

Dionizy BIAŁO<sup>1</sup>  
Jan PERONCZYK<sup>1</sup>  
Jerzy DUSZCZYK<sup>2</sup>  
Waldemar WIŚNIEWSKI<sup>3</sup>

## **WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI KOMPOZYTÓW ALUMINIOWYCH PO WEDM**

Badano materiały kompozytowe na osnowie Al+20Si+3Cu+1Mg umocnione przez cząstki ceramiczne Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC i Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> w ilości 5%. Materiały wytworzono metodą metalurgii proszków stosując wyciskanie na gorąco. Kompozyty i ich osnowy poddano obróbce elektroerozyjnej WEDM przy dwóch skrajnych wartościach energii wyładowań. Stwierdzono, że w warstwie wierzchniej (WW) materiałów po obróbce występuje charakterystyczna przetopiona strefa o grubości od 8 do 12 mikrometrów i dużej twardości w stosunku do rdzenia materiału z licznymi porami i mikropęknięciami. Próby tribologiczne na stanowisku pin-on-disc w warunkach tarcia technicznie suchego wykazały, że w początkowym okresie tarcia występuje intensywne zużywanie materiałów spowodowane stosunkowo łatwym usuwaniem WW o zmienionych właściwościach. Próbki obrobione elektroerozyjnie miały mniejszą wytrzymałość zmęczeniową niż próbki obrobione tradycyjnie np. szlifowane.

### **1. WPROWADZENIE**

Zastosowanie różnego rodzaju materiałów kompozytowych, w tym metalowych materiałów kompozytowych, w różnych gałęziach przemysłu a zwłaszcza w przemyśle lotniczym, kosmicznym, raketowym, samochodowym, zbrojeniowym itp. ciągle rośnie, bowiem kompozyty o osnowie metalowej skutecznie konkurują z tradycyjnymi stopami metali. Jest to istotne w tych zastosowaniach, w których materiałom stawia się wysokie wymagania dotyczące lekkości, wytrzymałości, sztywności i odporności na zużycie. W celu znacznej poprawy ich właściwości, a zwłaszcza w podwyższonej temperaturze lub niskiej, należy wprowadzić do materiału fazę zbrojącą w ilości objętościowo co najmniej 15% [1].

Fazami umacniającymi w kompozytach metalowych są zazwyczaj cząstki, włókna lub wiskery typu ceramicznego, bazujące na: tlenkach, węglkach, azotkach, borkach czy innych podobnych materiałach charakteryzujących się wysoką twardością.

<sup>1</sup> Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania w Warszawie

<sup>2</sup> Uniwersytet Techniczny w Delft, Holandia

<sup>3</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki

Lista materiałów stosowanych na osnowy kompozytów metalowych jest dość obszerna [2], ale dominujące znaczenie mają stopy aluminiowe, zarówno odlewnicze (Al-Si), jak i przeznaczone do przeróbki plastycznej (Al-Cu, Al-Mg), a także wytwarzane metodami metalurgii proszków (P/M) [1-3].

Jedną z barier hamujących szersze wprowadzenie kompozytów metalowych do praktyki przemysłowej są trudności technologiczne związane z ich kształtowaniem i wykańczaniem [4-7]. Spowodowane jest to między innymi niedoskonałością sposobów stosowanych do kształtowania elementów z takich kompozytów, które nie zapewniają wymaganej dokładności, chropowatości i odpowiednich właściwości warstwy wierzchniej (WW), zwłaszcza ważnych powierzchni współpracujących funkcjonalnie. Na ten stan mają także wpływ trudności z uzyskiwaniem bardzo złożonych, zwłaszcza wewnętrznych, kształtów geometrycznych oraz trudności z uzyskiwaniem otworów i szczelin o małych wymiarach.

W procesie wytwarzania elementów z kompozytów, znaczną rolę pełni nadal obróbka mechaniczna, która jest bardzo utrudniona ze względu na obecność w materiale twardych cząstek ceramicznych. Wymaga to zastosowania na ostrza narzędzi materiałów supertwardych np. PCD, regularny azotek boru – BN lub innych, co zwiększa koszty związane z wytwarzaniem elementów z takich materiałów.

Jednym z efektywnych sposobów umożliwiających kształtowanie elementów z kompozytów o osnowie metalowej i obniżenia kosztów wytwarzania, w porównaniu do innych możliwych do zastosowania sposobów, jest obróbka elektroerozyjna w jej odmianach: EDM, WEDM,  $\mu$ EDM, REDM. Jej zastosowanie umożliwia uzyskiwanie dokładności na skalę przemysłową w granicach 1 do  $5\mu\text{m}$  i chropowatości  $R_a$  w przedziale  $0,1\text{--}2\mu\text{m}$ , a nawet powierzchni o lustrzanym wyglądzie.

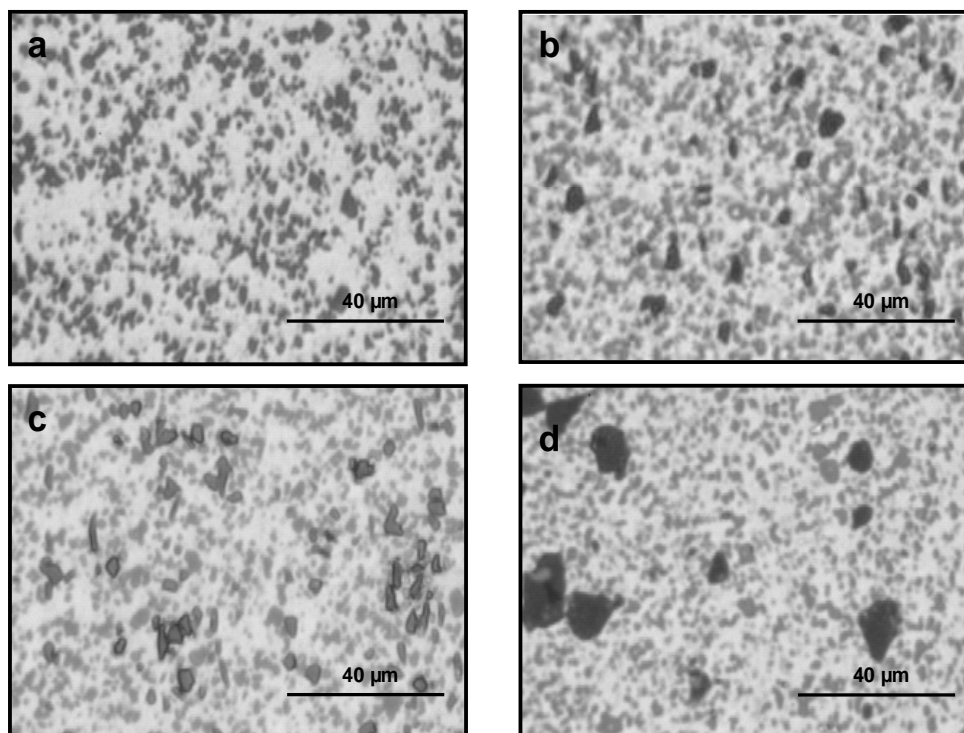
Prezentowany artykuł dotyczy badań wpływu parametrów obróbki elektroerozyjnej na stan i właściwości użytkowe elementów z kompozytów aluminiowych: chropowatości, struktury geometrycznej powierzchni obrobionej, odporności na ścieranie i wytrzymałości zmęczeniowej. Prace z tej tematyki są prowadzone w nielicznych ośrodkach naukowych na świecie.

## 2. MATERIAŁY BADANE I OBRÓBKA PRÓBEK

Badaniom poddano osnowę kompozytów o składzie Al+20%Si+3%Cu+1%Mg (ozn. KO) i materiały kompozytowe utworzone na tej osnowie z fazą zbrojącą:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ozn. KA), SiC (ozn. KS) i  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (ozn. KN).

Materiał wytworzono metodą metalurgii proszków. Zastosowany proces wyciskania na gorąco [2] zapewniał całkowite tj. 100% zagęszczenie i równomierne rozmieszczenie cząstek zbrojących w osnowie (rys. 1).

Próbki do badań wykonano przez elektroerozyjne wycinanie drutem mosiężnym o średnicy  $0,25\text{mm}$  (WEDM) w środowisku wody destylowanej i demineralizowanej na wycinarce drutowej ROBOFIL 310 firmy Charmilles z parametrami E2 i E7 (tabela 1). Parametry E2 (duża energia wyładowań) wg wskazań producenta obrabiarki zalecane są do wycinania zgrubnego stopów Al, zaś parametry E7 do wycinania wykańczającego.



Rys. 1. Struktura badanych materiałów: a) KO, b) KA (5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 6  $\mu\text{m}$ ), c) KS (5% SiC - 7  $\mu\text{m}$ ,  
d) KN (5%  $\text{Si}_3\text{N}_4$  - 16 $\mu\text{m}$ )

Fig. 1. Structure of the materials: a) KO, b) KA (5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 6  $\mu\text{m}$ ), c) KS (5% SiC - 7  $\mu\text{m}$ ,  
d) KN (5%  $\text{Si}_3\text{N}_4$  - 16 $\mu\text{m}$ )

Tabela 1. Parametry WEDM stosowane do wycinania próbek  
Table 1. Parameters of the WEDM cutting

Parametry	Napięcie robocze U	Amplituda prądu w impulsie I	Czas impulsu $t_i$	Czas przerwy $t_o$	Amplituda prądu zapłonu $I_z$	Czas impulsu zapłonu $t_z$	Ciśnienie płukania
	V	A	$\mu\text{s}$	$\mu\text{s}$	A	$\mu\text{s}$	bar
E2	-80	8	1,6	6	16	0,8	5,5
E7	-120	8	0,2	3,8	16	0,2	3,5

### 3. BADANIA TRIBOLOGICZNE

Badania tarcia i zużycia materiałów po WEDM przeprowadzono na próbkach z osnowy KO i z kompozytu KA obrabianych przy parametrach obróbki E2 i E7 (tabela 1) oraz dla porównania na próbkach szlifowanych. Zastosowano stanowisko tribologiczne z węzłem tarcia typu trzpień-tarcza. Próbki do badań w postaci wałeczków o średnicy  $\Phi=5\text{mm}$ , z obrabionymi przez szlifowanie lub elektroerozyjnie powierzchniami czołowymi, współpracowały z przeciwpróbkami w postaci krążków o średnicy  $\Phi=70\text{mm}$ .

Przeciwpółki wykonane ze stali NC10 miały twardość  $40\pm 1\text{HRC}$ , a powierzchnie trące były szlifowane do  $Ra = 0,16\mu\text{m}$ .

Próby przeprowadzono w następujących warunkach:

- nacisk jednostkowy  $p$  –  $1,5\text{MPa}$ ,
- droga tarcia  $L_{\text{max}}$  – do  $1000\text{m}$ ,
- prędkość ślizgania –  $1\text{m/s}$ .

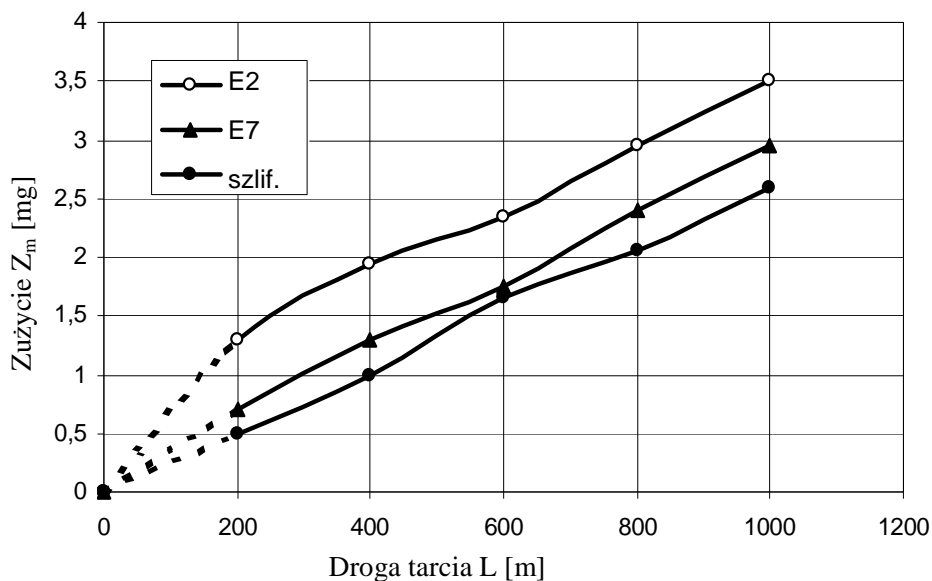
Próby prowadzone były w atmosferze powietrza w temperaturze ok.  $20^\circ\text{C}$  w warunkach tarcia suchego.

Do oceny zużycia badanych próbek wykorzystano następujące parametry: zużycie masowe –  $Z_m$  (mg), zużycie liniowe  $Z_L$  ( $\mu\text{m}$ ) i intensywność zużycia masowego w stanie ustalonym –  $I_m = Z_m/L$  (mg/m). Ponadto w czasie prób w sposób ciągły rejestrowano przebieg siły tarcia  $T$  i wartości współczynnika tarcia  $\mu$ .

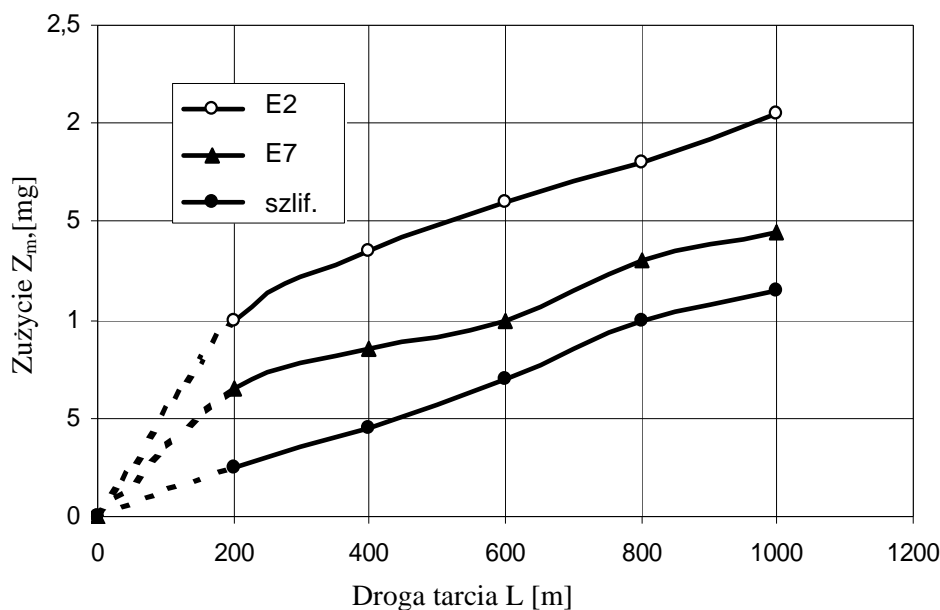
Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2 i na wykresach (rys. 2 i rys. 3).

Tabela 2. Zestawienie wyników badań tribologicznych  
Table 2. The results of the tribological tests

Materiał	Obróbka	Zużycie			Współczynnik tarcia	
		$Z_m$	$Z_L$	$I_m$	Początkowy $\mu_0$	Ustalony $\mu_u$
		mg	$\mu\text{m}$	mg/m		
KO	E2	3,5	63,2	$2,70 \cdot 10^{-3}$	0,19	0,38
	E7	2,95	53,3	$2,75 \cdot 10^{-3}$	0,21	0,38
	szlifowanie	2,6	47,0	$2,63 \cdot 10^{-3}$	0,30	0,37
KA	E2	2,05	37,0	$1,14 \cdot 10^{-3}$	0,21	0,42-0,47
	E7	1,45	26,2	$0,92 \cdot 10^{-3}$	0,20	0,42-0,47
	szlifowanie	1,15	20,8	$1,18 \cdot 10^{-3}$	0,39	0,40-0,46



Rys. 2. Zużycie materiału osnowy KO w funkcji drogi tarcia  
Fig. 2. Wear of the matrix material KO vs sliding distance



Rys. 3. Zużycie kompozytu KA w funkcji drogi tarcia

Fig. 3. Wear of the composite KA vs sliding distance

Wyniki badań zużycia nie potwierdziły oczekiwań, że twarda, przetopiona w wyniku obróbki WEDM, warstwa powierzchniowa ograniczy zużywanie próbek przynajmniej w początkowym okresie prób tarcia. Przebieg krzywych zużycia (rys. 2 i 3) jednoznacznie wskazuje na występowanie zjawiska o zupełnie innym charakterze. Przetopiona warstwa powierzchniowa ulega szybkiemu usuwaniu, o czym świadczy duże zużycie  $Z_m$  w fazie początkowej drogi tarcia (na odcinku 0-200m). Zużycie  $Z_m$  jest wtedy sumą zużycia warstwy przetopionej i postępującego później zużycia odsłoniętego materiału podłoża.

Im większą wartość ma energia wyładowań podczas obróbki elektroerozyjnej, tym większe jest zużycie  $Z_m$  w początkowym odcinku drogi tarcia. Ta zależność występuje dla obu badanych materiałów, tj. stopu i kompozytu. Warto zwrócić uwagę, że w dalszym okresie próby tarcia (od  $L=200m$  aż do  $1000m$ ) intensywność zużywania jest dla kompozytu niemal 2,5-krotnie mniejsza niż dla materiału osnowy, co potwierdza ogólnie znaną tezę o korzyściach wynikających ze stosowania kompozytów. Jednocześnie dla każdego z omawianych materiałów intensywność zużywania ma wartość zbliżoną, niezależnie od poziomu energii wyładowań przy WEDM jak i dla powierzchni bez tej obróbki tj. szlifowanej.

Współczynnik tarcia  $\mu_o$  w początkowej fazie tarcia przyjmuje stosunkowo małe wartości (tabela 2). Wtedy z powierzchnią przeciwpróbki współpracuje twarda, przetopiona warstwa materiału. Przy dalszej współpracy par trących współczynnik tarcia  $\mu_u$  odpowiada wartościom współczynnika tarcia materiału osnowy i kompozytu. Tworzą się wówczas stabilne warunki współpracy obu powierzchni trących, definiowane jako powstanie tzw. eksploatacyjnej warstwy wierzchniej (EWW) [1].

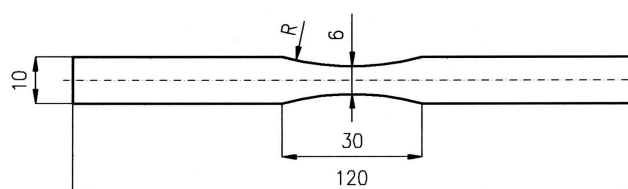
Wartości  $\mu_o$  są zbliżone dla obu materiałów i stosowanych energii wyładowań przy obróbce EDM i zawierają się w zakresie 0,19-0,21. W warunkach ustalonych tarcia,

współczynnik tarcia przyjmuje typowe wartości dla badanych materiałów [1], tj. 0,38 dla osnowy KO i 0,42-0,47 dla kompozytu KA. Przejście od wartości  $\mu_0$  do wartości  $\mu_1$  występuje na odcinku drogi tarcia 50-180m. Warstwa zmieniona w wyniku EDM jest wtedy usuwana, po czym rozpoczyna się tarcie pomiędzy materiałem (KO lub KA) i przeciwpróbką.

W podsumowaniu przeprowadzonych prób tarcia i zużycia materiału osnowy ze stopu Al-Si (KO) i kompozytu (KA) z taką osnową, umocnionego przez cząstki  $Al_2O_3$ , należy stwierdzić, że obróbka elektroerozyjna nie wprowadza korzystnych zmian w aspekcie właściwości tribologicznych warstw powierzchniowych. Wytworzona w wyniku EDM warstwa wierzchnia jest łatwo usuwana z podłoża i przyczynia się do dużego wzrostu zużycia w początkowej fazie tarcia. Powierzchnie takich materiałów obrobione elektroerozyjnie, a przewidywane do współpracy w węzłach tarciovych, powinny być wykończone innymi sposobami celem usunięcia warstwy wierzchniej zmienionej w wyniku obróbki elektroerozyjnej, zarówno strefy przetopionej jak i strefy wpływów cieplnych. Zalecenie to odnosi się do wszystkich kompozytów na bazie Al wzmacnianych różnymi cząstkami ceramicznymi.

#### 4. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

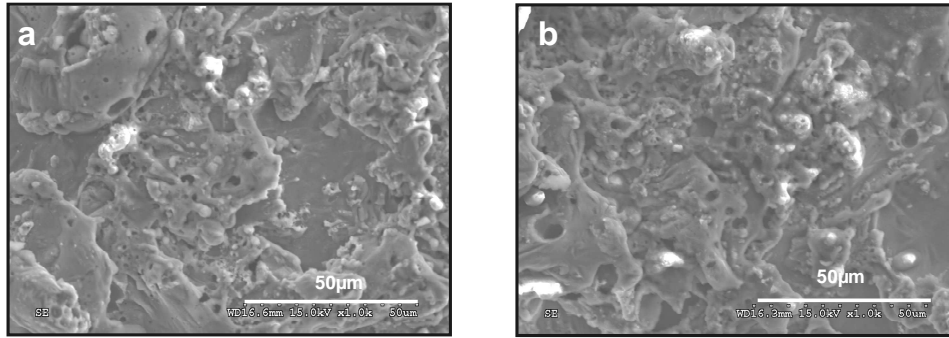
Badania zmęczeniowe prowadzono na próbkach płaskich grubości 1,52–1,60mm i wymiarach jak na rysunku 4, wyciętych drutem elektroerozyjnie z prętów  $\Phi 15$ mm przy parametrach E7 (tabela. 1).



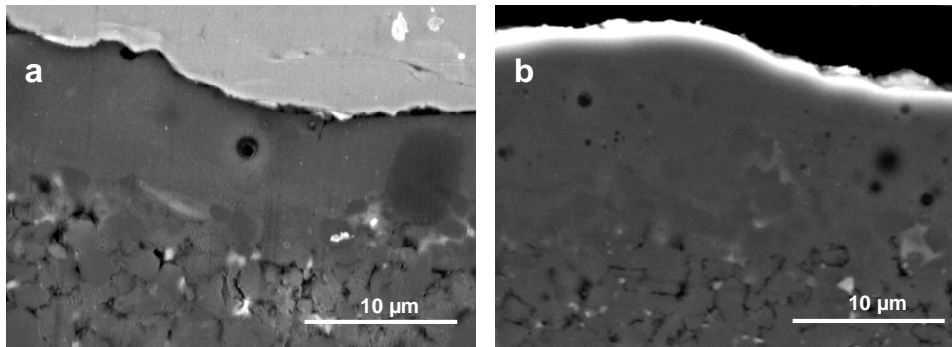
Rys. 4. Kształt i wymiary próbek do badań zmęczeniowych  
Fig. 3. Shape and size of the samples intended for fatigue tests

Obrazy powierzchni po obróbce elektroerozyjnej WEDM – E7 dla osnowy KO i kompozytu KA uzyskane za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) pokazano na rysunku 5. Wyraźnie widoczne są obszary nadtopione podczas obróbki jako występy i nierówności o zaokrąglonym profilu, oraz wgłębienia po usuniętym materiale. Na tle tych występow i wgłębień obserwuje się drobniejsze pory powstałe po wyładowaniach elektrycznych. Uśrednione chropowatości  $R_a/R_z$  po WEDM – E7 wynosiły dla poszczególnych materiałów: KO – 5,4/31 $\mu$ m, KA – 4,6/27,2 $\mu$ m, KS – 5/30,1 $\mu$ m, KN – 4,7/29,1 $\mu$ m – i jak widać były do siebie zbliżone.

Na rysunku 6 pokazano przykładowo na zglądach metalograficznych strukturę warstwy wierzchniej kompozytu KA po WEDM.



Rys. 5. Obrazy powierzchni (SEM) po obróbce elektroerozyjnej: a) KO, b) KA  
 Fig. 5. SEM images of the sample surface after electrodischarge machining: a) KO, b) KA



Rys. 6. Struktura metalograficzna warstwy wierzchniej kompozytu KA po WEDM: a) przy E7, b) przy E2  
 Fig. 6. Structure of the upper layer of the composite KA after WEDM: a) at E7, b) at E2

Na przedstawionych fotografiach można wyróżnić w warstwie przypowierzchniowej (zwłaszcza przy parametrach E2 – rys. 6b) strefę o zdecydowanie zmienionej budowie [9],[10] i położoną głębiej strefę wpływów cieplnych o wyraźnych zmianach strukturalnych materiału. Dla badanych materiałów stwierdzono, że grubość strefy przypowierzchniowej zmienia się wraz ze zmianą warunków WEDM i np. dla parametrów E7 wynosi około 8µm, a dla E2 około 12µm.

W tabeli 3 zamieszczono wyniki pomiarów mikrotwardości WW dla osnowy KO i kompozytu KA wykonanych na skośnych zglądach metalograficznych pod kątem 6°.

Tabela 3. Twardość warstwy wierzchniej materiałów KO i KA po WEDM – E2  
 Table 3. Hardness of the upper layer of the material KO and KA after WEDM – E2

Materiał	Mikrotwardość HV0,01		
	Strefa przypowierzchniowa	Strefa wpływów cieplnych	Rdzeń materiału
KO	339±7	219±6	142±5
KA	358±8	245±6	145±7

Obserwuje się wyraźny wzrost mikrotwardości w strefie przypowierzchniowej w stosunku do rdzenia materiału, co można uznać za zjawisko korzystne. Ale równocześnie w tej strefie obserwowane są pory, mikropęknięcia i inne defekty strukturalne [9],[10], co niekorzystnie może wpływać na właściwości użytkowe tak obrabianych elementów.

Badania zmęczeniowe próbek zrealizowano w układzie osiowego pulsacyjnego rozciągania w zakresie naprężeń  $\sigma_{\min}$  do  $\sigma_{\max}$ . Stosowano maszynę wytrzymałościową MTS 858. Jako naprężenie  $\sigma_{\max}$  przyjęto naprężenie odpowiadające wartości średniej granicy plastyczności badanych materiałów tj. 180MPa. Próbki badane były przy stałym współczynniku asymetrii cyklu  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,1$ .

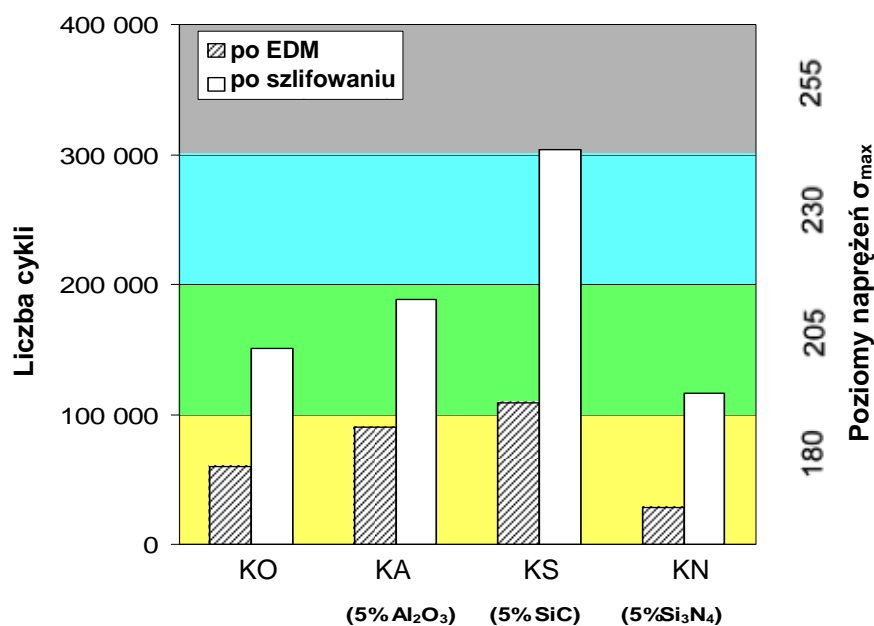
Rejestrowano liczbę cykli do zniszczenia próbki. Jeżeli po 100000 cykli obciążeń próbka nie uległa zniszczeniu, wtedy wartość  $\sigma_{\max}$  zwiększano o 25MPa i próbę kontynuowano. Populacja próbek w każdej próbie wynosiła 5 sztuk.

Dla porównania próbom zmęczeniowym poddano również próbki z powierzchniami szlifowanymi. W tym celu wykorzystano próbki wycięte elektroerozyjnie, z których usunięto przez szlifowanie warstwę wierzchnią wytworzoną podczas obróbki WEDM. Próbki po szlifowaniu miały zbliżoną chropowatość powierzchni ( $R_a \approx 2,38\mu\text{m}$  i  $R_z \approx 15,45\mu\text{m}$ ).

Jako kryterium odporności na zmęczenie przyjęto liczbę cykli, przy której następowało pełne zniszczenie próbek. Zgodnie z oczekiwaniami zniszczenie zmęczeniowe następowało w miejscu przewężenia, a charakterzy przełomu były podobne w całej populacji próbek.

Jak widać z rysunku 7 spośród badanych materiałów, kompozyty z cząstkami SiC charakteryzują się największą odpornością zmęczeniową i to zarówno po WEDM jak i po szlifowaniu, a najmniejszą zaś kompozyty umacniane cząstkami  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Generalnie można stwierdzić, że próbki po WEDM badanych materiałów wykazują mniejszą trwałość zmęczeniową od próbek po szlifowaniu. Przyczyną tego są niekorzystne zmiany jakie zachodzą w WW, opisane powyżej. Podobne spostrzeżenia, ale dla innych materiałów niż omawiane są przytaczane w wielu publikacjach.



Rys. 7. Wyniki prób zmęczeniowych  
Fig. 7. Results of the fatigue tests



## 5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wpływu WEDM na odporność na zużywanie i zmęczenie spiekanego stopu aluminiowego Al+20%Si+3%Cu+1%Mg i kompozytów z osnową z tego stopu, wzmacnianych cząstkami zbrojącymi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC i Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> wykazały, że:

- obróbka elektroerozyjna wprowadza istotne zmiany w warstwie wierzchniej (WW). W wyniku WEDM powstaje cienka przetopiona strefa przypowierzchniowa o dużej twardości w stosunku do rdzenia i dużej ilości defektów w postaci porów, mikropęknięć, co wpływa na zwiększenie intensywności zużywania w początkowym okresie tarcia. W stanie ustalonym tarcia, po usunięciu warstwy przypowierzchniowej, intensywność zużywania kompozytu jest 2–3 razy mniejsza niż osnowy,
- obecność wyżej wymienionych defektów powstających w strefie przypowierzchniowej jest główną przyczyną mniejszej wytrzymałości zmęczeniowej próbek z obu materiałów w stosunku do wytrzymałości próbek po szlifowaniu.

## LITERATURA

- [1] SOBCZAK J., 2001, *Kompozyty metalowe*, Wyd. Instytutu Odlewnictwa i Instytutu Transportu Samochodowego, Kraków – Warszawa.
- [2] BIAŁO D., 2002, *Zużycie trybologiczne kompozytów na osnowie stopów aluminiowych otrzymanych z proszków*, Prace Naukowe PW, Mechanika, 192, Oficyna Wydawnicza PW.
- [3] OCZOŚ K. E., 1998, *Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [4] CRONJAEGER L., MEISTER D., 1992, *Machining fibre and particle reinforced aluminium*, Annals of the CIPR, 41, 63-66.
- [5] MONAGMAN J., 1998, *Factors affecting the machinability of Al/SiC metal-matrix composites*, Key Engineering Materials, 138-140, 545-574.
- [6] JANKOWIAK M., KAWALEC M., KROL G., 1995, *Skrawność ostrzy narzędzi podczas tłoczenia stopów aluminium wzmacnianych cząstkami Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Mechanika, 44, 133
- [7] PEROŃCZYK J., KOZAK J., 1998, *Obróbka elektroerozyjna kompozytu stopu Al z Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*, VIII Międzynarodowa Konferencja "Przepływowe maszyny wirnikowe", Rzeszów-Bystre, 391-406.
- [8] TRZASKA M., BIAŁO D., PEROŃCZYK J., 2005, *Influence of ceramic reinforcement on fatigue strength of aluminium matrix composites after electrodischarge machining*, Powder Metallurgy Word Congress. Prague, Czech Republic, 2-5 Oct. 2005.
- [9] PEROŃCZYK J., 2008, *Rozprawa doktorska pt. Obróbka elektroerozyjna kompozytów na osnowie metalowej i ceramiki technicznej*, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Warszawa.
- [10] CICHOSZ P., 2011, *Kształtowanie ubytkowe materiałów kompozytowych na bazie aluminium*, Mechanik, 12, XXVIII – XXIX.

## SELECTED PROPERTIES OF THE SAMPLES FROM METAL MATRIX COMPOSITES AFTER WEDM

The study deals with the problems of composite materials with the Al+20%Si+3%Cu+1%Mg matrix reinforced with 5% of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC or Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> particles. The composites were manufactured by powder metallurgy using hot extrusion. The WEDM machining of composites and their matrix was conducted at two different energies of single discharges. It has been noticed, that upper layer (WW) of materials contains characteristic remelted zone with thickness of 6 to 12 μm with high hardness when compared to the core and with many pores and micro cracks. Tribological tests on pin-on-disc stand at dry friction conditions shown that at the beginning period of the friction the material wear is very intensive. It is caused by relatively easy removing of the WW with changed by WEDM properties. Fatigue strength of the samples machined by WEDM is lower than fatigue strength of the samples machined traditionally, for example by grinding.