

# Morfologia złączy kompozytów Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zgrzewanych tarciovo ze stopem Al 44200

Morphology of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -44200 Al alloy joints obtained by friction welding technique

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki spajania stopu EN-AC-44200 z materiałami kompozytowymi Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> z wykorzystaniem techniki zgrzewania tarciovo. Zastosowane materiały kompozytowe wytwarzano techniką ciśnieniowej infiltracji SC (ang. squeeze casting) oraz metodą iskrowego spiekania plazmowego SPS (ang. Spark Plasma Sintering). Zawierały one 20 oraz 30% objętościowego udziału fazy wzmacniającej – tlenku glinu, w różnej postaci. W przypadku kompozytów SC wzmocnienie stanowiły cząstki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (α-form) o wielkości 3-6 μm, zaś dla kompozytów SPS był to elektrokorund gruboziarnisty o uziarnieniu 180 μm. W pracy przedstawiono optymalne parametry procesu zgrzewania tarciovo dla poszczególnych materiałów kompozytowych, opracowane przez autorów na podstawie analizy zmian mikrostruktury i twardości materiałów w obszarze spajania. Przeprowadzone badania miały na celu ocenę morfologii oraz jakości połączenia pomiędzy stopem 44200 a kompozytami Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> w zależności od rodzaju wzmocnienia oraz techniki wytwarzania kompozytów Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Słowa kluczowe:** zgrzewanie tarciovo; kompozyt Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; stop Al

## Abstract

The paper presents results of bonding EN AC-44200 alloy with a different composite materials by friction welding technique. Materials used in the study, were processed using two techniques: squeeze casting (SC) and spark plasma sintering (SPS). It contained a 20% and 30% volume reinforced fraction of different forms of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. This paper presents the developed friction welding conditions of two different composite materials, and the analysis of microstructure and microhardness for obtained joints. All of studies were performed to determine the morphology and the quality of the connection between the 44200 alloy and Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites.

**Keywords:** friction welding; Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite; alumina; Al alloy

## Wstęp

Materiały kompozytowe na bazie aluminium, najczęściej wykorzystuje się w przemyśle motoryzacyjnym, na elementy silników spalinowych: tuleje cylindrów, zawory, a także jako materiały na tarcze hamulcowe, zaciski hamulcowe czy wały napędowe [1].

Aby w pełni wykorzystać potencjał aplikacyjny materiałów kompozytowych należy stosować odpowiednie techniki spajania materiałów, mając na uwadze wysokie wymagania oraz warunki w jakich muszą pracować złącza. W przypadku spajania materiałów różnoimiennych (ceramika - metal) pojawiają się problemy wynikające ze różnicowania natury wiązań atomowych tych materiałów. Wśród najważniejszych należy wymienić: brak zwilżalności ceramiki przez ciekłe metale, różnice we właściwościach fizycznych i chemicznych, powodujące generowanie termicznych naprężeń własnych [2]. Wymusza to konieczność zapewnienia specjalnych warunków łączenia,

przygotowania łączonych powierzchni, wytwarzania warstw pośrednich.

Jedną z technik umożliwiających spajanie materiałów różnoimiennych bez konieczności stosowania dodatkowych zabiegów jest zgrzewanie tarciovo. W pracach [3÷5] autorzy z powodzeniem wykorzystują technikę zgrzewania tarciovo do łączenia nie tylko materiałów kompozytowych, ale również intermetalików. Autorzy koncentrują się na określeniu wpływu parametrów procesu zgrzewania na jakość uzyskiwanych połączeń. Wyniki wyraźnie wykazały wpływ prędkości obrotowej, siły docisku w fazie tarcia i spęczania, na charakter otrzymywanych złączy, jak również na zmiany struktur materiałów łączonych w tzw. strefie wpływu ciepła. Dodatkowo, zgrzewanie tarciovo z powodzeniem wykorzystuje się do wytwarzania warstw metalicznych na ceramice [6÷8].

Mgr inż. Robert Siedlec, mgr inż. Cezary Strąk, mgr inż. Rafał Zybala – Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: robert.siedlec@itme.edu.pl

Celem prezentowanej pracy było określenie optymalnych, z punktu widzenia jakości połączenia, parametrów procesu zgrzewania tarcowego. W artykule przedstawiono analizę wpływu rodzaju wzmocnienia oraz techniki wytwarzania kompozytów Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na strukturę i właściwości złączy otrzymanych techniką zgrzewania tarcowego.

## Prace technologiczne oraz badania materiałów

Podstawowym materiałem wykorzystywanym w pracach był stop aluminium EN AC-44200, zawierający dodatki o następującym składzie wagowym: 10,5-13,5%Si, 0,55%Fe, 0,35%Mn oraz 0,05%Cu. Był to odlewniczy stop aluminium o dużej zawartości krzemu, należący do grupy tzw. siluminów eutektycznych (rys. 1a).

Zastosowane materiały kompozytowe wytwarzano techniką ciśnieniowej infiltracji (SC) [9] oraz metodą iskrowego

spiekania plazmowego (SPS) w ITME w Zakładzie Kompozytów Ceramiczno-Metalowych i Złączy.

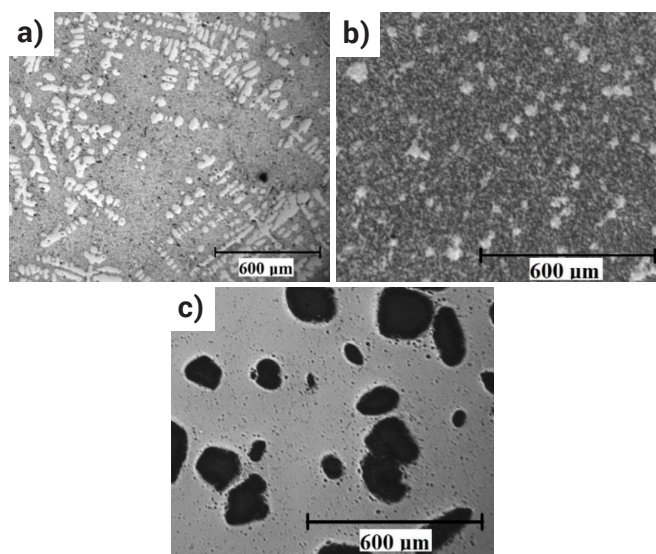
Pierwszą grupę materiałów kompozytowych wytworzono przy użyciu metody infiltracji ciśnieniowej porowatych kształtek ceramicznych ciekłym stopem EN AC-44200. Kształtki ceramiczne wykonano z cząstek tlenku glinu –  $\alpha$  ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) o wielkości 3-6  $\mu$ m, a następnie infiltrowano ciekłym stopem pod ciśnieniem 100 MPa. Podczas procesu infiltracji temperatura stopu EN AC-44200 wynosiła 720 °C, natomiast kształtki ceramiczne 480 °C [9].

Drugą grupę materiałów kompozytowych otrzymano metodą metalurgii proszków poprzez mieszanie cząstek ceramicznych w postaci elektrokorundu gruboziarnistego (uziarnienie 180  $\mu$ m) z proszkiem aluminium (uziarnienie 25  $\mu$ m), który stanowił osnowę. Przygotowane proszki poddano procesowi mieszania z prędkością obrotową 52 obr/min w mieszalniku obrotowym, przez 7 godzin. Uzyskane mieszaniny proszków kompozytowych spieczono przy użyciu techniki SPS. Ciśnienie spiekania wynosiło 30 MPa, temperatura 575 °C, natomiast szybkość nagrzewania oraz czas spiekania wynosiły odpowiednio 100°C/min i 5 min.

Zarówno kompozyty infiltrowane ciśnieniowo, jak i spiekane techniką SPS zawierały 20% oraz 30% udziału objętościowego fazy ceramicznej. Gęstość oraz twardość kompozytów przedstawiono w tablicy I. Przeprowadzone badania struktur tych materiałów wykazały równomierny rozkład fazy ceramicznej w osnowie aluminium oraz ciągłość połączenia na granicy ceramika – metal (rys.1b, c). Analiza mikrostrukturalna potwierdziła znaczące różnice wielkości fazy wzmacniającej. Dla kompozytów SC (rys.1b) były to cząstki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o wielkości 3-6  $\mu$ m, zaś dla kompozytów SPS 180  $\mu$ m (rys.1c).

Proces zgrzewania stopu aluminium 44200 z kompozytami Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wytwarzanymi różnymi technikami przeprowadzono na zgrzewarce tarcowej H&W RSM200. Wszystkie łączone materiały kompozytowe i stop zostały uformowane do postaci prętów o średnicy  $\varnothing$ 8 mm oraz długości 30 mm, posiadały płaskie powierzchnie czołowe.

W tablicy II zestawiono parametry zgrzewania tarcowego dla poszczególnych materiałów kompozytowych. Parametry procesu zgrzewania dobrano w sposób eksperymentalny. Przeprowadzono próby zgrzewania w zakresie prędkości



Rys. 1. Struktura materiałów wyjściowych: a) stop EN AC-44200, b) kompozyt Al alloy-30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SC, c) Al alloy-30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SPS  
Fig. 1. Microstructure of a) 44200 Al alloy, b) Al alloy-30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SC composite, c) Al alloy-30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SPS composite

Tablica I. Własności zastosowanych kompozytów Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Table I. Properties of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite

Technika wytwarzania	Rodzaj wzmocnienia	Wielkość wzmocnienia [ $\mu$ m]	Materiał/oznaczenie	Gęstość względna [%]	Twardość HV [1]
SC	cząstki $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-6	Al alloy-30%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	94,63	140
			Al alloy-20%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	97,17	110
SPS	elektrokorund gruboziarnisty	180	Al-30%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -elekG	92,64	52
			Al-20%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -elekG	95,11	47

Tablica II. Warunki procesu zgrzewania stopu Al dla różnych kompozytów

Table II. Friction welding conditions for Al alloy joined with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite

Materiał kompozytowy	Ciśnienie w fazie tarcia [MPa]	Czas tarcia [ms]	Prędkość obrotowa [rpm]	Czas spęczania [ms]	Ciśnienie w fazie spęczania [MPa]
Al alloy+30%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SC	0,8	40	13000	3000	1
Al alloy+20%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SC	0,5	40	13000	3000	1
Al+30%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SPS	0,5	40	11000	3000	0,8
Al+20%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SPS	0,5	40	10000	3000	0,5

obrotowych od 10000 do 23000 obr/min. Zastosowanie wysokiej prędkości wrzeciona, powyżej 20000 obr/min, powodowało wytworzenie dużej ilości ciepła, co skutkowało uformowaniem się znacznej wypłytki i nadmiernym skróceniem materiału (nawet do 20%). Siłę docisku zmieniano w zakresie od 1 do 2 MPa. Wysoki docisk w fazie spęczania powodował pękanie materiału kompozytowego. Przedstawione w pracy parametry określono jako optymalne z punktu widzenia jakości uzyskanych złączy.

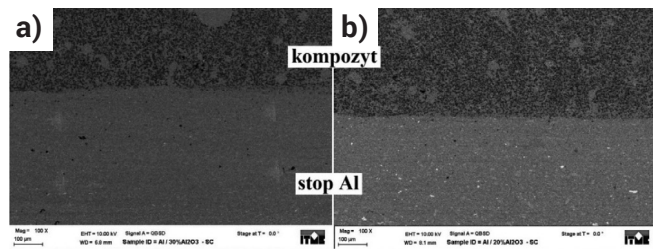
Wybór parametrów zgrzewania oparto o właściwości kompozytów m.in. ich twardość. Ze względu na dwukrotnie niższą twardość materiałów kompozytowych wytwarzanych techniką spiekania plazmowego w stosunku do kompozytów infiltrowanych ciśnieniowo, zmniejszono prędkość obrotową wrzeciona oraz siłę docisku w fazie spęczania.

W celu charakteryzacji uzyskanych złączy wykonano badania mikrostruktury przy użyciu mikroskopu optycznego Axiovert 40 MAT oraz na skaningowym mikroskopie elektronowym Auriga CrossBeam Workstation. Wykonano również pomiary twardości na przekroju złączy z wykorzystaniem twardościomierza Durascan 10 metodą Vickersa (HV1).

## Analiza wyników

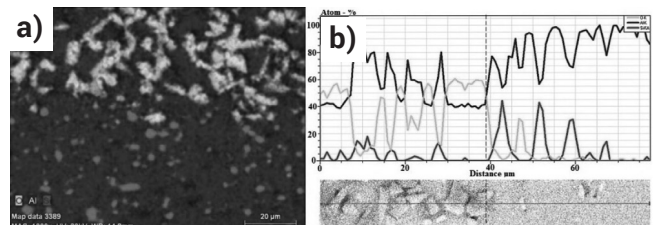
W tablicy III przedstawiono zdjęcia makroskopowe wraz z odpowiadającymi im przekrojami dla uzyskanych złączy. Największa wypłytką po stronie stopu aluminium wystąpiła w złączu z kompozytem Al-30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wytworzonym techniką ciśnieniowej infiltracji. Wynikało to z faktu zastosowania największej siły docisku w fazie tarcia, ze względu na wysoką twardość tego kompozytu (HV=140). Nie stwierdzono natomiast żadnych deformacji plastycznych kompozytu. Dla złączy z kompozytami SPS zaobserwowano wypłytkę zarówno aluminium jak i kompozytu; nastąpiło równomierne uplastycznienie obu części złącza.

Analizując obrazy SEM (rys. 2) przedstawiające mikrostruktury złączy stopu 44200 z kompozytami SC, trudno było zaobserwować warstwę przejściową w złączach. Widoczna jest zwarta, wyraźna granica rozdziálu pomiędzy stopem aluminium a kompozytem. Jednocześnie złącza zachowały ciągłość wzdłuż całego przekroju. Mapa rozkładu pierwiastków oraz rozkład liniowy na przekroju złącza (rys. 3) potwierdziły brak występowania strefy dyfuzyjnej oraz wyraźną granicę rozdziálu łączonych materiałów.



**Rys. 2.** Obrazy SEM mikrostruktury złączy stop 44200 – kompozyt SC: a) Al alloy+30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, b) Al alloy+20%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**Fig. 2.** SEM image of Al alloy 44200–SC composite friction welded joints: a) Al alloy+30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, b) Al alloy+20%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



**Rys. 3.** Rozkład pierwiastków O, Al, Si na przekroju złącza: stop Al-Al alloy+30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SC, a) powierzchniowy, b) liniowy

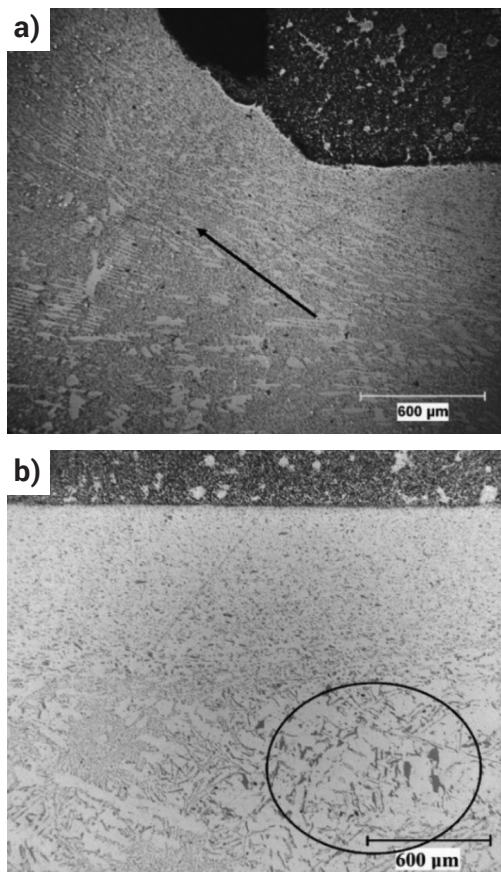
**Fig. 3.** Distribution of O, Al, Si in cross-section of Al-Al alloy+30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SC joint: a) surface, b) linear

Na obrazach z mikroskopu optycznego (rys. 4), zaobserwowano zmianę struktury oraz silne uplastycznienie stopu aluminium. Na skutek działania siły docisku w fazie spęczania oraz tarcia wewnętrznego, nastąpiło mechaniczne wymieszanie materiału i przemieszczenie uplastycznionego stopu 44200 do wypłytki. Na rysunku 4a widoczny jest bardzo wyraźnie kierunek płynięcia materiału. Nie obserwowano żadnych zmian w strukturze kompozytu.

W środkowym obszarze złącza aluminium-kompozyt Al alloy+30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SC, gdzie względna prędkość łączonych materiałów była najmniejsza, na głębokości ok. 650 μm wystąpiła strefa o silnie rozdrobnionym i wymieszanym materiale (rys. 4b), w której twardość wyniosła 60 [HV1]. Stop EN AC-44200 o mikrotwardości 50 [HV1] uległ w strefie połączenia umocnieniu. Było to spowodowane oddziaływaniem wysokiej temperatury w tym obszarze. Na zewnętrznym obszarze stopu aluminium zaznaczonym na rys. 6b, widoczne były duże iglaste wydzielenia krzemu, które obniżyły twardość materiału do wartości 40 [HV1]. Natomiast mikrotwardość

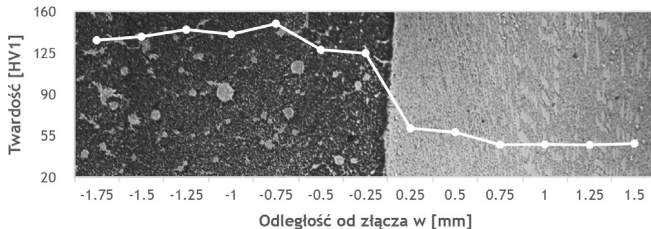
**Tablica III.** Zdjęcia makroskopowe i przekroje złączy dla poszczególnych kompozytów  
**Table III.** Shape and cross-section view of friction welded composites

Metoda:	SC		SPS	
Materiał	Al alloy +30%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al alloy +20%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al alloy +30%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -elekG	Al alloy +20%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -elekG
Widok złącza: kompozyt-stop				
Przekrój złącza: kompozyt-stop				



**Rys. 4.** Mikrostruktura stopu 44200 w obszarze złącza: stop-Al alloy-30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SC

**Fig. 4.** Microstructures of Al alloy 44200 in area of alloy-Al alloy-30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SC joint



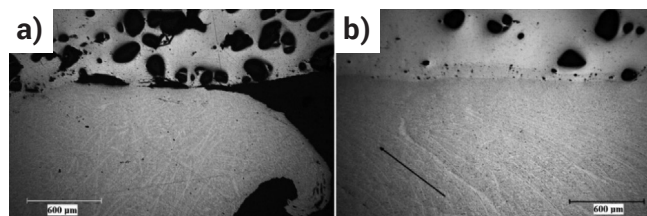
**Rys. 5.** Rozkład twardości na przekroju złącza: stop Al-kompozyt Al alloy-30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SC

**Fig. 5.** Microhardness distribution in the cross-section of Al alloy-Al alloy-30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SC composite

kompozytu, wynosząca 140 [HV1], zmniejszyła się w strefie połączenia do 125 [HV1] (rys. 5).

Ze względu na niższą twardość kompozytu Al-20%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SC zastosowano niższe ciśnienie w fazie tarcia, co spowodowało powstanie mniejszej wypłytki po stronie aluminium niż w przypadku kompozytu z dodatkiem 30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (tabl. III). Niższa siła docisku w fazie tarcia spowodowała również, że głębokość zmian w strukturze stopu aluminium była nieco mniejsza niż poprzednio i wyniosła 500 µm.

Na rysunku 6 przedstawiono złącze stopu EN AC-44200 z kompozytami wytworzonymi techniką SPS, gdzie wzmocnienie stanowił elektrokorund gruboziarnisty. Ze względu na niższą twardość kompozytów SPS, która była porównywalna z twardością stopu EN AC-44200 (wynikającą z zastosowania czystego aluminium jako osnowy) zaobserwowano formowanie się wypłytki zarówno po stronie aluminium jak i kompozytu (tabl. III). Obserwacje mikroskopowe złączy aluminium z kompozytami SPS wykazały, że połączenia miały charakter ciągły na całym przekroju próbki (rys. 6a, b).

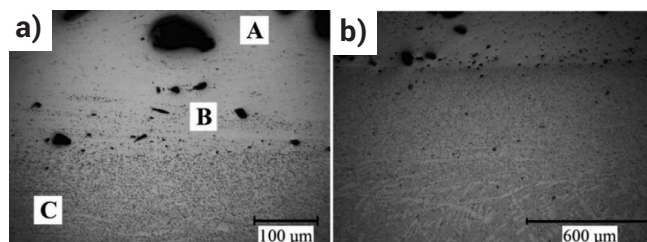


**Rys. 6.** Mikrostruktura złącza stop Al- kompozyt SPS: a) Al+30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> b) Al+20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**Fig. 6.** Microstructures of friction welded joints of Al alloy-SPS composite: a) Al+30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> b) Al+20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

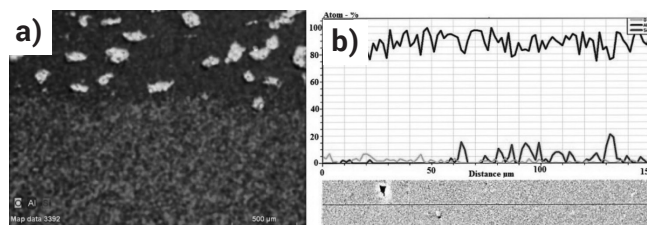
Po stronie aluminium widoczne były plastyczne deformacje oraz płynięcie materiału od osi próbki do zewnątrz w kierunku wypłytki (rys. 6a, b). Dodatkowo widoczne są również zmiany strukturalne w materiale kompozytowym. W mikrostrukturze kompozytu na powierzchni przylegania do stopu stwierdzono występowanie strefy przejściowej o szerokości 100 µm (rys. 6b). Ponadto w obszarze strefy połączenia zaobserwowano rozdrobnienie dużych ziaren elektrokorundu. W wyniku tarcia w miejscu styku łączonych materiałów i działania siły docisku, nastąpiło pęknięcie ziaren elektrokorundu.

Na rysunku 7a, przedstawiono dokładną analizę strefy złącza stopu EN AC-44200 z kompozytem Al+20%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SPS. W obszarze oznaczonym literą „A” wykazano niezmienną mikrostrukturę kompozytu Al-20%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SPS. W paśmie oznaczonym literą „B” zaobserwowano wyraźne rozdrobnienie i wymieszanie ziaren elektrokorundu. Dolna część zdjęcia oznaczona literą „C” przedstawia rozdrobnioną strukturę stopu aluminium. Wyraźnie widoczna we wszystkich złączach z kompozytami SPS warstwa przejściowa, świadczyła o dyfuzyjnym charakterze złącza. Potwierdziły to badania rozkładu pierwiastków na przekroju złącza (rys. 8a, b). Na liniowym rozkładzie pierwiastków (rys. 8b) widoczna dyfuzja krzemu w kierunku kompozytu na głębokości około 100 µm.



**Rys. 7.** Mikrostruktura złącza stop Al- kompozyt SPS: a) Al+30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> b) Al+20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**Fig. 7.** Microstructures of friction welded joints of Al alloy-SPS composite: a) Al+30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> b) Al+20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



**Rys. 8.** Rozkład pierwiastków O, Al, Si na przekroju złącza stop-Al-30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SPS, a) powierzchniowy, b) liniowy

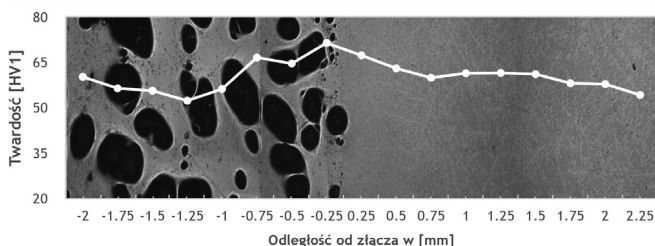
**Fig. 8.** Distribution of O, Al, Si in cross-section of Al-Al alloy+30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SPS joint: a) surface, b) linear

Zmniejszenie parametrów procesu zgrzewania dla kompozytów SPS (mniejsza prędkość obrotowa oraz ciśnienie docisku) spowodowały, że strefa odkształceń plastycznych po stronie aluminium była mniejsza (rys. 7b) niż dla złącza z kompozytami SC i wyniosła ok. 450 µm. W obszarze przylegającym do złącza, aluminium posiadało strukturę drobnoziarnistą, odkształconą plastycznie (rys. 7b), o mikrotwar-

dości zwiększonej do 60 [HV1]. W odległości powyżej 2 mm, twardość aluminium spadła do wartości twardości materiału rodzimego: 50 [HV1]. Badania wykazały, że również po stronie kompozytu w warstwie przejściowej wystąpiło umocnienie materiału; mikrotwardość wzrosła do 70 [HV1] (rys. 9).

Morfologia otrzymanych tarciowo złączy była zależna od parametrów zgrzewania tarcioowego. Dla złączy z kompozytami SC, gdzie prędkość obrotowa i siła docisku była największa, w centralnym obszarze złącza zaobserwowano rozdrobnioną mikrostrukturę stopu, z drobnymi płytkowymi wydzieleniami krzemu w osnowie aluminium. Natomiast na zewnętrznych obszarach próbek widoczne były duże iglaste wydzielenia krzemu pierwotnego (rys. 10), które obniżyły twardość stopu (HV40).

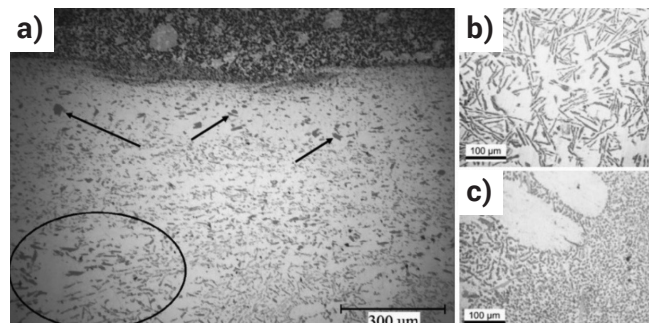
Zgodnie z badaniami autorów [10] struktura siluminów bezpośrednio po odlaniu zawierała grube, iglaste kryształy



**Rys. 9.** Rozkład twardości na przekroju złącza: Al-kompozyt Al-30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SPS

**Fig. 9.** Microhardness distribution in the cross-section of Al alloy-Al alloy-30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SPS composite

krzemu (rys. 10b), które niekorzystnie wpływały na własności mechaniczne stopu. Strukturę siluminów można polepszyć przez szybkie chłodzenie po odlaniu lub modyfikowanie strontem, sodem, borem (rys. 10c) [10]. Wysoka prędkość obrotowa i ciśnienie w fazie tarcia, spowodowały wytworzenie dużej ilości ciepła, w skutek czego nastąpiła obróbka cieplna stopu EN AC-44200. Nastąpiło wytrącenie grubokryształicznej fazy krzemu, co odpowiadało strukturze aluminium przed modyfikacją (rys. 10a, b). W przypadku złączy z kompozytami SPS, gdzie zastosowane prędkości obrotowe oraz siły docisku były mniejsze, nie zaobserwowano wydzielenia krzemu pierwotnego.



**Rys. 10.** Mikrostruktura a) złącza Al-Al+20%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SC, b) stopu AlSi11 bez modyfikacji, c) stopu AlSi11 po modyfikacji Sr, Ti oraz B [10]

**Fig. 10.** Microstructure of: a) Al-Al+20%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SC joint, b) AlSi11 alloy without modification, c) AlSi11 alloy after Sr, Ti and B modification [10]

## Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki prób spajania stopu aluminium 44200 z różnymi kompozytami Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> przy użyciu techniki zgrzewania tarcioowego. Opracowano warunki zgrzewania dla poszczególnych materiałów kompozytowych zawierających 20% oraz 30% udziału objętościowy fazy ceramicznej. Na podstawie badań strukturalnych stwierdzono, że wszystkie uzyskane złącza charakteryzowały się ciągłą, zwartą budową wzdłuż całego przekroju. Mapy rozkładu pierwiastków w złączu z kompozytami SPS, potwierdzają obecność warstwy przejściowej i tym samym mechanizmu dyfuzyjnego w procesie tworzenia się złącza. Morfologia otrzymanych tarciowo złączy była zależna od parametrów procesu. Większa siła docisku powodowała powstawanie większej wypłytki po stronie stopu Al. Zaobserwowano bezpośredni wpływ prędkości obrotowej oraz siły docisku na strukturę złączy. Wraz ze wzrostem tych parametrów, zwiększała się szerokość strefy zmian strukturalnych aluminium. Wysokie parametry zgrzewania tarcioowego powodowały powstanie niekorzystnych zmian w strukturze stopu aluminium. Dobór prawidłowych parametrów zgrzewania tarcioowego jest zatem kluczowy, aby uzyskać trwałe, jednorodne połączenie.

## Literatura

- [1] D. Özyürek, S. Tekeli, A. Güral, A. Meyveci, M. Gürü, "Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> amount on microstructure and wear properties of Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composites prepared using mechanical alloying method", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 49, No 5-6, 2010.
- [2] W. Węglewski, M. Basista, A. Manescu, M. Chmielewski, K. Pietrzak, Th. Schubert: "Effect of grain size on thermal residual stresses and damage in sintered chromium-alumina composites: Measurement and modeling", *Composites Part B*, 67, 119-124, 2014.
- [3] M. B. Uday, M. N. Ahmad Fauzi, H. Zuhailawati, A.B Ismail, "Effect of welding speed on mechanical strength of friction welded joint of YSZ–alumina composite and 6061 aluminum alloy", *Materials Science and Engineering A* 528, 2011.
- [4] K. Pietrzak, D. Kaliński, M. Chmielewski, T. Chmielewski, W. Włosiński, and K. Chorągiewicz, "Processing of intermetallics with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or steel joints obtained by friction welding technique", *Proc. 12th Conference of the European Ceramic Society – ECerS XII, Stockholm 2011*.
- [5] I.D. PARKa, Ch. T. LEEb, H.S. KIMc, W. J. CHOId, M. C. KANG, "Structural considerations in friction welding of hybrid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-reinforced aluminum composites", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China Volume 21, March 2011*.
- [6] M. Hudycz, T. Chmielewski, Winiarski M., Golański D. „Właściwości tytanowej powłoki metalizacyjnej osadzonej tarciowo na ceramice AlN”, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 88, nr 5, s. 29-35, 2016
- [7] Hudycz M., Winiarski M., Chmielewski T. „Tarciowo metalizowanie ceramiki AlN tytanem”, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 87, nr 10, s. 31-35, 2015.
- [8] Chmielewski T. "Wykorzystanie energii kinetycznej tarcia i fali detonacyjnej do metalizacji ceramiki". *Prace Naukowe PW, Seria Mechanika, Zeszyt 232*, s. 1-155. 2012.
- [9] J.W. Kaczmar, A. Kurzawa, "The effect of α-alumina particles on the properties of EN AC-44200 Al alloy based composite materials", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 55, Issue 1, November 2012.
- [10] R. Władysławski, M. Pawlak, "Plaster mould casting process of AlSi11 alloy", *Archives of Foundry Engineering, ISSN (1897-3310), Volume 9 Issue 4*, 2009.