

Jan PEROŃCZYK¹
Dionizy BIAŁO¹
Mirosław PRACKI²
Jerzy DUSZCZYK³

STAN POWIERZCHNI KOMPOZYTÓW Al PO OBRÓBCE ELEKTROEROZYJNEJ

W artykule przedstawiono wyniki badań struktury stereometrycznej po obróbce elektroerozyjnej (WEDM) osnowy z Al₂₀Si₁Mg i na jej bazie utworzonych kompozytów umacnianych cząstkami ceramicznymi Al₂O₃, SiC lub Si₃N₄ o zawartości 5% objętościowo. Osnowa i kompozyty wytworzone były metodami metalurgii proszkowej P/M i obrabiane WEDM przy dwóch nastawach: E2 i E7. Przedstawiono stereometryczne obrazy powierzchni próbek po WEDM oraz liniowe wykresy chropowatości. Uzyskane wyniki liczbowe szeregu parametrów, charakteryzujących stereometrię powierzchni obrabianej, pozwoliły na sformułowanie szeregu wniosków i spostrzeżeń dotyczących odmienności tej struktury w stosunku do struktur powstających po obróbce WEDM metali i ich stopów.

1. WPROWADZENIE

Elektroerozyjne wycinanie drutem (WEDM) znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle do kształtowania elementów o skomplikowanych kształtach geometrycznych, a ponadto często wykonywanych z materiałów trudnoskrawalnych lub nieskrawalnych metodami konwencjonalnymi. Współczesne obrabiarki elektroerozyjne umożliwiają osiągnięcie dokładności wymiarowej poniżej 1µm i powierzchni o lustrzanym wyglądzie o chropowatości Ra <0,1µm. Znajduje także coraz szersze zastosowanie w obróbce kompozytów metalowych, w tym ze stopów Al, umacnianych różnego rodzaju cząstkami ceramicznymi w postaci: ziaren, wiskerów czy włókien [1],[2]. Obecność cząstek ceramicznych w materiale osnowy wprowadza bardzo znaczne utrudnienia, a czasami wręcz uniemożliwia, ich kształtowanie na drodze skrawania, mimo stosowania najnowszej generacji materiałów na narzędzia [3-5]. Powierzchnia metali i ich stopów po obróbce elektroerozyjnej, po każdej odmianie, uzyskuje charakterystyczną strukturę geometryczną (SGP) zbliżoną do struktury punktowej o charakterze izotropowym [6]. Jak podkreślono w pracy [6], SGP po EDM "cechuje się względnie wysoką chropowatością i wierzchołkami o małych promieniach zaokrąglenia, co z punktu widzenia elementów współpracujących

¹ Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania, Warszawa

² Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Wytwarzania

³ Delft University of Technology, The Netherland

ruchowo jest mało korzystne". Z wielu prac, a m.in. [7-9] wiadomo, że na właściwości eksploatacyjne elementów, oprócz zmian w SGP, istotny wpływ ma warstwa wierzchnia (WW), jaka powstaje po przeprowadzonym procesie obróbki.

W wyniku oddziaływania wyładowań elektrycznych powstających w przestrzeni międzyelektrodowej wypełnionej dielektrykiem, zachodzą złożone procesy fizykochemiczne, prowadzące do erozji materiałów elektrod i powstania na powierzchni obrabianej zmienionej warstwy wierzchniej, o właściwościach w większości przypadków niekorzystnych dla dalszej eksploatacji elementów. Jest to przedmiotem szerokich badań prowadzonych na świecie, opisanych m.in. w podanej powyżej literaturze, których celem jest m. in. optymalizacja parametrów obróbki elektroerozyjnej pod kątem zapewnienia dużej produktywności procesu przy jednoczesnym zachowaniu żądanej SGP i dobrych właściwości WW.

Przy obróbce elektroerozyjnej kompozytów metalowych umacnianych cząstkami ceramicznymi, proces erozji elektrycznej jest bardziej złożony niż podczas obróbki materiałów jednorodnych jakimi są metale i ich stopy, a w WW zachodzą bardziej niekorzystne zmiany [4],[9-10]. Obecność w strukturze kompozytu cząstek ceramicznych o właściwościach wyraźnie odbiegających od właściwości pozostałych składników fazowych kompozytu (znacznie wyższe temperatury topnienia, znacznie wyższa twardość, niska przewodność cieplna, zmienne właściwości dielektryczne), powoduje powstawanie bardziej niekorzystnych zmian w WW. Powstają bardzo duże naprężenia rozciągające i często mikropęknięcia, na powierzchni obrobionej pozostają przywarte cząstki umocnienia, a ślady po wyładowaniach elektrycznych mają bardzo nieregularne kształty, odbiegające od kołowego, rozmyte o zróżnicowanej głębokości. Powoduje to wyraźnie dostrzegalną zmianę w wyglądzie i charakterze SGP [9]. Wydaje się zatem, że parametry SGP przyjmowane do oceny stanu powierzchni po obróbce elektroerozyjnej kompozytów powinny uwzględniać te odmienności.

2. BADANIA STANU WARSTWY WIERZCHNIEJ PO EDM

W pracy zamieszczono wyniki badań po WEDM kompozytów na osnowie Al₂₀Si₁Mg. Skład zbliżony do składu stopu AK20 wg PN) - oznaczono jako KO, z fazą umacniającą : Al₂O₃ - oznaczono jako KA ; SiC - oznaczono jako KS; Si₃N₄ - oznaczono jako KN, o zawartościach tych faz 5% objętościowo. Materiał wytworzono metodą metalurgii proszkowej P/M, a dalszy proces plastycznej redukcji 20:1 zapewnił 100% zagęszczenie i w miarę równomierne rozmieszczenie cząstek zbrojących w osnowie. Ziarnistość dla Al₂O₃ i SiC wynosiła 7µm, a dla Si₃N₄ - 16µm. Próbki do badań wykonano na wycinarce elektroerozyjnej ROBOFIL 310 firmy Charmilles przy parametrach nastawy E2 i E7 (tabela 1). Elektroda był drut mosiężny miękki o średnicy $\Phi=0,25\text{mm}$, a dielektrykiem woda demineralizowana i dejonizowana o przewodności 50 µS/cm, zaś naciąg drutu wynosił 10N.

Parametry nastawy E2 zalecane są przez producenta obrabiarek do zgrubnego wycinania stopów Al (duża energia impulsu), zaś parametry nastawy E7 do wycinania wykończeniowego (mała energia impulsu).

Tabela 1. Parametry WEDM stosowane do wycinania próbek
Table 1. WEDM parameters applied for wire cutting of the samples

L.p.	Parametr	Jednostka	Nastawa	
			E2	E7
1.	Napięcie robocze, U	V	-80	-120
2.	Amplituda natężenia prądu, I	A	8	8
3.	Czas impulsu, t_i	μs	1,6	0,2
4.	Czas przerwy, t_o	μs	6	3,8
5.	Prąd zapłonu, I_z	A	16	16
6.	Czas impulsu zapłonu, t_z	μs	0,8	0,2
7.	Ciśnienie płukania, p	MPa	0,55	0,35

Przy doborze parametrów charakteryzujących niektóre elementy SGP kierowano się sugestiami autorów publikacji [6],[11], a zwłaszcza [12]. W monografii [12] Autorzy szeroko uzasadniają wybór przyjętych parametrów do oceny chropowatości powierzchni po WEDM, przytaczając wyniki badań własnych wybranej SGP (dla próbki stalowej). W pracy [13] Autorka zamieszcza wyniki szerokich badań wpływu parametrów obróbki EDM na chropowatość powierzchni (wykonanych w ramach pracy doktorskiej), również dla próbek stalowych (stal Rigor-odpowiednik stali NC10 wg PN.). Za Autorami [12], do dalszej analizy wybrano 28 parametrów charakteryzujących SGP obrobionej powierzchni w układzie 3D, przytaczając grupę: parametrów amplitudowych, parametrów określanych z profilogramów chropowatości, parametrów powierzchniowych i objętościowych, parametrów przestrzennych SGP, parametrów hybrydowych i parametrów funkcjonalnych (tabela 2 i 3).

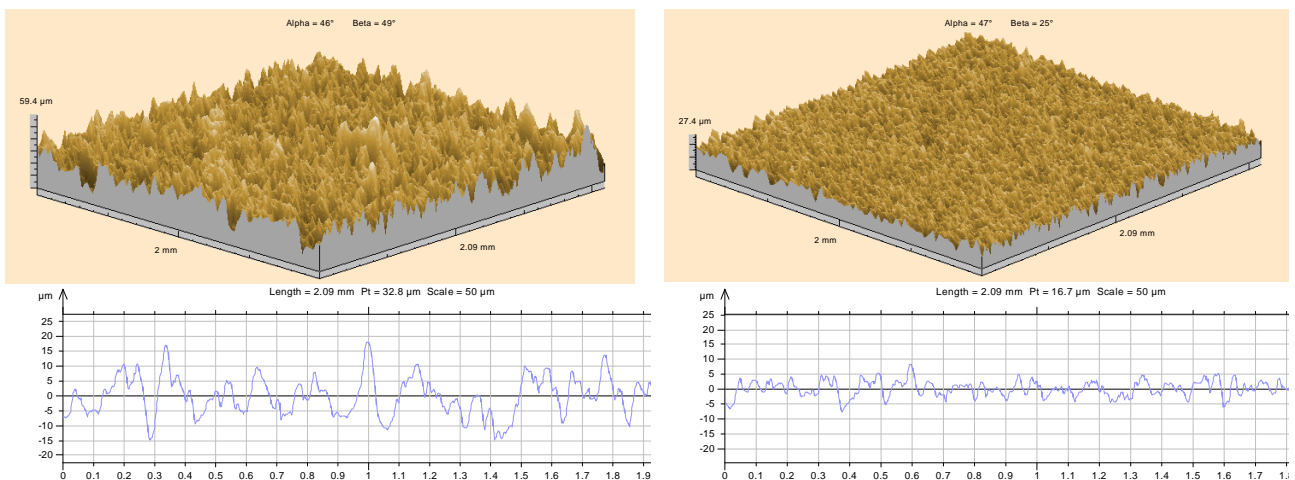
Tabela 2. Parametry SGP amplitudowe
Table 2. Amplitude-type parameters of the surface texture

Nastawa Parametr SGP		Materiał obrabiany (oznaczenie)							
		KO		KA		KS		KN	
		E2	E7	E2	E7	E2	E7	E2	E7
Sa μm	5,77	2,30	4,67	2,10	4,68	2,30	4,82	2,22	
Sq μm	7,28	2,90	5,94	2,65	5,90	2,89	6,05	2,88	
Sp μm	32,9	12,8	32,2	12,8	28,5	14,2	21,3	23,5	
Sv μm	26,5	14,6	23,8	11,8	24,5	12,0	24,6	12,7	
St μm	59,4	27,4	56	24,6	53	26,2	45,9	36,2	
Ssk	0,091	-0,206	0,012	-0,105	-0,017	-0,09	-0,154	-0,111	
Sku	3,17	3,13	3,43	3,26	3,19	3,12	3,02	3,29	
Sz μm	53,8	24,7	50,9	23,4	46,5	24,7	41	27,5	
Wybrane parametry profili chropowatości									
Ra μm	4,83	2,14	3,07	2,17	4,06	1,88	4,03	2,03	
Rz μm	28,7	13,5	20,8	12,9	22,5	10,7	25,2	16,7	
Rt μm	29,6	14	22,2	15,3	22,5	11,4	25,2	16,7	
Sm mm	0,11	0,056	0,073	0,063	0,088	0,051	0,087	0,057	

Tabela 3. Parametry SGP: a) powierzchniowe i objętościowe; b) przestrzenne; c) funkcjonalne
 Table 3. Surface texture parameters: a) surface and volume type b) spatial c) functional

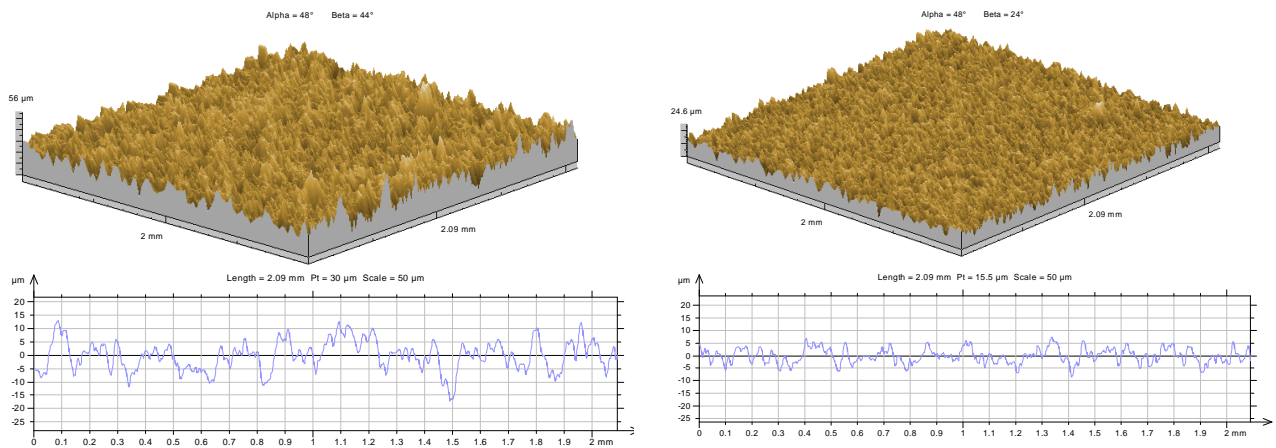
		Materiał obrabiany (oznaczenie)							
		KO		KA		KS		KN	
Parametr SGP	Nastawa	E2	E7	E2	E7	E2	E7	E2	E7
	a) Parametry powierzchniowe i objętościowe								
STp, %		0	0	0	0	0	0	0	0
SHTp, μm		12,10	4,84	9,66	4,38	9,82	4,82	10,10	4,76
Smmr, mm^3/mm^2		0,0265	0,0141	0,0238	0,0118	0,0245	0,0112	0,0246	0,0127
Smvr, mm^3/mm^2		0,0329	0,0128	0,0322	0,0128	0,0285	0,0142	0,0213	0,0235
b) Parametry SGP przestrzenne									
Spc, pks/ mm^2		13,2	4,06	15,1	3,11	9,59	7,97	22,1	5,02
Sdc, pks/ mm^2		659	970	769	1025	776	1021	978	977
Str		0,595	0,525	0,725	0,763	0,617	0,792	0,571	0,807
Sal, mm		0,0427	0,0172	0,0437	0,0193	0,045	0,0206	0,0005	0,0237
Std, $^\circ$		46,5	-46,5	46	14,5	46	46,5	88	-27,5
Sfd		2,47	2,59	2,49	2,59	2,48	2,58	2,6	2,56
c) Parametry hybrydowe SGP									
Sdq, $\mu\text{m}/\mu\text{m}$		0,539	0,395	0,524	0,38	0,486	0,408	0,607	0,386
Ssc, $1/\mu\text{m}$		0,169	0,132	0,167	0,133	0,164	0,144	0,279	0,135
Sdr, %		13,6	7,4	12,9	6,89	11,2	7,89	16,7	7,1
d) Parametry funkcjonalne SGP									
Sbi		0,346	0,352	0,261	0,307	0,31	0,301	0,521	0,152
Sci		1,55	1,46	1,5	1,47	1,52	1,48	1,5	1,5
Svi		0,113	0,126	0,12	0,122	0,116	0,12	0,122	0,122

Chropowatość powierzchni mierzono na profilometrze skanującym FORM TALYSURF 2. Obrazy stereometryczne i liniowe wykresy chropowatości mierzonych powierzchni po WEDM, dla badanych kompozytów przy nastawach E2 i E7, zamieszczono na rysunkach 1-4. Wartości wybranych parametrów SGP dla prezentowanych na rys. 1-4, zamieszczono w tabeli 2 i 3.

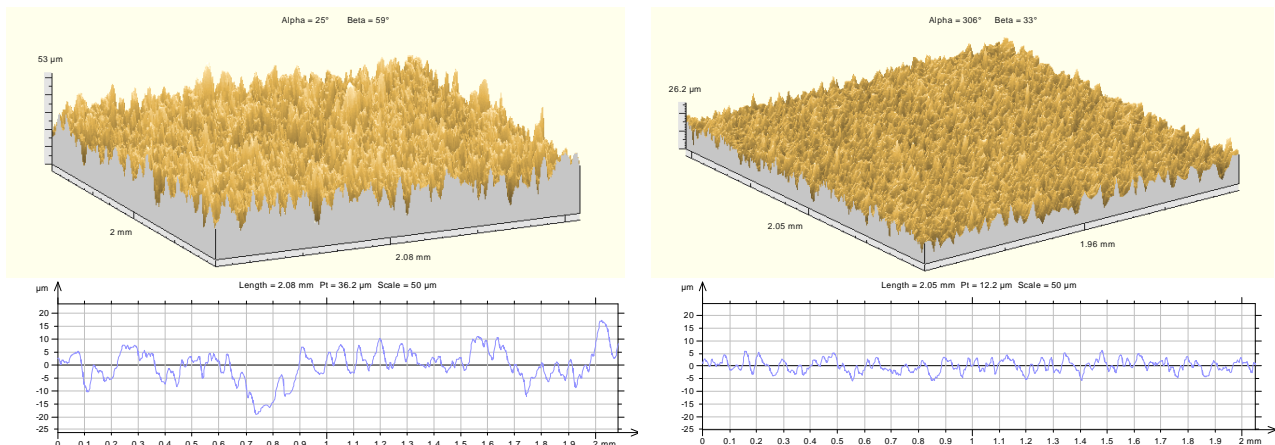


Rys. 1. Stereometryczny obraz powierzchni i wykres chropowatości po WEDM osnowy dla: a) E2 i b) E7

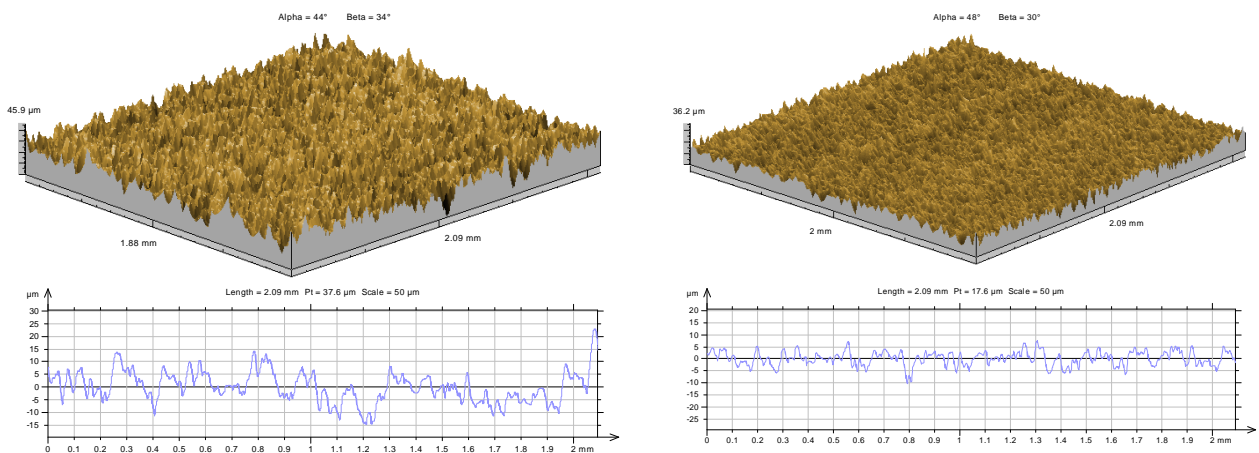
Fig. 1. Stereometric surface image and roughness diagram after the WEDM process applied for the matrix and carried out under a) E2, b) E7 machining regime



Rys. 2. Stereometryczny obraz powierzchni i wykres chropowatości po WEDM kompozytu KA. dla: a) E2 i b) E7
 Fig. 2. Stereometric surface image and roughness diagram after the WEDM process applied for the composite KA and carried out under a) E2, b) E7 machining regime



Rys. 3. Stereometryczny obraz powierzchni i wykres chropowatości po WEDM kompozytu KS. dla: a) E2 i b) E7
 Fig. 3. Stereometric surface image and roughness diagram after the WEDM process applied for the composite KS and carried out under a) E2, b) E7 machining regime



Rys. 4. Stereometryczny obraz powierzchni i wykres chropowatości po WEDM kompozytu KN dla: a) E2 i b) E7
 Fig. 4. Stereometric surface image and roughness diagram after the WEDM process applied for the composite KN and carried out under a) E2 b), E7 machining regime

3. ANALIZA WYNIKÓW

Analiza uzyskanych wyników pozwoliła sformułować następujące stwierdzenia i wnioski:

1. Analiza obrazów stereometrycznych (3D) powierzchni, wykazuje, że kształt powstałych nierówności zależy od rodzaju materiału obrabianego oraz zastosowanych parametrów obróbki WEDM (nastawy E2 lub E7). Wyraźnie widoczna jest zmienna gęstość upakowania wierzchołków na powierzchni.
2. Wartości parametrów: Ra, Rz, Rt, Sm, Sa, Sp, St, Sz są zbliżone do oczekiwanych i uzyskiwanych w innych badaniach jak np. [9-11]. Stosunek Rt/Ra dla nastawy E2 zawiera się w przedziale 5,5 - 7,25, natomiast dla nastawy E7 wynosi 6 (dla osnowy i kompozytu KS), 7 dla kompozytu KA i ponad 8 dla kompozytu KN. Jest to prawdopodobnie związane z właściwościami i ziarnistością cząstek umacniających. Różnice pomiędzy parametrami St i Sz dla próbek KO i KS mieszczą się w przedziale od 1,2 μ m dla kompozytu KA przy nastawie E7, do 8,7 μ m dla kompozytu KN też przy nastawie E7. Małe różnice pomiędzy tymi parametrami świadczą o tym, że udziały przypadkowych pojedynczych wierzchołków i wgłębień są pomijalnie małe [12].
3. Miarą skośności (współczynnika asymetrii nazywanego też współczynnikiem skośności) jest Ssk. Skośność charakteryzuje symetrię rozkładu rzędnych wysokości chropowatości względem płaszczyzny średniej. Wg [12] ujemna wartość tego współczynnika wskazuje na powierzchnię o wzniesieniach płaskowyżowych, zaś dodatnia na powierzchnię o wzniesieniach w kształcie zaostrowym. Z tabeli. 2 wynika że tylko dla 2 przypadków (KO i KA nastawy E2) współczynnik skośności Ssk ma wartości dodatnie (bliskie 0), zaś w pozostałych przypadkach przyjmuje wartości ujemne.
4. Miarą smukłości krzywej rozkładu rzędnych profilu- Sku- jest tzw. eksces nazywany też kurtozą lub współczynnikiem skupienia. Dla rozkładu normalnego rzędnych profilu Sku = 3 [12]. Analizując wyniki pomiarów z tabeli 2 widać, że ten parametr dla wszystkich przypadków jest nieco większy od 3, co świadczy o tym, że krzywa rozkładu rzędnych profilu chropowatości jest bardziej smukła, czyli węższa i wyższa [12].
5. Parametr Str jest miarą tekstury powierzchni i zawiera się w przedziale 0-1. Wartości bliskie 1 świadczą o tym, że SGP ma wysoki poziom izotropowości, zaś wartości bliskie 0 charakteryzują powierzchnie anizotropowe. Dla badanych przypadków, parametr Str zawierał się w przedziale 0,525 (dla osnowy KO nastawa E7) do 0,807 (dla kompozytu KN nastawa E7).
6. Długość odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji (domyślnie 0,2), określa udział falistości w pomiarach parametrów chropowatości. Ponieważ wartości tego parametru dla badanych przypadków (tabeli 2) są stosunkowo małe, oznacza to, że struktury geometryczne badanych powierzchni składają się głównie z fal o dużej częstotliwości [12].
7. Sdr określany jest jako wskaźnik rozwinięcia powierzchni w % (dla powierzchni płaskiej Sdr = 0). Wskaźnik ten dla badanych powierzchni zawierał się w przedziale 6,89 -16,7 %.
8. Wartości krzywizn wierzchołków chropowatości Ssc dla osnowy KO i kompozytów KA oraz KS obrabianych przy nastawie E2 osiągają wartości nieco powyżej 0,16 1/ μ m, zaś dla kompozytu KN=0,279 1/ μ m. Dla próbek obrabianych z nastawami E7, wartości Ssc zawierają się w przedziale 0,132 - 0,144 1/ μ m. Uzyskane wartości Ssc świadczą o powstawaniu małych promieni zaokrąglenia wierzchołków chropowatości podczas obróbki elektroerozyjnej, często o jeden do dwu rzędów mniejszych niż otrzymywanych np. podczas obróbki skrawaniem. Potwierdzają to wyniki badań innych Autorów jak np. [11-13]. Należy zauważyć, że wzrost ziarnistości cząstek umacniających, zmiana

właściwości fizyko-mechanicznych i wzrost energii pojedynczego wyładowania (E_i), powodują zmniejszanie promieni zaokrąglenia wierzchołków chropowatości - wierzchołki stają się bardziej ostre.

9. Parametry funkcjonalne: S_{bi} , S_{ci} i S_{vi} są ważnymi parametrami tribologicznymi i mogą być wykorzystane do analizy powierzchni stykowych. Przykładowo: wzrost wartości parametru S_{ci} wskazuje na poprawę warunków zatrzymywania środka smarnego [12]. Jak wynika z tabeli 3, wartość tego parametru dla badanych materiałów wynosi ok. 1,5 i podlega bardzo małym zmianom, niezależnie od rodzaju kompozytu i zastosowanych parametrów WEDM ($S_{ci} = 1,38$ dla WEDM próbek stalowych wg. [12]).

4. PODSUMOWANIE

Z uwagi na dużą liczbę parametrów przyjętych do analizy, oraz wpływ wielu czynników na ich konstytuowanie (parametry WEDM, różne kompozyty) śledzenie ich zmienności jest bardzo utrudnione. Wyniki mogą być także przypadkowe, z powodu arbitralnego losowego wyboru powierzchni czy odcinków pomiarowych. Szczególnie jest to istotne w przypadku kompozytów, charakteryzujących się, z natury rzeczy, dużo większą niejednorodnością struktury metalograficznej w porównaniu z metalami i ich stopami, co zresztą jest podnoszone w wielu publikacjach [2-5],[9]. Dużo większą wiarygodność wyników będzie można uzyskać po przeprowadzeniu szerokich badań, zaprogramowanych ściśle pod tym kątem.

Praktyczne wykorzystanie większości parametrów charakteryzujących SGP, możliwych do określenia dzięki nowym sposobom i nowej aparaturze umożliwiającej ich pomiar, musi być poprzedzone szerokimi badaniami eksploatacyjnymi. Celem tych badań powinno być ustalenie odpowiednich związków pomiędzy tymi parametrami, a badanymi właściwościami użytkowymi. Jak dotychczas takie informacje nie są popularyzowane w dostępnej literaturze technicznej.

LITERATURA

- [1] SOBCZAK J., 2001, *Kompozyty metalowe*, Wyd. Instytut Odlewnictwa i Instytut Transportu Samochodowego, Kraków - Warszawa.
- [2] BIAŁO D., 2002, *Zużycie tribologiczne kompozytów na osnowie stopów aluminium otrzymanych z proszków*, Prace Naukowe PW, Mechanika, 192, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [3] BIAŁO D., KUDŁA L., PEROŃCZYK J., *Problemy wiercenia i drążenia elektroerozyjnego mikrootworów*, Mechanik, 74/10, 631-635.
- [4] OCZOŚ K. E., 1998, *Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [5] FUKUZAWA Y. et al., 1998, *Machining of Insulating Ceramics with an Electric Discharge Machining – Machining of the Oxide Ceramics*, Proceedings of the ISEM-11, Losanna, 445 - 453.
- [6] NOWICKI B., PODOLAK-LEJTAS A., 2007, *Stan warstwy wierzchniej po łącznej obróbce elektroerozyjnej i powierzchniowej zgniotem*, Inżynieria Maszyn, 12/4, 132-141.
- [7] KURTH J. P., VAN HUMBEK J., STEVENS L., 1998, *Microstructural Investigation and Metalographic Analysis of the White Layer of a Surface Machined by Electro Discharge Machining*, ISEM -11, Losanna, 849-862.
- [8] EKMEKCIK B., 2007, *Residual Stresses and White Layer in Electric Discharge Machining EDM*, Applied Surface Science, 253, 9234-9240.
- [9] PEROŃCZYK J., 2008, *Obróbka elektroerozyjna kompozytów na osnowie metalowej i ceramiki technicznej*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Warszawa.

- [10] Le ROUXT., WISE M. L. H and ANSPINWALL D. K., 1993, *Electric Discharge Machining of an Aluminium Alloy Silicon Carbide Reinforced Metal Matrix Composites*, 30-th Int. Conf. M.T.D.R., Manchester, UK.
- [11] NOWICKI B., 2007, *Zaawansowane metody opisu i pomiarów struktury geometrycznej powierzchni*, Mechanik, 1, 36-41.
- [12] OCZOŚ K. E., LIUBIMOV V., 2003, *Struktura geometryczna powierzchni*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- [13] PODOLAK-LEJTAS A., 2010, *Modyfikacja warstwy wierzchniej zgniotem powierzchniowym elementów obrabianych elektroerozyjnie*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Warszawa 2010.

SURFACE CONDITION OF ALUMINIUM MATRIX COMPOSITES AFTER THE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

The results of investigation into surface texture after the WEDM process have been presented for the composites on a matrix Al₂₀Si₁Mg and reinforced by 5% volume of ceramic particles Al₂O₃, SiC or Si₃N₄. The matrix and the composites have been developed by powder metallurgy technology and they were subjected to the WEDM process for two technological regime settings E2 and E7. Stereometric images of the obtained sample surface as well as roughness profiles have been presented. The obtained digital results for a range of parameters featuring machined surface stereometry made it possible to draw numerous conclusions as to the difference of such structure compared to other structure formed after the WEDM process for other metals and their alloys.