https://doi.org/10.62753/ctp.2004.10.0.1

Maria Trzaska[1]
Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

Dionizy Biało[2]
Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Inżynierii Precyzyjnej i Biomedycznej, ul. św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa

Jan Perończyk[3]
Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Technologii Maszyn, al. Niepodległości 222, 00-663 Warszawa

STRUKTURA GEOMETRYCZNA POWIERZCHNI KOMPOZYTÓW ALUMINIOWYCH PO OBRÓBCE ELEKTROEROZYJNEJ

Praca dotyczy wpływu obróbki elektroerozyjnej (EDM) na strukturę geometryczną powierzchni kompozytów aluminiowych. Kompozyty o osnowie Al + 20% Si + 3% Cu + 1% Mg z fazą zbrojącą w postaci cząstek Al_2O_3, SiC i Si_3N_4 wytworzono z proszków przez prasowanie, spiekanie i wyciskanie na gorąco. Faza zbrojąca stanowiła 5% obj. kompozytu. Obróbkę EDM prowadzono z wykorzystaniem generatora RLC. Jako dielektryk stosowano naftę. Obróbkę realizowano przy różnych wartościach energii wyładowań zmieniającej się w zakresie $0{,}044 \cdot 10^{-3}$÷$2{,}268 \cdot 10^{-3}$ J.

Określano wydajność obróbki V_w i chropowatość powierzchni. Wykazano, że na przebieg obróbki EDM wpływa głównie energia wyładowań elektrycznych. Ze zwiększeniem energii wyładowań zwiększa się wydajność obróbki, wzrasta także chropowatość powierzchni. Stan powierzchni po obróbce EDM oceniano na podstawie zdjęć z obrazów z elektronowego mikroskopu skaningowego. Stwierdzono, że na powierzchni materiałów po obróbce EDM występują drobne, wykrystalizowane obszary po nadtopieniach materiału. Ich rozmiary zwiększają się wraz ze wzrostem energii wyładowań. Wpływa to znacząco na parametry chropowatości.

Wykazano, że rodzaj materiału fazy zbrojącej wpływa na wydajność obróbki EDM. Obróbka przebiega najszybciej dla materiału osnowy. Obecność nieprzewodzącej prądu elektrycznego fazy Al_2O_3 i Si_3N_4 w osnowie wpływa na znaczne zmniejszenie wydajności obróbki. W zakresie stosowanych parametrów obróbki EDM nie stwierdzono istotnego wpływu rodzaju materiału fazy zbrojącej na chropowatość powierzchni.

Słowa kluczowe: obróbka elektroerozyjna, kompozyty aluminiowe, mikrogeometria powierzchni

SURFACE MICROGEOMETRY OF ALUMINIUM MATRIX COMPOSITES AFTER ELECTRODISCHARGE MACHINING

The paper deals with the problems of influence of electrodischarge machining (EDM) on the surface microgeometry of aluminium matrix composites. The composites with Al + 20% Si + 3% Cu + 1% Mg matrix and with particles reinforcing phase Al_2O_3, SiC and Si_3N_4 were manufactured from powders in compaction, sintering and hot extrusion processes. Volume fraction of reinforcing phase in composites was 5% (Tab. 1). Generator RLC type was used to perform EDM process (Fig. 1). Kerosene was used as a dielectric. During EDM process different energies of single discharge in the range of $0{,}044 \cdot 10^{-3}$ to $2{,}268 \cdot 10^{-3}$ J (Tab. 2) were utilised. The following parameters were determined: productivity of EDM process and surface roughness R_a.

It was shown that energy of the single discharge influences mainly on the EDM process running (Fig. 2). The higher was energy of the single discharge the higher were the productivity of the process and roughness of the composite surfaces.

State of the composite surface after EDM was estimated on the base of the scanning microscope images (Figs. 3, 4). It has been noticed that at the material surface after EDM small, solid remelted areas occured. Their dimensions are growing up with increasing of the energy of a single discharge. This phenomenon signifficantly influences on the surface roughness parameters.

Moreover the type of the material of reinforcing phase influences the productivity of EDM process (Fig. 2). The speed of machining is the highest for the matrix material. Presence of the electrical non-conductive phases Al_2O_3 and Si_3N_4 in the matrix deereases the machining productivity. In the range of EDM process parameters which were used during the investigations, the influence of the type of the reinforcing phase material on surface roughness was not noticed (Fig. 5).

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

WPROWADZENIE

W procesie wytwarzania elementów z metalowych materiałów kompozytowych znaczna liczba operacji, szczególnie operacji końcowych procesu, realizowana jest przez obróbkę skrawaniem.

Obróbka skrawaniem kompozytów wiąże się z wieloma trudnościami [1-3]. Zasadnicza trudność wynika z zawartych w ich osnowie twardych cząstek, włókien lub wydzieleń stanowiących fazę zbrojącą kompozytu. Powodują one intensywne ścierne zużywanie narzędzi

[1] dr hab. inż. prof. nadzw., [2] dr hab. inż., [3] mgr inż.

skrawających, nawet takich, które są wykonane z węglików spiekanych czy ze specjalnych gatunków ceramiki. Ponadto podczas obróbki skrawaniem kompozytów występują złożone zjawiska dynamiczne wskutek przechodzenia ostrza narzędzia przez granicę fazową pomiędzy osnową i cząstkami zbrojącymi, co obserwowane jest często jako powtarzające się piki sił skrawania. W efekcie tego ostrze skrawające szybciej ulega zmęczeniowemu wykruszaniu niż przy obróbce materiałów o jednorodnej budowie.

W wielu ośrodkach badawczych na świecie są prowadzone prace nad alternatywnymi metodami obróbki ubytkowej kompozytów metalowych, takimi jak: laserowa, strumieniem wody, elektrochemiczna, ultradźwiękowa itd. Jedną z najbardziej obiecujących metod jest obróbka elektroerozyjna (EDM) we wszystkich jej odmianach, tj. drążenia, przecinania, szlifowania, polerowania [4-6].

Prezentowana praca dotyczy obróbki EDM wybranej grupy kompozytów aluminiowych. Badania wstępne [7, 8] wykazały przydatność obróbki EDM do kształtowania powierzchni wyrobów kompozytowych, szczególnie w przypadku wykonywania złożonych kształtów, wgłębień, przecięć i otworów o małych średnicach. Wykazały one także, że obróbka EDM kompozytów przebiega trudniej niż materiałów jednorodnych, co wiąże się z zawartością odpornych termicznie i zazwyczaj o złej przewodności elektrycznej cząstek zbrojenia. Stąd też wyłania się potrzeba bardziej szczegółowych badań w celu określenia związków pomiędzy parametrami obróbki EDM a budową kompozytów. Odnosi się to w szczególnie do ilości, rodzaju i postaci fazy zbrojącej. Ważne, z uwagi na właściwości eksploatacyjne wyrobów, jest określenie wpływu ww. czynników na strukturę geometryczną uzyskanych powierzchni, a także wpływu na właściwości warstwy wierzchniej, po obróbce EDM.

MATERIAŁY STOSOWANE W BADANIACH

Do badań procesu obróbki elektroerozyjnej i jego wpływu na strukturę geometryczną powierzchni zastosowano kompozyty wytworzone metodą metalurgii proszków. Osnowę kompozytów stanowił rozpylony proszek stopowy o składzie: Al + 20% Si + 3% Cu + + 1% Mg. Jako fazę zbrojącą zastosowano proszki Al_2O_3, SiC i Si_3N_4. Ich udział objętościowy w kompozytach wynosił 5%. Skład kompozytów stosowanych w badaniach przedstawiono w tabeli 1.

Proces wytwarzania kompozytów obejmował:
- mieszanie odważonych porcji proszków osnowy i fazy zbrojącej,
- prasowanie wstępne kształtek na zimno pod ciśnieniem 150 MPa,
- grzanie wyprasek do temperatury 400°C połączone z odgazowaniem w atmosferze przepływającego azotu,
- wyciskanie prętów na gorąco przy redukcji 20 : 1.

TABELA 1. **Oznaczenia i skład materiałów kompozytowych**
TABLE 1. **Code and composition of composite materials**

Oznaczenie materiału	Osnowa	Faza zbrojąca				
		Materiał	Ziarnistość μm	V_p %	Temp. topn.* K	Rezystywność* Ωm
MA	Al+ 20% Si+ 3% Cu+ 1% Mg	–	–	–		
KA2		Al_2O_3	6	5	2320	10^{14}
KA5		SiC	7	5	2573	10^{-3}
KA8		Si_3N_4	16	5	2137	10^{10}

* wg [9, 10]

Zastosowany proces wytwarzania kompozytów zapewniał równomierne rozmieszczenie cząstek zbrojących w osnowie i pełne, tj. 100% zagęszczenie materiału [11].

OBRÓBKA ELEKTROEROZYJNA

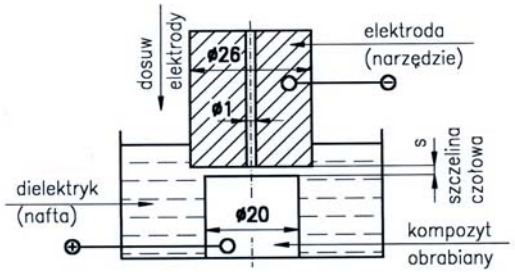
Obróbkę elektroerozyjną realizowano za pomocą obrabiarki EDEA-25 produkcji krajowej wyposażonej w generator tranzystorowy oraz w generator zasobnikowy typu RLC. Obrabiarka umożliwia dobór parametrów procesu w szerokim zakresie, pokrywającym warunki obróbki EDM zgrubnej, półwykańczającej i wykańczającej. Generator RLC ma 6 stopni regulacji para-metrów elektrycznych obróbki (tab. 2). Napięcie zasilania generatora U_o wynosiło 240 V, a średnie napięcie robocze U_r - 180 V.

TABELA 2. **Parametry obróbki EDM**
TABLE 2. **Parameters of the EDM process**

Stopień obróbki	R Ω	C pF	L μH	Energia pojed. wyładowania E_i J
1	95	140	28	$2{,}268 \cdot 10^{-3}$
2	138	96		$1{,}555 \cdot 10^{-3}$
3	170	44		$0{,}713 \cdot 10^{-3}$
4	215	12,9		$0{,}209 \cdot 10^{-3}$
5	375	10,2		$0{,}165 \cdot 10^{-3}$
6	820	2,7		$0{,}044 \cdot 10^{-3}$

Jako dielektryk stosowano naftę kosmetyczną, a elektrody robocze wykonano z miedzi elektrolitycznej M1E. Wartość energii pojedynczego wyładowania (impulsu) E_i pomiędzy elektrodą roboczą i materiałem obrabianym była określana z uwzględnieniem warunków prądowych i parametrów generatora RLC.

Schemat układu do obróbki elektroerozyjnej przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat obróbki elektroerozyjnej
Fig. 1. Scheme of EDM process

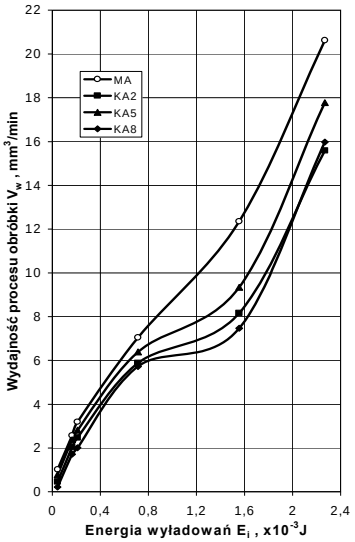
Obróbkę realizowano w układzie swobodnym, tzn. średnica elektrody była większa niż średnica obrabianej próbki kompozytowej. W elektrodzie roboczej wykonano otwór o ustalonej średnicy 1 mm do przepłukiwania szczeliny międzyelektrodowej za pomocą dielektryka podawanego przy ciśnieniu 0,02 MPa. Każdą próbę powtarzano minimum 5-krotnie. Określano:
– objętościową średnią wydajność procesu V_w, mm^3/ /min,
– względny objętościowy współczynnik zużycia elektrody Θ_w, %,
– chropowatość powierzchni obrobionej R_a i R_z, μm.

Są to najczęściej podawane wskaźniki użytkowe w charakterystyce drążarek elektroerozyjnych. Chropowatość powierzchni charakteryzowano parametrami R_a i R_z i określano profilografem Taylor Hobson - 10.

WYNIKI BADAŃ

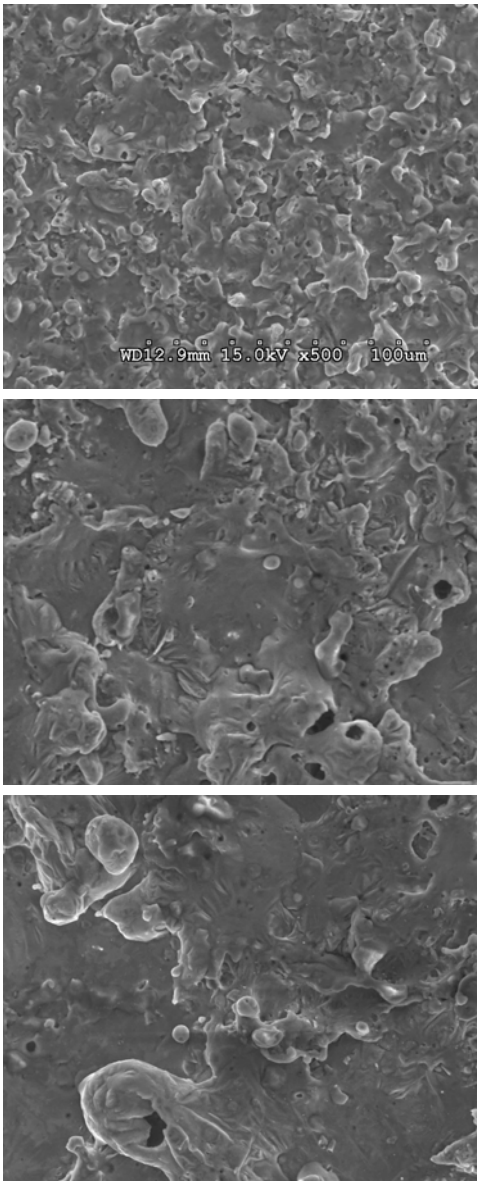
Wyznaczona zależność wydajności procesu obróbki elektroerozyjnej w funkcji energii wyładowań jest przedstawiona na rysunku 2. Z rysunku tego wynika, że wydajność obróbki w dużym stopniu zależy od energii pojedynczych wyładowań. Zgodnie z oczekiwaniami, największą wydajność obróbki odnotowano dla materiału osnowy. Wprowadzenie ceramicznych cząstek zbrojących pogarsza warunki obróbki, tzn. wskaźnik wydajności obróbki V_w przyjmuje mniejsze wartości niż dla materiału osnowy. Materiał cząstek zbrojących, a ściślej jego właściwości elektryczne i cieplne także wpływają na wydajność obróbki. Wśród trzech badanych kompozytów stosunkowo łatwiej obrabia się kompozyt z fazą zbrojącą SiC, która ma przewodność elektryczną zbliżoną do przewodności półprzewodników. Pozostałe kompozyty, tzn. z Al_2O_3 i Si_3N_4, charakteryzują się mniejszymi wydajnościami obróbki V_w, co niewątpliwie wiąże się z gorszą przewodnością elektryczną cząstek zbrojących zaliczanych do klasy dobrych izolatorów.

Na rysunku 3 przedstawiono obrazy powierzchni uzy- skane za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego dla kompozytu KA2 o zawartości 5% cząstek zbrojących Al_2O_3 po obróbce EDM. Rysunki 3a-c dotyczą powierzchni uzyskanych przy wzrastającej energii wyładowań. Dla porównania, zdjęcia wykonano przy jednakowym powiększeniu. Jak widać, topografia powierzchni ulega istotnym zmianom przy wzroście energii wyładowań. Przy najmniejszej z zastosowanych energii, tj. 0,044 · 10^{-3} J (rys. 3a), na powierzchni kompozytu występują liczne, drobne i równomiernie rozłożone obszary materiału, które zostały nadtopione podczas obróbki. Zwiększenie energii wyładowań (rys. 3b i c) prowadzi do większego urozmaicenia topografii powierzchni. Nadtopienia mają coraz większe rozmiary, niektóre przyjmują formy wydłużone z kulistymi zakończeniami. Są to formy poprzedzające oddzielenie kulistych produktów erozji. Należy wyjaśnić, że cechą charakterystyczną obróbki EDM prowadzonej przy dużej energii wyładowań jest występowanie produktów erozji o kształcie zbliżonym do drobnych kulek z pustymi wnętrzami powstającymi jako skutek oddzielania, topienia, parowania i szybkiego studzenia drobin materiału. Często takie kulki nie są całkowicie zamknięte i mają otwory na powierzchni. Takie otwory widać także na kulistych fragmentach materiału związanych z podłożem (rys. 3b i c).



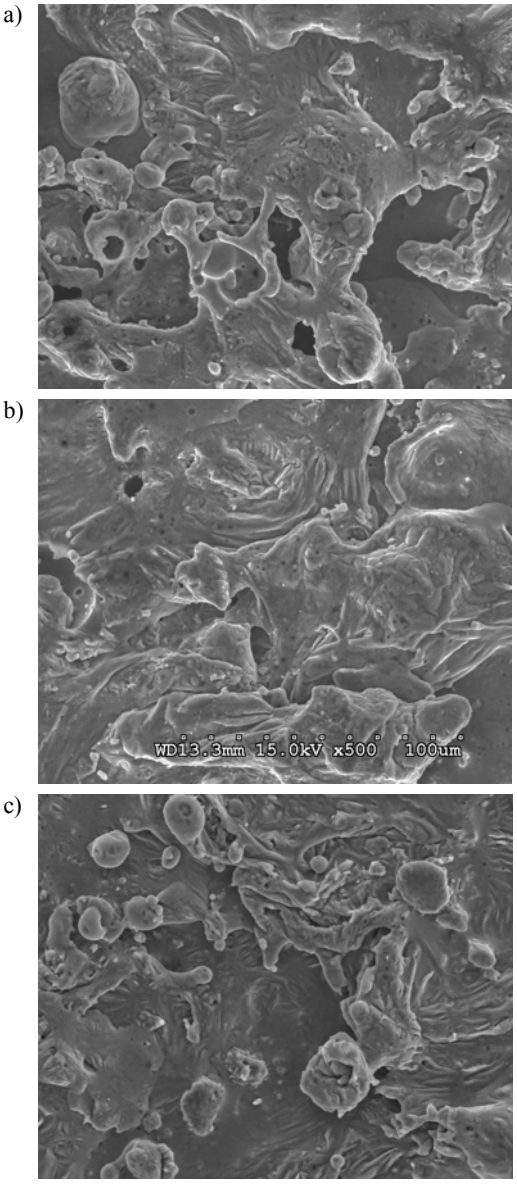
Rys. 2. Zależność wydajności obróbki EDM kompozytów od energii wyładowań dla materiału osnowy i trzech kompozytów KA2, KA5 i KA8
Fig. 2. The relationship between productivity of EDM process and discharge energy for matrix material MA and three composites KA2, KA5 and KA8

Na rysunku 4 przedstawiono obrazy powierzchni kompozytów KA5 (z 5% zawartością SiC) i KA8 (z 5% zawartością Si_3N_4) oraz materiału osnowy MA po obróbce elektroerozyjnej przy ustalonej, maksymalnej energii wyładowań równej 2,268 · 10^{-3} J. W tym przypadku stan powierzchni wszystkich materiałów jest zbliżony, a wykrystalizowane nadtopienia powierzchniowe materiału mają podobny charakter. Można więc sformułować tezę, że dominującym czynnikiem wpływającym



Rys. 3. Obrazy powierzchni kompozytu KA2 (5% Al_2O_3) po obróbce EDM przy energii wyładowań E_i: a) 0,044 · 10^{-3} J, b) 0,713 · 10^{-3} J, c) 2,268 · 10^{-3} J

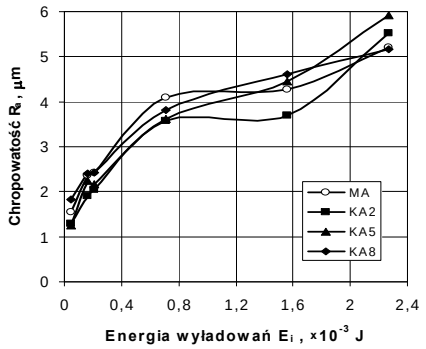
Fig. 3. SEM morphology of the composite KA2 (5% Al_2O_3) surface after EDM process at selected values of discharge energy E_i: a) 0.044 · 10^{-3} J, b) 0.713 · 10^{-3} J, c) 2.268 · 10^{-3} J



Rys. 4. Obrazy powierzchni: a) materiału osnowy MA, b) kompozytu KA5 (5% SiC) i c) kompozytu KA8 (5% Si_3N_4) po obróbce EDM przy największej energii wyładowań E_i = 2,268 · 10^{-3} J

Fig. 4. SEM morphology: a) matrix material MA, b) composite KA5 (5% SiC) i c) composite KA8 (5% Si_3N_4) after EDM process at max. discharge energy E_i = 2.268 · 10^{-3} J

na strukturę geometryczną powierzchni badanych materiałów jest energia wyładowań, a wpływu materiału cząstek zbrojących należy oczekiwać dopiero przy dużo większym niż 5% wypełnieniu kompozytów cząstkami ceramicznymi. Taką tezę potwierdzają prowadzone aktualnie badania w tej dziedzinie.

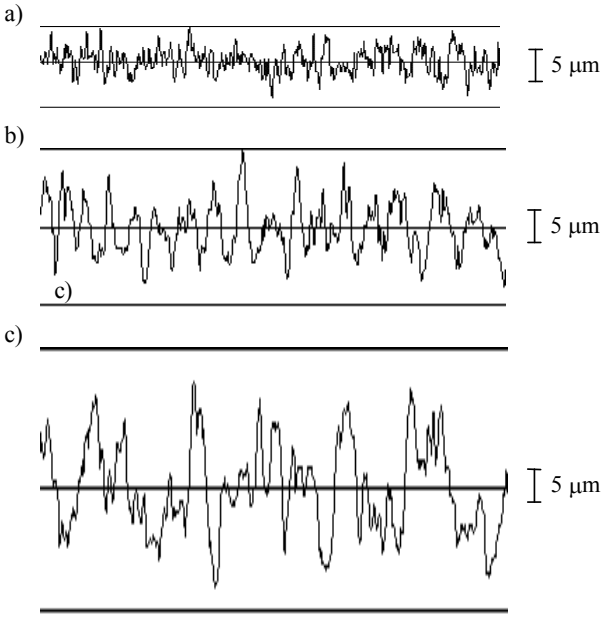


Rys. 5. Zależność parametru chropowatości R_a od energii wyładowań przy obróbce EDM dla materiału osnowy MA i kompozytów: KA2, KA5, KA8

Fig. 5. Dependence of the roughness parameter R_a on discharge energy during EDM process for matrix material MA and composites: KA2, KA5 and KA8

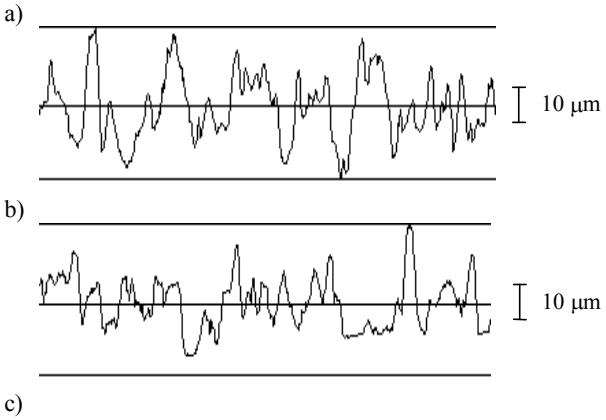
Wpływ energii wyładowań na chropowatość powierzchni po obróbce EDM badanych materiałów przed- stawiono na rysunku 5. Wartość parametru R_a zależy także od energii wyładowań i jest tym większa, im większa jest energia E_i. Przedstawione wyniki badań nie umożliwiają zróżnicowania wpływu fazy zbrojącej i jej materiału na chropowatość powierzchni obrobionej. Punkty średnich wartości z pomiarów układają się w charakterystyczne pasmo, a różnice pomiędzy nimi są niewielkie. Wiąże się to także ze specyfiką pomiarów parametru R_a, a także losowym wyborem kolejnych odcinków pomiarowych na tej samej powierzchni.

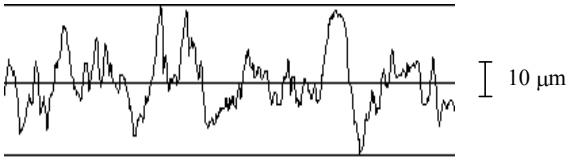
Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przykładowe profilogramy powierzchni zarówno kompozytów, jak i osnowy po obróbce elektroerozyjnej.



Rys. 6. Profilogramy chropowatości powierzchni kompozytu KA2 (5% Al_2O_3) po obróbce EDM przy energii wyładowań E_i: a) 0,044 × × 10^{-3} J, b) 0,713 · 10^{-3} J, c) 2,268 · 10^{-3} J

Fig. 6. Surface roughness profilograms of the composite KA2 (5% Al_2O_3) after EDM process at selected value of discharge energy E_i: a) 0.044 · 10^{-3} J, b) 0.713 · 10^{-3} J, c) 2.268 · 10^{-3} J





Rys. 7. Profilogramy chropowatości powierzchni poobróbce EDM przy energii wyładowań 2,268 · 10^{-3} J dla: a) osnowy MA, b) kompozytu KA5 (5% SiC) i c) kompozytu KA8 (5% Si_3N_4)

Fig. 7. Surface roughness profilograms after EDM process at discharge energy E_i = 2.268 · 10^{-3} J for: a) matrix material MA, b) composite KA5 (5% SiC) i c) composite KA8 (5% Si_3N_4)

Rysunek 6 dotyczy obróbki kompozytu KA2 (5% Al_2O_3) przy trzech wartościach energii wyładowań E_i: 0,044 · 10^{-3} J, 0,713 · 10^{-3} J i 2,268 · 10^{-3} J. Jak widać, wzrost wartości E_i powoduje wzrost wysokości chropowatości. Parametr chropowatości R_a, czyli średnie kwadratowe odchylenie profilu, wynosi kolejno: 1,29, 3,26 i 5,55 μm. Jest to zależność typowa dla obróbki EDM metali i stopów tradycyjnych. Dobierając parametry obróbki, a szczególnie wartość energii wyładowań, można przeprowadzać wydajną obróbkę zgrubną, obróbkę średnio dokładną lub wykańczającą, a w tej ostatniej nawet polerowanie.

Porównując profilogramy można zauważyć zmianę charakteru występowania chropowatości ze wzrostem energii wyładowań E_i. Stosowany w opisie topografii powierzchni parametr „średni rozstęp wierzchołków chropowatości" wyrażający częstotliwość występowania chropowatości wzdłuż linii pomiarowej wyraźnie zwiększa się ze wzrostem E_i. Zmiana ta odpowiada charakterowi powierzchni po erozji przedstawionych na rysunku 3.

Profilogramy pokazane na rysunku 7 dotyczą powierzchni po obróbce: materiału osnowy MA, kompozytu KA5 (5% SiC) i kompozytu KA8 (5% Si_3N_4) przy jednakowej energii wyładowań 2,268 · 10^{-3} J. Przebieg profilogramów jest zbliżony, a parametr chropowatości R_a wynosi kolejno: 5,82, 5,87 i 5,62 μm. Potwierdza to wcześniej sformułowane wnioski przy opisie zdjęć z rysunków 4 i 5, że dominującym czynnikiem wpływającym na strukturę geometryczną powierzchni omawianych materiałów jest energia wyładowań, a wpływ materiałów cząstek zbrojących jest w tym przypadku trudny do określenia.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań wpływu parametrów obróbki elektroerozyjnej na wydajność procesu i strukturę geometryczną powierzchni kompozytów aluminiowych zbrojonych cząstkami ceramicznymi można sformułować następujące wnioski:

– Istotny wpływ na wydajność obróbki EDM omawianych kompozytów ma energia wyładowań E_i. Przez racjonalny dobór wartości E_i można realizować wy-

dającą obróbkę zgrubną, średnio dokładną, a także wykańczającą.
- Najszybciej obróbka przebiega dla materiału osnowy, znacznie trudniej dla materiałów kompozytowych.
- Ze wzrostem energii wyładowań lokalne mikroobszary erozji są większe, a w efekcie zwiększa się chropowatość powierzchni. Potwierdzają to obserwacje za pomocą mikroskopu skaningowego i zarejestrowane profilogramy powierzchni.
- W zakresie objętym badaniami nie stwierdzono wpływu rodzaju materiału ceramicznej fazy zbrojącej na chropowatość powierzchni obrobionej przy określonej energii wyładowań.

Praca wykonana w ramach projektu KBN 4T08C 060 24.

LITERATURA

[1] Jankowiak M., Kawalec M., Król G., Skrawność ostrzy narzędzi podczas toczenia stopów aluminium wzmacnianych 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] Monagman 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 maschining, Proc. of IX Int. Symp. for Electro-Maschining, 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-bole drilling of Al_2O_3/6061Al composite using rotary electro-discharge machining, Journal of Mat. Proc. Techn. 2000, 102, 90-102.

[7] Perończyk J., Biało D., Wybrane problemy obróbki elektroerozyjnej kompozytów aluminiowych, Kompozyty (Composites) 2001, 1, 2, 211-214.

[8] 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.

[9] Olszyna A., Ceramika supertwarda, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.

[10] Srivatsan T.S., Sudorhan T.S., Lavernia E.J., Processing of discontinuously-reinforced metal matrix composites, Progress and Materials Science 1995, 39, 317-409.

[11] Biało D., Zużycie tribologiczne kompozytów na osnowie aluminium otrzymanych z proszków, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.

Recenzent
Henryk Morawiec