

Jan Perończyk¹

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

Dionizy Biało², Marek Oleczek³

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

BADANIA WPŁYWU WIELKOŚCI CZĄSTEK ZBROJĄCYCH NA PRZEBIEG OBRÓBKĘ ELEKTROEROZYJNEJ KOMPOZYTÓW ALUMINIOWYCH

Praca dotyczy problemów obróbki elektroerozyjnej (EDM) kompozytów na osnowie Al-20%Si-5%Fe-3%Cu-1%Mg. Kompozyty wytworzono metodą metalurgii proszków. Jako fazę zbrojącą zastosowano cząstki Al_2O_3 w ilości 10% obj. Cząstki miały nieregularny kształt. Ich ziarnistość wynosiła 3, 9, 23 i 53 μm . Obróbkę EDM prowadzono z zastosowaniem obrabiarki elektroerozyjnej wyposażonej w generator RLC przy różnych wartościach energii wyładowań zmieniającej się w zakresie 0,044-2,268 mJ. Określano wydajność obróbki V_w i chropowatość R_a powierzchni po obróbce. Wykazano, że dominującym parametrem wpływającym na przebieg obróbki EDM jest energia wyładowań elektrycznych E_i . Ze wzrostem E_i wzrosła wydajność V_w , a także chropowatość powierzchni kompozytów. Największą wydajność obróbki EDM wśród wszystkich badanych materiałów osiągnięto dla materiału osnowy. Budowa kompozytów ma także wpływ na przebieg obróbki EDM. Wraz ze wzrostem wielkości ziarna fazy zbrojącej wydajność V_w ulega zmniejszeniu o kilkanaście procent. Chropowatość powierzchni po obróbce jest tym większa, im większe są wymiary cząstek fazy zbrojącej.

Słowa kluczowe: kompozyty aluminiowe, obróbka elektroerozyjna, faza zbrojąca

INFLUENCE OF REINFORCING PARTICLE SIZE ON ELECTRODISCHARGE MACHINING OF ALUMINIUM MATRIX COMPOSITES

The paper deals with the problems of electrodischarge machining (EDM) of composites with Al-20%Si-5%Fe-3%Cu-1%Mg matrix. Composites were manufacturing by the powder metallurgy route in the process of cold isostatic compaction, degassing and hot extrusion. Aluminium alloy powder with above mentioned composition were gas atomized at high cooling rate of $10^4+10^6 K \cdot s^{-1}$. Powder particles have characteristic irregular rounded shape shown in Figure 1. Its size changes in broad range of 5-150 μm . As the reinforcing phase Al_2O_3 particles with average size of 3, 9, 23 and 53 μm were used. Samples had constant fraction of reinforcing phase - 10 by volume. Microstructure of the matrix powder and morphology of Al_2O_3 reinforcing phase are shown in Figures 2 and 3. After processing composites have homogenous structure with small silicon crystals, without porosity (Fig. 4). These composites are especially promising materials. This kind of light, temperature - resistant, wear - resistant, with low coefficient of thermal expansion has commercial potential for application in electrical equipment, automobile and aircraft industries. In Table 1 composite used in presented research is shown, its composition, hardness, UTS and coefficient of thermal expansion. Electrodischarge machining was performed using an EDEA-25 machine equipment with RLC generator. The generator had 6 modes of energy of single discharge. E_i in the range of 0.044 to 2.268 mJ, listed in Table 2. EDM machining was carried out in a free-system i.e. the diameter of the composite sample was the same that diameter of copper electrode. The main parameters determined after the machining was: volumetric productivity V_w (mm^3/min) and roughness of the machined surface expressed as R_a (μm). It was shown that energy of single discharge influence mainly on the EDM process running (Fig. 5). The higher was E_i , the higher were value of V_w . Influence of reinforcing particle size on V_w is not as strong. It was noticed that increasing particle granularity from 3 to 53 μm caused decreasing in process productivity 14 to 18% (Fig. 6). The highest productivity was for matrix material. Figure 7 shows how the discharge energy affects the surface roughness during EDM. The value of R_a increases as this energy increases. When the size reinforcing particles is growing roughness parameters R_a is also growing. Surface profilograms determined at the discharge energy of 2.268 mJ is shown in Figure 8. We can see that the higher reinforcing particle are in composites, the more rough is the surface after EDM.

Keywords: aluminium matrix composites, electrodischarge machining, reinforcement

WPROWADZENIE

Obróbka elektroerozyjna (elektro discharge machining - EDM) jest powszechnie stosowaną metodą kształtowania elementów z materiałów twardych, węglików spiekanych, hartowanych stali itp. Skutecznie

zastępuje szlifowanie jako sposób nadawania ostatecznego złożonego kształtu i dokładnych wymiarów takich elementów. EDM jest szczególnie przydatna przy

^{1, 3} mgr inż., ² dr hab. inż., prof. nadzw.

wykonywaniu małych (< 1 mm) otworów, podcięć i gniazd. Znajduje także zastosowanie przy obróbce kompozytów o osnowach metalowych. Jak wiadomo [1-3], faza zbrojąca w kompozytach stwarza znaczne trudności w tradycyjnej obróbce mechanicznej takich materiałów. Ziarna tej fazy wykonane zazwyczaj z twardej ceramiki mają ostre krawędzie i naroża. Podczas obróbki kompozytów występuje intensywne zużycie ostrzy narzędzi skrawających, nawet tych wykonanych z nowoczesnych materiałów narzędziowych. Obróbka elektroerozyjna stanowi więc alternatywny dla skrawania sposób obróbki kompozytów [4-6].

Przy EDM usuwanie materiału spowodowane jest wyładowaniami elektrycznymi w szczelinie roboczej pomiędzy elektrodą i obrabianym elementem. W miejscach wyładowań występuje wysoka temperatura szacowana na kilka tysięcy kelwinów [7]. W efekcie obrabiany materiał ulega lokalnie gwałtownemu topieniu i częściowemu parowaniu. Na skutek efektu implozyjnego (po pęknięciu pęcherzyka gazowego) drobiny roztopionego materiału zostają wyrzucone poza szczelinę roboczą w otaczający dielektryk, gdzie krzepną. Są to tzw. produkty erozji.

W przypadku metalowych kompozytów pewne utrudnienie wprowadzają nieprzewodzące prąd cząstki ceramiczne, np. Al_2O_3 . Cząstki takie charakteryzują się także wysoką odpornością termiczną. Jak wykazały wcześniejsze badania [8, 9], w których porównano przebieg obróbki elektroerozyjnej kompozytów i ich osnów bez cząstek zbrojących, wydajność EDM kompozytów jest zawsze mniejsza niż osnów. Istotnym czynnikiem wpływającym na wydajność obróbki jest także udział objętościowy fazy zbrojącej w kompozycie. Wzrost zawartości fazy zbrojącej z 2,5 do 20% spowodował 4-krotne zmniejszenie wydajności obróbki [10].

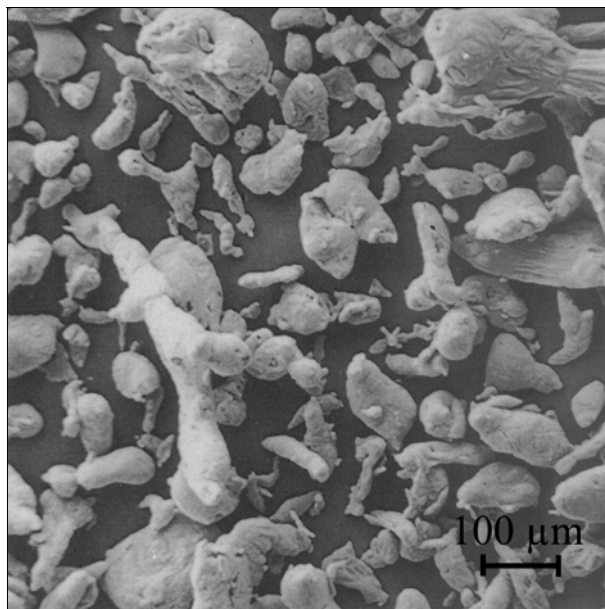
W prezentowanej pracy podjęto badania nad wpływem ziarnistości fazy zbrojącej w kompozytach na przebieg ich obróbki elektroerozyjnej. Jest to problem rzadko dostrzegany w specjalistycznej literaturze. W tym celu wytworzono kompozyt na osnowie stopu Al ze stałą 10% zawartością fazy zbrojącej Al_2O_3 o ziarnach 3, 9, 23 i 53 μm . Obróbkę prowadzono w tzw. układzie swobodnym.

MATERIAŁY KOMPOZYTOWE

Do badań zastosowano kompozyty wytworzone metodą metalurgii proszków.

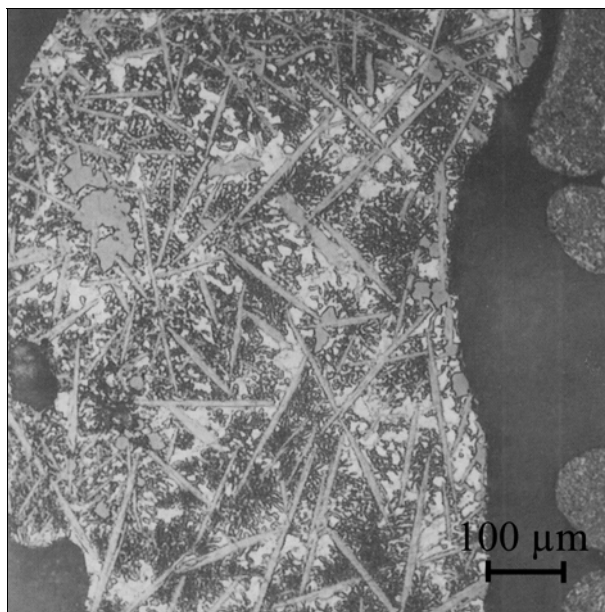
Na osnowę kompozytów użyto proszku stopowego Al-20%Si-5%Fe-3%Cu-1%Mg, produkcji japońskiej firmy Showa Denko. Proszek jest wytwarzany przez rozpylanie gazem ze stanu ciekłego. Rozpylanie odbywa się przy dużej szybkości studzenia $10^4 \div 10^6 K \cdot s^{-1}$.

Cząstki proszku mają charakterystyczny zaokrąglony i nieregularny kształt (rys. 1). Ich ziarnistość zmienia się w szerokim zakresie od kilku do ok. 150 μm . Mikrostruktura wybranej cząstki proszku jest pokazana na rysunku 2.



Rys. 1. Obraz skaningowy cząstek proszku ze stopu aluminiowego

Fig. 1. Scanning electron micrograph of air atomized aluminium alloy powder



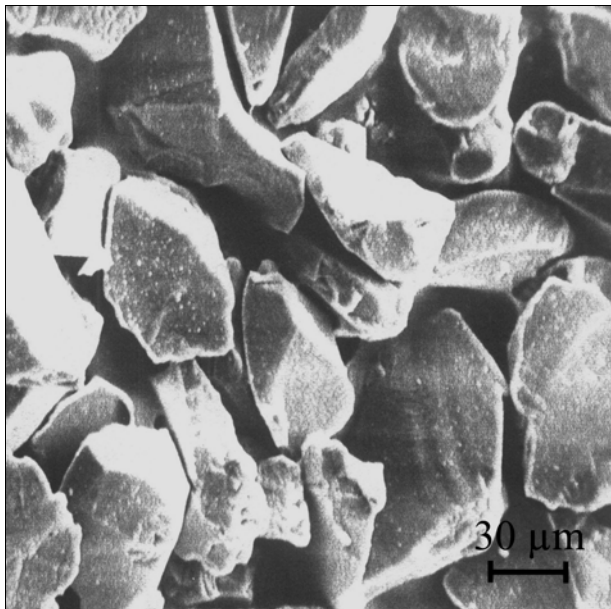
Rys. 2. Mikrostruktura szybko studzonego proszku użytego na osnowę kompozytów

Fig. 2. Microstructures of rapid cooled powder used for the composite matrix

W wyniku szybkiego studzenia w aluminiowej osnowie proszku występują bardzo drobne kryształy krzemu o wielkości mniejszej niż 6 μm i międzymetaliczne fazy Al-Si-Fe w postaci igieł. Jako fazę zbrojącą zastosowa-

no proszek Al_2O_3 (Abramax prod. LONZA) o średniej wielkości cząstek 3, 9, 23 i 53 μm .

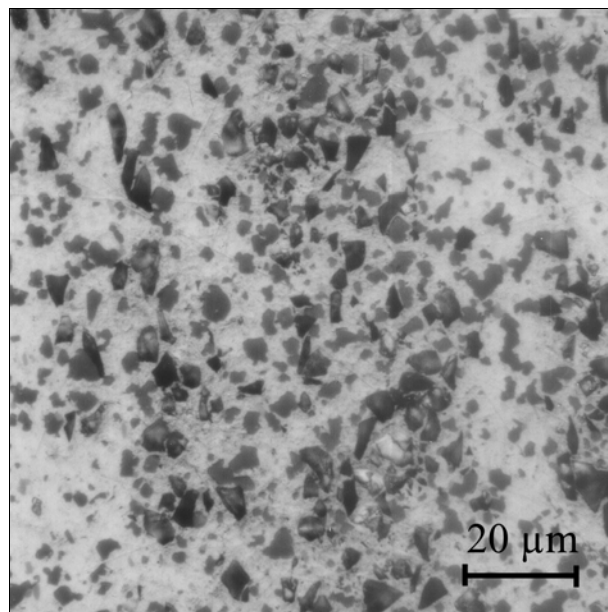
Cząstki proszku mają nieregularny kształt, ostre krawędzie i naroża (rys. 3). Udział objętościowy fazy zbrojącej był stały i wynosił 10% obj. Skład kompozytów podano w tabeli 1.



Rys. 3. Morfologia proszku Al_2O_3 o średniej wielkości ziarna 53 μm

Fig. 3. Morphology of Al_2O_3 powder with average size of 53 μm

Na rysunku 4 pokazano mikrostrukturę wybranego kompozytu. Materiał ma pełne 100% zagęszczenie i jednorodną budowę z równomiernie rozmieszczonymi kryształami krzemu (szare) i cząstkami Al_2O_3 (ciemne). Podczas wyciskania igłowa faza międzymetaliczna uległa pokruszeniu i rozproszeniu w osnowie materiału kompozytowego.



Rys. 4. Mikrostruktura kompozytu KF9

Fig. 4. Microstructure of KF9 composite

TABELA 1. Oznaczenia, skład i właściwości kompozytowych materiałów

TABLE 1. Code, composition and properties of composite materials

Oznaczenie materiałów	Osnowa	Faza zbrojąca Al_2O_3		Właściwości		
		Udział obj.	Wielkość ziarna μm	Twardość HRB	R_m MPa	α $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$
KF0		-	-		500	
KF3	Al + 20% Si + 5% Fe + 3% Cu + 1% Mg	10 %	3	98	357	17,4
KF9			9	103	453	15,7
KF23			23	101	466	15,4
KF53			53	102	396	15,1

Proces wytwarzania kompozytów obejmował:

- mieszanie odważonych porcji proszków osnowy i fazy zbrojącej,
- prasowanie izostatyczne na zimno przy ciśnieniu 350 MPa walcowych prętów ϕ 50 x 170 mm do gęstości względnej 75÷79%,
- odgazowanie w strumieniu przepływającego argonu w temperaturze 450°C przez 1,5 godziny,
- wyciskanie na gorąco kompozytowych prętów w temperaturze 420°C przy redukcji 20:1.

OBRÓBKA ELEKTROEROZYJNA

Obróbkę elektroerozyjną kompozytów prowadzono za pomocą obrabiarki EDEA-25 wyposażonej w generator RLC. Jako narzędzie zastosowano elektrodę miedzianą (z miedzi elektrolitycznej M1E), jako dielektryk zastosowano naftę kosmetyczną. Obróbkę prowadzono w tzw. układzie swobodnym [11], tzn. obrabiano czoło walcowej próbki kompozytowej czołem elektrody o takiej samej średnicy.

Stosowano następujące parametry obróbki: napięcie zasilania $U_0 = 250$ V i napięcie robocze $U_r = 180$ V oraz zmienną skokowo energię pojedynczego impulsu E_i . Wartości energii impulsów E_i zestawiono w tabeli 2.

TABELA 2. Wartości energii pojedynczych impulsów przy EDM

TABLE 2. Energy of single electrical discharge of EDM

Oznaczenie	E_i 1	E_i 2	E_i 3	E_i 4	E_i 5	E_i 6
Wartość, mJ	2,268	1,555	0,356	0,209	0,165	0,044

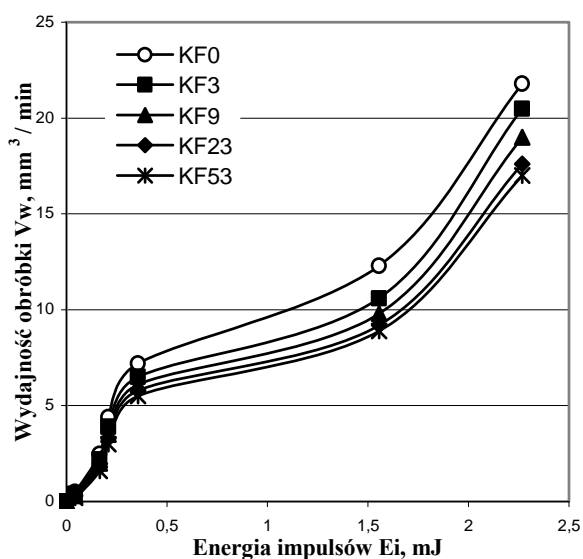
Podstawowym wskaźnikiem technologicznym EDM jest wydajność obróbki V_w , definiowana objętością usunianego materiału w jednostce czasu. W prezentowanych badaniach mierzono także chropowatość powierzchni

obrobionych. Do tego celu zastosowano profilometr skanujący FORM TALYSURF 2.

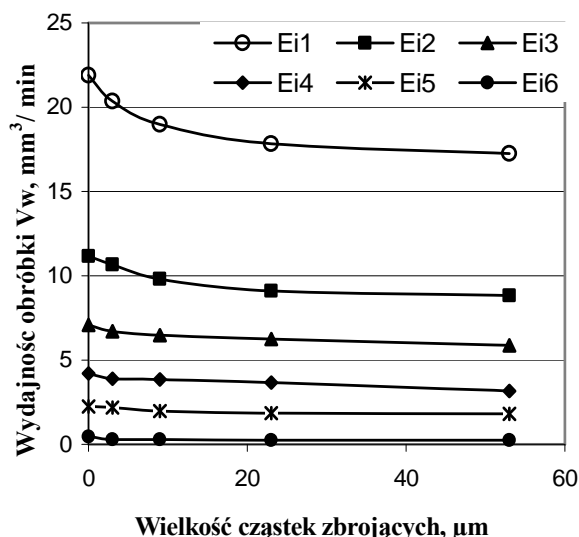
Określono wydajność obróbki V_w i parametr chropowatości R_a w funkcji energii impulsów i ziarnistości fazy zbrojącej.

WYNIKI BADAŃ

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wyniki badań wydajności obróbki dla materiału osnowy i czterech materiałów kompozytowych zawierających zbrojenie Al_2O_3 o różnej wielkości ziaren. Z rysunków wynika, że wydajność obróbki V_w silnie zależy od energii impulsów (wyładowań) i zgodnie z oczekiwaniami rośnie z ich wzrostem (rys. 5). Największe wartości V_w osiągnięto dla materiału osnowy. Tak więc obecność nieprzewodzących prądu cząstek ceramicznych w osnowie utrudnia obróbkę. Obserwuje się także wpływ wielkości cząstek Al_2O_3 na wydajność obróbki. Ze wzrostem wielkości cząstek zbrojenia w omawianym zakresie od 3 do 53 μm wydajność obróbki EDM zmniejsza się o 14÷18% (rys. 6).



Rys. 5. Zależność wydajności obróbki EDM od energii impulsów
Fig. 5. Dependence of EDM productivity and energy of discharges

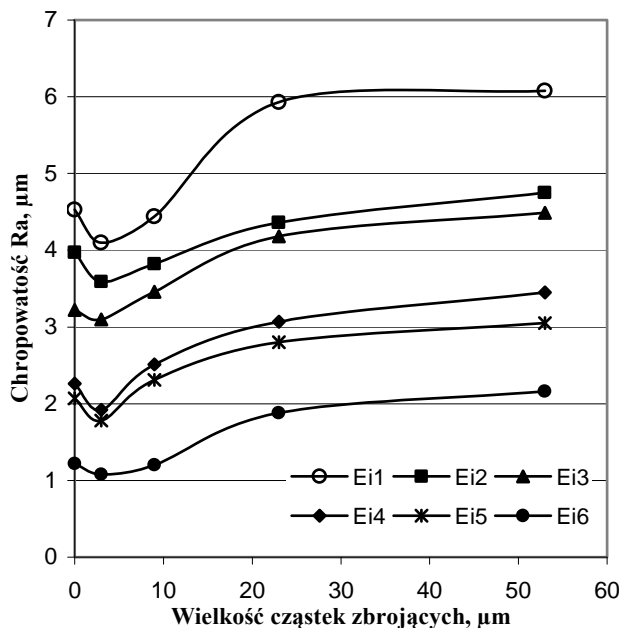


Rys. 6. Zależność wydajności obróbki od wielkości cząstek fazy zbrojącej dla różnej energii wyładowań

Fig. 6. The relationship between process productivity and reinforcing phase granularity for different energy of discharges

Podczas obróbki elektroerozyjnej efekt implozyjny (omówiony wcześniej) powoduje wrywanie z powierzchni materiału kompozytowego częściowo nadtopionych lub popękanych cząstek ceramicznych. To zjawisko przebiega trudniej w przypadku największych cząstek zbrojących, rzutuje to na mniejszą wydajność EDM.

Wyniki pomiarów chropowatości powierzchni po EDM przedstawiono na rysunku 7. Największą chropowatość mają próbki kompozytowe obrabiane przy największej energii wyładowań E_i 1. Wraz ze zmniejszaniem tego parametru chropowatość ulega zmniejszeniu. Tę zależność omówiono szczegółowo w publikacji [11], w której obrazy SEM powierzchni interpretowano jako zbiór mikrokraterów po pojedynczych wyładowaniach. Ich rozmiary rosną wraz ze wzrostem E_i , co rzutuje na wartości przyjętego do oceny parametru chropowatości R_a .

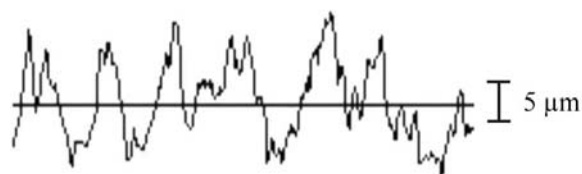
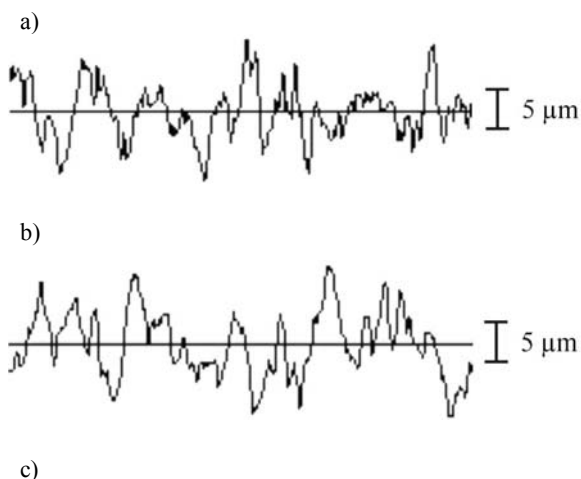


Rys. 7. Zależność chropowatości powierzchni od wielkości cząstek fazy zbrojącej dla różnej energii wyładowań

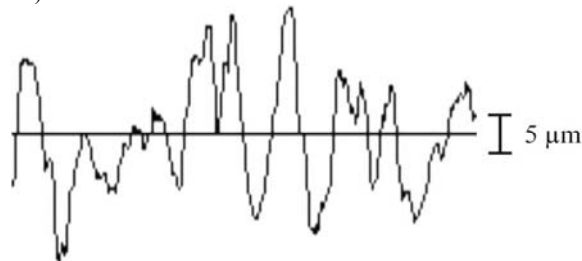
Fig. 7. The relationship between surface roughness and reinforcing particle size for different energy of discharges

Wpływ ziarnistości fazy zbrojącej na chropowatość jest złożony. Dla cząstek Al_2O_3 większych niż $3 \mu\text{m}$ chropowatość rośnie ze wzrostem wymiarów cząstek. Dla cząstek $3 \mu\text{m}$ wystąpiło charakterystyczne minimum chropowatości przy wszystkich wartościach stosowanej energii wyładowań. Chropowatość kompozytu KF3 jest nawet mniejsza niż osnowy KF0. Jest to ciekawe zjawisko wymagające dalszych szczegółowych badań. Celowe jest zastosowanie fazy zbrojącej o ziarnistości cząstek w zakresie submikronowym ($< 1 \mu\text{m}$) lub nanometrowym. Można oczekiwać, że w takich kompozytach warunki erozji elektrycznej będą nieco inne.

Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe profilogramy powierzchni badanych materiałów kompozytowych po EDM.



d)



Rys. 8. Profilogramy chropowatości powierzchni kompozytów po obróbce elektroerozyjnej przy energii wyładowań $2,268 \text{ mJ}$: a) kompozyt KF3, b) kompozyt KF9, c) kompozyt KF23, d) kompozyt KF53

Fig. 8. Surface roughness profilograms of composites after electrodischarge machining at energy of discharges of 2.268 mJ : a) composite KF3, b) composite KF9, c) composite KF23, d) composite KF53

Rysunek dotyczy obróbki elektroerozyjnej czterech badanych kompozytów przy ustalonej energii wyładowań (E_i 1) $2,268 \text{ mJ}$. Kolejne profilogramy (rys. 8a-d) zarejestrowano dla kompozytów zawierających coraz większe cząstki Al_2O_3 . Wartość parametru R_a , czyli średnie kwadratowe odchylenie profilu, wynosi kolejno: $4,10$; $4,44$; $5,83$ i $6,08 \mu\text{m}$. Te wyniki odpowiadają danym z rysunku 7.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań nad wpływem parametrów obróbki elektroerozyjnej na wydajność procesu i chropowatość powierzchni kompozytów aluminiowych zbrojonych cząstkami Al_2O_3 o zróżnicowanej ziarnistości można sformułować następujące wnioski:

- Istotnym czynnikiem decydującym o wydajności obróbki EDM jest energia wyładowań elektrycznych w szczelinie roboczej pomiędzy elektrodą i obrabianym materiałem kompozytowym.
- Ze wzrostem ziarnistości zbrojenia w zakresie od 3 do $53 \mu\text{m}$ wydajność obróbki zmniejsza się od 14 do 18% .
- Wzrost wymiarów cząstek zbrojących wpływa na wzrost chropowatości powierzchni kompozytów po EDM.

LITERATURA

- [1] Jankowiak M., Kawalec M., Król G., Skrawność ostrzy narzędzi podczas toczenia stopów aluminium wzmocnionych 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] Masaki T., Kawaka K., Misutani T., Shibuyo A., Mazuzawa T., Micro-electro-discharge machining, *Proc. IX Int. Symp. for Electro-Machining, ISEM-9, Nagoya* 1989, 26-30.
- [5] Perończyk J., Kozak J., Obróbka elektroerozyjna kompozytu stopu Al z Al_2O_3 , VIII Międzynarod. Konf. Przepływowe maszyny wirnikowe, Rzeszów-Bystre 1998, 391-406.
- [6] Wang Ch., Yan B., Blind-hole drilling of $Al_2O_3/6061$ Al composite using rotary electro-discharge machining, *Journal of Mat. Proc. Techn.* 2000, 102, 90-102.
- [7] Albiński K. et., The temperature of a plasma used electrical discharge machining. *Plasma sources, Sci. Technol.* 1986, 5, 1, 736-742.
- [8] Perończyk J., Biało D., Wybrane problemy obróbki elektroerozyjnej kompozytów aluminiowych, *Kompozyty (Composites)* 2001, 1, 2, 211-214.
- [9] Biało D., Kudła L., Perończyk J., Machinability of Al/ Al_2O_3 composites in the case of mechanical drilling and electro-discharge machining of microholes, II Int. Conf. *Advan. in Produc. Engi. APE* 2001, Warsaw, 2001, vol. II, 263-270.
- [10] Perończyk J., Biało D., Wpływ zawartości fazy zbrojącej Al_2O_3 i SiC w kompozytach aluminiowych na przebieg i wybrane wskaźniki technologiczne obróbki elektroerozyjnej (EDM), *Kompozyty (Composites)* 2003, 3, 8, 366-369.
- [11] Trzaska M., Biało D., Perończyk J., Struktura geometryczna powierzchni kompozytów aluminiowych po obróbce elektroerozyjnej, *Kompozyty (Composites)* 2004, 4, 11, 278-283.

Recenzent
Lucyna Jaworska