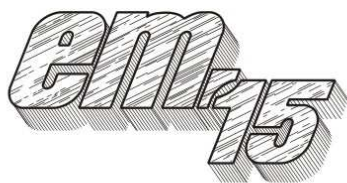


XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Produkcji
STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
MECHANIKÓW POLSKICH – Koło Uczelniane UTP

85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7
tel. (0 52) 340-87-47, fax. (0 52) 340-82-45,
e-mail: tomasz.paczkowski@utp.edu.pl

Tendencje rozwojowe wybranych niekonwencjonalnych procesów wytwarzania

Development trends of selected unconventional manufacturing processes

ADAM RUSZAJ¹
SEBASTIAN SKOCZYPIEC²

W przemyśle w coraz większym zakresie stosowane są nowe materiały o specjalnych właściwościach, zwykle trudne do efektywnego kształtowania metodami tradycyjnymi. Z tego względu racjonalnym rozwiązaniem jest zastosowanie metod niekonwencjonalnych a szczególne obróbki elektrochemicznej, elektroerozyjnej oraz metod hybrydowych. W artykule przedstawione zostaną przede wszystkim zasadnicze kierunki rozwoju i praktyczne zastosowania wyżej wymienionych procesów obróbkowych.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka elektrochemiczna, obróbka elektroerozyjna, metody hybrydowe.

In industry the range of practical applications of new materials with special properties significantly increases. These materials are usually difficult for traditional machining; so, the most efficient for shaping parts made of above mentioned materials are electrochemical, electrodischarge and hybrid machining processes. In the paper will be presented first of all basically directions of development and practical applications of these unconventional machining processes.

KEYWORDS: electrochemical machining, electrodischarge machining, hybrid machining processes.

Wprowadzenie

Inżynieria materiałowa rozwija się bardzo dynamicznie i oferuje wciąż nowe materiały o specjalnych właściwościach. Do takich już stosowanych materiałów zaliczane są między innymi: wysoko wytrzymałe stopy niklu, tytanu, materiały kompozytowe (np. PCD-Co, Al-SiC, Al-Al₂O₃) oraz ceramiczne (np. SiC, Al₂O₃, ZrO₂, MgO₂), półprzewodniki

(np. Si) oraz tworzywa sztuczne. Specjalne materiały kompozytowe znajdują coraz szersze zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, kosmicznym, zbrojeniowym, jądrowym, elektronicznym, mechatronicznym czy medycznym. Wynika to z ich właściwości, które można kształtować przez dobór odpowiedniej osnowy oraz zbrojenia. Racjonalne zastosowanie w praktyce przemysłowej nowych materiałów jest możliwe dopiero po opracowaniu efektywnych metod ich kształtowania. Specjalne stopy czy materiały kompozytowe o osnowie metalicznej - przewodzącej prąd elektryczny mogą być kształtowane z wykorzystaniem takich metod niekonwencjonalnych jak obróbka elektrochemiczna, elektroerozyjna czy metody hybrydowe. Konieczność dostosowania tych metod do obróbki wyżej wymienionych materiałów stanowi istotny element stymulujący ich dynamiczny rozwój. Kolejne czynniki stymulujące ich rozwój to:

- wzrost wymagań przemysłu w zakresie wydajności, dokładności oraz jakości warstwy wierzchniej,
- coraz szersze zastosowanie przez przemysł w produkowanych urządzeniach Mikro (Nano) – Elektro – Mechanicznych Systemów (MEMS-y, NEMS-y).

Produkcja Mikro (Nano) – Elektro – Mechanicznych Systemów stawia nowe wyzwania zarówno w zakresie stosowanych materiałów jak i wymiarów produkowanych elementów czy struktur geometrycznych – w skali mikro i nano. Z uwagi na to, że większość z wyżej omówionych materiałów przewodzi prąd elektryczny do ich kształtowania w skali makro i mikro można efektywnie stosować obróbkę elektrochemiczną, elektroerozyjną oraz związane z nimi metody hybrydowe.

¹prof. dr hab. inż. Adam Ruszaj (ruszaj@mech.pk.edu.pl)

²dr hab. inż. Sebastian Skoczypiec (skoczypiec@mech.pk.edu.pl)

Obróbka elektrochemiczna

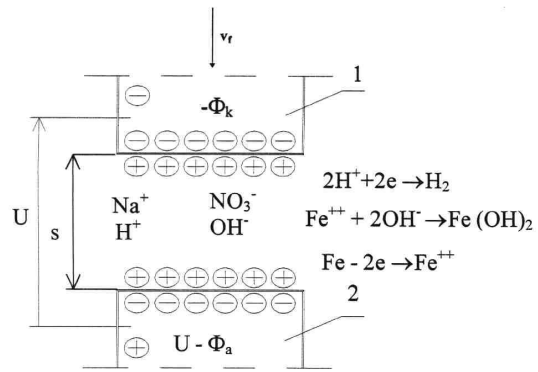
■ Charakterystyka procesu

W obróbce elektrochemicznej (ECM) materiał usuwany jest podczas roztwarzania anodowego, które zachodzi w wyniku reakcji elektrochemicznych przebiegających na powierzchni przedmiotu obrabianego. Podłączony jest on do dodatniego bieguna źródła prądu, a narzędzie zwane elektrodą roboczą podłączone jest do ujemnego bieguna prądu. Do obszaru pomiędzy nimi podawany jest elektrolit, będący wodnym roztworem soli, zasad lub kwasów. Przyłożenie do elektrod zewnętrznego napięcia $U(t)$ powoduje przepływ prądu elektrycznego przez szczelinę międzyelektrodową. Jest on możliwy dzięki zamianie nośników ładunku, jakimi są elektrony w obwodzie elektrycznym zewnętrznym, na jony w szczelinie międzyelektrodowej. Odbywa się to zgodnie z reakcjami elektrochemicznymi, mianowicie (rys. 1): na powierzchni anody następuje jonizacja jej atomów, na powierzchni katody dejonizacja jonów wodoru oraz elektroliza wody.

Jony rozpuszczonego na anodzie metalu dyfundują w głąb szczeliny, gdzie biorą udział w dalszych reakcjach, których ostatecznym produktem jest m.in. wodorotlenek rozpuszczonego metalu. Powyższy opis ma charakter uproszczony, ponieważ rodzaj zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej reakcji elektrochemicznych zależy od składu i właściwości elektrochemicznych materiału obrabianego, elektrody oraz elektrolitu. Na ich przebieg ma również wpływ wartość różnicy potencjałów pomiędzy anodą i katodą oraz hydrodynamika przepływu elektrolitu przez szczelinę międzyelektrodową.

Proces roztwarzania anodowego przebiega zgodnie z prawami Faradaya, z których m.in. wynika jedna z podstawowych zalet ECM, czyli brak powiązań pomiędzy wydajnością obróbki a właściwościami mechanicznymi materiału obrabianego. Wydajność obróbki elektrochemicznej zależy tylko od ilości ładunku elektrycznego, który przepływie przez szczelinę międzyelektrodową oraz składu chemicznego materiału obrabianego. Z powyższego opisu wynikają następujące zalety ECM:

- brak zużycia narzędzia - elektrody roboczej w trakcie obróbki (jedyne możliwe mechanizmy zniszczenia to wyładowanie elektryczne lub zwarcie pomiędzy przedmiotem i elektrodą roboczą),
- względnie duża, w porównaniu z metodami tradycyjnymi, wydajność obróbki materiałów trudnoobrabialnych,
- oddziaływania mechaniczne i termiczne w obszarze obróbki są pomijalne - nie mają wpływu na właściwości warstwy wierzchniej,
- przy optymalnie dobranych parametrach, obróbka nie wprowadza istotnych zmian w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego,
- obróbka daje możliwość wytwarzania elementów o skomplikowanej geometrii,
- dokładność i jakość powierzchni rosną zwykle ze wzrostem wydajności (gęstości prądu).



Rys. 1. Schemat drążenia elektrochemicznego wyjaśniający mechanizm obróbki elektrochemicznej w wodnym roztworze NaNO_3 , Φ_k – spadek potencjału w warstwie przykatodowej, Φ_a – spadek potencjału w warstwie przyanodowej; 1 – elektroda robocza (katoda wykonana np. z Cu), 2 – przedmiot obrabiany, S – grubość szczeliny międzyelektrodowej, U – napięcie międzyelektrodowe, v_r – prędkość przesuwu elektrody roboczej [1]

■ Podstawowe kierunki rozwoju

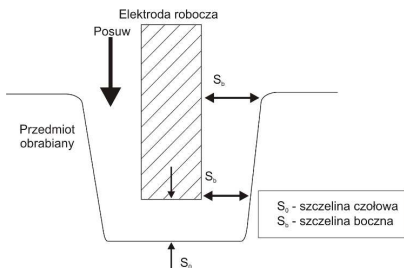
Podstawowe kierunki rozwoju obróbki elektrochemicznej związane są z podanymi na wstępie czynnikami stymulującymi rozwój metod niekonwencjonalnych. Są to prace badawcze ukierunkowane na wyznaczenie charakterystyk technologicznych dla specjalnych materiałów oraz na uzyskanie danych o zjawiskach zachodzących w obszarze obróbki. Dane te są niezbędne do podjęcia prac nad modelowaniem matematycznym obróbki powierzchni swobodnych, symulacji komputerowej oraz projektowania racjonalnych procesów technologicznych. Projektowane procesy technologiczne zapewniające niezbędną wydajność, dokładność wymiarową i jakość powierzchni wymagają zastosowania specjalnych generatorów impulsowych oraz specjalnych obrabiarek. Podsumowując podstawowe kierunki rozwoju ECM to: badania zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej, wyznaczenie charakterystyk technologicznych dla nowych materiałów, modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa procesu obróbki powierzchni swobodnych dla warunków obróbki impulsowej oraz projektowanie i konstrukcja specjalnych obrabiarek. W analogicznym zakresie prowadzone są prace dotyczące zastosowań ECM w skali mikro. Realizacja tych prac wymaga innego podejścia, uwzględnienia innych zjawisk zachodzących w szczelinie i na powierzchni elektrod oraz zastosowania specjalistycznego oprzyrządowania i obrabiarek.

■ Badania zjawisk

Jednym z podstawowych problemów obróbki elektrochemicznej jest lokalizacja procesu roztwarzania [2]. Jest to związane z warunkami panującymi w obszarze szczeliny międzyelektrodowej (kształt linii pola elektrycznego), a także z faktem, że roztwarzanie zachodzi nie tylko w obszarze czoła elektrody, ale także w obszarze szczeliny bocznej (rys. 2). Prowadzi to do błędów wymiarowo – kształtowych wykonywanego elementu. Wyeliminowanie tego typu błędów jest podstawowe dla całego procesu. Najczęściej stosowanymi metodami prowadzącymi do poprawienia lokalizacji procesu są [2]:

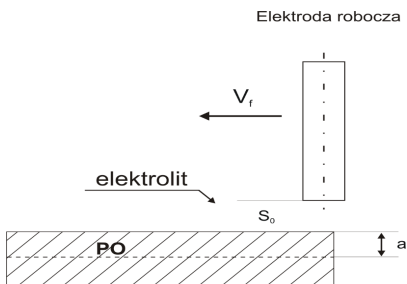
- zmniejszenie grubości szczeliny międzyelektrodowej,
- dobór odpowiedniego elektrolitu (zarówno jego rodzaju jak i stężenia),

- stosowanie małych napięć (rzędu kilku woltów),
- stosowanie układów stabilizujących potencjały elektrod,
- stosowanie bardzo krótkich czasów impulsów (rzędu setek nanosekund).



Rys. 2. Zaburzenia odwzorowania kształtu elektrody w obróbce elektrochemicznej

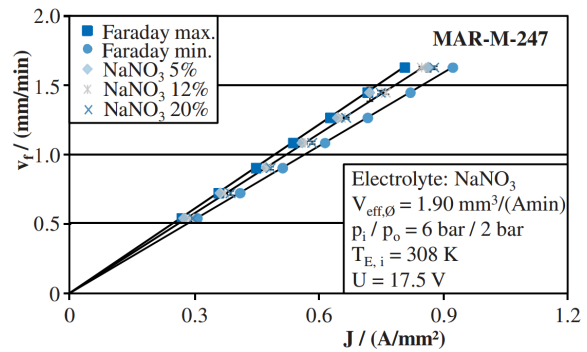
Ponadto w procesie roztwarzania w ograniczonym zakresie i tylko pośrednio można wpływać na reakcje zachodzące w obszarach przeelektrodowych. Rodzaj reakcji zależy od składu elektrolitu, materiału obrabianego oraz potencjału elektrod. W warunkach przemysłowych, a zwykle i laboratoryjnych ograniczamy się do wyboru i stabilizacji napięcia międzyelektrodowego, co nie jest równoznaczne z stabilizacją potencjałów elektrod. W [3] wykazano, że stabilizacja różnicy potencjałów elektrod nie jest równoznaczna ze stabilizacją procesu. Mianowicie ustalono, że przy stałej różnicy potencjałów elektrod wynoszącej 8 V potencjał anody zmieniał się w przedziale 2 – 8 V a potencjał katody w przedziale: (-2) – (-8) V. Spowodowało to istotne zmiany w wymiarach wykonanego elektroda o średnicy 300 μm rowka (Rys. 3). Głębokość rowka „a” zmieniała się losowo w przedziale (8 – 32) μm , szerokość rowka w przedziale (300 – 350) μm a chropowatość powierzchni Ra w przedziale (0.9 – 1.6) μm .



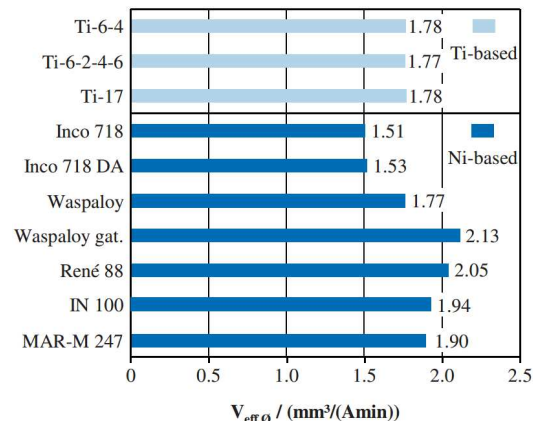
Rys. 3. Schemat impulsowej obróbki ECM mikroworka elektrodą o średnicy 300 μm , $S_0 = 30\mu\text{m}$, $t_i = 1\mu\text{s}$, $t_p = 1\mu\text{s}$, $V_f = 100\mu\text{m}/\text{min}$, stała różnica potencjałów elektrod: 8 V. ale przy zmiennych ich potencjałach względem elektrody odniesienia (odpowiednio - U_{PO} od 2 V do 8 V i U_{ER} od -2 V do -8 V) [3]

■ Obróbka specjalnych materiałów

Aby racjonalnie zaprojektować proces obróbki ECM nowego materiału należy wyznaczyć optymalne warunki jego obróbki. Przedziały napięć, grubości szczeliny, prędkości przesuwu elektrody roboczej oraz wskaźniki technologiczne: obrabialność, wydajność prądowa procesu roztwarzania czy możliwa do uzyskania chropowatość powierzchni. Wybrane wyniki takich badań przedstawiają rysunki 4 i 5. Przy obróbce stopów na bazie tytanu stosuje się wodny roztwór NaCl (aby uniknąć pasywacji) – dla superstopów na bazie niklu oraz TiAl stosuje się roztwór NaNO_3 .



Rys. 4. Zależność posuwu elektrody v_f od gęstości prądu J dla nadstopu niklu MAR-M-247 [4]



Rys. 5. Właściwa obrabialność elektrochemiczna $V_{eff,0}$ dla wybranych stopów tytanu i niklu [4]

Obróbka elektrochemiczna została również zastosowana z dobrymi wynikami do obróbki materiałów kompozytowych na osnowie metalowej umacnianych cząstkami nieprzewodzącymi (tzw. Metal Matrix Composites, MMC). W trakcie obróbki elektrochemicznej materiał metalowej osnowy jest roztwarzany elektrochemicznie a nieprzewodzące cząstki umacniające są wyłukiwane. Wyniki obróbki zależą od wymiarów ziaren umacniających oraz ich koncentracji [5].

■ Modelowanie matematyczne

Matematyczne modelowanie procesu ECM obejmuje przede wszystkim modelowanie pola przepływu elektrolitu. Przepływ elektrolitu ma podstawowe znaczenie w obróbce elektrochemicznej. Należy go tak zaprojektować aby nie występowały strefy zastoju i cyrkulacji a prędkość przepływu była na tyle duża aby utrzymać na odpowiednim poziomie (poniżej stanów krytycznych) temperaturę elektrolitu oraz koncentrację objętościową wodoru. Ważne jest również aby rozkład ciśnienia elektrolitu uniemożliwiał występowanie zjawiska kawitacji. Dysponując rozkładem prędkości i ciśnienia można wyznaczyć rozkłady: właściwości elektrolitu (przewodności elektrycznej) oraz grubości szczeliny międzyelektrodowej a tym samym kształt elektrody roboczej. Dokładność tak wyznaczonego kształtu elektrody roboczej zależy w dużym stopniu od dokładności wyznaczenia np. potencjałów elektrod, współczynnika obrabialności, rodzaju reakcji zachodzących na elektrodach, wydajności prądowej procesu roztwarzania zależnej od reakcji pobocznych (np. wydzielanie tlenu na anodzie). Jeżeli wartości tych wielkości będą oszacowane niedokładnie to również będą występować znaczne różnice pomiędzy wyznaczonym a rzeczywistym rozkładem grubości szczeliny międzyelektrodowej, a kształt wyznaczonego na tej podstawie narzędzia również

będzie niedokładny. Podsumowania ostatnich prac w tym zakresie dokonano w [6].

■ Impulsowa obróbka elektrochemiczna (PECM)

Stosowanie kombinacji prądu impulsowego i oscylacji elektrod umożliwiła precyzyjną obróbkę ECM przy grubości szczeliny 10 – 100 μm zamiast 100 – 1000 μm (przy zasilaniu prądem stałym). W zależności od rodzaju materiału i dla optymalnych parametrów można osiągnąć polerowaną powierzchnię materiału o $R_a \sim 20\text{-}30 \text{ nm}$ [4].

Firma PEMTec opracowała obrabiarki umożliwiające precyzyjną obróbkę elektrochemiczną z prądem stałym i impulsowym oraz oscylacjami elektrody roboczej [7] (rys 6). Porównanie wskaźników obróbki ECM z prądem stałym i impulsowym przedstawia Tabela I. Przykładem precyzji PECM jest odwzorowywanie na powierzchni obrabianej mikrostruktury geometrycznej powierzchni elektrody. PECM umożliwia uzyskanie $R_a = 0.05 \mu\text{m}$ i może zatem być wykorzystana do wygładzania powierzchni. Z drugiej strony na niektórych elementach ważne jest uzyskanie określonej chropowatości powierzchni. Przykładem takich elementów wykonanych w bardzo wysokiej tolerancji wymiarowej, a które muszą mieć określoną wartość R_a są: formy wtryskowe, implanty medyczne czy współpracujące ciernie powierzchni (rys. 7). Do wytworzenia takiej wartości R_a można wykorzystać PECM – w [8] elektrodę roboczą najpierw obrabiano elektroerozyjnie w celu uzyskania odpowiedniej mikrostruktury geometrycznej a następnie odwzorowywano tą strukturę w stali nierdzewnej w procesie PECM z bardzo dobrymi rezultatami.



Rys. 6. Obrabiarka PEM400 firmy PEMTec [7]



Rys. 7. Przykłady elementów obrobionych na obrabiarence PEM 400 Firmy PEMTec [7]

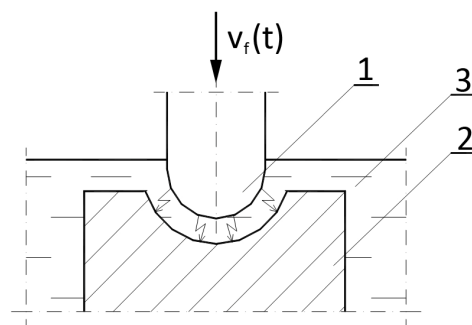
Tab. 1. Porównanie wskaźników obróbki elektrochemicznej z prądem stałym (ECM) i impulsowym (PECM) [7]

	ECM	PECM
Zasilacz	DC	Impulsowy
Szczelina	> 0,1 mm	< 10 μm
Posuw ER	0,1 – 1.2 mm/min	0,1 – 3 mm/min, nałożone oscylacje ER, (25 – 50 Hz, amplituda 200 – 400 μm)
Płukanie szczeliny	wymuszony przepływ elektrolitu	wymuszony przepływ elektrolitu + drgania elektrody
Dokładność	200 – 400 μm	2 – 5 μm
Max. natężenie prądu	< 2000 A	< 1000 A
Napięcie	7 – 15 V	15 V
Elektrolit	NaCl	NaNO ₃
Zastosowanie	usuwanie zadziorów, drażnienie dużych powierzchni	obróbka precyzyjna

Obróbka elektroerozyjna

■ Charakterystyka procesu

W obróbce elektroerozyjnej (EDM) naddatek jest usuwany z przedmiotu obrabianego w wyniku zjawisk towarzyszącym wyładowaniom elektrycznym (wydzielanie ciepła, wzrost temperatury, parowanie, topienie i rozrywanie materiału) w obszarze pomiędzy przedmiotem obrabianym a elektrodą roboczą (rys. 8) [1].



Rys. 8. Schemat drażnienia elektroerozyjnego: 1 – elektroda robocza, 2 – przedmiot obrabiany, 3 - wanna wypełniona dielektrykiem, $v_f(t)$ – prędkość przesuwu elektrody [1]

Szczelina międzyelektrodowa wypełniona jest cieczą dielektryczną, której zadaniem jest zapewnienie odpowiednich warunków do zachodzenia wyładowań elektrycznych oraz usunięcie produktów erozji (cząsteczki ponownie zakrzepłego materiału) z przestrzeni międzyelektrodowej. Mechanizm usuwania naddatku oparty na topieniu i parowaniu materiału obrabianego powoduje, że obróbka elektroerozyjna jest racjonalną alternatywą dla kształtowania elementów z materiałów trudno obrabialnych przewodzących prąd elektryczny: np. stале stopowe, węgliki spiekane, stopy o wysokiej wytrzymałości, super twarde materiały kompozytowe na osnowie metalicznej, ceramika techniczna. Obróbka elektroerozyjna umożliwia wykonywanie z tych materiałów skomplikowanych, swobodnych powierzchni z wysoką dokładnością (nawet do 2 μm) co powoduje, że powszechnie jest stosowana np. do wytwarzania narzędzi i mikro-narzędzi

(formy wtryskowe, matryce, wykrojniki). Ograniczenia w stosowaniu tej metody to: brak możliwości obróbki materiałów nieprzewodzących prądu elektrycznego, stosunkowo mała wydajność obróbki, zużycie elektrody roboczej, występowanie na powierzchni obrabianej warstwy wpływów cieplnych, ograniczenia kształtu i wymiarów wewnętrznych z uwagi na wymagany kształt i wymiary elektrody-narzędzia. Wytwarzanie mikro-elementów metodą EDM można realizować w operacjach drażenia, wiercenia, wycinania drutem oraz frezowania (obróbka uniwersalną elektrodą).

Kierunki rozwoju EDM są analogiczne jak procesu ECM i obejmują: badania i modelowanie zjawisk występujących w obszarze obróbki, obróbkę nowych materiałów (stałe stopowe, specjalne stopy), doskonalenie obrabiarek w zakresie dokładności geometryczno – kinematycznej, nowe generatory do obróbki wykończeniowej, mikroobróbki, układów sterowania procesem oraz systemów wspomagających projektowanie procesów technologicznych. W obróbce EDM, ze względu na mechanizm usuwania nadmiaru (topienie, parowanie), nie można osiągnąć właściwości warstwy wierzchniej zbliżonych do uzyskiwanej w ECM. Dlatego istotnym kierunkiem rozwoju jest stosowanie obróbki sekwencyjnej oraz obróbek hybrydowych. Poniżej zostaną scharakteryzowane wybrane kierunki rozwoju EDM.

■ Obróbka specjalnych materiałów

Obecnie obróbka elektroerozyjna jest coraz częściej stosowana do kształtowania stali i stopów na bazie niklu i tytanu tj. [9, 10, 11]: np.:

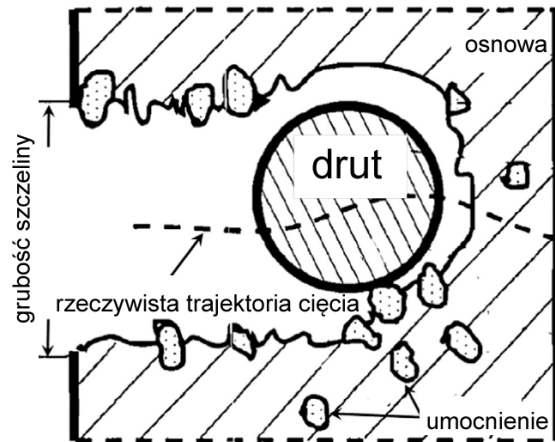
- stałe stopowe: X22CrMoV211, X12CrNiWTiB16-13,
- stopy na bazie Ti: Ti-6Al-4V, Ti-6Al-2Sn-4Zr2Mo-0.1Si,
- superstopy na bazie Ni – Inconel 718, Inconel 738, Inconel 939, Udimet 720, Nimonc 104, Nimonic 713 itp

Podstawowym problemem w obróbce wyżej wymienionych stali i stopów jest występowanie na powierzchni materiału obrabianego warstwy białej (przetopiony materiał), mikro-pęknięć i zwykle niezadowalająca chropowatość powierzchni. Wynika to z faktu, że omawiane stałe i stopy posiadają mniejszą przewodność cieplną i elektryczną, co istotnie zmienia warunki obróbki EDM i uzyskiwane wyniki. Przykładowo w [11] najlepszą jakość powierzchni $R_a \sim 1,5$ (zgrubne przejście) – 0.2 (wykończeniowe przejście) μm uzyskano dla impulsów $I = 400$ A, przy czasie 1.8 μs o częstotliwości $>1\text{MHz}$, Warstwa przetopionego materiału była nieciągła o grubości < 11 μm . Z tego względu po obróbce elektroerozyjnej stosowane są operacje obróbki wykończeniowej; często są stosowane tutaj metody hybrydowe np. obróbka elektroerozyjno ścierna lub elektrochemiczno – ścierna. Uzasadnione byłoby również zastosowanie opisanej w poprzednich rozdziałach obróbki elektrochemicznej. Przykłady takich operacji sekwencyjnych podane zostaną w dalszej części artykułu.

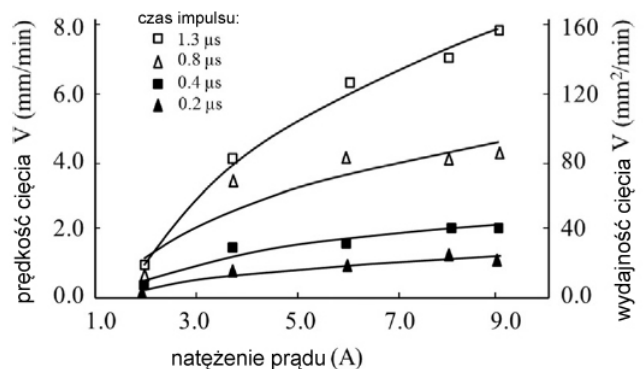
Prowadzone są również badania obróbki elektroerozyjnej materiałów kompozytowych na osnowie metalowej przewodzącej prąd elektryczny (MMC's) [5, 12, 13]. Ogólnie obróbka elektroerozyjna MMC przebiega analogicznie jak dla materiałów jednolitych (np. stal, stop). Różnice w wydajności, dokładności i strukturze warstwy wierzchniej wynikają z obecności nieprzewodzących cząstek umacniających (rys. 9). Wraz ze wzrostem ich koncentracji maleje przewodność cieplna i elektryczna obrabianego materiału (MMC) a tym samym istotnie zmieniają się warunki procesu obróbki

i uzyskane wyniki. Wybrane zależności technologiczne dla obróbki elektroerozyjnej MMC przedstawiono na rys. 10 i 11.

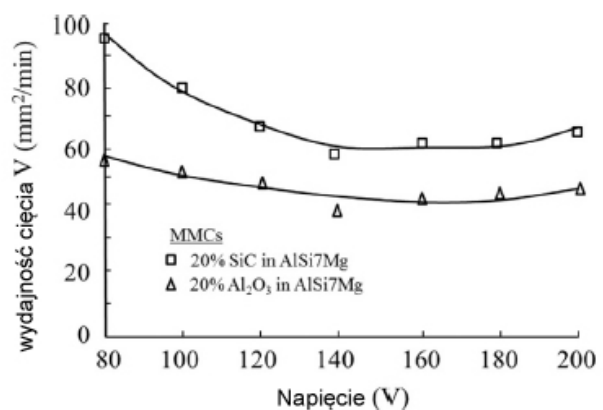
Niektóre materiały znajdujące szerokie zastosowanie w mikrosystemach (np. SiC, PCD) są modyfikowane tak aby przewodziły prąd elektryczny i mogły być obrabiane elektroerozyjnie [13].



Rys. 9. Schemat cięcia elektroerozyjnego MMC [5]



Rys. 10. Zależność prędkości cięcia od amplitudy natężenia prądu przy obróbce AlSi7Mg/20 %SiC dla różnych czasów impulsów [5]

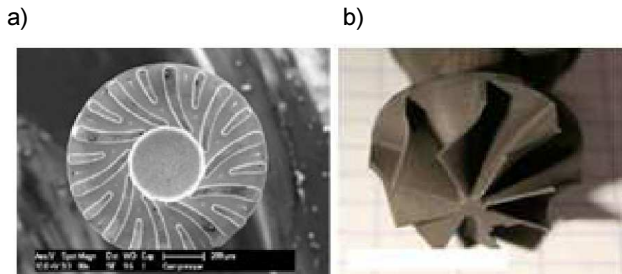


Rys. 11. Zależność prędkości cięcia od amplitudy napięcia dla różnych materiałów [5]

■ Mikroobróbka EDM

W wytwarzaniu mikroelementów stosując obróbkę EDM konieczne jest rozwiązanie wielu zagadnień takich jak: wykonanie elektrody roboczej, pozycjonowanie elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego, wykonanie odpowiedniej obrabiarki z precyzyjnymi przesuwami i specjalnych genera-

torów impulsów elektrycznych umożliwiającą uzyskanie impulsów napięcia rzędu nanosekund i amplitudy natężenia prądu rzędu mJ czy μJ . Bardzo ważnym i trudnym do rozwiązania problemem jest zużycie elektrody roboczej. Dlatego przy wytwarzaniu elementów kształtowych często wykorzystuje się kinematykę frezowania elektrodą walcową, której zużycie jest kompensowane w trakcie procesu. Osiągnięcia w tym zakresie są imponujące, co potwierdzają zdjęcia mikroelementów wykonanych frezowaniem EDM (rys. 12).



Rys. 12. Mikro kompresor o średnicy 1 mm (a) i mikro wirnik turbiny wykonane frezowaniem EDM [10]

■ Obrabiarki EDM

Rozwój obrabiarek EDM jest bardzo dynamiczny. Świadczą o tym prospekty czołowych producentów. Obrabiarki mają coraz lepsze właściwości geometryczna – kinematyczne i wyposażone są w coraz lepsze generatory impulsów elektrycznych, zarówno do obróbki kształtującej jak i wykończeniowej, zapewniających odpowiednią dokładność oraz właściwości warstwy wierzchniej, przy minimalnym zużyciu elektrody roboczej. Jednak obiektywnie największy postęp został dokonany w rozwoju obrabiarek EDM do wytwarzania mikroelementów. Przykładem może być tutaj oferta Firmy Sarix.



Rys. 13. Najnowsza obrabiarka SX 50 do mikroobróbki EDM Firmy Sarix

Obrabiarki serii SX-50 mogą mieć różnorodne wyposażenie umożliwiające drążenie w jednej osi elektrodą o średnicy od 0.045 do 3.00 mm do systemów wieloosiowych umożliwiających również realizację operacji frezowania. Można na nich wykonywać mikrootwory o średnicy nawet 20 μm . Generator SX-MFPS umożliwia uzyskanie chropowatości powierzchni R_a 0.10 – 0.05 μm . Wymiary stołu roboczego 510 x 270 mm, przesuw w osiach: X- 200 (250)mm, w osi Y | Z - 150 mm, dokładność pozycjonowania +/- 10 - +/- 2 μm , powtarzalność pozycjonowania 0.1 μm , masa przedmiotu – do 20 kg. Obrabiarki i przykłady ich zastosowań prezen-

wane są na stronie internetowej Firmy Sarix (<http://www.sarix.com/>).

Metody hybrydowe

■ Charakterystyka niekonwencjonalnych procesów hybrydowych

Poprawę wskaźników technologicznych czyli: zwiększenie wydajności, poprawę właściwości warstwy wierzchniej, zmniejszenie zużycia elektrody - narzędzia, zwiększenie dokładności wymiarowej dla omawianych (ECM, EDM) procesów wytwarzania można uzyskać przez zastosowanie procesów hybrydowych.

W obszarze ubytkowych procesów wytwarzania za procesy hybrydowe uważa się procesy, które bazują na równoczesnej i kontrolowanej interakcji różnych mechanizmów procesu oraz (lub) różnych źródeł energii, co wywiera istotny i korzystny wpływ na wskaźniki technologiczne procesu wytwarzania. W obszarze omawianych niekonwencjonalnych procesów wytwarzania wyróżnia się tzw. czyste procesy hybrydowe o różnych mechanizmach usuwania nadmiaru: obróbka elektrochemiczna – elektroerozyjna ECDM, szlifowanie elektrochemiczne, szlifowanie elektroerozyjne, oraz wspomagane hybrydowe procesy to takie, w których – mechanizm usuwania nadmiaru jest określony przez jeden proces, a mechanizm ten jest wspomagany przez dodatkowe źródło energii. Są to np. procesy ECM i EDM wspomagane drganiem ultradźwiękowymi. Główny mechanizm usuwania nadmiaru może być również wspomagany przez zastosowanie specjalnych płynów np. mieszanina dielektryka i proszku o specjalnie dobranych właściwościach. W przypadku metod tradycyjnych takim przykładem jest szlifowanie z chłodzeniem kriogenicznym ($T < -150^\circ\text{C}$, tzw. Media Assisted Machining) [15]. Biorąc pod uwagę rosnącą liczbę procesów hybrydowych wykorzystywanych w przemyśle należy uznać, że ich stosowanie rozwiązuje wiele problemów technologicznych.

■ Elektrochemiczne szlifowanie wykończeniowe po obróbce elektroerozyjnej

Z dotychczasowych badań wynika, że w procesie elektrochemicznego szlifowania (AECG) w stosunku do klasycznego szlifowania – maleje energochłonność, siły szlifowania i zużycie narzędzia, rośnie istotnie wydajność, właściwości warstwy wierzchniej poprawiają się szczególnie w przypadku obróbki elementów z węglików spiekanych, wysoko wytrzymałych stopów (Inconel, Nimonic), stopów tytanu, stopów niklu, metal matrix composites (PCD – Co, Al – SiC, Al- Al_2O_3). W zależności od wariantu obróbki można nawet uzyskać powierzchnie o $R_a \ll 0.1 \mu\text{m}$.

Szlifowanie elektrochemiczne zastosowano do obróbki wykończeniowej powierzchni ze stopu Ti-6Al-4V po zgrubnej obróbce EDM [16]. Stopy tytanu znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym, samochodowym, medycznym dzięki bardzo dobrej odporności na korozję. Jednak ich obróbka jest trudna ze względu na niską przewodność cieplną, chemiczną aktywność, niski moduł plastyczności. Konwencjonalne procesy obróbkowe nie są w stanie zapewnić dobrej jakości powierzchni obrabianej, wymaganej w produkcji lotniczej. Często stosowaną metodą kształtowania jest obróbka elektroerozyjna (EDM). Po obróbce EDM na powierzchni wyrobu pozostaje warstwa biała i widoczne są mikropęknięcia oraz kraterki (z wtórnymi produktami erozji) po wyładowaniach elektrycznych, a chropowatość powierzchni R_a wynosi od 2.69 μm (dla amplitudy natężenia prądu – 3 A) do 5.79 (dla amplitudy natężenia prądu – 25 A). Aby poprawić właściwości warstwy wierzchniej

niej zastosowano jako operację wykończeniową szlifowanie elektrochemiczne. Jako narzędzie zastosowano ściernicę o osnowie metalowej a głębokość szlifowania była większa od grubości warstwy białej i wynosiła 50 μm . W wyniku operacji szlifowania elektrochemicznego warstwa biała została usunięta całkowicie a wartość R_a zmniejszono nawet do 0.06 μm . Taka powierzchnia spełnia całkowicie wymagania produkcji lotniczej. Inne praktyczne zastosowania szlifowania elektrochemicznego przedstawione zostały przez autorów w [17].

■ Charakterystyka hybrydowych procesów obróbki elektroerozyjno – ściernej

Procesy hybrydowe obróbki elektroerozyjno ścierniej bazują na równoczesnej i kontrolowanej interakcji różnych mechanizmów procesu czyli usuwania materiału w wyniku wyładowań elektrycznych (nagrzewanie, topienie, parowanie, krzepnięcie) i oddziaływania mechanicznego ziaren ściernych. Oddziaływanie mechaniczne ziaren ściernych można realizować stosując ścierniwo związane spoiwem (ściernice, osetki, struny, taśmy, szczotki z włóknami zawierającymi ścierniwo) oraz luźne nie związane ścierniwo stanowiące mieszaninę z dielektrykiem. Oddziaływanie ziaren ściernych na materiał obrabiany wymuszamy przez ruch względem przedmiotu obrabianego narzędzia ściernego. Proces obróbki elektroerozyjno ścierniej prowadzony jest tak aby ziarna ściernie usuwały całkowicie warstwę białą, a tym samym umożliwiały poprawę właściwości warstwy wierzchniej przez eliminację warstwy białej, mikropęknięć i zmniejszenie chropowatości powierzchni w stosunku do obróbki EDM. Proces obróbki elektroerozyjno – ścierniej został również z powodzeniem zastosowany w procesie wycinania drutowego (Abrasive WEDM). Zagadnienia obróbki elektroerozyjno-ścierniej oraz praktyczne zastosowania omówione zostały przez autorów w [18].

■ Obróbka elektrochemiczno-elektroerozyjna (ECMM)

Koncepcja zastosowania procesu hybrydowego elektrochemiczno-elektroerozyjnego (ECMM) metali i ich stopów pojawiła się już w latach 70-tych ubiegłego stulecia i jest dalej rozwijana [15].

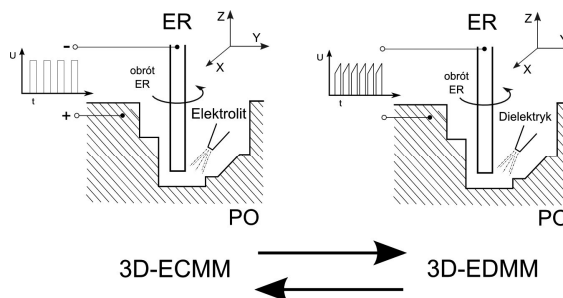
W metodzie tej materiał jest usuwany w wyniku równoczesnego rozpuszczania elektrochemicznego oraz wyładowań elektrycznych. Badania procesu ECMM w kształtowaniu materiałów metalowych (np. stal nierdzewna 1Cr18Ni9Ti) wykazały, że wydajność obróbki w procesie ECMM może być wielokrotnie większa (nawet 50 razy) niż w obróbce elektrochemicznej a jakość powierzchni obrabianej znacznie lepsza niż w EDM. Również zużycie elektrody roboczej znacznie mniejsze niż w EDM. Kolejne badania procesu ECMM dotyczyły już materiałów kompozytowych na osnowie metalicznej (np. aluminium 359 umacniane SiC w ilości 20%) [19]. Wyniki obróbki ECMM materiałów kompozytowych na osnowie metalicznej są również obiecujące chociaż badania te zrealizowano dla niewielu materiałów. Proces ECMM zastosowano również z pozytywnym skutkiem do obróbki stopu Nd-Fe-Ba oraz materiału kompozytowego na osnowie ceramicznej $\text{ZrB}_2 - \text{Cu}$.

■ Procesy sekwencyjne

Procesy produkcyjne w przemyśle muszą zapewnić przede wszystkim odpowiednią jakość wyrobów bo od tego zależy bezpieczna eksploatacja samolotu czy samochodu. Ale bardzo ważnym kryterium są również koszty produkcji. Kryteria te stymulują rozwój procesów ECM, EDM oraz hybrydowych. Tam gdzie wymienione procesy nie spełniają powyższych kryteriów stosuje się z powodzeniem procesy

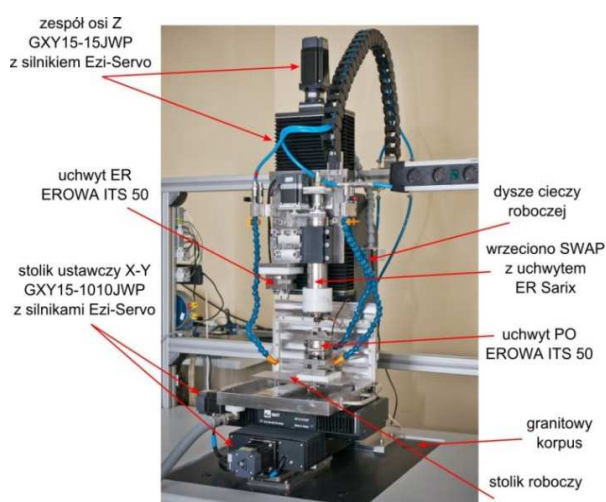
sekwencyjne. W niniejszym opracowaniu wspomniano już o takich sekwencjach jak: obróbka EDM > szlifowanie elektrochemiczne (lub elektroerozyjne), wycinanie elektroerozyjne > szlifowanie elektrochemiczne itp.

Z uwagi na to, że pomiędzy obróbką elektroerozyjną i elektrochemiczną istnieje podobieństwo pod względem kinematycznym a urządzenia składają się z analogicznych zespołów powstała koncepcja technologii i stanowiska do sekwencyjnej obróbki elektrochemiczno elektroerozyjnej mikroelementów [2, 20].



Rys. 13. Schemat sekwencyjnej obróbki elektroerozyjno – elektrochemicznej [2, 20]

Koncepcja sekwencyjnej realizacji obróbki ma na celu ominiecie wad EDM i ECM oraz wykorzystanie ich zalet. Na przykład w pierwszym etapie obróbki usuwane jest elektrochemicznie z dużą wydajnością 60 – 80% naddatku obróbkowego przy dokładności rzędu 10 – 20 μm , pozostała część naddatku usuwana jest w kolejnej operacji elektroerozyjnie z dokładnością 1 – 5 μm (rys. 13). Zasadniczym efektem tej sekwencji jest radykalne skrócenie całkowitego czasu obróbki, gdyż wydajność właściwa ECM jest nawet 10–100 krotnie większa od wydajności EDM oraz uzyskanie większej niż w ECM dokładności. Należy przypomnieć, że w ECM nie występuje zużycie elektrody roboczej. Dlatego procesy ECM i EDM mogą być realizowane tą samą elektrodą-narzędziem. Oczywiście pomiędzy operacjami konieczna jest przerwa na przełączenie układy obiegu cieczy roboczej (elektrolit > dielektryk) oraz generatorów impulsów napięcia (ECM > EDM).



Rys. 14. Prototyp obrabiarki do hybrydowego elektroerozyjno-elektrochemicznego wytwarzania mikroelementów [2, 20]

W wyniku przeprowadzonych prac teoretycznych oraz doświadczalnych nad przedstawionym wyżej procesem [2, 20] zaprojektowano i wykonano prototyp obrabiarki do realizacji sekwencyjnej mikrotechnologii ECMM>EDMM (rys.

14), który umożliwia realizację następujących operacji wytwarzania mikroelementów:

- obróbka elektrochemiczna i elektroerozyjna uniwersalną elektrodą walcową (frezowanie),
- drążenie elektrochemiczne i elektroerozyjne,
- wiercenie elektrochemiczne i elektroerozyjne,
- obróbka elektrochemiczna strumieniem elektrolitu.

Natomiast przeprowadzone badania własne sekwencji obróbki elektrochemicznej i elektroerozyjnej (EC/EDMM) pokazały że możliwe jest prawie dwukrotne skrócenie czasu obróbki, w porównaniu do czasu trwania EDM. W EC/EDMM średni promień krawędzi odchylenia był znacznie mniejszy niż przy zastosowaniu ECM (jest prawie taki sam jak podczas EDM). W EDM występowało znaczne zużycie elektrody roboczej, natomiast w przypadku odpowiedniego doboru parametrów obróbki podczas sekwencji EC/EDMM, wpływ zużycia narzędzia na kształt obrabiany był pomijalny. Przeprowadzone badania pozwoliły także stwierdzić, że grubość warstwy usuniętej podczas fazy EDM powinna wynosić ok. 100 μm .

Podsumowanie

Inżynieria materiałowa wychodząc naprzeciw potrzebom współczesnego przemysłu (szczególnie kosmicznego, lotniczego, zbrojeniowego, elektronicznego czy medycznego) oferuje wciąż nowe materiały (stale, stopy, materiały kompozytowe) o specjalnych właściwościach. Racjonalne zastosowanie w praktyce przemysłowej tych nowych materiałów jest możliwe dopiero po opracowaniu efektywnych metod ich kształtowania. I to jest podstawowy czynnik stymulujący rozwój wszystkich metod wytwarzania – również niekonwencjonalnych. Kolejne czynniki stymulujące ich rozwój to wzrost wymagań przemysłu w zakresie wydajności, dokładności oraz jakości warstwy wierzchniej, oraz coraz szersze stosowanie w produkowanych urządzeniach Mikro (Nano) – Elektro – Mechanicznych Systemów (MEMS-y, NEMS-y). Przy czym produkcja Mikro (Nano) – Elektro – Mechanicznych Systemów stawia nowe wyzwania zarówno w zakresie stosowanych materiałów jak i wymiarów produkowanych elementów czy struktur geometrycznych – w skali mikro i nano. W artykule skoncentrowano się na kształtowaniu specjalnych materiałów przewodzących prąd elektryczny z wykorzystaniem obróbki elektrochemicznej, elektroerozyjnej, związanych z nimi metod hybrydowych oraz procesów sekwencyjnych.

LITERATURA

1. Ruszaj A., Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi. Wydawnictwo IOS, Kraków, 1999.
2. Skoczypiec S., Elektrochemiczne metody wytwarzania mikroelementów. Monografia. Mechanika, nr 426, Wydawnictwo PK, Kraków 2013.
3. Lipiec P., Zastosowanie bipotencjostatu w procesie impulsowej obróbki elektrochemicznej mikroelementów, Mechanik, 2015 (publikacja w druku).
4. Klocke F., Zeiss M., Klink A., Veselovac D., Experimental research on the electrochemical machining of modern titanium- and nickel-based alloys for aero engine components. *Procedia CIRP* 6 (2013) 368 – 372
5. Pramanik A., Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites; *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 86 (2014) 44-61.
6. Hinduja S., Kunieda M., Modelling of ECM and EDM processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62 (2013) 775–797.
7. Wriek J., Upgrading to PECM. *Professional Journal on Precision Engineering*, $\mu\text{Mikroniek}$, Issue 3, 2014, 48 – 53.
8. Bahre D., Rebschlag A., Weber O., Steuer P., Reproducible, Fast and adjustable surface roughening of stainless steel using pulse electrochemical machining. *Procedia CIRP* 6 (2013) 384 – 389.
9. Klocke F., Klink A., Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2014) 703–726.
10. Rajurkar K.P., Sundaram M. M., Malshe A. P., Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining. *Procedia CIRP* 6 (2013) 13 – 26.
11. Aspinwall D.K., Soo S.L., Berrisford A.E., Walder G., Workpiece surface roughness and integrity after WEDM of Ti-6Al-4V and Inconel 718 using minimum damage generator technology; *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008) 187-190.
12. Sindhu S.S., Batish A., Kumar S., ED Machining of Particulate Reinforced MMC's; *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, Vol. 8. No 3, 2014, 503–509.
13. Garg R. K., Singh K. K. i in. Review of research work in sinking EDM and WEDM on metal matrix composite materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 50, Issue 5-8, 611-624.
14. Iwai M., Ninomiya S., Suzuki K., EDM properties of newly developed PCD made up of electrically conductive diamond particles. *Procedia CIRP* 6 (2013) 140 – 145.
15. Lauwers B., Klocke F., i inn., Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2014) 561–583.
16. Hascalik A., Cydas U., A comparative study of surface integrity of Ti-6Al-4V Alloy machined by EDM and AECG. *Journal of Materials Processing Technology* 190 (2007), 173 -180.
17. Ruszaj A., Skoczypiec S., Wybrane zagadnienia obróbki elektrochemicznej – ściernej. *Mechanik*, nr 2/2015, 103-105.
18. Ruszaj A., Skoczypiec S., Obróbka elektroerozyjno-ścierna – wybrane zagadnienia. *Mechanik*, nr 3/2015 (publikacja w druku).
19. Liu J.W., Yue T.M., Guo Z.N., An analysis of the discharge mechanism in electrochemical discharge machining of particulate reinforced metal matrix composites, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50 (2010) 86-96.
20. Skoczypiec S., Ruszaj A., A sequential electrochemical-electrodischarge process for microparts manufacturing. *Precision Engineering* 38 (2014) 680–690.