

BADANIA ROZPOZNAWCZE OBRÓBK ELEKTROCHEMICZNEJ ELEKTRODĄ UNIWERSALNĄ WSPOMAGANEJ DRGANIAMI ULTRADŹWIĘKOWYMI

Sebastian SKOCZYPIEC, Jan CZEKAJ, Adam RUSZAJ,
Maria ZYBURA-SKRABALAK

Zakład Niekonwencjonalnych Technologii Produkcyjnych, Instytut Obróbki Skrawaniem,
Kraków

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki wstępnych badań doświadczalnych obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną wspomaganą drganiami ultradźwiękowymi (USECM - CNC). Badano wpływ mocy ultradźwięków, napięcia międzyelektrodowego, prędkości posuwu elektrody roboczej oraz grubości początkowej szczeliny międzyelektrodowej na podstawowe wskaźniki technologiczne procesu. Analiza wyników pokazała, że wprowadzenie drgania ultradźwiękowe elektrody roboczej są efektywnym sposobem poprawy wydajności obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną.

Słowa kluczowe: obróbka elektrochemiczna, drgania ultradźwiękowe, metody hybrydowe.

1. WPROWADZENIE

We współczesnym przemyśle maszynowym stosuje się materiały konstrukcyjne o coraz to wyższych właściwościach mechanicznych, co powoduje że obróbka mechaniczna większości z nich jest utrudniona. Alternatywę w takich przypadkach stanowi grupa obróbek erozyjnych, wśród których szczególne miejsce zajmuje obróbka elektrochemiczna (ECM), ponieważ jako jedna z niewielu przebiega bez działania pola wysokich temperatur oraz oddziaływania mechanicznego. Umożliwia to obróbkę materiałów bez wprowadzania istotnych zmian w warstwie wierzchniej.

Jedną z odmian kinematycznych bezstykowej obróbki elektrochemicznej jest obróbka elektrodą uniwersalną (ECM – CNC) [2] w kształcie np. walca, kuli lub prostopadłościanu. Powierzchnia elektrody roboczej jest znacząco mniejsza od powierzchni obrabianej a elektroda porusza się wzdłuż odpowiednio dobranego toru. Główną zaletą tej metody jest większa dokładność obróbki ($T=0.02 \div 0.1 \text{ mm}$) w porównaniu z klasycznym drążeniem elektrochemicznym gdzie $T=0.05 \div 0.5 \text{ mm}$. Wadami ECM – CNC są przede wszystkim problemy ze skutecznym dostarczeniem elektrolitu w strefę obróbki oraz wyraźnie mniejsza wydajność (V_w do $180 \text{ mm}^3/\text{min}$) w porównaniu do drążenia elektrochemicznego (V_w do $80000 \text{ mm}^3/\text{min}$).

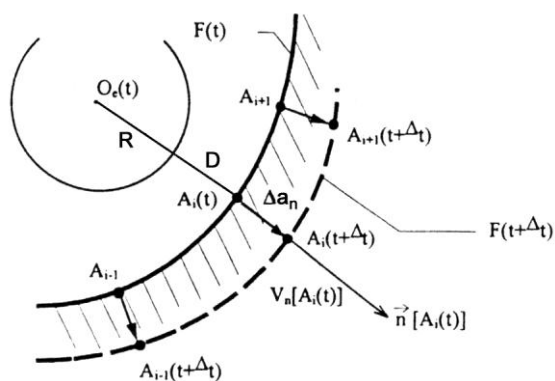
2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Rezultaty badań przedstawione w [1, 3, 5, 6, 7, 8, 9] pozwalają na sformułowanie wniosku że drgania ultradźwiękowe elektrody roboczej mają znaczący wpływ na przebieg procesu roztwarzania elektrochemicznego. Główny wpływ ultradźwięków jest spowodowany kawitacją oraz następstwami tego zjawiska [10]. Ultradźwięki umożliwiają powstawianie pęcherzyków kawitacyjnych w pobliżu powierzchni roboczej (anody). Procesowi zapadania się pęcherzyków towarzyszy powstawanie przy powierzchni anody mikro – strug, które powodują zwiększenie intensywności wymiany masy, ładunku elektrycznego i ciepła, co w rezultacie prowadzi do wzrostu prędkości roztwarzania [1]. Również wyniki badań przeprowadzonych w Instytucie Obróbki Skrawaniem przedstawione w [7, 8, 9] wykazały że zastosowanie drgającej z częstotliwością ultradźwiękową elektrody roboczej powoduje intensyfikację roztwarzania elektrochemicznego.

Jak już wcześniej wspomniano głównymi wadami ECM – CNC są problemy ze skutecznym dostarczeniem elektrolitu w strefę obróbki oraz wyraźnie mniejsza wydajność w porównaniu z drążeniem elektrochemicznym. Biorąc pod uwagę doniesienia literaturowe można stwierdzić, że jednym z sposobów rozwiązania problemów występujących w obróbce ECM – CNC może być wprowadzenie drgań ultradźwiękowych do szczeliny międzyelektrodowej. Poniżej zostaną przedstawione wyniki badań obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną wspomaganej drganiami ultradźwiękowymi (USECM – CNC).

3. MODELOWANIE MATEMATYCZNE

Model matematyczny obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną został przedstawiony w [2]. Znając warunki roztwarzania, początkowy kształt powierzchni obrabianej, kształt oraz trajektorie elektrody roboczej wspomniany model umożliwia uzyskanie kształtu powierzchni obrabianej F dla dowolnej chwili czasu (a w szczególności po zadanym czasie t_k).



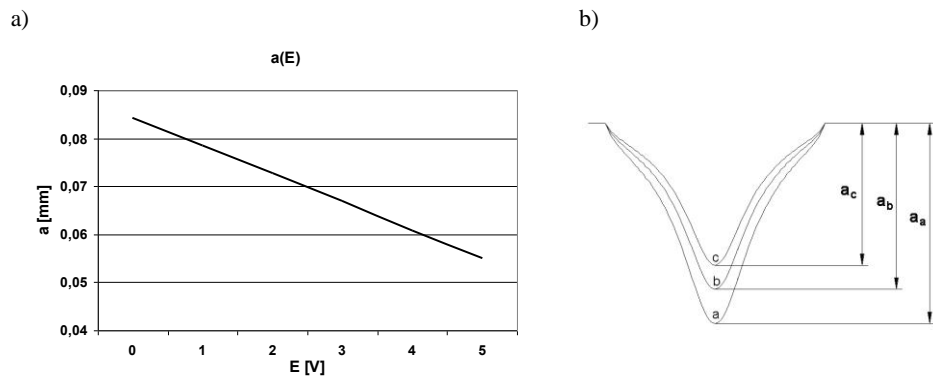
Rys. 1. Schemat zmian kształtu obrabianego w ciągu przyrostu czasu Δt [2]

Przyjmując opis matematyczny procesu kształtowania polegający na określeniu przemieszczeń w kierunku normalnym do powierzchni anody (Rys. 1) przemieszczenie powierzchni obrabianej o odcinek Δa_n w czasie Δt opisane jest równaniem:

$$\Delta a_{nA} = V_{nA} \Delta t = \eta k_{vA} i_A \Delta t = \eta k_{vA} \kappa \frac{U - E}{D} \Delta t \quad (1)$$

gdzie: ηk_{vA} – współczynnik obrabialności elektrochemicznej w punkcie A, κ – przewodność elektrolitu, V_{nA} – prędkość roztwarzania w kierunku normalnym do powierzchni obrabianej, i_A – gęstość prądu w punkcie A, D – odległość pomiędzy elektroda roboczą a powierzchnia obrabiana, U – napięcie międzyelektrode, E – spadek potencjału w warstwach przyelektrodeowych.

Na podstawie modelu matematycznego opracowane zostało w Instytucie Obróbki Skrawaniem oprogramowanie do symulacji komputerowej procesu kształtowania powierzchni krzywoliniowych obróbką elektrochemiczną uniwersalną elektrodą kulistą. Umożliwia ono obliczenie grubości usuniętego naddatku a oraz błędów kształtu na granicy kolejnych przejść elektrody W (falistości) dla dowolnego kształtu powierzchni obrabianej. Zostało ono wykorzystane do stworzenia zależności $a(E)$ (Rys. 2a), z której widać wyraźnie, że wraz ze wzrostem E grubość usuniętego naddatku a maleje. Przedstawiona zależność jest oczywista i dokładnie znana, jednak może być przydatna do analizy wyników badań USECM – CNC. Również nie bez znaczenia jest charakter zmian kształtu przekroju powierzchni obrabianej wraz ze zmianami E (Rys. 2b).



Rys. 2. Wyniki symulacji ECM – CNC dla różnych wartości E : a - zależność grubości usuniętego naddatku a od spadku potencjału na elektrodach E ; b - przekroje powierzchni obrabianej w kierunku prostopadłym do kierunku obróbki, $a_a - E=5$ V, $a_b - E=3$ V, $a_c - E=0$ V; warunki symulacji: $U=14$ V, $v_p=30$ mm/min, $S_o=0.5$ mm, $R=5$ mm, $\kappa=0.0136$ 1/ Ω mm, $k_v=0.0213$ mm³/As

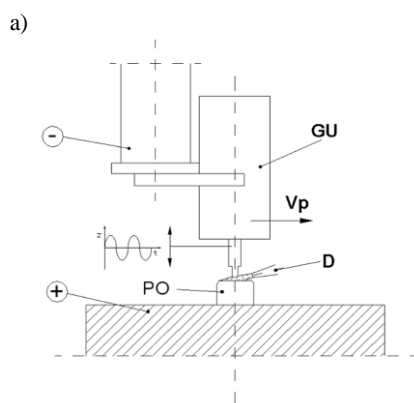
4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Stanowisko do badań USECM – CNC zbudowano na obrabiarce EOCA 40. Wykorzystana w badaniach głowica oraz generator drgań ultradźwiękowych skonstruowany i wykonany został w Instytucie Obróbki Skrawaniem. Dane techniczne głowicy ultradźwiękowej przedstawione zostały w Tabelicy 1. Badania przeprowadzono dla dwóch sposobów obróbki:

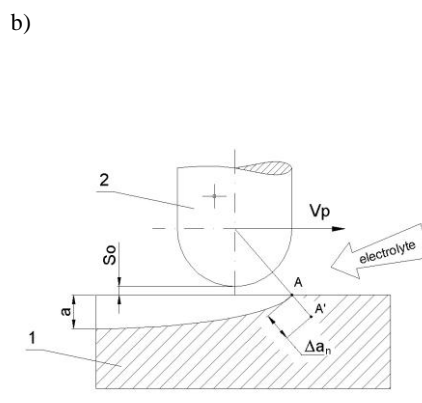
- obróbka elektrochemiczna elektrodą uniwersalną ze wspomaganie ultradźwiękami (USECM - CNC),
 - obróbka elektrochemiczna elektrodą uniwersalną (ECM - CNC).
- Schemat stanowiska do badań oraz obszaru obróbki przedstawiono Rys. 3 i Rys. 4.

Tablica 1. Dane techniczne głowicy ultradźwiękowej.

Dane techniczne głowicy ultradźwiękowej	
Częstotliwość pracy	$f=22\pm 1.5\text{ kHz}$
Maksymalna moc dostarczana do przetwornika	$P=160\text{ W}$
Maksymalna amplituda drgań czoła elektrody	$A=16\ \mu$
Maksymalnie dopuszczalny prąd w obwodzie	100 A
Zasilanie	$220\text{ V}, 50\text{ Hz}$



Rys. 3. Schemat stanowiska do badań ECM – CNC, *GU* – głowica ultradźwiękowa, *PO* – przedmiot obrabiany, *D* – dysza doprowadzająca elektrolit, *V_p* – kierunek posuwu elektrody



Rys. 4. Schemat obszaru obróbki, 1 – przedmiot obrabiany, 2 – elektroda robocza, S_o – początkowa grubość szczeliny międzyelektrodowej, a – grubość usuniętego nadatku, v_p – kierunek przesuwu elektrody

Badanymi czynnikami obróbki były:

- napięcie międzyelektrodowe: $U=8 - 20\text{ V}$,
- prędkość posuwu elektrody: $v_p=1 - 59\text{ mm/min}$,
- grubość początkowej szczeliny międzyelektrodowej: $S_o=0.1 - 0.9\text{ mm}$,
- stężenie elektrolitu (wodny roztwór NaNO_3): $C_e=10 - 25\%$,
- moc ultradźwięków: $P=30 - 150\text{ W}$ (odpowiada to amplitudzie drgań w zakresie $A=2.73 \div 9.75\ \mu\text{m}$).

Czynniki wynikowe:

- grubość usuniętego nadatku a ,
- chropowatość powierzchni obrabianej R_a, R_z ,
- wydajność obróbki V_w .

Czynniki ustalone:

- promień elektrody roboczej $R=5\text{ mm}$,
- ciśnienie elektrolitu p_e na wylocie z dyszy,
- materiał elektrody – miedź MI ,
- materiał obrabiany – stal $NC6$ obrabiana cieplnie do 50 HRC ,
- elektroda wykonuje pojedyncze przejście,
- temperatura elektrolitu – stabilizowana na 26°C .

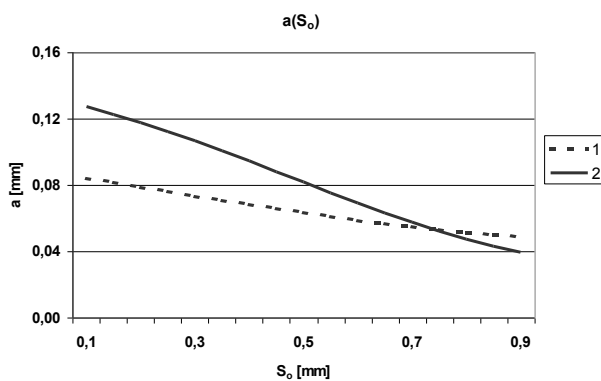
Czynniki zakłócające:

- niedokładność obrabiarki,
- zmienność w czasie właściwości elektrolitu,
- niejednorodność materiału obrabianego,
- niedoskonałość sposobu dostarczania elektrolitu do szczeliny.

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Otrzymane wyniki badań poddano analizie statystycznej. Jako funkcję obiektu badań przyjęto wielomian drugiego stopnia z interakcjami. Przeprowadzono również analizę przy zastosowaniu sieci neuronowych. Poniżej przedstawione zostaną wyniki aproksymacji neuronowej.

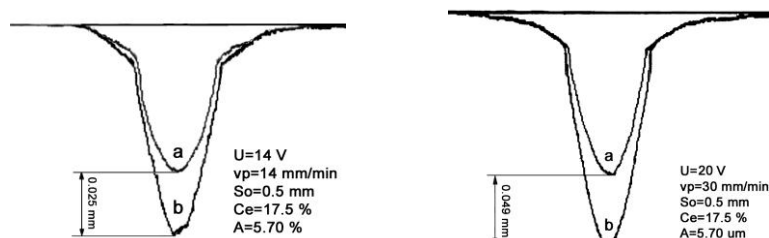
Z przedstawionej na Rys 5 zależności $a(S_o)$ wynika, że możliwy jest taki dobór parametrów procesu roztwarzania elektrochemicznego, że grubość usuniętego naddatku w wyniku obróbki USECM – CNC jest wyraźnie większa niż w wyniku ECM – CNC. Wprowadzenie drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej powoduje wzrost a nawet o 50% (dla $S_o=0.1\text{ mm}$).



Rys. 5. Zależność $a(S_o)$ dla $U=14\text{ V}$, $v_p=30\text{ mm/min}$; 1 – ECM – CNC, 2 – USECM – CNC, amplituda drgań elektrody roboczej $A=5.70\text{ }\mu\text{m}$

Dla tych samych parametrów obróbki (v_p , U) różnice w wartościach a można wytłumaczyć odmiennymi warunkami roztwarzania panującymi w szczelinie międzyelektrodowej. Prawdopodobnie drgania ultradźwiękowe zmieniają wartości E , ηk_v lub κ (1). Podczas badań obserwowano wzrost natężenia prądu I co wskazuje, że drgania ultradźwiękowe elektrody powodują zmniejszenie E . Również różnice w

kształcie przekrojów poprzecznych powierzchni obrabianych badanymi sposobami obróbki są zbliżone do różnic pomiędzy przekrojami otrzymanymi z symulacji dla różnych wartości E .



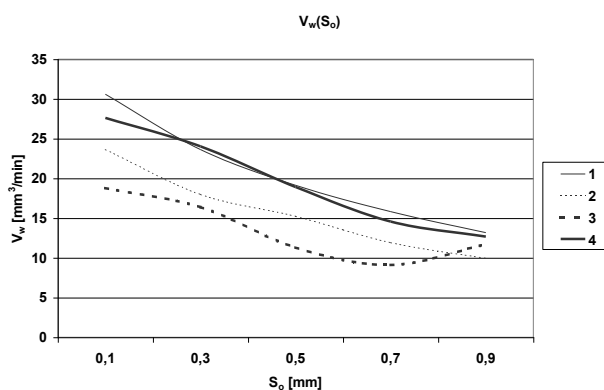
Rys. 6. Porównanie przekrojów powierzchni obrabianej dla ECM – CNC (a) i USECM – CNC (b)

W rozważanym przypadku, dla częstotliwości drgań ultradźwiękowych $f \approx 20 \text{ kHz}$ długość fali ultradźwiękowej λ jest o rząd wielkości większa od grubości szczelin międzyelektrodowych zwykle stosowanych w obróbce elektrochemicznej. Przykładowo, dla wody morskiej, prędkość rozchodzenia się ultradźwięków wynosi 1440 m/s , co dla częstotliwości 20 kHz daje długość fali $\lambda = 0.072 \text{ m}$. Dlatego też przy dyskusji zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej należy zwrócić uwagę na mechanizmy wtórne oddziaływania ultradźwięków, czyli przede wszystkim kawitację i następstwa tego zjawiska. Zmniejszenie E można wytłumaczyć zapadaniem się pęcherzyków kawitacyjnych, któremu to towarzyszą lokalne zmiany temperatury i ciśnienia następujące w bardzo krótkim czasie. W miejscach zapadania się pęcherzyków kawitacyjnych powstają temperatury rzędu $\sim 5000 \text{ K}$, ciśnienie sięga ~ 1000 atmosfer a prędkość zmian temperatury jest rzędu 10^7 K/s [10], co powoduje że w szczelinie międzyelektrodowej panują bardzo szczególne warunki. Zapadające się pęcherzyki deformują się do postaci lejkowatych wirów skierowanych końcówką do powierzchni granicznych. Tworzenie się takiego „lejka” poprzedza proces zaniku pęcherzyka kawitacyjnego, który doczepiony do powierzchni ciała stałego przekazuje mu swoją energię i zapada się nieodwracalnie [4]. W konsekwencji, lokalnie powstające mikro-strugi elektrolitu, mają znaczący wpływ na skład oraz właściwości warstw elektrolitu przyległych do elektrod co w efekcie powoduje zmniejszenie spadku potencjału E .

Również przedstawione na Rys. 7 porównanie zależności $V_w(S_o)$ potwierdza, że wprowadzenie drgań ultradźwiękowych do szczeliny międzyelektrodowej zmienia przebieg roztwarzania elektrochemicznego, co w rezultacie daje poprawę wydajności obróbki. Krzywa $V_w(S_o)$ otrzymana z badań USECM – CNC pokrywa się z krzywą $V_w(S_o)$ otrzymaną z symulacji komputerowej dla $E=0 \text{ V}$, co potwierdza, że wprowadzenie drgań ultradźwiękowych do szczeliny międzyelektrodowej zmniejsza spadek potencjału na anodzie i katodzie.

Kolejnym badanym wskaźnikiem była chropowatość powierzchni R_a i R_z . Pomimo wzrostu gęstości prądu dla USECM – CNC, chropowatość dla obróbki z ultradźwiękami jest nieznacznie większa niż dla prób bez ultradźwięków. W teorii ECM mechanizm wygładzania wynika z różnic pomiędzy prędkością roztwarzania dla zagłębień i wierzchołków chropowatości. Podczas USECM – CNC mikro-strugi powstające w wyniku zapadania się pęcherzyków kawitacyjnych powodują wyrównanie się warunków roztwarzania, co w rezultacie powoduje nawet niewielki wzrost

chropowatość dla powierzchni obrabianej elektrochemicznie ze wspomaganiem ultradźwiękowym.



Rys. 7. Zależności $V_w(S_o)$ dla $U=20$ V, $Ce=17.5$ %, $v_p=30$ mm/min; 1 – krzywa otrzymana z symulacji dla $E=0$ V, 2 – krzywa otrzymana z symulacji dla $E=5$ V, 3 – krzywa z analizy wyników badań ECM – CNC, 4 – krzywa z analizy wyników badań USECM – CNC.

6. WNIOSKI

Przedstawione powyżej analiza wyników badań wstępnych obróbki USECM – CNC pokazuje, że zastosowanie drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej powoduje zmianę przebiegu procesu roztwarzania elektrochemicznego, zwiększenie lokalnej prędkości roztwarzania, co jest widoczne zwłaszcza dla niewielkich wartości S_o . W wyniku tego obserwujemy wyraźny wzrost wydajności procesu V_w oraz grubości usuniętego nadkładu a w stosunku do klasycznej obróbki ECM – CNC. Jednak efektywne wykorzystanie powyższych faktów w warunkach przemysłowych wymaga przeprowadzenia dalszych, kompleksowych badań, które umożliwią dokładne poznanie zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej oraz pozwolą na określenie podstawowych założeń do projektowania procesu USECM – CNC.

Zaproponowany sposób poprawy wskaźników technologicznych obróbki elektrochemicznej poprzez wprowadzenie drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej może spowodować poszerzenie zastosowania obróbki elektrochemicznej elektrodą uniwersalną. Pomimo wzrostu wydajności obróbki wprowadzenie drgań elektrody roboczej nie spowoduje jednak, że ECM – CNC zacznie konkurować z drążeniem elektrochemicznym powierzchni krzywoliniowych ze względu na wyraźnie mniejszą wydajność obróbki. Obróbka USECM – CNC powinna być stosowana do operacji wykańczających powierzchni obrabianych innymi metodami np. EDM.

LITERATURA

1. Kozak J.: Analiza procesu obróbki elektrochemicznej elektrodą drgającą. In: Obróbka erozyjna – Materiały Konferencyjne. Bydgoszcz – Golub Dobrzyń, 1997, pp. 204÷212.

2. Kozak J., Chuchro M., Ruszaj A., Karbowski, K.: The computer aided simulation of electrochemical process with universal spherical electrodes when machining sculptured surfaces. Proceedings of the 15th International CAPE Conference, 1999, pp. 425÷430.
3. Kozak J., Rajurkar K. P., Malicki S.: Study of electrochemical machining utilizing a vibrating tool electrode. Proceedings of the 16th International Conference on Computer – Aided Production Engineering. 2000, pp. 173÷181.
4. Kuttruff H.: Ultrasonic fundamentals and applications. Elsevier Science Publishers LTD, 1991.
5. Perusich S. A., Alkire R. C.: Ultrasonically induced cavitations studies of electrochemical passivity and transport mechanism. I. Theoretical. J. Electrochemical Soc. Vol. 138/3, 1991, pp 700÷707.
6. Perusich S. A., Alkire R. C.: Ultrasonically induced cavitations studies of electrochemical passivity and transport mechanism. II. Experimental. J. Electrochemical Soc. Vol. 138/3, 1991, pp. 708÷713.
7. Ruszaj A., Zybura – Skrabalak M., Skoczypiec S., Żurek R.: Electrochemical machining supported by electrode ultrasonic vibrations. Proceedings of the 13th International Symposium of Electromachining. 2001, pp. 953÷964.
8. Ruszaj A., Zybura M., Żurek R., Skrabalak G.: Some aspects of electrochemical machining process supported by electrode ultrasonic vibrations optimisation. 2nd International Conference on Advances in Production Engineering, Warsaw, Poland, vol. II, 2001, pp. 281÷290.
9. Ruszaj A., Zybura – Skrabalak M., Żurek R., Skoczypiec S., Skrabalak G.: Electrochemical machining supported by electrode ultrasonic vibrations. Proceedings of The Symposium on Research on Clean Hybrid Micromachining (HMM) Processes. Krakow, Poland, 2001, paper number B6.
10. Suslick K.S., Didenko Y., Fang, M.M. Hyeon, T., Kolbeck K.J., Mcnamara W.B., Mdleleni M.M., Wong M.: Acoustic cavitation and its chemical consequences. Phil. Trans. Roy. Soc. A, vol. 357, 1999, pp. 335 – 353.

PRIMARY INVESTIGATIONS ON ELECTROCHEMICAL MACHINING WITH USING UNVERSAL ELECTRODE SUPORTED BY ULTRASONIC VIBRATIONS

Summary

One of a variants of ECM is electrochemical machining with universal electrode (ECM – CNC). The disadvantage of this way of machining is relatively small material removal rate in comparison to classical sinking. In paper primary investigations for the electrochemical machining when the universal electrode vibrating with ultrasonic frequency are presented. The influence of the amplitude of ultrasonic vibrations, interelectrode voltage, electrode feed rate, interelectrode gap thickness on thickness of removed material and final removal rate have been taken into account. The tests indicated that introduction of electrode ultrasonic vibrations can change conditions of dissolution process and cause the increase of allowance thickness a and material removed rate V_w without surface quality decreasing.