Polskie Towarzystwo Materiałów Kompozytowych
Polish Society for Composite Materials

Kompozyty 8: 4 (2008) 369-374

KOMPOZYTY
COMPOSITES

Stefan Szczepanik*, Jerzy Krawiarz

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland
** Corresponding author. E-mail: szczepan@metal.agh.edu.pl*

Otrzymano (Received) 12.02.2008

STRUKTURA I WYBRANE WŁASNOŚCI KOMPOZYTU Z GRADIENTEM SKŁADU CHEMICZNEGO OTRZYMANEGO Z PROSZKU ALUMINIUM I STOPU Al-Si-Fe-Cu-Mg

Zakres możliwości materiałowych elementów konstrukcyjnych i narzędzi znacznie poszerzają materiały gradientowe, które umożliwiają wytwarzanie wyrobów o mniejszej masie i ukierunkowanych własnościach. W grupie tych tworzyw postrzegane są materiały kompozytowe na osnowie aluminium i jego stopów. W pracy przedstawiono wyniki badań wytwarzania kompozytów z proszku aluminium i stopu Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr, obrabianego cieplnie przez przesycanie i starzenie. Wypraski z proszków materiałów wyjściowych i ich mieszanek z gradacją 20% proszku stopowego od 0 do 100% mas. i proszku aluminium odkształcano w matrycach zamkniętych, w warunkach izotermicznych. Dla otrzymanych materiałów opracowano struktury i własności mechaniczne po odkształcaniu. Wytworzono również kompozyt z gradientem składu chemicznego. Wyroby otrzymane zarówno z samego proszku aluminium RAl-1, jak i stopu Al17 oraz ich mieszanek są praktycznie pozbawione porowatości. Wraz ze wzrostem zawartości proszku stopu Al17 w tworzywach rośnie wytrzymałość na ściskanie oraz następuje umocnienie, w wyniku zmniejsza się plastyczność otrzymanych materiałów. Udział powierzchni przełomu kruchego zwiększa się z rosnącą zawartością stopu Al17 w materiałach. W wytworzonym kompozycie z gradientem składu chemicznego uzyskano kierunkową wytrzymałość na ściskanie. Jest ona znacznie większa podczas obciążenia próbki siłą przyłożoną prostopadle do gradientu składu chemicznego niż równolegle.

Słowa kluczowe: **proszki stopu aluminium, odkształcanie na gorąco, struktura, materiały z gradientem składu chemicznego, kompozyty, własności mechaniczne**

STRUCTURE AND PROPERTIES OF POWDER METALLURGY Al /Al-Si-Fe-Cu-Mg COMPOSITES WITH CHEMICAL COMPOSITION GRADIENT

Gradient materials are a unique type of composite, formed from two distinct constituents, which exhibits a graded composition, appearing to transform from one material to another, thus producing gradual changes in characteristics and resultant new exploitable functional properties. Accordingly they extend the range of solutions for constructional components. Research to extend the development of these materials are directed mainly towards obtaining experimental data necessary for working out their optimum chemical composition, microstructure and properties, and also developing methods of manufacture and processes of forming semi and finished products. Aluminium and aluminium alloys form an important group of gradient materials with potential for manufacture of low density construction parts. Aim of this research was, using Powder Metallurgy and subsequent plastic work and heat treatment, the production of composite with gradient chemical composition from the aluminium and its alloy Al-Si-Fe-Cu-Mg. Gradient composite preforms were manufactured by cold pressing aluminium, RAl-1, and aluminium alloy Al17Si5Fe3Cu1.1Mg0.6Zr, designated Al17, powders. Concentration changed from 0 to 100% alloy at 20% intervals. The performs were closed - die forged at a temperature of 490°C and their structures and mechanical properties after forging and additional heat treatment studied. Materials from RAl-1, aluminium alloy Al17 and some mixtures were without porosity. The influence of chemical composition gradient on material flow and tensile, bend and compression properties was examined. Increase in Al17 content increases the compressive strength, but decreases plasticity: on fractographs the increase in brittle regions is visible. Chemical composition of the specimens influenced stress-strain dependence during compression test. In gradient materials there was a pronounced anisotropy in compressive strength with values perpendicular to the concentration gradient being approximately double compared to parallel to the gradient. Optimum strengths were for Al-80% Al17 material: tensile - 219 MPa and compressive - 620 MPa, respectively. The value of compressive strength for the gradient material, measured perpendicular to the concentration gradient and plasticity are comparable with the Al-60%Al17 material.

Keywords: **aluminium alloys powder, hot forming, structure, gradient chemical composition, composite, mechanical properties**

WPROWADZENIE

Materiały gradientowe są tworzywami o stopniowo zmieniającej się względem odpowiedniego układu odniesienia charakterystyce materiałowej, która decyduje o ich walorach funkcjonalnych. Dzięki temu poszerzają one znacznie zakres możliwości rozwiązań materiałowych elementów konstrukcyjnych i narzędzi. Prace badawcze, zmierzające do dalszego rozwoju tych materiałów, ukierunkowane są przede wszystkim na pozyskanie danych eksperymentalnych niezbędnych do projektowania ich składu chemicznego, struktury i własności [1-3] oraz obejmują również opracowanie metod produkcji materiałów gradientowych i procesu kształtowania z nich półwyrobów i gotowych wyrobów [1, 4-6].

Celem niniejszej pracy było otrzymanie metodą metalurgii proszków, w połączeniu z przeróbką plastyczną i obróbką cieplną, lekkiego kompozytu z gradientem stopu Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr w osnowie aluminiowej oraz zbadanie jego struktury i wybranych własności mechanicznych.

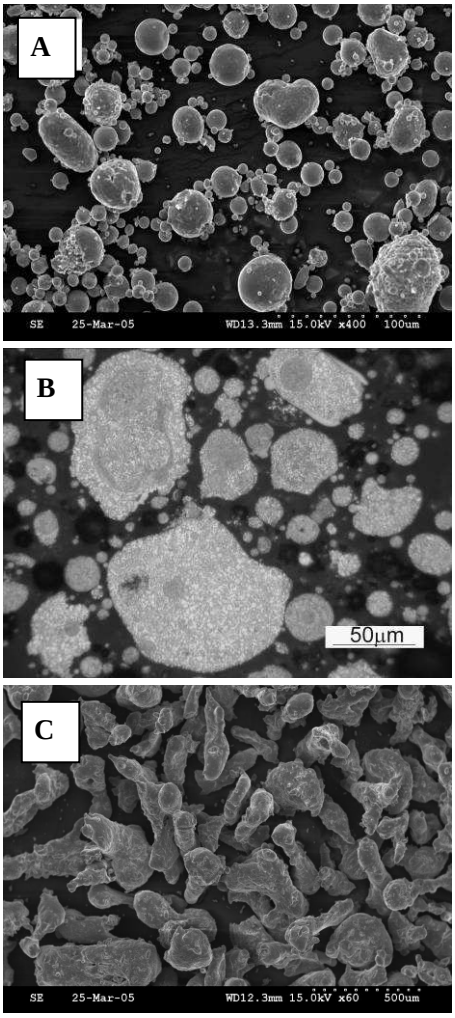
BADANIA WŁASNE

Przedmiotem badań były zagęszczone na gorąco oraz obrobione cieplnie wypraski z mieszanek proszku aluminium RAl-1, a także proszku stopu Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr (oznaczonego dalej jako Al17) o rosnącym stopniowo jego udziale masowym z gradacją co 20%. Z takich mieszanek proszków wykonano również próbki tworzywa o gradiencie składu chemicznego.

Zakres badań obejmował ocenę mikrostruktury materiału wyprasek, określenie takich jego własności, jak: gęstość, twardość, wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie, oraz badania powierzchni przełomów próbek po statycznej próbie rozciągania. Zbadano również wytrzymałość na ściskanie próbek tworzywa z gradientem składu chemicznego.

Wytworzenie materiału do badań

Wyjściowe materiały proszkowe RAl-1 i Al17 (rys. 1), które posłużyły do otrzymania ich kompozycji gradientowych, miały zbliżoną do siebie gęstość teoretyczną, wynoszącą odpowiednio 2,7 i 2,84 g/cm^3.
Naważki proszków, odpowiednie dla uzyskania mieszanek o udziale masowym stopu Al17 wynoszącym 20, 40, 60 i 80%, mieszano przez dwie godziny w mieszalniku dwustożkowym. Tak przygotowane mieszanki proszku aluminium RAl-1 i stopu Al17 oraz każdy z tych proszków oddzielnie prasowano na zimno w matrycach zamkniętych. Wypraski tworzywa z mieszanek proszków aluminium i stopu Al17 do 60% mas. otrzymano przez prasowanie na zimno w matrycach zamkniętych o średnicy ϕ35 mm, stosując nacisk jednostkowy 150 MPa. Z mieszanki o udziale masowym proszku Al17 80% oraz samego proszku Al17 nie uzyskano jednak zwartych wyprasek podczas tego zabiegu. Wypraski dogęszczano na gorąco w matrycach zamkniętych o średnicy matrycy ϕ37 mm, w warunkach zbliżonych do izotermicznych, temperatura materiału i narzędzia wynosiła 490°C. Końcową operacją przygotowania materiału do badań było utwardzenie wydzieleniowe obecnego w materiale wyprasek stopu Al17 w wyniku dokonania zabiegu przesycania (490°C, 30 minut, woda) i starzenia (180°C, 4 h, chłodzenie na powietrzu).



Rys. 1. Morfologia (A) i struktura cząstek proszku stopu Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr (B) oraz morfologia cząstek proszku aluminium RAl-1 (C)

Fig. 1. Morphology (A) and microstructure of Al17Si5Fe3Cu1.1Mg0.6Zr alloy powder particles (B), and morphology of RAl-aluminium powder (C)

Wyniki badań gęstości wyprasek w stanie wyjściowym oraz po zagęszczaniu na gorąco zestawiono w tabeli 1. Gęstości wyprasek określono przez pomiar masy i wymiarów, a gęstości po ich zagęszczaniu na gorąco metodą Archimedesa, wyznaczając masy na powietrzu i w wodzie.

 All rights reserved

TABELA 1. **Parametry prasowania na zimno i zagęszczania wyprasek na gorąco oraz wyniki badań ich gęstości**
TABLE 1. **Cold and hot consolidation parameters of PM performs and their density**

Lp.	Materiał	Gęstość wypraski ρ_o g/cm^3	Czas wywierania nacisku τ min	Gęstość ρ g/cm^3
1	Al	2,29±0,01*	2	2,74±0,01▫
2	Al17 [1]	-	5	2,83±0,01▫
3	Al-20%Al17	2,27±0,01**	2	2,70±0,01▫▫
4	Al-40%Al17	2,15±0,03**		2,74±0,01▫▫
5	Al-60%Al17	2,08±0,05**		2,777±0,01▫▫
6	Al-80%Al17[1]	-		2,79±0,01▫▫

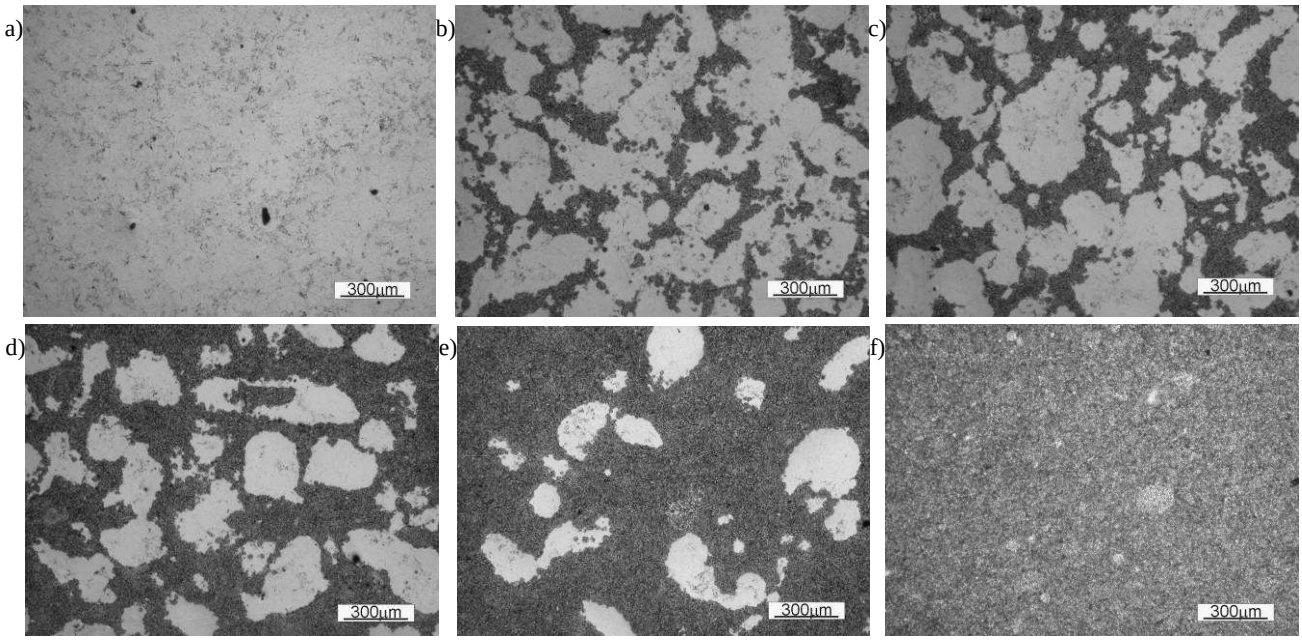
Oznaczenia: [1] materiał zagęszczany na gorąco,
prasowanie na zimno: * z naciskiem jednostkowym 120 MPa, ** z naciskiem jednostkowym 150 MPa
kucie: ▫ z naciskiem jednostkowym 120 MPa, ▫ ▫ z naciskiem jednostkowym 200 PMa

Wyniki badań struktury i wybranych własności materiału wyprasek

Struktura

Badania mikrostruktury materiałów wyprasek przeprowadzono przy użyciu mikroskopu optycznego typu NU na zgładach wzdłużnych (równoległych do osi wyprasek) wytrawionych 0,5% HF w wodzie. Wyniki tych badań zilustrowano na rysunku 2. Analiza mikrofotografii z rysunku 2 oraz wyników obserwacji mikrostruktury w polu jasnym, prowadzonych bezpośrednio w okularze mikroskopu, pozwala stwierdzić, że:

- wypraski otrzymane zarówno z samego proszku aluminium RAl-1 (rys. 2a), jak i stopu Al17 (rys. 2f) oraz ich mieszanek (rys. 2b, c, d, e) są praktycznie pozbawione porowatości,
- w przeciwieństwie do wyprasek z przewagą Al (80 i 60% mas.), w których obszary zajmowane w strukturze przez stop Al17 nie są od siebie izolowane w wypraskach, w wypraskach z przewagą stopu Al17 obszary zajmowane przez Al są od siebie wyraźnie rozdzielone osnową stopu Al17,
- stopień rozwinięcia powierzchni granicznej pomiędzy tymi obszarami maleje w miarę zwiększania się udziału w materiale wyprasek stopu Al17,
- równomierne rozmieszczenie obszarów występowania Al i stopu Al17 w strukturze wyprasek otrzymanych z odpowiednich mieszanek składników oraz gęstości wyprasek bliskie gęstości teoretycznej świadczą o prawidłowej technologii ich wykonania w warunkach laboratoryjnych.



Rys. 2. Mikrostruktura materiału wyprasek otrzymanych z proszku RAl-1 (a) i stopu Al17 (f) oraz mieszanek tych proszków: b) Al-20% mas. Al17, c) Al-40% mas. Al17, d) Al-60% mas. Al17, e) Al-80% mas. Al17. Obróbka cieplna b, c, d, e, f: przesycanie (490°C/30 minut, woda) i starzenie (180°C/4 h)

Fig. 2. Microstructure of materials obtained from RAl-1 powder(a) and Al17 powder (f) and mixture their powders: b) Al-20 wt. % Al17, c) Al-40 wt. % Al17, d) Al - 60 wt. % Al17, e) Al-80 wt. % Al17. Heat treatment b, c, d, e, f: supersaturation (490°C/30 minutes, cooling in water) and ageing (180°C/4 h)

 All rights reserved

Wybrane własności mechaniczne

Dla otrzymanych materiałów po zagęszczaniu na gorąco i poddanych obróbce cieplnej określono twardość, wytrzymałość na rozciąganie i na ściskanie. Twardości określono metodą Brinella, kulką o średnicy d = 2,5 mm. Statyczną próbę ściskania na próbkach ϕ8 o smukłości h_o/d_o = 1,25 oraz statyczną próbę rozciągania na próbka płaskich wykonano w temperaturze otoczenia na urządzeniu INSTRON 1196. Własności mechaniczne badanych materiałów w zależności od zawartości w nich stopu Al17 zestawiono w tabeli 2. Krzywe ściskania, opracowane dla naprężeń umownych i przedstawione na rysunku 3, pokazują, jak istotny jest wpływ składu chemicznego badanych materiałów na przebieg ich reakcji spowodowanej działaniem tych naprężeń.

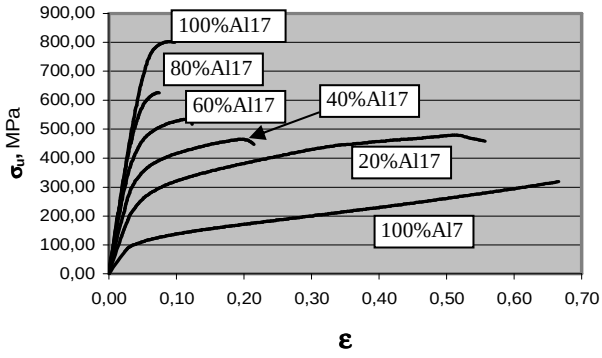
TABELA 2. **Własności składowych materiału gradientowego po zagęszczaniu w temperaturze 490°C i obróbce cieplnej**

TABLE 2. **Properties of the components of the gradient material after consolidation at 490°C and heat treatment**

Materiał	*HB*	*Rm* MPa	*Rc* MPa	ε_k
Al	34±1	107±10	-	-
Al-20%Al17	51±2	160±32	490	0,52
Al-40%Al17	72±2	214±29	470	0,20
Al-60%Al17	98±8	173±62,6	530	0,12
Al-80%Al17	136±3	219±56,4	620	0,09
Al17	168±4	176±102	800	0,09

oznaczenia: *HB* - twardość Brinella, *Rm* - wytrzymałość na rozciąganie, *Rc* - wytrzymałość na ściskanie, ε_k - odkształcenie krytyczne podczas ściskania

Ze zwiększeniem zawartości stopu Al17 w tworzywach składowych materiału gradientowego rośnie wytrzymałość na ściskanie wskutek umacniania ich osnowy aluminiowej rosnącym udziałem stopu Al17, zmniejsza się jednak przy tym stopniowo plastyczność. Wielkość odkształceń krytycznych podczas ściskania maleje z około 0,52 dla tworzywa o zawartości 20% mas. stopu Al17 do 0,1 dla tworzywa o zawartości 80% mas. tego stopu.

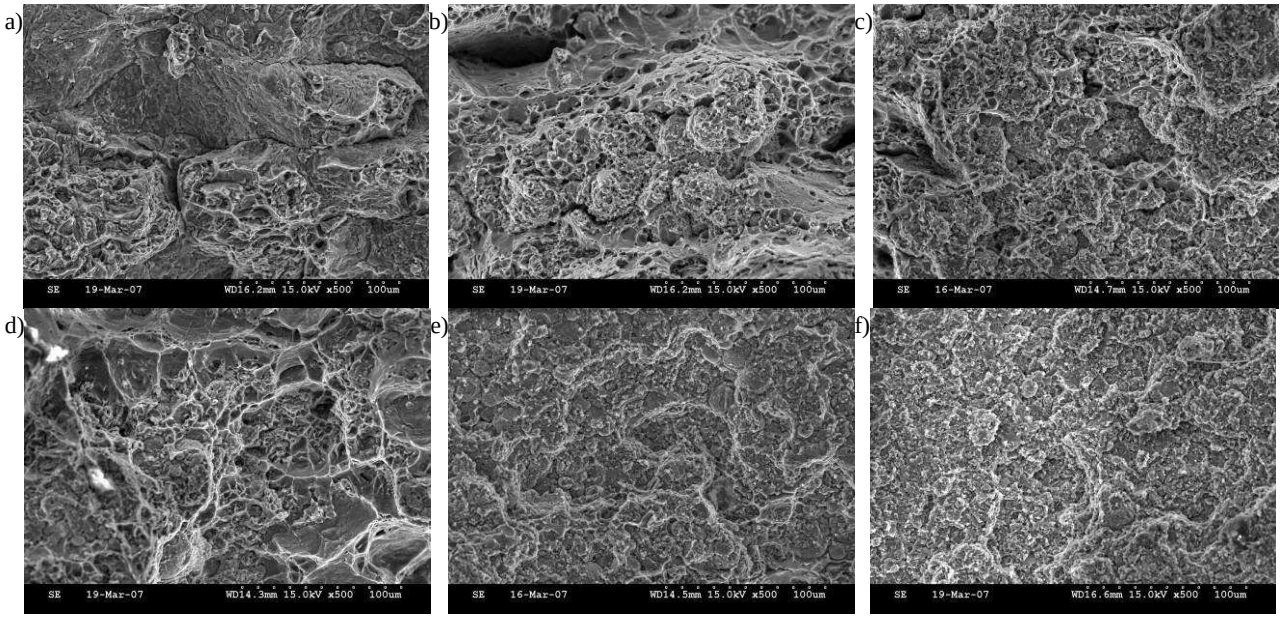


Rys. 3. Zależności umownego naprężenia od wielkości odkształcenia $\sigma_u = f(\varepsilon)$ dla materiałów Al-X% mas. Al17 po zagęszczaniu na gorąco i obróbce cieplnej

Fig. 3. Engineering stress – strain relationship $\sigma_u = f(\varepsilon)$ for materials Al-X% mas. Al17 obtained by hot consolidation and heat treatment

Przełomy

Obserwacje powierzchni zniszczenia powstałych podczas rozciągania próbek prowadzono na skaningowym mikroskopie elektronowym. Charakterystyczne obrazy przełomów materiałów w stanie po zagęszczaniu na gorąco i obróbce cieplnej przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przełomy materiału wyprasek otrzymanych z proszku RAl-1 (a) i stopu Al17 (f) oraz mieszanek tych proszków: b) Al-20% mas. Al17, c) Al-40% mas. Al17, d) Al-60% mas. Al17, e) Al-80% mas. Al17. Obróbka cieplna b, c, d, e, f: przesycanie (490ºC/30 minut, woda) i starzenie (180°C/4 h)

Fig. 4. Fractographs of materials from RAl-1 powder (a) and Al17 alloy (f) and Al-20 wt. % Al17 (b), Al-40 wt. % Al17(c), Al-60 wt. % Al17 (d), Al-80 wt. % Al17 (e). a, b, c, d, f: after supersaturation (490ºC/30 minutes, cooling in water) and ageing (180°C/4 h)

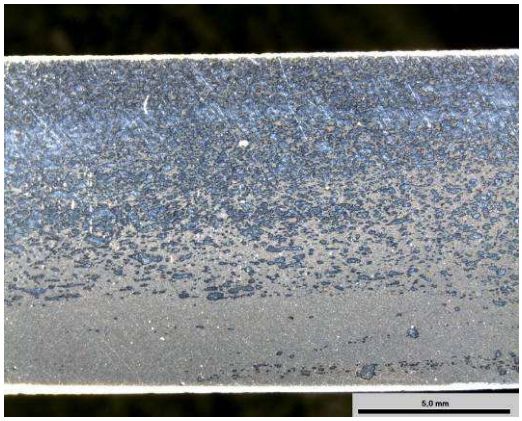
 All rights reserved

Przełom materiału z proszku aluminium jest plastyczny z lokalizacją dekohezji po granicach pierwotnych cząstek proszku (rys. 4a). Powierzchnie przełomów materiałów o mniejszej zawartości stopu Al17 są kruche w obszarach występowania tego stopu i ciągliwe w obszarach występowania aluminium (rys. 4b-d). Udział powierzchni przełomu kruchego zwiększa się z rosnącą zawartością stopu Al17 w materiałach (rys. 4e, f).

Przełom materiału z proszku aluminium jest plastyczny z lokalizacją dekohezji po granicach pierwotnych cząstek proszku (rys. 4a). Powierzchnie przełomów materiałów o mniejszej zawartości stopu Al17 są kruche w obszarach występowania tego stopu i ciągliwe w obszarach występowania aluminium (rys. 4b-d). Udział powierzchni przełomu kruchego zwiększa się z rosnącą zawartością stopu Al17 w materiałach (rys. 4e, f).

Zachowanie się materiałów gradientowych podczas odkształcania

Do badań wytworzono wyroby złożone z warstw o składzie Al-20% mas. Al17 do 100% mas. Al17, z przedziałem co 20% mas. Al17 (rys. 5). Próbki zagęszczano w matrycy zamkniętej w temperaturze 490°C, wywierając nacisk jednostkowy 200 MPa przez 5 minut.

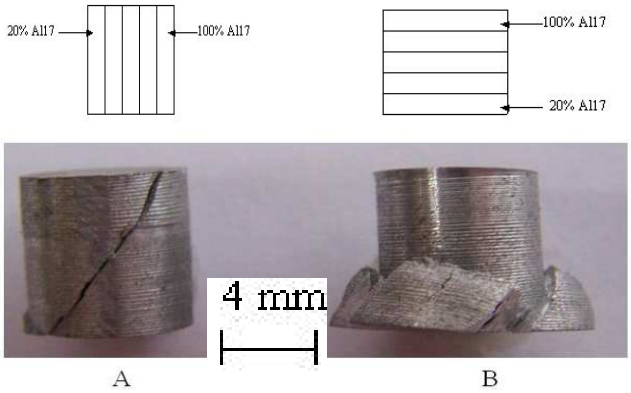


Rys. 5. Makrostruktura próbki kompozytu z gradientem składu chemicznego na przekroju wzdłużnym

Fig. 5. Macrostructure on longitudinal section of a composite specimen with gradient of chemical composition

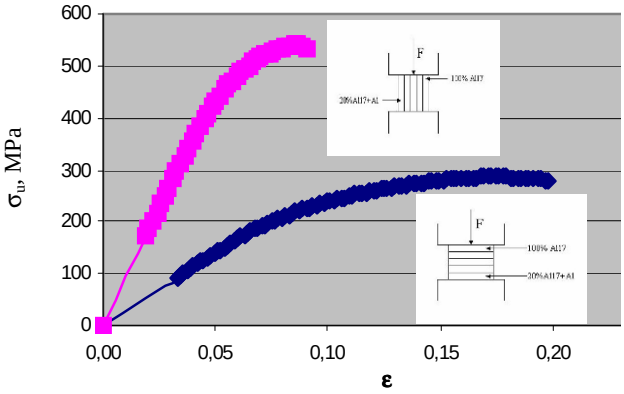
Z wytworzonego materiału wykonano próbki o smukłości h_o/d_o = 1,25 z gradientem składu chemicznego w kierunku promieniowym i osiowym, które poddano spęczaniu. Na rysunku 6 przedstawiono próbki po spęczaniu w zależności od gradientu składu chemicznego, a na rysunku 7 zależności naprężenie umowne-odkształcenie.

W próbkach z gradientem składu chemicznego wartości naprężeń σ_u są dużo większe dla próbek podczas obciążonych siłą przyłożoną prostopadle do gradientu składu chemicznego niż równolegle.



Rys. 6. Próbka z kompozytu gradientowego po spęczaniu w temperaturze otoczenia - materiał po zagęszczaniu na gorąco i obróbce cieplnej. Obciążenie: A - równolegle, B - prostopadle do gradientu składu chemicznego

Fig. 6. Specimens from gradient composite after compression tests at room temperature - material after hot consolidation and heat treatment. Load: A - parallel, B - perpendicular to gradient of chemical composition



Rys. 7. Zależności umownego naprężenia σ_u od wielkości odkształcenia ε podczas spęczania próbek z materiału kompozytowego

Fig. 7. Dependence of engineering stress σ_u on strain ε in the compression test of specimens of composite

WNIOSKI

W wyniku zagęszczania na gorąco mieszanek z proszków aluminium RAl-1 i stopowego proszku Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr otrzymano tworzywa o gęstości zbliżonej do teoretycznej. Własności wytrzymałościowe tak otrzymanych materiałów determinowane są zawartością proszku stopowego Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr w osnowie aluminiowej. Ze wzrostem jego udziału następuje ich zwiększenie. Obniżają się jednak znacząco własności plastyczne, których miarą jest wielkość odkształcenia krytycznego przy ściskaniu.

W wytworzonym materiale z gradientowym składu chemicznego uzyskano kierunkową wytrzymałość na ściskanie. Jest ona znacznie większa podczas obciążenia próbki siłą przyłożoną prostopadle niż równolegle do gradientu składu chemicznego.

Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy Nr N507 093 32/2562.
Autorzy dziękują drowi hab. inż. L. Magalasowi za wykonanie zdjęcia do rysunku 5.

LITERATURA

[1] Neubrand A., Rödel J., Gradient materials: an overview of a novel concept, Zeitschrift für Metallkunde 1997, 88, 358--371.

[2] Kieback B., Meyer-Olbersleben F., Bautaile mit konträren Eigenschaften aus Gradientenwerkstoffen herstellbar, Maschinenmarkt 1999, 105, 38-40.

[3] Raβach S., Lehnert W., Simulation of the deformation of graded materials, Advanced Engineering Materials 2000, 2, 442-444.

[4] Szczepanik S., Raβbach S., Hot forming of aluminium based gradient materials, ESAFORM the 5th International Conference on Material Forming, eds. M. Pietrzyk, Z. Mitura, J. Kaczmar, Kraków, April 14–17, 2002, „Akapit", Kraków 2002, 335-338.

[5] Szczepanik S., Gradient materials on aluminium alloy basis obtained from powders by hot forming, Inżynieria Materiałowa 2007, 3-4, 602-605.

[6] Szczepanik S., Wpływ zagęszczania na gorąco wyprasek z mieszanek proszków aluminium i stopu Al17Si3,3Cu1,4 Mg0,6Zr na własności otrzymanych materiałów, Rudy i Metale Nieżelazne 2007, 11, 707-711.

 All rights reserved