



Organizator:
Politechnika Warszawska
Instytut Techniki Wytwarzania

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

Szkoła Naukowa Obróbek Erozyjnych

SNOE

Artykuły naukowe z 2014 r.

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

Wpływ parametrów obróbki elektroerozyjnej na właściwości użytkowe stali o wysokiej przewodności cieplnej

Influence of EDM parameters on the functional properties of the steel with a high thermal conductivity

Rafał Świercz*
Dorota Oniszczyk-Świercz*

W artykule przedstawiono wpływ podstawowych parametrów obróbki EDM (tj. czasu impulsu wyładowania t_{on} i natężenia prądu I w impulsie) na wydajność procesu usuwania materiału, oraz wybrane parametry profilu chropowatości. Obróbka poddano materiał o wysokiej przewodności cieplnej elektrodami cienkościennymi.

SŁOWA KLUCZOWE: EDM, wydajność obróbki, chropowatość,

The paper presents experimental investigation of EDM parameters (current I and discharge time t_{on}) on material removal rate and parameters of roughness profile. In experiment processed material with high thermal conductivity with thin walled electrodes.

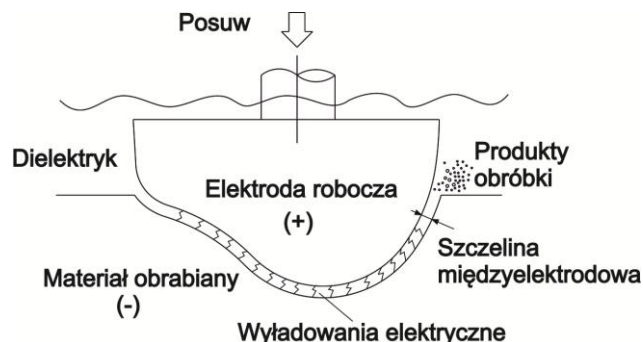
KEYWORDS: EDM, material removal rate, roughness,

Wstęp

Rozwój inżynierii materiałowej prowadzi do powstawania nowych stopów charakteryzujących się szczególnymi właściwościami, np. wysoką twardością, wytrzymałością, żaroodpornością, które są dostosowane do przewidzianych gałęzi przemysłu. Podstawowym problemem ich wprowadzania na rynek jest trudność w ich kształtowaniu przy użyciu tradycyjnych metod obróbki.

W przypadku obróbki elementów o skomplikowanych kształtach materiałów trudnoskrawalnych, obróbka elektroerozyjna Electrical Discharge Machining (EDM) jest podstawową techniką wytwarzania części np. form wtryskowych, matryc kuźniczych jak również części lotniczych. Proces EDM polega na usunięciu materiału z przedmiotu obrabianego wskutek wyładowań elektrycznych zachodzących pomiędzy materiałem obrabianym a elektrodą roboczą, które zanurzone są w cieczy dielektrycznej (rys. 1). Elektro-

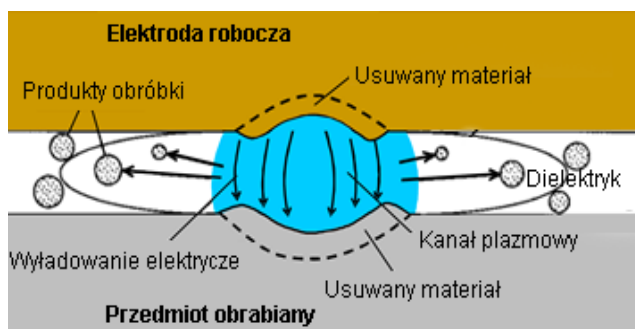
dy mogą być wykonane z metali i ich stopów, grafitu, półprzewodników, ceramiki, kompozytów itp., których przewodność elektryczna nie jest mniejsza niż 10^{-2} S/cm. W przypadku obróbki elektroerozyjnej wgłębnej elektroda robocza występuje w postaci bryły i w najprostszej odmianie odwzorowuje oczekiwany kształt przedmiotu po obróbce.



Rys. 1. Schemat procesu drążenia elektroerozyjnego

Wyładowanie elektryczne powstaje zwykle w miejscu, gdzie na powierzchni elektrod występują największe mikronierówności lub w miejscu, w którym występuje największa koncentracja produktów erozji (które obniżają wytrzymałość elektryczną ośrodka). Natężenie pola elektrycznego jest odwrotnie proporcjonalne do odległości między elektrodami. Jego wartość jest największa w miejscu, w którym szczelina jest najmniejsza [9,10].

Mechanizm usuwania materiału w procesie EDM jest przedmiotem badań wielu naukowców. Według Snoeysa [10] wraz ze wzrostem czasu wyładowania elektrycznego następuje wzrost średnicy kanału plazmowego, której odpowiada średnica powstałego krateru (rys. 2) (jest ona kilkakrotnie większa od wielkości szczeliny międzyelektrodowej).



Rys. 2. Schemat procesu usuwania materiału [9]

Temperatura wewnątrz kanału plazmowego szacowana jest na wartość od 8 000 do 12 000 °C [9], a według Snoyesa [10] może osiągać wartość 20 000 °C, przewyższa zatem temperaturę topnienia i wrzenia elektrod. Proces usuwania materiału z obrabianej powierzchni jest całkowicie odmienny w stosunku do tradycyjnych metod obróbkowych. Objętość usuwanego materiału w trakcie pojedynczego wyładowania mieści się w przedziale od 10^{-6} do 10^{-4} mm³, wydajność usuwania materiału zazwyczaj mieści się w przedziale 2 do 400 mm³/min w zależności od rodzaju obróbki (wykańczająca, zgrubna) [5].

Złożoność zjawisk fizycznych procesu drążenia elektroerozyjnego i jego warunków powodują znaczne trudności w opisie i identyfikacji wpływu poszczególnych parametrów obróbki, na jakość obrabianej powierzchni. Stan warstwy wierzchniej jest jednym z podstawowych zagadnień adaptacji obróbki elektroerozyjnej w wytwarzaniu gniazd form wtryskowych, części do przemysłu medycznego czy też lotniczego. Struktura geometryczna powierzchni po obróbce elektroerozyjnej powstaje w wyniku nakładania się śladów pojedynczych wyładowań elektrycznych. Kształt i głębokość poszczególnych kraterów zależą w głównej mierze od charakteru impulsów elektrycznych (zastosowanych parametrów obróbki) tj. natężenia prądu, czasu impulsu, czasu przerwy, napięcia wyładowania. Wzrost natężenia prądu powoduje wzrost ilości erodowanego materiału w trakcie pojedynczego wyładowania. Czas impulsu decyduje o ilości energii cieplnej dostarczonej do materiału obrabianego i również istotnie wpływa na ilość erodowanego materiału [2, 3, 4, 6, 7, 8].

Obróbka elektroerozyjna charakteryzuje się oddziaływaniem gwałtownych lokalnych procesów termicznych, w wyniku których, w warstwie wierzchniej powstają przemiany fazowe. Na podstawie badań własnych obróbki stali 1.2713 (WNL) obrabianej cieplnie do twardości 50 HRC stwierdzono występowanie trzech charakterystycznych podwarstw (rys. 3):

- zewnętrznej przetopionej (zwanej potocznie warstwą białą o obniżonej twardości w stosunku do materiału rdzenia),
- strefy wpływów cieplnych (HAZ - Heat Affected Zone), jest ona widoczna w postaci jasnej struktury położonej bezpośrednio pod warstwą przetopioną, warstwa ta posiada elementy struktury ukierunkowane wzdłuż kierunku odprowadzania ciepła (prostopadle do obrabianej powierzchni),
- odpuszczonej, występującej w postaci ciemnej smugi.



Rys. 3. Zdjęcie zglądu metalograficznego - mikrostruktura powierzchni po obróbce elektroerozyjnej

Warstwa biała powstaje wskutek roztopienia i gwałtownego krzepnięcia cienkiej warstwy metalu na powierzchni krateru. O wysokiej szybkości chłodzenia świadczy uchwycona część materiału (rys. 1), która roztopiona i „wyrzucona” w procesie erozji z krateru wyładowania nie rozłożyła się równomiernie na powierzchni materiału. Kierunek rozprzestrzeniania się struktur (prostopadły do materiału rdzenia) jest wynikiem szybkiego chłodzenia tych stref (około 10^6 K/s). Pod warstwą białą znajduje się strefa wpływów ciepła, o podwyższonej twardości w stosunku do materiału rdzenia. Zbudowana jest z martenzytu listkowego i austenitu szcążkowego. Otrzymana struktura powstaje w wyniku dyfuzji węgla z pirolizy nafty i gwałtownego odprowadzania ciepła. Pod warstwą HAZ znajduje się strefa odpuszczona.

Warstwa odpuszczona powstaje wskutek oddziaływania energii cieplnej wyładowania elektrycznego (ogrzania tej strefy materiału) a następnie chłodzenia przez odprowadzanie ciepła do materiału rodzimego.

W wyniku oddziaływań procesów termicznych zachodzących podczas obróbki EDM, w WW powstają mikropęknięcia. Przyczyną ich powstania są naprężenia cieplne, wytworzone na skutek oddziaływań efektów termicznych wyładowania elektrycznego. Roztopiony materiał jest „wyrzucany” z kanału plazmowego, przy czym pozostaje cienka warstwa roztopionego metalu na powierzchni rdzenia materiału o znacznie niższej temperaturze. W wyniku chłodzenia i krzepnięcia roztopionej warstwy powstaje skurcz, któremu przeciwdziała materiał rdzenia, a w konsekwencji generowane są naprężenia rozciągające. Przekroczenie dopuszczalnej wytrzymałości na rozciąganie materiału, jest zatem podstawą tworzenia mikropęknięć (rys. 4). Mikropęknięcia są efektem niepożądanym, powodującym między innymi: zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej oraz odporności na korozję.



Rys. 4. Zdjęcie zglądu metalograficznego przedstawiające mikropęknięcia w warstwie białej

Poszukiwane są rozwiązania, pozwalające na sterowanie procesem obróbki elektroerozyjnej, w taki sposób, aby wyeliminować lub też ograniczyć do niezbędnego minimum

zastosowanie dodatkowych operacji technologicznych w celu uzyskania zakładanego stanu warstwy wierzchniej. Badania procesu erozji elektrycznej prowadzone w ośrodkach na całym świecie ukierunkowane są w głównej mierze na wzrost efektywności obróbki, przy zapewnieniu określonego stanu WW, zmniejszeniu zużycia elektrody roboczej. Istotną z punktu widzenia możliwości adaptacji dostępnych wyników badań naukowych na temat wpływu poszczególnych parametrów i warunków obróbki na stan warstwy wierzchniej czy wydajność procesu jest informacja, iż w większości badania prowadzone są na obrabiarkach laboratoryjnych nie produkcyjnych

Badania własne wykazują [1,8], iż w przypadku realizacji badań na obrabiarkach produkcyjnych mogą występować istotne różnice w wartościach nastawianych w stosunku do rzeczywistych wartości zmierzonych. Prowadzi to do budowy matematycznych modeli wpływu określonych parametrów obróbki na czynniki wynikowe, które adekwatne będą wyłącznie dla badanego obiektu, a tym samym nie mogą być uogólnione na inne typy obrabiarek elektroerozyjnych.

Dotychczasowe rozwiązania implementowane w obrabiarkach elektroerozyjnych bazują na dostarczonych przez producenta obrabiarek tablicach technologicznych zawierających podstawowy dobór parametrów obróbki stali w zależności od pożądanej chropowatości powierzchni (opisywanej wartością parametru chropowatości Ra) i wydajności usuwania materiału.

Przeprowadzona analiza literaturowa wykazuje, iż obszar dotychczasowych zainteresowań naukowców obejmuje analizę możliwości obróbki szerokiego spektrum materiałów (węgliki spiekane, stale narzędziowe, superstopy, itp.), przy czym powstawanie coraz to nowszych materiałów specjalizowanych do poszczególnych gałęzi przemysłu, np. o wysokiej przewodności cieplnej jest nowym obszarem badawczym nieomawianym w dostępnej literaturze. Brak jest zatem specjalizowanych tablic technologicznych uwzględniających optymalny dobór parametrów i warunków obróbki EDM materiałów o wysokiej przewodności cieplnej znajdujących zastosowanie w przemyśle przetwórstwa tworzyw sztucznych (nowoczesne materiały stosowane na formy wtryskowe). W artykule uwaga skupiona będzie na nowych materiałach wykorzystywanych w produkcji form wtryskowych (stal narzędziowa HTCS). Materiał ten w porównaniu do dotychczasowo stosowanych charakteryzuje się wysokim przewodnictwem cieplnym (do 60 W/m K) i wysoką wytrzymałością, co istotnie wpływa na trwałość form wtryskowych.

Cel i warunki badań

Przedstawiony powyżej proces obróbki elektroerozyjnej charakteryzuje się złożonością zarówno wynikającą z samej fizyki usuwania materiału, jak i warunków obróbki wpływających na jego stabilność np. sposób odprowadzanie produktów obróbki ze szczeliny międzyelektrodowej. Szczególnie trudnymi warunkami wydają się zagadnienia związane z drażeniem elektroerozyjnym elektrodami cienkościennymi o wysokim stosunku długości elektrody do jej grubości. Warunki obróbki w zanurzeniu (bez dodatkowego wymuszonego przepływu „świeżego” dielektryka do szczeliny wypływającego cząsteczki wyerodowanego materiału) wymuszają stosowanie dodatkowych ruchów głowicy z elektrodą (oscylacyjnych) zwiększających grubość szczeliny podczas drażenia. Prowadzi to do zwiększenia czasu obróbki. Występowanie cząsteczek wyerodowanego materiału w szczelinie może również prowadzić do lokalnego zwiększenia ilości wyładowań elektrycznych spowodowanych obniżeniem oporności dielektryka. Skutkuje to zwiększeniem zużycia elektrody roboczej jak i zwiększeniem

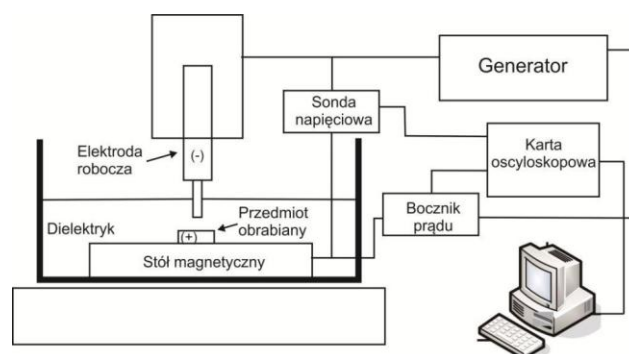
rozbitości szczeliny międzyelektrodowej prowadzących do istotnych odchyłek kształtu drażonej geometrii.

Celem badań było wyznaczenie wpływu podstawowych parametrów warunkujących proces usuwania materiału tj. czasu impulsu wyładowania t_{on} i natężenia prądu I w impulsie na wydajność procesu usuwania materiału obrabianego oraz wybrane parametry chropowatości profilu. Obróbki dokonano elektrodami cienkościennymi o wysokiej przewodności cieplnej.

Metodyka badań

Podstawą doboru poszczególnych wartości zmiennych niezależnych w prowadzonych badaniach doświadczalnych było wyznaczenie ich rzeczywistych wartości i określenie możliwych do ustawienia przedziałów zmienności dla przyjętego rodzaju eksperymentu planowanego.

Badania realizowano na obrabiarce elektroerozyjnej Charmilles Form 2LC ZNC. Opracowano tor pomiarowy (rys. 5), który pozwolił na wyznaczenie charakterystyki generatora obrabiarki.

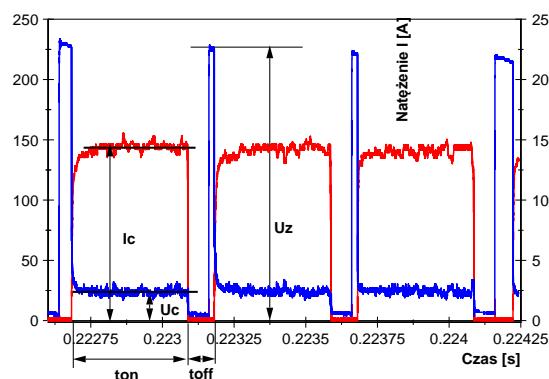


Rys. 5. Schemat opracowanego toru pomiarowego

Opracowany tor pomiarowy umożliwiał rejestrację rzeczywistych przebiegów prądu i napięcia elektrycznego w warunkach ciągłej obróbki elektroerozyjnej EDM.

Przykładowe impulsy zarejestrowane dla generatora izoenergetycznego przedstawiono na rysunku 6. Obróbka przedmiotu następuje w momencie spadku napięcia zasilania U_z do napięcia wyładowania U_c i wzrostu natężenia prądu wyładowania I_c , w czasie impulsu t_{on} . Następnie w czasie przerwy t_{off} następuje stabilizacja warunków w szczeliny międzyelektrodowej i proces powtarza cyklicznie.

a)



Rys. 6. Przebiegi napięcia i natężenia prądu dla parametrów: napięcie robocze $U_c = 25$ V, napięcie zasilania $U_z = 230$ V, natężenie prądu $I_c = 14,3$ A,

Napięcie wyładowania U_c ma decydujący wpływ na zjawisko jonizowania kanału, przez który płynie prąd. Dla wyższego napięcia wyładowania możliwe jest ustawienie wyższej wartości szczeliny międzyelektrodowej, a tym samym ułatwienie jej płukania i odprowadzania produktów

przez dielektryk. Wzrost napięcia wyładowania powoduje jednocześnie wzrost chropowatości powierzchni i wydajności usuwania materiału.

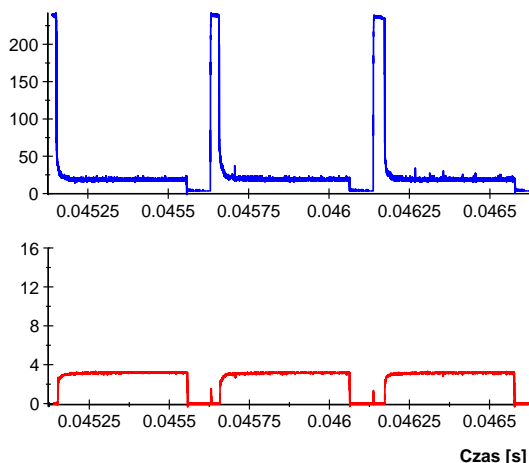
Natężenie wyładowania I_c wpływa bezpośrednio na ilość erodowanego materiału. Maksymalne wartości natężenia prądu stosowane są dla obróbki zgrubnej tak, aby zapewnić odpowiednią wydajność procesu.

Czas impulsu t_{on} w powiązaniu z natężeniem prądu decyduje o ilości energii cieplnej dostarczonej do materiału obrabianego. Wraz ze wzrostem czasu impulsu i natężenia prądu zwiększa się zarówno średnica jak i głębokość kraterów powstałych w wyniku wyładowania elektrycznego. Czas przerwy t_{off} odpowiada za stabilizację warunków w szczeliny międzyelektrodowej (odprowadzenie produktów obróbki, dejonizację kanału wyładowania).

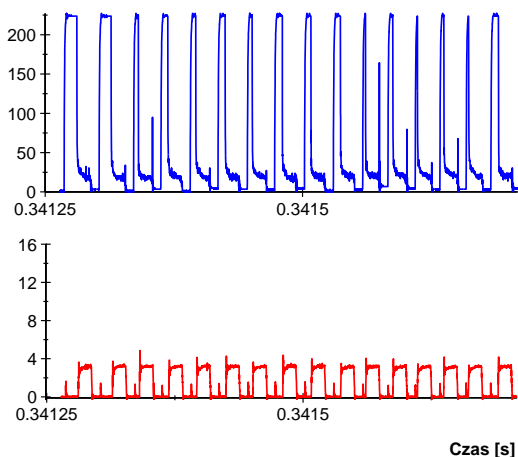
Dotychczas prowadzone badania pozwoliły na wyznaczeniu stabilnych parametrów obróbki, które realizowane będą w ramach eksperymentu planowanego. Wykonano ponad 100 prób drążenia, dla których rejestrowane były rzeczywiste przebiegi napięcia elektrycznego i natężenia prądu odpowiadające następującym nastawom generatora:

- zmiana amplitudy natężenia prądu w zakresie od 1,7 A do 36 A,
- zmiana czasu impulsu wyładowania w zakresie od 6 do 1200 μ s,
- zmiana czasu przerwy w zakresie 6 do 600 μ s.

Poniżej przedstawiono przykładowe stabilne przebiegi $U(t)$, $I(t)$, które pozwoliły na wyznaczenie zakresu zmienności parametrów wykorzystanych w ramach prowadzonych badań doświadczalnych (rys. 7, 8).



Rys. 7. Przebiegi napięcia i natężenia prądu dla wartości parametrów; napięcie robocze $U_c = 25$ V, natężenie prądu $I = 3,2$ A, czas impulsu $t_{on} = 400$ μ s, czas przerwy $t_{off} = 100$ μ s



Rys. 8. Przebiegi napięcia i natężenia prądu dla wartości parametrów; napięcie robocze, $U_c = 25$ V, natężenie prądu $I = 3,2$ A, czas impulsu $t_{on} = 11$ μ s, czas przerwy $t_{off} = 13$ μ s

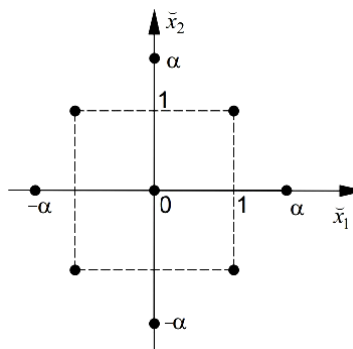
Badania doświadczalne prowadzone były na obrabiarce elektroerozyjnej firmy Charmilles Form 2LC ZNC. Poddano obróbkę EDM elektrodą miedzianą o wymiarach 100 x 1 mm (rys. 9) blok materiału HTCS.



Rys. 9. Elektroda robocza

Badanie bezpośrednie procesów wytwarzania jest skomplikowane, ze względu na ich złożoność wynikającą z zależności od wielu czynników zmiennych. Poszukiwane są zatem uproszczone modele opisujące rzeczywisty obiekt. W artykule wyznaczone będą modele matematyczne procesu obróbki na podstawie zależności statystycznych (analiza regresji) uwzględniających wpływ przyjętych zmiennych wejściowych na wybrane parametry wynikowe

Przeprowadzono badania doświadczalne określające wpływ parametrów energetycznych wyładowania na skutki jakościowe obróbki (wydajność procesu usuwania materiału, dokładność geometryczną kształtu, wybrane parametry profilu chropowatości). Badania doświadczalne przeprowadzono według planu ortogonalnego dwupoziomowo gwiazdowego. Schemat planu przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Schemat planu badań doświadczalnych

Warunki badań:

- polaryzacja prosta,
- zmienne niezależne monitorowane i rejestrowane w trakcie procesu : amplituda natężenia prądu I w impulsie (16 – 40 A), czas impulsu t_{on} (200 - 1600 μ s), czas przerwy między impulsami t_{off} , przyjęto jako współczynnik wyplenienia impulsu 0,3
- dielektryk: nafta,
- głębokość drążenia: 5 mm.

Badane parametry wynikowe:

- parametry profilu chropowatości: Ra – średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych profilu, Rsm - średnia szerokość rowków elementów profilu,
- czas obróbki t ,

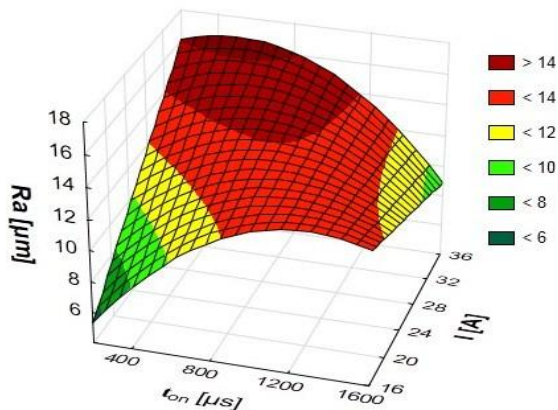
Na podstawie uzyskanych wyników z przeprowadzonych badań doświadczalnych opracowano statystyczne modele matematyczne opisujące wpływ wybranych parametrów obróbki na strukturę geometryczną powierzchni i czas obróbki. Wyznaczono równania regresji opisane funkcją wielomianu stopnia drugiego w programie STATISTICA. Dla każdego równania określono współczynnik korelacji R , odzwierciedlający zmienność badanej cechy. Istotność otrzymanego współczynnika korelacji (jego adekwatność na poziomie istotności $\alpha = 0.05$) sprawdzano testem Fishera – Snedecora (dla $F/F_{kr} > 1$ współczynnik R jest istotny). Dokonano również weryfikacji istotności współczynników równania regresji za pomocą testu t-Studenta. Na jego podstawie wnioskuje się o istotności bądź nieistotności wpływu konkretnego członu równania regresji (na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ spełnia warunek: $t_1, t_n, t_{n+1} > t_{kr}$). Wybrane zależności regresyjne przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Równania regresji

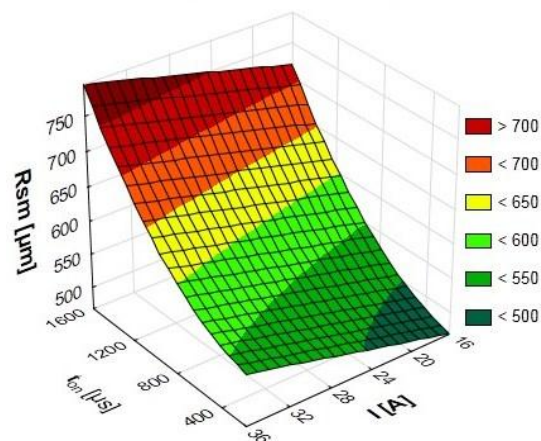
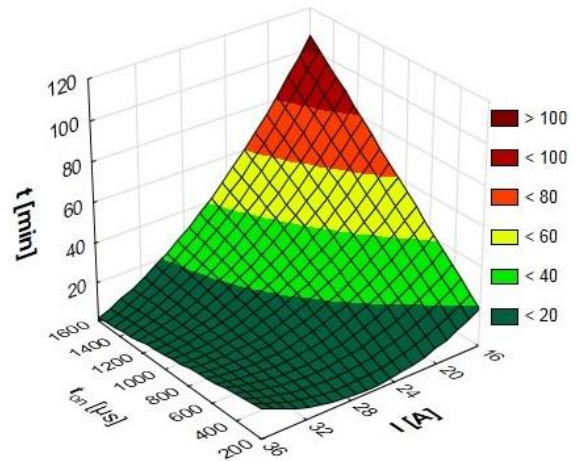
| Materiał elektrody miedź M1E | R | F/F_{kr} |
|---|------|------------|
| $T = 85,7 + 0,12 t_{on} - 7,38 I + 0,15 I^2 - 0,0036 I t_{on}$ | 0,98 | 4,1 |
| $Rsm = 402,7 + 0,0001 t_{on}^2 + 3,8 I$ | 0,95 | 5,45 |
| $Ra = - 8,2 + 0,025 t_{on} + 0,64 I - 0,00001 t_{on}^2 + 0,0005 t_{on} I$ | 0,89 | 3,25 |

Uzyskane równania charakteryzują się wysokim stopniem korelacji R , a stosunek F/F_{kr} jest znacząco większy od jedności. Graficzna prezentacja uzyskanych zależności przedstawiona jest na rysunkach: 11, 12.

a)



b)

Rys. 11. Zależność parametrów chropowatości profilu a) Ra b) Rsm , od czasu impulsu t_{on} i natężenia prądu I Rys. 12. Zależność czasu obróbki od czasu impulsu t_{on} i natężenia prądu I

Wyznaczone zależności wskazują, iż głównym czynnikiem wpływającym na parametry wysokościowe (Ra) i wzdłużne (Rsm) profilu chropowatości jest energia wyładowania elektrycznego. Wzrostowi natężenia prądu i czasu impulsu odpowiada wzrost ilości usuwanego materiału w pojedynczym impulsie, generując kraterę tworzącą chropowatość powierzchni. Zależność ta nie jest jednak wprost proporcjonalna. Przy najmniejszym czasie impulsu t_{on} i największym natężeniu prądu I powstały kraterki o największej głębokości ($Ra = 16 \mu\text{m}$) i stosunkowo niewielkiej szerokości ($Rsm = 550 \mu\text{m}$). Natomiast dla największego czasu t_{on} zmiana natężenia prądu nie powoduje istotnych zmian w kształcie i głębokości powstałych kraterów. Wyniki badań doświadczalnych potwierdzają gaussowski rozkład gęstości mocy wyładowania elektrycznego. Dla krótkich czasów impulsów większość energii wyładowania elektrycznego wykorzystywana jest na topienie i odparowanie materiału. Wraz ze wzrostem czasu impulsu następuje spłaszczenie kraterów, energia dostarczona do materiału powoduje topienie materiału na większej powierzchni i mniejszej głębokości.

Analiza czasu obróbki wykazuje, iż dostarczenie maksymalnej energii wyładowania do materiału obrabianego nie jest wprost proporcjonalne do wydajności obróbki. Efektywne usuwanie materiału musi być połączone z efektywnym odprowadzaniem produktów obróbki ze szczeliny międzyelektrodowej. Lokalne nagromadzenie produktów obróbki powoduje powstawanie wyładowań łukowych i zwarć, co prowadzi do zwiększenia grubości szczeliny międzyelektrodowej przez układ sterowania obrabiarki. Wydłużony zostaje zatem całkowity cykl związany z stabilizacją warunków obróbki i powstawaniem kolejnych stabilnych wyładowań elektrycznych.

Podsumowanie

Proces monitorowania obróbki służy zazwyczaj do identyfikacji rodzaju występujących impulsów elektrycznych, np. impulsy zwarciove, łukowe, prawidłowe itp. Na ich podstawie opracowywane są algorytmy mające na celu sterowanie adaptacyjne pracą obrabiarki, między innymi ruchem elektrody roboczej (oscylacją) czy też zmianą wartości parametrów obróbki tak, aby jak największa część impulsów elektrycznych efektywnie uczestniczyła w procesie usuwania materiału.

Przeprowadzone badania uwzględniają rzeczywiste zmierzone wartości impulsów elektrycznych, zatem mogą być uogólnione dla obrabiarek elektroerozyjnych, gdzie możliwe jest nastawienie badanych parametrów. Wyniki

przeprowadzonych badań, a w szczególności opracowane statystyczne modele regresji (opisujące wybrane parametry struktury geometrycznej) mogą być podstawą doboru odpowiednich parametrów obróbki w zależności od pożądanych cech topografii powierzchni i wydajności usuwania materiału.

LITERATURA:

- [1] Dąbrowski L., Świercz R.: Struktura metalograficzna powierzchni po obróbce elektroerozyjnej, *Inżynieria Maszyn*, pp. 16-23, 2012.
- [2] Guu Y.H., Ti-Kuang Hou Max: Effect of machining parameters on surface textures in EDM of Fe-Mn-Al alloy, *Materials Science and Engineering A* 466, 61–67, 2007.
- [3] Hu F.Q., Cao F.Y., Song B.Y., Hou P.J., Zhang Y., Chen K., Wei J.Q.: Surface properties of SiCp/Al composite by powder-mixed EDM, *The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), Procedia CIRP* 101 – 106, 2013.
- [4] Jiang Y., Zhao W., Gu L., Kang X.: Monitoring of EDM Gap Discharge Status with Wavelet Transform Method, *ISEM 2010*.
- [5] Klocke F., Schwade M., Klink A. Veselovac D.: Analysis of material removal rate and electrode wear in sinking EDM roughing strategies using different graphite grades, *The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), Procedia CIRP* 6, 164 – 168, 2013.
- [6] Kocher G., Chopra K., Kumar S.: Investigation of Surface integrity of AISI D3 tool steel After EDM, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 2, 2012.
- [7] Nowicki B., Dmowska A., Podolak - Lejtas A.: A new method of investigating crater and flash made by individual discharge using scanning profilometers., *WEAR* 270, 2011, str.121 – 126.
- [8] Oniszczyk D., Świercz R.: Investigation into the impact of electrical pulse character on surface texture in the EDM and WEDM process", *Advances in Manufacturing Science and Technology*, pp. 43 - 53, 2012.
- [9] Schumacher M. Kunieda, B. Lauwers, K. P. Rajurkar, B. M. Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2005.
- [10] SNOEYS R., VAN DIJCK F., *Plasma Channel Diameter Growth Affects Stock Removal in EDM*, 1972.