

## Krzysztof Naplocha\*, Kazimierz Granat

Politechnika Wroclawska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Poland

\* Corresponding author. E-mail: krzysztof.naplocha@pwr.wroc.pl

Otrzymano (Received) 06.02.2009

# SYNTEZA SPALENIOWA ZWIĄZKÓW MIĘDZYMETALICZNYCH Al-Ti

Przedstawiono badania porowatych materiałów Al-Ti wytworzonych na drodze syntezy spalenkowej. Niektóre z wytworzonych struktur można nasycić ciekłym stopem aluminium, umacniając w ten sposób strefowo odlewy. Analizowano przebieg syntezy, sposób powstawania struktury, jej skład fazowy, stopień jednorodności oraz rodzaj porowatości. Przygotowywano cylindryczne wypraski z proszków Al oraz Ti w różnym stosunku stechiometrycznym. Syntezę prowadzono w specjalnie zbudowanym reaktorze mikrofalowym, umieszczając prasówkę w falowodzie w silnie skoncentrowanym polu. Zarejestrowane pirometrem temperatury pokazały, że przyspieszenie propagacji syntezy następowało w momencie tworzenia się związku  $Al_3Ti$ . Najwyższą temperaturę syntezy osiągały próbki zawierające 50+67% at. Al. Obserwacje mikroskopowe ujawniły zaokrąglone ziarna z rdzeniem z roztworu stałego Ti(Al). Zasadniczą część ziarna składała się ze związku  $AlTi_3$ , który przy brzegu przechodził w  $AlTi$ . Niemal we wszystkich rodzajach próbek, w szczególności z większym udziałem Al, budowa ziaren była podobna. Wokół nich formowały się otoczki ze związków  $AlTi$  i  $Al_2Ti$ . Skład chemiczny osnowy odpowiadał w przybliżeniu stosunkowi stechiometrycznemu wyjściowej mieszaniny proszków. Badania XRD potwierdziły wielofazową budowę otrzymanych struktur i niewielki wpływ ziarnistości proszku Ti. Część próbek charakteryzowała się regularną budową i otwartą porowatością. Materiały te zawierające 75, 67 i 55% at. Al zostały użyte do wytworzenia kompozytów na osnowie stopu aluminium.

Słowa kluczowe: synteza spalenkowa, Al-Ti, kształtka, kompozyt

## COMBUSTION SYNTHESIS OF Al-Ti INTERMETALLIC COMPOUNDS

Investigations of porous Al-Ti materials produced by combustion synthesis were presented. Some of produced structures can be infiltrated with liquid aluminum alloy reinforcing castings. Synthesis and structure formation route, phase composition, degree of homogeneity and porosity sort were analyzed. Cylindrical green compacts from Al and Ti powder in Al:Ti = 75:25, 70:30, 67:33, 60:40, 55:45, 50:50, 45:55, 28:72 stoichiometric ratio were prepared. Granularity of Al powder amounts -325, Ti powder -325 and -200. In order to prepare cylindrical specimens 23 mm in diameter and 4.5 mm high, the powder mixture was cold pressured at 484 MPa. Synthesis was conducted in special constructed microwave reactor with a quartz tube filled with argon atmosphere. Compact was ignited in waveguide under strongly focused field. Temperature were controlled using continuous regulated power supply with pyrometer Raytek, model Marathon MM. Diameter of the measuring spot was ca. 0.6 mm. The structures were examined with X-ray diffraction (XRD) and a scanning microscope JEOL JSM-5800LV with an attachment for chemical analysis EDS.

Recorded temperature shows that acceleration of synthesis propagation followed after  $Al_3Ti$  compound formation. Samples containing 45-55 at. % Al reached the highest synthesis temperature. During microscope investigation rounded grains with core from (Ti) solid solution were observed. These grains mainly contain  $AlTi_3$  compound, which pass into  $AlTi$  at the external edge. Almost for all kind of samples, especially with higher Al content, composition of grains was similar. Around them envelopes of  $AlTi$  and  $Al_2Ti$  were formed. Chemical composition of matrix was adequate to stoichiometric ratio of initial powder mixture. XRD investigation confirmed multiphase structure and little influence on it of Ti powder granularity. Part of samples with regular structure and open porosity, containing 75, 67 and 55 at. % Al were used for production of composites with aluminium alloy matrix. Porous materials (preform) were infiltrated under 40 MPa pressure to locally reinforce casting.

Keywords: combustion synthesis Al-Ti, perform, composite

## WPROWADZENIE

Związki międzymetaliczne z układu Al-Ti są najczęściej wykorzystywane w przemyśle lotniczym czy energetycznym do produkcji elementów narażonych na działanie gazów i wysokiej temperatury. Cechuje je mała gęstość, wysoka granica sprężystości i wytrzymałości w podwyższonych temperaturach, stabilność wymiarowa oraz poprzez wytworzenie warstwy pasywa-

cyjnej odporność na utlenianie i korozję. Niestety wykazują również dużą kruchość w temperaturze otoczenia [1]. Aby temu przeciwdziałać, przykładowo zmienia się na strukturę  $Al_3Ti$  z  $D0_{22}$  na mniej kruchą  $L1_2$  [2], wprowadza domieszki Cr, Mn, V do  $AlTi$  [3] lub spieka z cząstkami  $TiB_2$  [4]. Dobrze rozpoznaną techniką są wielowarstwowe laminaty spiekane lub walcowane

z warstwami międzymetalicznymi rozdzielonymi najczęściej metalicznym Ti [5-7]. Mają one blokować ewentualne mikropełnienia i nadawać materiałom pożądaną plastyczność. Podobną koncepcję przyjęto w prezentowanej pracy. Wytworzony międzymetaliczny szkielet zostanie nasycony pod ciśnieniem stopem aluminium i stanie się integralną częścią odlewu. Wytworzony w ten sposób kompozyt będzie lokalnie umacniał element w części najbardziej obciążonej.

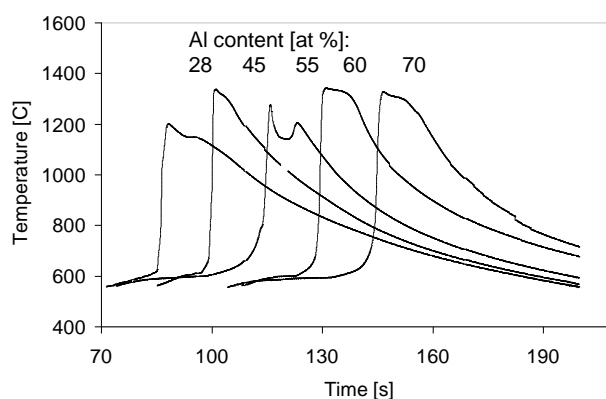
Wykonanie porowatego szkieletu, częściowej nazywanego kształtką, umożliwia syntezę spaleniową ze swoimi odmianami SHS (self-propagation high-temperature synthesis) i TE (thermal explosion). W tej pracy wykorzystano metodę zdefiniowaną w pracy [8] jako MACS (microwave activated combustion synthesis). W tym celu we współpracy z komercyjną firmą opracowano specjalny reaktor do syntezy i spiekania wysokotemperaturowego. Choć w materiały metaliczne promieniowanie wnika na kilka mikrometrów, to w zasadzie należy przyjąć, że odbijają one mikrofały, zakłócając przy tym pole. Zbudowany reaktor ma silnie skoncentrowaną wiązkę mikrofał o dobrze rozpoznanym natężeniu. Jeżeli materiał metaliczny będzie niejednorodny pod względem własności dielektrycznych, porowaty z nieregularną powierzchnią, możliwe będzie jego nagrzewanie. W badaniach do zainicjowania syntezy wykorzystywano plazmę, nadtapianie ostrych krawędzi cząstek oraz przede wszystkim podkładki SiC.

## MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Użyto proszków Al(99,9%, -325) oraz Ti(99,5, -200 i -325) dostarczonych przez firmę AlfaAesar. Przygotowano mieszaniny proszków w różnym stosunku stechiometrycznym Al:Ti (zawartość Al: 75,70,67,60,55, 50,45,28%, reszta Ti), od 75:25 do 28:72. Uwzględniając dwie ziarnistości proszku Ti, wytworzono kilkanaście serii próbek oznaczanych symbolem informującym o stosunku stechiometrycznym oraz wielkości cząstek Ti. Przykładowo próbka Al55Ti45\_74 zawiera 55% at. Al oraz 45% at. Ti o ziarnistości -200. Odmierzone porcje proszków prasowano jednoosiowo na zimno do postaci cylindrycznych tabletek o średnicy 23 mm i wysokości 4 mm. Syntezę spaleniową prowadzono w komorze mikrofałowej w atmosferze argonu. Dokładniejszy opis procesu przedstawiono w [9]. Pomiar temperatury wykonywano za pomocą pirometru Raytek, model Marathon MM, z płamką pomiarową 0,6 mm. Wykonano badania struktury na mikroskopie optycznym oraz skaningowym S-3400N firmy Hitachi, wyposażonym w mikroanalizator rentgenowski EDS (4nm, detektor BSE). Próbkę trawiono roztworem Kroll (0,5 ml HF, 1,5 ml HNO<sub>3</sub>, 98 ml H<sub>2</sub>O). Identyfikację fazową wykonano za pomocą proszkowego dyfraktometru rentgenowskiego Rigaku Ultima IV (lampa CuK<sub>α</sub>, 40 kV i 40 mA) oraz kart ICDD (2007). Wybrane próbki z właściwą porowatością otwartą nasycono stopem aluminium pod ciśnieniem 40 MPa w formie do prasowania w stanie ciekłym.

## OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Analiza przebiegu syntezy uwidacznia znaczne zróżnicowanie krzywych temperatur i ich charakterystycznych punktów wywołanych zmianą stechiometrii układu (rys. 1). Najwyższą temperaturę (1372°C) zarejestrowano przy badaniu materiałów Al45Ti55\_44 (45%Al i 55%Ti o ziarnistości -325), choć podobnie wysokie wartości uzyskiwano dla próbek zawierających od 50 do 70% Al. Największą dynamikę procesu zaraz po zainicjowaniu reakcji, określoną na podstawie analizy ATD, wykazywały materiały Al45Ti55. Przyspieszenie reakcji we wszystkich próbkach obserwowano w podobnej temperaturze 950÷1000°C. Może to wskazywać, że szybkość syntezy zwiększa się po zajściu przemiany ( $\alpha$ Ti)  $\rightarrow$  ( $\beta$ Ti).



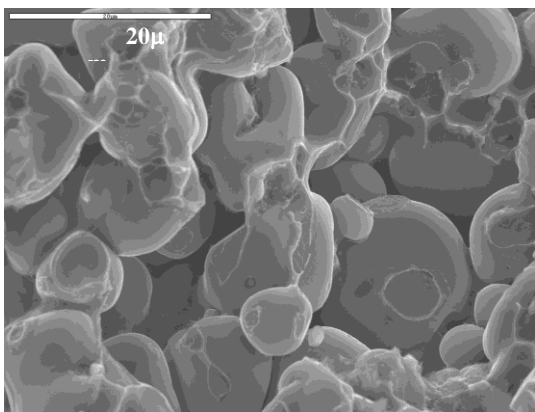
Rys. 1. Krzywe temperatur syntezy związków Al<sub>28</sub>Ti<sub>68</sub>, Al<sub>45</sub>Ti<sub>55</sub>, Al<sub>55</sub>Ti<sub>45</sub>, Al<sub>60</sub>Ti<sub>40</sub> i Al<sub>70</sub>Ti<sub>30</sub>, ziarnistość tytanu -325

Fig. 1. The synthesis temperature profile for Al<sub>28</sub>Ti<sub>68</sub>, Al<sub>45</sub>Ti<sub>55</sub>, Al<sub>55</sub>Ti<sub>45</sub>, Al<sub>60</sub>Ti<sub>40</sub> and Al<sub>70</sub>Ti<sub>30</sub> compounds

Przy analizowaniu krzywych uwzględniono wyniki badań EDS oraz XRD, które przedstawiono w dalszej części pracy. Pierwszy oczekiwany efekt związany z roztopieniem proszku Al występował tylko dla próbek zawierających większą ilość Al (60÷75%) i występował w temperaturze 615÷688°C. Synteza zaczynała gwałtownie przyspieszać po przekroczeniu punktu, w którym formował się związek Al<sub>3</sub>Ti. Potwierdzają to również inne prace [2, 10-12] prowadzone za pomocą różnicowego kalorymetru skaningowego DSC. Ogólnie przeważa opinia, że niezależnie od stechiometrii układu wyjściowego Al<sub>3</sub>Ti jest pierwszym związkiem, powstającym na styku reagujących metali. Charakterystyczne podwójne piki temperatur dla próbek Al<sub>50</sub>Ti<sub>50</sub> Al<sub>55</sub>Ti<sub>45</sub> można tłumaczyć opisaną w pracy [13] przemianą metastabilnego związku  $\beta_2$ -AlTi. Obserwowano tam wyraźny endotermiczny pik przy temperaturze 1270÷1320°C, kiedy związek ten przechodził w ( $\beta$ Ti). Niestety niektóre zarejestrowane wahania temperatury są trudne w interpretacji i wymagają dalszych badań.

Pierwszą istotną i pożądaną cechą budowy wytworzonych materiałów była porowatość otwarta, możliwie jednorodna bez konglomeratów czy warstwowej budo-

wy. Najlepszą pod tym względem strukturę posiadały próbki Al75Ti25\_44, które mogły być bez trudu nasycone, a ilość porowatości nieinfiltrowanych była stosunkowo mała. Użycie proszku Ti o większej ziarnistości (-200) do próbek o tym samym składzie chemicznym powodowało pojawienie się konglomeratów, choć nadal regularność i otwartość porów pozostawała niezmienną. Ich powierzchnia dzięki kulistym wydzieleniom  $Al_3Ti$  (rys. 2) była dobrze rozbudowana i nawet w przypadku słabej zwilżalności przez stop może dobrze związać się z osnową poprzez połączenie mechaniczne. Ze wszystkich wytworzonych i zbadanych struktur najbardziej regularną porowatość otwartą wykazują próbki Al55Ti45\_44, Al67Ti33\_44, Al75Ti25\_44, które z powodzeniem nasycono ciekłym stopem aluminium.



Rys. 2. Przełom kształtki z kulistymi wydzieleniami  $Al_3Ti$  nadającej się do nasycenia ciekłym stopem aluminium

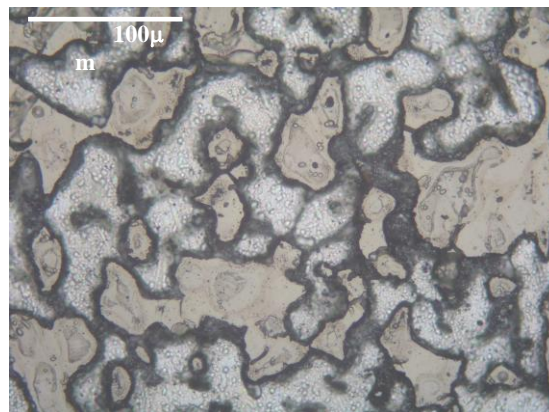
Fig. 2. Fracture of preform with rounded  $Al_3Ti$  particles, suitable for infiltration with liquid aluminium alloy

Analiza transformacji mikrostruktur wraz ze zmianą stosunku stechiometrycznego pokazała pewną ciągłość przemian i podobieństwo struktur kolejnych próbek. W badaniach zwracano szczególną uwagę na obszary, gdzie występowały pewne niedoskonałości struktury i pewnego rodzaju ślady po przeprowadzonej syntezie. Zaczynając od próbki o największej zawartości Al (rys. 3), można przy ziarnistości proszku Ti -200 zaobserwować ziarna - ślady po proszku Ti otoczone kilkoma warstwami. Podobną strukturę miały próbki Al70Ti30 z tym, że wydzielenia stawały się coraz mniejsze, a osnowa bardziej jednorodna.

Przy 67% Al trudniej było zaobserwować pozostałości po proszku Ti. Wydzielenia zanikały, choć nadal można było spotkać w ich środku jasne rdzenie. Osnowa stawała się coraz bardziej jednorodna i niestety mocno spękana (rys. 4). Kruchość ta była obecna również w próbkach Al60Ti40, po czym powoli zanikała i była sporadycznie obserwowana w próbkach zawierających 55% Al.

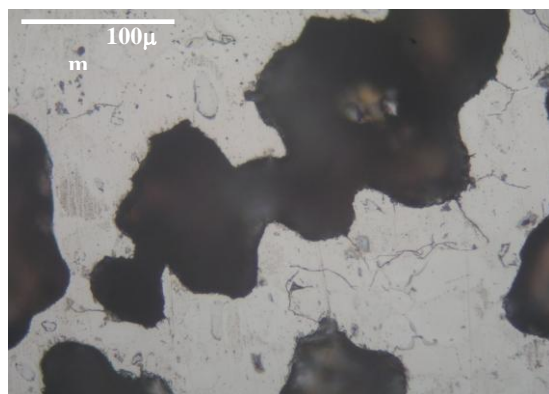
W próbkach Al55Ti45 pozostałości po proszku Ti w postaci ziaren łączyły i rozlewały się, zajmując coraz większą powierzchnię. Jeżeli w wyniku stapiania się tworzyły się lite obszary bez porowatości i dyfuzja

składników nie była utrudniona, to struktura stawała się niemal jednorodna. W takich litych obszarach porowatości były zamknięte i oczywiście niemożliwe było ich nasykanie. Nieregularną budową, zwykle z litą zewnętrzną skorupą, charakteryzowały się próbki Al50Ti50 (rys. 5). Występowały w niej ziarna z charakterystyczną lamelarną strukturą zbudowaną z  $AlTi$  i  $AlTi_3$ .



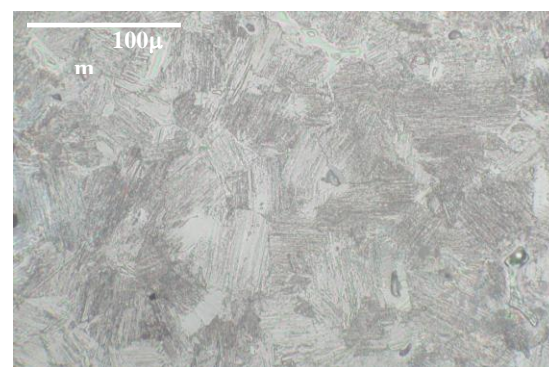
Rys. 3. Mikrostruktura próbki Al75Ti25\_74 nasyconej stopem aluminium - jasne obszary

Fig. 3. Optical micrograph of Al75Ti25\_74 sample infiltrated with aluminium alloy - light areas



Rys. 4. Mikrostruktura próbki Al67Ti33\_44, ciemne obszary - pory

Fig. 4. Optical micrograph of Al67Ti33\_44, dark areas are pores

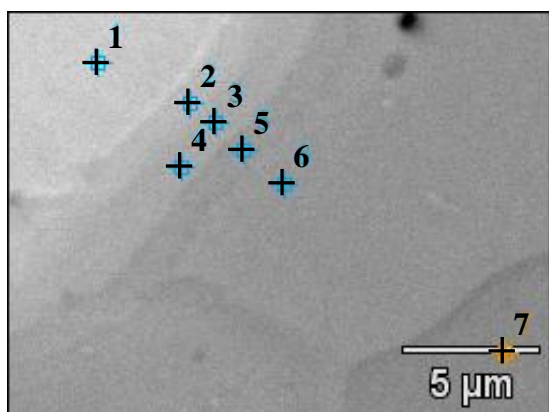


Rys. 5. Widok mikrostruktury próbki Al50Ti50\_44 z jej litej warstwy zewnętrznej. Lamelarne ziarna zbudowane z  $AlTi$  i  $AlTi_3$

Fig. 5. View of microstructure of Al50Ti50\_44 sample from its solid external layer. Lamellar grains formed from  $AlTi$  and  $AlTi_3$

W badaniach składu chemicznego zwrócono szczególną uwagę na pozostałości po proszku Ti w postaci ziaren i ich otoczki świadczące o przebiegu syntezy. W zależności od rodzaju próbki występowało kilka warstw, a największą ich ilość obserwowano w próbkach zawierających 70÷75% Al. Zarówno analiza punktowa, jak i liniowa ujawniły wielofazowy skład ziarna oraz 3 warstwy - obwódki wokół nich. Obszar pomiędzy nimi, będący pewnego rodzaju osnową, stanowił znaczącą większość. Na prezentowanych zdjęciach przedstawiono trochę nietypowe miejsca tak, aby ułatwić analizę rozwoju powstającej struktury.

Opierając się na pomiarach wykonanych na kilku ziarnach, można stwierdzić, że najczęściej ich rdzeń zbudowany jest z roztworu stałego Ti(Al). Wokół niego tworzy się ziarno  $AlTi_3$ , w którym, przesuwając się od rdzenia, maleje udział Ti (rys. 6). Zewnętrzna warstwa ziarna przechodzi w  $AlTi$ , który jest obecny w tym miejscu we wszystkich próbkach zawierających do 50% Al. Materiał osnowy składa się z większych jaśniejszych obszarów  $Al_2Ti$  oraz ciemniejszych bardziej oddalonych od ziaren związków  $Al_3Ti$ .



	1	2	3	4	5	6	7
	ziarno					osnowa	osnowa
Al %	38,38	50,34	56,49	57,8	62,62	66,52	70,94
Fazy	Ti+ $Ti_3Al$	$AlTi+$ $Ti_3Al$	$AlTi$		$AlTi+$ $Al_2Ti$	$Al_2Ti$	$Al_2Ti+$ $Al_3Ti$

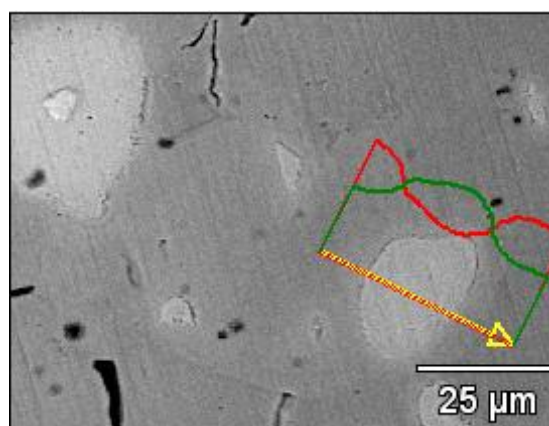
Rys. 6. Otoczki wokół ziarna oznaczonego jako 1 w próbce  $Al70Ti30_{44}$  z zaznaczonymi miejscami analizy punktowej EDS

Fig. 6. Envelopes around fibre (marked as 1) in  $Al70Ti30_{44}$  sample with points of EDS analysis

Kolejność występujących faz jest zgodna z obserwacjami w pracach [5, 6], kiedy badano kompozyty wielowarstwowe Al-Ti. Stosowano tam powolne wygrzewanie i stwierdzono, że pierwszym pojawiającym się związkiem był  $Al_3Ti$ . Potem z upływem czasu wytwarzała się wielowarstwowa strefa z następującą sekwencją związków:  $Ti(Al) \rightarrow Ti_3Al \rightarrow TiAl_2 \rightarrow TiAl_3$ . Biorąc pod uwagę najmniejszą energię swobodną [4, 14], preferowany byłby związek  $Al_2Ti$ . Z kolei uwzględniając kryterium modelu EHF [15], mówiącym również o doborze związku o najniższej temperaturze liquidus eutektyki, należy oczekiwać, że związek  $Al_3Ti$  będzie

pierwszą pojawiającą się fazą. Nie brak jednak opinii, że etapem pośrednim formowania się niektórych związków ( $TiAl_2$  i  $Ti_2Al_3$ ) jest  $AlTi$  [13, 14], który charakteryzuje się największą energią swobodną w podwyższonej temperaturze (powyżej  $\sim 500^\circ C$ ).

Wraz ze zmniejszeniem się zawartości Al zmienia się głównie otoczenie - osnowa materiału. Szare tło w próbkach  $Al60Ti40$  przedstawione na rysunku 7 składa się z  $Al_2Ti+AlTi$  (63% Al). Podobnie jak wcześniej na granicy ziarna występuje  $AlTi$ , chociaż wyraźnie zarysowuje się jego strzępiasta struktura. Skład ziarna nie ulega większej zmianie, zmniejsza się nieco udział Ti, ale nadal tworzy je  $AlTi$  i  $AlTi_3$ .



Rys. 7. Analiza liniowa EDS ziaren w próbce  $Al60Ti40_{44c}$ . Pomiedzy sąsiadującymi cząsteczkami proszku Ti występuje jego zwiększona koncentracja i tworzenie się związku  $AlTi$

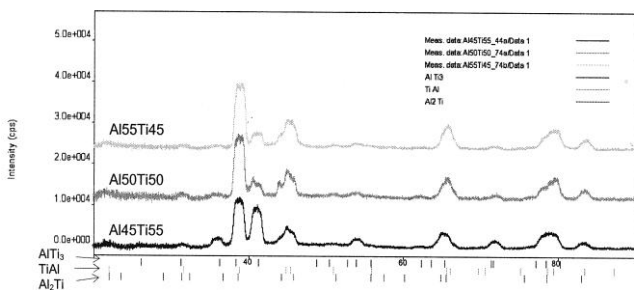
Fig. 7. Linear EDS analysis of grain in  $Al60Ti40_{44}$  sample. Between neighboring Ti particles occurring its high concentration and formation of  $AlTi$  compound

W próbkach  $Al50Ti50$  ziarna osadzone w osnowie  $AlTi$  (52% Al) składają się głównie z  $AlTi+AlTi_3$  w niektórych przypadkach z rdzeniem z ( $\alpha$  Ti). Można stwierdzić, że wyrównuje się udział pierwiastków i z czasem, jeżeli porowatości nie wydłużają drogi i nie utrudniają dyfuzji pierwiastków, powstaje regularna budowa.

Badania składu fazowego za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) pokazały, że zastosowane dwie różne ziarnistości proszku Ti (-200, -325) w niewielkim stopniu wpływają na skład próbek. Obserwowano różnice w intensywności pików  $AlTi_3$  lub wykrywano obecność Al w próbkach  $Al75Ti25_{44}$ . Zasadnicze zmiany powodowała zmiana stosunku stechiometrycznego wyjściowej mieszaniny proszków. Analiza dyfraktogramów próbek zawierających od 45 do 55% (rys. 8) Al pokazała przede wszystkim wyraźnie większą zawartość  $AlTi_3$  w próbce  $Al45Ti55$ . Z kolei ze wzrostem zawartości Al w pozostałych próbkach zwiększał się udział  $AlTi$ .

Dyfraktogramy kolejnej serii próbek w zakresach wyższych zawartości Al (60÷75%) pokazały większe zróżnicowanie składu fazowego. Wraz ze zmniejszaniem się udziału Al zanikał związek  $Al_3Ti$ , choć ze względu na nakładanie się pików nie jest wykluczona

jego obecność nawet w próbce Al60Ti40. Równocześnie zwiększał się udział AlTi i AlTi<sub>3</sub>, co miało swoją kontynuację we wcześniej przedstawionej serii próbek. Należy zaznaczyć, że w badaniach XRD wykrywano również w pojedynczych próbkach czysty Ti lub inne związki. Jednak przedstawione dyfraktogramy wydają się być najbardziej reprezentacyjne.



Rys. 8. Dyfraktogramy próbek zawierających od 45 do 55% at. Al

Fig. 8. X-ray diffraction patterns of the samples containing Al from 45 to 55 at. %

## PODSUMOWANIE

Nagrzewanie mikrofalowe pozwala zainicjować wysokotemperaturową syntezę związków międzymetalicznych układu Al-Ti. Część wytworzonych materiałów charakteryzuje się porowatością otwartą i może być poprzez prasowanie w stanie ciekłym nasycana ciekłym stopem aluminium. Przygotowano serie próbek z proszków Al i Ti w różnym stosunku stechiometrycznym Al:Ti, od 75:25 do 28:72 oraz z dwóch ziarnistości proszku Ti (-200, -325). Analiza wyników badań prowadzi do następujących wniosków:

- Obserwowane na krzywych temperatur chwilowe efekty cieplne świadczą, że synteza rozpoczynała się od powstania związku Al<sub>3</sub>Ti. Najwyższą temperaturę reakcji osiągały próbki zawierające około 50% Al. Zmiana ziarnistości proszku Ti nieznacznie wpływa na przebieg reakcji.
- Wymaganą do infiltracji porowatość otwartą posiadały próbki zawierające 75, 67 i 55% Al.
- W strukturze materiałów obserwowano częściowo przereagowane cząsteczki proszku Ti, które składały się głównie z AlTi<sub>3</sub> oraz AlTi. Można mówić o dwuskładnikowej budowie z osnową i ziarnami otoczonymi warstwami ze związków międzymetalicznych AlTi i Al<sub>2</sub>Ti. Osnowę tworzył związek odpowiadający stosunkowi stechiometrycznemu mieszaniny wyjściowej.
- Ze wzrostem zawartości Al wyrównywał się udział Ti w ziarnach i w osnowie. Próbki zawierające 50% Ti i więcej charakteryzowały się stosunkowo jednorodną budową.
- Badania XRD potwierdziły wielofazowy skład materiałów z bardzo niewielkimi różnicami pomiędzy próbkami wytworzonymi z proszków Ti o różnej ziarnistości.

## Podziękowania

Praca realizowana w ramach projektu badawczego N508 054 31/2810 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## LITERATURA

- [1] Samsel K., Garbacz H., Kurzydłowski K.J., Kulczyk M., Zastosowanie wyciskania hydrostatycznego do zagęszczania kompozytów na osnowie fazy międzymetalicznej Ti<sub>3</sub>Al, *Kompozyty (Composites)* 2007, 7, 3, 130-134.
- [2] Zhang F., Lu L., Lai M.O., Study of thermal stability of mechanically alloyed Ti-75% Al powders, *Journal of Alloys and Compounds* 2000, 297, Issues 1-2, 211-218.
- [3] Djanarthany S., Viala J.-C., Bouix J., An overview of monolithic titanium aluminides based on Ti<sub>3</sub>Al and TiAl, *Materials Chemistry and Physics* 2001, 72, Issue 3, 301-319.
- [4] Kostecki M., Olszyna A., Modyfikacja właściwości mechanicznych faz międzymetalicznych z układu Ti-Al cząstkami TiB<sub>2</sub>, *Kompozyty (Composites)* 2006, 6, 3.
- [5] Peng L.M., Wang J.H., Li H., Zhao J.H., He L.H., Synthesis and microstructural characterization of Ti-Al<sub>3</sub>Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites, *Scripta Materialia* 2005, 52, 243-248.
- [6] Luo J.-G., Acoff V.L., Using cold roll bonding and annealing to process Ti/Al multi-layered composites from elemental foils, *Materials Science and Engineering A* 2004, 379, 164-172.
- [7] Jinkeun Oh, Sung Gyu Pyo, Sunghak Lee, Nack J. Kim, Fabrication of multilayered titanium aluminide sheets by self-propagating high-temperature synthesis reaction using hot rolling and heat treatment, *Journal of Materials Science* 2003, 38, 3647-3651.
- [8] Jokisaari J.R., Bhaduri S.B., Microwave activated combustion synthesis of titanium aluminides, *Materials Science & Engineering A* 2005, 394, 385-392.
- [9] Naplocha K., Granat K., Wysokotemperaturowa synteza kształtek Al-Cr w polu mikrofalowym, *Kompozyty (Composites)* 2008, 8, 3236-241.
- [10] Tao Wang, Yu-xiang Lu, Mei-li Zhu, Jun-shan Zhang, Identification of the comprehensive kinetics of thermal explosion synthesis Ti+3Al->TiAl<sub>3</sub> using non-isothermal differential scanning calorimetry, *Materials Letters* 2002, 54, 284-290.
- [11] Novoselova T., Celotto S., Morgan R., Fox P., O'Neill W., Formation of TiAl intermetallics by heat treatment of cold-sprayed precursor deposits, *Journal of Alloys and Compounds* 2007, 436, 1-2, 69-77.
- [12] Shoshin Y.L., Trunov M.A., Zhu X., Schoenitz M., Dreizin E.L., Ignition of aluminum-rich Al-Ti mechanical alloys in air, *Combustion and Flame* 2006, 144, 688-697.
- [13] Ohnuma I., Fujita Y., Mitsui H., Ishikawa K., Kainuma R., Ishida K., Phase equilibria in the Ti-Al binary system, *Acta Materialia* 2000, 48, 12, 3113-3123.
- [14] Sujata M., Bhargava S., Sangal S., On the formation of Ti-Al<sub>3</sub> during reaction between solid Ti and liquid Al, *Journal of Materials Science Letters* 1997, 16, 1175-1178.
- [15] Theron C.C., Pretorius R., Ndwandwe O.M., Lombaard J.C., First phase formation at interfaces: Comparison between Walsler-Bené and effective heat of formation model, *Materials Chemistry and Physics* 1996, 46, Issue 2-3, 238-247.