

**Maria Trzaska<sup>1</sup>**

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

**Jan Perończyk<sup>2</sup>**

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Technologii Maszyn, al. Niepodległości 222, 00-663 Warszawa

**Dionizy Biało<sup>3</sup>**

Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Inżynierii Precyzyjnej i Biomedycznej, ul. św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa

## WPLÝW PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH OBRÓBKII ELEKTROEROZYJNEJ NA STAN POWIERZCHNI KOMPOZYTÓW ALUMINIOWYCH

Praca dotyczy wysokowydajnej obróbki elektroerozyjnej (EDM) kompozytu aluminiowego za pomocą obrabiarki, wyposażonej w generator tranzystorowy. Kompozyt o osnowie Al+20%Si+3%Cu+1%Mg z fazą zbrojącą w postaci cząstek SiC wytworzono z proszków metodą wyciskania na gorąco. Faza zbrojąca o przeciętnym wymiarze cząstek 7  $\mu\text{m}$  stanowiła 5% objętości w kompozycie. Badano wpływ następujących parametrów elektrycznych na przebieg obróbki i stan powierzchni po obróbce: amplitudy prądu w impulsie  $I$  w zakresie 4+16 A, czasu trwania impulsu  $t_i$  w zakresie 32+500  $\mu\text{s}$  i współczynnika wypełnienia impulsu  $\eta$  w zakresie 0,4+0,8. Wykazano, że wydajność obróbki  $V_w$  jest tym większa, im większe są wartości prądu i wypełnienia impulsu  $\eta$ . Wpływ czasu trwania impulsu  $t_i$  na wydajność występuje dopiero dla dużych wartości prądu  $I$  - wydajność  $V_w$  rośnie dla małych wartości  $t_i$ . Określono wpływ parametrów elektrycznych EDM na chropowatość powierzchni. Parametry chropowatości  $R_a$  i  $R_z$  są największe przy dużych prądach  $I$  i dużym wypełnieniu impulsu  $\eta$ . Ponadto występuje wzrost chropowatości dla dłuższych czasów  $t_i$ . Stan powierzchni po obróbce EDM oceniano na podstawie analizy powierzchni za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego i na podstawie mikroanalizy rentgenowskiej wybranych obszarów powierzchni. Stwierdzono, że na powierzchni kompozytu po obróbce występują obszary po nadtopieniu materiału i kraterki po wyerodowanym materiale. Ich rozmiary zależą od elektrycznych parametrów obróbki EDM. Stwierdzono, że warstwa powierzchniowa kompozytu po obróbce ulega wzbogaceniu w węgiel pochodzący z rozkładu nafty stosowanej w procesie jako dielektryk. Badania porównawcze kompozytu i materiału osnowy wykazały, że wydajność obróbki elektroerozyjnej osnowy przewyższa wydajność obróbki kompozytu o 6+10%.

Słowa kluczowe: obróbka elektroerozyjna, kompozyty aluminiowe, mikrogeometria powierzchni

## INFLUENCE OF ELECTRICAL PARAMETERS OF ELECTRODISCHARGE MACHINING ON STATE OF ALUMINIUM MATRIX SURFACE

The paper deals with problems of high efficiency electrodischarge machining (EDM) of aluminium composites with using a transistor generator. The composite with Al+20%Si+3%Cu+1%Mg matrix and with SiC particle reinforcements were manufactured by a powder metallurgy method using hot extrusion. The reinforcing phase exhibited an average granularity of 7  $\mu\text{m}$  and volume fraction of 5% in the composite. The influence of the following electrical parameters during the machining course and state of the surface after machining were estimated: amplitude of the current in pulse  $I$  in the range of 4+16A, duration time of the pulse  $t_i$  in the range of 32+500  $\mu\text{s}$  and filling pulse coefficient  $\eta$  in the range of 0.4+0.8. It was stated, that productivity of EDM is higher if higher is value of current  $I$  and pulse filling coefficient  $\eta$  (Fig. 2). The influence of the pulse duration  $t_i$  on the productivity, occurs only for higher current value  $I$  - productivity  $V_w$  grows for small  $t_i$  (Fig. 3). The roughness of the surface was investigated as a function of EDM electrical parameters. Roughness parameters  $R_a$  and  $R_z$  are highest for the higher current values  $I$  (Fig. 4) and grows for higher pulse filling coefficient  $\eta$  (Fig. 5). Moreover a roughness growth for longer time  $t_i$  was observed (Fig. 5). State of the composite surface after EDM machining was estimated as a result of scanning microscope images investigations - Figures 6 and 7 and of microanalyse probes for selected areas of surface. It has been noticed that small solid remelted areas of material and small craters after eroded material occurred on the composite surface after machining. Their dimensions also depend on electrical parameters of EDM machining. Composite surface is enriched in carbon from the decomposed kerosene used as a dielectric during machining (Tab. 1). Comparative research of the composite material and matrix material shows that productivity of electrodischarge machining of the matrix is higher than productivity of composite machining by about 6+10%.

Key words: electrodischarge machining, aluminium matrix composite, surface microgeometry

## WPROWADZENIE

Elementy konstrukcyjne z materiałów kompozytowych o osnowie metalowej umocnionej cząstkami ceramicznymi wymagają stosowania obróbek ubytkowych w

celu nadania ostatecznych kształtów i zapewnienia wymaganych tolerancji wymiarowych. Najbardziej popularna obróbka - przez skrawanie - przebiega z wieloma

<sup>1</sup> dr hab. inż., prof. PW, <sup>2</sup> mgr inż., <sup>3</sup> dr hab. inż.

trudnościami [1, 2]. Twarde cząstki zbrojące powodują intensywne zużycie ściernie narzędzi skrawających. Do obróbki kompozytów stosowane są więc narzędzia z węglików spiekanych, ze specjalnych ceramiek, diamentowe lub narzędzia z powłokami o dużej odporności na zużycie. Do kształtowania wyrobów z kompozytów metalowych umacnianych twardymi cząstkami ceramicznymi podejmowane są próby stosowania obróbek elektroerozyjnych: ultradźwiękowych, laserowych, elektrochemicznych, strumieniem wody [3, 4]. Jedną z bardziej efektywnych jest obróbka elektroerozyjna (EDM), w której erozja materiału przebiega podczas elektrycznych wyładowań pomiędzy elektrodą i materiałem obrabianym [5, 6].

Obróbkę EDM realizuje się za pomocą specjalnych obrabiarek wyposażonych w generatory impulsów elektrycznych o ściśle ustalonych parametrach. Stosowanych jest wiele typów generatorów, między innymi RLC i tranzystorowe. Pierwszy z nich zalecany jest zwłaszcza do obróbki wykańczającej, zaś drugi najczęściej do obróbki kształtującej z dużą wydajnością.

Badania obróbki EDM kompozytów aluminiowych za pomocą obrabiarek wyposażonych w generator RLC wykazały [7], że obecność ceramicznych cząstek zbrojących ma wpływ na zmniejszenie wydajności obróbki, co wiąże się bezpośrednio z właściwościami cząstek ceramicznych, ich wysoką temperaturą topnienia oraz małymi przewodnościami: elektryczną i cieplną.

Prezentowana praca dotyczy wysoko wydajnej obróbki elektroerozyjnej kompozytów aluminiowych zbrojonych cząstkami SiC za pomocą obrabiarek wyposażonych w generator tranzystorowy. Podjęto w niej próbę określenia wpływu parametrów elektrycznych obróbki EDM na stan powierzchni po obróbce, jej chropowatość, topografię, zmiany składu chemicznego, a także na wydajność obróbki.

## MATERIAŁY STOSOWANE W BADANIACH

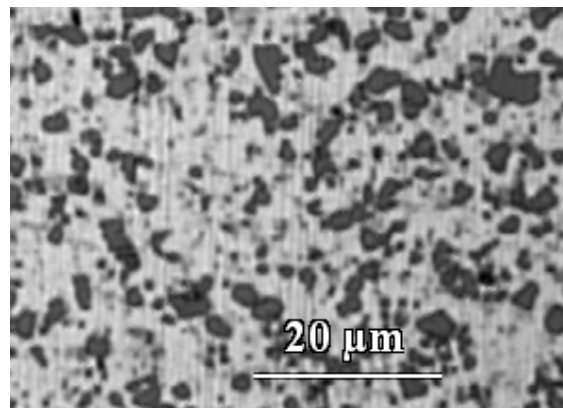
Badaniom poddany został kompozyt wytworzony metodą metalurgii proszków. Na jego osnowę zastosowano rozpylany proszek stopowy o składzie Al+20%Si+3%Cu+1%Mg produkcji japońskiej firmy Showa Denko. Fazą zbrojącą był proszek SiC o średnim wymiarze cząstek 7  $\mu\text{m}$ . Udział fazy ceramicznej w kompozycie wyniósł 5% objętości.

Proces wytwarzania kompozytu obejmował mieszanie odważonych porcji proszku osnowy i fazy zbrojącej, prasowanie wstępne kształtek, wyciskanie na gorąco kompozytowych prętów w temperaturze 400°C przy redukcji 20:1. Zastosowany proces wytwarzania zapewniał równomierne rozmieszczenie cząstek zbrojących w osnowie i pełne (tj. 100%) zagęszczenie materiału.

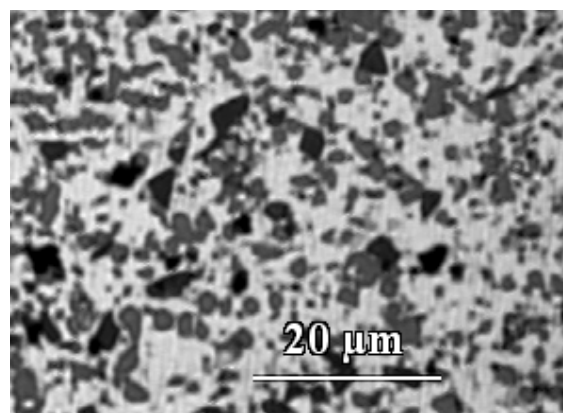
W celach porównawczych obróbce EDM poddano również materiał osnowy (bez cząstek zbrojących)

wytwarzany w takich samych warunkach jak materiał kompozytowy. Mikrostruktury obu materiałów przedstawiono na rysunku 1.

a)



b)



Rys. 1. Mikrostruktury badanych materiałów: a) materiał osnowy, b) kompozyt

Fig. 1. Microstructure of tested materials: a) matrix material, b) composite material

## OBRÓBKĄ ELEKTROEROZYJNA

Obróbkę elektroerozyjną prowadzono za pomocą obrabiarki EDEA-25 produkcji krajowej wyposażonej w generator tranzystorowy. Parametry elektryczne obróbki były następujące:

- napięcie zasilania  $U_o$  100 V,
- napięcie robocze  $U_r$  50 V,
- amplituda prądu w impulsie  $I$  4÷16 A,
- czas trwania impulsu  $t_i$  32÷500  $\mu\text{s}$ ,
- czas przerwy pomiędzy impulsami  $t_o$  8÷750  $\mu\text{s}$ ,
- współczynnik wypełnienia impulsu  $\eta$  0,4÷0,8

$$\text{gdzie: } \eta = \frac{t_i}{t_i + t_o}$$

Generator formuje impulsy napięciowe i prądowe o przebiegach prawie prostokątnych.

Próbki poddawane obróbce miały kształt walców o średnicy 20 mm. Obróbkę prowadzono na powierzchni czołowej próbek elektrodą z miedzi elektrolitycznej M1E o średnicy 26 mm [7]. Badania prowadzono wg zasad eksperymentu planowanego w oparciu o plan Recht-

schaffnera PS/DS-P [8]. Przyjęto eksperyment 3-czynnikowy, trójpoziomowy.

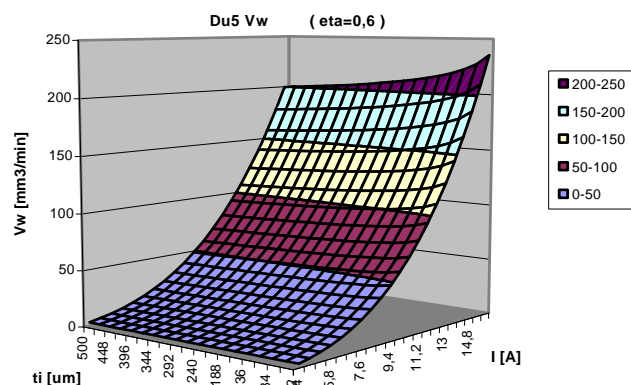
W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczano następujące wielkości:

- wydajność obróbki  $V_w$  wyrażoną objętością usuwanego materiału w jednostce czasu ( $\text{mm}^3/\text{min}$ ),
- chropowatość powierzchni obrobionych  $R_a$  i  $R_z$  ( $\mu\text{m}$ ),
- skład warstwy wierzchniej,
- topografie powierzchni po obróbce.

Ponadto określono zależności  $V_w$ ,  $R_a$  oraz  $R_z$  od  $I$ ,  $t_i$ ,  $\eta$ ,  $t_o$  i ustalono dla nich funkcje regresyjne.

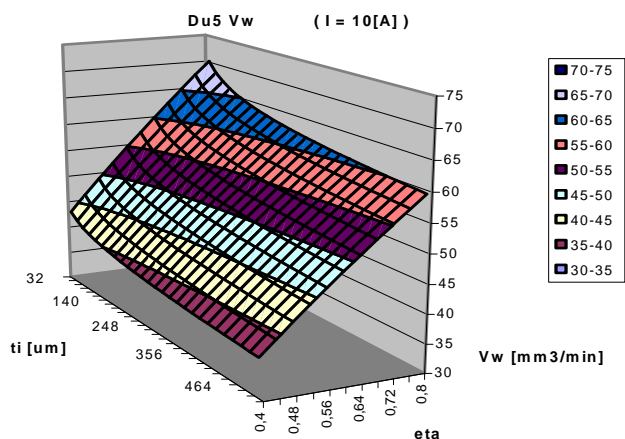
### WYNIKI BADAŃ

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono zależność wydajności procesu od zastosowanych parametrów obróbki dla materiału kompozytowego. Przy ustalonej wartości współczynnika wypełnienia  $\eta$  wzrost wartości amplitudy prądu  $I$  powoduje intensywny wzrost wydajności obróbki  $V_w$  (rys. 2). Natomiast czas trwania impulsu  $t_i$  wpływa w stopniu znacznie mniejszym na wydajność, co jest obserwowane dopiero w zakresie większych wartości amplitudy prądu.



Rys. 2. Zależność wydajności  $V_w$  od prądu obróbki  $I$  oraz czasu impulsu  $t_i$  dla  $\eta = 0,6$

Fig. 2. Relationship between process productivity  $V_w$ , and current  $I$  and pulse time  $t_i$  at  $\eta = 0.6$

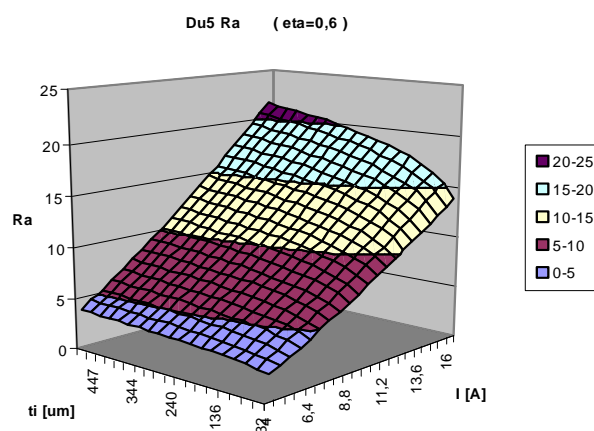


Rys. 3. Zależność wydajności obróbki  $V_w$  od czasu impulsu  $t_i$  i współczynnika wypełnienia  $\eta$  dla  $I = 10 \text{ A}$

Fig. 3. Relationship between process productivity  $V_w$ , and pulse time  $t_i$  and coefficient  $\eta$  for  $I = 10 \text{ A}$

Przy ustalonej wartości amplitudy prądu  $I$  wydajność obróbki  $V_w$  zależy przede wszystkim od współczynnika wypełnienia impulsu  $\eta$  (rys. 3), a więc pośrednio od czasu przerw między impulsami  $t_o$ . Zmiana wartości  $\eta$  od 0,4 do 0,8 wywołuje niemal dwukrotny wzrost wydajności obróbki.

Przeprowadzone badania dla materiału osnowy wykazały występowanie takich samych zależności jak dla kompozytu. Natomiast wydajność obróbki  $V_w$  materiału osnowy jest większa o 6÷10% od wydajności obróbki materiału kompozytowego.

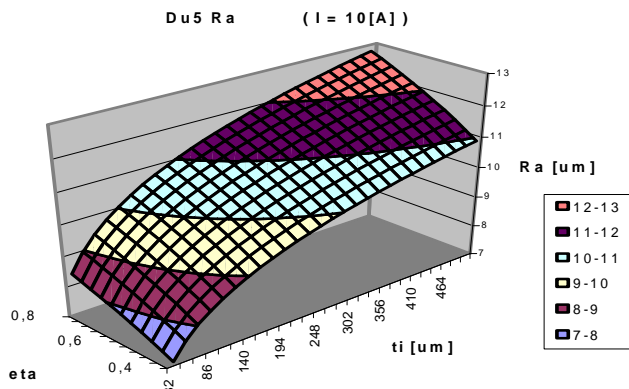


Rys. 4. Wpływ prądu obróbki  $I$  i czasu impulsu  $t_i$  na parametr chropowatości  $R_a$  przy  $\eta = 0,6$

Fig. 4. Influence of current  $I$  and pulse time  $t_i$  on roughness  $R_a$  at  $\eta = 0.6$

Zmiany chropowatości powierzchni kompozytów w zależności od stosowanych parametrów obróbki elektroerozyjnej przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Parametr chropowatości  $R_a$  zwiększa się niemal liniowo ze wzrostem amplitudy prądu  $I$  (rys. 4).

Wpływ czasu trwania impulsu  $t_i$  na parametr  $R_a$  jest niewielki w zakresie małych amplitud prądu  $I$ . Dla dużych wartości  $I$  wpływ tego parametru obróbki jest znaczący - występuje wyraźny wzrost chropowatości dla dłuższych czasów trwania impulsu, co przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wpływ czasu impulsu  $t_i$  i współczynnika  $\eta$  na parametr chropowatości  $R_a$  przy  $I = 10$  A

Fig. 5. Influence of pulse time  $t_i$  and coefficient  $\eta$  on roughness parameter  $R_a$  for  $I = 10$  A

Przy ustalonej wartości amplitudy prądu  $I$  na chropowatość wpływa także współczynnik wypełnienia impulsu  $\eta$ . Wzrost wartości  $\eta$  skutkuje wzrostem parametru chropowatości  $R_a$ .

Dane pokazane na rysunkach 2-5 pozwalają na stwierdzenie, że parametry obróbki  $I$  i  $\eta$  wpływają na równoczesny wzrost wydajności  $V_w$  i na chropowatość powierzchni. Natomiast wpływ czasu trwania impulsu  $t_i$  nie jest tak jednoznaczny. Ze wzrostem wartości  $t_i$  wzrasta chropowatość powierzchni obrabianej i równocześnie w niewielkim stopniu zmniejsza się wydajność obróbki.

Przeprowadzone badania chropowatości powierzchni materiału kompozytowego i materiału osnowy nie wykazały istotnych różnic. Zarówno parametr  $R_a$ , jak też parametr  $R_z$  przyjmował zbliżone wartości, gdy obróbka elektroerozyjna przebiegała przy takich samych wartościach parametrów elektrycznych. Wpływ parametrów elektrycznych obróbki na wielkość  $R_z$  określającą wysokość chropowatości jest taki sam jak ich wpływ na  $R_a$ . Wartości  $R_z$  przewyższają jednak wartości  $R_a$  5÷7 razy.

W zrealizowanych badaniach wyznaczono również funkcyjne zależności regresyjne wydajności i parametrów chropowatości od elektrycznych parametrów obróbki. Dla badanego kompozytu mają one następującą postać:

$$V_w = 0,10065 \cdot I^{3,002} \cdot t_i^{-0,061} \cdot \eta^{0,693}, \text{ mm}^3/\text{min}$$

$$R_a = 0,2898 \cdot I^{1,249} \cdot t_i^{0,155} \cdot \eta^{0,227}, \text{ } \mu\text{m}$$

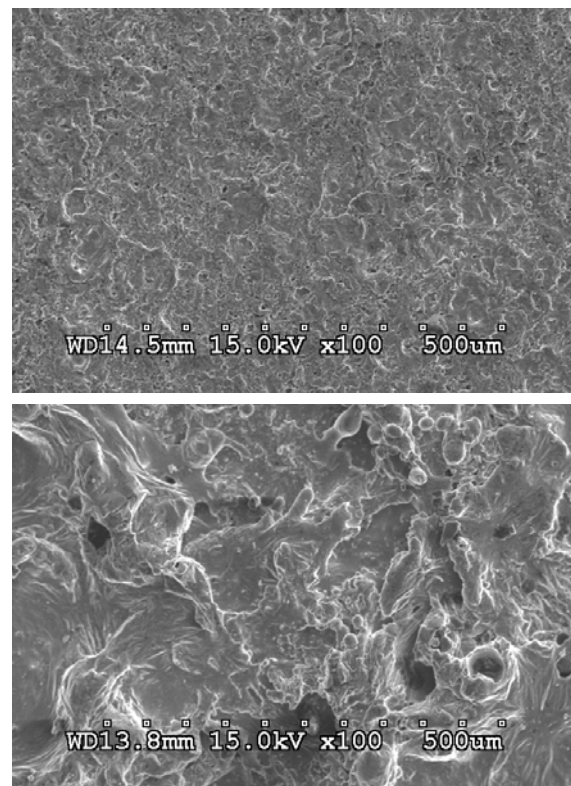
$$R_z = 2,655 \cdot I^{1,025} \cdot t_i^{0,179} \cdot \eta^{0,222}, \text{ } \mu\text{m}$$

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono obrazy wybranych powierzchni kompozytu po obróbce EDM. Rysunek 6 dotyczy powierzchni obrabianych przy skrajnych wartościach amplitudy prądu 4 i 16 A dla ustalonych wartości  $\eta$  i  $t_i$ . Dla dużej wartości  $I$  na powierzchni występują duże nadtopione nierówności i płaskie obszary stanowiące zagłębienia po usunięciu, na skutek wyładowań elektrycznych, materiale. Wartość średnia parametru  $R_a$

wynosi 17,6  $\mu\text{m}$ . Natomiast dla małych wartości prądu  $I = 4$  A nierówności powierzchni są dużo mniejsze, a średnia wartość  $R_a$  wynosi 1,86  $\mu\text{m}$ .

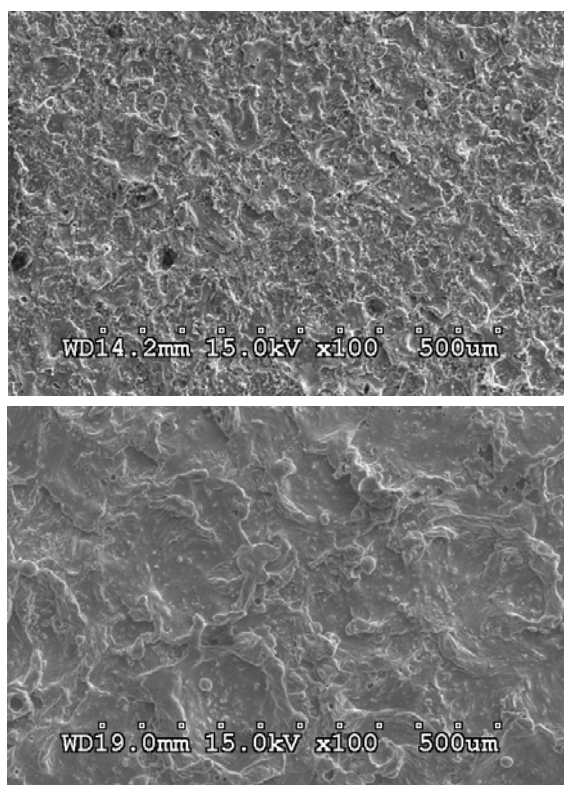
Wpływ czasu  $t_i$  na topografię powierzchni przedstawiono na rysunku 7. Obróbkę prowadzono przy ustalonych wartościach:  $I = 10$  A,  $\eta = 0,6$ . Dla mniejszych czasów trwania impulsów  $t_i = 32$  ms nierówności powierzchni są drobniejsze i gęściej rozmieszczone (rys. 7a) niż dla czasu trwania impulsu  $t_i = 500$  ms (rys. 7b).

Powierzchnie kompozytu po obróbce poddano mikroanalizie rentgenowskiej dla określenia ewentualnych zmian składu chemicznego wywołanego obróbką. W tabeli 1 zamieszczono wyniki takiej analizy w dwóch charakterystycznych miejscach, tj. na wierzchołku przetopionej nierówności i na obszarze wgłębienia po usuniętym materiale.



Rys. 6. Topografia powierzchni kompozytu po obróbce EDM przy  $\eta = 0,6$  i  $t_i = 500$  ms i różnych amplitudach prądu: a)  $I = 4$  A, b)  $I = 16$  A

Fig. 6. SEM morphology of the composite surfaces after EDM at: a) current  $I = 4$  A, b) current  $I = 16$  A, for  $\eta = 0,6$  and  $t_i = 500$  ms



Rys. 7. Topografia powierzchni kompozytu po obróbce EDM przy: a)  $t_i = 32 \mu\text{s}$ , b)  $t_i = 500 \mu\text{s}$ , dla  $I = 10 \text{ A}$ ,  $\eta = 0,6$

Fig. 7. SEM morphology of the composite surfaces after EDM at: a) pulse time  $t_i$  of  $32 \mu\text{s}$ , b) pulse time  $t_i$  of  $500 \mu\text{s}$ , for  $I = 10 \text{ A}$  and  $\eta = 0.6$

TABELA 1. Skład materiału warstwy wierzchniej kompozytu, % atom.

TABLE 1. Composition of the material of upper layer of the composite, atom. %

Pierwiastek <i>Element</i>	Nierówność <i>Protrusion</i>	Wgłębienie <i>Cavity</i>
Al	55,59	64,11
Si	16,73	21,81
Cu	1,69	1,48
C	23,95	8,76
O	2,04	3,36

b) Występujący w warstwie wierzchniej węgiel jest produktem rozkładu nafty stosowanej jako dielektryk w procesie obróbki. Zawartość węgla na wierzchołkach nierówności, a także w produktach erozji jest dużo większa niż we wgłębieniach po usuniętym materiale.

## WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań procesu obróbki elektroerozyjnej (EDM) kompozytu aluminiowego i materiału osnowy z wykorzystaniem generatora tranzystorowego umożliwiają sformułowanie następujących wniosków:

1. Znaczącą rolę w obróbce spełnia racjonalny dobór parametrów elektrycznych. Wydajność obróbki zale-

ży przede wszystkim od amplitudy prądu  $I$  i współczynnika wypełnienia impulsu  $\eta$ . Wpływ czasu trwania impulsu  $t_i$  na wydajność obróbki uwidacznia się dopiero w zakresie większych wartości amplitudy prądu. Wydajność obróbki rośnie dla małych wartości  $t_i$ .

2. Chropowatość powierzchni po obróbce jest tym większa, im większą zastosowano amplitudę prądu i większy współczynnik  $\eta$ . Ponadto zauważa się wyraźny wzrost chropowatości dla dłuższych czasów trwania impulsu  $t_i$ .

3. Warstwa wierzchnia kompozytu ulega podczas obróbki wzbogaceniu w węgiel pochodzący z rozkładu dielektryka. Zawartość węgla na występkach nierówności powierzchni przewyższa zawartość węgla we wgłębieniach po wyerodowanym materiale.

*Praca wykonana w ramach projektu KBN 4T08C 060 24.*

## LITERATURA

- [1] Jankowiak M., Kawalec M., Król G., Skrawność ostrzy narzędzi podczas toczenia stopów aluminium wzmocnianych cząstkami  $Al_2O_3$ , ZN Politechniki Rzeszowskiej 1995, 133, Mechanika 44.
- [2] Cronjaeger L., Meister D., Machining fibre and particle reinforced aluminium, Annals of the CIPR 1992, 41, 1, 63-66.
- [3] Monaghan J., Factors affecting the machinability of Al/SiC metal-matrix composites, Key Engineering Materials 1998, 138-140, 545-574.
- [4] Srivatsan T.S., Sudorhan T.S., Lavernia E.J., Processing of discontinuously-reinforced metal matrix composites, Progress and Materials Science 1995, 39, 317-409.
- [5] Masaki T., Kawaka K., Misutani T., Shibuya A., Mazuzawa T., Micro-electro-discharge machining, Proc. IX Int. Symp. for Electro-Machining, ISEM-9, Nagoya 1989, 26-30.
- [6] Perończyk J., Biało D., Wybrane problemy obróbki elektroerozyjnej kompozytów aluminiowych, Kompozyty (Composites) 2001, 1, 2, 211-214.
- [7] Trzaska M., Biało D., Perończyk J., Struktura geometryczna na powierzchni kompozytów aluminiowych po obróbce elektroerozyjnej, Kompozyty (Composites) 2004, 11, 4, 278-283.
- [8] Polański Z., Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa 1984.

Recenzent  
Jan Ryszard Dąbrowski