

Zastosowanie bipotencjostatu w procesie impulsowej obróbki elektrochemicznej mikroelementów

Application of bipotentiostat in the electrochemical pulse machining of microparts

PIOTR LIPIEC*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.494

Aby móc zastosować obróbkę elektrochemiczną do mikrowytwarzania, należy zapewnić stałą kontrolę nad warunkami panującymi w obrębie szczeliny międzyelektrodowej. Do najważniejszych parametrów zalicza się potencjały elektryczne elektrod, prąd roztworzenia oraz stężenie elektrolitu. W warunkach laboratoryjnych pozwala na to użycie bipotencjostatu.

SŁOWA KLUCZOWE: impulsowa obróbka elektrochemiczna, bipotencjostat, mikroobróbka

To perform micromachining operations by means of electrochemical pulse process it is required that permanent control of the electrode potentials and current flows within the electrode gap was maintained. Critical parameters cover electrical potentials of the electrodes, solution current and electrolyte concentration. In laboratory environment this is enhancing to use bipotentiostat technique.

KEYWORDS: pulse electrochemical machining, bipotentiostat, micromachining

Metody bezstykowe, należące do technik niekonwencjonalnych, odgrywają ważną rolę w wytwarzaniu mikroelementów [1÷3]. Najpopularniejsze wśród tych metod są: obróbka elektroerozyjna, elektrochemiczna i laserowa. Na szczególną uwagę zasługuje obróbka elektrochemiczna – ECM [4]. Ma ona wiele odmian ze względu na: ruch elektrody roboczej (kinematykę drażenia i frezowania), zakres stosowanych napięć (3÷400 V) i rodzaje zasilaczy (o stałej oraz impulsowej charakterystyce czasowej).

Mikroelementy wytwarza się najczęściej z zastosowaniem obróbki impulsowej, a czasy impulsów mieszczą się w przedziale od 100 ns do 100 μs. Ograniczenia związane z długością impulsu, a także wielkość obrabianych elementów powodują, że natężenie płynącego w trakcie procesu prądu nie przekracza kilku amperów. Obróbka elektrochemiczna nie wprowadza istotnych zmian w warstwie wierzchniej, a jej wydajność i dokładność nie zależą od właściwości mechanicznych materiału. Z tych powodów jest ona wykorzystywana do kształtowania materiałów trudnoobrabialnych (bardzo twardych, kruchych, ciągliwych itp.), co ma istotne znaczenie w przypadku wytwarzania mikroelementów [5].

Metodę tę można stosować do materiałów przewodzących prąd elektryczny. Początkowo ograniczało to jej wykorzystanie do metali i ich stopów, jednak dynamiczny rozwój inżynierii materiałowej, w wyniku którego powstało wiele nowych i bardziej zaawansowanych materiałów, spowodował, że można ją stosować z powodzeniem także do materiałów ceramicznych czy kompozytowych wykazujących pewne cechy przewodnictwa elektrycznego. To wszystko sprawia, że cały czas prowadzone są badania mające na celu zoptymalizowanie procesu obróbki elektrochemicznej.

Impulsowa obróbka elektrochemiczna mikroelementów

Obróbka elektrochemiczna polega na usuwaniu nadmiaru z przedmiotu w wyniku reakcji elektrochemicznych zachodzących zgodnie z prawami Faradaya. Proces przebiega w elektrolicie będącym najczęściej wodnym roztworem kwa-

sów, zasad lub soli. W trakcie obróbki w materiale odtwarzany jest kształt elektrody roboczej lub jej trajektoria. Jedną z odmian obróbki elektrochemicznej jest obróbka impulsowa, którą stosuje się zarówno w skali makro, jak i mikro.

W tej odmianie obróbki elektrochemicznej napięcie na elektrody jest zadawane w postaci krótkich impulsów. Ich stosowanie w sposób istotny przyczynia się do zwiększenia wydajności procesu oraz poprawy lokalizacji. Najważniejsze zalety obróbki elektrochemicznej [6, 7]:

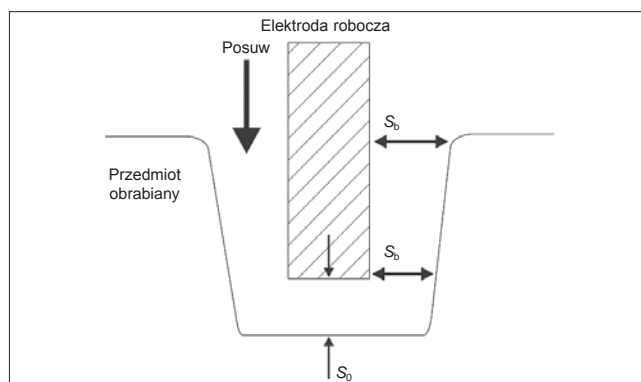
- zmiany w strukturze, mikrotwardości i składzie chemicznym są pomijalne,
- temperatura procesu nie przekracza 100 °C,
- brak zużycia elektrody roboczej,
- możliwość wytwarzania elementów o skomplikowanej geometrii.

Z drugiej strony obróbka elektrochemiczna charakteryzuje się pewnymi ograniczeniami, do których można zaliczyć:

- dużą energochłonność,
- niską lokalizację procesu,
- stosowanie tylko do materiałów przewodzących prąd elektryczny,
- problem z dostarczaniem elektrolitu do obszaru obróbki w przypadku grubości szczelin międzyelektrodowych rzędu kilkunastu mikrometrów,
- ograniczenia prądowe związane z długością impulsu roboczego rzędu nanosekund.

Jednym z największych problemów obróbki elektrochemicznej jest lokalizacja procesu [8]. Wiąże się to z warunkami panującymi w obszarze szczeliny międzyelektrodowej (kształtem pola elektrycznego) oraz z faktem, że roztworzenie zachodzi nie tylko w obszarze czoła elektrody, ale także w obszarze szczeliny bocznej (rys. 1). Prowadzi to do błędów wymiarowo-kształtowych wykonywanego elementu. Wyeliminowanie tego typu błędów ma podstawowe znaczenie dla całego procesu. Najczęściej stosowanymi metodami prowadzącymi do poprawienia lokalizacji procesu są [9, 10]:

- zmniejszenie grubości szczeliny międzyelektrodowej,
- dobór odpowiedniego elektrolitu (jego rodzaju i stężenia),
- stosowanie małych napięć (rzędu kilku woltów),
- wykorzystanie układów stabilizujących potencjały elektrod,
- stosowanie bardzo krótkich czasów impulsów (rzędu setek nanosekund).

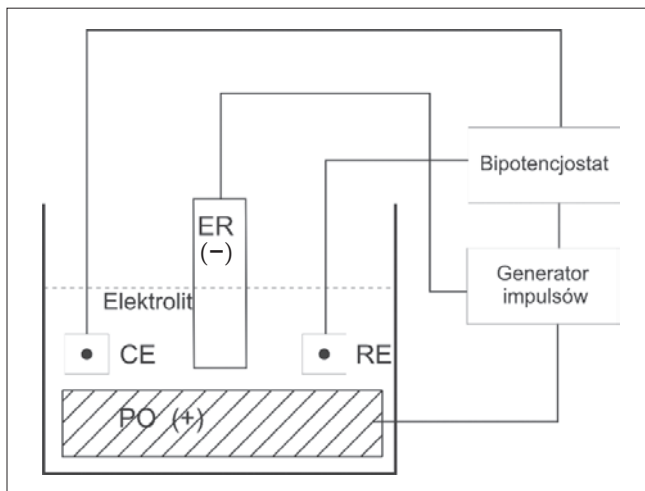


Rys. 1. Zaburzenia odwzorowania kształtu elektrody roboczej w materiale obrabianym (S_0 – szczelina czołowa, S_b – szczelina boczna)

* Dr inż. Piotr Lipiec (lipiec@mech.pk.edu.pl) – Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej

Zastosowanie bipotencjostatu w obróbce elektrochemicznej mikroelementów

W przypadku stosowania impulsowej obróbki elektrochemicznej mikroelementów istotną kwestią jest zapewnienie kontroli nad potencjałami elektrod. W układach dwuelektrodowych jest to bardzo trudne, ponieważ nie można prawidłowo wyznaczyć punktu odniesienia dla potencjałów elektrodowych. Dopiero zastosowanie układów wieloelektrodowych daje takie możliwości. Przykładem tego może być wykorzystanie bipotencjostatu. Jest to układ czteroelektrodowy (rys. 2), stabilizujący potencjały elektrod pracujących – w tym wypadku elektrody roboczej (ER) i przedmiotu obrabianego (PO) względem elektrody odniesienia (RE) – oraz wyposażony w pomocniczą elektrodę zliczającą (CE) [11].



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego, na którym wykorzystano bipotencjostat

Zastosowanie bipotencjostatu pozwala na kontrolę potencjałów elektrod pracujących, a także płynących w układzie prądów. Aby zapewnić odpowiednią długość impulsów roboczych, zastosowano generator przebiegów arbitralnych pozwalający na uzyskanie czasów rzędu 200 ns.

Do najważniejszych zalet stosowania bipotencjostatu można zaliczyć:

- pełną kontrolę potencjału (lub prądu) elektrod roboczych,
- możliwość monitorowania płynących w układzie prądów, potencjałów między poszczególnymi elektrodami i ładunków,
- rekonfigurowalność,
- szerokie możliwości pomiarowe (potencjałów, prądów, ładunków),
- możliwość korzystania z modułu do spektroskopii impedancyjnej.

Urządzenie to ma także kilka ograniczeń, które powodują, że można je wykorzystać jako zasilacz jedynie do obróbki mikroczęści:

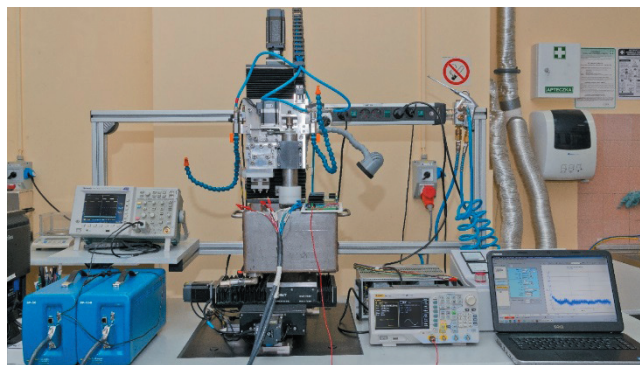
- zakres napięć od -10 do $+10$ V,
- prąd do 1 A,
- długość impulsu rzędu milisekund w trybie pracy impulsowej,
- wymóg stosowania dodatkowych generatorów wysokiej częstotliwości i odpowiednich przełączników,
- konieczność prowadzenia obróbki w zanurzeniu (ze względu na dodatkowe elektrody).

Badania doświadczalne

Przeprowadzono badania wstępne impulsowej obróbki elektrochemicznej mikroelementów z wykorzystaniem bipotencjostatu jako zasilacza. Ich celem było wykazanie, że przy ustalonej i stałej różnicy potencjałów między elektrodą roboczą a przedmiotem obrabianym istotny wpływ na proces obróbki elektrochemicznej ma zmiana potencjałów obu elektrod

(ER i PO) względem elektrody odniesienia. Badania przeprowadzono na stanowisku (rys. 3) złożonym z kilku modułów, z których najważniejsze to:

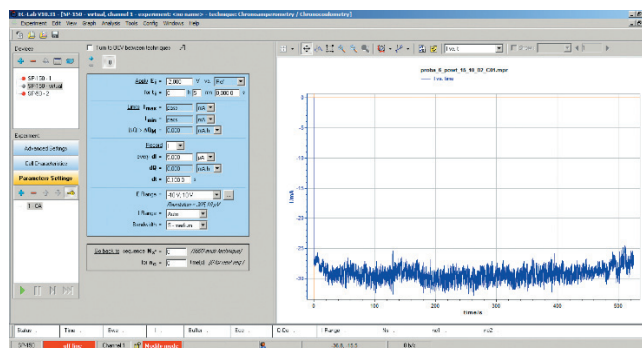
- układ mechaniczny wraz z napędami, uchwytem elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego, komorą roboczą, układem wykrywania styku,
- bipotencjostat wraz z kompletem elektrod,
- komputer sterujący,
- generator przebiegów arbitralnych,
- przełącznik sterowany generatorem impulsów,
- oscyloskop cyfrowy.



Rys. 3. Stanowisko badawcze

Układ pracuje pod kontrolą specjalnego oprogramowania pozwalającego na dokładne ustawienie parametrów procesu. Zawiera ono wiele predefiniowanych ustawień, a także pozwala na indywidualne skonfigurowanie systemu. Bipotencjostat może pracować zarówno w trybie potencjostatu, jak i galwanostatu.

Na rys. 4 przedstawiono przykładowy zrzut ekranu programu sterującego. W trakcie pracy na bieżąco pokazywane są i zapisywane wybrane parametry. Dodatkowo do weryfikacji wartości płynącego w układzie prądu wykorzystywany jest oscyloskop cyfrowy. Jako elektrodę odniesienia zastosowano elektrodę kalomelową.

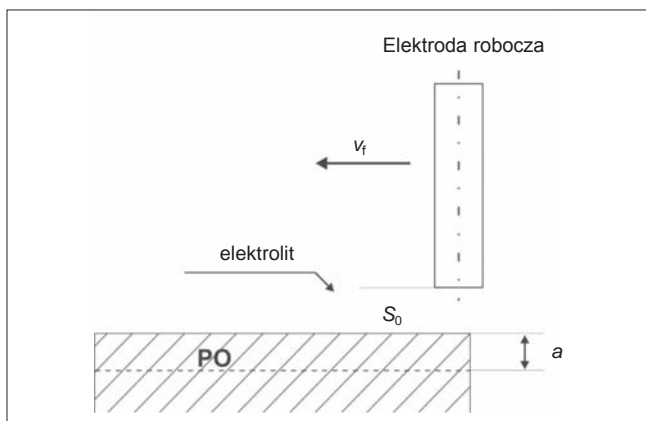


Rys. 4. Okno programu sterującego pracą bipotencjostatu

Badania przeprowadzono według schematu przedstawionego na rys. 5. Elektroda robocza przesuwiała się nad powierzchnią przedmiotu obrabianego, wykonując rowki o długości 2,5 mm. Do badań użyto elektrody o średnicy 200 μm . Pozostałe parametry wejściowe to:

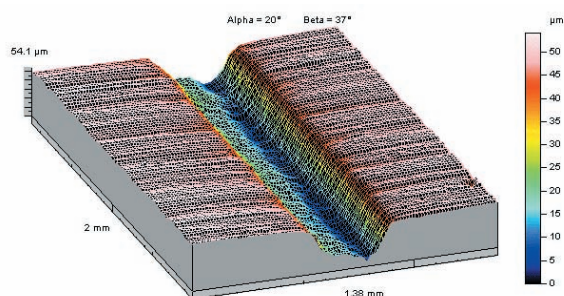
- napięcie na przedmiocie obrabianym $U_{PO} = 2 \div 8$ V,
- napięcie na elektrodzie roboczej $U_{ER} = -2 \div -8$ V,
- początkowa szczelina międzyelektrodowa $S_0 = 30$ μm ,
- czas impulsu $t_i = 1$ μs ,
- czas przerwy między impulsami $t_p = 1$ μs ,
- prędkość posuwu $v_f = 100$ $\mu\text{m}/\text{min}$.

Badania doświadczalne zostały wykonane z wykorzystaniem potencjostatów sp-150 i sp-50 firmy Bio-Logic na zmodyfikowanym stanowisku do obróbki elektrochemicznej mikroelementów, znajdującym się w laboratorium Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej.

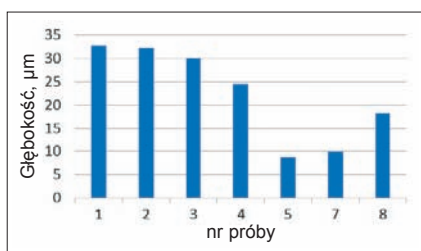


Rys. 5. Schemat badań

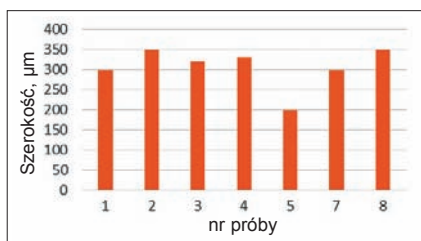
W trakcie prezentowanych badań zmianie ulegały potencjały na elektrodzie roboczej i przedmiocie obrabianym w zadanym przedziale, ale tak, że różnica między nimi wynosiła cały czas 8 V. Na rys. 6-9 przedstawiono przykładowe wyniki badań.



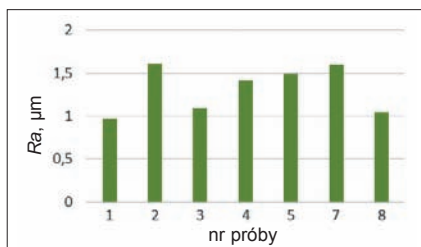
Rys. 6. Obraz uzyskanego rowka



Rys. 7. Głębokości wydrążonych rowków



Rys. 8. Szerokości wydrążonych rowków



Rys. 9. Chropowatości wydrążonych rowków

Jak widać na przedstawionych wykresach, wartości mierzonych parametrów różnią się od siebie w sposób istotny dla poszczególnych próbek, co świadczy o tym, że dla procesu obróbki elektrochemicznej decydujące znaczenie ma możliwość pełnej kontroli nad potencjałami elektrod.

Wnioski

W przypadku zasilaczy stosowanych w impulsowej obróbce elektrochemicznej mikroczości napięcie robocze ustawia się między elektrodami tak, że poziomem odniesienia jest punkt uziemienia zasilacza, którego rzeczywisty potencjał bardzo często jest trudny do określenia. W większości przypadków nie ma możliwości oddzielnego ustalenia potencjałów elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego. To powoduje, że w rzeczywistości potencjały obu elektrod względem elektrolitu nie są znane. W obróbce elektrochemicznej mikroczości stosowane są napięcia rzędu kilku woltów i prądy rzędu jednego ampera, dlatego przy zachowaniu odpowiednich warunków można użyć jako zasilacza bipotencjostatu, który pozwala na kontrolę parametrów elektrycznych na elektrodach roboczych (potencjału, prądu, ładunku). Oprócz tego umożliwia on niezależne ustalenie dla każdej elektrody pracującej jej potencjału względem elektrody odniesienia i utrzymanie każdego z nich na stałym poziomie w trakcie całego procesu.

Jak wynika z przeprowadzonych badań, przy stałej różnicy potencjałów między elektrodami pracującymi (ER i PO) na poziomie 10 V, ale przy zmiennych ich potencjałach względem elektrody odniesienia (odpowiednio: U_{PO} 2÷8 V i U_{ER} od -2 do -8 V) można zaobserwować istotny wpływ tych zmian na przebieg procesu roztwarzania.

To pokazuje, że oprócz wartości napięcia międzyelektrodowego na proces roztwarzania elektrochemicznego istotny wpływ ma właściwy dobór potencjałów elektrod pracujących względem stałego i znanego punktu odniesienia, związanego z elektrolitem.

Dzięki zastosowaniu bipotencjostatu można uzyskać dokładne informacje na temat płynących w układzie prądów, przepływającego ładunku oraz potencjałów ustawionych na elektrodach pracujących. W przypadku stosowania krótkich impulsów napięciowych (poniżej 1 µs) konieczne jest użycie dodatkowych generatorów wysokich częstotliwości i odpowiednich przełączników pozwalających na skrócenie czasu impulsu.

LITERATURA

- Bhattacharyya B., Mitra S., Boro A.K. "Electrochemical machining: new possibilities for micromachining". *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 18 (2002): pp. 283÷289.
- Skoczypiec S., Ruszaj A. "A sequential electrochemical-electrodischarge process for micropart manufacturing". *Precision Engineering*. Vol. 38 (2014): pp. 680÷690.
- Skoczypiec S., Ruszaj A. "The Micromachining Processes Supported by Electrochemical Dissolution". *Proceedings INSECT*. Brussel (Belgium). 2010: pp. 119÷126.
- Zhang Zhaoyang, Zhu Di. "Experimental Research on the Localized Electrochemical Micro-machining". *Russian Journal of Electrochemistry*. Vol. 44, No. 8 (2008): pp. 926÷930.
- Ruszaj A., Gawlik J., Skoczypiec S. "Stan badań i kierunki rozwoju wybranych niekonwencjonalnych procesów wytwarzania". *Inżynieria Maszyn*. Wydawnictwo Wrocławskiej Rady FSNT NOT. 14, 1 (2009): s. 7÷19.
- Lee E.-S., Shin T.-H., Kim B.-K., Baek S.-Y. "Investigation of Short Pulse Electrochemical Machining for Groove Process on Ni-Ti Shape Memory Alloy". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. Vol. 11, No. 1 (2010): pp. 113÷118.
- Skoczypiec S., Kozak J., Ruszaj A. "Wybrane problemy technologii elektrochemicznej i elektroerozyjnej mikronarzędzi". *Inżynieria Maszyn*. Wydawnictwo Wrocławskiej Rady FSNT NOT. 14, 1 (2009): pp. 20÷30.
- Kozak J., Rajurkar K.P., Makkar Y. "Study of pulse electrochemical micromachining". *Transactions of North America Manufacturing Research Institute of SME*. XXXI (2003): pp. 363÷370.
- Schulze H.-P., Ruszaj A., Gmelin T., Kozak J., Karbowski K., Borkenhagen D., Leone M., Skoczypiec S. "Study of the process accuracy of the electrochemical micromachining using ultra nanosecond and short microsecond pulses". *Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining*. (2010): pp. 651÷656.
- Skoczypiec S., Ruszaj A., Lipiec P. "Research on electrochemical dissolution localization in case of micromachining with ultra short pulses". *Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining*. (19÷23 April 2010): pp 319÷322.
- Koza J.A. et al. "Electrochemical micromachining of a Zr-based bulk metallic glass using a micro-tool electrode technique". *Intermetallics*. (2011): pp. 437÷444.