

Sebastian Skoczypiec
Zakład Niekonwencjonalnych Technologii Produkcyjnych,
Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania

WYBRANE ASPEKTY MODELOWANIA NUMERYCZNEGO PROCESU USECM

Streszczenie: Zapewnienie odpowiednich warunków hydrodynamicznych w szczelinie międzyelektrodowej jest decydującym elementem przy projektowaniu procesu obróbki elektrochemicznej. Jednym ze sposobów poprawy warunków wymiany masy w szczelinie jest wprowadzenie drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej. W referacie przedstawiono rezultaty modelowania numerycznego zjawisk transportu masy zachodzących podczas USECM. Otrzymane wyniki potwierdziły, że drgania ultradźwiękowe wprowadzają jakościową zmianę przepływu w szczelinie.

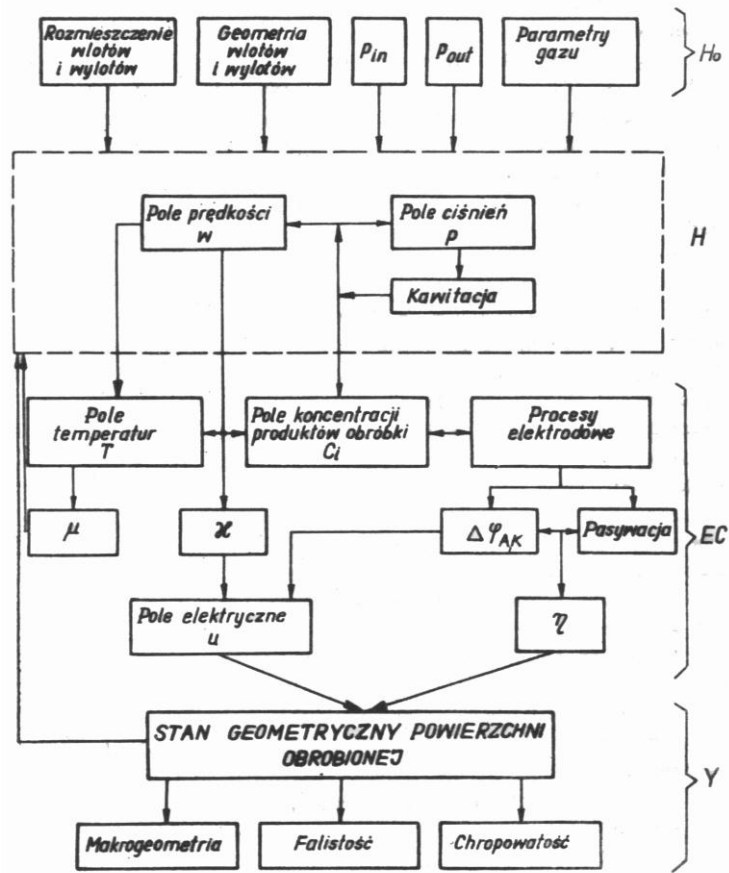
Słowa kluczowe: obróbka elektrochemiczna, drgania ultradźwiękowe, modelowanie numeryczne, CFD.

1. Wprowadzenie.

Zapewnienie odpowiednich warunków hydrodynamicznych w szczelinie międzyelektrodowej, czyli odpowiedniego rozkładu prędkości i ciśnienia, jest decydującym elementem przy projektowaniu procesu obróbki elektrochemicznej. Wynika to z zależności między warunkami hydrodynamicznymi a warunkami wymiany masy, wymiany ciepła oraz właściwościami elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej (Rys. 1). Od tych procesów uzależniony jest rozkład prędkości roztwarzania na powierzchni obrabianej, rozkład chropowatości powierzchni oraz wydajność obróbki.

W warunkach obróbki ECM przepływ w szczelinie międzyelektrodowej jest wielofazowy (wydzielanie się na elektrodach gazu i produktów roztwarzania), trójwymiarowy i niestacjonarny. Istnieje wiele czynników kształtujących przepływ w strefie obróbki a najważniejsze z nich to ukształtowanie wlotu, chropowatość powierzchni oraz wstępne parametry doprowadzonego elektrolitu. Ze względu na kształt i zmienną grubość szczeliny międzyelektrodowej wzdłuż kierunku przepływu, trudnością jest jednoznaczne stwierdzenie rodzaju przepływu. Przepływ laminarny w szczelinie międzyelektrodowej może zmieniać się w turbulentny i odwrotnie. Wszystkie powyższe fakty powodują spore trudności w

kompleksowym zamodelowaniu zjawisk związanych z przepływem elektrolitu w trakcie obróbki ECM. Dlatego też, zdecydowana większość modeli przepływu w szczeliny międzyelektrodowej opierają się na uśrednieniu właściwości elektrolitu wzdłuż grubości szczeliny i rozwiązaniu zagadnienia przy zmieniających się właściwościach elektrolitu wraz z kierunkiem przepływu. Należy zaznaczyć, że jest to w zupełności wystarczające w przypadku analizy procesu roztwarzania elektrochemicznego (np. drażenie).



Rys. 1 Schemat powiązań pomiędzy warunkami hydrodynamicznymi a warunkami wymiany masy, wymiany ciepła i właściwościami elektrolitu w szczeliny międzyelektrodowej [2].

2. Sformułowanie problemu.

Jednym z wariantów obróbki ECM wspomaganą ultradźwiękami jest obróbka elektrodą uniwersalną (USECM-CNC). Przeprowadzone w IZTW badania tej metody obróbki potwierdzają korzystny wpływ drgań ultradźwiękowych również w tym przypadku (wzrost grubości usuniętego naddatku nawet do 50 %).

Badając wpływ ultradźwięków na proces roztwarzania elektrochemicznego nie można wykluczyć, że periodyczne zmiany grubości szczeliny i ich wpływ jedynie na zmiany gradientu potencjału są źródłem zwiększenia grubości usuniętego naddatku. W przedstawionym w pracach [1, 3] modelu matematycznym obróbki ECM - CNC pominięto wpływ hydrodynamiki oraz możliwości wystąpienia nieciągłości roztwarzania anodowego (założono całkowite wypełnienie szczeliny międzyelektrodowej elektrolitem). Poprawność tych założeń potwierdzona została w pracy [1]. Wykorzystując powyższe założenia przeprowadzono symulacje obróbki USECM – CNC [8]. Na podstawie analizy otrzymanych wyników można sformułować następujące wnioski:

- przy założeniu stałych parametrów elektrolitu w szczelinie wprowadzenie do modelu obróbki ECM – CNC drgań ultradźwiękowych elektrody nie wpływa na grubość usuniętego naddatku;
- czas realizacji obliczeń jest bardzo długi i praktycznie uniemożliwia symulacje obróbki z zastosowaniem skomplikowanych trajektorii.

Otrzymane badań wyniki potwierdzają przypuszczenia, że to właśnie spowodowane ultradźwiękami zmiany pola prędkości i ciśnienia elektrolitu mają korzystny wpływ na proces roztwarzania elektrochemicznego. Dlatego też, aby wyjaśnić mechanizm oddziaływania drgań ultradźwiękowych na przepływający w szczelinie elektrolit konieczne jest rozwiązanie zagadnienia turbulентnego, wielofazowego przepływu przez szczelinę międzyelektrodową.

Idealnym narzędziem do rozwiązania tego problemu jest numeryczna mechanika płynów (Computational Fluid Dynamics - CFD). Jest to burzliwie rozwijająca się dziedzina wykorzystująca metody numeryczne do analizy zjawisk związanych z przepływem płynów. Numeryczne rozwiązanie równań opisujących analizowany problem umożliwia uzyskanie informacji o rozkładzie pola prędkości, pola ciśnienia, przepływie ciepła (pole temperatury) i masy (z uwzględnieniem reakcji chemicznych). Możliwości tych metod są bardzo szerokie, dlatego też oprogramowanie to znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i przemysłu m.in.: przemysł biomedyczny, chemiczny, metalurgiczny i motoryzacyjny.

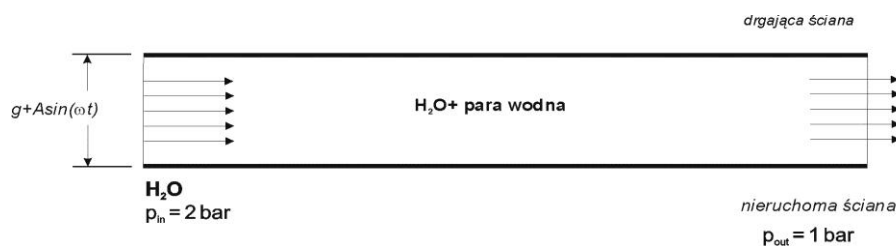
3. Model przepływu dwufazowego w szczelinie międzyelektrodowej

W zaprezentowanym modelu rozważono przepływ cieczy przez szczelinę pomiędzy dwoma płytami. Jedna płyta jest nieruchoma natomiast druga porusza się ruchem drgającym z częstotliwością 20 kHz i amplitudą $10\ \mu\text{m}$ (Rys. 2). Do rozwiązania tego zagadnienia zastosowano zaimplementowany w programie Fluent "Mixture model" [9]. W modelu tym mieszanina dwóch lub więcej faz traktowana jest jako ośrodek ciągły, a zawartość poszczególnych faz określa się poprzez jej udział objętościowy α_k . Są to ciągłe funkcje przestrzeni i czasu a ich suma zawsze równa jest jedności. Równanie ciągłości dla tak potraktowanej mieszaniny przedstawia się następująco [9]:

$$\frac{\partial(\rho_m)}{\partial t} + \nabla(\rho_m \vec{v}_m) = \dot{m} \quad (1)$$

gdzie:

- $\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_k}{\rho_m}$ uśredniona prędkość,
- $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$ - gęstość mieszaniny,
- α_k - zawartości objętościowa fazy k ,
- \dot{m} - opisuje wymianę masy w wyniku zjawiska kawitacji.



Rys. 2. Schemat zamodelowanej szczeliny.

Zastosowany model umożliwia przeanalizowanie zjawiska kawitacji w mieszaninie cieczy i jej pary. W rozważanym przypadku założono, że przez szczelinę przepływa słaby elektrolit i przyjęto dane materiałowe jak dla wody. Ilość tworzonej i zanikającej w danej chwili pary opisana jest następującymi

współczynnikami, zależnymi od ciśnienia prężności pary wodnej p_{sat} (dla $T = const.$) [5]:

gdy $p < p_{sat}$:

$$R_e = C_e \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{3\rho_l}} (1 - f) \quad (2)$$

gdy $p > p_{sat}$

$$R_c = C_c \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p - p_{sat})}{3\rho_l}} f \quad (3)$$

gdzie:

- indeksy l oraz v odnoszą się do cieczy i pary,
- V_{ch} - prędkość charakterystyczna oszacowana na podstawie intensywności turbulencji,
- σ - napięcie powierzchniowe cieczy,
- $C_e = 0.02$ i $C_c = 0.01$ - stałe empiryczne.

Założono, że przepływ w modelowanej szczelinie ma charakter turbulentny opisany modelem $k-\varepsilon$. Wpływ lokalnych turbulencji na zachowanie się pęcherzyków kawitacyjnych został uwzględniony poprzez zmianę progu zmiany fazy z p_{sat} do [5]:

$$p_v = (p_{sat} + 0.39\rho k / 2) \quad (4)$$

gdzie: k to energia kinetyczna turbulencji. Znaczący wpływ na procesy tworzenia się i zanikania pęcherzyków kawitacyjnych ma również ilość rozpuszczonego w cieczy gazu, dlatego też wykorzystany do symulacji model daje możliwości założenia stałej ilości rozpuszczonego gazu na wlocie do szczeliny. Stałe przyjęte do modelu przedstawiono w Tabeli 1.

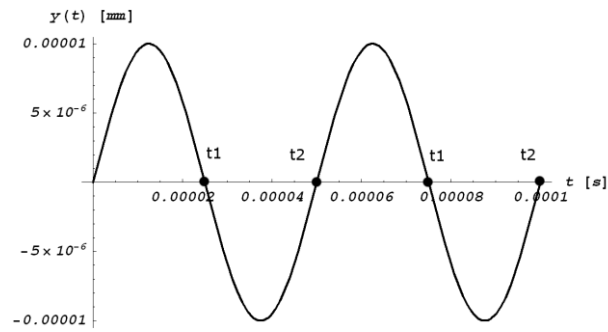
Tabela 1. Parametry analizowanego przypadku przepływu w szczelnie.

Przepływająca mieszanina w szczelinie	<i>Woda + para wodna + gaz</i>
Temperatura cieczy	<i>300 K</i>
Ciśnienie prężności pary wodnej	<i>3540 Pa</i>
Napięcie powierzchniowe	<i>0.0717 N/m</i>
Ilość rozpuszczonego gazu	<i>100 ppm</i>
Ciśnienie cieczy na wlocie do szczeliny	<i>2 bar</i>
Ciśnienie cieczy na wylocie ze szczeliny	<i>1 bar</i>
Częstotliwości drgań ultradźwiękowych	<i>20 kHz</i>
Amplituda drgań ultradźwiękowych	<i>10 μm</i>

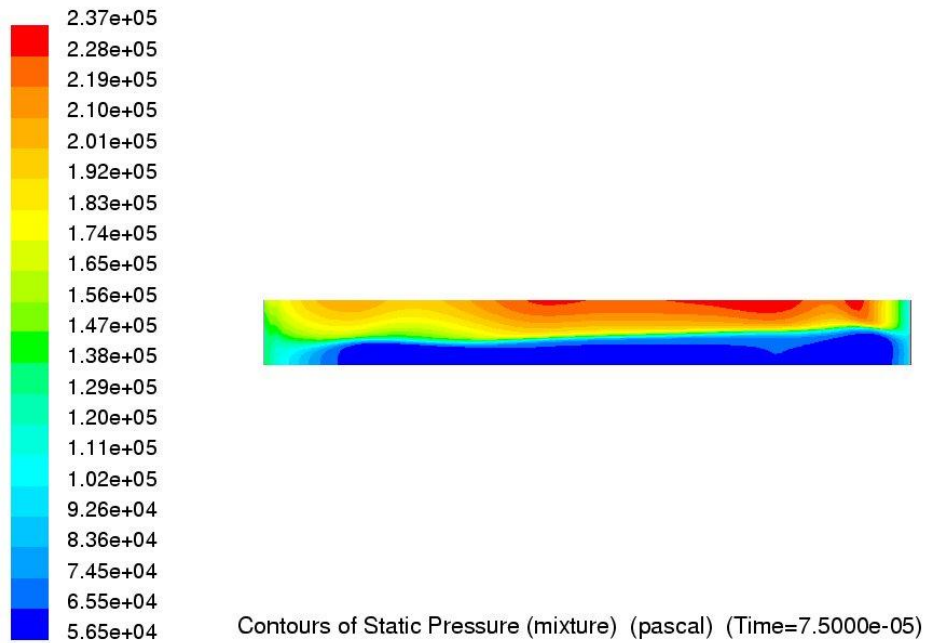
4. Analiza wyników

Otrzymane z obliczeń wyniki zostały przeanalizowane, głównie pod kątem zmian ciśnienia i zawartości fazy gazowej. Z otrzymanych danych wynika, że przepływ w szczelnie ma charakter periodyczny o okresie zgodnym z okresem drgań ultradźwiękowych. Dokładna analiza otrzymanych rozkładów ciśnienia i ich zmian w czasie pokazuje, że w ramach jednego okresu $T = 50 \mu\text{s}$ istnieją dwie charakterystyczne chwile $t_2 \approx (2n+1) \cdot 25 \mu\text{s}$ i $t_1 \approx n \cdot 50 \mu\text{s}$ (Rys. 3). Dla t_1 i t_2 jest, że grubość szczeliny międzyelektrodowej jest taka sama.

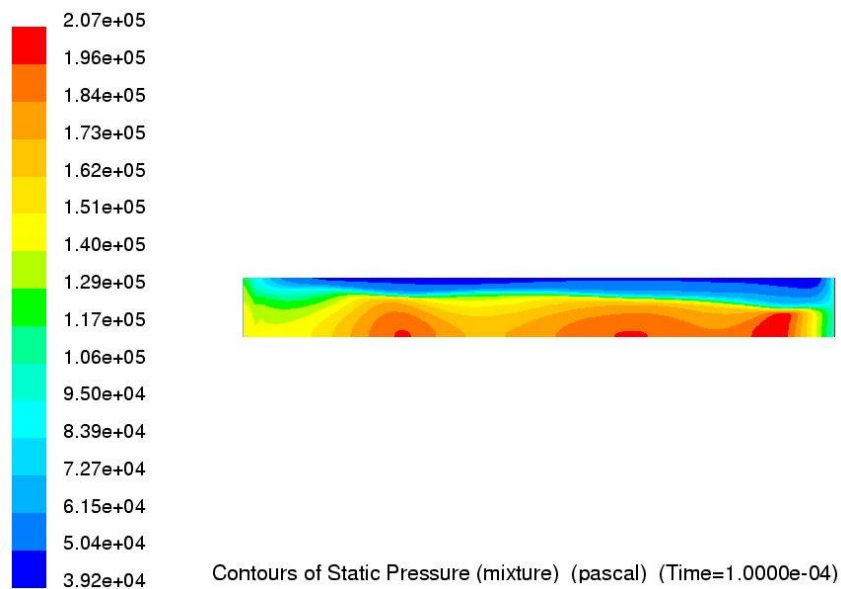
Na Rys. 4 i Rys. 5 przedstawiono rozkład ciśnienia statycznego w szczelinie międzyelektrodowej w chwilach t_1 i t_2 . Na podstawie przeanalizowanych konturów ciśnienia można przypuszczać, że ultradźwięki wprowadzają poprzeczny do kierunku przepływu, zmienny w czasie gradient ciśnienia. W szczelinie istnieją obszary o ciśnieniu mniejszym niż ciśnienie atmosferyczne. Obszary te są miejscami, gdzie powstają korzystne warunki do powstawania pęcherzyków kawitacyjnych, które w kolejnej fazie ruchu elektrody roboczej zapadają się pod wpływem zwiększonego ciśnienia. Potwierdzają to rozkłady objętościowego udziału fazy gazowej dla chwil t_1 i t_2 przedstawione na Rys. 6 i 7.



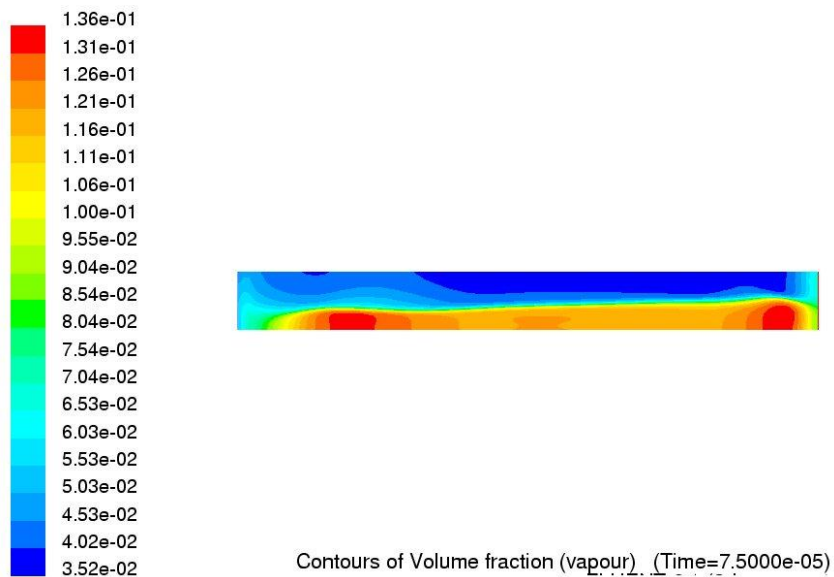
Rys. 3. Punkty $t_1 \approx (2n+1) \cdot 25 \mu\text{s}$ i $t_2 \approx n \cdot 50 \mu\text{s}$ dla których przedstawiono otrzymane wyniki.



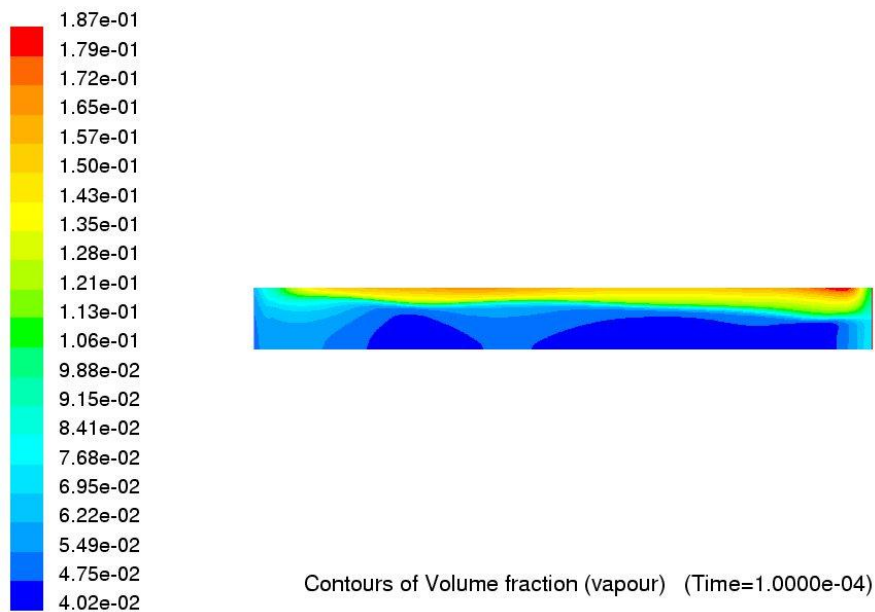
Rys 4. Rozkład ciśnienia w szczelinie w chwili t_1 .



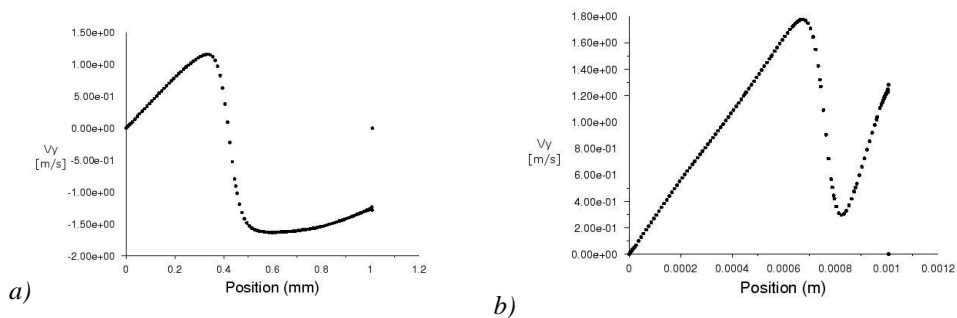
Rys 5. Rozkład ciśnienia w szczelinie w chwili t_2 .



Rys 6. Rozkład udziału objętościowego pary wodnej w szczelinie w chwili t_1 .



Rys 7. Rozkład udziału objętościowego pary wodnej w szczelinie w chwili t_2



Rys. 7. Rozkład składowej v_y wektora prędkości wzdłuż grubości szczeliny, 0 mm – płyta nieruchoma, 1 mm – płyta drgająca, a – dla $t = t_1$, b – $t = t_2$.

Na Rys 7. przedstawiono rozkład składowej v_y wektora prędkości mieszaniny woda i para wodna dla $t = t_1$ (7a) i $t = t_2$ (7b). Analizując zależność na Rys. 7a można stwierdzić, że wartości $v_y > 0$ dla $y < 0.4$ mm świadczą o istnieniu tendencji do kierowania strugi cieczy w kierunku od powierzchni płyty nieruchomej ($y = 0$).

Natomiast $v_y < 0$ dla $y > 0.4 \text{ mm}$ pokazuje, że podobna sytuacja ma miejsce w pobliżu powierzchni drgającej. Należy zwrócić również uwagę, że zarówno dla chwili t_1 jak i chwili t_2 składowa v_y w pobliżu płyty nieruchomej przyjmuje wartości dodatnie. W warunkach ECM takie profile składowej prędkości v_y świadczą o ciągłej tendencji do wymiany elektrolitu w obszarach przyległych do przedmiotu obrabianego.

5. Podsumowanie

Przedstawione powyżej analiza wyników badań zjawisk zachodzących w szczelinie wypełnionej mieszaniną dwóch faz (woda i para wodna) pokazuje, że drgania ultradźwiękowe wprowadzają jakościową zmianę przepływu w szczelinie. Przenosząc wyniki na grunt ECM można z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że drgania intensyfikują procesy wymiany masy oraz ułatwiają ewakuację produktów roztwarzania ze szczeliny międzyelektrodowej.

Słabością przedstawionego modelu jest spora trudność jego weryfikacji. Przeprowadzenie badań doświadczalnych i potwierdzenie otrzymanych wyników jest praktycznie niemożliwe. Głównymi przeszkodami są przede wszystkim wymiary badanej szczeliny oraz czas, w jakim zachodzą badane zjawiska ($< 50 \mu\text{s}$). Otrzymane wyniki znajdują jednak potwierdzenie, pośrednio poprzez rezultaty badań obróbki USECM gdzie wprowadzenie drgań ultradźwiękowych daje bardzo korzystne efekty.

Przedstawiony model przepływu w szczelinie daje jedynie jakościowy obraz wpływu ultradźwięków na zjawiska w trakcie obróbki ECM. Dalsze prace będą miały na celu opracowanie modelu, który uwzględniłby typowy dla ECM przepływ trójfazowy, z uwzględnieniem źródeł masy (wodoru na katodzie oraz roztworzonego materiału na anodzie). Dopiero rozwiązanie takiego zadania pozwoli jednoznacznie stwierdzić o przydatności ultradźwięków do wspomaganie procesu roztwarzania elektrochemicznego

Przeprowadzone prace, pokazały również możliwość wykorzystania metod i oprogramowania CFD do modelowania zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej.

Praca została wykonana w ramach grantu badawczego KBN nr 5 T07D 007 24 pt. *Badania wspomaganego drganiami ultradźwiękowymi procesu obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną*. Obliczenia z wykorzystaniem oprogramowania Fluent zostały przeprowadzone w ACK Cyfronet (nr grantu: MNiI/SGI2800/IOS/003/2004).

6. Bibliografia

- [1] Chuchro M.: *Modelowanie procesu obróbki elektrochemicznej uniwersalną elektrodą kulistą*. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, 1998.
- [2] Kozak J.: *Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną bezstykową (ECM)*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – Mechanika, 1976, Nr 46.
- [3] Kozak J., Chuchro M., Ruszaj A., Karbowski K.: *The Computer Aided Simulation of Electrochemical Process with Universal Spherical Electrodes When Machining Sculptured Surface*. Proceedings of the 15th International Conference on Computer – Aided Production Engineering 1999.
- [4] Ruszaj, A., Zybura – Skrabalak, M., Skoczypiec, S., Żurek R., 2001, Electrochemical machining supported by electrode ultra
- [5] Singhal A.K., Athavale M.M., Li H., Jiang Y.: *Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model*. Journal of Fluids Engineering, Vol. 124, September 2002, str. 617 – 624.
- [6] Skoczypiec S., Ruszaj A.: *Discussion of Cavitation Phenomena Influence on Electrochemical Machining Process*. Proceedings of international conference APE 2004, part III, str. 225 – 232.
- [7] Suslick, K.S, Didenko, Y., Fang, M.M., Hyeon, T., Kolbeck, K.J., McNamara, W.B., Mdleleni, M.M., Wong M., 1999, *Acoustic Cavitation and Its Chemical Consequences*. Phil. Trans. Roy. Soc. A, vol. 357, str. 335 – 353.
- [8] *Obróbka elektrochemiczna wspomagana drganiami ultradźwiękowymi*. Prace Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania. Seria Sprawozdania. Nr 8620.
- [9] FLUENT 6.1 User's Guide.

Abstract:

The aim of investigation was numerical estimation of ultrasonic influence on electrolyte flow condition in the interelectrode gap during Ultrasonically Assisted Electrochemical Machining (USECM). In the paper results of numerical simulation (using Fluent Software) of the water and vapor mixture flow between two electrodes has been presented. One of electrodes is assumed to vibrate with ultrasonic frequency. Authors assumed that mass transfer between two phases is according to Full Cavitation Model [5]. Authors especially focused on distribution of the flow parameters (pressure and velocity) in the gap. Result of calculations gives possibility to state that ultrasonic vibrations significantly influence the mass transport phenomena in the gap.

