



Stefan Szczepanik*, Marek Wojtaszek

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 KOMPOZYTÓW WARSTWOWYCH ZE STOPÓW Fe-Al OTRZYMANYCH METODĄ METALURGII PROSZKÓW PO ZAGĘSZCZANIU W MATRYCY ZAMKNIĘTEJ

Prezentowano wybrane wyniki badań kompozytów warstwowych ze skokowym gradientem składu chemicznego, otrzymanych z proszku aluminium RAL-1 i mieszanek tego proszku z proszkiem żelaza WPL w ilościach 30 i 40% atomowych. Wypraski z proszku aluminium i mieszanek proszków wstępnie zagęszczano, a następnie nagrzewano do temperatury 480°C i odkształcano przy tej temperaturze w warunkach izotermicznych. Badano strukturę, własności mechaniczne i przełomy składowych materiałów warstwowych i otrzymanych z nich kompozytów warstwowych w stanie po odkształceniu oraz po dodatkowym wyżarzaniu. W wyniku zagęszczania otrzymano z proszku aluminium i jego mieszanek z proszkiem żelaza tworzywa konstrukcyjne o dużym zagęszczeniu. W mikrostrukturze materiałów Fe-Al występują obszary bogate w aluminium lub żelazo oraz strefy przejściowe faz o twardości wynoszącej $\mu\text{HV}_{0,02} = 1240$. Strefy przejściowe Fe-Al charakteryzują się obniżoną plastycznością w odniesieniu do składników metali wyjściowych, tj. żelaza i aluminium. Wykazano, że przez konstrukcję warstwowego kompozytu można sterować własnościami wyrobu, które zależą od składu chemicznego oraz sposobu ułożenia warstw. Wytrzymałość na zginanie kompozytu wynosi 90÷105 MPa. Znajomość własności wytworzonych materiałów przy różnych schematach ułożenia poszczególnych warstw pozwala na wybór najbardziej efektywnego wariantu w zależności od wymaganych w konkretnym przypadku własności produktu.

Słowa kluczowe: metalurgia proszków, zagęszczanie, struktura, własności mechaniczne, przełomy, kompozyt warstwy

STRUCTURE AND PROPERTIES OF CLOSED-DIE FORGED Fe-Al POWDER LAYER COMPOSITES

To obtain alloys with intermetallic phases metallurgical processes and PM routes are used. The research focuses mainly on the materials obtained in the metallurgic route. The main disadvantage of the alloys based on Fe-Al phases is their low plasticity at room temperature and low strength at elevated temperatures. The aim of the research in this paper is to determine the influence of hot deformation and heat treatment of the preforms obtained from a mixture of iron and aluminium powders as well as the influence of the multilayer geometry of hot consolidated layer composite samples on the density and mechanical properties of these materials. The paper presents the results of the research of Fe-Al materials after hot consolidation of the Fe-Al PM preforms. Fe-Al PM [30 and 40 wt. %] PM layer preforms were cold pressed and consolidated by hot closed-die forging at 480°C to yield high-density composites. Microstructures and mechanical properties were studied after consolidation, and also after 4 h heat treatment at 550°C. After consolidation hardness of the base materials was in the range 25÷43 HB, after heat treatment 25÷62 HB, and bend strengths then in the range 83÷91 MPa. Fe-Al phases on the boundary surfaces of the specimens had microhardness $\mu\text{HV}_{0.02}$ of 1240. Bend strengths of composite samples were in the range 90÷105 MPa, depending on chemical composition and layer geometry of the specimens. The plasticities of Fe-Al composites were smaller than of the starting metals. Fractographs of bend specimens show regions of brittle in area reach in iron and Fe-Al phases, and ductile failure in aluminium - rich regions. These data can contribute to design of layer materials for specific applications utilising the PM route and closed-die forging.

Keywords: powder metallurgy, consolidation, structure, mechanical properties, fracture, layer composite

WSTĘP

Stopy Fe-Al odznaczają się dużą odpornością na ścieranie, zdolnością do tłumienia drgań, dobrą odpornością na zmęczenie, zachowując przy tym wysoką wytrzymałość na rozciąganie w podwyższonej tempera-

turze. Zasadniczą wadą tych stopów jest kruchość w temperaturze pokojowej i trudności z przetwórstwem, co ogranicza ich wykorzystanie jako materiałów konstrukcyjnych.

Dla uzyskania stopów z fazami międzymetalicznymi stosuje się procesy metalurgiczne lub technologie metalurgii proszków. Badane są głównie materiały otrzymywane tradycyjnymi metodami metalurgicznymi [1, 2]. Ze względu na dużą różnicę temperatur topnienia głównych składników faz międzymetalicznych trudno jest otrzymać materiały o powtarzalnym składzie i strukturze. Prowadzone są również prace nad otrzymywaniem tych materiałów metodą mechanicznej syntezy proszków [3] oraz samorozwijającej się wysokotemperaturowej syntezy SHS ujednolodnionej mieszanki proszków [4]. Zgodnie z badaniami [5, 6], fazy międzymetaliczne Fe-Al otrzymane z proszków w procesie SHS w połączeniu z przetwórstwem na gorąco wykazują dobrą odporność na korozję wysokotemperaturową oraz zadowalające własności mechaniczne, które jednak silnie zależą od warunków odkształcania.

Zasadniczą wadą omawianych stopów jest ich kruchość w temperaturze pokojowej i trudności z przetwarzaniem, co ogranicza ich wykorzystanie jako tworzyw konstrukcyjnych. Zainteresowanie aluminidkami żelaza wynika z możliwości zastosowania ich w technice jako materiałów konstrukcyjnych oraz jako materiału do badań podstawowych, np. do badań mechanizmu odkształcania czy mechanizmu umocnienia stopów wykazujących uporządkowanie dalekiego zasięgu.

Badania w niniejszej pracy dotyczą możliwości wytwarzania warstwowych materiałów kompozytowych z wykorzystaniem tworzyw Fe-Al otrzymanych metodą metalurgii proszków oraz ich wybranych własności.

BADANIA WŁASNE

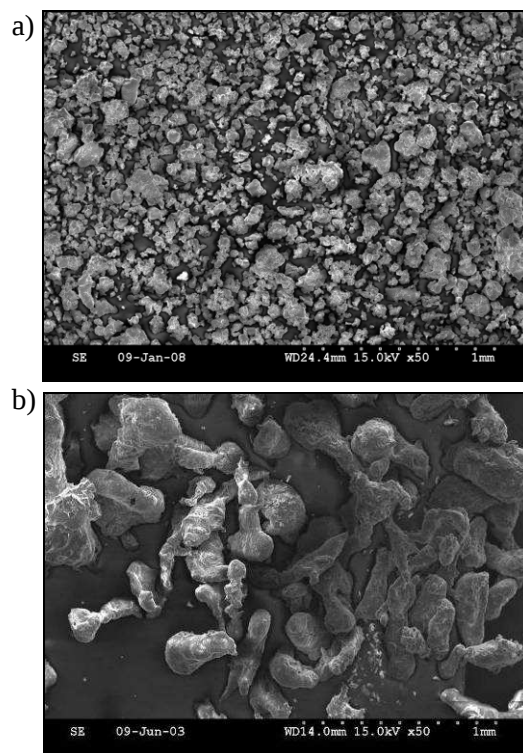
Cel i zakres badań

W pracy przedstawiono wyniki wstępnych prób, które miały na celu wytworzenie metodą metalurgii proszków warstwowych wyrobów ze stopów Fe-Al oraz ocenę ich własności. Badano wpływ zagęszczania na gorąco i obróbki cieplnej na strukturę oraz wybrane własności fizyczne i mechaniczne otrzymanych tworzyw. Celem badań jest opracowanie własności tworzyw Fe-Al otrzymanych z mieszanek proszków i wytworzonych z nich warstwowych wyrobów kompozytowych pod kątem najefektywniejszego schematu lokowania w nich poszczególnych warstw.

Przygotowanie materiału do badań

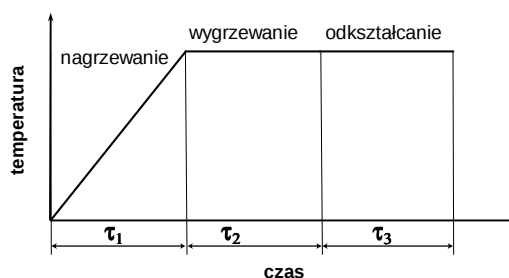
Do wytworzenia próbek do badań zastosowano dwa rodzaje proszku; rozpylany proszek aluminium o symbolu RAl-1 oraz rozpylany proszek żelaza o oznaczeniu WPL-200. Morfologię użytych do badań proszków przedstawiono na rysunku 1. Warstwowe próbki kompozytowe przygotowano z proszku aluminium oraz jego mieszanki z proszkiem żelaza, w ilościach odpowiednio 30 oraz 40% atomowych. Z tak

dobranych składników wykonano wypraski o średnicy $\phi 35,4$ mm i wysokościach oraz masach zależnych od przeznaczenia, tj. o masie 30 g próbki do badań własności składników bazowych i 7÷14 g do wytworzenia warstwowych próbek ze skokowym gradientem składu chemicznego. Analizowane warianty ułożenia poszczególnych warstw w konstrukcji wyrobów kompozytowych przedstawiono na rysunku 3. Do prasowania wyprasek stosowano nacisk jednostkowy wynoszący 100 MPa. Następnie wypraski nagrzewano do temperatury 480°C, wygrzewano i prasowano na gorąco w warunkach izotermicznych. Schemat cieplny prasowania przedstawiono na rysunku 2, a rozłokowanie poszczególnych warstw w wypraskach i zagęszczonych wyrobach na rysunku 3. W tabeli 1 zestawiono parametry geometryczne oraz średnie wartości gęstości, odpowiednio dla wyprasek i otrzymanych z nich wyrobów.



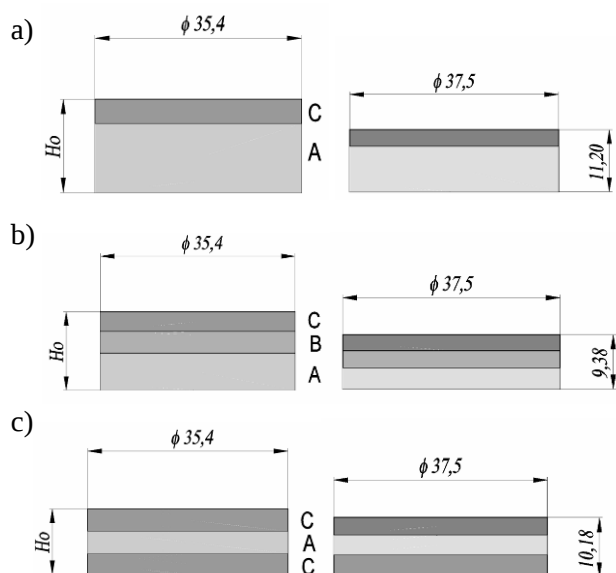
Rys. 1. Morfologia proszku: a) żelaza WPL-200; b) proszku aluminium RAl-1

Fig. 1. Powder morphology: a) iron WPL-200; b) aluminium RAl-1



Rys. 2. Schemat cieplny prasowania na gorąco próbek Al-Fe: τ_1 i τ_2 = 4 min, τ_3 = 2 min

Fig. 2. A schematic of hot consolidation of specimens Al-Fe: τ_1 and τ_2 = 4 min, τ_3 = 2 min



legenda:

- Aluminium
- Al - 60 % Fe
- Al - 70 % Fe

Rys. 3. Schematyczne przedstawienie konstrukcji wyprasek warstwowych (po lewej) i zagęszczonych na gorąco warstwowych kompozytów (po prawej)

Fig. 3. Multilayer geometry of preforms (left) and hot consolidated layer composite samples (right)

TABELA 1. Wielkości charakterystyczne wyprasek i wyrobów
TABLE 1. Parameters of the preforms and consolidated samples

Schemat wykonania próbki	Wypraska			Odkuwka	
	ho mm	masa g	gęstość g/cm ³	kształt wg rys.	gęstość g/cm ³
Al/Al-70Fe	14,74	35,37	2,45	3a	2,86
Al-70Fe/Al-60Fe/Al	14,50	37,34	2,62	3b	3,28
Al-70Fe/Al/Al-70Fe	14,68	38,34	2,66	3c	4,14
Al-70Fe/Al-60Fe/Al	13,54	36,98	2,81	3b	3,57
Al-70Fe	12,56	30,06	2,44		5,02
Al-60Fe	9,92	30,22	3,11		3,88
Al	14,84	29,8	2,05		2,63

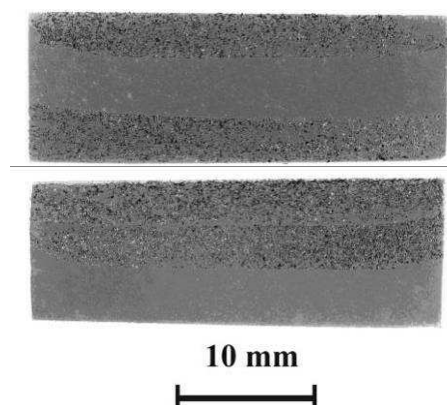
Oznaczenia: Al - aluminium, 70 - materiał Al-70%Fe, 60 - materiał Al-60%Fe, ho - początkowa wysokość wypraski

Struktura i własności mechaniczne

Przeprowadzono analizę makro- i mikrostruktury wyprasek składowych materiałów kompozytu ze skokowym gradientem. Obserwacje makrostruktury ujawniły warstwową budowę otrzymanych tworzyw (rys. 4a) oraz skokowy gradient składu chemicznego (rys. 4b).

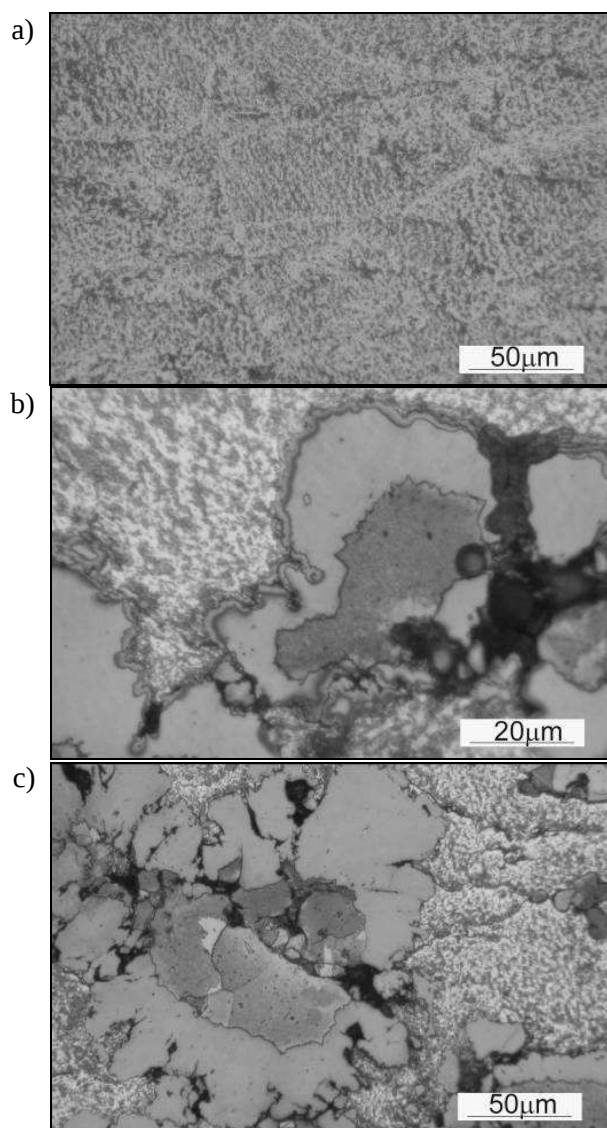
Strukturę i własności mechaniczne materiałów badano po wyżarzaniu w temperaturze 540°C przez 4 godziny. Na rysunku 5 przedstawiono mikrostruktury

składowych materiałów warstwowych, tj. aluminium i materiałów Al-Fe.



Rys. 4. Makrostruktury trójwarstwowych próbek kompozytu po zagęszczeniu w temperaturze 480°C

Fig. 4. Macrostructure of three-layer composite samples after consolidation at 480°C

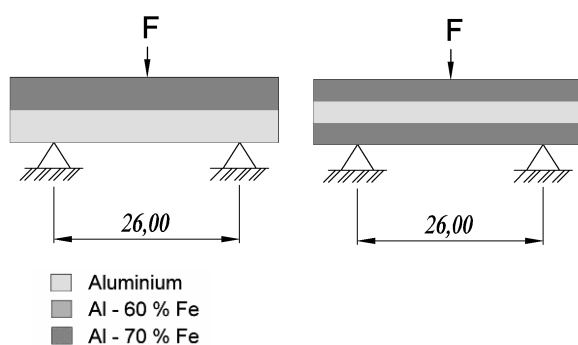


Rys. 5. Mikrostruktury materiałów: a) Al; b) Al-60%Fe; c) Al-70%Fe

Fig. 5. Microstructure of the materials: a) Al; b) Al-60%Fe; c) Al-70%Fe

Mikrostruktury obserwowano metodą mikroskopii świetlnej. W strukturze materiału otrzymanego z proszku aluminium RA1-1 stwierdzono obecność pojedynczych porów oraz rozdrobnionych tlenków (rys. 5a). Widoczne są również powierzchnie pierwotnych cząstek proszków, a w nich występujące podstruktury. W materiałach typu Fe-Al oprócz obszarów bogatych w aluminium i żelazo występują obszary przejściowe, które tworzą fazy Fe-Al (rys. 5b, c). Konsekwencją takiej struktury są zróżnicowane twardości w materiale, które wynoszą odpowiednio dla obszarów bogatych w aluminium $\mu\text{HV}_{0,05} = 15$, żelazo $\mu\text{HV}_{0,05} = 102$ oraz dla faz Fe-Al $\mu\text{HV}_{0,02} = 1240$.

Dla badanych materiałów określono twardość Briella oraz wytrzymałość na zginanie. Sposób obciążenia próbek podczas zginania przedstawiono schematycznie na rysunku 6. Wyznaczone własności mechaniczne zestawiono w tabeli 2.



Rys. 6. Sposób obciążenia próbek podczas zginania

Fig. 6. Loading of the sample during the bend test

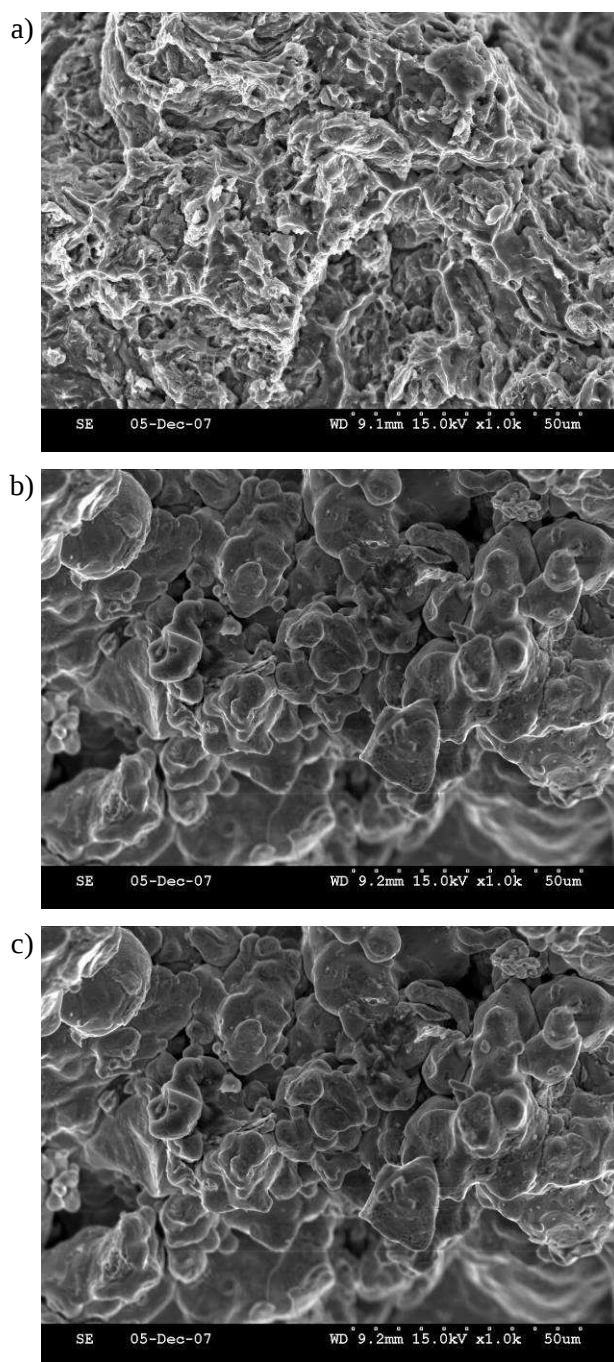
TABELA 2. Twardość i wytrzymałość na zginanie próbek Al-Fe
TABLE 2. Hardness and bend strength of the Al-Fe samples

Budowa próbki	Twardość HB		R_m MPa
	po kuciu	po kuciu i po o.c.	
Al/Al-70Fe	-	-	90
Al-70Fe/Al-60Fe/Al	-	-	87
Al-70Fe/Al/Al-70Fe	-	-	105
Al-70Fe/Al-60Fe/Al	-	-	92
Al-70Fe	43	62	91
Al-60Fe	32	32	83
Al	25	25	-

Oznaczenia materiału jak w tabeli 1. Twardość - wartość średnia z 5 pomiarów, wytrzymałość na zginanie - średnia z 3 pomiarów.

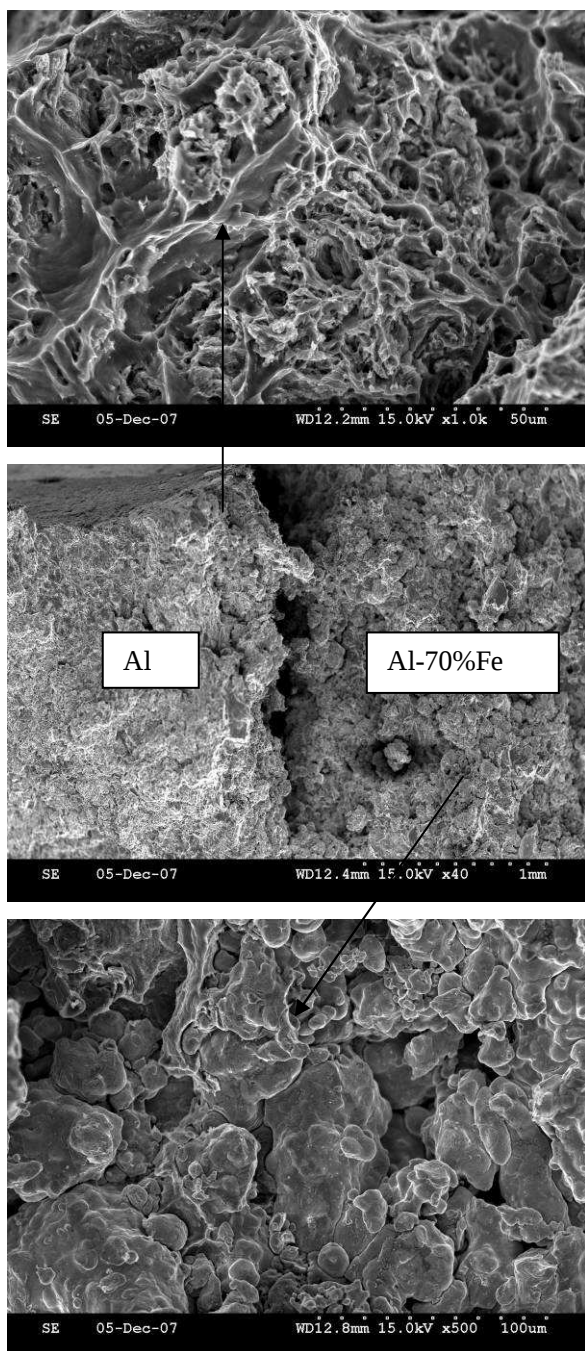
Przełom powstały podczas trójpunktowego zginania próbek z proszku aluminium jest drobnoziarnisty i plastyczny. W materiałach Al-Fe (rys. 7b, c) przełomy przebiegają po granicach cząstek żelaza ulokowanych w aluminium. Na obrazie widoczne są powierzchnie

cząstek proszku żelaza oraz pojedyncze pory, występujące sporadycznie między nimi poszczególnymi cząstkami proszku żelaza, które są zalążkami do inicjowania pęknięcia. Podczas zginania próbek warstwowych dekohezja rozpoczyna się w materiale Al-Fe, a następnie rozprzestrzenia się na powierzchni rozdziału Al/Al-Fe, powodując jej rozwarstwienie (rys. 8). Wytrzymałość na zginanie tych próbek zależy od przyjętego do badań schematu ułożenia poszczególnych warstw.



Rys. 7. Przełomy materiałów po zginaniu: a) Al; b) Al-70%Fe; c) Al-60%Fe

Fig. 7. Fractographs of materials after bending: a) Al; b) Al-70%Fe; c) Al-60%Fe



Rys. 8. Powierzchnie zniszczenia dwuwarstwowej próbki kompozytu Al/Al-70%Fe podczas zginania

Fig. 8. Fractographs of two-layer bend samples of Al/Al-70%Fe composite

WNIOSKI

W świetle wyników badań własności kompozytów warstwowych ze skokowym gradientem składu chemicznego, otrzymanych z proszku aluminium RA1-1 i mieszanek tego proszku z proszkiem żelaza WPL w ilościach 30 i 40% atomowych, można stwierdzić, że:

1. W wyniku zagęszczania na gorąco w matrycach zamkniętych otrzymano z proszku aluminium i jego mieszanek z proszkiem żelaza tworzywa konstrukcyjne Fe-Al o dużym zagęszczeniu.
2. W mikrostrukturze tych materiałów występują obszary bogate w aluminium lub żelazo oraz strefy przejściowe faz Fe-Al o twardości wynoszącej $\mu\text{HV}_{0,02} = 1240$. Tworzywa Fe-Al charakteryzują się obniżoną plastycznością w stosunku do składników wyjściowych.
3. Przez odpowiednią konstrukcję warstwowej wypraski wyjściowej można sterować własnościami wyrobu, które zależą będą od składu chemicznego oraz sposobu ułożenia warstw.
4. Uzyskane wstępne wyniki wskazują na potrzebę prowadzenia dalszych badań w celu opracowania najkorzystniejszych warunków realizacji odkształcania oraz oceny własności wyrobów i ich cech użytkowych.

Podziękowania

Praca realizowana w ramach działalności statutowej na Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH w Krakowie - nr 11.11.110.795.

Autorzy dziękują drowi inż. J. Krawiarzowi za wykonanie badań metalograficznych.

LITERATURA

- [1] Barcik J., Cebulski J., Intermetallic compound based Fe40Al as cast alloy- chemical composition, microstructure and properties, *Inżynieria Materiałowa* 1998, 4, 901-904.
- [2] Kupka M., Struktura i właściwości stopów na osnowie fazy FeAl otrzymanych w procesach metalurgicznych, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2005.
- [3] Oleszak D., Proszki kompozytowe FeAl-Al₂O₃ i NiAl-Al₂O₃ otrzymywane metodą mechanicznej syntezy, *Kompozyty (Composites)* 2001, 1, 76-78.
- [4] Godlewska E., Mania R., Szczepanik S., Kosiński S., Krawiarz J., Some useful properties of FeAl intermetallic obtained by self-propagating high-temperature synthesis, *Inżynieria Materiałowa* 2001, 4, 354-357.
- [5] Szczepanik S., Godlewska E., Mania R., Influence of hot forming on the properties of Fe-Al intermetallic materials, *Proc. 8th Inter. Conf. on Metal Forming - Metal forming 2000*, ed. Pietrzyk et al., Balkema, Rotterdam 2000, 477-484.
- [6] Godlewska E., Mania R., Szczepanik S., Selected properties of Fe-Al intermetallics prepared by various processing routes, *Proc. Int. Conf. Environmental Degradation of Engineering Materials*, Gdańsk-Jurata 1999, 347-352.