

Lucjan DĄBROWSKI<sup>1</sup>  
Rafał ŚWIERCZ<sup>1</sup>, Józef ZAWORA<sup>1</sup>

## **STRUKTURA GEOMETRYCZNA POWIERZCHNI PO OBRÓBCE ELEKTROEROZYJNEJ ELEKTRODĄ GRAFITOWĄ I MIEDZIANĄ - PORÓWNANIE**

W referacie przedstawiono wyniki badań wpływu parametrów wejściowych obróbki elektroerozyjnej: amplitudy prądu I, czasu impulsu  $t_{on}$ , czasu przerwy  $t_{off}$ , oraz rodzaju materiału elektrody roboczej; miedź, grafit, przy ustalonych pozostałych parametrach obróbki na wybrane parametry struktury geometrycznej obrabianej powierzchni. Badania wykonano według trójpoziomowego planowanego eksperymentu Boxa Behnkena.

### **1. WPROWADZENIE**

Badania prowadzone przez wielu naukowców wykazały, że istnieją bardzo silne związki pomiędzy własnościami eksploatacyjnymi podzespołów maszyn i urządzeń a stanem warstwy wierzchniej (WW) konstytuowanej po obróbce. Nieodłączną częścią WW jest powierzchnia zewnętrzna, której budowę określa struktura geometryczna powierzchni (SGP) [3].

Doświadczalnie stwierdzono, że parametry SGP wykazują znaczny wpływ między innymi na:

- tarcie i procesy zużycia elementów współpracujących ze sobą,
- odkształcenia i wytrzymałość stykową,
- odporność na działanie korozyjne,
- aktywność drganiową,
- jakość nanoszenia i utrzymywanie się powłok,
- właściwości aero- i hydromechaniczne [7].

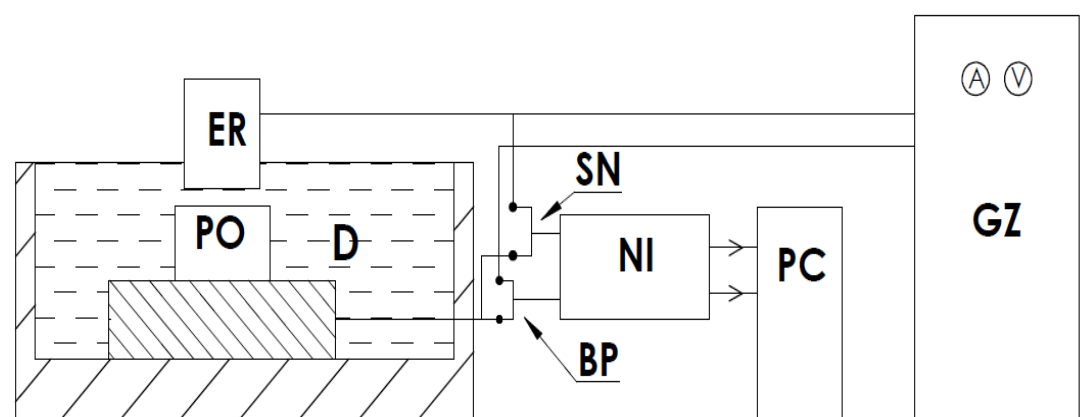
SGP po obróbce elektroerozyjnej kształtowana jest w wyniku nakładania się śladów pojedynczych wyładowań iskrowych i ma punktowy, izotropowy charakter. Parametry SGP takie jak np. chropowatość powierzchni bezpośrednio zależą od zastosowanych parametrów obróbki [2],[3],[7]. W referacie przedstawiono wpływ wybranych parametrów obróbki oraz zastosowanych materiałów elektrod roboczych na parametry struktury geometrycznej powierzchni.

---

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Technik Wytwarzania

## 2. METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono na obrabiarce elektroerozyjnej Charmilles Form 2LC ZC. Obrobiono próbki o wymiarach 12 x 12mm z hartowanej stali WNL (1.2713), elektrodą miedzianą (M1E) oraz grafitową (grafit POCO EDM-3) w dielektryku (nafcie). Dokonano analizy wpływu amplitudy prądu  $I$ , czasu impulsu  $t_{on}$ , czasu przerwy  $t_{off}$ , przy ustalonych pozostałych parametrach na parametry struktury geometrycznej powierzchni. Badania realizowane były z uwzględnieniem rzeczywistych wartości czynników wejściowych, które były monitorowane i rejestrowane w trakcie obróbki EDM. Opracowano tor pomiarowy (rys. 1), który pozwolił na wyznaczenie charakterystyk zasilacza obrabiarki.



Rys. 1. Schemat drążenia i toru pomiarowego  
Fig. 1. The EDM scheme and data acquisition circuit

Powyższy tor pomiarowy (rys. 1) składa się z:

- badanego obiektu – obrabiarki elektroerozyjnej z zamocowanym przedmiotem obrabianym (PO), elektrodą roboczą (ER) zanurzonych w płynnym dielektryku (D),
- generatora, zasilacza (GZ),
- bocznika prądu (BP),
- sondy napięciowej (SN),
- oscylloskopu cyfrowego firmy National Instruments NI3253 (NI).

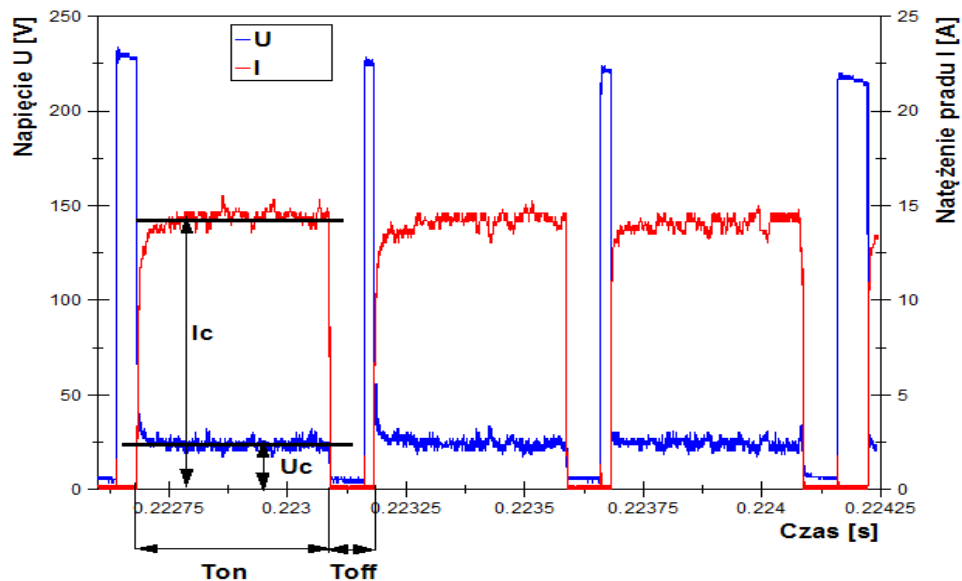
Przebiegi zmienności prądu oraz napięcia elektrycznego rejestrowane były w pamięci oscylloskopu. Opracowana została aplikacja w środowisku LabView odpowiadająca za sterowanie oscylloskopem i przekazywanie zarejestrowanych danych na dysk twardy komputera (PC), w warunkach ciągłej obróbki. Proces rejestracji danych przebiegał przy następujących parametrach i warunkach:

- dwukanałowa rejestracja danych,
- częstotliwość próbkowania danych 100MHz (50MHz na kanał),
- długość rekordu danych: 5 000 000,
- zakres pomiaru amplitudy:

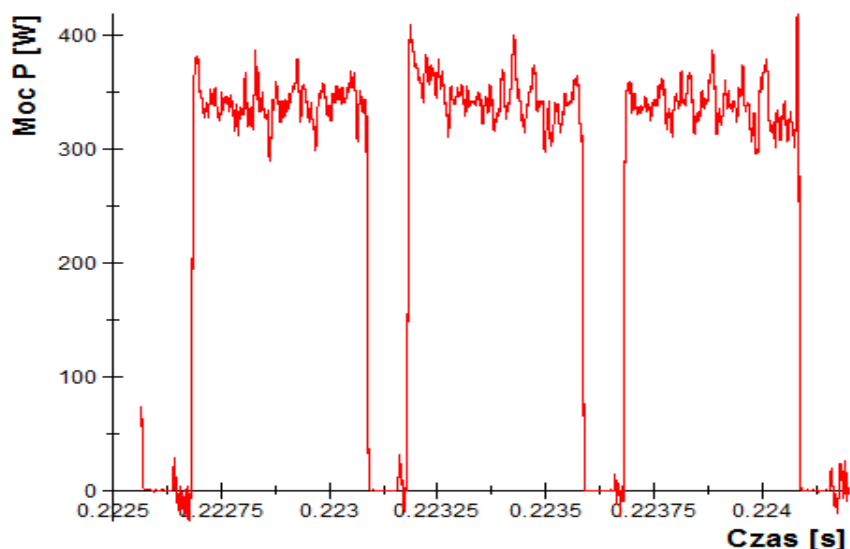
- 25V dla pomiaru napięcia wyładowania przez sondę 10 x zmniejszającą,
- od 0 do 3V spadek napięcia na boczniku dla nastawianych wartości prądu.

Przetworzenie i analizę statystyczną otrzymanych danych - przebiegów prądowo napięciowych dokonano w programie DIAdem firmy National Instrument. Uzyskane wyniki pomiarów umożliwiły wyznaczenie wiarygodnych wykresów przebiegów badanych wartości. Przykładowe przebiegi  $U(t)$ ,  $I(t)$ ,  $P(t)$ , przedstawiono na rysunku 2.

a)



b)



Rys. 2. Przebiegi: a) napięcia i natężenia prądu dla wartości parametrów: napięcie robocze  $U_c$  - 25V, napięcie zasilania  $U_o$  - 230V, natężenie prądu  $I$  - 14A, czas impulsu  $t_{on}$  - 80 $\mu$ s, czas przerwy  $t_{off}$  - 18 $\mu$ s, b) mocy  $P$  - 350W

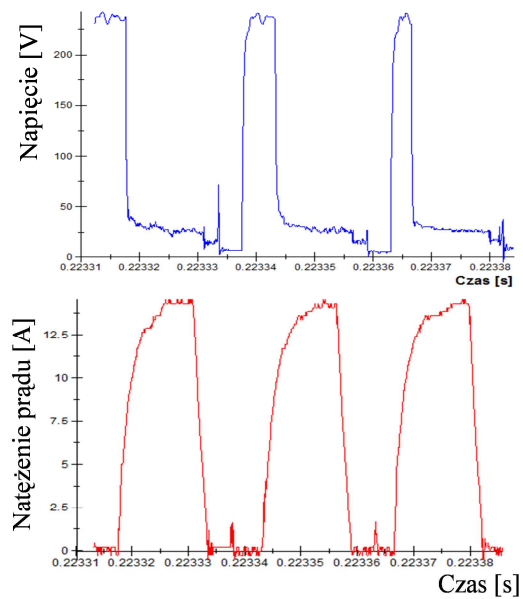
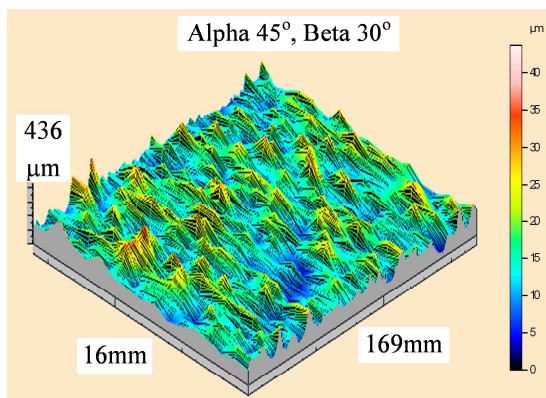
Fig. 2. Course: a) current and voltage for the following parameters: voltage  $U_c$  - 25V, supply voltage  $U_o$  - 230V, current  $I$  - 14A, pulse time  $t_{on}$  - 80 $\mu$ s, break time  $t_{off}$  - 18 $\mu$ s, b) power  $P$  - 350W

Uwzględniając charakterystykę impulsu roboczego w EDM (rys. 2) wartości średnie parametrów elektrycznych określono z zależności:

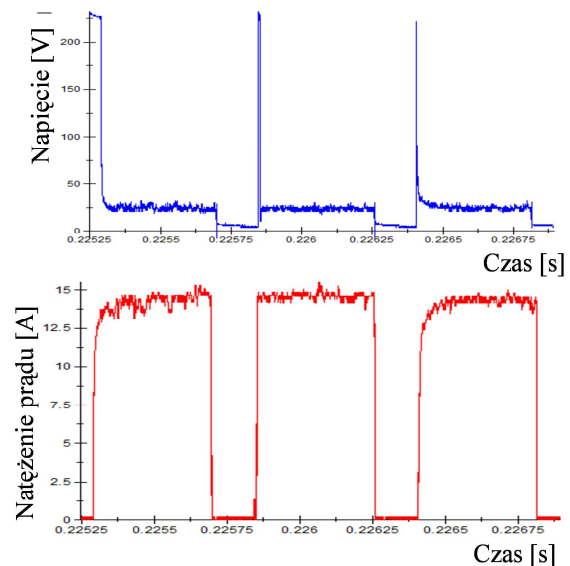
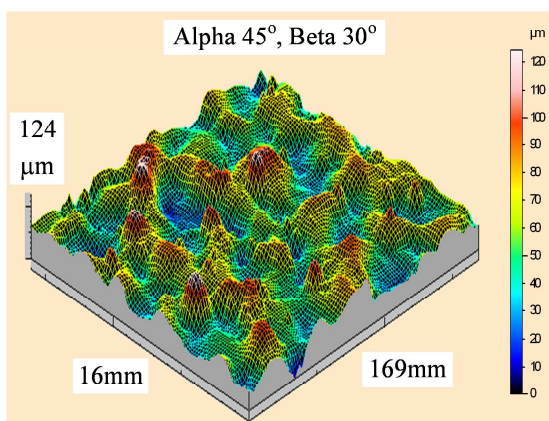
- średnia amplituda napięcia wyładowania: 
$$U_{sr} = \frac{1}{t_{on}} \int_0^{t_{on}} U_c dt \quad (V), \quad (1)$$

- średnia amplituda natężenia wyładowania: 
$$I_{sr} = \frac{1}{t_{on}} \int_0^{t_{on}} I_c dt \quad (V). \quad (2)$$

a)



b)



Rys. 3. Obrazy stereometryczne powierzchni po obróbce EDM wraz z zarejestrowanymi przebiegami prądowo napięciowymi: a)  $U = 25V, I = 14,3A, t_{on} = 13\mu s, t_{off} = 11\mu s$ , b)  $U = 25V, I = 14,3A, t_{on} = 400\mu s, t_{off} = 150\mu s$

Fig. 3. Stereometric image of the surface after EDM with recorded waveforms measured current-voltage characteristics: a)  $U = 25V, I = 14,3A, t_{on} = 13\mu s, t_{off} = 11\mu s$ , b)  $U = 25V, I = 14,3A, t_{on} = 400\mu s, t_{off} = 150\mu s$

Badania doświadczalne przeprowadzono wg. planu trójpoziomowego, trzyczynnikowego Boxa Behnkena [8]. Zdecydowano się na wykorzystanie eksperymentu trzyczynnikowego na podstawie analizy literatury oraz własnych badań wstępnych. Stwierdzono, że najistotniejszy wpływ na mikrostrukturę warstwy wierzchniej mają następujące czynniki: amplituda prądu  $I$ , czasu impulsu  $t_{on}$ , czasu przerwy  $t_{off}$ . [1],[2],[4-6]. Badanie wpływu czynników wejściowych na trzech równoodległych poziomach zmienności pozwoliło na wyznaczenie równań regresji o wysokim stopniu korelacji i małym rozrzucie wartości. Na podstawie wyznaczonych charakterystyk zasilacza obrabiarki przyjęto stabilne przedziały paramentów obróbki realizowane w ramach eksperymentu. Wyznaczone zakresy zmienności odpowiadają parametrom wykorzystywanym w procesach produkcji. Przyjęto następujące zakresy wielkości wejściowych:

- amplituda natężenia prądu  $I$  w impulsie w przedziale: 3 - 14,3A,
- czas impulsu  $t_{on}$  w przedziale: 13 - 400 $\mu$ s,
- czas przerwy między impulsami  $t_{off}$  w przedziale: 9 - 150 $\mu$ s.

Ustalono wartość parametru stałego:

- napięcie wyładowania  $U_c = 25V$ .

Parametry wyjściowe:

- wybrane parametry chropowatości powierzchni:  $S_a$ ,  $R_{sm}$ ,  $S_{ds}$ .

Badania struktury geometrycznej powierzchni obejmowały pomiary cech związanych zarówno z wysokością chropowatości, cechami horyzontalnymi profilu, kształtem nierówności jak również stopniem złożoności budowy geometrycznej nierówności. Na każdej powierzchni dokonano pomiaru mikrostereometrii oraz profilu wraz z ich parametrami. Pomiary realizowane były na profilometrze skanującym FORMTALYSURF Series 2. Rysunek 3 a, b przedstawia obrazy stereometryczne powierzchni po obróbce EDM wraz z odpowiadającymi im parametrami obróbki (przebiegami napięciowo prądowymi).

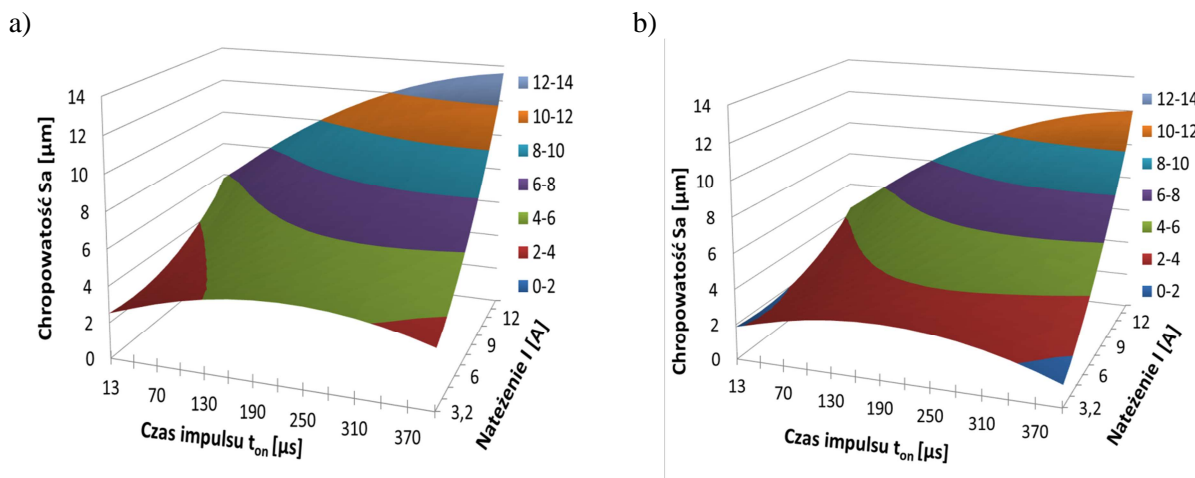
### 3. ANALIZA WYNIKÓW

Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano modele matematyczne opisujące wpływ wybranych parametrów obróbki na strukturę geometrycznej powierzchni. Wyznaczono równania regresji opisane funkcją wielomianu stopnia drugiego (tabela 1) w programie STATISTICA. Dla każdego równania wyznaczono współczynnik korelacji  $R$ , odzwierciedlający zmienność badanej cechy. Im bliższa jedności jest wartość  $R$ , tym wierniejsze odwzorowanie. 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  $\alpha = 0,1$  spełnia warunek:  $t_1, t_n, t_{n+1} > t_{kr}$ ). Wybrane zależności regresyjne przedstawiono w tabeli 1.

Uzyskane równania charakteryzują się wysokim stopniem korelacji  $R$ , a  $F/F_{kr}$  jest znacząco większy od jedności. Graficzna prezentacja uzyskanych zależności przedstawiona jest na rysunkach 4, 5, 6.

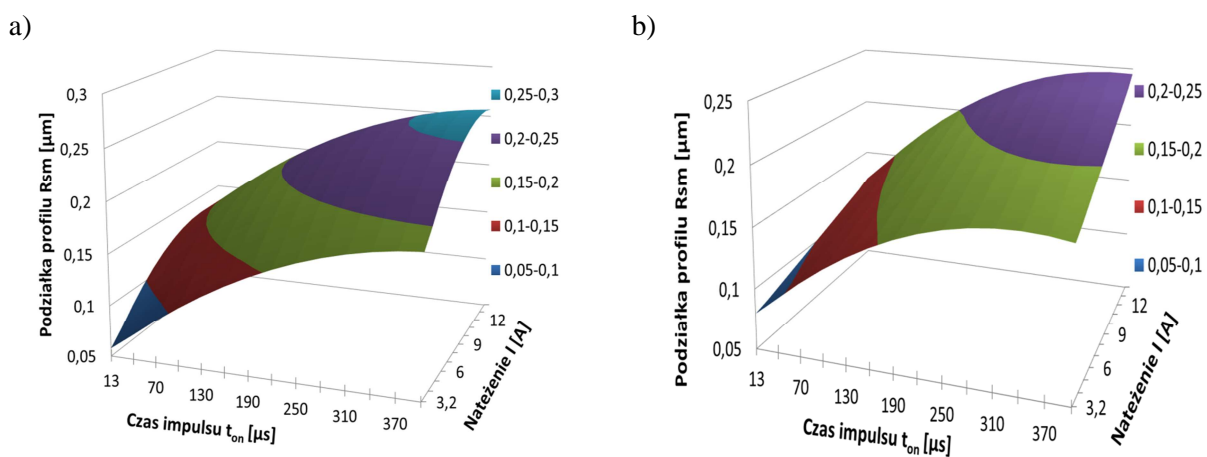
Tabela 1. Równania regresji opisujące parametry SGP  
 Table 1. Regression relationship EDM parameters and the SGP

Materiał elektrody miedz M1E	R	F/F <sub>kr</sub>
$Sa = 3,13 - 0,37 I + 0,09 t_{on} + 0,037 I^2 - 0,00005 t_{on}^2 - 0,002 I t_{on} + 0,00005 t_{on} t_{off}$	0,924	37,74
$Rsm = -0,129 + 0,022 I + 0,0006 t_{on} - 0,0009 I^2 - 0,000001 t_{on}^2$	0,83	12,14
$Sds = 2047 - 80 I + 0,00578 t_{on}^2 - 0,16 I t_{on} - 0,008 t_{off} t_{on}$	0,85	13,65
Materiał elektrody grafit POCO EDM3		
$Sa = 2,41 - 0,32 I + 0,008 t_{on} + 0,03 I^2 - 0,00004 t_{on}^2 - 0,002 I t_{on} + 0,000008 t_{on} t_{off}$	0,96	42,65
$Rsm = 0,06 + 0,004 I + 0,0005 t_{on} - 0,000001 t_{off}^2 - 0,000007 I t_{off}$	0,97	54,61
$Sds = 3057 - 276,2 I + 8,941 I^2 - 0,005 t_{off}^2 - 0,083 I t_{on}$	0,92	27,03



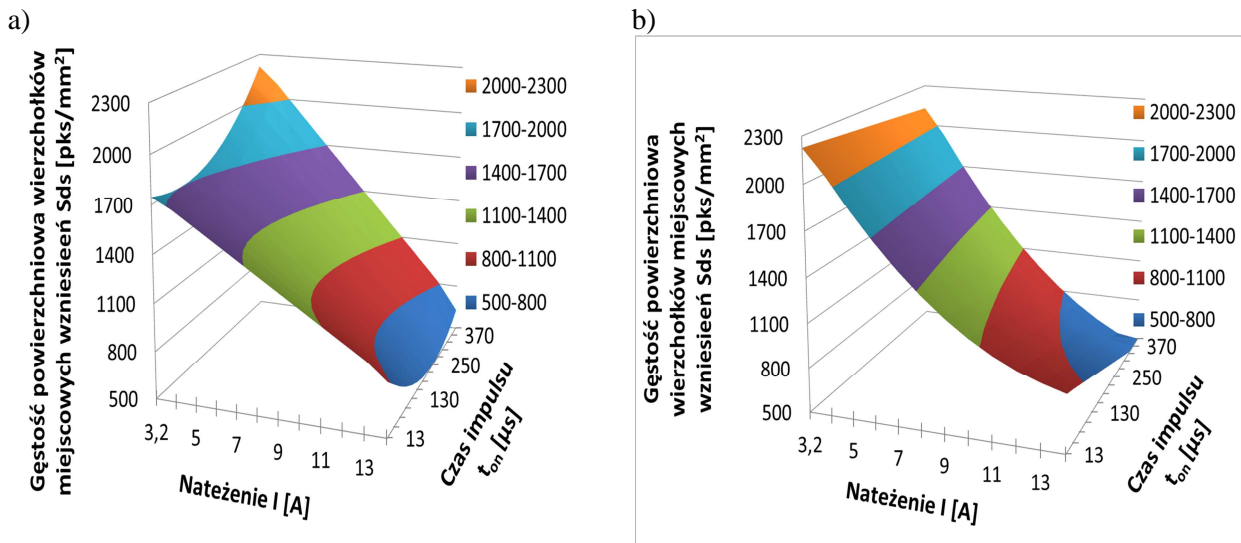
Rys. 4. Zależność chropowatości powierzchni  $Sa$  od czasu impulsu  $t_{on}$  i natężenia prądu  $I$  przy stałym czasie przerwy  $t_{off} = 80\mu s$ , materiał elektrody: a) miedz M1E, b) grafit POCO EDM-3

Fig. 4. The dependence of surface roughness  $Sa$  from pulse time  $t_{on}$  and the current  $I$  at constant time break  $t_{off} = 80\mu s$ , the electrode material: a) copper M1E, b) graphite POCO EDM-3



Rys. 5. Zależność podziałki profilu  $Rsm$  od: czasu impulsu  $t_{on}$  i natężenia prądu  $I$  przy stałym czasie przerwy  $t_{off} = 80\mu s$ , materiał elektrody: a) miedz M1E, b) grafit POCO EDM-3

Fig. 5. The dependence of profile scale  $Rsm$  from pulse time  $t_{on}$  and the current  $I$  at constant time break  $t_{off} = 80\mu s$ , the electrode material: a) copper M1E, b) graphite POCO EDM-3



Rys. 6. Zależność gęstości powierzchniowej wierzchołków miejscowych wzniesień  $Sds$  od czasu impulsu  $t_{on}$  i natężenia prądu  $I$  przy stałym czasie przerwy  $t_{off} = 80\mu s$ , materiał elektrody: a) miedź M1E, b) grafit POCO EDM-3

Fig. 6. The dependence of surface density of the local hill tops  $Sds$  from pulse time  $t_{on}$  and the current  $I$  at constant time break  $t_{off} = 80\mu s$ , the electrode material: a) copper M1E, b) graphite POCO EDM-3

Parametry wysokościowe chropowatości (np.  $Sa$  – rys. 4) w głównej mierze uzależnione są od wartości energii wyładowania elektrycznego. Nie są to jednak zależności wprost proporcjonalne. Przy niewielkich wartościach natężenia prądu, rzędu 3 A, zwiększanie czasu wyładowania, a tym samym energii, nie powoduje znaczącego wzrostu parametru  $Sa$ . Może mieć to związek z ilością energii cieplnej wytworzonej i dostarczonej do materiału obrabianego w procesie wyładowania, zależnej od wartości natężenia prądu. Zastosowanie w procesie obróbki, elektrody grafitowej o bardzo małej wielkości ziarna (POCO EDM 3 – wielkość ziarna  $< 5\ \mu m$ ) nie wpłynęło w sposób istotny na zmianę parametrów wysokościowych chropowatości, w tym  $Sa$ , w porównaniu z elektrodą miedzianą.

Podziałka profilu  $Rsm$  (rys. 5) oraz parametry wzdłużne chropowatości wzrastają wraz z wzrostem energii wyładowania. Również w tym przypadku wpływ materiału elektrody roboczej na wartość podziałki jest nieznaczący. Różnice w otrzymanych zależnościach wynikają z wyższego stopnia korelacji równania regresji dla elektrody grafitowej.

Gęstość powierzchniowa wierzchołków miejscowych wzniesień  $Sds$  jest odwrotnieproporcjonalna do wielkości energii impulsu, wraz ze wzrostem energii zmniejsza się gęstość  $Sds$  (rys. 6).

#### 4. PODSUMOWANIE

Opracowany tor pomiarowy pozwolił na wyznaczenie charakterystyk zasilacza obrabiarki niezbędnych do prawidłowego doboru parametrów realizowanych w ramach



planowanego eksperymentu, stabilnych w całym obszarze zmienności. Wyznaczone równania regresji uzależnione od rzeczywistych parametrów obróbki (zmierzonych) charakteryzują się wysokim stopniem korelacji tj. małym rozrzutem wartości. Wykazują one, że głównymi czynnikami wpływającymi na strukturę geometryczną powierzchni po EDM jest natężenie prądu i czas trwania impulsu, przy ustalonych pozostałych parametrach obróbki. Zastosowany materiał elektrody roboczej, jakim była miedź i grafit, nie wpływa znacząco na zmianę parametrów SGP. Uzyskane równania mogą być wykorzystane w procesie projektowania technologii obróbki EDM jako wytyczne doboru parametrów, w celu uzyskania pożądaných cech jakościowych SGP. Pozostałe wyniki badań zostaną przedstawione w następných artykułach.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008 – 2012 jako projekt badawczy.*

#### LITERATURA

- [1] MIERNIKIEWICZ A., 2000, *Doświadczalno - teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM)*, Monografia, Kraków.
- [2] RUSZAJ A., GRZEŚ W., 2012, *Manufacturing of sculptured surface using EDM and ECM processes*, Machining of Complex Sculptured Surfaces, Springer – Verlag, London.
- [3] NOWICKI B., 2007, *Zaawansowane metody opisów i pomiarów struktury geometrycznej powierzchni*, Mechanik, 80/1, 36-41.
- [4] Yu Z.Y., KOZAK J., RAJURKAR K., 2003, Modelling and Simulation of Micro EDM Process, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 52, 143-146.
- [5] PEROŃCZYK J., 2008, *Obróbka elektroerozyjna kompozytów na osnowie metalowej i ceramiki techniczne*, Rozprawa doktorska, Warszawa.
- [6] KURTH J. P., VAN HUMBEECK J., STEVENS L., 1995, *Micro structural investigation and metallographic analysis of the white layer of a surface machined by electrodischarge machining*, ISEM XI, Losanna, 849 – 862.
- [7] OCZOŚ K., LIUBIMOV V., 2008, *Struktura geometryczna powierzchni*, Rzeszów.
- [8] KORZYŃSKI M., 2006, *Metodyka eksperymentu, planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa.

#### GEOMETRICAL STRUCTURE OF THE SURFACE AFTER EDM USING GRAPHITE AND COPPER ELECTRODE – COMPARISON

The paper presents the influence of the amplitude of  $I$ , pulse time  $t_{on}$ , the time break  $t_{off}$ , and the type of working electrode material: copper, graphite, on the surface layer parameters after EDM. Research was carried out by an planned experiment three-level Box Behnken. The developed data acquisition circuit allowed the determination of the characteristics of AC machines necessary for the proper selection of parameters implemented in the planned experiment (stable in the whole area of variation). Developed regression equations depend on the real measured parameters are characterized by a high degree of correlation. They show that the main factors affecting the geometrical structure of the surface after EDM is the current intensity and pulse duration (at fixed other parameters of treatment). Used in the processes of EDM electrode material (copper, graphite) does not significantly change the parameters of the SGP.