

Lucjan DĄBROWSKI<sup>1</sup>  
Richard KELLER<sup>2</sup>  
Jerzy TOMCZAK<sup>3</sup>

## **PRZYKŁADY INNOWACYJNEGO WYKORZYSTANIA PRECYZYJNYCH OBRABIAREK ECM**

W artykule przedstawiono przykłady wykorzystania precyzyjnych obrabiarek realizujących obróbkę elektrochemiczną, zwłaszcza szeroko rozumianych materiałów trudno obrabialnych. W prezentacji, oprócz obrabiarek uwzględniono także oprzyrządowanie oraz urządzenia pomocnicze, np. do przygotowania i filtrowania elektrolitu, mycia wstępnego i końcowego. Takie kompleksowe ujęcie zagadnienia pozwala uzyskać bardzo dużą dokładność wykonania i gładkość powierzchni po obróbce. Opracowania dokonano na przykładzie wybranych obrabiarek, zapewniających niezawodność produkcji na najwyższym poziomie, przede wszystkim w branży lotniczej i motoryzacyjnej.

### **1. WPROWADZENIE**

Obróbka ECM znajduje coraz szersze zastosowanie w procesach wytwarzania i znacząco wpływa na ich wydajność, chociaż wciąż zaliczana jest do obróbek niekonwencjonalnych [2],[3]. Z tego powodu w licznych ośrodkach naukowych uczelni i przemysłu prowadzone są intensywne prace mające na celu tworzenie obrabiarek do tej obróbki, wydajniejszych i dokładniejszych niż obecne [4].

W obróbce elektrochemicznej wykorzystywane jest zjawisko elektrolizy. Elektroda podłączona do źródła prądu stałego działa jak katoda (narzędzie). Przedmiot obrabiany to druga elektroda, spolaryzowana jako anoda. W elektrolicie, między katodą i przedmiotem obrabianym następuje wymiana ładunku, co powoduje bezstykowe roztwarzanie przedmiotu w wybranym jego obszarze. Tak tworzone są profile, rowki pierścieniowe, wyżłobienia lub otwory, wszystko o dużej dokładności. Usunięty materiał usuwany jest z elektrolitu jako wodorotlenek metalu. Obróbka jest realizowana niezależnie od mikrostruktury metalu lub jego twardości. Przedmioty obrabiane nie są narażone na temperaturowe lub mechaniczne naprężenia. Stosowane w praktyce przemysłowej warianty podano w tabeli 1. Narzędzie kształtujące – elektroda robocza, nie ulega zużyciu w procesie obróbki i może służyć do wykonania wielu przedmiotów, zmniejszając w ten sposób koszty produkcji.

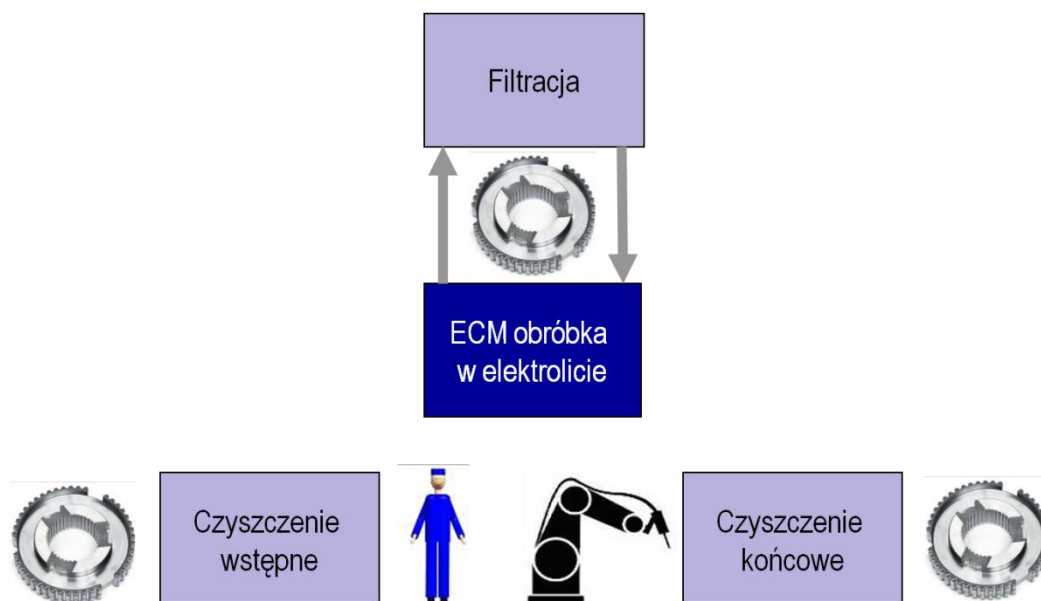
<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Instytut Technik Wytwarzania

<sup>2</sup> EMAG ECM GmbH, Gaildorf, Niemcy

<sup>3</sup> ERALL, Warszawa

Tabela 1. Stosowane odmiany obróbek elektrochemicznych  
Table 1. Different electrochemical machining in use

Obróbka elektrochemiczna (ECM)				Precyzyjna obróbka elektrochemiczna (PECM)	
katoda nieruchoma		katoda z posuwem		katoda z posuwem i ruchem oscylacyjnym	
operacja	technologia	operacja	technologia	operacja	technologia
gratowanie	DC (prąd stały) lub ECM impulsowa	wiercenie ECM	prąd stały lub ECM pulsacyjna	precyzyjne profilowanie	ECM pulsacyjna
wygładzanie powierzchni	ECM impulsowa	2.5D grawerowanie	DC lub ECM pulsacyjna	polerowanie	ECM pulsacyjna
drażnienie	DC lub ECM impulsowa	drażnienie	DC lub ECM impulsowa		



Rys. 1. Gniazdo kompleksowe obróbki elektrochemicznej  
Fig. 1. Complex electrochemical machining cell

Jako zalety obróbki elektrochemicznej można wymienić:

- brak zużycia narzędzia (katody), co stanowi korzystne warunki do produkcji seryjnej,
- osiągalna chropowatość powierzchni  $Ra$  do  $0,05 \mu\text{m}$ ,
- osiągalna duża dokładność wymiarowa,
- brak negatywnych efektów temperaturowych i mechanicznych, a w konsekwencji brak zmian w mikrostrukturze materiału,
- brak wpływu procesu na właściwości materiału,

- twardość, wytrzymałość, właściwości magnetyczne materiału pozostają niezmiennie,
- możliwość obróbki małych i cienkościennych zarysów,
- prosty i bardzo wydajny proces obróbki przy braku konieczności późniejszego usuwania ostrych krawędzi lub polerowania,
- obróbka zgrubna, wykończeniowa i polerowanie odbywa się w jednej operacji,
- możliwość obróbki supertwardych stopów,
- możliwość równoczesnej obróbki makro i mikrostruktur.

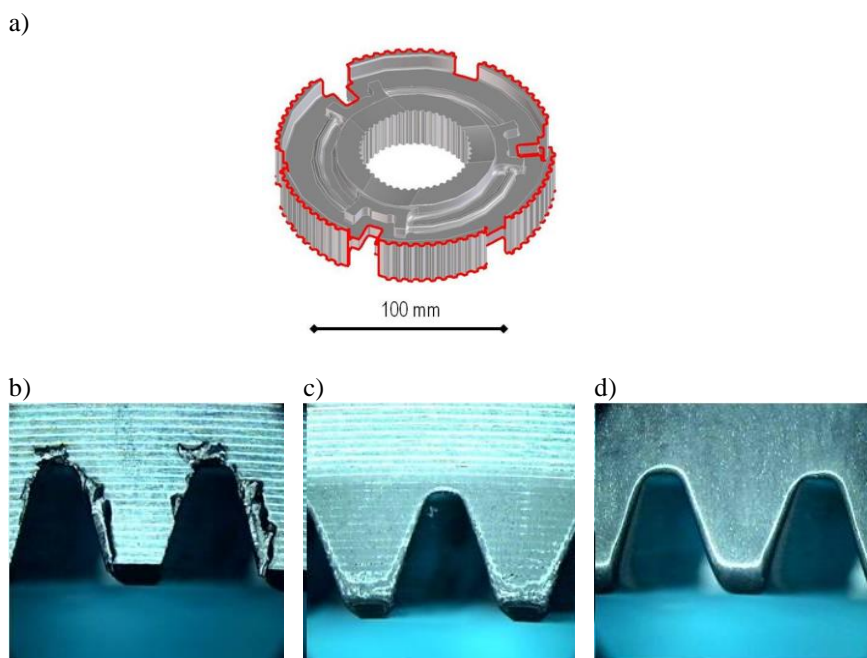
Samej obrabiarce stawiane są również wysokie wymagania dokładnościowe.

Obróbka elektrochemiczna jest oferowana kompleksowo, tzn. że po poznaniu wymagań użytkownika proponuje się proces technologiczny oraz niezbędne urządzenia służące do przygotowania przedmiotów do obróbki ECM i do realizacji operacji końcowych (rys.1).

## 2. PROCES OBRÓBKI ELEKTROCHEMICZNEJ

### 2.1. USUWANIE ZADZIORÓW I ZAOKRĄGLANIE KRAWĘDZI

Obróbka ECM znalazła duże zastosowanie w usuwaniu zadziorów, zaokrąglaniu naroży i wygładzaniu powierzchni. Wynika to z faktu, że największą gęstość prądu, i co się z tym wiąże – największą szybkość roztwarzania materiału obserwuje się na wierzchołkach zadziorów i nierównościach powierzchni. Zapewnia to dużą efektywność obróbki.



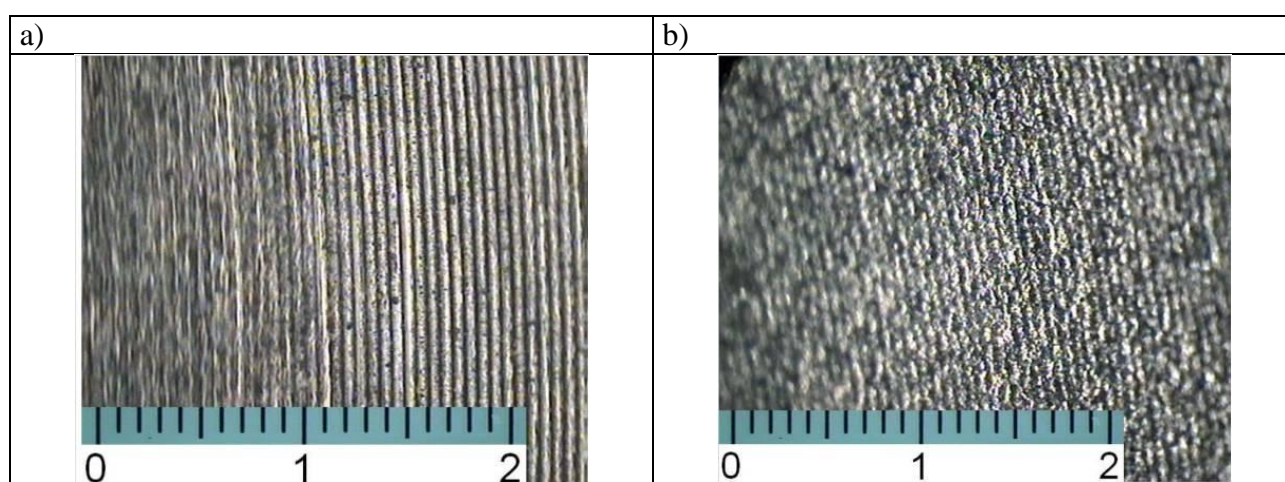
Rys. 2. Trzystopniowe usuwanie zadziorów z koła zębatego: a) widok ogólny koła, b) faza I – obróbka zgrubna, c) faza II – wyrównywanie, d) faza III – obróbka w trybie pulsacyjnym

Fig. 2. Three-phases of burrs removing in a gear: a) general view, b) I phase – rough machining, c) II phase – equalizing, d) III phase – machining at pulsating mode

Przykłady wykorzystania obróbki ECM w tym zakresie przedstawiono na kolejnych rysunkach – rys. 2 i 3. Na rys. 2b, 2c, 2d wyraźnie widoczne są różnice w efektach obróbki różnymi jej wariantami. Obróbka w trybie pulsacyjnym (rys. 2d), ma charakter wykończeniowy, W jej wyniku uzyskuje się gładkie powierzchnie bez zadziorów.

## 2.2. WYGŁADZANIE POWIERZCHNI I POLEROWANIE

Obróbkę ECM wykorzystuje się także do zmiany struktury powierzchni obrobionej innymi technikami. Na rys. 3 przedstawiono zmianę powierzchni dna pompy zębatej po jej ujednorodnieniu za pomocą obróbki ECM.



Rys. 3. Ujednorodnienie powierzchni dna pompy zębatej: a) struktura powierzchni przed obróbką ECM, b) struktura powierzchni po obróbce ECM; materiał: stal C45-E

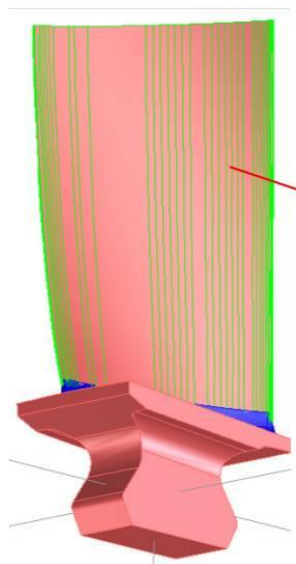
Fig. 3. Homogenization of the bottom surface of the gear pump: a) surface structure before ECM, b) surface structure after ECM; material: steel C45-E

Obróbka ECM powierzchni pompy spowodowała, m.in. zmianę parametrów krzywej nośności:  $Rk$  – wysokości chropowatości rdzenia i  $Rpk$  – zredukowanej wysokości wzniesień, a więc parametrów istotnych ze względu na szczelność pompy. Po obróbce mechanicznej wartości tych parametrów wynosiły odpowiednio:  $Rk = 1,8\mu\text{m}$  a  $Rpk = 1,2\mu\text{m}$ , natomiast po obróbce ECM przyjęły one następujące wartości:  $Rk = 0,8\mu\text{m}$  a  $Rpk = 0,2\mu\text{m}$ . Uzyskane efekty znacząco poprawiły właściwości eksploatacyjne pompy.

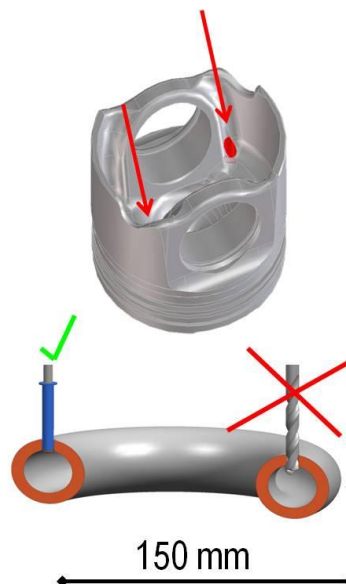
## 2.3. DRAŻENIE, WIERCENIE

Obróbka ECM umożliwia ponadto drażenie zarówno swobodnych powierzchni kształtowych (free form), np. łopatek turbiny gazowej, jak i otworów, np. o kształcie niekołowym lub zamkniętych przestrzeni. Przykłady takiego wykorzystania analizowanej obróbki pokazano na rys. 4 i 5.

Na rys. 4 pokazano łopatkę turbiny gazowej wykonanej ze stali wysoko chromowo-niklowej Inconel 718 o powierzchni profilu ok. 3000 mm<sup>2</sup>, grubości 0,3÷1mm. Obrabiarka realizuje obróbkę wykończeniową 3D powierzchni łopatki oraz stopki tej łopatki i otwory o kształcie niekołowym lub do zamkniętych przestrzeni, nie wprowadzając wiórów do obszarów, z których usunięcie wymagałoby dodatkowych operacji lub byłoby niemożliwe – rys. 5.



Rys. 4. Łopaska po precyzyjnej obróbce ECM  
Fig. 4. Blade after ECM precise machining

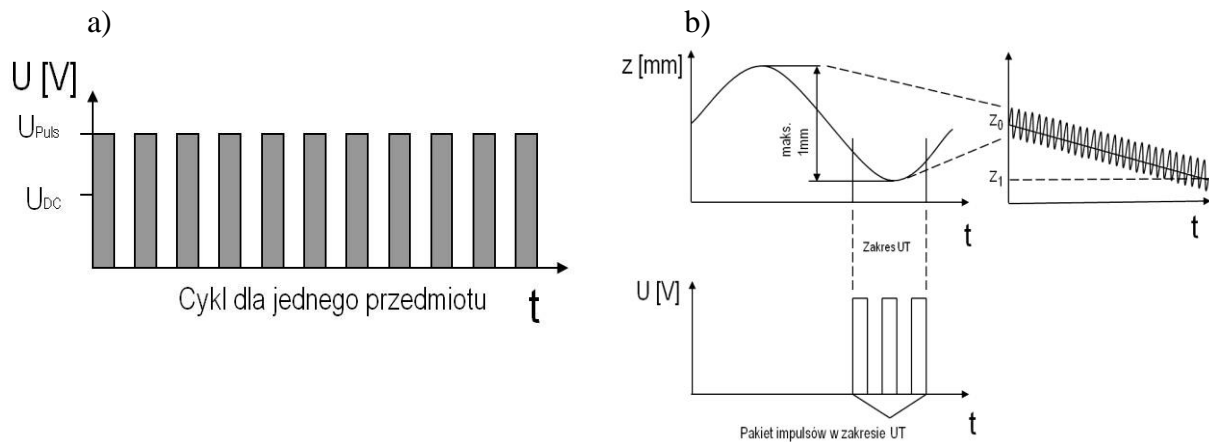


Rys. 5. ECM wiercenie do zamkniętej przestrzeni  
Fig. 5. ECM drilling into a closed space

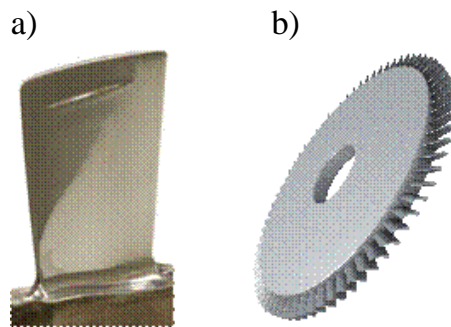
#### 2.4. OBRÓBKA DOKŁADNYCH ZARYSÓW

Od lat 60-tych obserwuje się ciągły wzrost międzynarodowego ruchu lotniczego: pasażerskiego i towarowego. Według najnowszych prognoz ruch ten, w kolejnych dwóch latach ma rosnać o 5% rocznie [5], co oznacza zapotrzebowanie na ok. 7.600 nowych samolotów w kolejnych dziesięcioleciach. Z powyższych danych wynika, że aby zaspokoić te potrzeby produkcja samolotów musi być intensywnie rozwijana, a do tego niezbędne są obrabiarki realizujące innowacyjne procesy technologiczne. Jeden z czołowych w świecie producentów silników już wykorzystuje tego typu obrabiarkę do realizacji projektów badawczo-rozwojowych. W obrabiarkach takich wykorzystywane są oscylacyjne drgania elektrody z dużą częstotliwością oraz impulsowe podawanie prądu (rys. 6). Pakiet impulsów jest wysyłany przy najmniejszej szczelinie międzyelektrodowej, a przy wzroście szczeliny następuje ewakuacja produktów obróbki.

Duże problemy technologiczne stwarza obróbka krzywoliniowych powierzchni łopatek pojedynczych lub zintegrowanych z tarczą turbiny (rys. 7). Powierzchnie te powinny być bardzo gładkie i wykonane z małymi tolerancjami. Do realizacji tego zadania została zaprojektowana i wykonana obrabiarka, która umożliwia obróbkę PECM łopatek wirnika sprężarki w całości wraz z dyskiem (rys. 7b).



Rys. 6. Innowacyjne procesy: a) pulsacyjny ECM, b) katoda oscylacyjna z prądem pulsacyjnym PECM  
 Fig. 6. Innovative processes: a) pulse – ECM, b) oscillation cathode with pulse current – PECM



Rys. 7. Łopatką wirnika sprężarki (a) oraz wirnik z łopatkami (b)  
 Fig. 7. Rotor blade of compressor (a), and rotor as the monoblock (b)

Materiał z jakiego jest ten element wykonany to Inconel 718, a więc tworzywo konstrukcyjne bardzo trudne do obróbki. Wymagania techniczne oraz materiał praktycznie uniemożliwiają zastosowanie innej technologii, a dzięki zastosowaniu wspomnianej obrabiarki udoskonalono proces wytwórczy, spełniając wymagania przemysłu lotniczego. Obrabiarka realizująca wyżej opisany proces nie jest wytwarzana przez innych producentów obrabiarek do ECM.

## 2.5. MIKROOBRÓBKA ECM

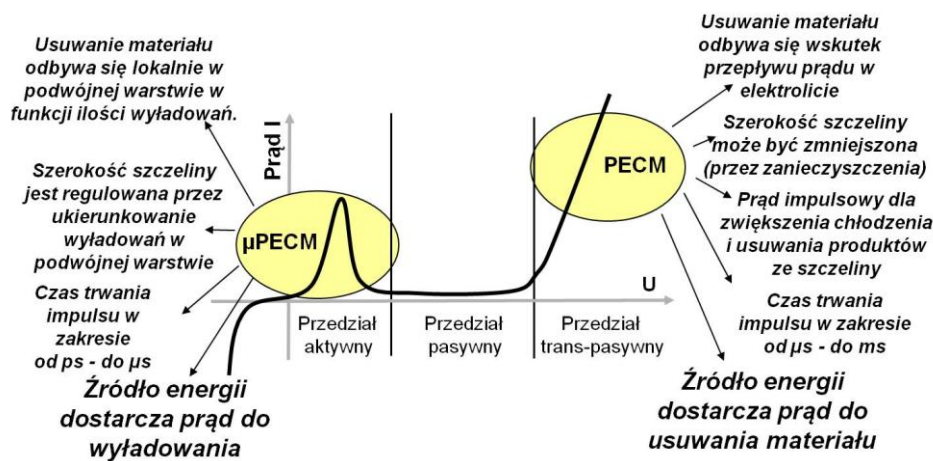
Mikro-technologie mają aktualnie bardzo duże zastosowanie w produkcji wielu precyzyjnych elementów i stanowią jeden z głównych kierunków prac badawczo rozwojowych w programach naukowych: międzynarodowych, programach rządowych oraz

agencji i fabryk. Zasadnicze znaczenie ma rozszerzenie zastosowań mikrosystemów w budowie maszyn, co uważane jest za kolejną rewolucję techniczną w tej dziedzinie [6÷10].

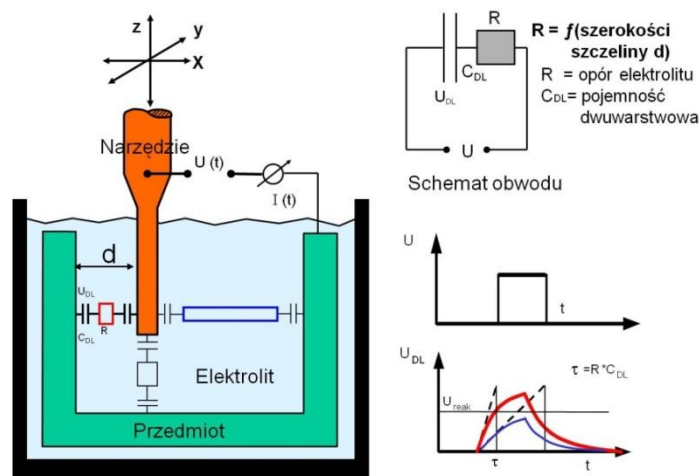
Do wytwarzania prototypowych/modelowych zespołów MEMS oraz struktur mikrogeometrycznych w elementach maszyn, oprzyrządowaniu i narzędziach do mikro-skawania, mikro-odlewania i mikro-kształtowania plastycznego mogą być z powodzeniem zastosowane technologie elektroerozyjne i elektrochemiczne.

W rezultacie zainteresowania zagadnieniem ściśle zdefiniowanych obszarów usuwania materiału, poprzez krótkie impulsy napięcia (rys. 8 i 9), powstały obrabiarki, łącznie z generatorami prądowymi i osprzętem, zarówno do precyzyjnej obróbki elektrochemicznej PECM, jak i do mikroobróbki elektrochemicznej  $\mu$ PECM.

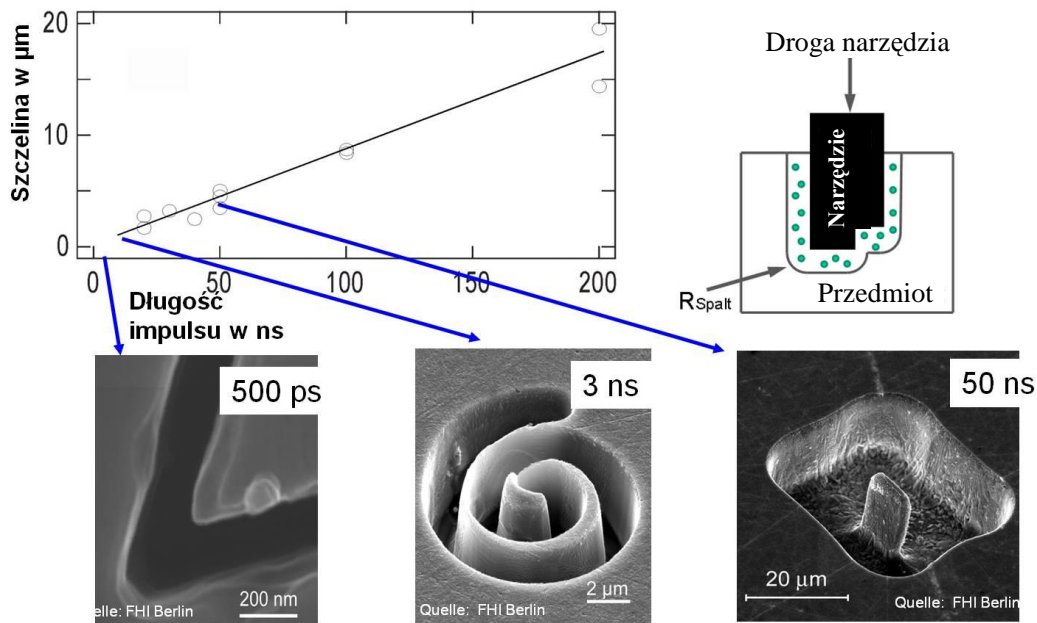
Przykłady zastosowania mikroobróbki PECM w różnych zakresach wymiarowych przedstawiono na rys. 10.



Rys. 8. Porównanie  $\mu$ PECM oraz PECM na tle krzywej polaryzacyjnej [1]  
Fig. 8. Comparison of  $\mu$ PECM and PECM against the polarization curve [1]



Rys. 9. Elektrochemiczne frezowanie z ultrakrótkimi impulsami napięcia  $\mu$ PECM [1]  
Fig. 9. Essence of electrochemical milling with ultra short voltage pulses  $\mu$ PECM [1]



Rys. 10. Przykłady  $\mu$ PECM (szerokości szczeliny nastawiana czasem impulsu) [8]  
 Fig. 10. Examples of  $\mu$ PECM results (gap width is adjusted by pulse time) [8]

Na rys. 10 widać, że dzięki możliwości sterowania w obrabiarce impulsami rzędu nanosekund powstały warunki drażenia rowków o szerokości znacznie poniżej mikrometra, przy głębokości kilkakrotnie większej.

### 3. KIERUNKI ROZWOJU OBRÓBKI ECM

Wymagania dużej dokładności, powtarzalności obróbki oraz małych chropowatości, generują duże wymagania odnośnie konstrukcji wszystkich wysoko zorganizowanych zespołów obrabiarek do ECM. Dotyczy to zwłaszcza:

- generatora impulsów elektrycznych i oscylacji elektrody,
- układu sterowania zapewniającego optymalną, dostosowaną do zadań, wydajność, chropowatość i dokładność geometrii,
- zespołu elektrolitu; doboru składu, sposobu i ciśnienia podawania, aktywnej kontroli temperatury oraz  $pH$ , filtracji,
- elektrod i uchwytów z powierzchniami aktywnymi i pasywnymi,
- konstrukcji nośnej i napędów oraz rejestracji pozycji z szybkim sprzężeniem z regulatorem.

W obrabiarkach ECM, o których mowa, postęp w ostatnich wyżej wymienionych zespołach polega na tym, że:

- korpusy maszyn są wykonane ze specjalnego materiału Mineralitu<sup>®</sup>, którego skład i technologia jest własnością firmy lub z granitu. Wiadomo przy tym, że materiał taki tłumi drgania 6÷8 razy lepiej niż żeliwo szare oraz zapewnia dużą stabilność cieplną.



Sztywna, stabilna konstrukcja łoża zapewnia uzyskanie dużych dokładności wymiarowych,

- prowadnice toczone oraz bezpośrednie napędy i systemy pomiaru drogi zapewniają duże dokładności pozycjonowania, co jest szczególnie istotne w precyzyjnej kontroli szczeliny międzyelektrodowej i adaptacji impulsów w PECM,
- najważniejsze elementy konstrukcyjne mają stabilizowaną temperaturę za pomocą agregatu chłodzącego i oddzielnych obiegów chłodzenia dla: korpusu, napędów i szafy sterowniczej. W ten sposób zmiany temperatury w maszynie są zredukowane do minimum.

Należy również zwrócić uwagę, że zaprezentowane obrabiarki są dostosowane do realizacji zróżnicowanych zadań, od najprostszych do bardzo złożonych, wyposażonych m.in. w:

- precyzyjne systemy przemieszczeń i kontroli drogi w pięciu osiach,
- precyzyjny oscylator drgań mechanicznych elektrody,
- technologię generatora do 40 kA, z regulacją charakterystyk impulsów,
- bardzo sprawny system sterowania procesem (patent),
- ergonomiczny interfejs z wizualizacjami graficznymi PECM Premium,
- regulację temperatury i *pH* elektrolitu,
- monitorowanie konduktancji,
- mikrofiltrację.

#### 4. PODSUMOWANIE

Postęp w rozwoju procesów i w budowie obrabiarek do realizacji obróbek elektrochemicznych, jest bardzo duży, co w pewnym zakresie przedstawiono na przykładach osiągnięć EMAG.

Prezentowane metody obróbki ECM realizowane przez precyzyjne obrabiarki, pozwalające na obróbkę przedmiotów wykonanych ze stopów Inconelu i innych trudno skrawalnych metali, mogą być już realizowane z wystarczająco dużą dokładnością i wydajnością, aby znalazły szerokie zastosowanie w procesach wytwórczych: turbin gazowych, elementów silników lotniczych, turbosprężarek, wysokowydajnych pomp itp.

#### LITERATURA

- [1] Materiały informacyjne, EMAG ECM.
- [2] RUSZAJ A., 1999, *Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi*, Wydawnictwo Instytutu Obróbki Skrawaniem, Kraków.
- [3] STYP-REKOWSKI M., 2003, *Obróbki hybrydowe i niekonwencjonalne jako uzupełnienie zbioru technik wytwarzania skoncentrowaną wiązką energii*, w: STYP-REKOWSKI M. (red.), *Wybrane zagadnienia obróbki skoncentrowaną wiązką energii*, Wydawnictwo Bydgoskiego Towarzystwa Naukowego.

- [4] DĄBROWSKI L., 2006, *Innowacyjne rozwiązania w budowie obrabiarek elektrochemicznych*, w: STYP-REKOWSKI M. (red.), *Zagadnienia konstrukcyjne i technologiczne niekonwencjonalnych technik wytwarzania*, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz.
- [5] <http://ec.europa.eu/research/rtdinfo/de/28/aero1.html>.
- [6] KOZAK J., 2009, *Mikrotechnologia erozyjna*, Badania realizowane na Wydziale Inżynierii Produkcji PW, 15, Naukowa Szkoła Obróbki Erozyjnej, OWPW.
- [7] KOZAK J., RAJURKAR K.P., MAKKAR Y., 2004, *Study of Pulse Electrochemical Micromachining*, *Journal of Manufacturing Processes*, 6/1, 7-14.
- [8] KOCK M., KIRCHNER V., SCHUSTER R., 2002, *Electrochemical micromachining with ultrashort voltage pulses – a versatile method with lithographical precision*, *Electrochimica Acta*, 48/20-22, 3213-3219.
- [9] KOZAK J., RAJURKAR K.P., GULBINOWICZ D., GULBINOWICZ Z., 2007, *Investigations of Micro Electrochemical Machining Using Ultrashort Pulses*, *Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining, ISEM'07*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 319.
- [10] NA C.W., KIM B.H., SHIN H.S., CHU C.N., 2007, *Micro Wire Electrochemical Machining*, *Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining, ISEM'07*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 329.

#### EXAMPLES OF PRECISE ECM MACHINE-TOOLS INNOVATIVE APPLICATIONS

In this paper examples of precise ECM machine-tools innovative applications, particularly for machining almost unworkable materials, were described. In presentation, besides machine-tools tooling and auxiliary devices, e.g. for electrolyte preparation and filtering, initial and final washing were included. Such complex approach of problem makes possible to get great accuracy of machining and small machined surface roughness. Elaborate was worked out on example of selected machine tools.