

BADANIA WPLYWU PARAMETRÓW IMPULSÓW ELEKTRYCZNYCH NA STRUKTURĘ WARSTWY WIERZCHNIEJ PO OBRÓBCE ELEKTROEROZYJNEJ

Skoczypiec Sebastian*
Furyk Karolina
Ruszaj Adam
Wyszyński Dominik

Słowa kluczowe: obróbka erozyjna, krater erozyjny,

W obróbce elektroerozyjnej podstawowym warunkiem uzyskania zadowalających wskaźników technologicznych jest odpowiedni dobór charakterystyk wyładowań elektrycznych. Można to zrealizować przez dobór odpowiedniego generatora oraz sterowanie parametrami impulsów czyli napięcia i natężenia prądu władowania. W artykule przedstawione zostaną wyniki badań wpływu energii wyładowań elektrycznych na wymiary kraterów erozyjnych dla generatorów RC i tranzystorowego.

1. 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 pomiędzy przedmiotem obrabianym a elektrodą roboczą. Szczelina międzyelektrodowa wypełniona jest cieczą dielektryczną, której zadaniem jest m.in. usunięcie produktów erozji z przestrzeni międzyelektrodowej. Mechanizm usuwania naddatku, oparty na wyładowaniach elektrycznych, powoduje, że 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). Obróbka elektroerozyjna umożliwia wykonywanie z tych materiałów skomplikowanych swobodnych powierzchni z wysoką dokładnością (nawet do $\sim 2 \mu\text{m}$) co powoduje, że powszechnie jest stosowana np. do wytwarzania narzędzi, form wtryskowych czy matryc.

W EDM, najmniejszą porcją usuwanego materiału jest objętość materiału usuniętego podczas pojedynczego wyładowania z tzw. krateru erozyjnego. Od wymiarów krateru zależy chropowatość obrabianej powierzchni, wydajność oraz dokładność (rozdzielczość) kształtowania elektroerozyjnego. Na rozmiar kraterów erozyjnych wpływa szereg czynników, wśród których można wyróżnić:

- właściwości fizyko – chemiczne materiału obrabianego i elektrody,
- energia i moc pojedynczego wyładowania elektrycznego,
- stan fizyko – chemiczny szczeliny międzyelektrodowej.

Istotny wpływ na wskaźniki technologiczne mają parametry impulsów elektrycznych, zależne m.in. od rodzaju generatora i jego możliwości technicznych. W latach 40, 50 najczęściej stosowany był generator relaksacyjny (tzw. RC). Jednak, ze względu na brak możliwości kontroli parametrów pojedynczego impulsu elektrycznego, a tym samym zużycia

elektrody roboczej, został on wyparty przez generatory tranzystorowe [1]. Generator tranzystorowy pozwala na uzyskanie impulsu prądowego o regulowanych czasach impulsu t_i i przerwy t_p . Posiada on specjalny układ mikroprocesorowy kształtowania impulsów i wykorzystuje tranzystory mocy jako elementy wykonawcze. Pozwala to na kontrolowanie kształtu, czasu trwania i energii impulsów. Dla generatora tranzystorowego średnia energia wyładowania wynosi:

$$E_w = U_g * I_c * t_e \quad (1)$$

gdzie: U_g – napięcie graniczne (czyli napięcie międzyelektrodowe, przy którym następuje wyładowanie, I_c – prąd wyładowania, t_e - czas wyładowania). Wadą generatorów tranzystorowych jest praktycznie brak możliwości minimalizacji energii impulsu (np. w celu zastosowania tych rozwiązań do mikrokształtowania elektroerozyjnego). Wymaga to zastosowania skomplikowanych i niezwykle kosztownych układów elektronicznych.

Natomiast generator RC generuje impulsy na skutek cyklicznego ładowania i rozładowywania kondensatora o pojemności C . Szczegółowy opis takiego generatora przedstawiony został w [1, 4]. Czas naładowania i rozładowania kondensatora jest funkcją rezystancji i pojemności obwodu. Jedynie poprzez ich zmianę można wpłynąć na czas trwania impulsu i przerwy. Należy podkreślić, że rezystancja R zależy również od wartości rezystancji kanału plazmowego w momencie wyładowania. Jest ona trudna do oszacowania ponieważ zależy od szeregu zmieniających się w trakcie wyładowania czynników tj.:

- grubości szczeliny międzyelektrodowej
- rodzaju zastosowanego dielektryka,
- stopnia zanieczyszczenia dielektryka (produkty erozji),
- kształtu powierzchni elektrody i elementu obrabianego.

Dlatego też precyzyjna kontrola parametrów czasowych wyładowań w generatorze RC jest praktycznie niemożliwa. Stosując generator relaksacyjny czas trwania pojedynczego wyładowania zazwyczaj jest $< 5 \mu s$, natomiast energia E_w zmagazynowana w kondensatorze w końcu procesu ładowania zależy od pojemności kondensatora C i tzw. napięcia granicznego U_g , czyli napięcia międzyelektrodowego, przy którym następuje rozładowanie obwodu. Jej przybliżona wartość może być obliczona ze wzoru:

$$E_w = \frac{1}{2} C U_g^2 \quad (2)$$

Poniżej przedstawione zostaną badania wpływu parametrów impulsów elektrycznych (energii pojedynczego wyładowania) na średnicę uzyskanych kraterów erozyjnych w zależności od rodzaju użytego generatora (RC , tranzystorowy).

2. Badania doświadczalne

Dla dwóch typów przedstawionych powyżej generatorów elektroerozyjnych, przeprowadzono badania mające na celu określenie zakresu średnic kraterów erozyjnych, powstałych przy różnych nastawach zasilacza. Badania wykonano na, zaprojektowanym w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji Politechniki Krakowskiej, stanowisku badawczym [8]. Badania przeprowadzono dla dwóch następujących generatorów:

- generatora tranzystorowego BP-95 wyprodukowanego w Zakładzie Automatyki Przemysłowej B.P. Końskie – Kutno,
- generatora relaksacyjnego zbudowanego zgodnie z projektem przedstawionym w [4].

Generator BP-95 przystosowany jest do obróbki elektroerozyjnej w skali makro, natomiast konstrukcja zasilacza RC predysponowana jest do mikrokształtowania elektroerozyjnego,.

Czynniki badane dla zasilacza BP-95 [2]:

- czas impulsu: $t_i = 50 - 250 \mu s$,
- amplituda natężenia prądu: $I = 1 - 5 A$.

Czynniki badane dla zasilacza RC [3]:

- oporność $R = 22, 220, 1000 k\Omega$,
- pojemność: $C = 22, 220, 3300 pF$.

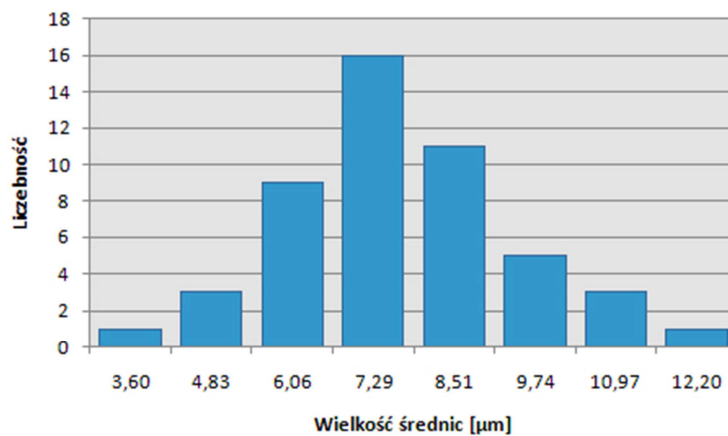
Czynniki wyjściowe:

- średnica krateru $D [mm]$.

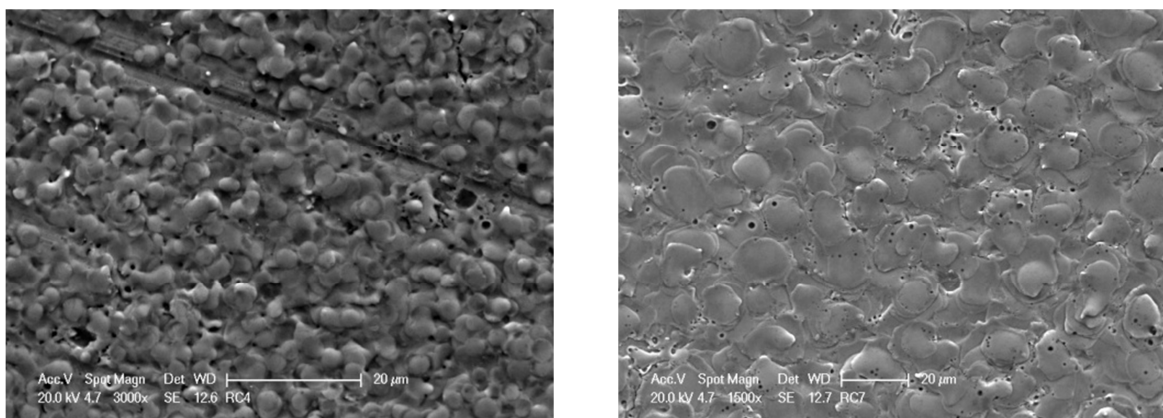
Czynniki stałe:

- czas przerwy (dla zasilacza BP-95): $t_p = 0,1 t_i$,
- napięcie zasilania (dla zasilacza RC): $U_0 = 150 V$
- dielektryk: Exxsol D80 (mieszanina węglowodorów alifatycznych i cykloparafinowych),
- materiał elektrody roboczej: miedź,
- materiał obrabiany: stal 304 (0H18N9).

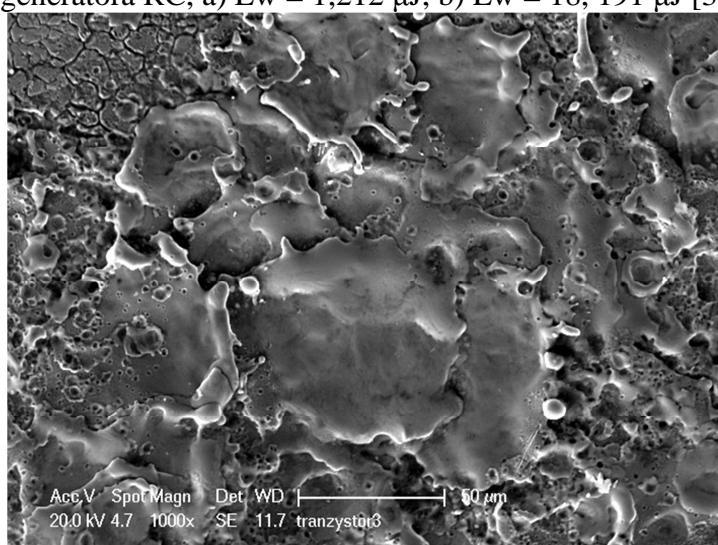
Pomiarów średnic kraterów dokonano na podstawie skalibrowanych w programie Motic Images Plus fotografii ze skaningowego mikroskopu elektronowego. Dla każdego układu planu obróbki wykonano pomiar kilkudziesięciu kraterów, aby na tej podstawie wyliczyć parametry rozkładu normalnego średnicy krateru dla konkretnych warunków obróbki (przykładowy otrzymany histogram przedstawiono Rys. 1). Przykładowe fotografie uzyskanych powierzchni przedstawiono na Rys 2 i 3, natomiast uzyskane wyniki w Tabelach 1 i 2.



Rys. 1. Przykładowy histogram przedstawiający rozkład średnicy kraterów erozyjnych dla zasilacza RC, nastawy: $C = 3300 pF$, $R = 1000 k$ ($E_w = 18191 nJ$, $f = 0,25 kHz$) [3]



a) b)
Rys. 2. Fotografie SEM przedstawiające kraterzy erozyjne uzyskane z zastosowaniem generatora RC, a) $E_w = 1,212 \mu\text{J}$, b) $E_w = 18,191 \mu\text{J}$ [3]



Rys. 3. Fotografia SEM przedstawiająca kraterzy erozyjne uzyskane z zastosowaniem generatora BP-95 dla następujących parametrów: $t_i = 250 \mu\text{s}$, $I = 1 \text{ A}$.

Tabela 1. Wyniki pomiarów średnic kraterów erozyjnych D dla zasilacza BP-95.

| Amplituda natężenia prądu I [A] | Czas trwania impulsu t_i [μs] | Średnica krateru D [μm] | δD [μm] |
|-----------------------------------|--|--|------------------------------|
| 1 | 50 | 49,98 | 13,48 |
| 1 | 150 | 54,60 | 12,03 |
| 1 | 250 | 55,48 | 17,13 |
| 3 | 50 | 65,24 | 12,12 |
| 3 | 150 | 68,04 | 12,45 |
| 3 | 250 | 78,11 | 24,44 |
| 5 | 50 | 83,64 | 20,94 |
| 5 | 150 | 103,36 | 24,72 |
| 5 | 250 | 109,48 | 14,94 |

Tabela 2. Wyniki pomiarów średnic kraterów erozyjnych D dla zasilacza RC (teoretyczną energię wyładowania policzono z zależności 2 wstawiając $U_g = U_0$).

| Teoretyczna energia wyładowania E [μJ] | Teoretyczna częstotliwość wyładowań f [kHz] | Średnica krateru D [μm] | δD [μm] |
|---|---|----------------------------------|------------------------|
| 121 | 1721 | 1,58 | 0,48 |
| 121 | 172 | 1,95 | 0,43 |
| 121 | 37,8 | 1,38 | 0,37 |
| 1212 | 172 | 2,92 | 1,6 |
| 1212 | 17,2 | 4,18 | 0,79 |
| 1212 | 3,78 | 2,77 | 0,62 |
| 18191 | 11,4 | 10,26 | 2,03 |
| 18191 | 1,14 | 13,99 | 8,6 |
| 18191 | 0,25 | 23,26 | 13,16 |

Pomiary wykonane na podstawie zdjęć SEM umożliwiają jedynie analizę wymiarów liniowych w płaszczyźnie przekroju poprzecznego próbki, co nie pozwala na przeprowadzenie pełnych badań morfologii krateru, a tym samym określić objętość usuniętego materiału. Należy podkreślić, że w badaniach średnicę krateru zdefiniowano jako obszar obejmujący mikro-wgłębienie oraz jego zewnętrzne otoczenie tzw. wypływkę (czyli wzniesienie powstałe w wyniku zakrzepnięcia roztopionego i następnie promieniowo przemieszczonego wskutek dynamicznego oddziaływania kanału iskrowego i pęcherza gazowego materiału - bez utraty kontaktu z materiałem rodzimym). Jak wynika z badań przedstawionych w [5, 6, 7] głębokość krateru jest równa ok. 5% jego średnicy. Dlatego też sposób pomiaru średnicy krateru w oparciu o fotografie SEM jest wystarczający do oszacowania rozdzielczości obróbki.

Na podstawie zależności przedstawionych na Rys. 4, 5 i 6 sformułowano następujące wnioski:

- **dla zasilacza BP-95:**

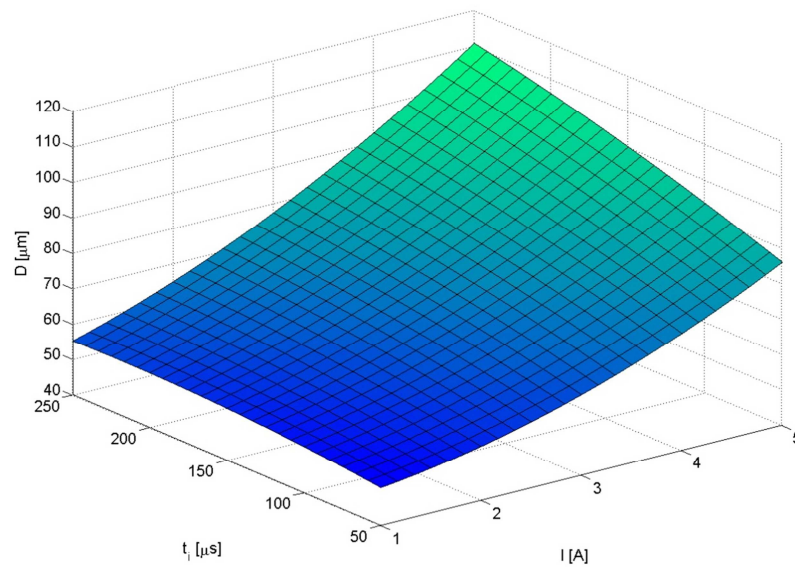
- średnica kraterów w rozważanym przedziale czynników badanych jest w zakresie $D = 35 - 130 \mu m$,
- pomimo, że energia wyładowania zależy w takim samym stopniu od amplitudy natężenia prądu I i t_i (zależność 1) wpływ natężenia prądu I na średnicę krateru jest znacznie silniejszy niż czas impulsu t_i . Można to tłumaczyć faktem, że dla dłuższego czasu impulsu jest większy udział odprowadzenia ciepła przez elektrody i dielektryk, natomiast wzrost amplitudy prądu przede wszystkim zwiększa udział energii topienia i parowania materiału w bilansie energetycznym wyładowania,
- energia wyładowania zależy od amplitudy natężenia prądu I i t_i (zależność 1); dla stałej energii ostateczny wynik obróbki zależy od mocy impulsu; ze wzrostem mocy impulsu rośnie ilość materiału usuniętego w wyniku parowania; wraz ze zmniejszeniem mocy impulsu wzrasta ilość materiału usuniętego w wyniku topnienia; rosną również straty energii na skutek odprowadzenia ciepła przez elektrody i dielektryk,

- **dla zasilacza RC:**

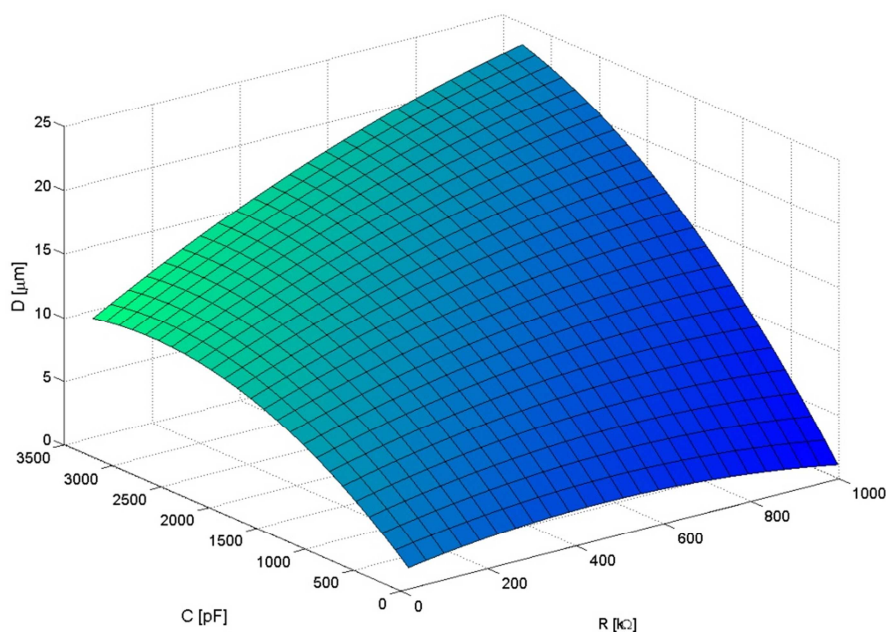
- średnica kraterów w rozważanym przedziale czynników badanych jest w zakresie $D = 1 - 50 \mu m$,
- średnica krateru zależy głównie od pojemności elektrycznej C (energia wyładowania jest zdeterminowana przez napięcie i pojemność elektryczną,
- wpływ oporności R (determinującej częstotliwość wyładowania) na średnicę D jest niewielki. Jak wynika z Rys. 6, dla najmniejszych częstotliwości

wyładowań istnieje związek pomiędzy średnicą krateru a częstotliwością (pomimo tej samej teoretycznej energii wyładowania). Wzrost ten można wytłumaczyć zmianą średniego granicznego napięcia wyładowania U_g , które zależy od grubości szczeliny i warunków fizycznych w niej panujących (np. stopień zanieczyszczenia dielektryka). Przy mniejszej częstotliwości wyładowań jest więcej czasu na oczyszczenie szczeliny i wyładowanie zachodzi przy większych wartościach U_g .

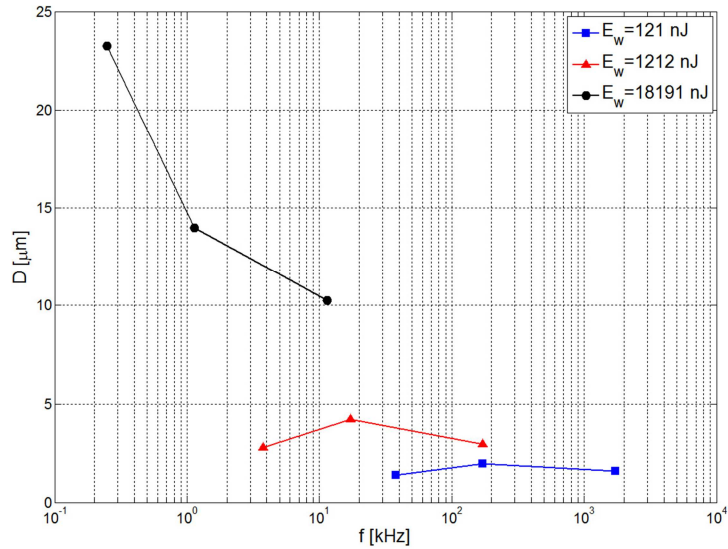
- o zaobserwowano dwa typy kraterów erozyjnych. Typ pierwszy powstał w czasie obróbki z niską energią wyładowania. Cechuje się on mało regularnym kształtem, lekko wypukłą strukturą oraz jednolitą powierzchnią (Rys. 2a). Typ drugi powstał przy największej energii wyładowania. Charakteryzuje się on jednolitą, regularną i płaską strukturą (Rys. 2b).



Rys. 4. Zależność średnicy krateru wyładowczego od teoretycznej częstotliwości wyładowań dla zasilacza BP-95, t_i - czas impulsu, I - amplituda natężenia prądu.



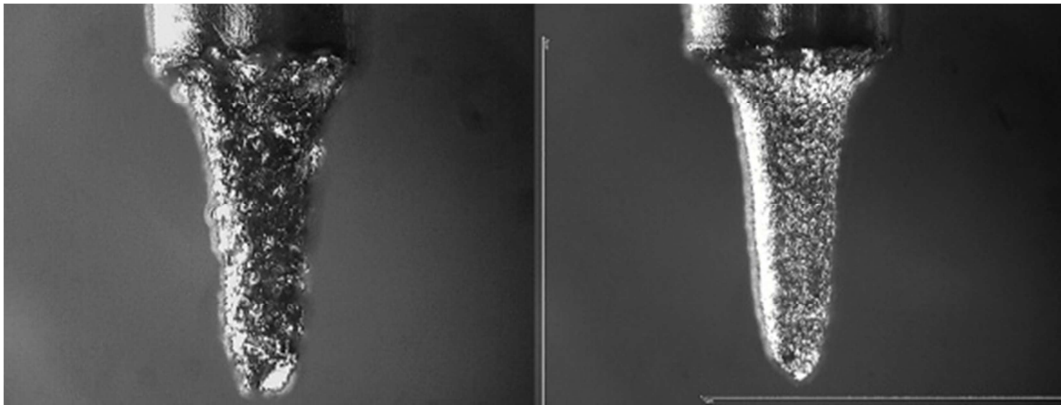
Rys. 5 Zależność średnicy krateru wyładowczego od nastaw pojemności kondensatora C i rezystancji R .



Rys. 6. Zależność średnicy krateru wyładowczego od teoretycznej częstotliwości wyładowań dla zasilacza RC, E_w - teoretyczna energia wyładowania policzona z zależności 2 wstawiając $U_g = U_0$.

3. Podsumowanie

Na Rys. 7 przedstawione zostało porównanie powierzchni wałka o średnicy 0.4 mm, który został obrobiony elektroerozyjnie zasilaczem tranzystorowym oraz RC. Z przedstawionych fotografii widać wyraźną różnicę w jakości powierzchni, co ma bezpośredni związek ze średnicą pojedynczego krateru wyładowczego.



Rys. 7. Porównanie powierzchni wałka po obróbce zasilaczem tranzystorowym BP-95 (fotografia lewa, $t_p = 25 \mu s$, $t_i = 25 \mu s$ i $I = 1 A$) i zasilaczem RC (fotografia prawa, $U_0 = 150 V$, $E_w = 55,1 nJ$), materiał obrabiany: miedź.

W aspekcie zastosowania generatora relaksacyjnego do mikroobróbki elektroerozyjnej, niezwykle istotna jest możliwość kształtowania czasu trwania impulsu, średniej częstotliwości wyładowań, amplitudy prądu i energii pojedynczego wyładowania poprzez odpowiedni dobór pojemności C , rezystancji R i napięcia U_0 . Natomiast wadą zasilacza relaksacyjnego jest brak możliwości stałych nastaw czasu impulsu, czasu przerwy oraz kształtu impulsu.

Z kolei, zastosowanie generatora RC umożliwia kontrolowanie kształtu, czasu trwania i energii impulsów, natomiast jego sporą wadą jest utrudnienie przy minimalizacji energii impulsu w wykorzystywanych. Wymaga to zastosowania skomplikowanych i niezwykle kosztownych układów elektronicznych.

Literatura

1. Obróbka elektroerozyjna - drążenie i wycinanie. Internetowy Podręcznik. <http://zowie.meil.pw.edu.pl/edm/edm.html>
2. Fricze A.: Badanie wpływu wybranych parametrów obróbki elektroerozyjnej z użyciem generatora tranzystorowego na charakter kraterów powstałych na powierzchni obrabianej, Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Krakowska, 2011 r.
3. Furyk K.: Badanie wpływu wybranych parametrów obróbki elektroerozyjnej z użyciem generatora RC na charakter kraterów powstałych na obrabianej powierzchni, Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Krakowska, 2011 r.
4. Mojzych R.: Opracowanie projektu i wykonanie prototypu generatora RC do mikroobrabiarki elektroerozyjnej, Praca dyplomowa, Promotor prof. L. Kudła. Politechnika Warszawska, 2008 r.
5. Nowicki B., Dmowska A., Podolak-Lejtas A.: Morphology of traces made by individual electric discharge in the EDM. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, vol 33, str. 5-24, 2009 r.
6. Nowicki B., Dmowska A., Podolak-Lejtas A.: A new method of investigating crater and flash made by individual discharge using scanning profilometers. *Wear*, vol. 270(3-4), str. 121-126, 2011 r.
7. Podolak-Lejtas A. Modyfikacja warstwy wierzchniej zgniotem powierzchniowym elementów obrobionych elektroerozyjnie. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 2010 r.
8. Skoczypiec S, Ruszaj A.: Koncepcja obrabiarki do hybrydowej sekwencyjnej technologii EC/EDMM. *Inżynieria Maszyn*, vol 12, nr 4, str. 62-69, 2009 r.

Research on electrical pulse parameters influence on surface layer properties after electrodischarge machining.

In electrodischarge machining proper selection of the voltage pulse characteristic has significant influence on technological factors. It can be realized by selection of generator type and control of pulse time, discharge voltage and current amplitude. In the paper the research on pulse energy influence on erosion crater size for RC and transistor-type generator has been presented.

Исследования влияния энергии и возможности электрических разрядов на структуру поверхностного слоя после электроразрядной обработке.

Чтобы в электроразрядной обработке получить хорошие технологические результаты надо правильно выбрать характеристики электрических разрядов. Это можно получить через правильный выбор генератора и контролирование электрического напряжения и тока. В работе представлено результаты исследования влияния энергии и мощности электрических разрядов на размеры кратеров для генераторов RC и транзисторного.