

Marek ROZENEK¹

MODEL HOMOGENICZNY IMPULSOWEJ OBRÓBKIE ELEKTROCHEMICZNEJ

Tradycyjny proces przygotowania procesu technologicznego, wykonanie elektrod-narzędzi, dobór parametrów obróbki, jest długotrwały i kosztowny. Jedną z najskuteczniejszych metod redukcji kosztów jest modelowanie i symulacja komputerowa procesu. W artykule przedstawiono założenia oraz opis matematyczny modelu homogenicznego obróbki elektrochemicznej impulsowej wraz z wynikami symulacji komputerowej. W szczególności zaprezentowano wyniki dotyczące wpływu parametrów procesu na przebiegi: gęstości prądu w impulsie, temperatury i zmiany koncentracji fazy gazowej.

1. WSTĘP

Obróbka elektrochemiczna ECM, należy do jednych z najbardziej efektywnych sposobów wytwarzania części o złożonych kształtach, zarówno z materiałów łatwo jak i trudnoskrawalnych. Główne trudności w zastosowaniu ECM w przemyśle związane są z projektowaniem technologii, obejmującej konstrukcję geometrii elektrody roboczej ER i dobór warunków obróbki. Wiąże się to z wyznaczeniem geometrii powierzchni czynnej ER oraz parametrów elektrycznych, kinematycznych, hydrodynamicznych, składu i własności elektrolitu. Najczęściej, w zakładach przemysłowych odbywa się to metodą kolejnych prób i korekcji. Metoda ta jest bardzo pracochłonna i kosztowna, przy tym nie wiadomo czy przy innych warunkach i parametrach obróbki nie uzyskałoby się wyników lepszych, zwłaszcza dotyczących dokładności powierzchni obrabianej.

Cechą szczególną ECM jest ściśle powiązanie warunków fizycznych panujących w strefie obróbki z rozkładem grubości szczeliny między elektrodami, która zmienia się w czasie procesu i wzdłuż przepływu elektrolitu oraz zależy od kształtu obrabianego. Zmiana jednego z parametrów obróbki np. napięcia roboczego czy prędkości ER, powoduje zmiany kształtu końcowego, a więc dla uzyskania zadanego kształtu niezbędna jest korekcja geometrii ER.

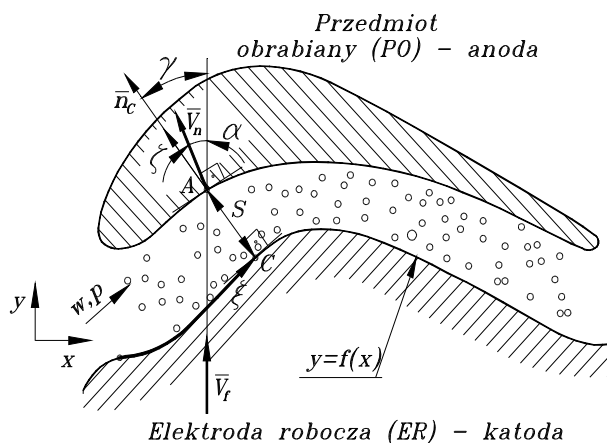
Niektóre niedogodności związane z obróbką elektrochemiczną prądem ciągłym można wyeliminować bądź zredukować przez zastosowanie prądu impulsowego PECM. W obróbce elektrochemicznej impulsowej roztwarzanie zachodzi cyklicznie w takt

¹ Politechnika Warszawska, Instytut Technik Wytwarzania

podawania impulsów prądowych, natomiast w czasie przerwy między nimi następuje ewakuacja produktów obróbki [2-4]. Proces ten mimo mniejszej wydajności, wynikającej z przerw w roztwarzaniu, pozwala na prowadzenie procesu przy wielkościach szczelin nie osiągalnych przy obróbce elektrochemicznej prądem stałym (poniżej 0,2mm). Zmniejszenie szczeliny międzyelektrodowej przekłada się na zwiększenie dokładności i łatwiejsze projektowanie elektrody roboczej. Uproszczenie to w niektórych przypadkach może sprowadzić się do wykonania elektrody roboczej jako negatywu przedmiotu obrabianego, skorygowanego o wielkość szczeliny między elektrodami. Realizacja procesu przy małych szczelinach powoduje, że procesy elektrochemiczne zachodzą z dużo większą prędkością, wynikającą z dużych gęstości prądu. Ze względu na złożoność procesu obróbki elektrochemicznej i trudności w jego monitorowaniu, a także braku narzędzi typu CAD-CAM dla PECM, celowe jest realizowanie prac nad modelowaniem i tworzeniem oprogramowania symulującego proces. Poniżej zaprezentowany zostanie jeden z modeli, który może być wykorzystany zarówno do zastosowań praktycznych jak i nauki o PECM dla celów dydaktycznych.

2. ZAŁOŻENIA DO MODELU HOMOGENICZNEGO

Podczas obróbki elektrochemicznej, czy to prądem stałym, czy impulsowym, procesom roztwarzania anodowego towarzyszą zjawiska wymiany ciepła i powstawania fazy gazowej. Powodują one zmianę przewodności elektrycznej, a także cieplnej elektrolitu, ośrodka bezpośrednio uczestniczącego w procesie.



Rys. 1. Schemat szczeliny międzyelektrodowej wypełnionej ośrodkiem dwufazowym (elektrolit – gaz, model homogeniczny)

Fig. 1. Scheme of interelectrode gap for homogeneous model

W PECM przy zastosowaniu krótkich impulsów (np. < 5ms) w szczelinie międzyelektrodowej można wyróżnić strefy dwufazowe wypełnione elektrolitem i gazem (przykatodową i przyanodową) oraz strefę jednofazową czystego elektrolitu [4],[5].

W zależności od warunków hydrodynamicznych, sprawności prądowej, wydzielania się wodoru i czasu trwania impulsu można budować modele warstwowe, gdy na końcu szczeliny nie następuje całkowite wypełnienie ośrodkiem dwufazowym lub modele pośrednie są warstwowo – homogeniczne. Przy stosowaniu krótkich impulsów ($t_p < 2\text{ms}$) najbardziej zbliżonymi do rzeczywistych warunków będą modele termiczne, gdzie zakłada się, że decydującym czynnikiem wpływającym na przewodność elektrolitu jest temperatura. Należy nadmienić, że czas impulsu elektrycznego nie jest jedynym kryterium stosowalności danego modelu. Jak wspomniano wcześniej istotne są również parametry przepływu elektrolitu. Stąd celowym jest stosowanie jako podstawowego kryterium liczby Strouhala (1), która to wiąże ze sobą te parametry.

$$Sh = \frac{L}{wt_p} \quad (1)$$

L – długość szczeliny,

w – średnia prędkość elektrolitu w szczelinie,

t_p – czas impulsu elektrycznego.

Przy dostatecznie długim czasie impulsu (mała liczba Strouhala) i wysokiej wydajności prądowej elektrolitu szczelina wypełniona jest mieszaniną elektrolitu i gazu. Koncentracja fazy gazowej zmienia się w różnych przekrojach. W najprostszym modelu homogenicznym PECM zakłada się, że koncentracja fazy gazowej zmienia się jedynie w czasie, a parametry hydrodynamiczne tj. prędkość przepływu i ciśnienie elektrolitu są równe wartościom średnim. Przyjęte szczegółowe założenia to:

- prawo Ohm'a ekstrapoluje się na całą grubość szczeliny S , a wpływ procesów elektrodowych i dyfuzyjnych uwzględnia się poprzez wprowadzenie polaryzacji $E(i, t_p)$ do warunków brzegowych, w równaniu opisującym pole elektryczne w szczelinie międzyelektrodowej,
- charakterystyki: obrabialności elektrochemicznej $k_v(i, t_p)$ i polaryzacji elektrod $E(i, t_p)$ są znane z badań doświadczalnych, przy czym, w celu uproszczenia obliczeń można założyć wartość stałą, uśrednioną dla spodziewanego zakresu gęstości prądu,
- pomija się wymianę ciepła przez elektrody,
- przewodność elektryczna ośrodka dwufazowego opisana jest zależnością Bruggeman'a, po uwzględnieniu przyrostu temperatury $\theta = T - T_0$ [1] tj.:

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

gdzie:

θ - przyrost temperatury,

α_T – temperaturowy współczynnik przewodności elektrycznej,

β – koncentracja objętościowa fazy gazowej,

- przestrzeń międzyelektrodowa wypełniona jest ośrodkiem dwufazowym,
- średnia prędkość przemieszczania się pęcherzyków gazu jest równa prędkości elektrolitu,

- ciśnienie w szczelinie międzyelektrodowej jest równe ciśnieniu średniemu, nie uwzględnia się zmian ciśnienia wzdłuż szczeliny,
- pomija się wpływ napięcia powierzchniowego na ciśnienie w pęcherzyku gazu, zakłada się równość ciśnienia elektrolitu z ciśnieniem panującym w pęcherzyku gazu, pomija się również czas tworzenia się pęcherzyka gazu,
- gęstość ośrodka opisano równaniem $\rho = \rho_e \cdot (1 - \beta) + \rho_g \cdot \beta$, biorąc pod uwagę, że gęstość elektrolitu ρ_e jest ok. 1000 razy większa od gęstości gazu ρ_g , przyjęto zastępczą gęstość ośrodka wyrażoną zależnością:

$$\rho = \rho_e \cdot (1 - \beta),$$

- założono, że w szczelinie wydziela się jedynie wodór i cały zawarty jest w pęcherzykach gazu.

3. MODEL MATEMATYCZNY

Układ równań opisujący proces dla pojedynczego impulsu ma następującą postać:

- zmiana szczeliny w czasie pojedynczego impulsu:

$$\frac{dS}{dt} = K_v \cdot \frac{\kappa_0 \cdot (1 + \alpha_T \theta) \cdot (1 - \beta)^{3/2} (U - E)}{S},$$

- zmiana gęstości prądu:

$$i = \frac{\kappa_0 \cdot (1 + \alpha_T \theta) \cdot (1 - \beta)^{3/2} (U - E)}{S},$$

- wydzielający się wodór:

$$\frac{d(\beta \cdot S \cdot p/T)}{dt} = \frac{10^5}{273} \eta_H \cdot K_V^H \cdot \frac{\kappa_0 \cdot (1 + \alpha_T \theta) \cdot (1 - \beta)^{3/2} (U - E)}{S}, \quad (3)$$

- wydzielanie się ciepła:

$$\frac{d[(1 - \beta) \cdot \theta \cdot S]}{dt} = \frac{\kappa_0 \cdot U}{\rho_e \cdot C_p} \cdot \frac{(1 + \alpha_T \theta) \cdot (1 - \beta)^{3/2} (U - E)}{S},$$

z warunkami początkowymi: dla $t = 0$, $S = S_0$, $\beta = 0$, $\theta = 0$.

Rozwiązanie powyższego układu równań pozwoli na wyznaczenie takich charakterystyk jak: $S(t)$, $\beta(t)$, $\theta(t)$, $i(t)$, dla różnych kształtów impulsu $U = U(t)$.

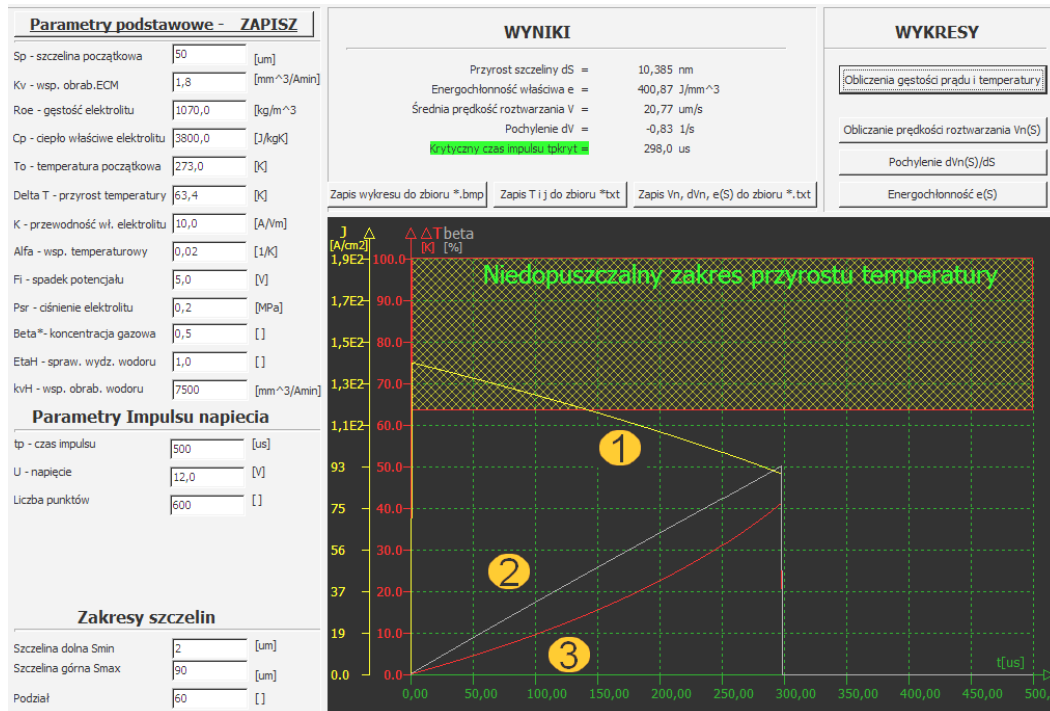
W przypadku, gdy w czasie przerwy między impulsami następuje całkowita wymiana medium, rozwiązanie układu równań dla pojedynczego impulsu można przenieść na ciąg impulsów z nowymi warunkami początkowymi dla każdego kolejnego impulsu. Można wówczas wyznaczyć zmianę szczeliny międzyelektrodowej w czasie kształtowania elektrochemicznego ciągiem impulsów lub pakietem impulsów, przy różnych wariantach kinematyki elektrod. Można stwierdzić czy występuje w procesie kształtowania stan quasi-ustalony, tj. okresowe ustalenie się wartości szczeliny, przy jednoczesnym zbadaniu ryzyka wystąpienia stanu krytycznego, związanego z wrzeniem elektrolitu lub osiągnięciem zbyt dużej koncentracji fazy gazowej.

4. SYMULACJA KOMPUTEROWA PECM

Rozwiązanie układu równań (3), z zastosowaniem metody różnic skończonych, możliwe było przy założeniu, że nie zmienia się wartości szczeliny w trakcie pojedynczego impulsu. Popełniany błąd, jest nieznaczny ze względu na to, że wartość usuniętego materiału jest znikomo mała w stosunku do wartości szczeliny międzyelektrodowej. W przypadku stosowania ciągu impulsów lub pakietów impulsów, wartość szczeliny korygowana jest o obliczony przyrost szczeliny. Na rys. 2 pokazany jest typowy zrzut ekranu oprogramowania do symulacji komputerowej procesu, którego część po lewej stronie zarezerwowana jest dla wprowadzania danych, górna dla wyników liczbowych, a prawa dolna dla prezentacji wyników w postaci graficznej.

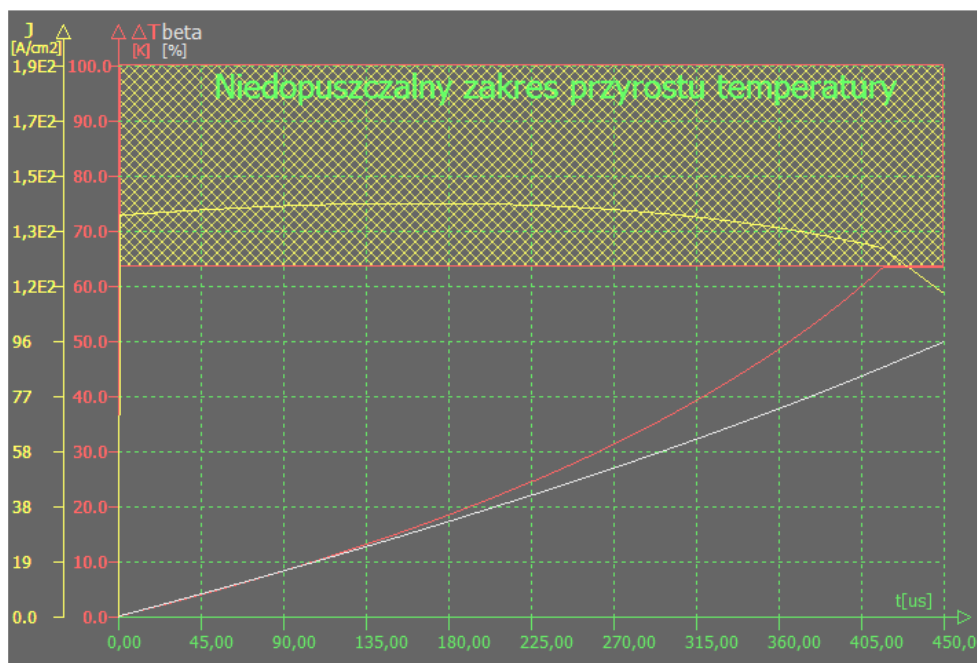
Z rys. 2 widać, że z upływem czasu (impulsu) gęstość prądu maleje pomimo wzrostu temperatury elektrolitu. Zaznacza się tu znaczący wpływ wydzielającego się gazu, którego koncentracja w czasie impulsu wzrasta do około 50 %. W tym przypadku znajdujemy się blisko granicy, kiedy to może dochodzić do wystąpienia stanu krytycznego, związanego z nadmierną ilością gazu w elektrolicie. Może to spowodować przeskok iskry elektrycznej między elektrodami. W przypadku zbyt dużej koncentracji fazy gazowej dochodzić może też do zatykania przepływu elektrolitu na końcu szczeliny międzyelektrodowej, w wyniku czego, w tym rejonie może dochodzić do gwałtownego wzrostu temperatury i wrzenia elektrolitu.

Na rys. 3 przedstawiono zmiany wymienionych wielkości dla elektrolitu ze sprawnością prądową wydzielania wodoru równą 1 (np. NaCl). W przypadku elektrolitów ze sprawnością prądową wydzielania wodoru, np. 0,5 (NaNO₃) przebiegi tych wielkości mają już inny charakter. Zmiany gęstości prądu są nieznaczne ok. 30A/cm², gdy poprzednio ponad 60 A/cm². Wynika to z innych relacji pomiędzy powstawaniem fazy gazowej i przyrostu temperatury. Przyrost temperatury ma decydujący wpływ na przewodność elektrolitu, powodując jej zwiększenie. Maksymalny czas impulsu, ze względu na osiągnięcie założonej wartości granicznej temperatury lub koncentracji fazy gazowej, dla elektrolitu ze sprawnością prądową wydzielania wodoru równą 0,5, wydłużył się w omawianym przypadku do 410μs, podczas gdy poprzednio wynosił 300μs.



Rys. 2. Zrzut ekranu programu symulacyjnego dla modelu homogenicznego: 1 – zmiana gęstości prądu, 2 – zmiana koncentracji fazy gazowej, 3 – przyrost temperatury

Fig. 2. Capture screen of simulation program for base homogeneous model 1 – change of current density, 2 – change of gas concentration, 3 – increase temperature

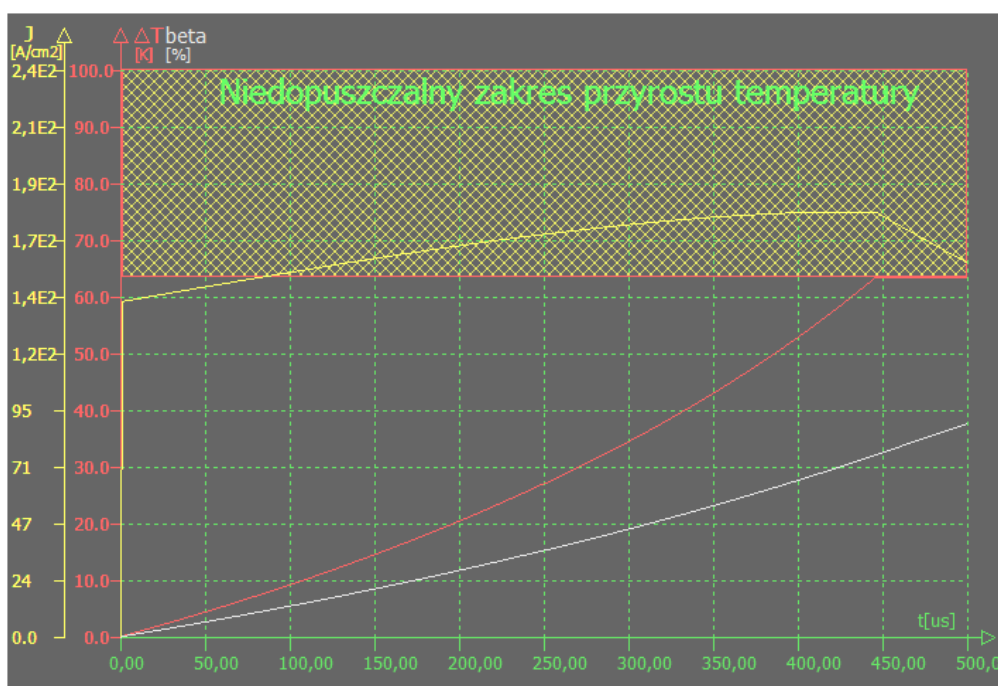


Rys. 3. Zmiany gęstości prądu, przyrostu temperatury i koncentracji fazy gazowej dla elektrolitu ze sprawnością prądową wydzielania wodoru 0,5

Fig. 3. Change of current density, concentration of gas and increase temperature increase temperature for current efficiency of hydrogen 0,5

Wydłużenie czasu impulsu i zwiększenie średniej gęstości prądu przekłada się na zwiększenie grubości usuniętego materiału, a więc i wydajności procesu.

Innym sposobem, uniknięcia negatywnego wpływu fazy gazowej na proces, często stosowanym w praktyce PECM i ECM jest zwiększenie ciśnienia w szczelinie międzyelektrodowej. Na rys. 4 pokazano przebiegi zmian wyżej wymienionych podstawowych wielkości, przy ciśnieniu średnim w szczelinie równym 0,7MPa.



Rys. 4. Zmiany gęstości prądu, przyrostu temperatury i koncentracji fazy gazowej dla ciśnienia elektrolitu 0,7MPa
 Fig. 4. Change of current density, concentration of gas and increase temperature increase temperature for pressure of electrolyte 0,7MPa

Zwiększenie ciśnienia o 0,5MPa spowodowało ten sam skutek, co zastosowanie elektrolitu o mniejszej sprawności prądowej wydzielenia wodoru. Z przyczyn technicznych zwiększenie ciśnienia wydaje się zabiegiem łatwiejszym i efektywniejszym w rzeczywistych warunkach usuwania produktów obróbki. W przedstawionym przypadku zwiększenie ciśnienia spowodowało wzrost gęstości prądu do 180 A/cm² i wydłużenie czasu impulsu do ok. 450 μ s. Wspomina się tutaj o możliwości wydłużenia czasu impulsu, jednak w praktyce należy dążyć do możliwie najkrótszych czasów impulsu, ze względu m.in. na stopień lokalizacji roztwarzania elektrochemicznego. Jednak zasilacze impulsowe o impulsach rzędu kilku mikrosekund i natężeniu prądu - tysiący amperów są bardzo drogie. Dlatego potrzebna jest znajomość procesu PECM przy dłuższych impulsach, gdyż stwarza to możliwości uniknięcia zjawisk krytycznych. Oprogramowanie pozwala na wyznaczenie charakterystyk $S(t)$, $\beta(t)$, $\theta(t)$, $i(t)$ dla różnych kształtów impulsu $U = U(t)$. Z symulacji przeprowadzonej przez autora wynika, że najkorzystniejsze wyniki uzyskuje się dla impulsów piłokształtnych i trójkątnych.

5. WNIOSKI

Opracowany model i powstałe na jego bazie oprogramowanie do symulacji procesu jest wygodnym i tanim narzędziem zarówno do poznania procesu PECM jak i do doboru parametrów procesu. Pozwala na wyznaczenie parametrów procesu z jednoczesną kontrolą nieprzekraczania założonych warunków krytycznych. Pozwala na dobór własności elektrolitu. Z badań symulacyjnych wynika, że należy dążyć do zwiększenia ciśnienia elektrolitu w celu uniknięcia niekorzystnego wpływu wydzielenia się fazy gazowej. Pamiętać należy jednak, że zwiększanie parametrów hydrodynamicznych może nie skutkować pozytywnymi efektami ze względu na małe szczeliny stosowane w PECM (duże straty hydrauliczne) i mogące się ujawnić defekty struktury geometrycznej powierzchni związanymi z przepływem elektrolitu. PECM daje możliwość stosowania niższych napięć (małe szczeliny międzyelektrodowe), przez co maleje energochłonność procesu. W celu zwiększenia dokładności obliczeń, możliwe jest np. poprzez zbudowanie modelu, który zawierałby w sobie modele cząstkowe powiązane ze sobą: termiczne, warstwowe homogeniczne. Brak jest jednak na dzień dzisiejszy wyznaczonych warunków umożliwiający w sposób łatwy połączenie tych modeli (jak wykazują badania, czas impulsu – czas powstawania fazy gazowej nie jest jednoznacznym kryterium).

LITERATURA

- [1] BRUGGEMANN A.G., 1935, *Annals Physics*, 24/7.
- [2] KOZAK J., 1976, *Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną bezstykową (ECM)*, Prace naukowe PW, Mechanika, 41.
- [3] ŁUBKOWSKI K., 1980, *Zjawiska fizyczne w szczelinie międzyelektrodowej podczas obróbki elektrochemicznej impulsowej*, Praca doktorska, Politechnika Warszawska.
- [4] ROZENEK M., 1995, *Obróbka elektrochemiczna krótkimi impulsami prądowymi*, Praca doktorska, Politechnika Warszawska.
- [5] ROZENEK M., 2010, *Badania obróbki elektrochemicznej impulsowej (model dwuwarstwowy procesu)*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, KBM, PAN, 30/4.

HOMOGENEOUS MODEL OF PULSE ELECTROCHEMICAL MACHINING

The traditional preparation process is long and expensive (implementation of electrode tools, selection of processing parameters). One of the most effective methods of reducing costs is the modeling and computer simulation of the process. The article presents the assumptions and the mathematical description of the homogeneous model pulse electrochemical machining with the results of computer simulation. In particular, the presented results concerning the influence of process parameters on the waveforms in the pulse current density, temperature, changes in concentration of the gas phase