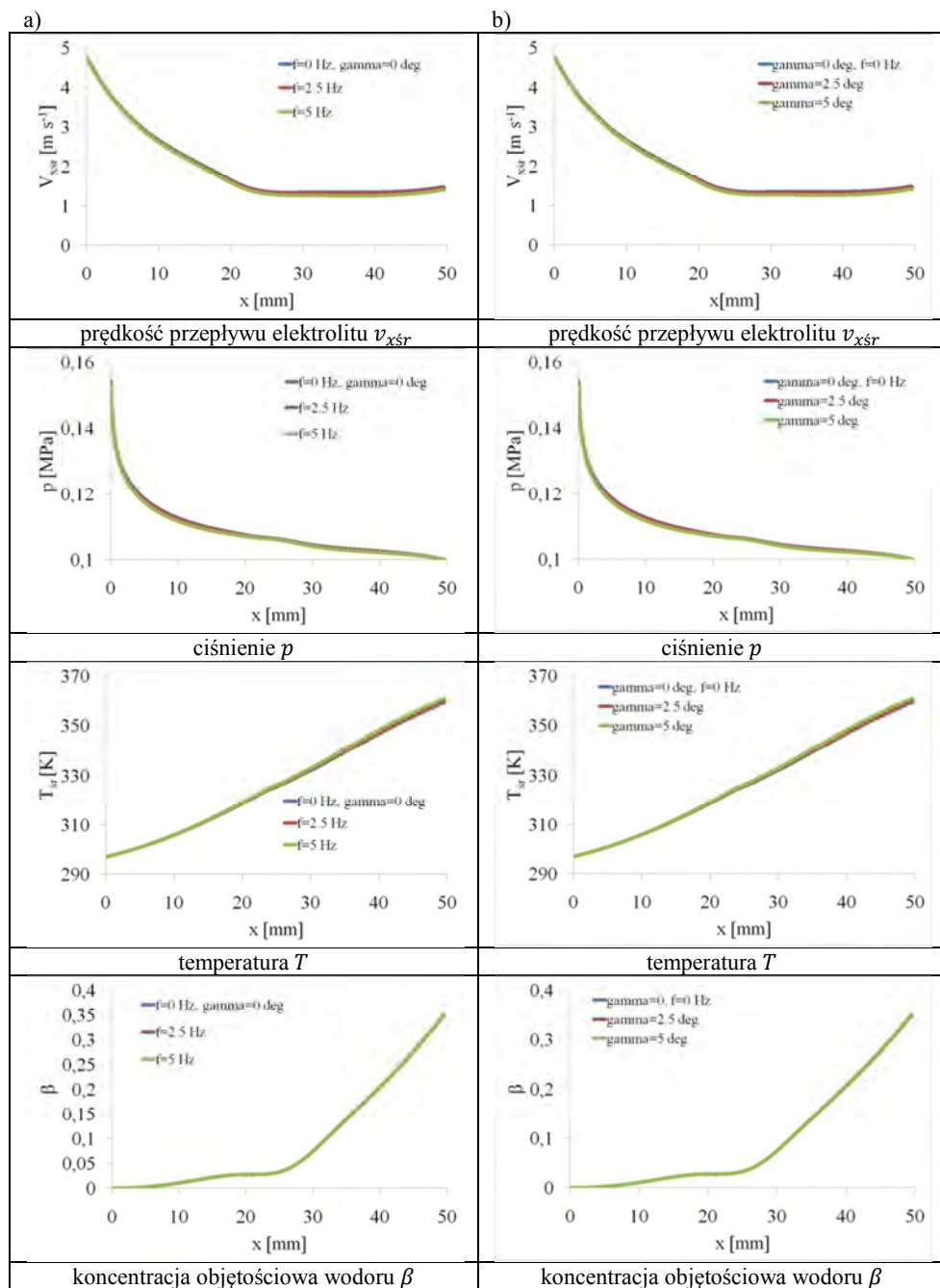
Rys. 10.8. Wpływ: a) częstotliwości drgań f ($A = 0,1 \text{ mm}$) b) amplitudy A ($f = 30 \text{ Hz}$) na rozkłady parametrów obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

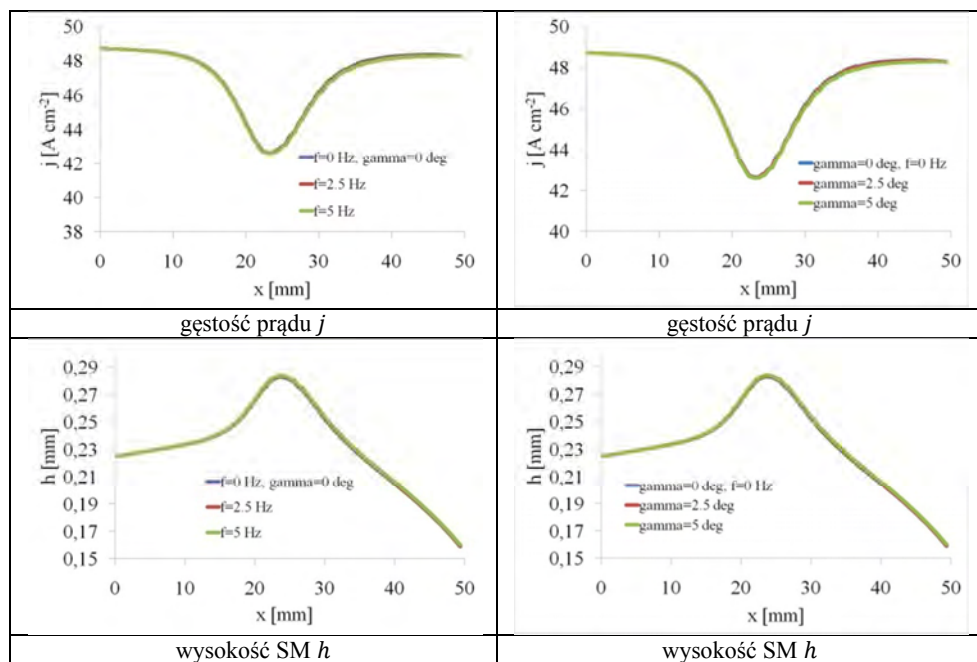
10.2.4. Obróbka ECM wirującej i drgającej powierzchni obrotowej



Rys. 10.9. Wpływ częstotliwości drgań f , prędkości obrotowej n dla zadanej wartości amplitudy $A = 0,1$ mm na parametry obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

10.2.5. Obróbka ECM drgającej skrętnie powierzchni obrotowej





Rys. 10.10. Wpływ: a) częstotliwości drgań f ($\gamma = 5$ deg) b) amplitudy γ ($f = 5$ Hz) na rozkłady parametrów obróbki ECM wzdłuż szczeliny międzyelektrodowej (SM)

ANALIZA I MODELOWANIE PROCESU OBRÓBKİ ELEKTROCHEMICZNEJ KRZYWOLINIOWYCH POWIERZCHNI OBROTOWYCH

Streszczenie

Praca jest próbą kompleksowej analizy i modelowania procesu obróbki elektrochemicznej bezstykowej powierzchni obrotowych, w ogólności powierzchni o dowolnych krzywoliniowych kształtach w różnych układach kinematycznych ruchu elektrody roboczej.

W pracy przedstawiono istotę obróbki elektrochemicznej, jej zalety i wady, dokonano szczegółowej charakterystyki procesu obróbki elektrochemicznej, w szczególności obróbki elektrochemicznej bezstykowej (kształtowej).

Przeprowadzono rozważania odnoszące się do obróbki ECM powierzchni kształtowych, w szczególności do procesu drażenia elektrochemicznego profilową elektrodą roboczą. Zwrócono uwagę na etapy projektowania procesu obróbki ECM oraz przedstawiono istotę modelowania matematycznego procesu obróbki ECM powierzchni kształtowych.

Zaproponowano opis matematyczny ewolucji kształtu powierzchni obrotowych o dowolnym krzywoliniowym zarysie. Opisano procesy fizykochemiczne obróbki (procesy związane z przepływem ładunku, hydrodynamiczne, cieplne, elektrodowe). Sformułowano układ równań wynikający z zasad zachowania masy, pędu, energii opisujący w ogólności przepływ ośrodka wielofazowego w szczelinie międzyelektrodowej. Dokonano odpowiednich uproszczeń, formułując ostateczną postać wektorową układu równań ruchu mieszanki elektrolitu i wodoru opisującego przepływ ośrodka podczas procesu obróbki ECM.

Przedstawiono konfigurację pola przepływu mieszanki elektrolitu i wodoru w szczelinie międzyelektrodowej dla którego sformułowano w krzywoliniowym ortogonalnym układzie współrzędnych równania ruchu odpowiednio, dla przepływu laminarnego i turbulentnego. Sformułowano układ równań ruchu mieszanki słuszny dla przepływu trójwymiarowego uproszczono do postaci opisującej przepływ osiowosymetryczny. W obszarze przepływu laminarnego wyróżniono dwie klasy oszacowań odniesione do składowych prędkości i ciśnienia, na podstawie których, przedstawiono układy równań ruchu opisujące stosowne klasy przepływu mieszanki elektrolitu i wodoru. Przepływ turbulentny opisano za pomocą uśrednionego układu równań Naviera-Stokesa (równań Reynoldsa), dokonując stosownych uproszczeń charakterystycznych dla przepływów w cienkich warstwach. Dla przedstawionych równań sformułowano warunki brzegowe. Omówiono metody analityczne i numeryczne rozwiązania przedstawionych równań ruchu mieszanki elektrolitu i wodoru. Sformułowano całki równań ruchu dla przepływu laminarnego i turbulentnego, przedstawiając rozkłady prędkości i ciśnienia w szczelinie międzyelektrodowej oraz koncentracji objętościowej wodoru w warunkach przepływu laminarnego i turbulentnego.

Przeprowadzono analizę numeryczną procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych. Do rozwiązania równania ewolucji kształtu przedmiotu obrabianego zaproponowano metodę numeryczną Eulera.

Równanie wynikające z zasady zachowania energii rozwiązano MRS. Biorąc pod uwagę dokładność i stabilność schematu numerycznego dla rozwiązania problemu,

zastosowano metodę Cranka-Nicholsona. Przybliżone równanie różnicowe rozwiązano metodą iteracji.

Praca zawiera opis metodyki projektowania geometrii elektrody roboczej. Obliczeniowa korekcja geometrii elektrody roboczej zwana zagadnieniem odwrotnym jest podobna do korekcji elektrody uzyskanej w wyniku kolejnych prób doświadczalnych.

Sformułowano algorytm symulacji komputerowej procesu obróbki elektrochemicznej i projektowania elektrody roboczej metodą korekcji.

Przedstawiono opis opracowanego w środowisku Delphi 7 programu komputerowego symulacji obróbki elektrochemicznej powierzchni obrotowych Sym_ECM/CAM_2.0.

Przeprowadzono symulacje numeryczne procesu obróbki ECM powierzchni kształtowych osiowosymetrycznych. Analizie numerycznej poddano proces kształtowania elektrochemicznego dla trzech charakterystycznych powierzchni obrotowych, wyznaczających szczelinę międzyelektrodową: stożkowych, kulistych i o dowolnym zarysie krzywoliniowym. Symulacje numeryczne przeprowadzono dla różnych konfiguracji kinematycznych ruchu elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego.

Badania doświadczalne wykonano na zaproponowanym stanowisku badawczym dostosowanym do badań eksperymentalnych procesu obróbki ECM powierzchni obrotowych. Uwagę skierowano na badania weryfikujące wariant obróbki ECM o złożonym ruchu przedmiotu obrabianego PO i elektrody roboczej ER. Badania weryfikacyjne polegały na porównaniu kształtu przedmiotu obrabianego PO zmierzonego po obróbce elektrochemicznej w zadanym czasie obróbki z wynikami symulacji komputerowej przy takich samych parametrach obróbki.

W podsumowaniu pracy omówiono otrzymane wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych oraz sformułowano przewidywane możliwości dalszych badań w zakresie podjętego tematu podjętego w pracy.

ANALYSIS AND MODELING OF ELECTROCHEMICAL MACHINING OF CURVILINEAR ROTARY SURFACES

Summary

This work is an attempt to make a complex analysis and a model of the electrochemical machining process for contactless rotary surfaces, generally speaking, randomly shaped curvilinear surfaces and for various kinematic positions of the tool electrode.

In this work there has been presented the operation principle of electrochemical machining, its advantages and disadvantages. Also a detailed characteristics of this kind of machining, especially a contactless (shaping) electrochemical machining has been presented.

ECM machining of shaping surfaces, especially the process of electrochemical drilling with the use of a profiled tool electrode, has been studied. Attention has been paid to the ECM process design stages and the mathematical modeling process principle of ECM for shaping surfaces has been presented as well.

A mathematical description of the shape evolution of rotary surfaces with any curvilinear profile has been proposed and physical-chemical phenomena accompanying the process (processes connected with the load flow, hydrodynamic, thermal and electrode-related) have been described. A system of equations, resulting from the rules of mass, momentum and energy conservation, describing the flow of a multi-phase medium through the inter-electrode gap, has been formulated. Appropriate simplifications have been made in order to formulate the final vector representation of the electrolyte and hydrogen mixture motion equation accounting for the medium flow during the ECM process.

Configuration of the field of the electrolyte and hydrogen mixture flow through the inter-electrode gap has been presented, for which motion equations have been formulated in a curvilinear orthogonal system of coordinates, respectively, for a laminar and turbulent flow. The formulated system of equations of the mixture motion which is right for a three-phase flow has been reduced to a form describing an axial-symmetrical flow. Two estimation classes referred to components of speed and pressure have been distinguished within the area of laminar flow, and on their basis systems of motion equations describing adequate classes of the electrolyte and hydrogen mixture have been presented. Turbulent flow has been described by means of averaged Navier-Sokes system of equations (Reynold equation) using appropriate simplifications characteristic for flows through thin layers. Boundary conditions have been formulated for the presented equations.

Analytical and numerical methods for solving the formulated motion equations of the electrolyte and hydrogen mixture flow have been discussed. Integrals of motion equations for laminar and turbulent flows have been formulated by presenting distributions of speed and pressure in the inter-electrode gap and hydrogen volume concentration in the conditions of laminar and turbulent flows.

A numerical analysis of the ECM process of rotary surfaces has been made. Euler's numerical method has been proposed for solving an equation of the work-piece shape evolution.

The equation resulting from the principle of energy conservation has been solved by MRS. Crank-Nicholson method has been used to solve the problem in order to provide accuracy and stability of the numerical scheme.

Approximate differential equation has been solved with the use of iteration method.

This work contains a description of methodology for the tool-electrode geometry design. Computing correction of the tool-electrode geometry referred to as an inverse problem is similar to correction of tool-electrode obtained by successive experimental tests.

Algorithms for the electrochemical machining process computer simulation and the tool-electrode design by correction method have been formulated.

There has also been presented a description of computer program simulation developed in Delphi 7 environment as well as electrochemical machining of rotary surfaces Sym ECM/CAM 2.0.

Numerical simulations of ECM machining of axial-symmetrical shaping surfaces have been performed within the research. The process of electrochemical shaping has been analyzed numerically for three characteristic rotary surfaces determining the inter-electrode gap, such as: cone-shaped, spherical and random shaped curvilinear surfaces. Numerical simulations have been performed for different kinematic configurations of the tool-electrode and work-piece motion.

Experimental tests have been performed on a proposed test stand adjusted to the demands of ECM machining of curvilinear surfaces. Attention has been focused on verification of ECM machining involving complex motion of the work-piece and tool-electrode. Verification tests based on comparing the work-piece shape, measured after electrochemical machining, in a given time, with the results of computer simulation for the same machining parameters have been performed.

In the summary of this work, the results of theoretical and experimental tests have been discussed and possibilities to conduct further test in this field have been provided.