https://doi.org/10.62753/ctp.2002.25.4.4

Stefan Szczepanik[1]
Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Elżbieta Godlewska[2], **Ryszard Mania**[3]
Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

MATERIAŁY Fe-Al OTRZYMANE Z PROSZKÓW

Przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych (wytrzymałości na zginanie i twardości) materiałów z faz międzymetalicznych Fe-Al, wytworzonych przez odkształcanie na gorąco wyprasek, otrzymanych w procesie SHS z proszków żelaza i aluminium. Własności materiałów z faz międzymetalicznych Fe-Al otrzymanych w procesie SHS można znacznie polepszyć przez ich przeróbkę plastyczną. Badania wykazały pomijany do tej pory w analizach wpływ parametrów przeróbki plastycznej na kształtowanie własności tych materiałów. Parametry odkształcania determinują ich gęstość końcową oraz własności mechaniczne i strukturę. Fazy międzymetaliczne FeAl i Fe_3Al otrzymane z proszków żelaza i aluminium mają dobrą plastyczność i dużą wytrzymałości na zginanie, która nie występuje w tych materiałach wytwarzanych innymi metodami. Tlenek glinu występuje w małych ilościach w postaci drobnych cząstek. Nie stwierdzono znaczącego jego wpływu na własności wytworzonych wyrobów.

Fe-Al MATERIALS OBTAINED FROM POWDER SUBSTRATES

The paper presents the results of investigations on mechanical properties (bending strength and hardness) of Fe-Al intermetallics. The materials were obtained by hot forming of compacted blocks, received from the self-propagating high--temperature synthesis (SHS). It has been shown that the properties of SHS products can be markedly improved by hot processing. The hot-forming parameters strongly affect final density, mechanical properties (Table 1) and structure (Figs 3, 5-9) of Fe-Al intermetallics. Moreover, deformability of these materials is temperature dependent. For FeAl, deformation attained at 850°C is 65% and as much as 83% at 1080°C. For Fe_3Al, deformation attained at 1060°C is 78% with the preserved sample integrity. Bending strength of FeAl is the highest when the material is strongly deformed, e.g. 1967 MPa for the processing parameters $\varepsilon = 83\%$, $T = 1080$°C. Fe_3Al deformed at the same temperature with $\varepsilon = 73\%$ has a lower bending strength, i.e. 1263 MPa. Hardness has also been found to depend on deformation parameters. After the bending test the features of brittle fracture are observed in the case of FeAl samples processed at 850°C with $\varepsilon = 56\%$ or at 1060°C with $\varepsilon = 42\%$, whereas the samples processed at 1060°C with $\varepsilon = 60\%$ or 80% undergo plastic deformation prior to failure (Figs 7 and 9). Fine alumina dispersions encountered in the fractured samples do not seem to have any significant effect on the properties of the investigated materials. The intermetallic phases, FeAl and Fe_3Al, obtained from powder substrates according to the technology developed by the authors of the present paper, exhibit good ductility combined with high bending strength, which are unattainable by means of other known manufacturing methods.

WPROWADZENIE

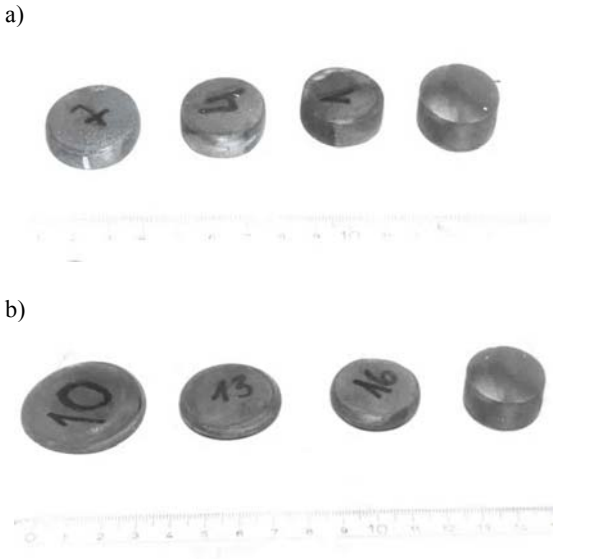
Fazy międzymetaliczne Fe-Al, Ti-Al, Mo-Al ze względu na swoje własności stanowią obszar intensywnych badań w świecie, a ostatnio również w kraju [1, 4-6]. Do uzyskania stopów z fazami międzymetalicznymi stosuje się metody metalurgiczne [4, 5] oraz metody metalurgii proszków [1, 3, 6]. Zaawansowaną techniką wytwarzania faz międzymetalicznych jest samorozwijająca się wysokotemperaturowa synteza [1, 3]. Otrzymane wyroby z faz międzymetalicznych posiadają dobrą odporność na korozję wysokotemperaturową, lecz cechują się małą plastycznością. Stąd podejmuje się badania mające na celu poprawę własności plastycznych tych tworzyw przez wprowadzenie do nich plastyfikatorów lub przez ich przetwórstwo. W pracy skoncentrowano się na analizie wpływu warunków odkształcania na własności faz międzymetalicznych Fe-Al.

BADANIA WŁASNE

Celem badań jest określenie wpływu parametrów odkształcania wyprasek z faz międzymetalicznych FeAl i Fe_3Al na własności mechaniczne i strukturę otrzymanych z nich materiałów. Opis wytworzenia próbek do badań z zastosowaniem procesu SHS podano w pracach [1, 3]. Odkształcanie próbek przeprowadzono w zakresie temperatur 850÷1080°C z gniotami do około 80%, co pozwoliło uzyskać informacje o podatności do odkształceń plastycznych tych materiałów oraz oszacować wpływ parametrów odkształcania na własności mechaniczne.

Na rysunku 1 pokazano kształt materiału FeAl po procesie SHS oraz po odkształceniu w zadanych temperaturach z różnymi gniotami. Odkształcanie tego materiału jest możliwe w temperaturze 850°C z gniotami do 65%, a w temperaturze 1080°C do około 83% przy zachowaniu jego dobrej spójności.

[1] dr hab. inż., [2] dr inż., [3] dr inż.



Rys. 1. Kształty materiału FeAl po odkształceniu w temperaturze: a) 850°C, b) 1080°C

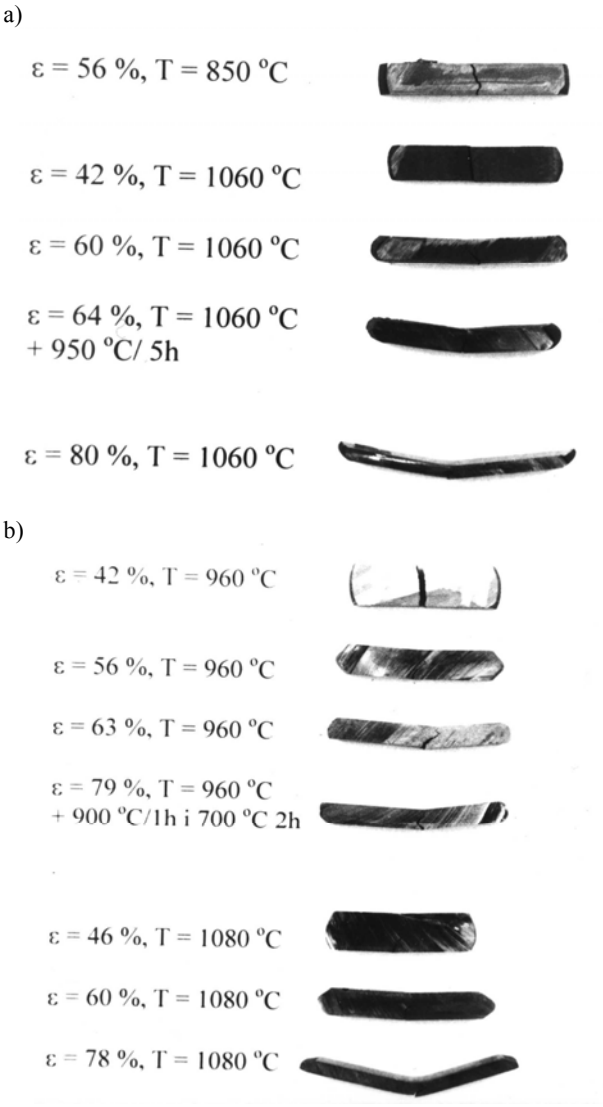
Fig.1. Shapes of FeAl samples, as-received from SHS and after deformation at 850°C (a) and 1080°C (b)

Badano wpływ temperatury i wielkości odkształcenia na zagęszczenie materiału, strukturę i własności mechaniczne określone w próbie zginania i twardości.

Własności mechaniczne

Własności mechaniczne otrzymanych materiałów Fe-Al podano w tabeli 1. Zależą one w sposób istotny od gęstości oraz parametrów odkształcania. Materiał FeAl odkształcony z gniotem 73% w temperaturze 850°C ma wytrzymałość na zginanie 1694 MPa i twardość 241 HV_5, a odkształcony w tej samej temperaurze z gniotem 56% tylko 536 MPa i 107 HV_5. Podobna zależność występuje dla materiału odkształcenego w temperaturze 1060°C. Wyżarzanie materiału FeAl w temperaturze 950°C przez 5 h spowodowało zwiększenie jego wytrzymałości na zginanie i twardości o około 10% w stosunku do materiału po odkształceniu. Najwyższą wytrzymałość na zginanie ma materiał FeAl po odkształcaniu z gniotem 83% w temperaturze 1080°C. Próbki po zginaniu pokazano na rysunku 2. Przełom materiału FeAl po odkształcaniu w temperaturze 850°C z gniotem 56% i w temperaturze 1060°C z gniotem 42% jest kruchy. Materiał odkształcony z gniotem 60 i 80% w temperaturze 1060°C odkształca się plastycznie przed zniszczeniem.

Podobne zależności wytrzymałości na zginanie od parametrów odkształcania występują dla materiału Fe_3Al. Wytrzymałość na zginanie jest mniejsza niż dla materiału FeAl odkształcanego w tych samych warunkach. Również twardość zależy od warunków odkształcania.



Rys. 2. Próbki po zginaniu z materiału: a) FeAl, b) Fe_3Al

Fig. 2. Specimens after bending: a) FeAl, b) Fe_3Al

TABELA 1. **Własności mechaniczne materiałów FeAl i Fe_3Al po odkształcaniu**

TABLE 1. **Mechanical properties of FeAl and Fe_3Al after deformation**

Materiał	Warunki odkształcenia		Wytrzymałość na zginanie σ_{zg} MPa	Całkowita strzałka ugięcia f_c mm	Twardość	
	Temperatura, °C	Gniot ε_h, %			HV_5	μHV002
1	2	3	4	5	6	7
FeAl	-	-	-	-	61	381
	850	56	536	0,15	107	263
	850	73	1695	1,45	241	529
	960	42			178	349
	960	65			268	353
	1060	42	504	0,24	236	521
	1060	60	527	0,20	268	441
	1060	80	1465	1,15	296	642
	1080	83	1967	1,78	-	-

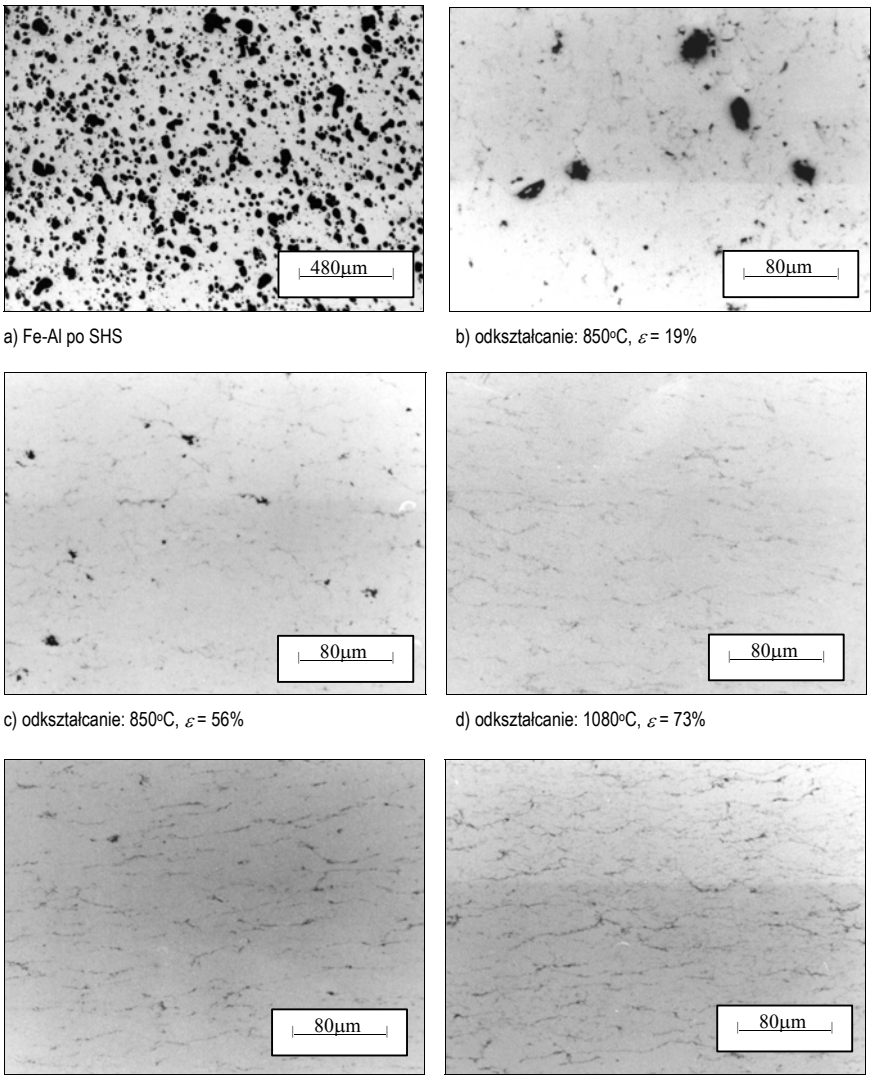
1	2	3	4	5	6	7
Fe_3Al	-	-	-	-	49	187
	960	42	306	0,2	142	332
	960	56	624	0,2	219	421
	960	63	856	0,21	268	413
	1080	46	323	0,16	241	431
	1080	60	512	0,14	-	-
	1080	73	1263	1,11	-	-

Struktura

Badania struktury objęły analizę nietrawionych zgładów na mikroskopie optycznym oraz powierzchni zgładów i przełomów na mikroskopie skaningowym. Na rysunku 3a pokazano typową strukturę materiału po procesie SHS, która charakteryzuje się dużą ilością porów o wielkości do 80 μm. Pory rozłożone są nierównomiernie pojedynczo i w skupiskach. Materiał po odkształcaniu w temperaturze 850°C z gniotem 19% uległ znacznemu zagęszczeniu (rys. 3b), a na zgładzie obserwuje się pojedyncze pory o wielkości do około 10 μm oraz liczne małe. Po odkształceniu wynoszącym 56% nastąpiło dalsze dogęszczenie materiału i zamknięcie dużych porów. Pory występują sporadycznie na zgładzie (rys. 3c). Materiał odkształcany w temperaturze 1080°C z gniotem 73% jest bezporowaty (rys. 3d). Na zgładach materiału odkształconego w tej temperaturze z gniotem wynoszącym 60% obserwuje się pojedyncze bardzo małe pory (rys. 3e) oraz tendencję do ukierunkowania ziarn. Wyżarzanie w temperaturze 950°C w czasie 5 h nie spowodowało istotnych zmian w strukturze materiału (rys. 3f).

Strukturę obserwowaną na mikroskopie skaningowym przedstawiono na rysunku 4. Ziarna rozdzielone są wyraźnymi granicami, na których lokalizują się również mikropory. Przeprowadzona analiza składu chemicznego, której przykładowe wyniki podano na rysunku 4b, pokazuje stabilność koncentracji żelaza oraz lokalnie zmienną koncentrację glinu i tlenu. Może to powodować zróżnicowanie mikrotwardości.

Przełomy obserwowane na mikroskopie skaningowym pokazano na rysunkach 5-9. Przełom materiałów po procesie SHS przebiega po graniach bardzo drobnych ziarn. Obserwuje się na powierzchni przełomu pory o różnych kształtach i wielkości. Materiały odkształcone mają przełomy zależne od warunków odkształcania. W materiałach po małych odkształceniach przebiegają one po granicach drobnych ziarn (rys. rys. 6a i 7a). Widoczne są na nich niezamknięte i niezgrzane pory. W materiałach odkształconych z dużymi gniotami szczególnie w temperaturze 1060 i 1080°C zniszczenie przebiega przez ziarna (rys. rys. 7c, 8c, 9c). Powierzchnia zniszczenia wykazuje cechy przełomu plastycznego, co potwierdza kształt próbek po zginaniu i kąt zawarty między powierzchnią zniszczenia i kierunkiem przyłożenia siły (rys. 2). Obserwuje się na przełomach również mikropęknięcia na granicach ziarn (rys. rys. 6a i b, 7a i b, 8a i b oraz 9b).



a) Fe-Al po SHS

b) odkształcanie: 850°C, ε = 19%

c) odkształcanie: 850°C, ε = 56%

d) odkształcanie: 1080°C, ε = 73%

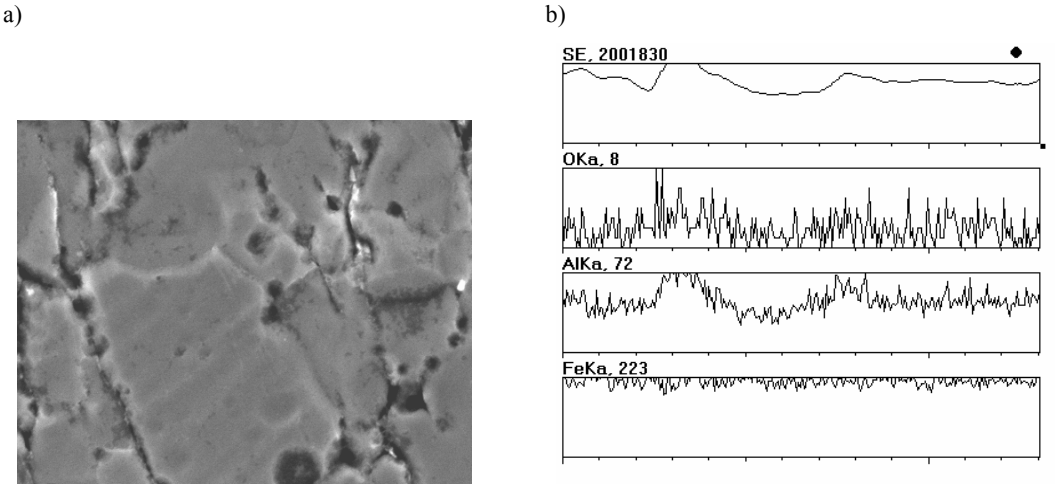
e) odkształcanie: 1080°C, ε = 60%

f) odkształcanie: 1080°C, ε = 64% i wyżarzanie w temperaturze 950°C, 5 h

Rys. 3. Struktura materiału Fe-Al po procesie SHS oraz po plastycznym odkształceniu z różnymi gniotami w temperaturze 850 i 1080°C

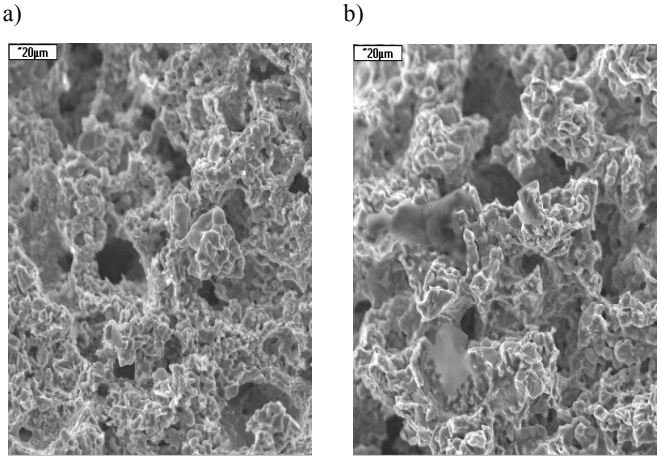
Fig. 3. Structure of FeAl samples after SHS and hot forging at 850°C and 1080°C with

different deformations



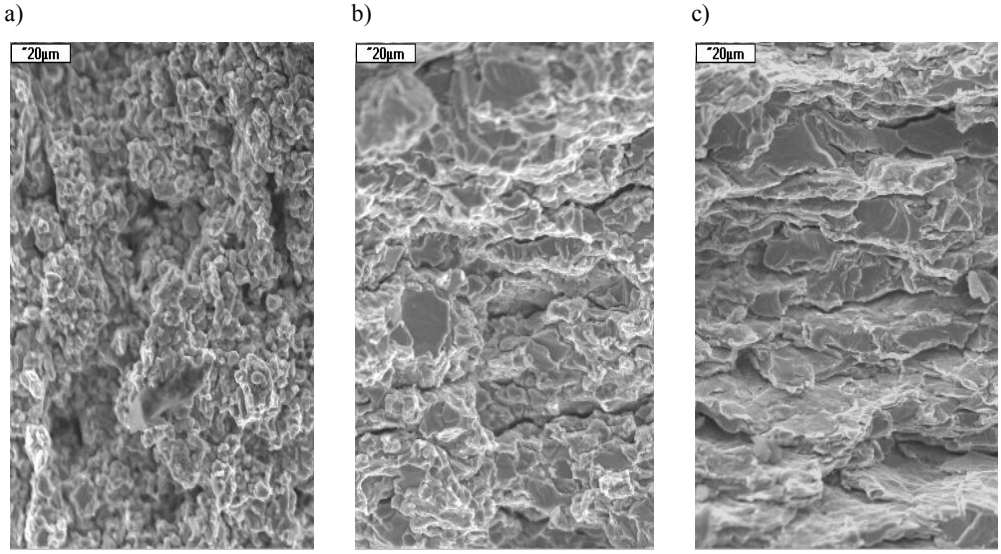
Rys. 4. Struktura materiału FeAl po odkształceniu ε = 57% w temperaturze 1080°C oraz wyżarzaniu w temperaturze 900°C w czasie 1 h i studzeniu z piecem do temperatury 720°C przez 2 h 10 min (atmosfera powietrza) i następnie chłodzeniu na powietrzu (a) i wynik analizy składu chemicznego (b)

Fig. 4. Structure of FeAl sample after hot forging at 1080°C, ε = 57%, followed by annealing at 900°C for 1 h, furnace cooling to 720°C for 2 h 10 min (in air) and air cooling: (a) concentration profiles of elements along the marked line (b)



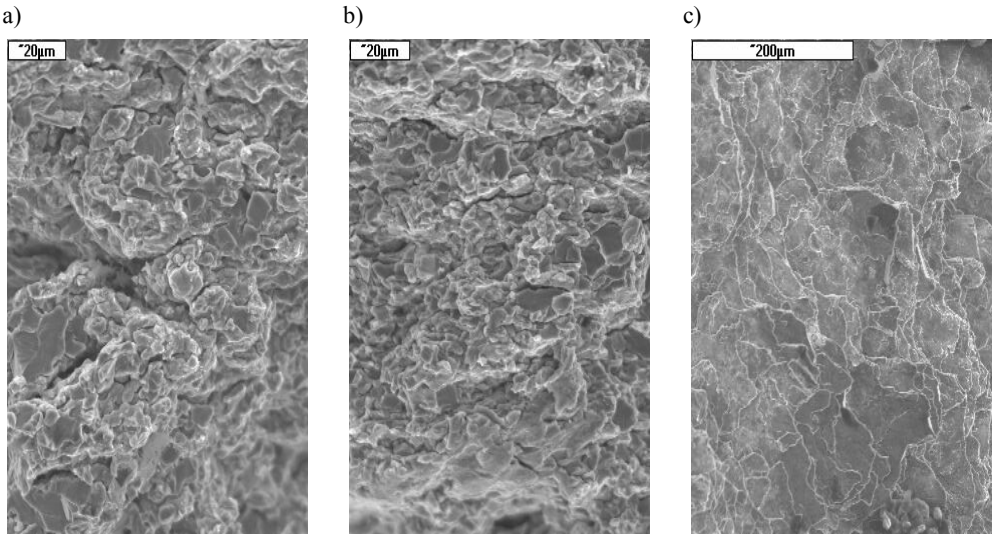
Rys. 5. Materiał po SHS: a) Fe_3Al, b) FeAl

Fig. 5. Fractures of SHS products: a) Fe_3Al, b) FeAl



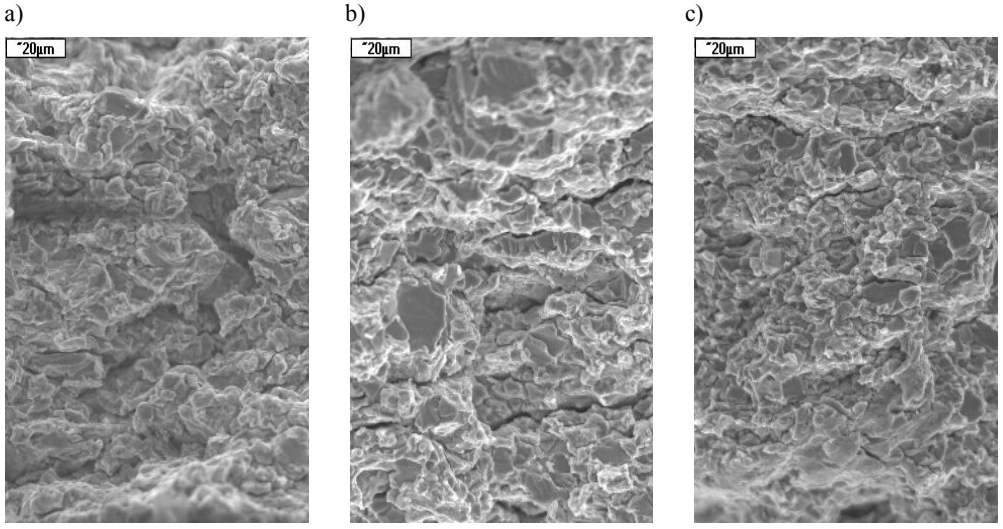
Rys. 6. Materiał Fe_3Al po SHS i odkształcaniu w temperaturze 960°C z gniotem: a) ε = 42%, b) ε = 56%, c) ε = 63%

Fig. 6. Fe_3Al obtained by SHS followed by hot forging at 960°C with different deformations: a) 42%, b) 56%, c) 63%



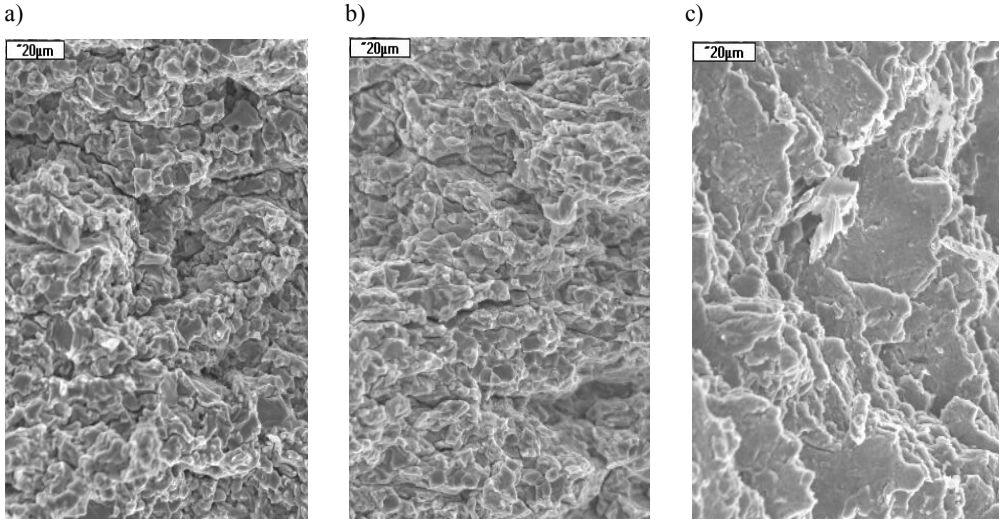
Rys. 7. Materiał Fe_3Al po SHS i odkształcaniu w temperaturze 1080°C z gniotem: a) ε = 46%, b) ε = 60%, c) ε = 78%

Fig. 7. Fe_3Al obtained by SHS followed by hot forging at 1080°C with different deformations (ε): a) 46%, b) 60%, c) 78%



Rys. 8. Materiał FeAl po SHS i odkształcaniu w temperaturze 850°C z gniotem: a) ε = 42%, b) ε = 56%, c) w temperaturze 1060°C z gniotem ε = 73%

Fig. 8. FeAl obtained by SHS followed by hot forging at 850°C with different deformations (ε): a) 42%, b) 56%, c) 73% (forged at 1060°C)



Rys. 9. Materiał FeAl po SHS i odkształcaniu w temperaturze 1080°C z gniotem: a) ε = 42%, b) ε = 60% oraz c) w temperaturze 1060°C z gniotem ε = 80%

Fig. 9. FeAl obtained by SHS followed by hot forging at 1080°C with different deformations (ε): a) 42%, b) 60%, c) 63% (forged at 1060°C)

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Otrzymane wyniki badań wskazują na potencjalne możliwości przetwórstwa półwyrobów z faz międzymetalicznych FeAl i Fe_3Al w procesach przeróbki plastycznej. Pokazały one istotny wpływ pomijanych do tej pory w badaniach parametrów przeróbki plastycznej na kształtowanie własności tych materiałów.

Przeprowadzone badania materiałów z faz międzymetalicznych Fe-Al wykazały, że:

- półwyroby otrzymane metodą SHS można formować z dużymi odkształceniami w zakresie temperatur od 850 do 1080^{o}C,
- w wyniku odkształcania następuje zagęszczenie materiału oraz zmiana własności mechanicznych, które związane są silnie z parametrami odkształcania, tj. gniotem i temperaturą odkształcenia. Materiały po odkształceniu wynoszącym około 80% w temperaturze 1060÷1080^{o}C mają dobrą plastyczność. Dla materiału FeAl strzałka całkowitego ugięcia przy zginaniu wynosi 1,15 do 1,78 mm, a dla materiału Fe_3Al - 1,11 mm,
- w odkształcanych materiałach wraz ze wzrostem odkształcenia tworzy się ukierunkowana struktura.

Praca została zrealizowana w ramach projektu nr 7 T08A 028 18, finansowanego przez KBN.

LITERATURA

[1] Godlewska E., Mania R., Szczepanik S., Selected Properties of Fe-Al Intermetallics Prepared by Various Processing Routes, Proc. Int. Conf. Enviromental Degradation of Engineering Materials, Gdańsk-Jurata 1999, 347-352.

[2] Szczepanik S., Godlewska E., Mania R., Influence of Hot Forming on the Properties of Fe-Al Intermetallics, Proc. of the 8th Inter. Conf. on Metal Forming - Metal Forming 2000, ed. Pietrzyk et al. Balkema, Rotterdam 2000, 477-484.

[3] Godlewska E., Mania R., Szczepanik S., Koziński S., Krawiarz J., Some Useful Properties of Fe-Al. Intermetallics Obtained by Self Propagating High Temperature Synthesis, Inżynieria Materiałowa 2000, 4, 23, 354-357.

[4] Barcik J., Cebulski J., Intermetallic Compound Based Fe-40% Al as Cast Alloy-Chemical Composition, Microstructure and Properties, Inżynieria Materiałowa 1998, 4, 105, 901-904.

[5] Czeppe T., Szczepanik S., The Influence of Hot Deformation on the Microstructures of Ni-Al and Ni-Al-Fe Alloys with Small Ti_2B Addition, J. Mat. Process. Tech. 1996, 60, 317-323.

[6] Oleszak D., Proszki kompozytowe FeAl-Al_2O_3 i NiAl-Al_2O_3 otrzymywane metodą mechanicznej syntezy, Kompozyty (Composites) 2001, 1, 1, 76-78.

Recenzent
Władysław Włosiński