

Obróbka elektrochemiczna – stan badań i kierunku rozwoju

Electrochemical machining – state of the art and direction of development

ADAM RUSZAJ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.12.188>

English version available on: www.mechanik.media.pl

Obróbkę elektrochemiczną (ECM) można zastosować do wydajnego wytwarzania elementów ze specjalnych materiałów przewodzących prąd elektryczny, które są trudne lub niemożliwe do kształtowania metodami konwencjonalnymi. W obróbce elektrochemicznej obrabiany przedmiot jest anodą, a materiał jest usuwany – atom po atomie – w wyniku reakcji elektrochemicznych bez użycia sił mechanicznych. Taki sposób usuwania materiału pozwala na uzyskanie warstwy wierzchniej o niskiej chropowatości. Bardzo ważną zaletą obróbki elektrochemicznej jest brak zużycia narzędzia (elektrody roboczej – katody), ponieważ reakcją ekwiwalentną do usuwania materiału z przedmiotu obrabianego jest wydzielanie się wodoru na powierzchni katody, który usuwany jest przez elektrolit przepływający przez szczelinę. W związku z tym w kierunku przepływu elektrolitu zmieniają się koncentracja wodoru i produktów roztwarzania oraz temperatura, co istotnie wpływa na rozkład przewodności elektrolitu oraz grubość szczeliny międzyelektrodowej – zob. równania (1) i (2) [1–5].

Proces roztwarzania przebiega zgodnie z prawami Ohma i Faradaya. Na tej podstawie można wyznaczyć wydajność obróbki oraz grubość szczeliny międzyelektrodowej. Dla przypadku z rys. 1 – przy założeniu, że proces jest ustalony, a w przestrzeni międzyelektrodowej właściwości elektrolitu są stałe – otrzymuje się [1, 5]:

$$S_u = \frac{\eta k_v \kappa (U - E)}{v_f} \quad (1)$$

gdzie: S_u – grubość szczeliny międzyelektrodowej w stanie ustalonym procesie, η – wydajność prądowa procesu roztwarzania, k_v – równoważnik elektrochemiczny obrabianego materiału, κ – elektryczna przewodność elektrolitu, E – suma spadków potencjału elektrycznego na granicy elektrod i elektrolitu, U – napięcie międzyelektrodowe, v_f – prędkość przesuwu elektrody roboczej.

Przewodność elektryczną elektrolitu w ogólnym przypadku można obliczyć z następującej zależności [1–5]:

$$\kappa = \kappa_0 (1 + \alpha \Delta T) (1 - C_H)^{3/2} \quad (2)$$

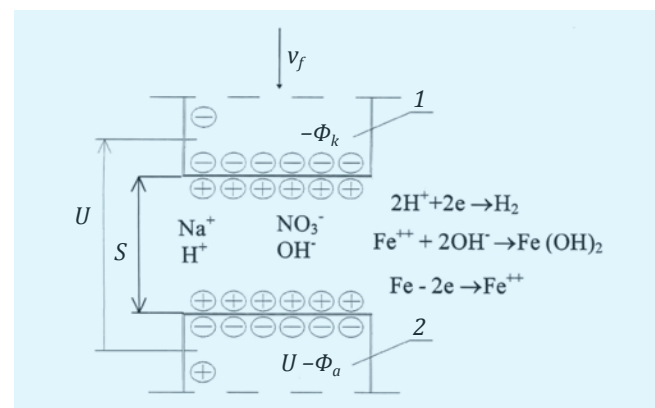
gdzie: κ – właściwa przewodność elektrolitu w wybranym punkcie przestrzeni międzyelektrodowej, κ_0 – właściwa przewodność elektrolitu na wlocie do obszaru obróbki, α – temperaturowy współczynnik przewodności elektrolitu, C_H – koncentracja objętościowa wodoru.

Electrochemical machining process (ECM) can be applied for efficient shaping advanced materials conducting electrical current, which are difficult or impossible for machining using conventional methods. In electrochemical machining, the workpiece is an anode and material is removed as a result of electrochemical reactions "atom by atom" without mechanical forces. This mechanism of material removal make it possible to obtain high quality of machined surface layer with uniform properties. The very important advantage of ECM process is also the fact that there is not a tool wear (working electrode – cathode), because the equivalent reaction to anodic dissolution is hydrogen generation on cathode surface and hydrogen can be easily removed from, the inter-electrode gap by electrolyte flow. Because of this advantages, the ECM process is widely applied in space, aircraft, car and electromechanical industry and research stimulating ECM development are carried out.

KEYWORDS: ECM, pulse ECM, ECM-CNC, micro ECM, wire ECM

Ogólna charakterystyka procesu ECM

Nadatek obróbkowy w procesie ECM jest usuwany w wyniku reakcji elektrochemicznych zachodzących na powierzchni obrabianego przedmiotu, który jest anodą (rys. 1). Przestrzeń międzyelektrodowa jest wypełniona przepływającym elektrolitem. Atomy obrabianego przedmiotu pod wpływem pola elektrycznego ulegają jonizacji i dyfundują w głąb szczeliny międzyelektrodowej, gdzie wchodzą w dalsze reakcje. Reakcją równoważną, za-

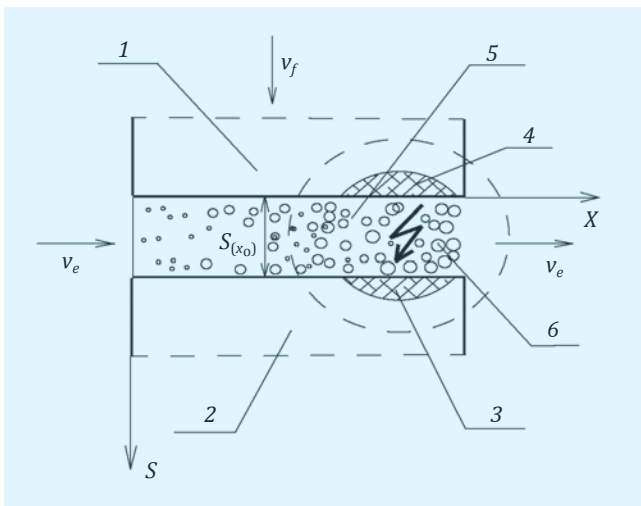


Rys. 1. Uproszczony schemat obszaru międzyelektrodowego w procesie obróbki elektrochemicznej w wodnym roztworze NaNO_3 ; Φ_a , Φ_k – potencjały elektrod, U – napięcie międzyelektrodowe, v_f – prędkość przesuwu elektrody roboczej, S – grubość szczeliny międzyelektrodowej [5]

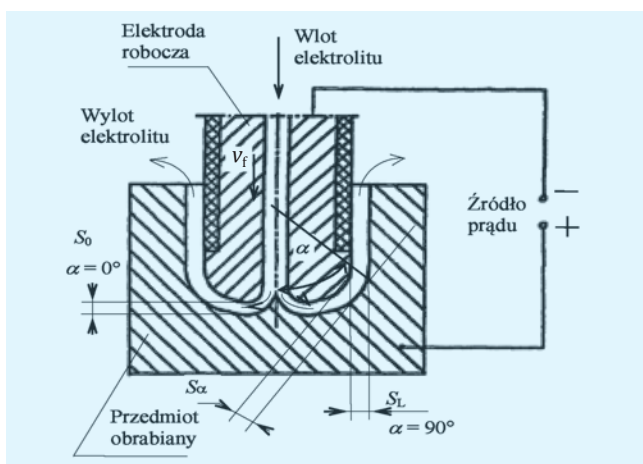
* Prof. dr hab. inż. Adam Ruszaj (ruszaj@mech.pk.edu.pl, aruszaj@pwsz-ns.edu.pl) – Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej oraz Instytut Techniczny Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Nowym Sączu

Zjawiska zachodzące w szczelinie międzyelektrodowej decydują o podstawowych zaletach procesu ECM [1–5], takich jak:

- możliwość wydajnej obróbki materiałów przewodzących prąd elektryczny, niezależnie od ich właściwości mechanicznych, trudnych lub niemożliwych do obróbki metodami klasycznymi;
- możliwość uzyskania dobrej jakości warstwy wierzchniej oraz małej chropowatości powierzchni, ponieważ materiał jest usuwany najmniejszymi możliwymi porcjami – atomami, a do usuwania nadmiaru nie potrzeba sił mechanicznych wprowadzających zmiany w warstwie wierzchniej; oczywiście na obrabiany przedmiot i elektrodę roboczą przy obróbce dużych powierzchni działają nawet bardzo duże siły wynikające z ciśnienia elektrolitu przepływającego przez obszar obróbki;
- brak zużycia elektrody roboczej; w trakcie procesu z powierzchni narzędzia – elektrody roboczej – nie jest usuwany materiał.



Rys. 2. Schemat uszkodzenia elektrody w wyniku wyładowań elektrycznych: 1 – elektroda robocza; 2 – obrabiany przedmiot; 3 – materiał usunięty z obrabianej powierzchni w wyniku wyładowania elektrycznego; 4 – materiał usunięty z powierzchni elektrody roboczej w wyniku wyładowania elektrycznego; 5 – obszar szczeliny międzyelektrodowej, w którym wystąpił stan krytyczny; 6 – pęcherzyki gazu; v_f – prędkość przesuwu elektrody roboczej; v_e – prędkość przepływu elektrolitu [5]



Rys. 3. Schemat drążenia powierzchni krzywoliniowej 3D (np. wnętrza roboczej matrycy, kokili lub formy). Stosowane w praktyce wartości natężenia prądu, przekraczające niekiedy 10 000 A, powodują intensywne wydzielanie wodoru i ciepła. Aby utrzymać temperaturę elektrolitu i koncentrację objętościową wodoru, prędkość przepływu elektrolitu może wynosić nawet 20 m/s [5]. Oznaczenia: α – kąt zarysu powierzchni obrabianej; S_0 , S_α , S_L – grubość szczeliny międzyelektrodowej odpowiednio dla: $\alpha = 0^\circ$ punktu o kącie zarysu α , $\alpha = 90^\circ$

Podstawowym warunkiem odniesienia tych korzyści jest równomierny i stabilny przepływ elektrolitu przez szczelinę międzyelektrodową oraz możliwie niewielka zmiana właściwości elektrolitu, a zwłaszcza jego właściwej przewodności elektrycznej, której wartość zależy m.in. od temperatury i koncentracji objętościowej wodoru. Warunki przepływu elektrolitu powinny gwarantować jego równomierny rozptył na obrabianej powierzchni, bez stref zastojów, cyrkulacji czy obszarów kawitacji. Ponadto prędkość przepływu powinna być tak dobrana, aby temperatura oraz koncentracja objętościowa wodoru nie przekroczyły wartości krytycznych ($T_{kr} \approx 60\div 70^\circ\text{C}$, $C_{H,kr} \approx 70\div 75\%$). W przeciwnym razie w szczelinie pojawiają się wyładowania elektryczne uszkadzające obie elektrody i powodujące przerwanie procesu (rys. 2) [1–5].

Z tego uproszczonego opisu wyłaniają się podstawowe problemy związane z modelowaniem i symulacją komputerową procesu ECM. W wyniku modelowania otrzymuje się rozkłady przestrzenne wszystkich omawianych wielkości, przy czym ważny jest zwłaszcza rozkład grubości szczeliny międzyelektrodowej, niezbędny do wyznaczenia kształtu i wymiarów powierzchni obrabianej dla zadanej elektrody (tzw. zadanie proste) lub do korekcji elektrody roboczej w celu otrzymania zadanej powierzchni obrabianej (tzw. zadanie odwrotne). Warunkiem koniecznym praktycznego wykorzystania modelowania matematycznego oraz symulacji komputerowej jest zadowalająca zgodność ich wyników z wynikami doświadczeń. Opisane zjawiska wskazują również, że proces ECM charakteryzuje się stosunkowo dużą losowością, co utrudnia jego automatyzację. Aby ograniczyć losowość procesu oraz ujednolicić właściwości elektrolitu – zwłaszcza w obróbce złożonych powierzchni 3D (rys. 3) – podejmuje się następujące działania [np. 1–11, 18]:

- obróbkę złożonych powierzchni swobodnych realizuje się nawet w trzech etapach, które zapewniają kolejno uzyskanie dużej wydajności oraz wysokiej dokładności wymiarowej i jakości powierzchni;
- w przestrzeni międzyelektrodowej zapewnia się jednorodność warunków (możliwie małą zmienność temperatury i koncentracji objętościowej wodoru), co zwiększa dokładność modelowania matematycznego i symulacji komputerowej oraz pozwala na uzyskanie wymaganej dokładności obróbki i wysokiej jakości obrabianej powierzchni.

W praktyce spełnienie drugiego z tych warunków osiąga się dzięki zastosowaniu:

- mieszaniny elektrolitu z gazem (N_2 , CO_2) – mieszanina jest przygotowywana przed wlotem do obszaru obróbki; ostatnio ten wariant technologiczny jest rzadko stosowany – wypiera go obróbka impulsowa;
- dodatkowych względnych ruchów elektrod, np. drgań elektrod (anody, katody) – wibracje elektrod powodują mieszanie elektrolitu w szczelinie; pomocne może być zastosowanie drgań ultradźwiękowych;
- takich wartości napięcia impulsowego (często sprzężonego z drganiami czy oscylacjami elektrod), czasu impulsu napięcia i czasu przerwy pomiędzy impulsami (lub pakietami impulsów), że ciepło oraz produkty reakcji powstające w czasie impulsu napięcia zostają całkowicie usunięte przez przepływający elektrolit w czasie przerwy pomiędzy impulsami;
- uniwersalnych elektrod roboczych o prostym kształcie i powierzchni mniejszej od powierzchni obrabianej, charakteryzujących się specjalną kinematyką – w tym przypadku kształt przedmiotu obrabianego uzyskuje się w wyniku odwzorowania trajektorii względnego ruchu elektrod (w drążeniu ECM kształt przedmiotu obrabianego

otrzymuje się w wyniku odwzorowania kształtu i wymiarów skorygowanej elektrody roboczej);

- kombinacji powyższych przypadków.

Dalej przedstawiono działania, które umożliwiły uzyskanie większej jednorodności właściwości płynu (elektrolitu + produkty reakcji) i tym samym uprościły modelowanie matematyczne oraz poprawiły dokładność symulacji komputerowej i rzeczywistej obróbki. Należy podkreślić, że przyjęte uproszczenia ograniczają też losowość procesu ECM i czynią go bardziej podatnym na automatyzację.

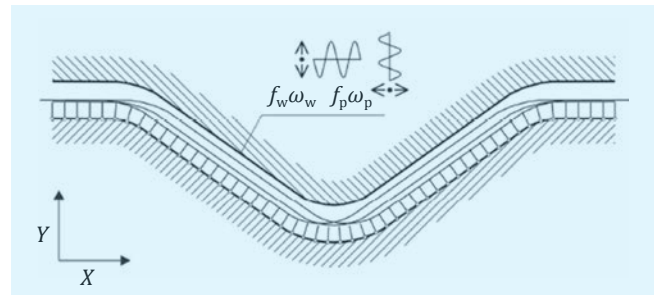
Drażenie elektrochemiczne

Schemat obróbki z drganiami elektrody w dwóch osiach przedstawiono na rys. 4 [10]. Dla tego przypadku opracowano system komputerowego wspomagania projektowania procesu technologicznego, który zawiera pakiety do matematycznego modelowania procesu oraz jego symulacji komputerowej. System został zweryfikowany doświadczalnie dla następujących parametrów:

- napięcia międzyelektrodowego 15 V,
- elektrolitu 15% NaNO₃,
- wydatku elektrolitu 2 dm³/min,
- temperatury elektrolitu $T = 293$ K,
- prędkości przesuwu elektrody $v_f = 1$ mm/min,
- dwóch wariantów drgań elektrody roboczej: w kierunku przesuwu elektrody (drgania o amplitudzie $A = 0,1$ mm i częstotliwości $f = 30$ Hz) oraz w kierunku do niego prostopadłym (drgania o amplitudzie $A = 0,05$ mm i częstotliwości $f = 60$ Hz).

Na podstawie analizy wyników symulacji komputerowej oraz ich porównania z wynikami badań stwierdzono, że zastosowanie wibracji elektrody roboczej w dwóch osiach powoduje ujednorodnienie właściwości elektrolitu w obszarze obróbki, co upoważnia do przeprowadzenia modelowania i symulacji przy założeniach upraszczających. Zgodność wyników pomiarów oraz symulacji jest zadowalająca. Podobne rezultaty uzyskano w przypadku modelowania i symulacji komputerowej drażenia ECM powierzchni obrotowych z różnymi wariantami ruchu drgającego: drganiami w kierunku posuwu elektrody oraz drganiami skrętnymi wokół osi obrotu [11]. W badaniach weryfikacyjnych zastosowano następujące parametry: napięcie międzyelektrodowe $U = 15$ V, elektrolit 15% NaNO₃ o temperaturze $T = 293$ K i wydatku $Q = 3$ dm³/min, ciśnienie na wlocie do obszaru obróbki $p = 0,1$ MPa, grubość szczeliny początkowej $S_0 = 0,2$ mm. Parametry kinematyczne były następujące: prędkość ruchu obrotowego elektrody $n = 800 \div 1600$ obr/min, amplituda drgań $A = 0,1$ mm, częstotliwość drgań $f = 30$ lub 60 Hz. Po porównaniu wyników symulacji komputerowej z wynikami badań stwierdzono, że dzięki wprowadzeniu w analizowanym przypadku ruchu względnego elektrod (ruchu obrotowego, drgań) uzyskano zadowalającą zgodność tych wyników.

Drażenie elektrochemiczne znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Podstawowymi elementami silników lotniczych są turbiny, czyli elementy zawierające odpowiednio ukształtowane łopatki. Gazy spalinowe uderzają w łopatki i wprawiają turbinę w ruch obrotowy. Dotychczas każdą z łopatek silnika lotniczego wytwarzano (metodą elektrochemiczną) oddzielnie, a następnie gotowe łopatki osadzano w specjalnych zagłębieniach (zamkach) na obwodzie pierścienia turbiny. Wykonywanie zamków w pierścieniu i negatywów zamka na częściach chwytowych łopatek oraz montaż łopatek są operacjami bardzo trudnymi i pracochłonnymi. Z tego powodu coraz częściej łopatki wykonuje się elektroche-

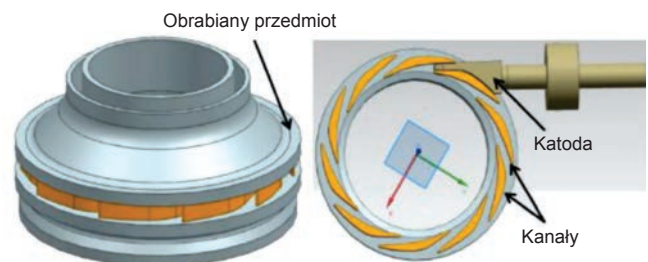


Rys. 4. Schemat drażenia elektrochemicznego z drganiami elektrody w dwóch osiach [10]

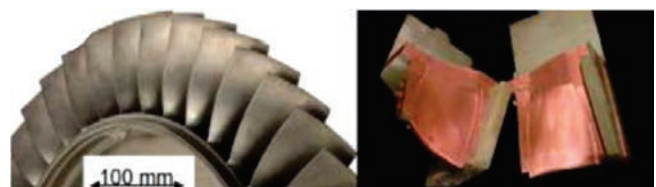
micznie bezpośrednio na pierścieniu turbiny – taką turbinę wykonaną jako jedną część nazywa się bliskiem (od *bladed disk*). Zalety takiego rozwiązania są oczywiste (rys. 5 i 6): zwartość konstrukcji, mniejsze wymiary, większa sztywność i ogólna wytrzymałość, możliwość uzyskania większych obrotów, dłuższe okresy między przeglądami itp. [12–16].

Obróbka elektrochemiczna – jako metoda bardzo wydajna i pozwalająca na uzyskanie dobrej jakości powierzchni – jest stosowana w procesach wytwarzania łopatek turbin lotniczych silników przepływowych. ECM nie wprowadza w warstwie wierzchniej zmian, jakie można zaobserwować na powierzchniach po obróbce skrawaniem czy obróbce elektroerozyjnej.

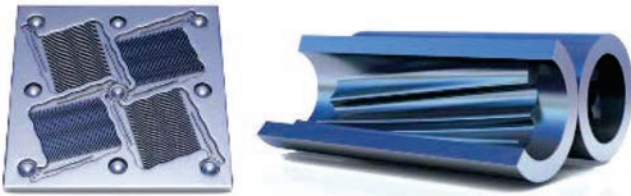
Obecnie do obróbki elementów lotniczych (również blisków) wykorzystuje się obróbkę elektrochemiczną impulsową z ruchem drgającym elektrod. Gdy elektroda zbliża się do powierzchni obrabianej, generowany jest pakiet impulsów, natomiast gdy elektroda odsuwa się od powierzchni obrabianej, produkty reakcji elektrochemicznych oraz ciepło są usuwane na zewnątrz obszaru obróbki [15]. W szczególnych przypadkach obróbkę realizuje się w komorze ciśnieniowej [16] z dławieniem wypływu elektrolitu. Dzięki temu przepływ elektrolitu przez obszar obróbki jest stabilny i rzadko występują warunki krytyczne. Ponadto przy zwiększonym ciśnieniu w obszarze obróbki mniejsza jest koncentracja objętościowa wodoru. Ma to istotne znaczenie w obróbce dużych precyzyjnych elementów, prowadzonej z dużą gęstością prądu – rzędu $50 \div 200$ A/cm², co odpowiada natężeniu prądu nawet do



Rys. 5. Schemat obróbki monolitycznego wirnika [12]



Rys. 6. Monolityczna turbina niskociśnieniowa, wytworzona z Ti6Al4V (po lewej), oraz elektrody, którymi wykonano kanały pomiędzy łopatkami (po prawej) [16]



Rys. 7. Przykłady elementów wykonanych w operacji drążenia PECM: płyta reaktora chemicznego o wymiarach 30 × 30 mm, stosowana w wymiennikach ciepła (po lewej), oraz element pompy lub wysokociśnieniowego miksera o stosunku długości do średnicy wynoszącym 100 (po prawej) – w zasadzie niemożliwy do wytworzenia metodami konwencjonalnymi (źródło: <http://electrochemicalmachining.com>)

kilku tysięcy amperów. Wszystkie te działania sprzyjają zmniejszeniu losowości procesu oraz poprawie dokładności obróbki i jakości warstwy wierzchniej. Przykłady monolitycznych turbin wytworzonych metodą ECM przedstawiono na rys. 5 i 6, a przykłady innych jej zastosowań – na rys. 7.

Podsumowując tę część rozważań, można stwierdzić, że dzięki modyfikacji klasycznego procesu drążenia – przez wprowadzenie drgań, ruchu obrotowego elektrod (w obróbce powierzchni obrotowych) czy impulsowego napięcia (PECM) – oraz prowadzeniu obróbki w komorach ciśnieniowych uzyskuje się bardziej równomierne warunki roztworzenia i stabilizację przepływu elektrolitu oraz możliwość realizacji procesu etapami, w których parametry są kolejno optymalizowane ze względu na wydajność, dokładność i jakość powierzchni. Ponadto upraszcza się modelowanie matematyczne i symulacje komputerowe, przy czym ich wyniki nie różnią się istotnie od wyników badań doświadczalnych. Z drugiej strony przyczynia się to do poprawy jakości obrabianych elementów i zmniejszenia losowości procesu obróbkowego, który w większości przypadków staje się możliwy do automatyzacji.

Obróbka elektrochemiczna uniwersalnymi elektrodami

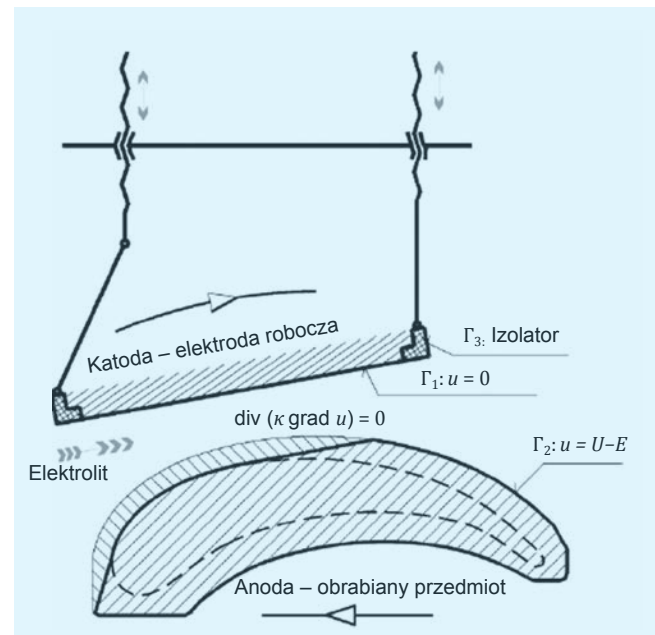
W tym przypadku uniwersalna elektroda robocza oraz obrabiany przedmiot wykonują względny ruch – kształt powierzchni obrabianej uzyskuje się w wyniku odwzorowania trajektorii tego względnego ruchu w przedmiocie obrabianym. Wyróżnia się tu dwa przypadki:

- obróbkę elektrochemiczną generacyjną – ECGM (rys. 8),
- elektrochemiczne frezowanie z ruchem obrotowym elektrody (rys. 9) lub struganie – *planning* – bez ruchu obrotowego. W obu przypadkach objętość obszaru obróbki jest mała i intensywnie przepłukiwana elektrolitem, co uzasadnia przyjęcie w modelowaniu matematycznym i symulacji komputerowej założenia, że obszar obróbki ma równomierne i stałe właściwości. Przy tym założeniu modelowanie matematyczne oraz symulacja komputerowa są łatwiejsze, a uzyskane wyniki w zadowalającym stopniu pokrywają się z wynikami badań doświadczalnych. Również w rozważanym przypadku proces obróbki przebiega stabilniej niż drążenie. Ponadto często podczas frezowania czy strugania elektroda robocza jest przemieszczana ponad powierzchnią obrabianą, co wyklucza wystąpienie zwarć czy styku (kolizji) elektrod. Stwarza to idealne warunki do automatyzacji – systemy do takiej realizacji obróbki są oznaczane jako ECM-CNC.

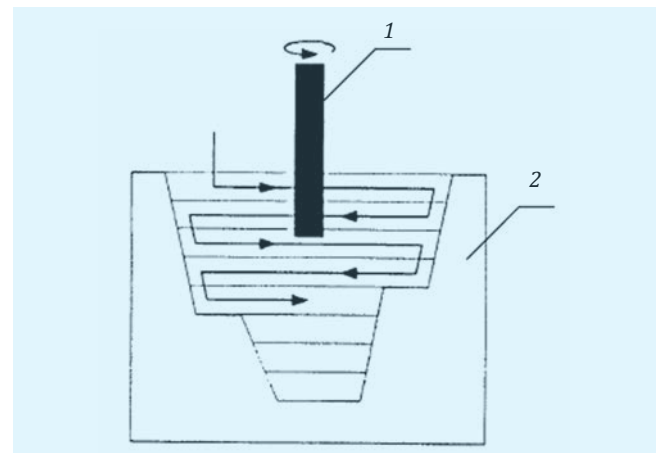
Matematyczne modelowanie, symulacje komputerowe oraz badania doświadczalne procesu ECGM [17] pozwalają na stwierdzenie, że umożliwia on obróbkę określonej klasy wyrobów o złożonych kształtach 3D. Wyniki mode-

lowania i symulacji komputerowej są wystarczająco zgodne z wynikami badań doświadczalnych. Losowość procesu jest zdecydowanie mniejsza w porównaniu z klasycznym drążeniem, więc proces może zostać zautomatyzowany.

Na rys. 9 przedstawiono poglądowy schemat frezowania elektrochemicznego z zastosowaniem wirującej elektrody, przemieszczającej się wzdłuż specjalnej trajektorii. W niektórych przypadkach elektroda nie wykonuje ruchu obrotowego – taką operację nazywa się struganiem ECM. Uniwersalne elektrody mogą mieć dowolny kształt, przy czym w makroobróbce zwykle stosuje się elektrody walcowe kuliste, a w mikroobróbce – elektrody walcowe płaskie [5, 7–9, 18, 20, 23]. Obróbka ECM uniwersalnymi elektrodami jest procesem stabilnym oraz wygodnym do matematycznego modelowania, symulacji komputerowej oraz automatyzacji, jednak ma jedną istotną wadę, a mianowicie bardzo małą wydajność. Tego rodzaju obróbkę stosuje się do operacji specjalnych, takich jak wytwarzanie elementów cienkościennych, obróbka szczelin czy kieszeni [23] oraz operacje wykończeniowe (wygładzanie) powierzchni po zgrubnym frezowaniu klasycznym lub obróbce elektroerozyjnej (rys. 15, 16) [19].



Rys. 8. Schemat procesu ECGM – kształt przedmiotu obrabianego jest uzyskiwany przez odwzorowanie w nim trajektorii względnego ruchu płaskiej elektrody roboczej [17]



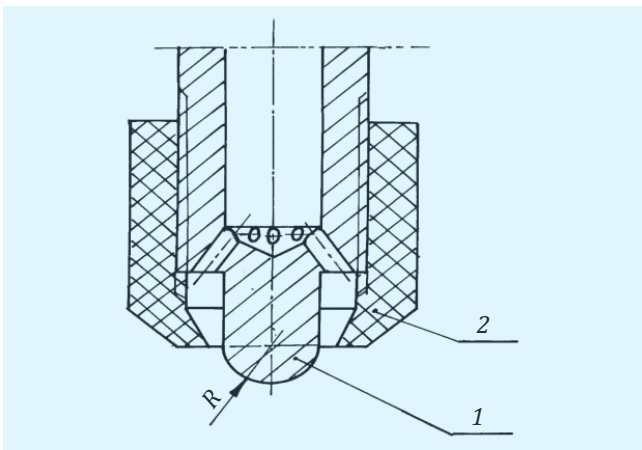
Rys. 9. Schemat frezowania elektrochemicznego uniwersalną elektrodą walcową (1 – elektroda walcowa, 2 – obrabiany przedmiot) [5]

Uniwersalna elektroda robocza może mieć dowolny kształt, jednak najczęściej stosuje się elektrody walcowe kuliste lub walcowe płaskie. Elektrolit jest dostarczany do obszaru obróbki w sposób wymuszony – przez otwór w elektrodzie (rys. 10 – makroobróbka) – albo elektroda i obszar obróbki są polewane elektrolitem przez zewnętrzną dyszę (rys. 11 – zwykle mikroobróbka).

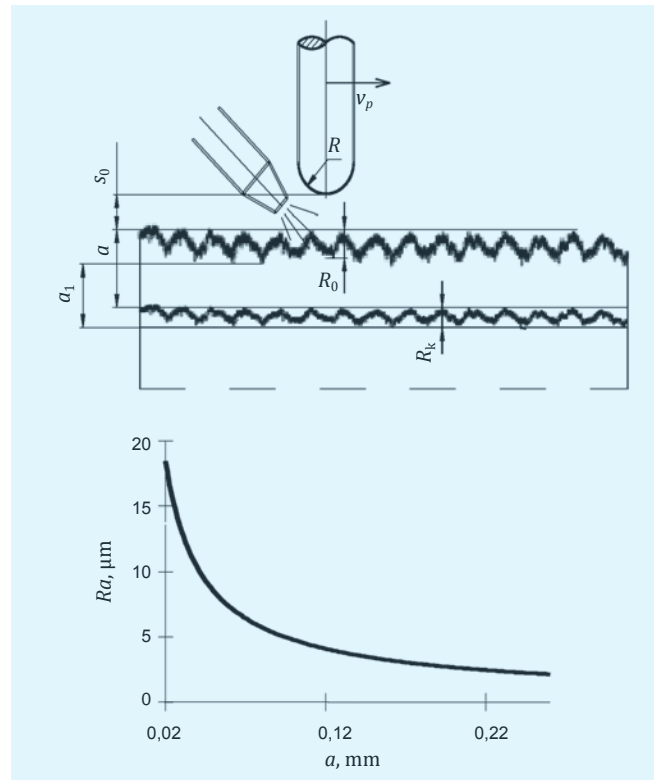
Dobierając odpowiednio parametry obróbki, można usunąć ślady (falistość, krater, po wyładowaniach) po obróbce zgrubnej frezowaniem czy obróbce elektroerozyjnej. Na przykład falistość powierzchni po frezowaniu powierzchni swobodnej 3D frezem kulistym o promieniu $R = 5$ mm, wynoszącą $0,1$ mm, zmniejszono praktycznie do zera, czyli do skali chropowatości powierzchni ($Ra \approx 2 \mu\text{m}$), co osiągnięto dzięki przeprowadzeniu wygładzania w następujących warunkach: $U = 16$ V, $v_p = 42$ mm/min, $S_0 = 0,2$ mm, elektroda robocza o promieniu $R = 9$ mm, czas obróbki $t = 45$ min, elektrolit – 15% wodny roztwór NaNO_3 [18].

Badania nad uniwersalnymi elektrodami opisano m.in. w [5, 7, 8, 18]. W pracach tych przedstawiono model matematyczny, wyniki symulacji komputerowych oraz wyniki badań doświadczalnych w zakresie kształtowania elementów oraz wygładzania powierzchni, przede wszystkim elektrodą kulistą. Te wyniki pozwoliły na opracowanie kompleksowego systemu – służącego do modelowania matematycznego i symulacji komputerowej oraz komputerowego wspomaganie projektowania procesu technologicznego – sprzężonego z obrabiarką elektrochemiczną ECM-CNC, na której ten proces jest realizowany w sposób automatyczny. W skład systemu wchodzi [5]:

- **A – podsystem komputerowego wspomaganie projektowania procesu technologicznego**, obejmujący: komputerową bazę danych technologicznych z oprogramowaniem wspomagającym dobór warunków obróbki; oprogramowanie do komputerowej symulacji procesu obróbki na podstawie modelu matematycznego; oprogramowanie wspomagające projektowanie trajektorii elektrody roboczej oraz optymalizację warunków obróbki w celu uzyskania założonego kształtu przedmiotu obrabianego i wymaganych właściwości warstwy wierzchniej; oprogramowanie do automatycznego generowania programu sterującego obrabiarką elektrochemiczną EOCA 40; systemy AutoCAD oraz PROENGINEER;
- **B – podsystem realizacji procesu obróbki**, obejmujący układ sterowania PRONUM 640 FC oraz obrabiarkę EOCA 40;
- **C – podsystem zarządzający współpracą podsystemów A i B** oraz przepływem informacji w obrębie systemu.

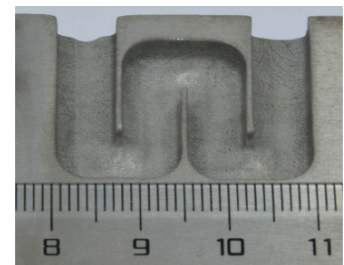


Rys. 10. Elektroda w kształcie czaszy kulistej stosowana w kształtowaniu ECM makroelementów (R – promień elektrody roboczej, 1 – elektroda robocza, 2 – dysza zmieniająca kierunek przepływu elektrolitu) [5]

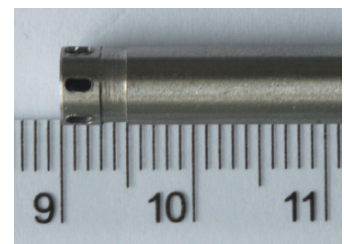


Rys. 11. Schemat wygładzania powierzchni uniwersalną elektrodą w kształcie czaszy kulistej (na górze) oraz zależność $Ra = f(a)$ (na dole); v_p – prędkość przesuwu uniwersalnej elektrody roboczej ponad powierzchnią obrabianą (wygładzaną), a – naddatek usunięty z wierzchołków nierówności, a_1 – naddatek usunięty z dna nierówności, R – promień elektrody roboczej, R_0 – wysokość nierówności powierzchni przed wygładzaniem, R_k – wysokość nierówności po wygładzaniu, Ra – chropowatość powierzchni [5, 7, 8]

Rys. 12. Element cienkościenny wykonany frezowaniem elektrochemicznym za pomocą elektrody pokazanej na rys. 13 [23]

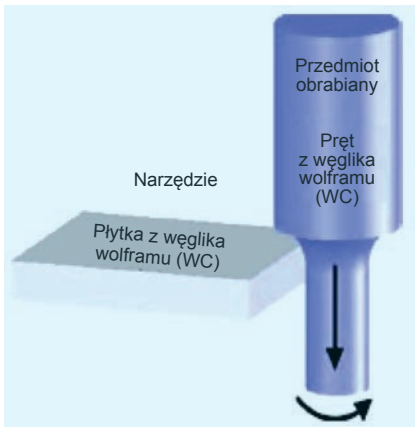


Rys. 13. Elektroda do frezowania struktury cienkościennej pokazanej na rys. 12. Elektrolit dostarczany jest do obszaru obróbki przez otwory wykonane w powierzchni bocznej – walcowej, naddatek elektrolitu również jest usuwany przez tę powierzchnię [23]



Mikroobróbka elektrochemiczna

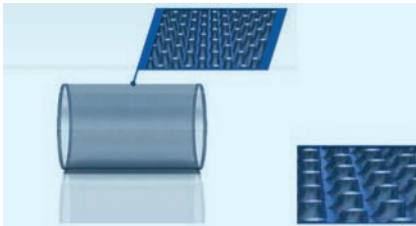
Obróbka elektrochemiczna mikroelementów czy mikrostruktur jest zwykle realizowana w operacjach: drażenia (bez ruchu obrotowego elektrody), wiercenia (z ruchem obrotowym elektrody), frezowania (z ruchem obrotowym elektrody) oraz strugania (bez ruchu obrotowego elektrody) [19–26]. W przypadku mikroobróbki ($d \ll 1$ mm) poważny problem stanowią wykonanie i pozycjonowanie elektrody roboczej. Z tego powodu elektrody robocze wykonuje się zazwyczaj na tej samej obrabiarkę, na której są wytwarzane mikroelementy [22].



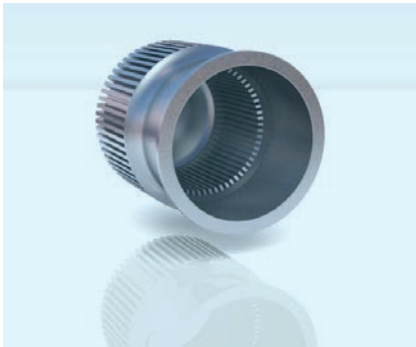
Rys. 14. Schemat obróbki elektrody roboczej do drażenia lub wiercenia mikrootworów oraz do frezowania mikrostruktur 3D [22]

Wykorzystując PECM oraz elektrodę wytworzoną w sposób pokazany na rys. 14, w płytce WC-Co o grubości 200 μm wykonano otwory o średnicy 48 μm (na wejściu elektrody) oraz 42 μm (na wyjściu elektrody). Zastosowano elektrolit 0,5 M NaNO_3 + 0,2 M H_2SO_4 , a parametry procesu były następujące: grubość szczeliny międzyelektrodowej 3÷5 μm , impulsy napięcia 9 V, czas impulsu 100 ns, przerwa pomiędzy impulsami 1 μs , posuw elektrody 0,1 $\mu\text{m/s}$ [22]. Również w procesie PECM, ale z zastosowaniem elektrody roboczej w formie drutu platynowego o średnicy 10 μm , czasu impulsu 50 ns, napięcia impulsu 1,6 V i częstotliwości impulsów 2 MHz, wykonano struktury 3D < 30 μm – najmniejsza struktura przestrzenna miała wymiary 5 × 10 × 12 μm [24]. Oczywiście im większe są wymiary projektowanych otworów oraz mikrokształtów, tym łatwiej je wykonać. Przykłady mikrostruktur wytwarzanych na skalę przemysłową przedstawiono na rys. 15–17.

Mikroelementy lub mikrostruktury coraz częściej wykonuje się metodą wycinania drutowego WECM, jednak w tym przypadku podstawowym problemem jest usuwanie z obszaru obróbki produktów roztrawiania, wodoru



Rys. 15. Element walcowy (po lewej) do produkcji perforowanych elementów ze specjalną mikrostrukturą (po prawej) (źródło: <http://electrochemicalmachining.com>)

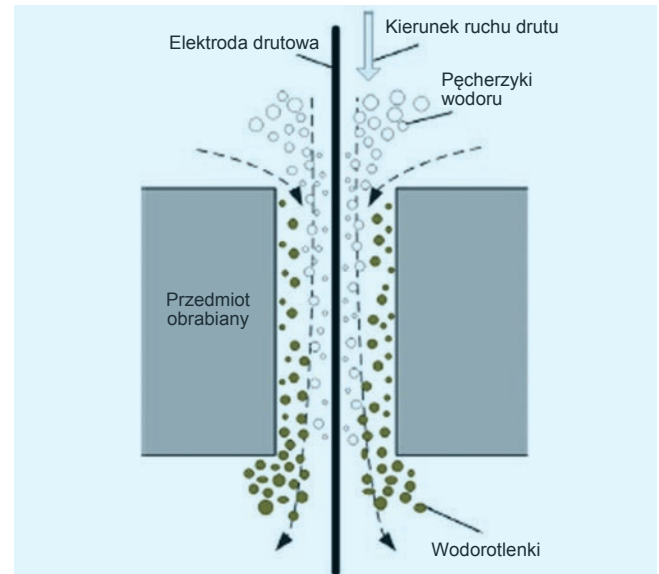


Rys. 16. Element wykonany ze stopu niklu z 90 żebrami wewnętrznymi o szerokości 600 μm (źródło: <http://electrochemicalmachining.com>)

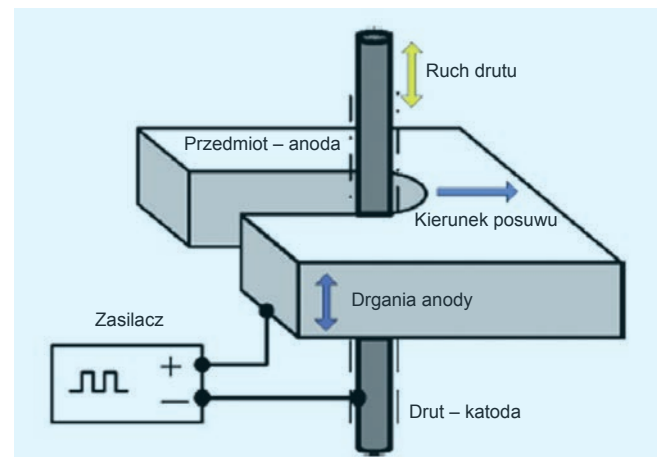


Rys. 17. Płyta wymiennika ciepła z mikrokanalami o wymiarach 800 × 400 μm , wykonana ze stopu niklu (źródło: <http://electrochemicalmachining.com>)

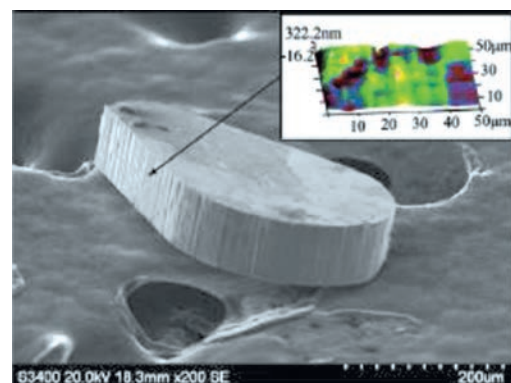
oraz ciepła (rys. 18). Rozwiązaniem tego problemu jest zapewnienie względnych ruchów drutu (katody) i obrabianego przedmiotu (anody) (rys. 19) oraz zastosowanie drutu o specjalnej strukturze powierzchni bocznej (rys. 21).



Rys. 18. Schemat obszaru cięcia w przypadku WECM [27]

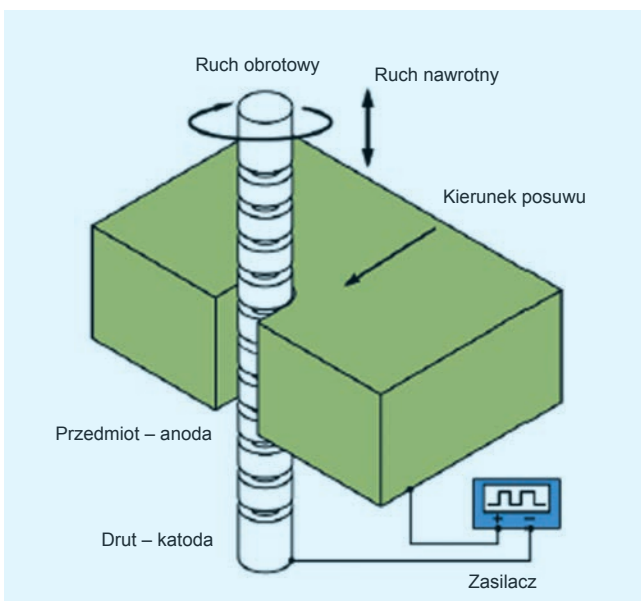


Rys. 19. Schemat procesu WECM w płytce o grubości 80 μm , wykonanej ze stopu na bazie kobaltu drutem tytanowym (Tungsten) o średnicy 10 μm . Elektrolit 0,01 M HCl. Drut i przedmiot obrabiany wykonują ruch drgający, ponadto drut jest dosuwany z prędkością 0,02 $\mu\text{m/s}$ w kierunku ciętej powierzchni [25]

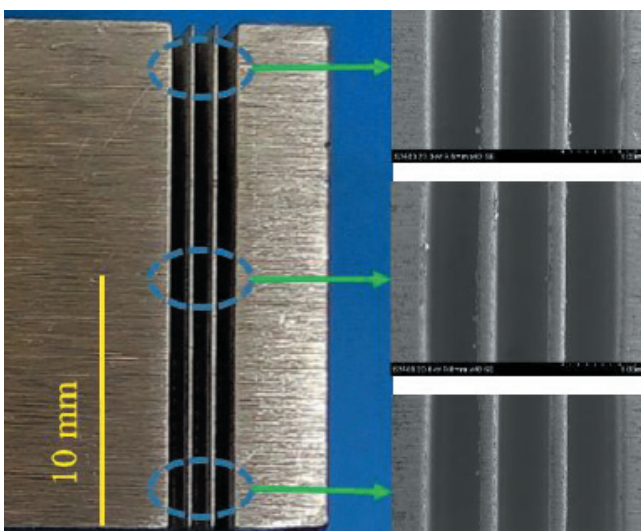


Rys. 20. Przykład wycinania ECM mikroelementu z optymalnymi parametrami: drganiem anody o amplitudzie 5 μm i częstotliwości 100 Hz, prędkością przemieszczania drutu 400 $\mu\text{m/s}$ (na ten przesuw nałożono drgania o amplitudzie 100 μm i częstotliwości 5 Hz), czasem impulsu napięcia 40 ns, okresem impulsu 6 μs . Wymiary wycinanych elementów: 150 i 400 μm . Chropowatość powierzchni cięcia $R_a \approx 0,058 \mu\text{m}$ [25]

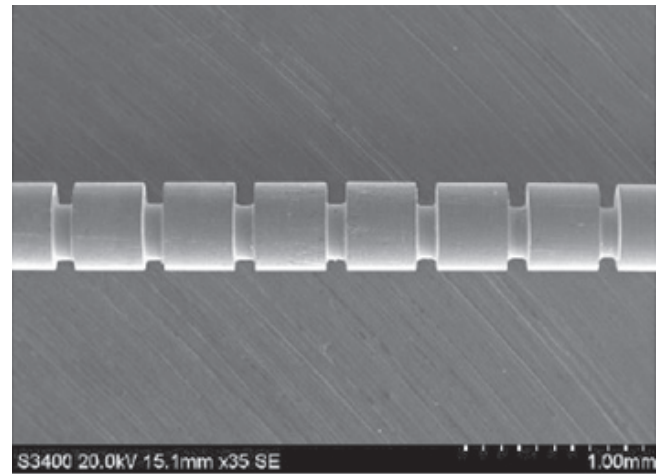
Na rys. 21 przedstawiono schemat wytwarzania mikrostruktur metodą WECM, aczkolwiek w taki sposób można wytwarzać również makrostruktury lub makroelementy. Wtedy również usuwanie produktów roztrawiania z obszaru obróbki wspomagane jest odpowiednio dobranym ruchem względnym elektrod (drułu i przedmiotu wycinanego), lecz w rozważanym przypadku stosowany jest grubszy drut niż w opisanych wcześniej operacjach mikrowycinania. W przypadku przedstawionym na rys. 21 usuwanie produktów roztrawiania z obszaru obróbki wspomagane jest przez specjalną strukturę powierzchni bocznej drutu (rys. 21, 23). Taka struktura generuje burzliwość przepływu elektrolitu przez szczelinę, co poprawia skuteczność usuwania produktów reakcji i umożliwia zwiększenie prędkości wycinania. Strukturyzowanie powierzchni bocznej drutu w WECM stanowi bardzo ważny kierunek dalszych badań.



Rys. 21. Schemat wycinania ECM z zastosowaniem drutu ze strukturyzowaną powierzchnią boczną [26]



Rys. 22. Cienkościenna mikrostruktura (o grubości ścianki 230 μm) wykonana w płycie ze stali nierdzewnej o grubości 20 mm według schematu pokazanego na rys. 21 i z zastosowaniem elektrody pokazanej na rys. 23. Amplituda impulsu napięcia 21 V, częstotliwość impulsów 100 kHz, współczynnik wypełnienia impulsu 40%, elektrolit NaNO_3 o stężeniu 15 g/l, prędkość posuwu elektrody (drułu) 1 $\mu\text{m/s}$, amplituda ruchu posuwisto-zwrotnego 20 mm, częstotliwość 1,5 Hz, prędkość obrotowa drutu 5000 obr/min [26]



Rys. 23. Elektroda drutowa ze stali nierdzewnej ze strukturyzowaną powierzchnią boczną: średnica zewnętrzna 500 μm , średnia szerokość i głębokość wgłębien – 113 i 100 μm [26]

Elektrochemiczne wycinanie drutowe w skali mikro i makro jest intensywnie rozwijane. Świadczą o tym liczne publikacje [np. 25, 26, 27], z których wynika, że ta metoda jest już stosowana w wytwarzaniu elementów lub struktur o wymiarach od ok. 100 μm .

Podsumowanie i wnioski

Dynamiczny rozwój obróbki elektrochemicznej wynika z jej podstawowych zalet:

- materiał jest usuwany wskutek reakcji elektrochemicznych – dzięki temu nie występują siły mechaniczne i nie ma zmian w strukturze warstwy wierzchniej; istotne siły mechaniczne mogą działać na elektrody w przypadku obróbki dużych powierzchni, przy czym są one efektem ciśnienia elektrolitu;
- usuwanie materiału małymi porcjami (atom po atomie) umożliwia uzyskanie wysokiej jakości powierzchni, jednak pod warunkiem zapewnienia optymalnych warunków elektrochemicznego roztrawiania oraz przepływu elektrolitu;
- elektroda robocza (katoda) nie zużywa się – na katodzie wydziela się wodór, który jest następnie usuwany przez elektrolit przepływający przez obszar obróbki; ubytkowe zużycie elektrody jest możliwe w przypadku wystąpienia wylądowań (rys. 2) spowodowanych zbyt wysoką temperaturą elektrolitu oraz koncentracją objętościową wodoru.

Podstawowe wady procesu ECM i trudności z jego realizacją wynikają z jego dużej złożoności, w tym licznych zjawisk fizyko-elektrochemicznych występujących w obszarze obróbki, przez co matematyczne modelowanie oraz komputerowe symulacje tego procesu charakteryzują się ograniczoną dokładnością. W ogólnym przypadku proces ECM cechuje wysoka losowość, a gdy przepływ elektrolitu nie jest optymalny, mogą wystąpić stany krytyczne prowadzące do wylądowań elektrycznych, które uszkadzają elektrodę roboczą i przedmiot obrabiany, co jest równoznaczne z przerwaniem obróbki. Z tych względów proces ECM jest niezwykle trudny do automatyzacji. Podstawowym kierunkiem rozwoju procesu ECM jest zwiększanie równomierności rozkładu właściwości fizycznych elektrolitu i stabilności jego przepływu oraz minimalizowanie możliwości wystąpienia wylądowań elektrycznych. W praktyce sprowadza się to do:

- zapewnienia dodatkowych względnych ruchów elektrod, co powoduje mieszanie elektrolitu w obszarze obróbki i wyrównywanie jego właściwości; skuteczne jest

zwłaszcza zastosowanie drgań ultradźwiękowych, które intensyfikują występowanie kawitacji sprzyjającej wyrównywaniu właściwości elektrolitu i depasywacji obrabianej powierzchni;

- stosowania i tym samym wytwarzania elementów obrotowych z wykorzystaniem dodatkowych względnych ruchów elektrod;
- zasilania szczeliny napięciem impulsowym – często sprzężonym z dodatkowym względnym ruchem elektrod (PECM);
- prowadzenia obróbki w komorach ciśnieniowych z dławieniem wypływu elektrolitu – skutkuje to zmniejszeniem koncentracji objętościowej wodoru, stabilizacją warunków hydrodynamicznych oraz dobrym wypełnieniem obszaru obróbki;
- zastosowania uniwersalnych elektrod oraz specjalnie zaprojektowanych trajektorii względnego ruchu obrabianego przedmiotu (anody) i narzędzia (katody); w tym przypadku kształt przedmiotu obrabianego otrzymuje się w efekcie odwzorowania trajektorii w materiale obrabianym; zastosowanie elektrod uniwersalnych wyraźnie zmniejsza obszar obróbki, stabilizuje właściwości elektrolitu oraz redukuje prawdopodobieństwo wyładowań elektrycznych, a tym samym umożliwia automatyzację procesu (tego typu obróbkę często nazywa się ECM-CNC) – niestety, uzyskuje się to kosztem zmniejszenia wydajności obróbki.

Z powyższych rozważań wyłaniają się następujące kierunki rozwoju procesu ECM:

- tworzenie zintegrowanych systemów do modelowania, symulacji i projektowania procesów technologicznych oraz wytwarzania (programów sterujących do automatycznej realizacji procesu na obrabiarkach ECM-CNC);
- wytwarzanie łopatek turbin silników przepływowych – co prawda istnieją alternatywne technologie wytwarzania łopatek turbin, jednak nie zostały one wdrożone ze względów bezpieczeństwa lotów – łopatki po ECM charakteryzują się wyższą jakością i można przyjąć, że ewentualne modyfikacje kształtu łopatek czy struktury ich powierzchni też będą realizowane z wykorzystaniem ECM;
- wytwarzanie lekkich i cienkościennych elementów (np. dla lotnictwa) ze specjalnych trudnoobrabialnych materiałów – również kompozytowych;
- wytwarzanie mikrostruktur i mikroelementów typu MEMS (*micro-electro-mechanical-system*);
- kształtowanie specjalnych właściwości warstwy wierzchniej elementów współpracujących (np. wygładzanie, wytwarzanie struktur bionicznych [28, 29]);
- dalszy rozwój WECM;
- doskonalenie technologii i obrabiarek ECM w tradycyjnych obszarach zastosowań ECM (elementy lotnicze, narzędzia do obróbki plastycznej itp.).

LITERATURA

1. Davydov A.D., Kozak J. „Vysokoskorostnoe elektrochimicheskoe formoobrazovanie”. Moskwa: Izd. Nauka, 1990.
2. Dąbrowski L. „Podstawy komputerowej symulacji kształtowania elektrochemicznego”. *Prace Naukowe PW. Mechanika*. 154 (1992).
3. Hardisty H., Milleham A.R., Shirvarni H. “A finite element simulation of the electrochemical machining process”. *CIRP Annals*. 42, 1 (1993): s. 201–204.
4. Kozak J. “Mathematical models for computer simulation of electrochemical machining processes”. *Journal of Materials Processing Technology*. 76, 1–3 (1998): s. 170–175.
5. Ruszaj A. „Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi” (*Unconventional methods of machine parts and tools manufacturing*). Kraków, 1999, s. 350.
6. Ruszaj A., Zybura M., Żurek R., Skrabalak G. “Some aspects of the electrochemical machining process supported by electrode ultrasonic vibration optimization”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 217 (2003): s. 1365–1371.
7. Ruszaj A., Czekaj J., Miller T., Skoczypiec S. “Electrochemical finishing surfaces after rough milling”. *International Journal for Manufacturing Science and Technology*. 7, 2 (2005): s. 21.
8. Kozak J., Chuchro M., Ruszaj A., Karbowski K. “The computer aided simulation of electrochemical process with universal spherical electrodes when machining sculptures surfaces”. *Journal of Materials Processing Technology*. 107, 1 (2000): s. 283–287.
9. Hinduja S., Pattavanitch J. “Experimental and numerical investigations in electrochemical milling”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 12 (2016): s. 79–89.
10. Paczkowski T. „Symulacja komputerowa obróbki elektrochemicznej powierzchni krzywoliniowych elektrodą roboczą o złożonym ruchu translacyjnym” (*Computer simulation of electrochemical machining curvilinear surfaces using electrode tool with complex movement*). Bydgoszcz: Bydgoszcz University of Technology, 2012.
11. Sawicki J. „Analiza i modelowanie procesu obróbki elektrochemicznej krzywoliniowych powierzchni obrotowych” (*Analysis and modelling process of electrochemical machining of curvilinear rotary surfaces*). Bydgoszcz: Bydgoszcz University of Technology, 2013.
12. Tang L., Gan W.M. “Utilization of flow field simulations for cathode design in electrochemical machining of aerospace engine blisks channels”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 72 (2014): s. 1759–1766.
13. Dong Z.D. i in. “Cathode design investigation based on iterative correction of predicted profile errors in electrochemical machining of compressor blades”. *Chinese Journal of Aeronautics*. January (2016).
14. Ruszaj A., Skoczypiec S., Gawlik J. “Special equipment and industrial applications of electrochemical machining process”. *Management and Production Engineering Review*. 7, 2 (2016): s. 33–41.
15. Wijers J. “Upgrading to PEM”. *Mikroniek – Professional Journal on Precision Engineering*. 54, 3 (2014): s. 48–53.
16. Klocke F. i in. “Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 63 (2014): s. 703–726.
17. Domanowski P., Kozak J. “Direct and inverse problems of shaping by electrochemical generating machining”. *Journal of Material Processing Technology*. 107 (2000): s. 300–306.
18. Ruszaj A. “Some aspects of electrochemical machining accuracy improvement”. *Proceedings INSECT 2016: International Symposium on Electrochemical Machining Technology VUB Vrije Universiteit Brussel*. Faculty of Engineering. 2016, s. 29–35.
19. Volgin V.M., Lyubimov V.V., Davydov A.D. “Modelling and numerical simulation of electrochemical micromachining”. *Chemical Engineering Science*. 140 (2016): s. 252–260.
20. Fan Z.-W., Hourng L.-W. “Electrochemical micro-drilling of deep holes by rotational cathode tools”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 52 (2011): s. 555–563.
21. 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, s. 651–656.
22. Choi S.H., Kim B.H., Shin H.S., Chung D.K., Chu C.N. “Analysis of electrochemical behaviors of WC-Co Alloy for micro ECM”. *Journal of Material Processing Technology*. 213 (2013): s. 621–630.
23. Niu S., Qu N., Fu S., Fang X., Li H. “Investigation of inner – jet electrochemical milling of nickel based Alloy GH4169/Inconel 718”. *International Journal of Manufacturing Technology*. June (2017).
24. Bhattacharyya B., Munda J., Malapati M. “Advancement in electrochemical micro-machining”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 44 (2004): s. 1577–1589.
25. Xu K., Zeng Y., Li P., Zhu D. “Study of surface roughness in wire electrochemical micromachining”. *Journal of Materials Processing Technology*. 222 (2015): s. 103–109.
26. Xianghe Z., Xiaolong F., Yongbin Z., Pengfei Z., Di Z. “In situ fabrication of ribbed wire electrodes for wire electrochemical micromachining”. *International Journal of Electrochemical Science*. 11 (2016): s. 2335–2344.
27. Zeng Y., Yu Q., Fang X., Xu K., Li H., Qu H. “Wire electrochemical machining with monodirectional travelling wire”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Published online 07.01.2015.
28. Ruszaj A. „Bionika w rozwoju inżynierii produkcji” (*Bionic in production engineering development*). *Mechanik*. 5–6 (2016): s. 350–355.
29. Ruszaj A. “Bionic impact on industrial production development”. *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 39, 4 (2015): s. 5–22. ■