

Zgrzewanie tarciove kompozytów Al/Al₂O₃ ze stopami Al 44200

Robert Siedlec, Cezary Strąk

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
ul. Wólczyńska 133, 01 - 919 Warszawa;
e-mail: robert.siedlec@itme.edu.pl

Streszczenie: Zgrzewanie tarciove to jedna z bardziej ekonomicznych metod trwałego łączenia materiałów w stanie stałym. Metoda ta umożliwia wykonywanie złączy zarówno jednoimiennych, jak i różnoimiennych w bardzo krótkim czasie. Zaletą zgrzewania tarciovego jest możliwość uzyskania złączy o wysokiej jakości. Zgrzewanie tarciove kompozytów z metalami, stwarza nowe możliwości aplikacji z uwagi na fakt, że oba materiały posiadają różne właściwości fizyczne oraz mechaniczne. W pracy przeprowadzono próby spajania stopu aluminium 44200 (wg normy PN-EN 1706:2001) z kompozytami Al/Al₂O₃. W pracy przeprowadzono następujące badania złączy stop aluminium-kompozyt uzyskanych metodą zgrzewania tarciovego: mikroskopowe, twardości, mechaniczne (pomiar wytrzymałości na rozciąganie). Wykonane badania miały na celu ocenę jakości połączenia pomiędzy stopem 44200, a kompozytami na osnowie stopu aluminium wzmocnianymi fazą ceramiczną Al/Al₂O₃.

Słowa kluczowe: zgrzewanie tarciove, kompozyt, ceramika, stop Al

Joining Al/Al₂O₃ composites and 44200 aluminium alloys by friction welding technique

Abstract: Friction welding is one of the most economical processes for durable joining of solid-state materials. This technique allows bonding similar and dissimilar materials in a very short time. Friction welding of metals and composites opens up new application opportunities due to the fact that these materials have different physical and mechanical properties. In the present study, 44200 aluminum alloy was friction welded to Al/Al₂O₃ composite. In addition, the following analyses were performed for all joints produced by friction welding: optical microscopy, microhardness measurements and tensile strength measurements. All studies were carried out to evaluate the quality of bonding between aluminum alloy and metal matrix composites reinforced with a ceramic phase of Al/Al₂O₃.

Key words: friction welding, composite, ceramic, aluminum alloy

1. Wprowadzenie

Stosowanie materiałów kompozytowych wytwarzanych na osnowie stopów lekkich niesie szereg korzyści. Szczególne znaczenie ma tutaj grupa materiałów kompozytowych wytwarzana na osnowie stopów aluminium wzmocnianych fazą ceramiczną Al₂O₃.

Kompozyty na bazie stopów Al znajdują coraz szersze zastosowanie, szczególnie w konstrukcjach obciążonych, spełniając wysokie właściwości wytrzymałościowe. Dodatkowo charakteryzują się one odpornością na korozję, wyższą odpornością na zużycie w połączeniu z niską gęstością i niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej. Coraz częściej stosuje się je tam, gdzie istotne jest zmniejszenie masy podzespołów, przy jednoczesnym zachowaniu parametrów mechanicznych. Obszarem potencjalnego zastosowania materiałów kompozytowych jest przemysł motoryzacyjny.

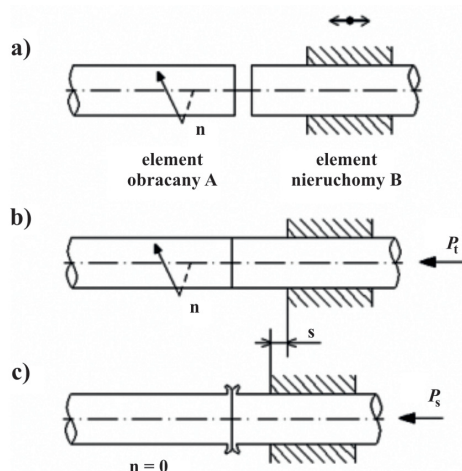
Biorąc pod uwagę wymagania i jednocześnie zmniejszenie kosztów produkcji kluczowe jest opracowanie nowych technologii łączenia kompozytów z innymi materiałami. Jedną z takich metod jest zgrzewanie tarciove.

Materiałem podstawowym wykorzystywanym podczas badań był stop aluminium 44200, który znajduje zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym na elementy silników spalinowych (tłoki, głowice). Do wytworzenia materiałów kompozytowych z grupy Al/Al₂O₃ wykorzystano również stop 44200, który stanowił osnowę. Jako wzmocnienie

kompozytu zastosowano cząstki ceramiczne tlenku glinu. Wykorzystywane w pracy materiały kompozytowe wytworzono metodą infiltracji ciśnieniowej kształtek ceramicznych o porowatościach 70 % oraz 80 %.

Zarówno wybór stopu jak i materiałów kompozytowych stosowanych w pracy nie był przypadkowy. Stop aluminium typu 44200 jest jednym z częściej stosowanych w przemyśle samochodowym, a użyte kompozyty opracowano w ramach projektu KomCerMet (POIG.01.03.01-00-013/08-00) właśnie w celu podniesienia właściwości (istotnych z punktu widzenia zastosowań w motoryzacji) czystego stopu. Stosowanie kompozytów o dwóch różnych zawartościach fazy ceramicznej miało wykazać, który z nich będzie miał większy potencjał aplikacyjny.

Podczas procesu zgrzewania tarciovego następuje zamiana energii kinetycznej w energię cieplną wskutek tarcia. Cały proces polega na łączeniu w stanie stałym dwóch elementów, przy czym jeden z nich umieszczony jest w nieruchomym uchwycie, a drugi poddany jest ruchowi obrotowemu względem ich osi. Materiały są zbliżane do siebie, a następnie zostaje zadane tarcie pochodzące od siły docisku P_t (Rys .1). W wyniku tarcia łączonych powierzchni wytwarza się ciepło. Powierzchnie zgrzewanych materiałów nagrzewają się do wysokiej temperatury, bliskiej temperaturze topnienia metalu, jednak jej nie przekraczają. Po zatrzymaniu obrotów materiały dociskane są jeszcze siłą P_s , zazwyczaj większą od siły P_t . Silnie



Rys. 1. Przebieg procesu zgrzewania tarciovego: a) nadanie elementowi A prędkości obrotowej n , b) docisk łączonych elementów siłą P_t , c) zwiększenie siły docisku po zatrzymaniu obrotów [1].

Fig. 1. Friction welding process: a) giving element A rotational speed, b) pressure force on welded elements, c) increasing pressure force after stopping rotation [1].

uplastyczniony materiał ze strefy tarcia przesuwa się do wypłytki, następuje skrócenie s łączonych elementów [1].

Główną cechą, którą muszą się odznaczać złącza kompozyt – metal jest najczęściej wysoka wytrzymałość mechaniczna w warunkach znacznych amplitud temperaturowych. Jest to zagadnienie utrudnione ze względu na wysoką twardość i kruchość materiałów kompozytowych. Zatem uzyskanie złącza metal-kompozyt o wysokiej jakości sprowadza się do ukształtowania odpowiedniej warstwy przejściowej pomiędzy tymi materiałami.

Dodatkowo, podczas łączenia materiałów o różnych właściwościach pojawiają się problemy wynikające z występowania różnic twardości, temperatury topnienia, przewodności cieplnej oraz mikrostruktury. Zgrzewanie tarciove umożliwia uzyskanie połączenia dwóch materiałów różnoimiennych, których właściwości fizykochemiczne są odmienne. Dzięki technice zgrzewania tarciovego uzyskuje się złącza bardzo wysokiej jakości, w krótkim czasie.

2. Zgrzewanie tarciove stopu Al 44200 z kompozytami Al/Al₂O₃

2.1. Charakteryzacja materiałów

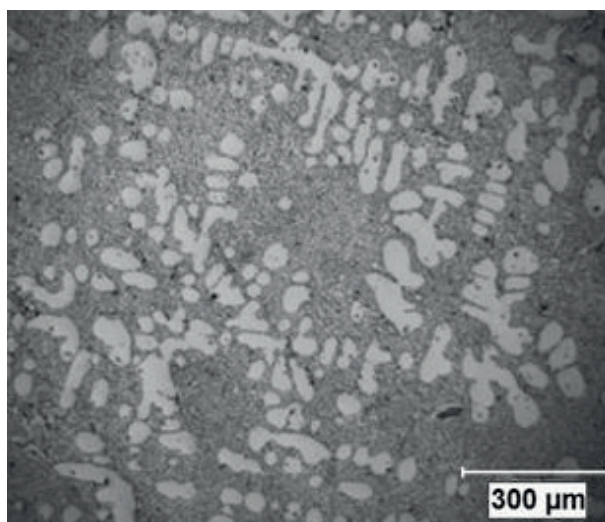
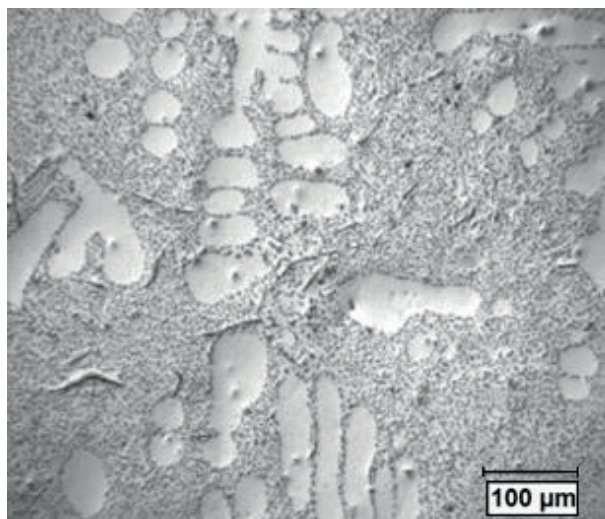
Materiałem wyjściowym wykorzystywanym w pracach był stop aluminium 44200 zawierający następujące pierwiastki stopowe: Si, Fe, Cu, Mg i Ni (Tab. 1). Materiał ten należy do grupy stopów eutektycznych - wysoka zawartość krzemu - 11 %. Stopy Al – Si tworzą eutektykę przy składzie 11,7 % Si, o temperaturze topnienia 577 °C złożoną z kryształów roztworu stałego krzemu w aluminium i roztworu stałego β aluminium w krzemie.

Tab. 1. Skład chemiczny stopu Al 44200.

Tab. 1. Chemical composition of 44200 Al alloy.

Skład chemiczny						
Fe	Si	Mn	Ti	Cu	Zn	Pozostałe
max	10,5 -					
0,55	13,5	0,35	0,15	0,05	0,1	0,15

Stop 44200 charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami odlewniczymi. Jego mikrostruktura została przedstawiona na Rys. 2. Wybrane właściwości stopu 44200 zebrano w Tab. 2.



Rys. 2. Mikrostruktura stopu 44200.

Fig. 2. Microstructure of 44200 Al alloy.

Tab. 2. Wybrane właściwości stopu 44200.

Tab. 2. Selected properties of 44200 aluminum alloy.

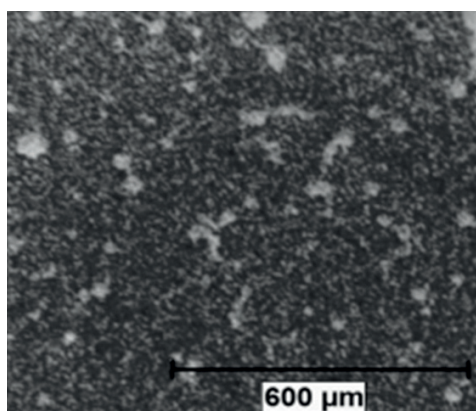
Materiał:	Gęstość [g/cm ³]	Cp [J/(g*K)]	$\alpha \cdot 10^{-6}$ [1/K]
Czyste Al	2,66	0,9	23,86
Stop Al (44200)	2,64	0,9	23,86

Przeprowadzono pomiar twardości stopu 44200 metodą Vickersa na urządzeniu Struers Durascan 10. Użytkano średnią twardość stopu: 51 HV [0,3] (odchylenie standardowe $\sigma = 1,6$)

Do prób zgrzewania ze stopem aluminium 44200 wykorzystano materiały kompozytowe wytworzone na bazie odlewniczego stopu aluminium 44200. Wykorzystane w pracy kompozyty wytworzone zostały przez Politechnikę Wrocławską.

Wykorzystano dwa rodzaje materiału kompozytowego:

- stop Al 44200 umacniany cząstkami Al_2O_3 (rozmiar rzędu 3 - 6 μm) o udziale objętościowym 30 %.

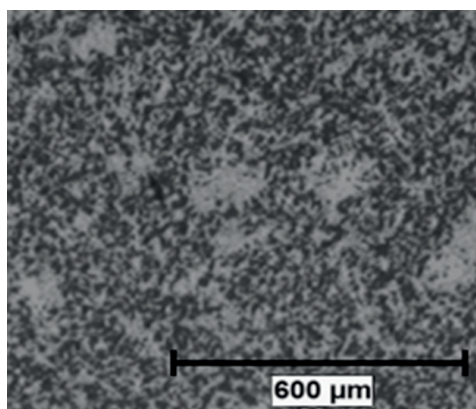


Rys. 3. Mikrostruktura kompozytu Al 44200 + 30 % Al_2O_3 .
Fig. 3. Microstructure of 44200 Al + 30 % Al_2O_3 composite.

Kompozyt objętościowy, którego osnową jest stop 44200, wzmocnienie stanowi kształtka ceramiczna o porowatości 70 %. Badania mikroskopowe wykazały, iż cząstki tlenku glinu są równomiernie rozmieszczone w osnowie stopu.

Średnia twardość kompozytu zmierzona metodą Vickersa wynosiła 140 HV [0,3] ($\sigma = 13,3$). Kompozyt charakteryzuje się wysoką twardością, prawie trzykrotnie wyższą niż stop aluminium 44200.

- stop Al 44200 umacniany cząstkami Al_2O_3 (rozmiar rzędu 3 - 6 μm) o udziale objętościowym 20 %.



Rys. 4. Mikrostruktura kompozytu Al 44200 + 20 % Al_2O_3 .
Fig. 4. Microstructure of 44200 Al + 20 % Al_2O_3 composite.

Zastosowano kształtkę ceramiczną o porowatości 80 %. Badania struktury potwierdzają dobre rozmieszczenie fazy ceramicznej Al_2O_3 w kompozycie.

Średnia twardość kompozytu zmierzona metodą Vickersa wyniosła 110 HV[0,3] ($\sigma = 10,9$).

2.2. Próby zgrzewania tarcowego

Próby łączenia stopu aluminium 44200 z kompozytami Al/ Al_2O_3 przeprowadzono na zgrzewarce tarcowej HARMS WENDE HWH model RSM200 umożliwiającej zgrzewanie materiałów osiowo-symetrycznych (Rys. 5).

Zgrzewarka ta umożliwia przeprowadzenie prób łączenia materiałów w następującym zakresie parametrów:

- prędkość obrotowa głowicy: 6000 - 24000 rpm,
- siła tarcia: 11 kN,
- siła spęczania: 11 kN,
- czas tarcia/spęczania: 100 - 7000 ms.



Rys. 5. Zgrzewarka tarcowa H&W RSM200.

Fig. 5. H&W RSM200 friction welding system.

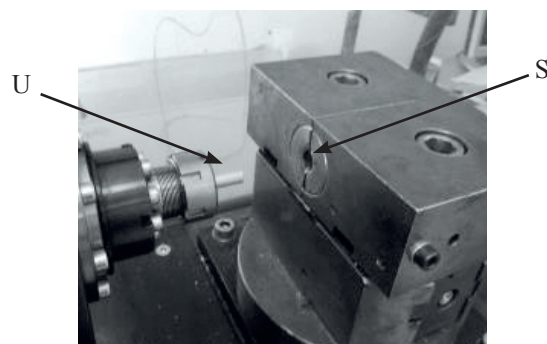


Rys. 6. Materiały wykorzystywane do prób zgrzewania.

Fig. 6. Specimens used for friction welding.

Wszystkie zgrzewane materiały miały postać prętów o średnicy $\varnothing 8$ mm o płaskich powierzchniach czolowych. Długość zgrzewanych materiałów wynosiła 25 mm (Rys. 6).

Schemat prób zgrzewania stopu Al z kompozytami przedstawiono na Rys 7. Próbkę aluminiową



Rys. 7. Schemat procesu zgrzewania tarcowego: U - próbka ze stopu aluminium umieszczona w obrotowym wrzecionie, S - materiał kompozytowy umieszczony w nieruchomym uchwycie.
Fig. 7. Scheme of friction welding process: U - Al alloy specimen mounted on rotary spindle, S - composite material in stationary clamp.

mocowana była w obrotowym wrzecionie U. Materiał kompozytowy umieszczano w nieruchomym uchwycie S z dociskiem pneumatycznym.

Przeprowadzono szereg prób i wstępnych badań uzyskanych złączy. Parametry procesu zgrzewania tarciovego z części przeprowadzonych prób zestawiono w Tab. 3.

Rys. 8 przedstawia obraz z ekranu komputera

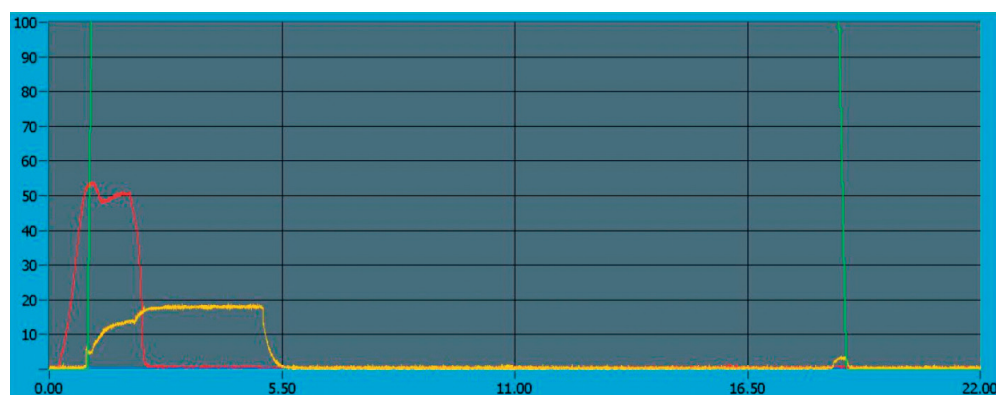
z warunkami zgrzewania w funkcji czasu dla złącza: 44200/44200 + 30 % Al₂O₃ (próbka nr 4).

Na schemacie z Rys. 10 przedstawiono warunki zgrzewania w funkcji czasu dla złącza: 44200/44200 + 20 % Al₂O₃ (próbka nr 5), natomiast na Rys. 11 przedstawiono otrzymane złącze dla tych warunków.

Tab. 3. Warunki zgrzewania tarciovego dla stopu Al 44200 z kompozytami Al₂O₃.

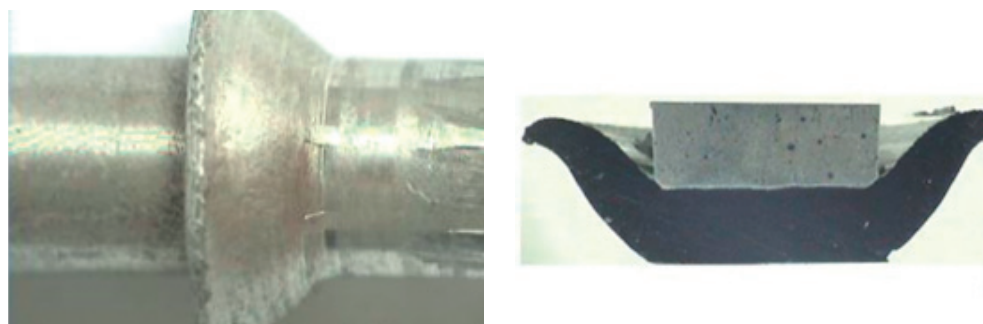
Tab. 3. Friction welding conditions for Al alloy joined with Al₂O₃ composites.

Nr próbki	Materiał kompozytowy	Prędkość obrotowa (obr/min)	Czas tarcia (ms)	Czas spęczania (ms)	Siła docisku w fazie tarcia (bar)	Siła docisku w fazie spęczania (bar)	Ciśnienie w fazie tarcia [MPa]	Ciśnienie w fazie spęczania [MPa]
1	44200 + 30 %-obj Al ₂ O ₃	23000	40	3000	3	4	1,5	2,0
2	44200 + 30 %-obj Al ₂ O ₃	13000	40	3000	3	4	1,5	2,0
3	44200 + 30 %-obj Al ₂ O ₃	13000	40	3000	2	2	1,0	1,0
4	44200 + 30 %-obj Al ₂ O ₃	13000	40	3000	1,6	2	0,8	1,0
5	44200 + 20 %-obj Al ₂ O ₃	13000	40	3000	1	2	0,5	1,0
6	44200 + 20 %-obj Al ₂ O ₃	15000	40	3000	1	2	0,5	1,0



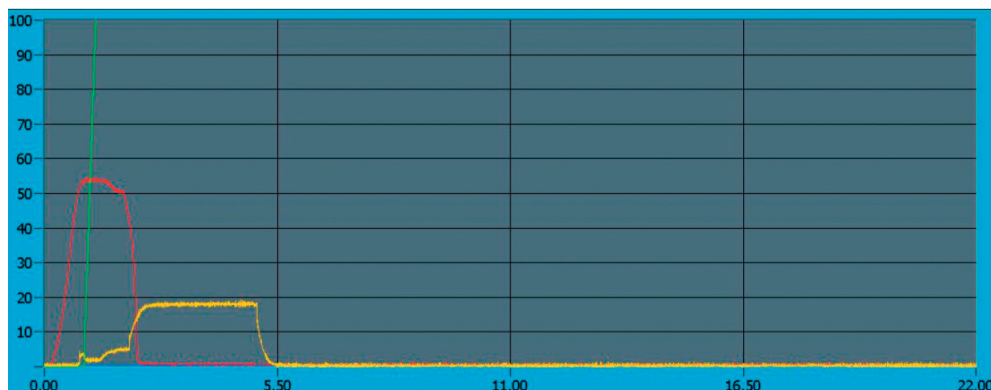
Rys. 8. Przebieg warunków zgrzewania w funkcji czasu dla złącza: 44200/44200 + 30 % Al₂O₃. Linia: czerwona – prędkość obrotowa wyrażona w procentach (100 % = 25000 obr/min), żółta – ciśnienie wyrażone w procentach (100 = 8 bar).

Fig. 8. Welding conditions as a function of time for 44200/44200 + 30 % Al₂O₃ joints.



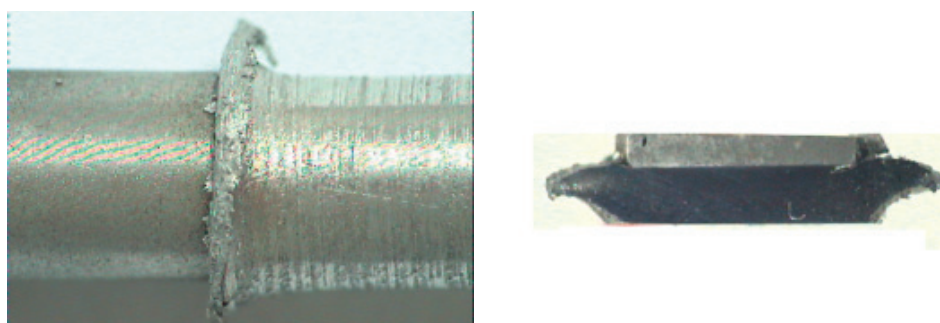
Rys. 9. Widok złącza i jego przekrój otrzymane techniką zgrzewania tarciovego w warunkach z Tab. 3, dla próbki nr 4.

Fig. 9. Shape and cross-sectional view of friction zone welded under conditions specified in Tab. 3 for specimen 4.



Rys. 10. Przebieg warunków zgrzewania w funkcji czasu dla złącza: 44200/44200 + 20 % Al₂O₃. Linia: czerwona – prędkość obrotowa wyrażona w procentach (100 % = 25000 obr/min), żółta – ciśnienie wyrażone w procentach (100 = 8 bar).

Fig. 10. Welding conditions as a function of time for 44200/44200 + 20 % Al₂O₃ joints.



Rys. 11. Złącze 44200/44200 + 20 % Al₂O₃ otrzymane dla parametrów zgrzewania zestawionych w Tab. 3, próbka nr 5.

Fig. 11. Shape and cross-sectional view of friction zone welded under conditions specified in Tab. 3 for specimen 5.

3. Wyniki badań

Na uzyskanych złączach stopu aluminium 44200 z materiałami kompozytowymi Al/Al₂O₃ przeprowadzono badania twardości, mikrostrukturalne oraz wytrzymałości na rozciąganie.

Badanie twardości przeprowadzono metodą Vickersa (HV_{0,3}) na urządzeniu firmy Struers model Durascan 10. Badanie rozkładu twardości wykonano zgodnie ze schematem z Rys. 12 wzdłuż trzech linii pomiarowych: I, II oraz III. Otrzymane wyniki pomiarów przedstawiono w Tab. 4 i 5.



Rys. 12. Schemat pomiarów twardości w złączach stop 44200 - kompozyt.

Fig. 12. Schematic microhardness measurement diagram for Al alloy-composite joints.

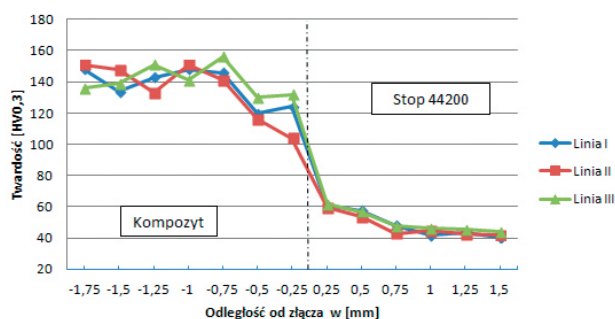
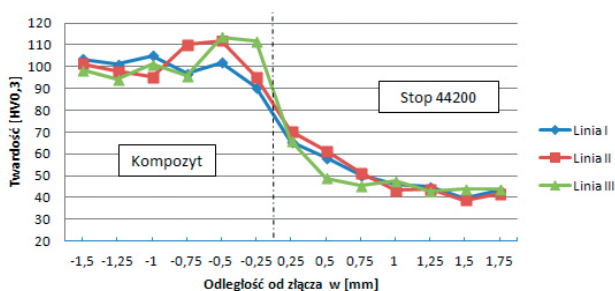
Tab. 4. Wyniki pomiarów twardości w złączu stop/44200 + 30 % Al₂O₃.

Tab. 4. Results of microhardness measurements for 44200 alloy + 30 % Al₂O₃ joints.

Materiał	Twardość HV [0,3]			Odległość od złącza [mm]
	I	II	III	
Kompozyt	148	151	136	-1,75
	134	148	139	-1,5
	143	133	151	-1,25
	148	151	141	-1
	146	141	156	-0,75
	120	116	130	-0,5
	124	104	132	-0,25
Stop 44200	60,7	59,3	61,5	0,25
	57,7	53,5	56,9	0,5
	48,1	42,9	47,6	0,75
	41,8	45	46,3	1
	43,3	42,8	45,3	1,25
	40,3	41,8	43,8	1,5

Tab. 5. Wyniki pomiarów twardości w złączu stop Al/44200 + 20 % Al₂O₃.**Tab. 5.** Results of microhardness measurements for 44200 Al alloy + 30 % Al₂O₃ joints.

Materiał	Twardość HV [0,3]			Odległość od złącza [mm]
	I	II	III	
Kompozyt	103,5	101,4	98,5	-1,5
	101	98,1	94,2	-1,25
	105	95,5	101	-1
	96,9	110	95,8	-0,75
	102	112	113,6	-0,5
	90,5	95,5	112	-0,25
Stop 44200	65,7	70,3	66,2	0,25
	58,1	61,5	48,9	0,5
	50,3	51,3	45,7	0,75
	46,3	43,5	47,6	1
	44,9	44	43	1,25
	39,6	38,9	43,8	1,5
	43,3	41,9	43,8	1,75

**Rys. 13.** Rozkład twardości złącza: 44200 + 30 % Al₂O₃/stop.**Fig. 13.** Microhardness pattern for 44200 Al alloy + 30 % Al₂O₃ friction welded joints.**Rys. 14.** Rozkład twardości złącza: 44200 + 20 % Al₂O₃/stop.**Fig. 14.** Microhardness pattern for 44200 Al alloy + 20 % Al₂O₃ friction welded joints.

Graficzne rozkłady twardości dla złącza stop/44200 + 30 % Al₂O₃ oraz złącza stop/44200 + 20 % Al₂O₃ przedstawiono na Rys. 13 i 14.

Wyniki pomiarów pokazują, że rozkład twardości pokrywa się dla wszystkich trzech linii pomiarowych. W odległości 0,5 mm od złącza obserwuje się spadek twardości kompozytu z wartości 140 HV (twardość materiału rodzimego) do wartości ~ 110 HV.

W przypadku stopu 44200 jest nieco inaczej. W obszarze przylegającym do samego złącza (do 0,5 mm), następuje wzrost twardości stopu aluminium do wartości 60 HV. W obszarze od 0,7 mm stop 44200 posiada już twardość na poziomie materiału rodzimego ~ 50 HV.

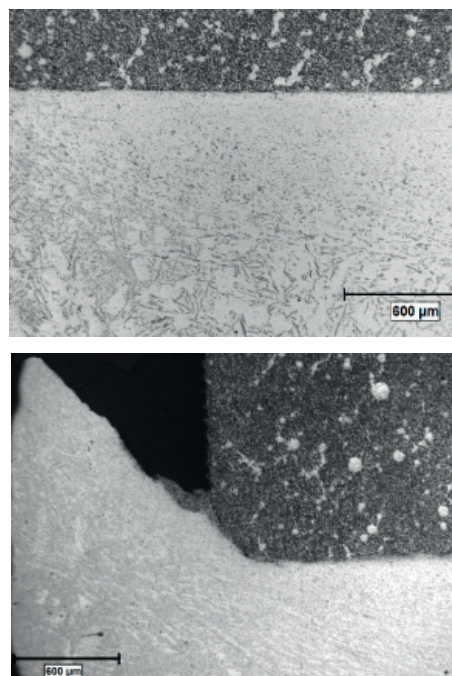
Dla złącza stopu aluminium z kompozytem umacnianym cząstkami Al₂O₃ o 20 % udziale następuje zmniejszenie twardości materiału kompozytowego w obszarze przylegającym do samego złącza (0,25 mm). Dla stopu 44200 widoczne jest zwiększenie twardości w obrębie samego złącza (~ 60 HV) przy czym od odległości 0,75 mm od złącza, stop posiada już twardość materiału rodzimego.

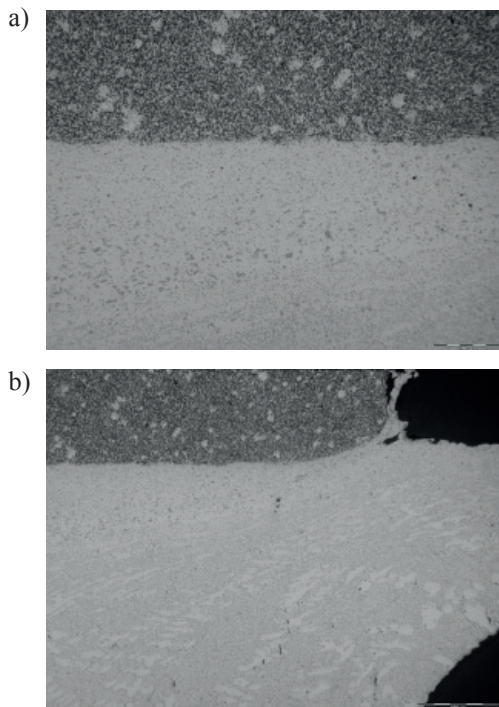
Rozkład wartości twardości jest niemal identyczny dla wszystkich z trzech linii pomiarowych.

Wybrane wyniki badań strukturalnych otrzymanych złączy stopu z kompozytami przedstawiono poniżej. Zdjęcia mikrostruktur wykonano przy użyciu mikroskopu optycznego Axiovert 40 MAT.

Na Rys. 15 przedstawiono przekrój poprzeczny złącza stopu 44200 z kompozytem 44200 + 30% Al₂O₃ przy powiększeniu x 50, uzyskanego przy warunkach z Tab. 3. W górnej części zdjęcia widoczna jest struktura kompozytu, natomiast w dolnej części można zaobserwować strukturę stopu 44200.

Zdjęcia strukturalne potwierdzają dobrą jakość złącza stop-kompozyt. Obserwuje się ciągłość połączenia

**Rys. 15.** Obrazy mikrostruktury złącza: stop-44200 + 30 % Al₂O₃.**Fig. 15.** Microstructure of 44200 Al alloy + 30 % Al₂O₃ friction welded joints.



Rys. 16. Obrazy struktury złącza: stop/44200 + 20 % Al_2O_3 .
Fig. 16. Microstructure of 44200 Al alloy + 20 % Al_2O_3 friction welded joints.

wzdłuż całego złącza. Nie są widoczne żadne nieciągłości. Struktura materiału kompozytowego nie uległa zmianie. Nie zaobserwowano żadnych pęknięć czy też deformacji w materiale kompozytowym wzmocnianym cząstkami tlenku glinu. Mała plastyczność kompozytu wynikająca z wysokiej zawartości cząstek Al_2O_3 (30 %) sprawia, że kompozyt nie ulega odkształceniu. Można zaobserwować natomiast silne uplastycznienie i wymieszanie stopu Al w obszarze złącza, który w wyniku działania siły docisku, został przemieszczony do wypływkę.

W obszarze samego złącza obserwuje się zmianę struktury stopu 44200. Następuje rozdrobnienie struktury, obszar ten wykazuje większą twardość. W dalszych obszarach od złącza widoczne są igłowe wydzielenia kryształów Si.

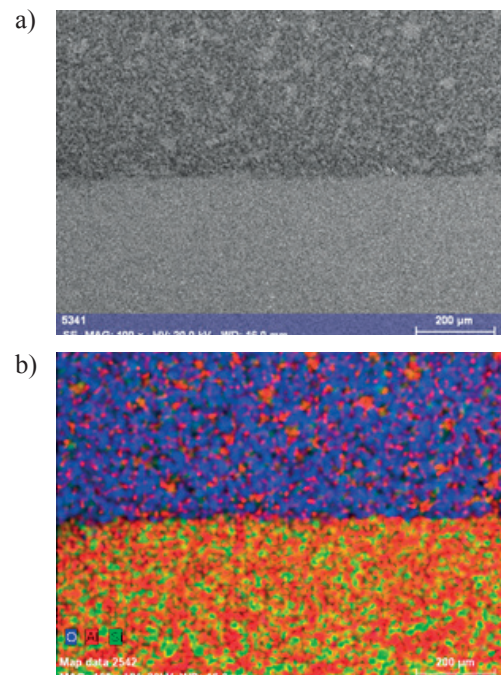
Na Rys. 16a przedstawiono strukturę przekroju poprzecznego złącza Al 44200/44200 + 20 % Al_2O_3 przy powiększeniu $\times 100$ (warunki procesu zgrzewania z Tab. 3 (próbka nr 5)). Nie obserwuje się żadnych nieciągłości wzdłuż całego złącza. Struktura połączenia jest jednorodna, bez widocznych pęknięć czy porów.

Na Rys. 16b przy powiększeniu $\times 50$ można zaobserwować kierunek płynięcia materiału: stop Al przemieszcza się z osi próbki (środką) do zewnątrz, formując wypływkę.

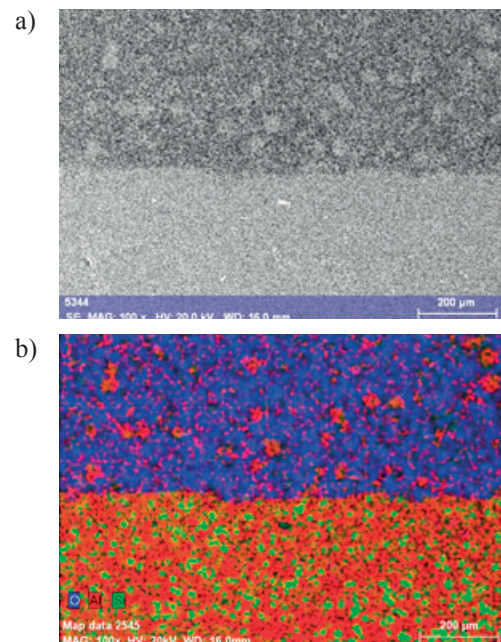
Struktura kompozytu pozostaje nienaruszona. Nie obserwuje się jego pęknięć ani deformacji. Można natomiast zaobserwować rozdrobnienie struktury stopu 44200.

Wykonano również rozkład powierzchniowy pierwiastków na przekroju złączy stop-kompozyt.

Rozkłady powierzchniowe pokazują jednorodne rozmieszczenie poszczególnych faz w obrębie złącza. Dla stopu Al 44200 obserwuje się charakterystyczne wydzie-



Rys. 17. a) Mikrostruktura, b) rozkład powierzchniowy pierwiastków, na przekroju złącza stop/44200 + 30 % Al_2O_3 .
Fig. 17. a) Microstructure, b) surface distribution of 44200 Al alloy + 30 % Al_2O_3 joints.

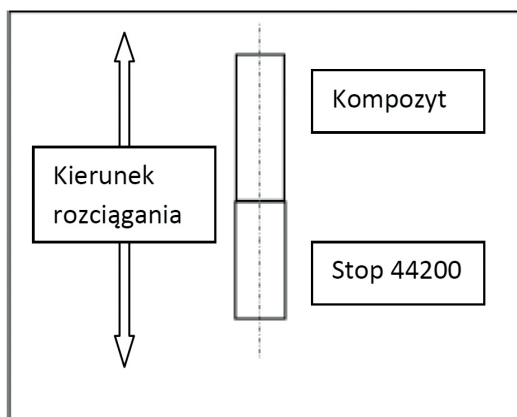


Rys. 18. a) Mikrostruktura, b) rozkład powierzchniowy pierwiastków, na przekroju złącza stop/44200 + 20 % Al_2O_3 .
Fig. 18. a) Microstructure, b) surface distribution of 44200 Al alloy + 20 % Al_2O_3 joints.

lenia krzemowe, widoczne jako jasno-zielone pola.

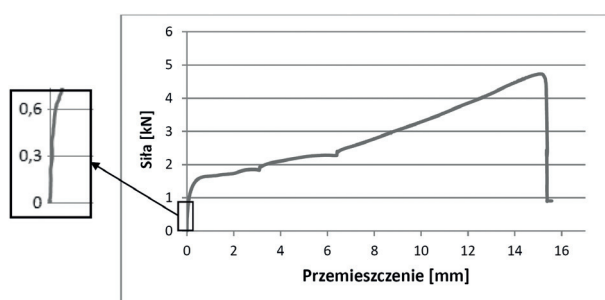
Rozkłady przedstawione na Rys. 17 oraz 18 wykazują taki sam charakter złączy. Widoczna jest wyraźna granica połączenia stop-kompozyt.

Badania wytrzymałościowe przeprowadzone zostały



Rys. 19. Schemat badania wytrzymałości na rozciąganie.

Fig. 19. Schematic diagram of tensile strength tests for 44200 aluminum alloy and Al/Al₂O₃ composite joints.



Rys. 20. Krzywa statycznej próby rozciągania dla złącza stop-stop.

Fig. 20. Stress-strain diagram for Al alloy-Al alloy joint.

w celu określenia wytrzymałości otrzymanych złączy na rozciąganie. Otrzymane złącza były zrywane osiowo według schematu na Rys. 19.

Próbką referencyjną było złącze stop 44200/stop 44200, dla którego zerwanie następowało przy sile $F = 4,73$ kN (Rys. 20), co odpowiada naprężeniu $R_m = 94$ MPa.

Dla złączy z materiałami kompozytowymi wzmocnionymi cząstkami Al₂O₃ w udziale 30 % oraz 20 % uzyskano siłę zrywającą odpowiednio: 5 kN i 4,6 kN (Rys. 21a,b). Otrzymane wyniki wytrzymałości na rozciąganie złączy stopu 44200 z kompozytami wzmocnionymi cząstkami tlenku glinu odpowiadają wytrzymałości połączenia stop-stop.

Na wszystkich krzywych uzyskanych podczas statycznej próby rozciągania obserwuje się na samym początku wykresu bardzo krótki odcinek prostoliniowy (powiększone obszary). Jest to ten fragment wykresu na którym badane próbki odkształcają się sprężysto. Najmniejsze odkształcenie sprężyste zarejestrowano dla złącza stop-44200 + 30 % Al₂O₃ (Rys. 21a).

Za prostoliniowym fragmentem krzywych rozciągania, występuje etap, który odpowiada odkształceniom plastycznym badanych próbek. Następnie rejestruje się dalsze trwałe plastyczne odkształcenia, aż do momentu zerwania badanych materiałów przy sile zawartej w Tab. 6.

Dodatkowo dla złącza stop-stop zarejestrowano największe przemieszczenie wynoszące ponad 15 mm.

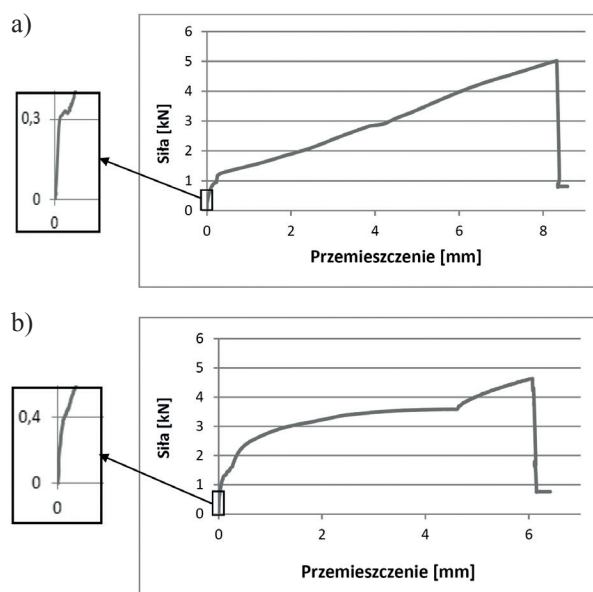
Rys. 21. Krzywa rozciągania dla złączy: a) stop/44200 + 30 % Al₂O₃, b) stop/44200 + 20 % Al₂O₃.

Fig. 21. Stress-strain diagram for: a) 44200 Al alloy + 30 % Al₂O₃, b) 44200 Al alloy + 20 % Al₂O₃.

Tab. 6. Zestawienie wyników badania wytrzymałości na rozciąganie.

Tab. 6. Summary of results of tensile strength tests.

Opis złącza	Siła [kN]	Naprężenie [MPa]
stop-stop	4,73	94,1
stop/44200 + 30 % Al ₂ O ₃	5,01	99,7
stop/44200 + 20 % Al ₂ O ₃	4,63	92,2

Wynika to z wysokiej plastyczności stopu. W przypadku złączy z materiałami kompozytowymi, przemieszczenie jest znacznie mniejsze, poniżej 10 mm. Wynika to z wyższego modułu Younga zastosowanych materiałów kompozytowych wzmocnionych cząstkami Al₂O₃.

4. Podsumowanie.

W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania techniki zgrzewania tarciovego do łączenia dwóch materiałów różnoimiennych: stop Al – kompozyt Al/Al₂O₃. Zawarto w nim parametry procesu zgrzewania tarciovego dla złączy stopu aluminium z materiałami kompozytowymi wzmocnionymi cząstkami Al₂O₃ o różnym procentowym udziale objętościowym. Przeprowadzone badania strukturalne uzyskanych połączeń potwierdzają zwartą budowę złączy zarówno dla kompozytów o 30 %, jak i 20 % udziale objętościowym. Złącza charakteryzują się stabilną strukturą wzdłuż całego przekroju, a strefa połączenia wolna jest od wad w postaci nieciągłości. Dodatkowo wyniki badań wytrzymałościowych na rozciąganie

ganie pokazują wysoką wytrzymałość uzyskanych złączy stop-kompozyt, na poziomie złącza odniesienia stop-stop.

Zastosowana metoda daje bardzo dobre rezultaty w przypadku spajania kompozytów z grupy Al/Al₂O₃ ze stopem Al. Technika zgrzewania tarcowego znajduje najczęściej zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym. Przewagą tej metody spajania jest fakt, iż proces łączenia przebiega bardzo szybko. Dodatkowo w obszar połączenia nie wprowadza się dodatkowych materiałów. Krótki czas zgrzewania oraz brak konieczności przygotowywania łączonych powierzchni przed procesem czyni tę metodę prostą i ekonomiczną.

Należy również zwrócić uwagę na trudności jakie pojawiają się podczas spajania aluminium takie jak: wysokie przewodnictwo cieplne, stosunkowo niska temperatura topnienia oraz wysokie powinowactwo do tlenu. Metalicznie czyste powierzchnie aluminium błyskawicznie pokrywają się warstwą tlenków, która ma znacznie większą temperaturę topnienia niż czyste aluminium. Ze względu na wysokie powinowactwo chemiczne tlenu z aluminium oraz możliwość występowania porów, podczas spawania tego metalu wykorzystuje się gazy osłonowe. Zgrzewanie tarcowe zyskuje w tym miejscu znaczącą przewagę ze względu na fakt, że wszelkiego rodzaju zanieczyszczenia m.in. tlenkowe usuwane są z obszaru złącza i przemieszczane do wypływu na skutek silnego uplastycznienia materiału i działania siły docisku.

W celu zmniejszenia różnic właściwości pomiędzy kruchym materiałem kompozytowym, a plastycznym stopem aluminium, podczas łączenia stosuje się często dodatkowe zabiegi w postaci nanoszenia powłok na łączone materiały, czy też wykorzystywanie materiałów o pośrednich właściwościach jako przekładkę (międzywarstwę), przez którą następuje spajanie. Dzięki zastosowaniu metody zgrzewania tarcowego uzyskano trwałe połączenie stop-kompozyt, bez konieczności modyfikacji czy też specjalnego przygotowania powierzchni materiałów przed procesem.

Podziękowania

Badania zostały wykonane w ramach pracy statutowej „Opracowanie warunków technologicznych zgrzewania tarcowego kompozytów Al/Al₂O₃ ze stopami Al”.

Literatura

- [1] Ambroziak A., Zgrzewanie tarcowe materiałów o różnych właściwościach, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
- [2] Uday M. B., Ahmad-Fauzi M. N.: Microstructural development in friction welded aluminum alloy with different alumina specimen geometries, *Friction and Wear Research*, 2013, 1, 2
- [3] Uday M. B., Ahmad Fauzi M. N., Zuhailawati H., Ismail A. B.: Effect of welding speed on mechanical strength of friction welded joint of YSZ – alumina composite and 6061 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528
- [4] Park I. D., Lee Ch. T., Kim H. S., Choi W. J., Kan M. C.: Structural considerations in friction welding of hybrid Al₂O₃-reinforced aluminum composites, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21, Supplement 1
- [5] Ahmad Fauzi M. N., Uday M. B., Zuhailawati H., Ismail A. B.: Microstructure and mechanical properties of alumina-6061 aluminum alloy joined by friction welding, School of Materials and Minerals Resource Engineering, Engineering Campus, University Sains Malaysia, *Materials & Design*, 2010, 31, 2
- [6] Hascalik A., Orhan N.: Effect of particle size on the friction welding of Al₂O₃ reinforced 6160 Al alloy composite and SAE 1020 steel, University of Firat, Technical Education Faculty, Department of Manufacturing, Elaziğ, Turkey, *Materials & Design*, 2007, 28, 1
- [7] Zhou Y., Zhang J., North T. H., Wang Z.: The mechanical properties of friction welded aluminium-based metal-matrix composite materials, *Journal of Materials Science*, 1997, 32