



Organizator:
Politechnika Warszawska
Instytut Techniki Wytwarzania

Przewodniczący:
Lucjan Dąbrowski
ld@meil.pw.edu.pl
<http://snoe.meil.pw.edu.pl>

Szkoła Naukowa Obróbek Erozyjnych

SNOE

Artykuły naukowe z 2013 r.

Patronat naukowy: SEKCJA PODSTAW TECHNOLOGII KOMITETU BUDOWY MASZYN POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Mikroelementy wytwarzane elektrochemicznie

Electrochemically machined microparts

SEBASTIAN SKOCZYPIEC *

W referacie omówiono najważniejsze wyniki wieloletnich prac autora nad opracowaniem technologii elektrochemicznego kształtowania mikrostruktur trójwymiarowych. Jest to obszerne streszczenie opublikowanej w 2013 r. przez Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej monografii pt. Elektrochemiczne metody wytwarzania mikroelementów.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka elektrochemiczna, mikroobróbka,

In the paper the results of the author's research on the development of electrochemical machining of 3D microparts have been described. It is a comprehensive summary of published in 2013 monograph (in polish) titled Electrochemical methods of microparts manufacturing

KEYWORDS: electrochemical machining, micromachining

Wprowadzenie

W praktyce przemysłowej technologii wytwarzania przyjmuje się, że mikroelementy to elementy o wymiarach charakterystycznych $< 1000 \mu\text{m}$. Ich produkcja wymaga zastosowania odpowiednio zmodyfikowanych systemów produkcyjnych. Adaptacje te skupiają się wokół zwiększenia rozdzielczości obróbki oraz zwiększenia dokładności obrabiarów i oprzyrządowania technologicznego. Dodatkowo, w aspekcie wytwarzania mikrokomponentów mechanicznych należy umożliwić kształtowanie skomplikowanych trójwymiarowych struktur geometrycznych.

W referacie omówiono najważniejsze wyniki wieloletnich prac autora nad opracowaniem technologii elektrochemicznego kształtowania mikrostruktur trójwymiarowych. Zostały one opublikowane w monografii habilitacyjnej pt. Elektrochemiczne metody wytwarzania mikroelementów [1].

Pełna wersja monografii jest udostępniona do pobrania w formacie PDF z repozytorium Politechniki Krakowskiej (<http://suw.biblos.pk.edu.pl/>), dlatego też poniżej ograniczono się jedynie do szczegółowego streszczenia pracy.

Analiza stanu badań

W obróbce elektrochemicznej materiał usuwany jest w postaci jonów podczas roztrawiania anodowego. Zachodzi ono w wyniku reakcji elektrochemicznych przebiegających na powierzchni przedmiotu obrabianego. Taki sposób usuwania naddatku powoduje, że obróbka elektrochemiczna ma szereg zalet (np. brak zużycia narzędzia), natomiast w aspekcie miniaturyzacji wytwarzanych elementów znaczenia nabierają takie cechy jak: możliwość usuwania naddatku z udziałem pomijalnie małych oddziaływań mechanicznych i termicznych, teoretyczne możliwości usuwania naddatku z rozdzielczością rzędu nanometrów oraz brak związku pomiędzy właściwościami mechanicznymi materiału a wydajnością obróbki.

W związku z powyższym w ciągu ostatnich kilkunastu lat rozwoju mikroobróbki elektrochemicznej wyraźnie zarysowały się jej możliwości aplikacyjne. Najczęściej używane są jej dwie odmiany kinematyczne, mianowicie drażnienie i obróbka elektrodą uniwersalną. W drażnieniu kształt przedmiotu jest wynikiem odwzorowania kształtu narzędzia w materiale obrabianym natomiast podczas obróbki elektrodą uniwersalną kształt powierzchni jest odwzorowaniem trajektorii ruchu elektrody o prostym kształcie (np. walca czy stożka).

Wadą obróbki elektrochemicznej jest niekorzystne zjawisko rozprzestrzeniania się obszaru usuwania materiału na znaczne odległości w stosunku do grubości szczeliny międzyelektrodowej. Ma to związek z pierwotnym rozkładem pola elektrycznego w obszarze obróbki. Efekt ten może być zminimalizowany poprzez prawidłowy dobór warunków w których zachodzi roztrawianie elektrochemiczne. W aspekcie zastosowania obróbki elektrochemicznej w mikrowytwarzaniu kluczowym zagadnieniem staje się więc uzyskanie odpowiedniej rozdzielczości kształtowania.

* dr hab. inż. Sebastian Skoczy piec (skoczy piec@mech.pk.edu.pl),
Politechnika Krakowska

Analiza stanu badań mikrokształtowania ubytkową obróbką elektrochemiczną wykazała, że do najbardziej efektywnych rozwiązań przystosowujących obróbkę elektrochemiczną do wytwarzania mikroelementów jest prowadzenie procesu z zastosowaniem impulsów napięciowych o odpowiednio dobranej długości. Mają tutaj zastosowani dwie odmiany, mianowicie z zastosowaniem impulsów nanosekundowych o czasie < 500 ns oraz impulsów mikrosekundowych w zakresie czasu 1-100 μ s.

Obróbka impulsami nanosekundowymi odbywa się w warunkach aktywacyjnych ograniczeń roztwarzania, a zwiększenie rozdzielczości związane jest z bezwładnością procesów ładowania i rozładowania podwójnej warstwy elektrycznej. Proces ten został opracowany specjalnie do wytwarzania mikroelementów i umożliwia wykonywanie elementów z dokładnością < 1 μ m. Charakteryzuje się on jednak ograniczonymi możliwościami zwiększania powierzchni obrabianej natomiast lokalizacja roztwarzania zależna jest od wymiarów elektrody roboczej. Z powyższych względów ta odmiana obróbki elektrochemicznej nie znalazła szerszego zastosowania w przemyśle.

Natomiast proces obróbki elektrochemicznej impulsami mikrosekundowymi odbywa się w zakresie dyfuzyjnych ograniczeń roztwarzania. Do zwiększenia dokładności wykorzystuje się zależność spadku ohmowego napięcia w szczelinie międzyelektrodowej. Przy optymalnych warunkach roztwarzania dokładność tej odmiany wynosi 10 μ m. W obróbce elektrochemicznej impulsami mikrosekundowymi nie ma ograniczeń co do wymiarów obrabianej powierzchni oraz lokalizacja roztwarzania zależy od wymiarów elektrody roboczej, dlatego ciągle prowadzone są prace przesuwające granice technologiczne tego procesu.

Prace własne

Opracowanie przez Autora podstaw technologii elektrochemicznego kształtowania struktur trójwymiarowych wymagało: wyjaśnienia mechanizmu usuwania materiału i poprawy lokalizacji usuwania nadmiaru w obróbce elektrochemicznej, opracowania modeli matematycznych procesu PECMM, zaprojektowania i budowy stanowisk badawczych a ostatecznie prototypu obrabiarki do kształtowania mikroelementów, przeprowadzenia badań doświadczalnych mikroobróbki elektrochemicznej w różnych odmianach kinematycznych oraz sformułowania i zweryfikowania koncepcji integracji mikroobróbki elektrochemicznej i elektroerozyjnej.

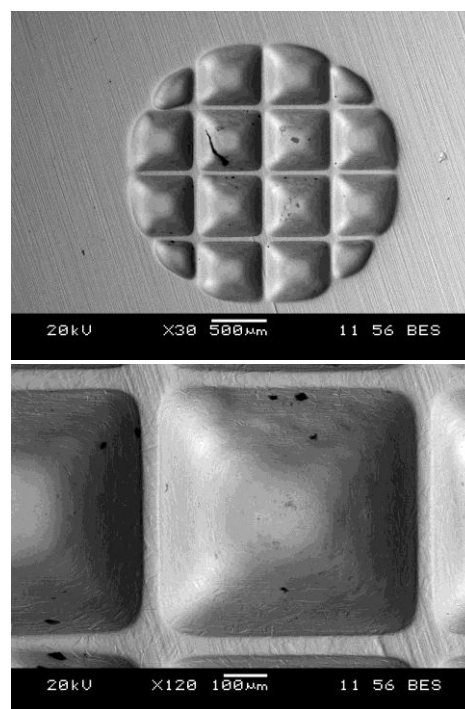
Etap modelowania matematycznego jest niezbędnym elementem opracowania technologii mikroobróbki elektrochemicznej. Sprowadza się on do wyznaczenia rozkładu grubości szczeliny międzyelektrodowej oraz wyznaczenia warunków fizycznych panujących w obszarze roztwarzania. Określenie zmian kształtu przedmiotu w trakcie obróbki wymaga znalezienia rozkładu gęstości prądu na powierzchni przedmiotu obrabianego czyli analizy zagadnień zjawisk związanych z przepływem elektrolitu oraz transportem masy w szczelinie międzyelektrodowej z uwzględnieniem reakcji elektrochemicznych na powierzchni elektrod. Ze względu na złożoność opisu matematycznego obróbki elektrochemicznej w jego najbardziej ogólnej postaci, tworzone są modele cząstkowe, uwzględniające jedynie najważniejsze czynniki fizyczne występujące w analizowanej odmianie obróbki procesu.

W związku z tym w pracy, do opisu procesu obróbki impulsami nanosekundowymi ($t_i < 500$ ns) zastosowano model uwzględniający procesy przejściowe na granicy faz, natomiast do opisu procesu obróbki impulsami mikrosekun-

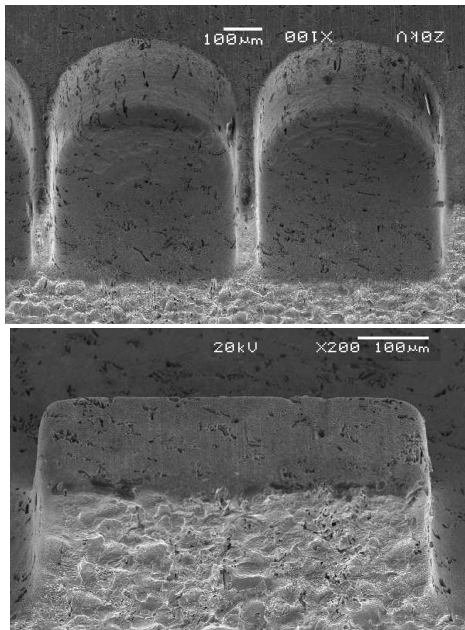
dowymi ($1 < t_i < 100$ μ s) zastosowano model termiczny. W pierwszym przypadku przyjmuje się że transport ładunku elektrycznego (gęstość prądu) na granicy metal-elektrolit określony jest kinetyką procesów elektrodowych dlatego też model matematyczny opisuje procesy przejściowe związane z ładowaniem i rozładowaniem podwójnej warstwy elektrycznej.

Natomiast w obróbce impulsami mikrosekundowymi gęstość prądu ograniczona jest zjawiskami transportu na granicy materiał-elektrolit. W modelu matematycznym rozważono więc zjawiska związane z przepływem elektrolitu oraz wydzielaniem się ciepła w szczelinie międzyelektrodowej.

W kolejnym etapie prac przeprowadzono badania doświadczalne, które ukierunkowane zostały na wyznaczenie zależności pomiędzy parametrami roztwarzania elektrochemicznego a wskaźnikami użytkowymi obróbki. Na podstawie rozważań teoretycznych oraz analizy wyników symulacji stwierdzono, że podstawowa rola w projektowaniu technologii wytwarzania mikroelementów odgrywa zależność ładunku elektrycznego q przepływającego przez obszar obróbki od grubości szczeliny międzyelektrodowej S . Dlatego też, przeprowadzane badania doświadczalne koncentrowały się wokół wyznaczenia i interpretacji zależności $q(S, U = \text{const})$. Analiza wyników pozwoliła także na opracowanie i zweryfikowanie koncepcji drażenia elektrochemicznego przebiegającego z okresowym przepłukiwaniem szczeliny międzyelektrodowej. Przeprowadzono również badania doświadczalne doświadczalne mikrokształtowania elektrochemicznego uniwersalną elektrodą walcową. Ich celem było wyznaczenie podstawowych charakterystyk technologicznych dla tego procesu. Jak widać z przedstawionych na rys. 1 i rys. 2 przeprowadzone prace pozwoliły na opracowanie technologii elektrochemicznego kształtowania mikroelementów w różnych odmianach kinematycznych.



Rys. 1. Przykład mikrostruktury wykonanej drażeniem elektrochemicznym z okresowym przepłukiwaniem szczeliny międzyelektrodowej [1]



Rys. 2. Przykłady mikrostruktur wykonanych obróbką elektrochemiczną z zastosowaniem uniwersalnej elektrody walcowej

Jedną z podstawowych wad mikroobróbki elektrochemicznej jest mała dokładność kształtowania. Proces ten jednak charakteryzuje się relatywnie wysoką wydajnością. Dlatego też opracowano koncepcję integracji mikrotechnologii elektrochemicznej i elektroerozyjnej w ramach jednej obrabiarki.

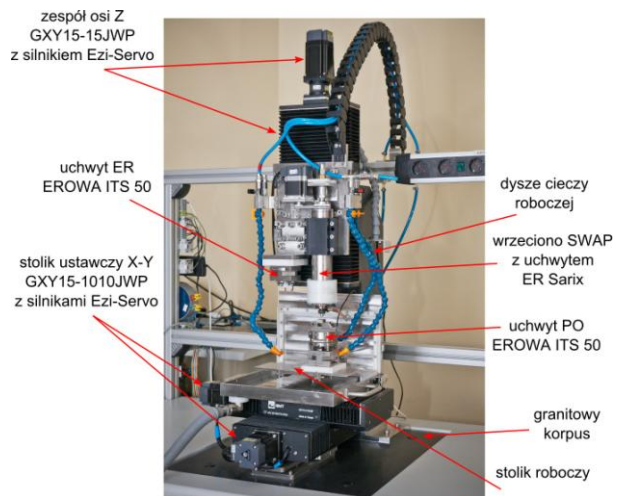
W obróbce elektroerozyjnej (EDMM) nadatek usuwany jest z przedmiotu obrabianego w wyniku zjawisk towarzyszących wyładowaniom elektrycznym (parowanie, topienie i rozrywanie materiału) w obszarze pomiędzy przedmiotem obrabianym a elektrodą roboczą. Jest to racjonalna alternatywa obróbki przy kształtowaniu mikroelementów wykonanych z materiałów trudnoobrabialnych. Dużą zaletą EDMM jest możliwość wykonywania skomplikowanych kształtów krzywoliniowych z dużą dokładnością ($< 2 \mu\text{m}$).

Porównanie cech mikroobróbki elektrochemicznej i elektroerozyjnej prowadzi do wniosku, że są to technologie wzajemnie komplementarne. Wynika to z faktu że zarówno w obróbce elektrochemicznej jak i elektroerozyjnej stosuje się takie same odmianny kinematyczne do kształtowania przedmiotu, obie metody obróbki stosuje się do wytwarzania geometrycznych struktur trójwymiarowych, mikromatryc oraz mikro form odlewniczych i wtryskowych. Mikroobróbka elektroerozyjna charakteryzuje się wysoką dokładnością, natomiast w przeciwieństwie do mikroobróbki elektrochemicznej jest mało wydajna oraz występuje w niej zużycie narzędzia.

Dlatego też zaproponowano koncepcję połączenia mikroobróbki elektrochemicznej i elektroerozyjnej w sekwencyjny proces realizowany na tej samej obrabiarence. Celem połączenia jest minimalizacja wad obu technologii a w szczególności skrócenie całkowitego czasu obróbki (w odniesieniu do procesu EDMM). Połączenie to może być realizowane w operacjach drążenia, wiercenia lub obróbki uniwersalną elektrodą walcową.

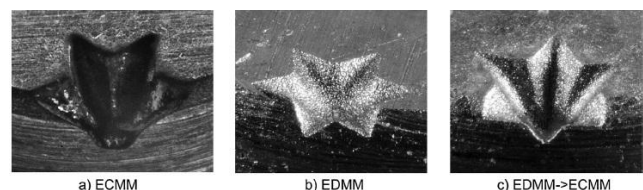
Pozytywne wyniki badań doświadczalnych były impulsem do podjęcia prac nad prototypem obrabiarki do realizacji hybrydowej technologii elektrochemiczno – elektroerozyjnej (rys. 3). Prototyp obrabiarki został skonstruowany w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji i umożli-

wia realizację następujących operacji technologicznych: obróbka elektrochemiczna i elektroerozyjna uniwersalną elektrodą walcową (frezowanie), drążenie elektrochemiczne i elektroerozyjne, wiercenie elektrochemiczne i elektroerozyjne, obróbka elektrochemiczna strumieniem elektrolitu, elektrochemiczne lub elektroerozyjne wytwarzanie narzędzi walcowych.

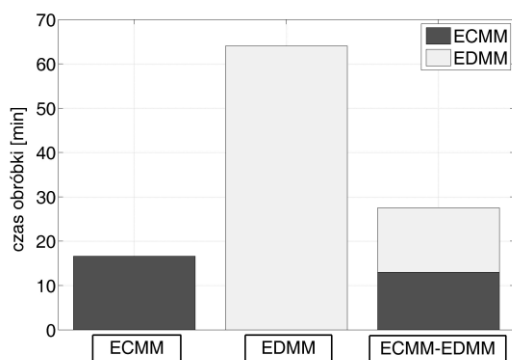


Rys. 3. Prototyp obrabiarki do realizacji hybrydowej technologii elektrochemiczno – elektroerozyjnej [1]

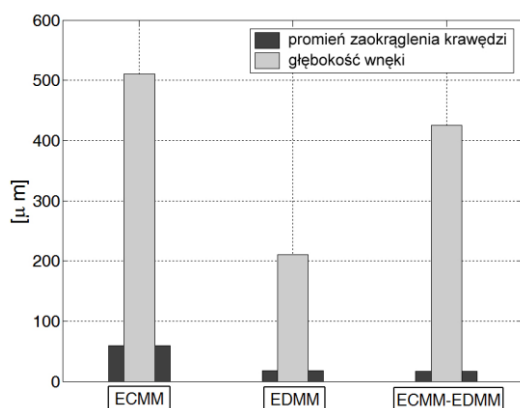
Wyniki badań własnych nad omówionym wyżej procesem pokazały, że możliwe jest prawie dwukrotne skrócenie czasu obróbki, w porównaniu do czasu trwania EDMM (rys. 4). W EC/EDMM średni promień krawędzi odchylenia jest znacznie mniejszy niż przy zastosowaniu ECMM (jest prawie taki sam jak podczas EDMM) (rys. 5). W EDMM występuje znaczne zużycie elektrody roboczej, natomiast w przypadku odpowiedniego dobrania parametrów obróbki podczas sekwencji EC/EDMM, wpływ zużycia narzędzia na kształt obrabiany jest znikomy (rys. 6). Przeprowadzone badania pozwalają także stwierdzić, że grubość warstwy usuniętej podczas fazy EDMM powinna wynosić ok. $100 \mu\text{m}$. Natomiast niższe wartości są tylko częściowo poprawiane przez EDMM. Warto podkreślić, że uzyskane kształty są trudne do osiągnięcia w przypadku zastosowania EDMM i ECMM oddzielnie. W pierwszym przypadku wiąże się to z utrudnionym dostarczeniem elektrolitu do szczeliny między-elektrodowej, natomiast w drugim wynika ze zużycia elektrody roboczej, które skoncentrowane jest na końcu elektrody.



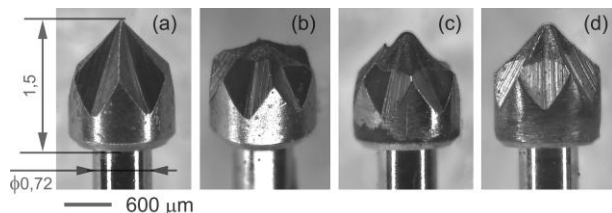
Rys. 4. Kształt uzyskany podczas mikrodrążenia elektrochemicznego (a), mikrodrążenia elektroerozyjnego (b), mikrodrążenia sekwencyjną EDMM -> ECMM [1]



Rys. 5. Porównanie czasu wykonania powierzchni przedstawionych na rysunku 4 [1]



Rys. 5. Porównanie średniego promienia zaokrąglenia krawędzi oraz głębokości kształtów przedstawionych na rysunku 4 [1]



Rys. 6. Rysunek przedstawiający elektrodę przed obróbką (a), po operacji drążenia elektroerozyjnego (b), oraz po nieprawidłowo (c) i prawidłowo (d) zaprojektowanej sekwencji EC/EDMM [1]

Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych prac teoretycznych i doświadczalnych opracowano technologie elektrochemicznego kształtowania struktur trójwymiarowych, która może być efektywnie wykorzystana w produkcji narzędzi do mikroformowania, prototypów oraz krótkich serii mikroelementów. Dzięki integracji mikroobróbki elektrochemicznej i elektroerozyjnej w ramach jednej obrabiarki uzyskano możliwość relatywnie wydajnego (w porównaniu z EDM) i dokładnego (w porównaniu z ECMM) kształtowania mikroelementów

LITERATURA

1. Skoczypiec S.: Elektrochemiczne metody wytwarzania mikroelementów. Monografia nr 426, Seria Mechanika, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2013.