

Wysokowydajne drążenie elektroerozyjne małych otworów w kompozytach metaliczno-ceramicznych

High-performance Electrical Discharge Machining of small hole in metallic ceramic composites

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu materiału elektrody roboczej na wysokowydajną obróbkę elektroerozyjną. W badaniach uwzględniono dwa czynniki wejściowe: czas impulsu t_{on} oraz zmianę ciśnienia dielektryka p , przy ustalonych pozostałych parametrach obróbki EDM. Obrabiano materiał kompozytowy SiC-Ni o zawartości 20% węgla krzemu, elektrodami rurkowymi jednokanałowymi i wielokanałowymi wykonanymi z mosiądzu i miedzi. Użytkowano wyniki liczbowe szeregu parametrów charakteryzujących powierzchnię obrobioną, które pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących obróbki tego materiału.

Słowa kluczowe: drążenie elektroerozyjne; elektrody rurkowe; materiały kompozytowe; struktura geometryczna powierzchni

Abstract

The paper presents the result of the influence of the working electrode material on high performance Electrical Discharge Machining. In the studies been taken into account two input factors: impulse time t_{on} and pressure change of the dielectric p , at the fixed others parameters of Electrical Discharge Machining. Composite material SiC-Ni with 20% silicon carbide, single-channel and multi-channel tubular electrodes made of brass and copper were machined. Getting the numerical results of parameters characterizing the machined surface, which allowed us to formulate proposals for the machining of these materials.

Keywords: Electrical Discharge Machining; tubular electrodes; composite materials; geometric structure of surface

Wprowadzenie

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 między przedmiotem obrabianym a elektrodą roboczą. Szczelina międzyelektrodowa wypełniona jest cieczą dielektryczną, której zadaniem jest m.in. usunięcie produktów erozji z przestrzeni międzyelektrodowej. Twardość materiału obrabianego nie wpływa na przebieg procesu, a siły występujące między narzędziem a materiałem są znikome. W związku z tym, obróbka elektroerozyjna jest racjonalną alternatywą przy kształtowaniu elementów wykonanych z materiałów trudno obrabialnych klasycznymi metodami tj.: utwardzona stal, węgliki, stopy o wysokiej wytrzymałości, super twarde materiały przewodzące prąd elektryczny (np. materiały kompozytowe na osnowie metalicznej, ceramika) [1÷3]. Obróbka ta umożliwia także drążenie głębokich otworów, gdzie stosunek średnicy do głębokości jest znacznie mniejszy niż 1:10. Podczas wiercenia elektroerozyjnego elektroda robocza pełni funkcję wiertła, wykonując ruch posuwowy oraz obrotowy. Do mikrowiercenia metodą

elektroerozyjną stosowane są elektrody rurkowe (dielektryk jest dostarczany poprzez otwór) [4].

Podczas wiercenia elektroerozyjnego elektrodą w kształcie rurki, zużycie występuje na długości (tzn. następuje skrócenie elektrody) oraz ścianach bocznych [5,6]. W wyniku takiego zużycia elektrody roboczej wywiercony otwór ma kształt stożka. Wysokie zużycie elektrody ma wpływ także a stabilność, dokładność oraz wydajność procesu. Możliwość wiercenia głębokich otworów jest ograniczona jedynie przez gromadzenie na dnie otworu produktów obróbki, co powoduje nieprawidłowe wyładowania, szczególnie gdy otwór jest wiercony głęboko. Również powstające podczas procesu pęcherzyki gazowe, blokujące wpłynięcie dielektryka do obszaru obróbki, mogą ograniczać smukłość otworu [7,8]. Jednak w przypadku wiercenia głębokich mikrootworów w metalu, mikrowiercenie elektroerozyjne stanowi jedną z najbardziej efektywnych metod. W przypadku mikroobrobki elektroerozyjnej możliwe jest uzyskanie mikrokształtów z wysoką dokładnością (mniejszą niż 5 μm) i dobrą jakością powierzchni (z chropowatością R_a mniejszą niż 0,1 μm). Wykonane otwory, przy zastosowaniu mikrowiercenia elektroerozyjnego,

Mgr inż. Łukasz Sosinowski; dr hab. inż. Marek Rozenek, prof. PW – Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: lukasz.sosinowski@wp.pl

mają regularny kształt oraz wysoką dokładność powierzchni bez zadziorów. Jednak parametry obróbki zapewniające powyższe wskaźniki technologiczne, przyczyniają się do niskiej wydajności procesu i znacznego zużycia narzędzia [9].

Do nowoczesnych spiekanych materiałów narzędziowych, o szybko rosnącym znaczeniu w technologii obróbki skrawaniem należą cermetale narzędziowe. Cermetale to materiały kompozytowe spiekane z materiałów ceramicznych i metalowych. Metal jest zwykle spoiwem dla tlenków, borków lub węglików. Używane metale to zwykle nikiel, molibden i kobalt. Cermetale, podobnie jak inne spiekane materiały narzędziowe, np. węgliki spiekane, wytwarzane są metodą metalurgii proszków. Formowanie jest najczęściej przeprowadzane przez jednoosiowe prasowanie, natomiast spiekanie, zależnie od składu chemicznego, przebiega w temperaturze 1400÷1550 °C (z udziałem fazy ciekłej) w piecu próżniowym. W celu polepszenia własności (zmniejszenia porowatości spieku) stosowane jest izostatyczne spiekanie na gorąco HIP (ang. *Hot Isostatic Pressing*). Dla spiekanych cermetali narzędziowych typową jest struktura rdzeniowo-płaszczowa będąca nośnikiem twardości, powodująca, że cermetale są niewrażliwe na rozrost ziaren podczas spiekania, uzyskując w efekcie drobnoziarnistą strukturę [1].

Struktura geometryczna powierzchni jest jednym z ważniejszych czynników decydujących, o jakości uzyskiwanych wyrobów. Wpływa na własności eksploatacyjne elementów maszyn wyrażone m.in. przez warunki tarcia na powierzchniach stykowych, naprężenia stykowe, wytrzymałość zmęczeniową, odporność na korozję, szczelność połączeń, powierzchniowe promieniowanie cieplne czy własności magnetyczne. Strukturę geometryczną powierzchni (SGP) określa się zbiorem wszystkich nierówności, powstałych w wyniku procesów obróbki i zużycia materiału. Przyjmuje się podział (SGP) na składowe: chropowatość powierzchni, falistość powierzchni i odchyłki kształtu. Podział ten oparty jest na proporcjach wysokości i długości fali nierówności. Pierwsza składowa jest uznawana za jeden z najistotniejszych wyróżników stanu warstwy wierzchniej (WW). Czynnikiem ten wpływa na przebieg podstawowych zjawisk tribologicznych elementów współpracujących węzła kinematycznego [10÷12].

Metodyka badań doświadczalnych

Do badań wytypowano materiał kompozytowy (SiC-Ni) o zawartości 20% węgla krzemu. Próbkę przed badaniami zostały wyszlifowane, a następnie za pomocą specjalnych uchwytów połączone ze sobą w pakiet. Próby wiercenia elektroerozyjnego wybranego materiału zostały przeprowadzone w Zakładzie Obróbek Wykańczających i Erozyjnych Politechniki Warszawskiej. Wykonano je na drążarce elektroerozyjnej Charmilles Drill 20, widocznej na rysunku 1.

Badania przeprowadzono z użyciem elektrod rurkowych (jedno i wielokanałowych), wykonanych z mosiądzu i miedzi, o średnicy zewnętrznej równej 1 mm. Jako dielektryk zastosowano wodę dejonizowaną, która była dostarczana do obszaru obróbki przez kanały w elektrodzie roboczej (rys. 2).

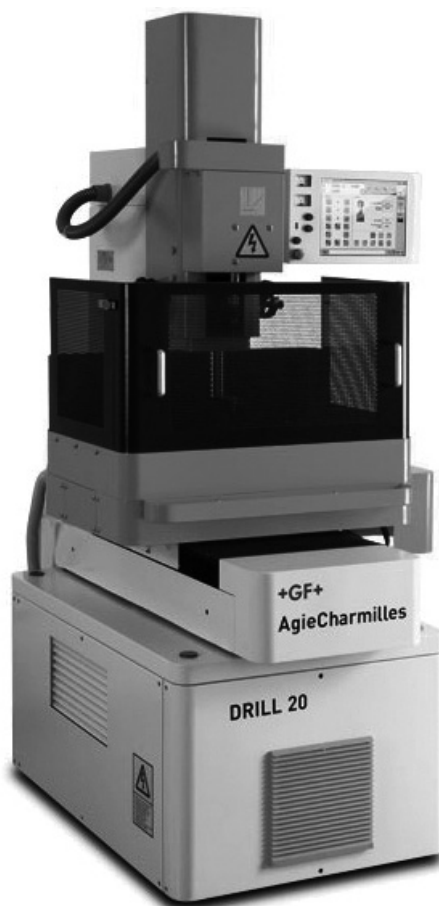
W badaniach uwzględniono dwa czynniki wejściowe, których wartości były zmienne w następujących przedziałach:

- t_{on} – czas impulsu (19÷99 μ s),
- p – ciśnienie dielektryka (1÷8 bar).

Przyjęto następujące czynniki wyjściowe:

- liniowe zużycie elektrody roboczej (Z_e),
- czas drążenia (t_d),
- średnica wydrążonych otworów (d),
- chropowatość powierzchni wydrążonych otworów (R_a).

W celu obliczenia czynników wyjściowych zmierzono: długość elektrody roboczej przed obróbką (h_p) oraz długość



Rys. 1. Drążarka elektroerozyjna Drill 20 firmy Charmilles
Fig. 1. Hole drilling EDM Drill 20 – Charmilles Company

elektrody roboczej po obróbce (h_k). Liniowe zużycie elektrody roboczej (Z_e) obliczono wg poniższego wzoru:

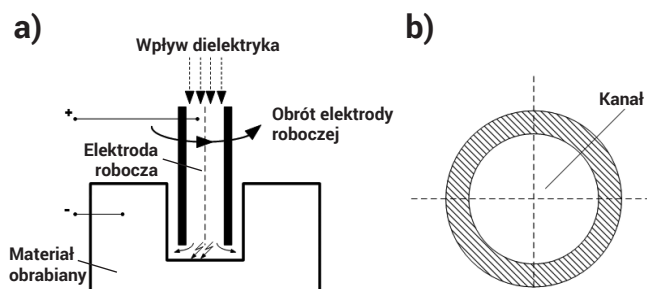
$$Z_e = h_p - h_k \quad (1)$$

gdzie:

- h_p – długość elektrody roboczej przed obróbką;
- h_k – długość elektrody roboczej po obróbce.

Natomiast przyjętymi czynnikami stałymi, były:

- materiały obrabiane (materiał kompozytowy WC-Ni o zawartości 20% WC),
- wysokość materiału obrabianego $h_m = 40$ mm,
- elektrody rurkowe przelotowe o średnicach zewnętrznych $d_e = 1$ mm (jedno i wielokanałowe, z mosiądzu i miedzi)
- dielektryk (woda dejonizowana),
- amplituda natężenia prądu I (12÷14 A),
- napięcie wyładowania U (40÷45 V).



Rys. 2. a) Schemat przedstawiający drążenie elektroerozyjne z dostarczaniem dielektryka poprzez kanał w elektrodzie roboczej, b) przekrój elektrody roboczej jednokanałowej

Fig. 2. a) Diagram showing the electrical discharge machining with dielectric supply through the channel in the working electrode, b) cross-section of the single-channel working electrode

Tablica I. Parametry obróbki zastosowane w badaniach
Table I. The machining parameters used in the study

Parametry wejściowe	
czas impulsu t_{on} w przedziale	19÷99 μ s
ciśnienie dielektryka p	1÷8 bar
Parametry wejściowe ustalone	
napięcie wyładowania U	40÷45 V
amplituda natężenia prądu I	12÷14 A
Parametry wyjściowe	
zużycie elektrody Z_e	
czas drążenia t_d	
średnica wydrążonych otworów d	
chropowatość powierzchni R_a	

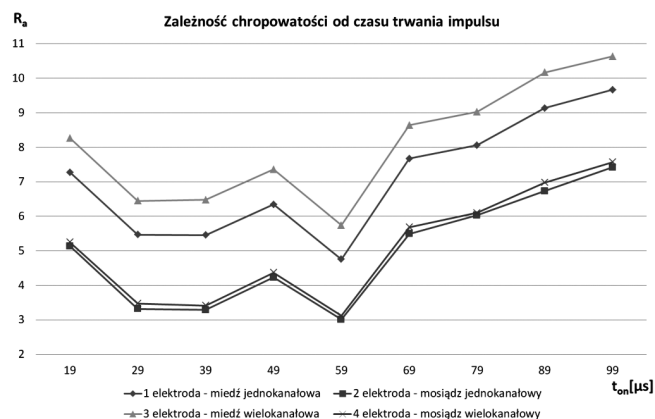
W tablicy I przedstawiono parametry obróbki, z jakimi były realizowane badania.

Pomiary chropowatości oraz średnicy wydrążonych otworów wykonano na profilometrze Talysurf 10.

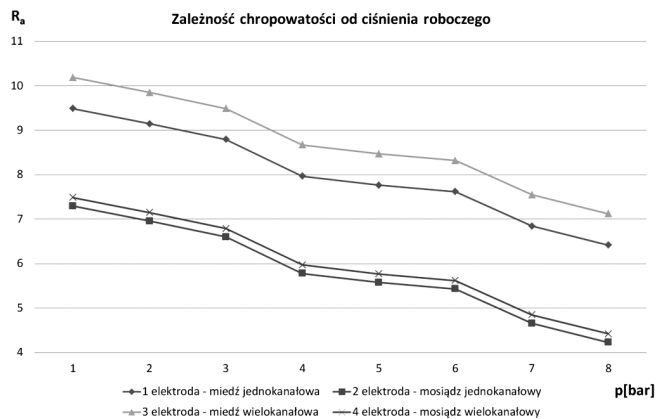
Analiza wyników

Analizując wyniki badań wpływu czasu impulsu t_{on} na chropowatość powierzchni (rys. 3), można stwierdzić, że dla wszystkich elektrod roboczych wraz ze wzrostem czasu impulsu t_{on} wzrasta chropowatość powierzchni. Najkorzystniejsze wyniki osiąga się dla czasów impulsu t_{on} w przedziale od 19 μ s do 59 μ s. Widać także, że zmiana materiału i kształtu kanału doprowadzającego dielektryk przez elektrodę roboczą wpływa na chropowatość zarówno przy zmianie czasu trwania impulsu t_{on} , jak i zmianie ciśnienia roboczego p. Analizując wykres wpływu ciśnienia roboczego p na chropowatość powierzchni (rys. 4) możemy także zauważyć, iż wraz ze wzrostem ciśnienia chropowatość obrabianej powierzchni maleje.

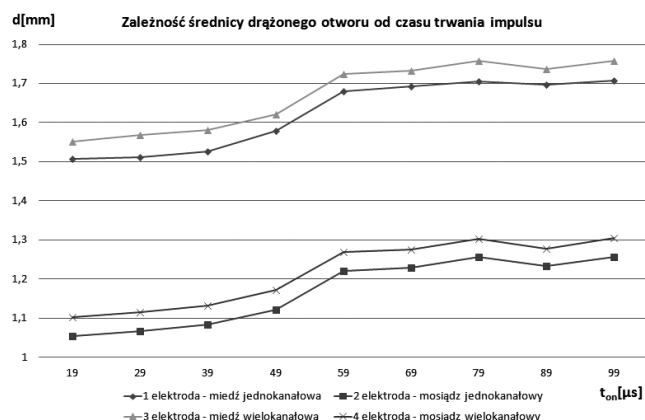
Na podstawie analizy wpływu czasu impulsu t_{on} na średnicę drążonego otworu d (rys. 5) można stwierdzić, że dla wszystkich elektrod roboczych wraz ze wzrostem czasu impulsu t_{on} wzrasta średnica drążonego otworu d. Tak samo jak w poprzednim przypadku, zmiana materiału elektrody ma istotny wpływ na średnicę drążonego otworu d, zarówno przy zmianie czasu impulsu t_{on} , jak i ciśnienia roboczego p. Patrząc na zależność średnicy drążonego otworu d od ciśnienia roboczego p (rys. 6) widać, iż przy wzroście ciśnienia roboczego p średnice drążonych otworów d maleją.



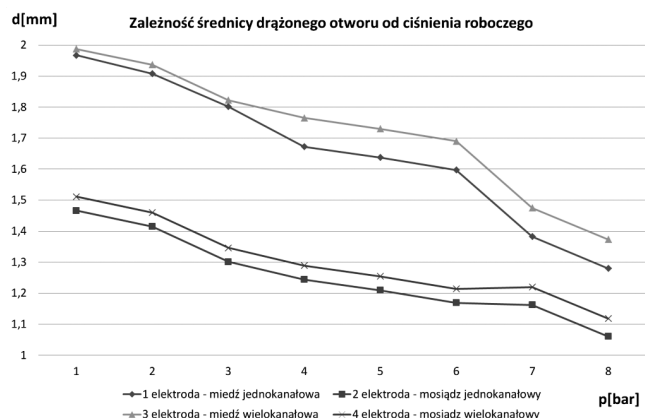
Rys. 3. Zależność parametru chropowatości R_a od czasu impulsu t_{on}
Fig. 3. Dependence of the surface roughness parameter R_a from the impulse time t_{on}



Rys. 4. Zależność parametru chropowatości R_a od ciśnienia dielektryka p
Fig. 4. Dependence of the surface roughness parameter R_a from the dielectric pressure p

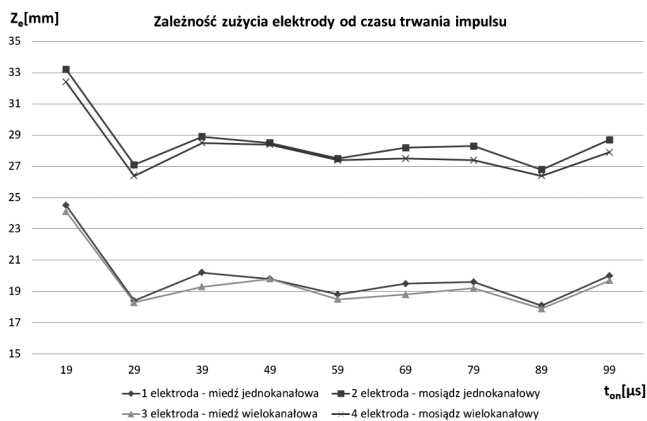


Rys. 5. Zależność średnicy drążonego otworu d [mm] od czasu impulsu t_{on}
Fig. 5. Dependence of the drilling hole diameter d [mm] from the impulse time t_{on}

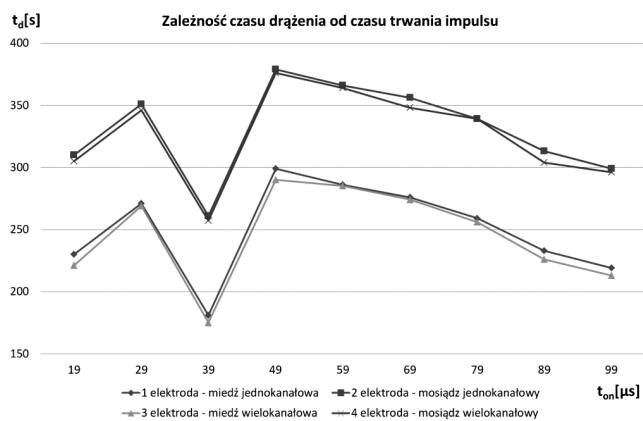


Rys. 6. Zależność średnicy drążonego otworu d [mm] od ciśnienia dielektryka p
Fig. 6. Dependence of the drilling hole diameter d [mm] from the dielectric pressure p

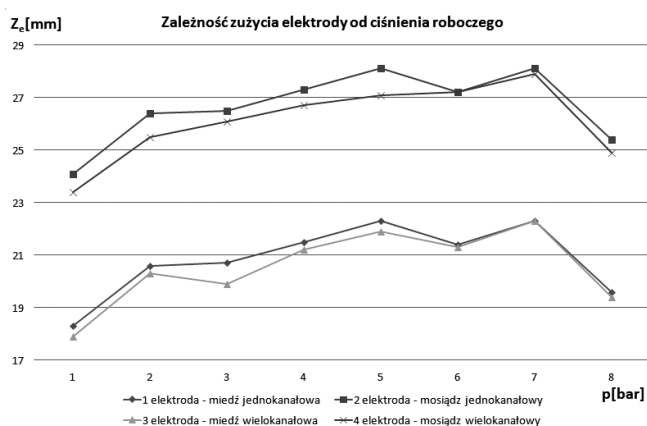
Obserwując wpływ czasu impulsu t_{on} na zużycie elektrody Z_e (rys. 7), można zaobserwować, że największy wpływ na zużycie elektrody ma jej rodzaj, natomiast czas impulsu t_{on} w pewnym stabilnym zakresie od 29 μ s do 89 μ s jest znikomy. Należy jednak zauważyć, że poza tym zakresem następuje gwałtowny wzrost zużycia elektrody Z_e . Na podstawie zależności zużycia elektrody Z_e od ciśnienia roboczego p (rys. 8) widać, że w przedziale od 1 do 5 barów wraz ze wzrostem ciśnienia roboczego p wzrasta zużycie elektrody Z_e .



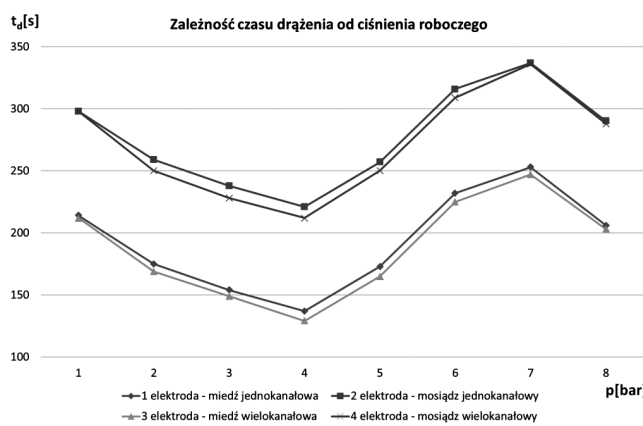
Rys. 7. Zależność zużycia elektrody roboczej Z_e od czasu impulsu t_{on}
Fig. 7. Dependence of the working electrode wear Z_e from the pulse time t_{on}



Rys. 9. Zależność czasu drążenia t_d od czasu impulsu t_{on}
Fig. 9. Dependence of the drilling time t_d from the pulse time t_{on}



Rys. 8. Zależność zużycia elektrody roboczej Z_e od ciśnienia dielektryka p
Fig. 8. Dependence of the working electrode wear Z_e from the dielectric pressure p



Rys. 10. Zależność czasu drążenia t_d od ciśnienia dielektryka p
Fig. 10. Dependence of the drilling time t_d from the dielectric pressure p

Analizując wyniki badań wpływu czasu impulsu t_{on} na czas drążenia t_d (rys. 9), można stwierdzić, że dla czasu impulsu t_{on} wyższego niż 49 μs wraz ze wzrostem czasu impulsu t_{on} skraca się czas drążenia t_d . Najkorzystniejszy wynik osiąga się dla czasu impulsu t_{on} równego 39 μs . Patrząc natomiast na zależność czasu drążenia t_d od ciśnienia roboczego p (rys. 10), można zauważyć, że najkrótszy czas drążenia t_d osiągnięty jest przy ciśnieniu roboczym równym 4 bary.

Z uzyskanych wyników badań wynika, że zastosowanie miedzi (w stosunku do mosiądzu), jako materiału na elektrody robocze powoduje wzrost: chropowatości powierzchni obrabianej oraz rozbitcia bocznego (średnicy) otrzymywanego otworu. Jednakże zastosowanie miedzi, jako elektrody daje pozytywne skutki obróbki w postaci skrócenia czasu drążenia i zużycia elektrody roboczej.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań wpływu czasu impulsu t_{on} oraz ciśnienia dielektryka p na chropowatość powierzchni, średnicę drążonych otworów d , czas drążenia t_d oraz zużycie elektrody Z_e , można sformułować następujące wnioski:

- wraz ze wzrostem czasu impulsu t_{on} wzrasta chropowatość powierzchni;
- przy wzroście ciśnienia roboczego p chropowatość obrabianej powierzchni maleje;
- gdy wzrasta czas impulsu t_{on} , średnica drążonych otworów d także wzrasta;
- przy wzroście ciśnienia roboczego p średnice drążonych otworów d maleją;
- w pewnym stabilnym zakresie od 29 μs do 89 μs czas impulsu t_{on} nie wpływa na zużycie elektrody Z_e , natomiast poza tym zakresem zużycie elektrody Z_e gwałtownie wzrasta;
- w przedziale od 1 do 5 bar wraz ze wzrostem ciśnienia roboczego p wzrasta zużycie elektrody Z_e ;
- gdy rośnie czas impulsu t_{on} to skraca się czas drążenia t_d ;
- kiedy czas przerwy między impulsami t_p jest większy bądź równy czasowi impulsu t_{on} , zużycie elektrody Z_e gwałtownie wzrasta;
- wraz ze wzrostem czasu przerwy t_p wzrasta czas drążenia t_d ;
- zużycie elektrody Z_e rośnie, gdy zwiększa się czas przerwy t_p .

Literatura

- [1] Dobrzański L., Matula G.: Podstawy metalurgii proszków i materiały spiekane, Open Access Library, vol.8 (14), 2012.
 - [2] Świercz R., Oniszczyk-Świercz D.: Wpływ parametrów obróbki elektroerozyjnej na właściwości użytkowe stali o wysokiej przewodności cieplnej, *Mechanik* nr 1, s. 29-34, 2015.
 - [3] Świercz R., Oniszczyk-Świercz D.: Obróbka elektroerozyjna – badanie impulsów elektrycznych napięcia i natężenia prądu, *Mechanik* nr 2, s. 112-113, 2017.
 - [4] El-Hofy H.: *Advanced Machining Process. Nontraditional and hybrid machining process*, Alexandria University, Egypt, 2005.
 - [5] Spadło S., Dudek D.: Badania dokładności geometrycznej otworów drążonych metodą EDM, *Mechanik* nr 12, s. 23-28, 2015.
 - [6] Spadło S., Dudek D.: Badania wpływu przepłukiwania szczeliny roboczej na efekty obróbki elektroerozyjnej (EDM), *Mechanik* nr 1, s. 77-79, 2017.
 - [7] Pham D.T., Ivanov A., Bigot S., Popov K., Dimov S.: An investigation of tube and rod electrode wear in micr EDM drilling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume: 3, Issue: 1-2, pp. 103-109, May 2007.
 - [8] Jiazhong L., Guoqiang Y., Cong W., Xuejie G., Zuyuan Y.: Prediction of aspect ratio of micro hole drilled by EDM, *Journal of Mechanical Science and Technology* 27 (1), pp. 185-190, 2013.
 - [9] Jahan M.P., Rahman M., Wongb Y.S.: A review on the conventional and microelectrodischarge machining of tungsten carbide, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 51, pp. 837-858, 2011.
 - [10] Świercz R., Oniszczyk-Świercz D.: Experimental investigation of surface layer properties of high thermal conductivity tool steel after electrical discharge machining, *Metals*, vol. 12, 2017.
 - [11] Piekarski R., Zawora J.: Analiza porównawcza struktur geometrycznych powierzchni (SGP) po procesie kulowania stali 42CrMo4 ze strukturą odniesienia żelaza armco, *Przegląd Spawalnictwa* vol. 83 (3), s. 32-37, 2016.
 - [12] Chmielewski T., Golański D.: Modelowanie numeryczne naprężeń własnych w złączach Al_2O_3-Ti oraz $Al_2O_3-(Ti+Al_2O_3)$ formowanych podczas natryskiwania detonacyjnego, *Przegląd Spawalnictwa* vol. 81, s. 58-62, 2009.
-