OBRÓBKA ELEKTROEROZYJNA

Zasadniczym zjawiskiem fizycznym wykorzystywanym w obróbce elektroerozyjnej jest wyładowanie elektryczne w ciekłym ośrodku dielektrycznym pomiędzy dwiema elektrodami przewodzącymi prąd elektryczny. Właściwości i skutki wyładowania elektrycznego zależą od charakterystyki impulsów elektrycznych powodujących inicjację i podtrzymanie wyładowania elektrycznego. Skutkiem wyładowania elektrycznego są powstające na elektrodach kratery, zwane kraterami erozyjnymi. Od objętości i częstości powstawania kraterów erozyjnych zależy szybkość usuwania naddatku obróbkowego materiału przedmiotu obrabianego ale też i materiału elektrody roboczej. Usuwanie naddatku obróbkowego z przedmiotu obrabianego jest skutkiem pożądanym, natomiast usuwanie materiału elektrody roboczej jest niekorzystne, gdyż powoduje zmianę jej kształtu i wymiarów. Ten efekt powoduje, że wgłębienie czy otwór zaplanowany do wykonanie nie uzyskuje oczekiwanego wymiaru i kształtu. Objętość powstających kraterów erozyjnych zależy od wielu czynników, ale głównie od charakterystyki wyładowania elektrycznego, od właściwości materiału obrabianego i materiału elektrody roboczej, od właściwości zastosowanej cieczy dielektrycznej oraz od sposobu jej dostarczania do szczeliny międzyelektrodowej.

Doświadczenie pokazuje, że znaczny wpływ na wartości wskaźników technologicznych EDM ma, oprócz wymienionych wcześniej czynników zastosowany system regulacji i napędu posuwu elektrody roboczej.

Wyładowania elektryczne wykorzystywane w EDM przebiegają w czasie od ułamka mikrosekundy do około tysiąca lub dwóch tysięcy mikrosekund. Skutki wyładowań (kratery erozyjne) posiadają rozmiary (średnicę) rzędu od pojedynczych mikrometrów do pojedynczych milimetrów. Dla generacji, pomiaru i rejestracji skutków EDM będzie użyte specjalne wyposażenie technologiczne oraz odpowiednia aparatura naukowo – badawcza. Schemat stanowiska badawczego wraz z jego opisem zamieszczono w pomocy dydaktycznej do ćwiczenia laboratoryjnego EDM1.

OBRÓBKA ELEKTROEROZYJNA W TECHNOLOGII MASZYN

Obróbka elektroerozyjna jest stosowana w przemyśle od około pięćdziesięciu lat jako sposób kształtowania przedmiotów przewodzących prąd elektryczny, przez usuwanie naddatku, na skutek działania wyładowań

elektrycznych pomiędzy dwiema elektrodami w ciekłym ośrodku dielektrycznym. Początkowo, w latach czterdziestych i pięćdziesiątych ubiegłego wieku EDM stosowana była do wykonywania wszelkiego rodzaju wgłębień i otworów. Pod koniec lat sześćdziesiątych pojawia się nowy odmiana EDM elektroerozyjne wycinanie drutem (WEDM). Równocześnie zauważa się wprowadzanie planetarnej obróbki elektroerozyjnej. Dokonuje się modyfikacji generatorów w celu dobrania właściwego kształtu impulsów napięcia i natężenia prądu. Prowadzone są intensywne badania nad układami sterowania posuwem elektrody roboczej. Wraz z rozwojem techniki cyfrowej w układach sterowania i napędów posuwu w EDM i WEDM stosuje się wspomaganie układów regulacji posuwu elektrody roboczej przez wykorzystanie w nich elementów logiki rozmytej i sieci neuronowych. Nowoczesne obrabiarki do wgłębnej EDM pozwalają na wykonanie części z tolerancją ±0.01 mm, a wycinarki drutowe z tolerancją ±0.001 mm.

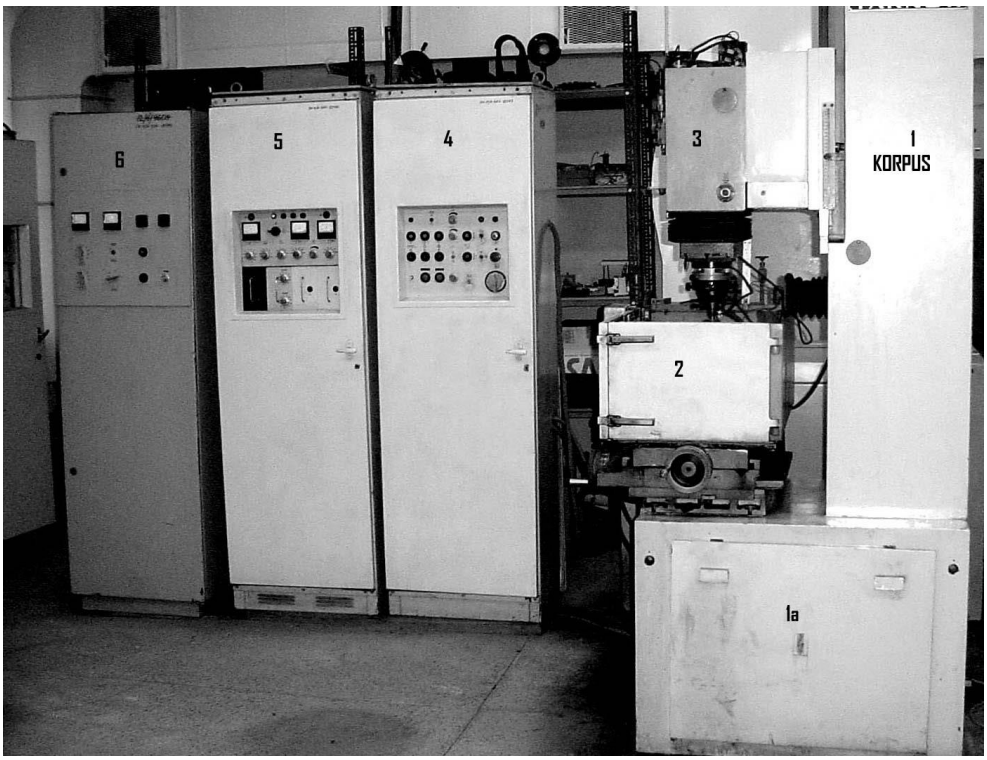
Od opatentowania przez B. R. Lazarenko, N.I. Lazarenko elektroiskrowego sposobu obróbki materiałów w latach 1943 i 1946 przez cały czas trwa w wielu ośrodkach naukowych na świecie badanie tego złożonego procesu. Badania prowadzone są przez interdyscyplinarne zespoły nad fizyką elektrycznej erozji materiałów w warunkach EDM oraz nad wpływem czynników na wartości wskaźników technologicznych tego procesu. Podczas badań EDM wykorzystywane są najnowsze osiągnięcia w zakresie przebicia elektrycznego w gazach i cieczach izolacyjnych. Pomimo zaangażowania licznych zespołów naukowców, proces erozji elektrycznej, jak dotychczas, pilnie strzeże swych tajemnic. Przyczyną takiego stanu poznania EDM może być i to, że przebiega on w niedostępnej dla badaczy szczelinie międzyelektrodowej o grubości od kilku mikrometrów do kilku dziesiątych części milimetra. Drugim istotnym utrudnieniem dla badaczy tego procesu do niedawna był czas impulsu, podczas którego przebiega erozja w warunkach EDM. Wartości czasu impulsu mieszczą się w granicach od ułamka mikrosekundy przy drutowej obróbce elektroerozyjnej, do jednej lub dwu milisekund przy wgłębnej EDM. Innym utrudnieniem w badaniu EDM jest ciecz dielektryczna, w której proces przebiega. W strefie działania wyładowania elektrycznego ciecz dielektryczna zostaje zanieczyszczona przez produkty erozji już podczas okresu przedprzebiciowego. Taki stan cieczy dielektrycznej może zniekształcać informację emitowaną przez wyładowanie elektryczne i towarzyszące zjawiska fizyczne. Prowadzone doświadczenia w warunkach zbliżonych do EDM, poprzez np. stosowanie elektrod ostrzowych, pozwalają wprawdzie na udostępnienie badaczowi pewnych informacji o zachodzących zjawiskach, jednak taki schemat, szczególnie przy badaniu skutków pojedynczych wyładowań i przenoszenie ich na pracę ciągłą, może wnosić do

wniosków z badań trudne do oszacowania błędy. Wymienione niektóre tylko właściwości EDM wskazują, jak trudne zadania stają przed badaczami tego szeroko stosowanego sposobu obróbki.

OBRABIARKA ELEKTROEROZYJNA

Obrabiarka elektroerozyjna przedstawiona na fotografii (rys.1) posiada w rzeczywistości następujące moduły:

- Właściwa obrabiarka (moduł mechaniczny) (1 KORPUS) oraz podstawa (1a) z poziomo przemieszczającym się roboczym stołem krzyżowym umieszczonym w wannie (2) na ciecz dielektryczną. Moduł mechaniczny w większości przypadków wykonany jest jako konstrukcja w kształcie litery C, którą stanowią podzespoły (1), (1a) i (3). Taka konstrukcja cechuje się sztywnością, zapewniając wymaganą dokładność wymiarów i kształtu przedmiotów obrabianych.
- Pionowo przemieszczana głowica (3) z uchwytem elektrody zamocowanym na płycie narzędziowej. Płyta narzędziowa wykonuje ruch roboczy posuwowy sterowany przez automatyczny układ regulacji posuwu. Regulator posuwu odróżnia obrabiarkę elektroerozyjną od wiertarki czy frezarki tym, że ostatnie dwie obrabiarki posiadają posuw wymuszony, bez względu na stan w strefie skrawania.
- Elektroniczny zespół regulatora posuwu roboczego głowicy, którego zadaniem jest utrzymanie odpowiedniej wartości grubości czołowej szczeliny międzyelektrodowej S_F, stosownie do usuwania warstw materiału obrabianego i zużycia elektrody roboczej, znajduje się w szafie sterującej (4). Na przedniej ścianie szafy sterującej (4) znajdują się elementy obsługi obrabiarki. Są to głównie przełączniki elektryczne służące do aktywowania różnych funkcji zespołów obrabiarki elektroerozyjnej.



Rys.1. Obrabiarka elektroerozyjna (drążarka wgłębna) EDEA25. Integralnymi zespołami obrabiarki są: korpus (1), podstawa (1a), wanna napełniana cieczą dielektryczną (2), przesuwna głowica(3), szafa sterująca (4), generator tranzystorowy (5), niewidoczny na fotografii zbiornik na ciecz dielektryczną (usytuowany za podstawą 1a)

- Tranzystorowy generator impulsów elektrycznych GETB63a (szafa 5) z możliwością nastawiania parametrów mocy impulsu takich, jak napięcie robocze, natężenie prądu, czas impulsu, czas przerwy pomiędzy impulsami i inne. W szafie generatora mogą znajdować się urządzenia do kontroli (nadzoru) procesu obróbki (w obrabiarkach nowoczesnych są układy elektroniczne wykrywające i usuwające zwarcia w szczelinie międzyelektrodowej, co wymaga wytworzenia impulsu mocy o specjalnym kształcie).
- Zasobnikowy generator impulsów GEZA 10, szafa (6), jest zespołem dodatkowym, zainstalowanym dla celów dydaktycznych. Współpracuje ze wszystkimi zespołami obrabiarki EDEA25.

- Zespół obiegu cieczy dielektrycznej (usytuowany za modułem mechanicznym, niewiele widoczny na fotografii) ze zbiornikiem,

w którym znajduje się 400 l cieczy dielektrycznej, układ do filtrowania cieczy dielektrycznej oraz pompa umożliwiająca dostarczanie cieczy dielektrycznej do przestrzeni roboczej. Ciecz dostarcza się do wanny (2) oraz do strefy obróbki w celu wypłukiwania wyerodowanych cząstek ze szczeliny międzyelektrodowej. Filtry w zbiorniku oczyszczają ciecz dielektryczną z produktów erozji.

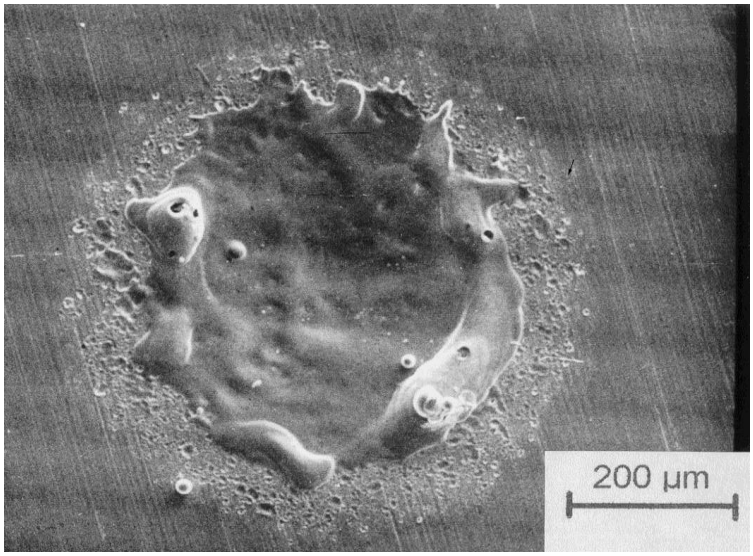
Erozja elektryczna w warunkach wgłębnej EDM

Dokonany w laboratorium ITMiAP Politechniki Krakowskiej po raz pierwszy w świecie pomiar temperatury plazmy erozyjnej, badania doświadczalne siły działającej na elektrody pochodzącej od kanału plazmowego oraz analiza doświadczalno - teoretyczna gęstości mocy w wyładowaniu elektrycznym pozwoliły zaproponować model fizyczny wyładowania elektrycznego w cieczy dielektrycznej. Badania doświadczalne potwierdziły hipotetyczny przebieg wyładowania elektrycznego w warunkach EDM.

Dotychczasowe hipotezy o przebiegu erozji elektrycznej w warunkach EDM koncentrują się na możliwości zmiany stanu skupienia, głównie na skutek topienia materiału przedmiotu obrabianego i elektrody roboczej. Niektóre hipotezy uwzględniają możliwość wrzenia materiału obrabianego lub elektrody roboczej. Żadna z hipotez nie koncentruje uwagi na problemie powstawania i podtrzymywania plazmowego kanału wyładowania elektrycznego (PKWE).

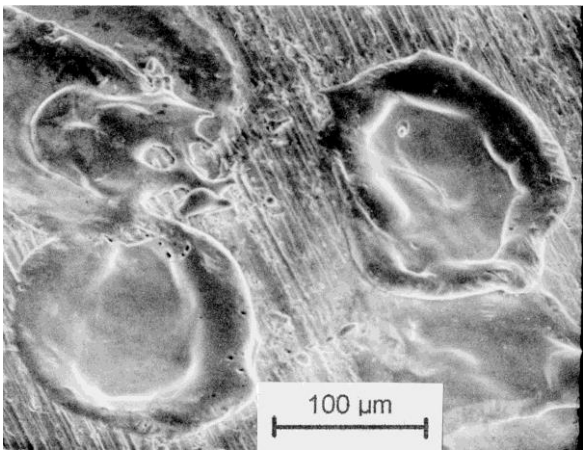
Zasadniczymi mankamentami wszystkich dotychczasowych hipotez o EDM jest założenie, iż wyładowanie elektryczne jest jednokanałowe, o beczkowatym kształcie kanału, obejmujące pewną, bliżej nieokreśloną część powierzchni powstającego krateru oraz marginalne traktowanie właściwości PKWE. Zakończone sukcesem pomiary temperatury plazmy wyładowań elektrycznych w warunkach EDM, jednoznacznie wskazują, iż dla egzystowania wyładowania elektrycznego niezbędna jest określona wartość gęstości mocy dla generacji plazmy metali elektrod.

Pewne wyobrażenie o wyładowaniach elektrycznych w warunkach EDM dają mikroskopowe obserwacje kraterów erozyjnych będących skutkiem tych wyładowań. Wyniki obserwacji kraterów powstających na czynnej powierzchni przedmiotu obrabianego i elektrody roboczej pokazano na (rys.2) i (rys.3).



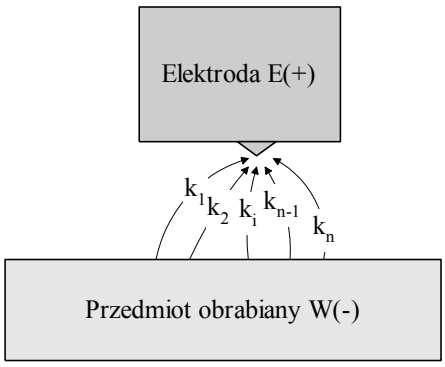
Rys. 2. Krater erozyjny na próbce ze stali NC6(-), powstały przy warunkach obróbki: elektroda M1E(+), i_e = 60 A, t_i = 100 µs, ciecz dielektryczna – nafta kosmetyczna

Przedstawiona na (rys.2) fotografia krateru erozyjnego na powierzchni przedmiotu obrabianego będącego katodą, wskazuje, że wyładowanie elektryczne w warunkach EDM może być wielokanałowe.



Rys.3. Kratery erozyjne powstałe na elektrodzie z miedzi elektrolitycznej M1E(+) przy warunkach obróbki: przedmiot obrabiany stal NC6(-), i_e = 60 A, t_i = 25 µs, ciecz dielektryczna - nafta kosmetyczna

Badania mikroskopowe, prowadzone z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego wskazują, że kratery na metalowej katodzie posiadają otaczający je pierścień kraterów o mniejszej średnicy, zaś kratery na anodzie kraterów satelitów nie posiadają. Wyniki tych badań pozwalają na przedstawienie prawdopodobnego schematu i przebiegu wyładowania.



Rys. 4. Schemat wielokanałowego wyładowania elektrycznego

Przeprowadzone w ITMiAP PK badania składu chemicznego kanału plazmowego w warunkach EDM wskazały, iż zawiera on świecący gaz metali obu elektrod. Zatem można stwierdzić, że plazma wyładowania erozyjnego w warunkach EDM składa się z gazu i pary metali elektrod. To stwierdzenie pozwoliło na przeprowadzenie pomiaru temperatury plazmy erozyjnej.
Zmierzona wartość temperatury plazmy erozyjnej w warunkach EDM stali i elektrody miedzianej z wykorzystaniem impulsów z kondensatora, generującego wyładowanie periodyczne oraz dla impulsów uzyskiwanych z generatora tranzystorowego wynosi dla tych warunków eksperymentu 10000 ± 2500 K.

Przedstawiono własną hipotezę przebiegu wyładowania elektrycznego w cieczy dielektrycznej opracowaną w oparciu o badania własne oraz badania innych autorów nad przebiciem elektrycznym cieczy izolacyjnych. Hipoteza ta została potwierdzona przez wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych.

Napięcie doprowadzone do elektrod zanurzonych w ośrodku dielektrycznym oddzielonych nie przewodzącą szczeliną, wytwarza pole

elektryczne o wartości natężenia proporcjonalnej do wartości napięcia i odwrotnie proporcjonalnej do odległości elektrod. Nierówności powierzchni katody i niejednorodne właściwości jej materiału stwarzają warunki do powstawania niejednorodnego pola elektrycznego pomiędzy elektrodami. Przy odpowiedniej grubości szczeliny międzyelektrodowej, na skutek powstałego pola elektrycznego o natężeniu rzędu (107÷108) V·m-1, następuje zimna emisja elektronów z katody.
Pole elektryczne przyspiesza elektrony wyciągnięte z katody i znajdujące się w szczelinie międzyelektrodowej. Powstają przewodzące kanały w cieczy dielektrycznej. Wyciągane z katody elektrony powodują miejscowy wzrost temperatury materiału katody i cieczy dielektrycznej. Wzrost temperatury sprzyja zwiększeniu emisji elektronów z katody. Następuje zwiększanie temperatury cieczy dielektrycznej i lokalne zmniejszenie jej gęstości. Z wielu miejsc na katodzie, (rys.2), (rys.4) gdzie są najkorzystniejsze warunki do emisji elektronów, zapoczątkowywane są przewodzące kanały. Mała masa elektronów sprzyja zakrzywianiu się ich torów na skutek ogniskującego działania nierówności powierzchni na anodzie. Oddziaływanie elektronów przepływających przez te kanały z przewodzącymi materiałami elektrod przedstawiono jako działanie punktowych ciągłych źródeł ciepła na te materiały, potraktowane jako ciała półnieskończone. Źródła te powodują nagrzewanie pewnych objętości materiału elektrod początkowo do temperatury topnienia a następnie do temperatury wrzenia. Moc pojedynczego źródła i czas jego działania, dla określonego materiału katody limitują efektywność topienia i sublimacji jej materiału. Następuje sublimacja materiału katody, co jest równoznaczne z wytwarzaniem gazu z składników tworzących katodę. Powstaje pęcherz plazmy i gazu wciskający się w miejsca cieczy dielektrycznej o zmniejszonej lepkości. Początkowo powstaje wielokanałowe wyładowanie elektryczne, a liczbę kanałów i czas efektywnej generacji gazu materiału elektrody ujemnej określają nastawione parametry impulsu elektrycznego. Plazma i para z materiałów stykających się z kanałem plazmowym (przedmiot obrabiany, ciecz dielektryczna, elektroda robocza) wytwarzają falę uderzeniową. Materiał z kraterów usuwany jest w stanie ciekłym lub gazowym na skutek ciśnienia pochodzącego od fali uderzeniowej. Nie wyklucza się udziału sił natury elektrycznej w procesie powstawania kraterów. Zjawiska te przebiegają w czasie przepływania prądu elektrycznego przez kanał plazmowy, czyli w czasie impulsu. Materiał wyrzucony z kraterów zastyga w cieczy dielektrycznej wypełniającej

szczelinę międzyelektrodową, tworząc produkty erozji. Część roztopionego materiału elektrod zastyga ponownie w powstających kraterach. Po przerwaniu przepływu prądu, kanał plazmowy zanika, rozpada się pęcherz pary i gazów. Następuje dejonizacja obszaru objętego wyładowaniem elektrycznym. Na roztopiony metal w kraterach wlewa się ciecz dielektryczna. Powoduje szybkie chłodzenie materiału elektrod i może być przyczyną powstawania mikropęknięć w obrębie lub w okolicy powstałych kraterów. Ciecz dielektryczna przepływając przez szczelinę międzyelektrodową oczyszcza ją z produktów erozji. (Ciecz dielektryczna nie wypłukuje roztopionego materiału z kraterów!) Objętość krateru po pojedynczym wyładowaniu zależy głównie od wartości energii impulsu i od jego charakterystyki napięciowo - prądowej. Na objętość krateru erozyjnego mają także wpływ właściwości materiału elektrod oraz ich biegunowość. Pewien wpływ na kształt i rozmiary krateru erozyjnego mają właściwości cieczy dielektrycznej. Impulsy elektryczne o wymaganej charakterystyce dostarczane są do szczeliny międzyelektrodowej (SME) z generatora impulsów elektrycznych.

Badania ewolucji kraterów erozyjnych w czasie impulsu wykazały, że powstające kratery zwiększają swoją „średnicę” przez cały czas impulsu. Kratery niekoniecznie muszą posiadać kształt kołowy. Jednak niektórym kraterom, szczególnie podczas obróbki węglików spiekanych G40 można przypisać z dobrym przybliżeniem kształt kołowy.

Warunki obróbki elektroerozyjnej

Każdemu ze sposobów obróbki można przyporządkować zbiór warunków, które noszą nazwę warunków obróbki. W przypadku EDM zbiór ten, podobnie jak dla innych sposobów będzie zawierał:

- Warunki związane z obrabiarką.
- Warunki związane z przedmiotem obrabianym.
- Warunki związane z elektrodą roboczą.
- Warunki związane z cieczą dielektryczną.
- Elektryczne warunki obróbki.

Najistotniejszymi warunkami związanymi z obrabiarką, są właściwości układu automatycznej regulacji posuwu elektrody roboczej. Układ automatycznej regulacji posuwu elektrody roboczej ma za zadanie utrzymywanie odpowiedniej grubości szczeliny międzyelektrodowej.

Właściwości te wpływają na wydajność obróbki, zużycie elektrody roboczej, stan WW przedmiotu obrabianego oraz na stan elektrody roboczej. Niewłaściwa dla realizowanych elektrycznych warunków grubość szczeliny międzyelektrodowej może być przyczyną powstania zwarcia przedmiotu obrabianego z elektrodą roboczą. Zwarcie może być przyczyną uszkodzenia elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego. Od obrabiarki zależy także dokładność wymiarowo kształtowa przedmiotów obrabianych.

Czynniki związane z elektrodą roboczą to między innymi:

- właściwości fizyko chemiczne materiału elektrody roboczej
- kształt części roboczej elektrody,
- wartość czynnej powierzchni elektrody roboczej,
- technologia wykonania elektrody roboczej,
- możliwość przepłukiwania szczeliny międzyelektrodowej i inne.

Właściwości fizyko chemiczne elektrody roboczej to głównie:
Przewodność elektryczna materiału elektrody, temperatura topnienia materiału elektrody, temperatura wrzenia, współczynnik przewodzenia ciepła, gęstość oraz struktura w tym porowatość.
Kształt części roboczej elektrody wpływa głównie na dobieranie elektrycznych warunków obróbki i możliwość usuwania produktów erozji ze szczeliny międzyelektrodowej.
Wartość czynnej powierzchni roboczej elektrody wpływa na dobranie maksymalnej wartości natężenia prądu.
Elektroda może być wykonana jako monolityczna bądź powłokowa. Powłokowa może być wykonana na drodze obróbki plastycznej np. z blachy o różnej grubości lub metoda nanoszenia powłok, jedną z szerokiej gamy technologii nanoszenia powłok. Ta właściwość elektrody może limitować wartości elektrycznych warunków obróbki.
Od kształtu elektrody i technologii jej wykonania może zależeć sposób przepłukiwania szczeliny międzyelektrodowej ze względu na możliwość wykonania kanałów doprowadzających ciecz dielektryczną w celu oczyszczania szczeliny z produktów erozji.

Warunki związane z cieczą dielektryczną to gównie właściwości fizyko chemiczne tej cieczy oraz sposób jej doprowadzania do strefy obróbki oraz sposób usuwania produktów erozji ze szczeliny międzyelektrodowej. Ważnymi czynnikami są: wartość stałej dielektrycznej cieczy oraz jej lepkość.

Elektryczne warunki obróbki określają jedne z podstawowych wskaźników technologicznych EDM a to: wydajność obróbki, zużywanie się elektrody roboczej, chropowatość obrobionej powierzchni, stan WW oraz dokładność wymiarowo kształtowa przedmiotu obrabianego.
Do elektrycznych warunków obróbki zalicza się:
Wartość napięcia biegu luzem.
Wartość natężenia prądu w impulsie ie.
Wartość czasu impulsu ti.
Wartość czasu przerwy pomiędzy impulsami to.
Wartość napięcia roboczego Ur.
Biegunowość elektrod.

Wymienione warunki obróbki elektroerozyjnej nie są wszystkimi, jakie należy uwzględniać przy projektowaniu procesu technologicznego EDM. Jednak dla oceny złożoności tego sposobu obróbki wymieniono te, których wpływ na wartości wskaźników technologicznych EDM można ocenić przez wykonanie stosunkowo łatwych doświadczeń. Doświadczenia te będą przedmiotem ćwiczeń laboratoryjnych.

Wskaźniki technologiczne obróbki elektroerozyjnej

Wskaźniki technologiczne to wielkości, których wartości służą do projektowania procesu technologicznego EDM oraz oceny jego realizacji. Wielkości, których wartości są łatwo wyznaczalne służą także do oceny przydatności obrabiarki (drążarki) elektroerozyjnej wgłębnej w przypadku jej kupowania czy odbioru po remoncie. Najprościej wyznaczalnymi wskaźnikami technologicznymi i niezbędnymi dla wstępnej oceny obrabiarki elektroerozyjnej są:

- Objętościowa wydajność obróbki V_W.
- Współczynniki określające zużycie elektrody roboczej ϑ, ϑ_l, ϑ_{lk}.
- Chropowatość obrobionej powierzchni i jej nierównomierność określone np. wartością parametru Ra, przez podanie wartości $\bar{Ra}$, oraz SD(RA).
- Grubość czołowej szczeliny międzyelektrodowej S_F, oraz grubość bocznej szczeliny międzyelektrodowej S_B.
- Grubość warstwy uszkodzonej q_u.

Objętościowa wydajność obróbki jest objętością usuniętego naddatku obróbkowego z przedmiotu obrabianego e jednostce czasu. Najczęściej za jednostkę przyjmuje się [$mm^3 \cdot min^{-1}$]. Jednostka ta, choć archaiczna, jest używana w większości krajów świata. W Europie tylko w Wielkiej Brytanii używa się innych jednostek do określania wydajności obróbki elektroerozyjnej. Wydajność objętościową EDM oblicza się z wzoru (1):

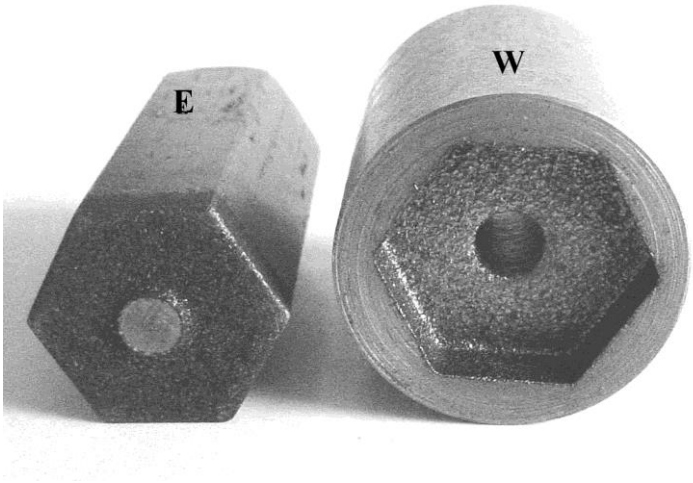
$$V_W = \frac{m_{wp} - m_{wk}}{\rho_W \cdot \Delta t} \tag{1}$$

Podczas obróbki przedmiotu obrabianego ma miejsce obrabianie elektrody roboczej przez wyładowania elektryczne (obrabianie nie zawsze znaczy ubywanie materiału), które mogą powodować ubywanie materiału elektrody roboczej. Dla sprawdzenia skutków obróbki powstałych na elektrodzie roboczej wyznaczamy wartość względnego objętościowego współczynnika zużycia elektrody roboczej wg wzoru (2):

$$\vartheta = \frac{V_E}{V_W} \tag{2}$$

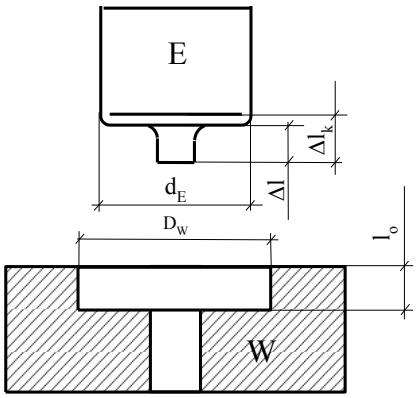
Wydajność objętościową erodowania elektrody roboczej, podobnie jak dla przedmiotu obrabianego wyznacza się z wzoru (3)

$$V_E = \frac{m_{Ep} - m_{Ek}}{\rho_E \cdot \Delta t} \tag{3}$$



Rys.5. Fotografia elektrody roboczej E oraz przedmiotu obrabianego W.

Stan przedmiotów po obróbce dokonanej podczas ćwiczenia. Skutki obróbki widoczne na przedmiocie obrabianym W - (wgłębienie) oraz na elektrodzie E – zużycie elektrody od strony powierzchni czołowej.



Rys.6. Schemat zużycia elektrody roboczej E oraz przedmiotu obrabianego W.
Zaznaczono wielkości, których wartości należy zmierzyć w celu wyznaczenia wartości współczynników zużycia elektrody

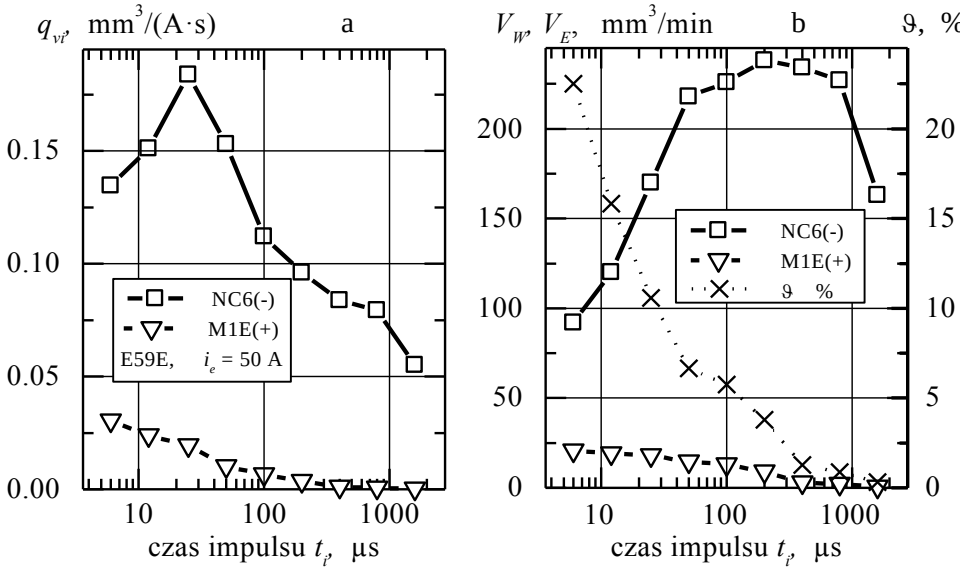
Na fotografii (rys.5) pokazano skutki obróbki elektroerozyjnej widoczne na elektrodzie i przedmiocie obrabianym. Warunki obróbki zostały tak dobrane, aby skutki EDM były łatwo mierzalne.

Wartość współczynnika liniowego zużycia elektrody roboczej wyznacza się z wzoru (4) po zmierzeniu wartości przedstawionych na (rys.6)

$$\vartheta_l = \frac{\Delta l}{l_o} \tag{4}$$

Wartość współczynnika kształtowego zużycia elektrody roboczej wyznacza się z wzoru (5) po zmierzeniu wartości przedstawionych na (rys.6)

$$\vartheta_{lk} = \frac{\Delta l_k}{l_o} \tag{5}$$



Rys.7. Zależność wybranych wskaźników technologicznych przy obróbce elektroerozyjnej stali NC6(-) elektrodą wykonaną z miedzi M1E(+) od czasu impulsu. Warunki obróbki: obrabiarka E59E, i_e = 50 A, CD – nafta kosmetyczna

We wzorach (4) i (5) przedstawione na (rys.6) wielkości przyjęto nazywać:

l_o – głębokość wykonanego (wydrążonego, wyerodowanego) wgłębienia lub otworu,

Δl – ubytek długości elektrody roboczej, skrócenie elektrody

Δl_k – długość czynnej części elektrody, na

Grubość bocznej szczeliny międzyelektrodowej, posługując się schematem przedstawionym na (rys.6) obliczamy z zależności (6):

$$S_B = \frac{D_W - d_E}{2} \tag{6}$$

Przedstawione na (rys.7) zależności wybranych wskaźników technologicznych od nastawionego czasu impulsu wskazują, jak istotny wpływ ma czas wyładowania na kształtowanie się wydajności objętościowej EDM i zużycia elektrody roboczej. Użyto wyżej wymiennie określenia

„czas impulsu” oraz „czas wyładowania”. Taka wymienność jest uzasadniona tym, że obrabiarka E56E wyposażona była w generator tranzystorowy izoenergetyczny, zatem nastawiona wartość czasu impulsu była równa, przynajmniej w założeniu, wartości czasu wyładowania impulsowego. Zależności graficzne przedstawione na (rys.7) pozwalają na wyjaśnienie zasadniczej różnicy pomiędzy generatorem izoenergetycznym i izoczęstotliwościowym. Zależność objętościowego zużycia elektrody ϑ[%] wyrażona w procentach wartości V_W, wskazuje, że dla małej wartości czasu wyładowania impulsowego zużycie elektrody roboczej przyjmuje znacznie większe wartości niż dla dużych wartości nastawionego czasu impulsu. Przykładowo, dla czasu impulsu $t_i = 10$ µs zużycie elektrody wynosi około 17 %, podczas gdy dla czasu impulsu $t_i = 1000$ µs zużycie elektrody wynosi poniżej 1 %. Podczas stosowania generatora izoczęstotliwościowego czas wyładowania impulsowego zmienia się w sposób niekontrolowany, zależnie od stanu szczeliny międzyelektrodowej. Jeżeli nastawimy czas impulsu np. $t_i = 1000$ µs to możemy w realizacji w szczelinie międzyelektrodowej oczekiwać wyładowań elektrycznych, których wartość czasu będzie zawarta w granicach od zera do nastawionej wartości 1000 µs. Zatem w pojedynczych wyładowaniach wystąpi różne zużycie elektrody roboczej. Wynikowa wartość zużycia elektrody będzie większa dla generatora izoczęstotliwościowego niż dla izoenergetycznego i będzie zależała od stanu szczeliny międzyelektrodowej.

Warstwa wierzchnia po obróbce elektroerozyjnej

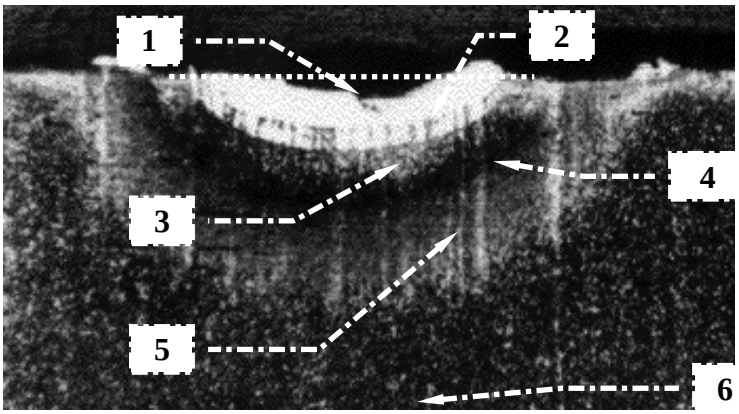
Stan warstwy wierzchniej wytwarzanych części ma niekwestionowany wpływ na ich właściwości eksploatacyjne. Warstwa wierzchnia (WW) przedmiotów kształtowanych w drodze obróbki elektroerozyjnej w znakomitej większości przypadków posiada wymagane właściwości, określone przez konstruktora w procesie projektowania wyrobów. EDM jest metodą technologiczną, w której naddatek obróbkowy jest usuwany na skutek jego topnienia i sublimacji. Zmiana stanu materiału obrabianego nawet w niewielkiej objętości, na skutek procesów transportu energii i masy w strefie obróbki w materiale obrabianym, odciska swoje piętno w określonym obszarze przedmiotu obrobionego. WW przedmiotów obrobionych elektroerozyjnie oprócz typowych parametrów, takich jak chropowatość, falistość czy stan naprężeń, na skutek rozprzestrzeniającego

się pola temperatury może zawierać warstwę materiału stopionego i powtórnie zestalonego. Warstwa ta może posiadać pożądane przez konstruktora właściwości, takie jak zwiększona twardość czy odporność na ścieranie, ale może także być siedliskiem mikropęknięć, które mogą być wynikiem specyficznych warunków fizycznych i chemicznych występujących w EDM. Wartości parametrów określających stan WW są związane z parametrami obróbki stosowanymi w danej operacji. Wpływ parametrów EDM na wartości wskaźników określających stan WW po obróbce elektroerozyjnej był przedmiotem szerokich badań. Wyniki tych badań pozwalają na określenie wpływu warunków obróbki elektroerozyjnej na kształtowanie się grubości warstwy zmienionej, wartości i głębokości zalegania naprężeń oraz zmiany mikrotwardości przy obróbce stali narzędziowej NC6 i węglików spiekanych stosowanych na narzędzia do obróbki plastycznej.

Szczególnie podczas EDM węglików spiekanych obserwuje się oprócz warstwy zmienionej także mikroszczeliny w WW. Do badań były wykonywane elektrody z miedzi, spieku wolfram - miedź, z miedziografitu i z grafitu. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, iż podczas obróbki węglików spiekanych G20 elektrodą z miedzi o średnicy 15 mm z otworem do przepłukiwania szczeliny międzyelektrodowej o średnicy 3 mm, głębokość mikroszczelin zwiększa się od 5 µm dla natężenia prądu 3.3 A i czasu impulsu 6 µs do 800 µm dla natężenia prądu 120 A i czasu impulsu 1400 µs. Przy nastawionej wartości czasu impulsu około 75 µs dla natężenia prądu 3.3 A głębokość rys (mikroszczelin) wynosi około 20 µm, a przy natężeniu prądu 120 A, wynosi ona około 100 µm. Mikrotwardość *HV* 0.05 w WW węglików spiekanych G40 obrabianych przy wykorzystaniu elektrody miedzianej wzrasta o około 50% od wartości 10 kN/mm^2 dla materiału rodzimego do około 15 kN/mm^2 na granicy strefy wpływu źródła ciepła i materiału rodzimego. W wyniku badania wpływu elektrycznych warunków na stan WW badacze stwierdzają, iż WW węglików spiekanych po EDM zawiera liczne pęcherze gazu i mikropęknięcia. Uważają, że mikrotwardość wzrasta po obróbce elektroerozyjnej o około 100%, zaś wartość mikrotwardości zależy od odległości od powierzchni obrobionej i energii impulsu.

Podczas obróbki elektroerozyjnej stali z wykorzystaniem wyładowań elektrycznych w ciekłym ośrodku dielektrycznym, na elektrodach powstają kratery, w których zalega stopiony i powtórnie zastygły metal. Objętość powtórnie zastygłego metalu zalegającego w

kraterze erozyjnym zależy od wartości energii wydzielonej w impulsie oraz od warunków hydrodynamicznych w szczelinie międzyelektrodowej w czasie wyładowania elektrycznego.



Rys.5. Fotografia zgładu metalograficznego próbki ze stali NC6 zawierającej krater erozyjny.

Kształt kraterów erozyjnych zbliżony jest do czaszy kuli. Badania wykazują, że z kraterem erozyjnym mogą być związane niżej wymienione strefy:

1. Obszar zawarty pomiędzy dnem krateru a linią przerywaną, oznaczony „1” reprezentuje krater erozyjny, z którego został usunięty materiał w wyniku zachodzenia zjawisk związanych z wyładowaniem elektrycznym.
2. Strefa „biała” oznaczona jako „2” obejmuje metal stopiony przez działanie energii dostarczonej do obszaru wyładowania elektrycznego. Roztopiony metal nie został całkowicie usunięty z krateru w czasie działania wyładowania elektrycznego, a po zakończeniu impulsu, zastygł w kraterze.
3. Strefa oznaczona jako „3” posiada strukturę o budowie pasmowej, można w niej wyróżnić pasma martenzytu gruboziarnistego, na tle której znajdują się wydzielone węgliki.
4. Strefa oznaczona jako „4” zawiera martenzyt gruboziarnisty na tle austenitu szczątkowego.

5. „Strefa ciemna” oznaczona jako „5” zawiera strukturę sorbityczną z licznymi węglikami pierwotnymi i wtórnymi. W tej strefie wystąpiło wysokie i średnie odpuszczanie.
6. Strefa oznaczona jako „6” posiada strukturę odpuszczonego nartenzytu z licznymi węglikami.

Opisane strefy towarzyszące kraterowi erozyjnemu powstały prawdopodobnie na skutek działania energii zgromadzonej w roztopionym i powtórnie zastygłym materiale. W zależności od stosowanych warunków obróbki grubość warstwy zmienionej stali narzędziowej w wyniku działania wyładowań elektrycznych wynosi od kilku mikrometrów do kilku dziesiątych milimetra przy zgrubnych warunkach obróbki. Celem obróbki jest uzyskanie warstwy wierzchniej o określonych właściwościach. Dlatego stosuje się różne sposoby jej modyfikacji.

Stosując prasowane elektrody proszkowe EDM wykorzystuje się w celu uzyskania efektu stopowania WW przedmiotu obrabianego. Doświadczenia prowadzono dla dwu wartości natężeniu prądu w impulsie $i_e = 16$ A, $t_i = 200$ µs, oraz $i_e = 6$ A i $t_i = 3.2$ µs. W obu przypadkach stosowano biegunowość elektroda robocza (-), przedmiot obrabiany (+). Stopowanie WW stosuje się z dwu powodów. W celu zwiększenia twardości WW stosuje się elektrody z proszku wolframu lub chromu. W przypadku redukcji mikropęknięć stosuje się elektrody z proszków krzemu, żelaza, kobaltu lub manganu. Elektrody prasowano z proszków metali pod ciśnieniem 200 do 400 MPa. Uzyskiwały one gęstość 60% do 80% gęstości metalu. Autorzy stosowali także EDM w zawiesinie mikroproszku w cieczy dielektrycznej. Taka metoda także przynosi oczekiwane skutki.

LITERATURA

1. Albiński K., Miernikiewicz A., Ruszaj A., Zimny J.: Laboratorium obróbki erozyjnej. PWN, Warszawa 1980.
2. Albiński K., Musioł K., Miernikiewicz A., Łabuz S., Małota, M.: Plasma Temperature in Electrical Discharge Machining. Plasma Sources Science and Technology. *Institute of Physics Publishing Techno House,* Bristol, 5.1996, 736-742.

3. Cyklis J., Miernikiewicz A., Szymczak A.: Problemy regulacji szczeliny międzyelektrodowej. *Mechanik* Nr 3/78, 129-132.
4. Delpretti R., Pereira A.: Controlling short circuits in EDM. *Proc. ISEM - XI,* Lousanne, 1995, 295-303.
5. Forster Eric O.: Progress in the understanding of electrical breakdown in condensed matter. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 23 1990, 1506-1514.
6. Ikai T., Hashiguchi K.: Heat imput for crater formation in EDM *Proc. ISEM - XI,* Lousanne, 1995, 163-170.
7. Kesajev I. G.: Katodnye processy elektriceskoj dugi. *Nauka,* Moskva 1968.
8. Klocke F.: The Process Sequence in Tool - and Diemaking. *Proc. ISEM - XII,* Aachen, 1998, 65-97.
9. Klocke F., Karden A.: Electrochemical Finishing for Manufacture of Dies and Moulds. *Proc. ISEM - XII,* Aachen, 1998, 375-385.
10. Kobayashi K.: The present and future developments of EDM and ECM. *Proc. ISEM - XI,* Lousanne, 1995, 29-47.
11. Kruth J. P., Tönshoff H. K., Klocke F.: Surface and Sub-Surface Quality in Material Removal Processes for Tool Making. *Proc. ISEM - XII,* Aachen, 1998, 33-64.
12. Kruth J. P., Froyen R., Stevens L., Dejonghe P.: In-process alloying of the white layer of a workpiece machined by die-sinking EDM. *International Journal of Electrical Machining,* No 3, Tokyo, 1998, 33-38.
13. Kryza J., Miernikiewicz A., Szymczak A.: Badania nad pewnym elektrohydraulicznym układem sterowania. *Czasopismo Techniczne, Kraków,* Zeszyt 6 i 8 -M, 1978.
14. Miernikiewicz A.: Rozpoznawcze pomiary temperatury w plazmowym kanale impulsowego wyładowania elektrycznego w warunkach EDM., *Konferencja Naukowa EM '90,* Bydgoszcz, 1990, 126-135.
15. Miernikiewicz A.: Doświadczalno-teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM). Politechnika Krakowska, Seria Mechanika, Monografia 274, Kraków 2000.
16. Miernikiewicz A.: Instrukcje do ćwiczenia Obróbka Elektroerozyjna.
17. Miernikiewicz A.: Plazmowy kanał wyładowania elektrycznego źródłem informacji o procesie obróbki elektroerozyjnej (EDM). *V Konferencja Naukowo-Techniczna EM' 97,* Bydgoszcz - Golub Dobrzyń, 1997, 244-251.
18. Miernikiewicz A.: New hypothesis on the electro-erosion process mechanism in Electro-Discharge Machining. 1st International Conference on Machining and Measurements of Sculptured Surfaces, *IOS Kraków,* 1997, 265-270.
19. Miernikiewicz A.: Wydajność energetyczna procesu obróbki elektroerozyjnej wgłębnej. PAN, KBM , Sekcja Podstaw Technologii, *SNOE,* Zeszyt nr 4, Warszawa, 1998, 27-48.
20. Miernikiewicz A.: Opracowanie i badanie zmodyfikowanych impulsów napięcia i natężenia prądu umożliwiających podwyższenie sprawności

obróbki elektroerozyjnej. KBN, *Zespół Mechaniki, Budownictwa i Architektury, Sekcja technologii, automatyzacji maszyn i produkcji*, Radom, 1998, 153-157

21. Miernikiewicz A.: Power density of an electric discharge under EDM conditions. PAN, *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*, Vol 23 1/99, 69-80.
22. Miernikiewicz A.: Obróbka elektroerozyjna (EDM) węglików spiekanych kształtowanymi impulsami mocy. *MECHANIK*, 2/99, 67-70.
23. Notatki z wykładów. : Obróbka Erozyjna, Obróbka Skrawaniem i Erozyjna, Technologia Elektroerozyjna, Technologie Strumieniowe i Erozyjne, Technologia maszyn II.
24. Polański Z.: Badania warstwy wierzchniej wybranych materiałów stosowanych na narzędzia do obróbki plastycznej na zimno kształtowane za pomocą drążenia elektroiskrowego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej*, nr 8, 1968.
25. Polański Z.: Metodyka badan doświadczalnych. Kraków, 1978.
26. Rajurkar K. P., Wei B., Kozak J., Nooka S. R.: Abrasive elektrodischarge grinding of advanced materials. *Proc. ISEM - XI*, Lousanne, 1995, 863-869.
27. Weck M., Dehmer J. M.: Analysis and Adaptive Control of EDM Sinking Process Using the Ignition Delay Time and Fall Time as Parameter. *Annals of the CIRP*, Vol. 41/1/1992, 243-246.
28. Wälder G.: New Technologies add EDM. *Proc. ISEM - XII*, Aachen, 1998, 331-340.
29. Siwczyk M. : Obróbka elektroerozyjna. WNT, Warszawa 1981.