

Anna Dolata-Grosz<sup>1</sup>

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

Bolesław Formanek<sup>2</sup>

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Nauki o Materiałach, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

Józef Śleżiona<sup>3</sup>

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

## OTRZYMYWANIE AMC<sub>s</sub> W POŁĄCZONYCH PROCESACH ODLEWANIA I METALURGII PROSZKÓW

Przedstawiono koncepcję materiałowo-technologiczną otrzymywania i strukturę wybranych wielofazowych kompozytów aluminiowych wytworzonych w połączonych procesach odlewania i metalurgii proszków. Strukturę stopów aluminium modyfikowano mieszaninami proszków kompozytowych, które w reakcji z aluminium umacniały osnowę fazami międzymetalicznymi i ceramicznymi. Jako nośnik faz zbrojących wykorzystano reaktywne proszki kompozytowe uzyskane w procesie samorozwijającej się syntezy wysokotemperaturowej (SHS). Morfologię i skład fazowy stosowanych proszków pokazano na rysunkach 1-4. Stosując metodę odlewniczą (mechanicznego mieszania), wytworzono kompozyty z heterofazowym umocnieniem w złożonych, reaktywnych układach: Al/FeAl-TiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/FeAl<sub>3</sub>-TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC oraz Al/Fe(Cu)-TiC. Strukturę kompozytów scharakteryzowano metodami mikroskopii świetlnej i skaningowej, a skład fazowy i chemiczny umocnienia określono metodami dyfrakcji oraz spektroskopii rentgenowskiej. Otrzymane wyniki badań przedstawiono na rysunkach 5-8. Uzyskane odlewy charakteryzowały się złożoną strukturą faz o różnej morfologii i składzie chemicznym. Przeprowadzone badania wykazały, że połączenie procesów odlewania i wprowadzenia kompozytowego proszku o zadanym składzie chemicznym jest efektywnym procesem wytwarzania kompozytów hybrydowych o zadanym wielofazowym umocnieniu i dyspersyjnej strukturze.

Słowa kluczowe: kompozyty odlewane, proszki kompozytowe, kompozyty *in situ*, stopy aluminium

## OBTAINING OF AMC<sub>s</sub> IN COMBINED CASTING AND POWDER METALLURGY PROCESSES

Aluminium matrix composites (AMCs) have found applications in the aerospace, military, and especially in the automotive industries. The literature review showed that the most of studies were concentrated on an aluminium matrix composites with SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hard particles reinforcement. During recent years, the articles appeared concerning capability fabricate and employment of other, dispersion reinforcing particles like: TiC, ZrC, B<sub>4</sub>C, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> or TiB<sub>2</sub> and intermetallic phases. The basic technologies used for manufacturing of these *in situ* composites are powder metallurgy methods (P/M) and casting techniques. These composites are characterized by high thermodynamic stability which counteracts the chemical reactions at the matrix/reinforcing particle border, and reduces the structure degradation during work at elevated temperatures. This paper presents the material and technological concepts related to obtaining selected multiphase aluminium composites produced in combined casting and powder metallurgy processes and their structures. The structure of aluminium alloys was modified with composite powder mixtures which in a reaction with aluminium reinforced the matrix with intermetallic and ceramic phases. As a carrier of reinforcing phases, reactive composite powders were used, obtained in a self-propagating high-temperature synthesis (SHS). The morphology and phase composition of the powders applied are shown in Figures 1-4. By applying a casting method (mechanical stirring), composites with heterophase reinforcement were fabricated, in complex reactive systems: Al/FeAl-TiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/FeAl<sub>3</sub>-TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC and Al/Fe(Cu)-TiC. The structure of the composites was characterized by means of light and scanning microscopy methods, and the phase and chemical compositions of the reinforcement were identified by diffraction and X-ray spectroscopy methods. The examination results are presented in Figures 5-8. The casts obtained were characterized by complex phase structures of different morphologies and chemical compositions. The research carried out has shown that a combination of casting and introducing a composite powder of a defined chemical composition is an effective process which enables the production of hybrid composites of defined multiphase reinforcement and a dispersion structure.

Keywords: cast composites, composite powders, *in situ* composites, aluminium alloys

## WPROWADZENIE

Rosnące wymagania przemysłu, szczególnie motoryzacyjnego, maszynowego i lotniczego, wymuszają stosowanie materiałów o coraz to wyższych wskaźnikach wytrzymałościowych, mechanicznych, trybologicznych, a także cieplnych przy zachowaniu stabilności wymia-

rów i stosunkowo niskiej masy właściwej wyrobów,

głównie na elementy części maszyn i silników spalinyowych. Wzrost powyższych parametrów, w odlewach kompozytowych na osnowie aluminium i jego stopów, jest wprost proporcjonalny do rosnącego

<sup>1,2</sup> dr inż., <sup>3</sup> prof. dr hab inż.

udziału objętościowego cząstek zbrojących i odwrotnie proporcjonalny do ich rozmiaru [1-3]. Z kolei wraz ze wzrostem udziału objętościowego zbrojenia - powyżej 15÷20% - wzrasta znacznie lepkość zawiesiny kompozytowej. Powoduje to obniżenie jej właściwości odlewniczych, przede wszystkim lejności, a w konsekwencji uniemożliwia odlanie kompozytu do formy. Ponadto wprowadzenie cząstek dyspersyjnych o wielkościach poniżej 10 µm lub nanometrycznych nie jest możliwe do zrealizowania z punktu widzenia klasycznej metody zawieszinowej [1].

Z analizy danych literaturowych i stanu wiedzy w zakresie wytwarzania odlewanych kompozytów z osnową aluminiową wynika, że:

1. Opracowane i wdrożone zostały kompozytowe odlewy z umocnieniem w postaci cząstek SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o zróżnicowanym składzie ziarnowym [1-3]. Odlewane kompozyty otrzymywane były z wykorzystaniem znanych metod odlewania grawitacyjnego, z mieszaniem kąpieli aluminiowej (*stir casting*) i prasowania ciekłego metalu (*squeeze casting*) [1-5]. Potwierdzone i określone zostały wysokie właściwości trybologiczne omawianych kompozytów zarówno w testach zużycia ściernego, abrazyjnego, jak i erozyjnego [6, 7]. Ich właściwości fizykochemiczne zostały wykorzystane w określonych węzłach tarcia i skojarzeniach ciernych [6]. Do wytworzenia kompozytów tzw. *ex-situ* zostały dobrane urządzenia, oprzyrządowanie i sposoby preparacji powierzchni zbrojenia dla poprawy ich zwilżalności przez ciekłe stopy aluminium [1-5, 8].
2. Kompozyty *in situ* wytwarzane są przez wprowadzenie do kąpieli stopu aluminium cząstek o zróżnicowanym składzie chemicznym i fazowym, np.: TiC, TiB<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>C, TiO<sub>2</sub>, TiAl, Ni<sub>3</sub>Al [9-12]. Zaletą procesu jest możliwość wytwarzania kompozytów charakteryzujących się wielofazowym umocnieniem o zróżnicowanej dyspersji. Problemem technologicznym jest otrzymywanie kompozytów odlewanych, zawierających nanostrukturalne, wielofazowe zbrojenie.

Koncepcja materiałowo-technologiczna przyjęta przez autorów artykułu, polegająca na połączeniu metody odlewniczej i metalurgii proszków, stanowi rozwiązanie dla wymienionych przeszkód i ograniczeń (udział objętościowy i wielkość cząstek) w zastosowaniu znanych i ekonomicznych metod zawieszinowych, do wytwarzania nowoczesnych, heterofazowych materiałów kompozytowych z dyspersyjnym umocnieniem [13-20]. Rozwiązania te dotyczą zarówno poszczególnych etapów technologicznych, jak i strukturalnych, dając możliwość uzyskania korzystnych właściwości użytkowych wytwarzanych kompozytów [19, 21].

## CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem zrealizowanych badań było określenie parametrów technologicznych wytwarzania oraz struktury heterofazowych aluminiowych odlewów kompozytowych zawierających dyspersyjne umocnienie w postaci faz międzymetalicznych i ceramicznych w połączonych procesach odlewania i metalurgii proszków.

Zakres badań obejmował:

- określenie struktury i składu fazowego stosowanych proszków kompozytowych,
- wytworzenie heterofazowych odlewów kompozytowych na osnowie stopów aluminium umacnianych fazami międzymetalicznymi i ceramicznymi,
- określenie struktury i składu fazowego kompozytów wytworzonych w połączonych procesach odlewania i metalurgii proszków.

Ciekłą osnowę stanowiły stopy aluminium z magnezem (AlMg2, AlMg10), do której wprowadzono kompozytowe proszki o granulacji 20÷45 µm, zawierające fazy węglików chromu oraz tytanu z osnową nichromową lub aluminidki żelaza i tytanu.

Założono, że cykl zaplanowanych badań powinien dostarczyć informacji o zmianach zachodzących w strukturze i składzie fazowym stopów aluminium w reakcji z proszkami kompozytowymi, wytworzonymi w procesie samorozwijającej się syntezy wysokotemperaturowej.

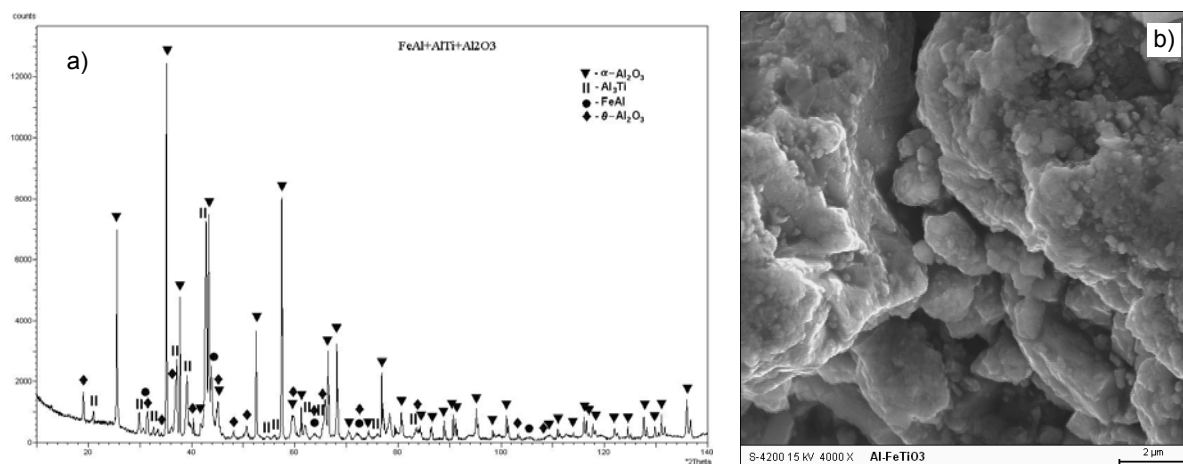
## STOSOWANE PROSZKI KOMPOZYTOWE I METODYKA BADAŃ

Do modyfikacji struktury stopów aluminium zastosowano reaktywne proszki kompozytowe, zawierające fazy międzymetaliczne z układów AlFe, AlTi, a także cząstki ceramiczne: tlenek aluminium oraz węgliki tytanu i chromu. Proszki kompozytowe otrzymano w procesie samorozwijającej się syntezy wysokotemperaturowej (SHS) [22, 23]. Skład fazowy oraz morfologię proszków stosowanych jako nośnik umocnienia osnowy pokazano na rysunkach 1-4.

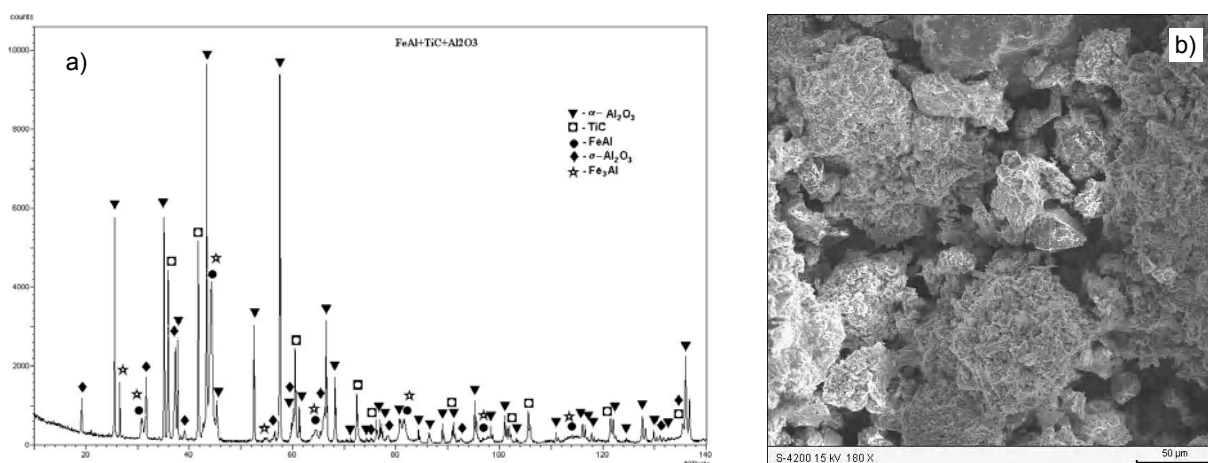
Proszki kompozytowe, o znanej morfologii i składzie fazowym, wprowadzono do mieszanego mechanicznie ciekłego aluminium w zakresie temperatur 720÷740°C [15-18, 20]. Uzyskaną zawieszinę kompozytową mieszano w czasie 10 minut i odlewano do formy grafitowej. W ten sposób wytworzono odlewy, a następnie pobrano materiał do badań strukturalnych. Sposób wytwarzania heterofazowych zawieszin kompozytowych przedstawiono m.in. w publikacjach [14-20].

Strukturę proszków oraz odlewów kompozytowych obserwowano na zglądach metalograficznych na mikroskopie optycznym Reichert MF2. Wybrane zglądy analizowano na mikroskopie skaningowym Hitachi

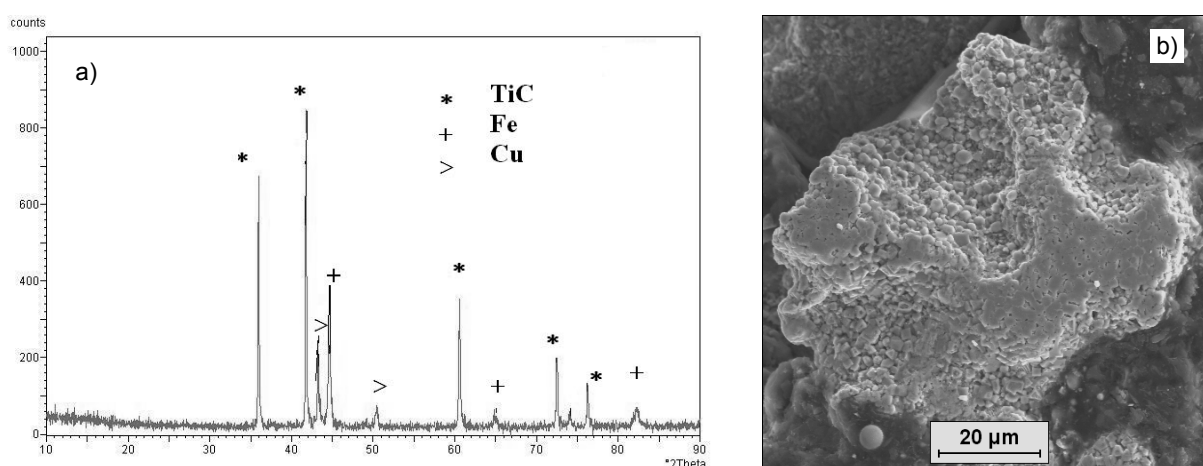
z wyposażeniem EDX w systemie Voyager firmy



Rys. 1. Dyfraktogram (a) i morfologia (b) proszku kompozytowego FeAl-TiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stosowanego do modyfikacji osnowy, SEM  
 Fig. 1. The diffraction pattern (a) and morphology (b) FeAl-TiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> of composite powder used for the matrix modification, SEM



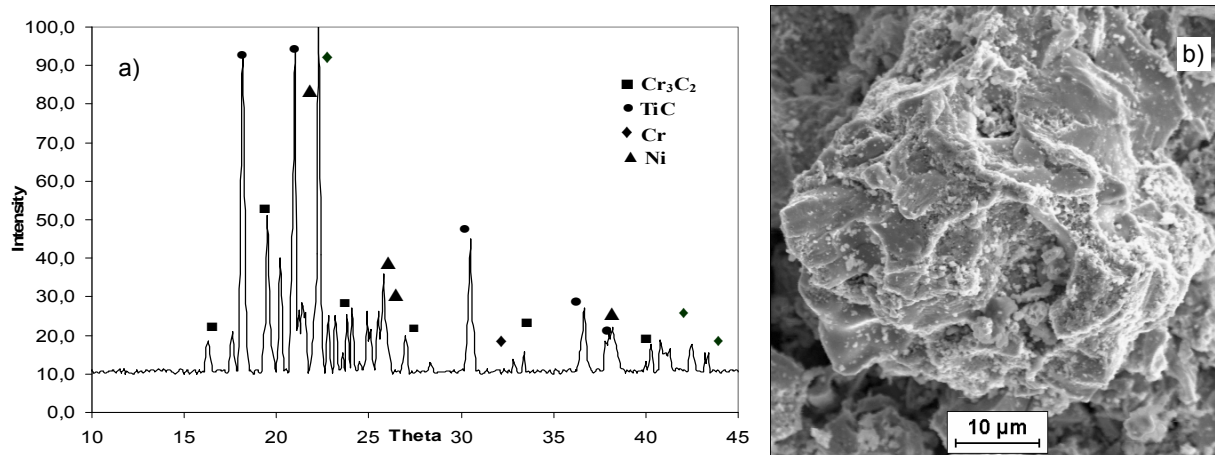
Rys. 2. Dyfraktogram (a) i morfologia (b) proszku kompozytowego FeAl<sub>3</sub>-TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stosowanego do modyfikacji osnowy, SEM  
 Fig. 2. The diffraction pattern (a) and morphology (b) of FeAl<sub>3</sub>-TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite powder used for the matrix modification, SEM



Rys. 3. Dyfraktogram (a) i morfologia (b) proszku kompozytowego Fe(Cu)-TiC stosowanego do modyfikacji osnowy, SEM  
 Fig. 3. The diffraction pattern (a) and morphology (b) of Fe(Cu)-TiC composite powder used for the matrix modification, SEM

Norton. Ilościową i jakościową analizę fazową wykonano metodą dyfrakcji promieni rentgenowskich na polikryształach. Badania wykonano na dyfraktometrze

JDX-7S produkcji japońskiej firmy JEOL, posiadającym pionowy układ ogniskowania. Źródłem promieniowania była lampa z anodą miedzią, zasilana stałym napię-

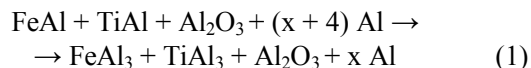


Rys. 4. Dyfraktogram (a) i morfologia (b) proszku kompozytowego NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC stosowanego do modyfikacji osnowy, SEM  
 Fig. 4. The diffraction pattern (a) and morphology (b) of NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC composite powder used for the matrix modification, SEM

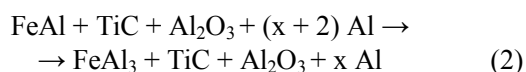
ciem 40 kV przy prądzie 20 mA. Monochromatyzacji wiązki dokonano na monochromatorze grafitowym. Zakres oraz stałą czasową integratora dobrano tak, aby uzyskać maksymalne wyodrębnienie linii dyfrakcyjnych z tła. Identyfikację fazową wykonano przy wspomaganium programem komputerowym PCSIWIN, wykorzystującym bazę danych w postaci kartoteki JCPDS-International Centre for Diffraction Data 2000.

## ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Dyspersyjną, wielofazową strukturę i skład fazowy wybranych aluminiowych odlewów kompozytowych otrzymanych w połączonych procesach odlewania i metalurgii proszków przedstawiono na rysunkach 5-8. Zgodnie z założeniami oraz na podstawie uprzednio wykonanej analizy termicznej, a także termicznej analizy różnicowej umocnienie osnowy AlMg<sub>2</sub>, dla której zastosowano proszki kompozytowe zawierające aluminidki żelaza, tytanu oraz cząstki tlenku aluminium można zapisać następującą reakcją [16]:



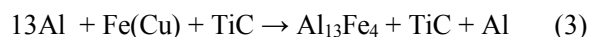
Z kolei dla kompozytów wytworzonych poprzez wprowadzenie syntezowanego proszku z fazami z układu AlFe oraz cząstkami ceramicznymi w postaci węgliku tytanu i tlenku aluminium reakcję powstawania faz umacniających można zapisać jako



Uzyskane odlewy charakteryzowały się dyspersyjną strukturą o założonym składzie chemicznym i fazowym. Na podstawie przeprowadzonych badań strukturalnych (rys. 5) oraz analizy rentgenowskiej (rys. 5a, c) potwier-

dowano występowanie umocnienia osnowy aluminiowej fazami międzymetalicznymi i ceramicznymi, które były w korelacji z granulacją i składem fazowym stosowanych proszków kompozytowych.

W badaniach własnych do modyfikacji stopu aluminium z 2% zawartością magnezu zastosowano również proszek kompozytowy zawierający obok cząstek węgliku tytanu także żelazo i niewielkie ilości miedzi. Reakcję w omawianym układzie komponentów można zapisać jako

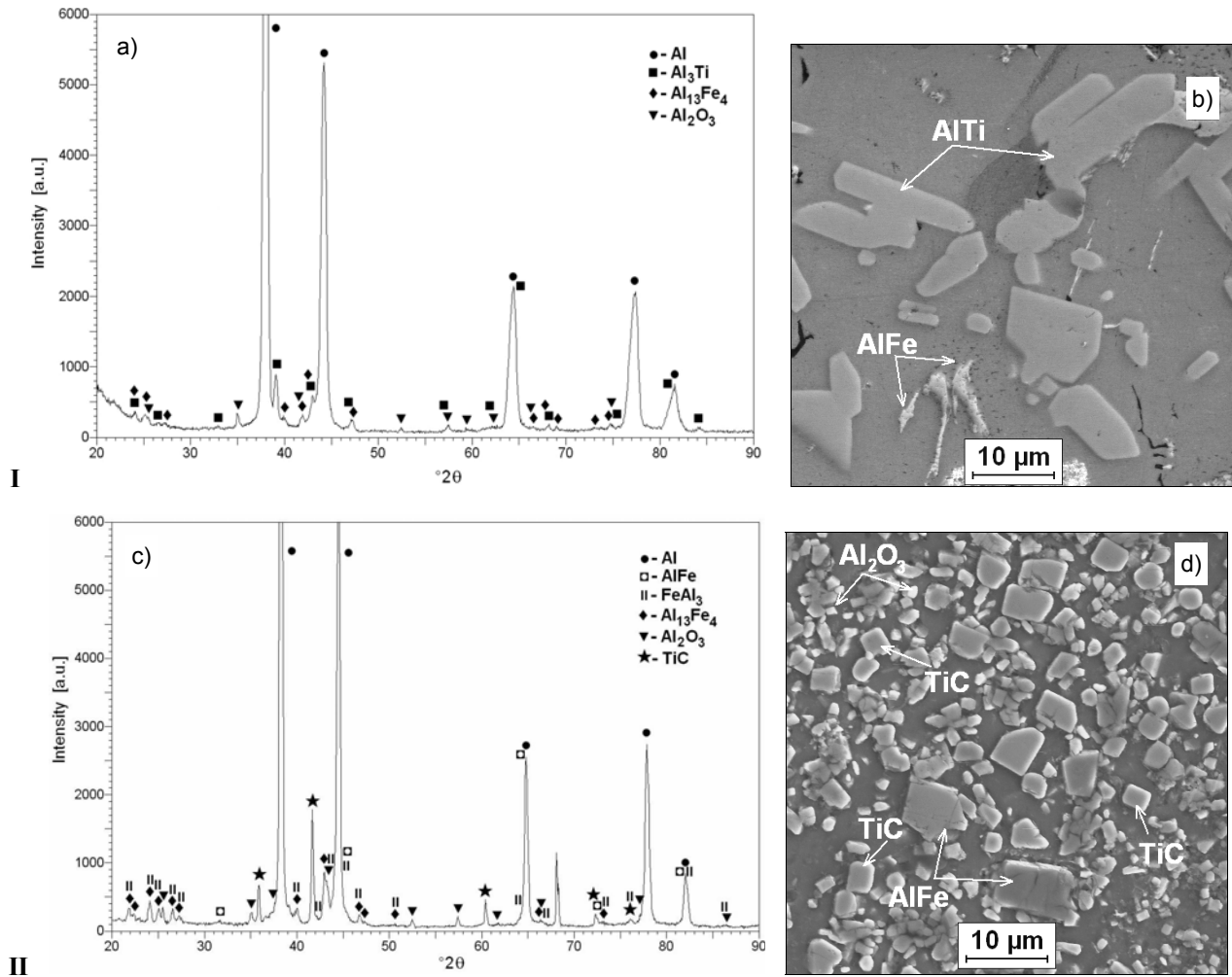


Na podstawie analizy rentgenowskiej obecności fazy Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub> i intensywności kolejnych pików dla układu Al/Fe(Cu)-TiC, przedstawionej na rysunku 6, nie stwierdzono zmian struktury w kolejnych procesach przetapiania. Zaobserwowano znaczne zróżnicowanie morfologii fazy zidentyfikowanej jako AlFe. Wewnątrz dużych wydzieleni fazy AlFe stwierdzono występowanie dyspersyjnych cząstek węgliku tytanu, co powiązane jest z metodą wytwarzania proszków i krystalizacją tej fazy podczas procesu wytwarzania kompozytu. Rozmiar drobnych cząstek, twardej fazy węglkowej (TiC) często nie przekraczał wielkości 1 µm (rys. 7) [20].

Realizując badania, określające wpływ rodzaju osnowy i zbrojenia na strukturę i skład fazowy umocnienia, zaobserwowano i potwierdzono, że wprowadzenie do stopu AlMg<sub>10</sub> proszku NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>3</sub>-TiC zmienia skład fazowy umocnienia z powstaniem faz międzymetalicznych z aluminium oraz węglikiem aluminium Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> [15, 18]. Strukturę i skład fazowy stopu AlMg<sub>10</sub> z 10% udziałem wagowym umocnienia po trzecim procesie wytwarzania przedstawiono na rysunku 8.

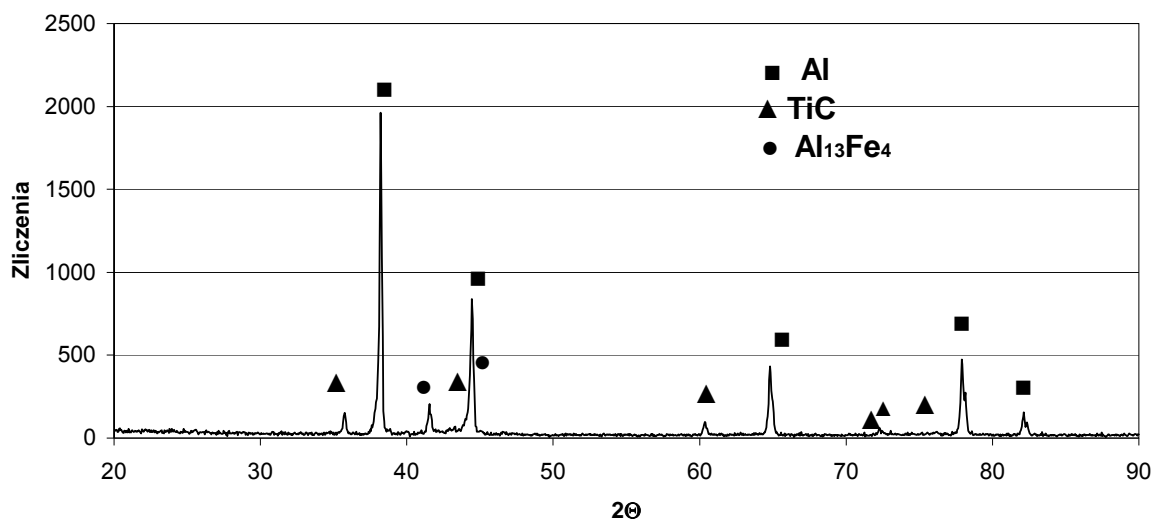
Analizując strukturę i skład fazowy kompozytu po kolejnych procesach obniżających zawartość umocnienia od 30 do 10% wag, zaobserwowano, że na dyfraktogramach zanikają piki faz węglków chromu i tytanu

(rys. 8a). Prawdopodobną reakcję proszku kompozytowego, zawierającego węgliki chromu i tytanu w osno-



Rys. 5. Skład fazowy (a, c) i struktura (b, d) kompozytowych odlewów otrzymanych w połączonych procesach odlewania i metalurgii proszków: I) Al/FeAl-TiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, II) Al/FeAl<sub>3</sub>-TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

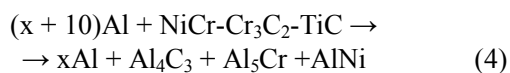
Fig. 5. Phase composition (a, c) and structure (b, d) of composite casts obtained in combined casting and powder metallurgy process: I) Al/FeAl-TiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, II) Al/FeAl<sub>3</sub>-TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Rys. 6. Skład fazowy kompozytowych odlewów Al/Fe(Cu)-TiC otrzymanych w połączonych procesach odlewania i metalurgii proszków

Fig. 6. Phase composition of Al/Fe(Cu)-TiC composite casts obtained in combined casting and powder metallurgy process

wie NiCr ze stopem AlMg10 można zapisać wzorem (4), w którym produkty reakcji wynikają bezpośrednio z analizy składu fazowego, jaką wykonano na podstawie dyfraktogramu przedstawionego na rysunku 8



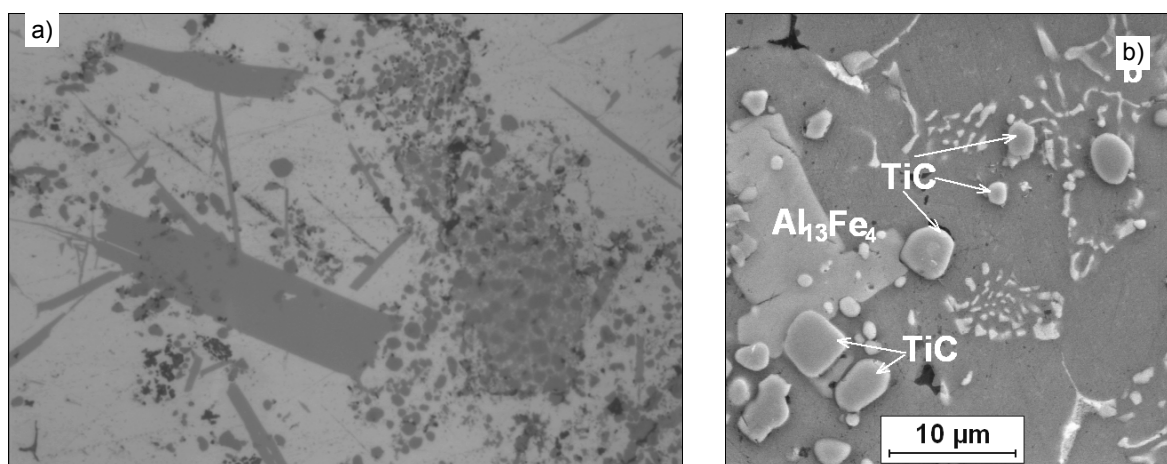
Analiza rentgenowska składu fazowego odlewów, której szczegółowe wyniki przedstawiono w [17, 18], wskazuje na małą odporność korozyjną węgla tytanu w stopie AlMg10 i jego przemianę do fazy AlTi. Powstałe w procesie rozpuszczania wydzielania, większe od wielkości ziaren węgla chromu w proszku kompozytowym, są fazami typu  $Al_5Cr$  i  $Al_2Cr$  (rys. 8b). Z kolei wiążąca osnowa NiCr w kompozytowym proszku jest reaktywna w roztopionym aluminium, powoduje destrukcję jego kształtu oraz powstanie faz typu AlNi (rys. 8a, b).

Wytworzone kompozytowe odlewy z hybrydowym umocnieniem mogą być efektywnym półwyrobem dla procesu odlewania odśrodkowego [13, 18, 21]. Jednak podczas wytwarzania kompozytów, przede wszystkim w rozważaniach nad doбором parametrów dla poszczególnych procesów technologicznych oraz dla określenia ich struktury, należy mieć na uwadze procesy krystalizacji i krzepnięcia zawiesiny kompozytowej [24].

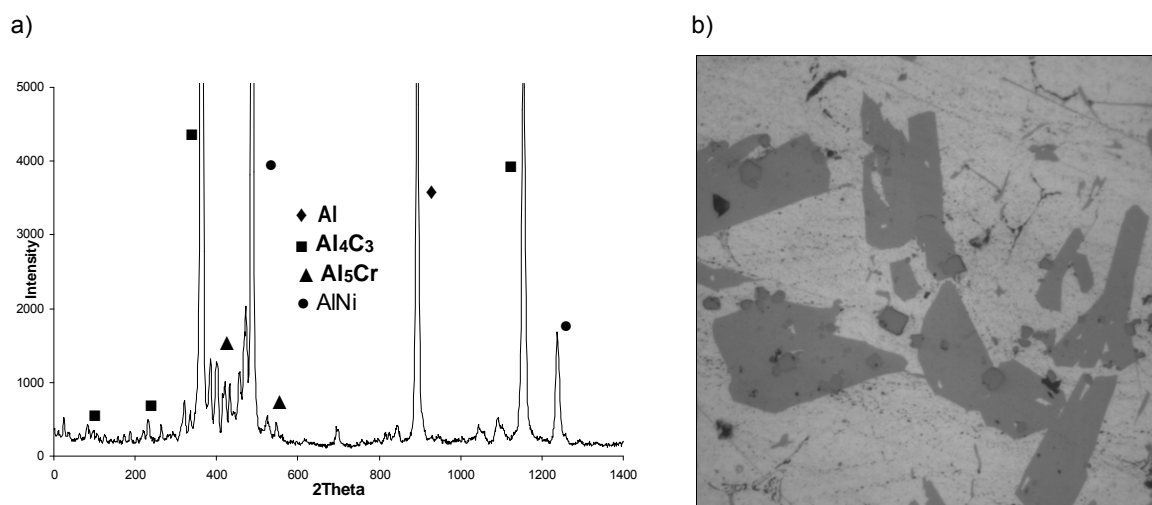
## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały, że połączenie procesów odlewania i wprowadzania kompozytowego proszku o zadanym składzie chemicznym jest efektywnym procesem wytwarzania hybrydowych kompozytów o zadanym wielofazowym umocnieniu.

Zagadnienie wytwarzania kompozytów *in situ* o dyspersyjnej strukturze z hybrydowym umocnieniem



Rys. 7. Struktura kompozytowych odlewów Al/Fe(Cu)-TiC otrzymanych w połączonych procesach odlewania i metalurgii proszków: a) OM, b) SEM  
Fig. 7. Structure of Al/Fe(Cu)-TiC composite casts obtained in combined casting and powder metallurgy process: a) OM, b) SEM



Rys. 8. Skład fazowy (a) i struktura (b) kompozytowych odlewów AlMg10/NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC otrzymanych w połączonych procesach odlewania i metalurgii proszków  
Fig. 8. Phase composition (a) and structure (b) of AlMg10/NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC composite casts obtained in combined casting and powder metallurgy process



jest złożonym zagadnieniem technologicznym i materiałowym realizowanym w pracach naukowo-badawczych nad polepszeniem właściwości trybologicznych i mechanicznych oraz określeniem zakresu ich aplikacji [13]. Przedstawione wyniki badań są częścią szerszego programu badawczego ujmującego wpływ rodzaju umocnienia i jego składu fazowego na strukturę i właściwości odlewanych, heterofazowych kompozytów z osnową aluminiową [13-20].

*Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2007, projekt badawczy KBN 3 T08D 024 28.*

## LITERATURA

- [1] Śleziona J., Kształtowanie właściwości kompozytów stop Al-cząstki ceramiczne wytwarzanych metodami odlewniczymi, ZN Politechniki Śląskiej, Hutnictwo 47, Gliwice 1994.
- [2] Hashim J., Looney L., Hashim M.S.J: Metal matrix composites: production by the stir casting method, Journal of Material Processing Technology 1999, 92-93, 1-7.
- [3] Skibo M.D., Schuster M., US Patent No. 4 759 995, 26 July, 1988.
- [4] Górny Z., Sobczak J., Metal matrix composites fabricated by the squeeze casting process, Transactions of the Foundry Research Institute 1995, 42, 1995.
- [5] Kaczmar J.W., Pietrzak K., Włosiński W., The production and application of metal matrix composite materials, Journal of Material Processing Technology 2000, 106, 58-67.
- [6] Posmyk A., Śleziona J., Dolata-Grosz A., Wieczorek J., Reibungs- und Schmierungsverhalten von Aluminium - legierungen mit einem verstärkten Oberflächenbereich, Technische Akademie Esslingen, 12<sup>th</sup> International Colloquium, January 11-13 2000, Tribology 2000 - Plus.
- [7] Wieczorek J., Śleziona J., Myalski J., Dolata-Grosz A., Dyzia M., Zużycie i struktura powierzchni po współpracy w warunkach tarcia technicznie suchego w kompozytach AK12-cząstki ceramiczne, Kompozyty (Composites) 2003 3, 6, 131-135.
- [8] Śleziona J., Dolata-Grosz A., Dytkowicz A., Wieczorek J., The effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC particles preparation on quality of the metal-ceramic suspension, IV International Conference, Surface Phenomena in Foundry Processes, 1998, 263-271.
- [9] Lakshmi S., Lu L., Gupta M., In situ preparation of TiB<sub>2</sub> reinforced Al based composites, Journal of Materials Processing Technology 1998, 73, 160-166.
- [10] Fraś E., Janas A., Kolbus A., Odlewany kompozyt aluminiowy *in situ* umacniany cząstkami borków tytanu, Kompozyty (Composites) 2002, 1, 1, 23-27.
- [11] Fraś E., Janas A., Wierziński S., Kolbus A., Odlewane aluminiowe kompozyty *in situ* umacniane węglnikami tytanu, IV Międzynarod. Konf. Nauk. Zapewnienie jakości w odlewnictwie 2000, Krzepnięcie Metali i Stopów PAN, 2000, 2, 43, 167-176.
- [12] Zyska A., Braszczyńska-Malik K.N., Structure of the Al-(TiB<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>p</sub> composites produced by in situ method, Kompozyty (Composites) 2004, 4, 11, 336-340.
- [13] KBN nr 3T08D02428: Kształtowanie funkcjonalnej, warstwowej struktury odlewów kompozytowych zawierających zbrojenie heterofazowe.
- [14] Dolata-Grosz A., Śleziona J., Wieczorek J., Formanek B., Struktura odlewów odśrodkowych w kompozytach Al-FeO-TiO<sub>2</sub>, Kompozyty (Composites) 2004, 4, 10, 164-169.
- [15] Dolata-Grosz A., Formanek B., Śleziona J., Wieczorek J., Aluminium hybrid composites reinforced with intermetallic and ceramic phases, Archives of Foundry 2004, 4/14, 126-131.
- [16] Dolata-Grosz A., Formanek B., Śleziona J., Wieczorek J., Al-FeAl-TiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite with hybrid reinforcement, Journal of Materials Processing Technology 2005, 162-163, 33-38.
- [17] Dolata-Grosz A., Formanek B., Śleziona J., Aluminium matrix cast composites (AlMCCs) with hybrid reinforcement, Archive of Foundry 2005, 5/15, 70-78.
- [18] Dolata-Grosz A., Formanek B., Śleziona J., Wieczorek J., Struktura heterofazowych aluminiowych odlewów kompozytowych zawierających węgliki chromu i tytanu, Kompozyty (Composites) 2005, 5, 3, 81-85.
- [19] Myalski J., Wieczorek J., Dolata-Grosz A., Tribological properties of heterophase composites with an aluminium matrix, CAM3S 2005, Zakopane, Book of abstract, 1.128, 50.
- [20] Dolata-Grosz A., Formanek B., Wieczorek J., Cast aluminium with Fe-Cu-TiC composite powder reinforcement, Journal of Materials Processing Technology 2006 (w druku).
- [21] Watanabe Y., Nakamura T., Microstructures and wear resistances of hybrid Al-(Al<sub>3</sub>Ti+Al<sub>3</sub>Ni) FGMs fabricated by a centrifugal method, Intermetallics 2001, 9, 33-43.
- [22] Formanek B., Józwiak S., Szczucka-Lasota B., Dolata-Grosz A., Bojar Z., Intermetallic alloys with ceramic particles and technological concept for high loaded materials, Elsevier, Journal of Materials Processing Technology 2005, 162-163, 46-51.
- [23] KBN nr 4T08C00825: Kompozytowe materiały i powłoki natryskiwane cieplnie metodami naddźwiękowymi - HVOF i HVOF o wysokiej odporności na zużycie korozyjne i erozyjne.
- [24] Braszczyński J., Crystallization of metal matrix alloy in composites containing non-metallic particles, Materials Science and Engineering 1991, 135 A, 105-109.

Recenzent  
Zbigniew Górny