

Bolesław Formanek<sup>1\*</sup>, Maria Sozańska<sup>2</sup>, Marek Staszewski<sup>3</sup>, Mirosław Cholewa<sup>4</sup>, Anna Dulęba<sup>5</sup>

<sup>1-3</sup> Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Katedra Nauki o Materiałach, ul. Krasińskiego 8, 40-018 Katowice, Poland

<sup>4,5</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Odlewnictwa

ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice, Poland

e-mail: \* Bolesław.Formanek@polsl.pl

Otrzymano (Received) 12.03.2007

## ODLEWANE KOMPOZYTY ALUMINIOWE Z FAZAMI AZOTKOWYMI

Przedstawiono koncepcję technologiczną i materiałową oraz wyniki badań nad otrzymywaniem kompozytu aluminiowego umacnianego fazami azotkowymi, w szczególności azotkiem aluminium. Kompozyty wytworzono w technice *in situ* - reakcji wewnętrznej z fazy gazowej oraz *ex situ* z wykorzystaniem metalurgii proszków. W technice *ex situ* wykorzystano dodatek kompozytowych proszków Al-AlN. W wytwarzaniu proszków zastosowano samorozwijającą się wysokotemperaturową syntezę. Przedstawiono morfologię proszku. Proszki są produktem aglomeracji mechanicznej. W technice *in situ* założony skład kompozytów uzyskano przez zastosowanie aktywnej chemicznie alotropowej odmiany azotu. Odlewy próbne wykonano w formach piaskowych i grafitowych. W kompozytach *ex situ* pożądaną dyspersję wzmocnienia oraz krystalizację wspomagano za pomocą zewnętrznego pola elektromagnetycznego. Zaprezentowano typowe struktury kompozytów *ex situ* uzyskane bez wspomagania polem magnetycznym oraz z wykorzystaniem pola dla poprawy dystrybucji cząstek wzmocnienia. Strukturę uzyskanego kompozytu scharakteryzowano metodami mikroskopii świetlnej, elektronowej mikroskopii skaningowej, charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego i chemicznej analizy ilościowej wybranych mikroobszarów kompozytu o dużej zawartości fazy AlN (EDX). Wskazano, że kompozyt o wysokiej dyspersji fazy umacniającej - azotków - można wytwarzać przez alternatywne zastosowanie generatora aktywnych chemicznie gazów i aglomeratów proszkowych. Wykazano zalety obu metod *ex situ* i *in situ* - proszkowej i gazowej. Potwierdzono pozytywne wykorzystanie pola elektromagnetycznego do kształtowania dyspersji wzmocnienia i struktury osnowy kompozytu. Wyniki badań potwierdziły zaproponowaną koncepcję tworzenia i odlewnia kompozytu oraz słuszność przyjętych założeń.

Słowa kluczowe: odlewnictwo, kompozyt, dyspersja, krzepnięcie, struktura

## CAST ALUMINIUM COMPOSITES WITH NITRIDE PHASES

In this paper technological and material conception of composite manufacturing with use of nitride reinforcing phases, especially aluminium nitride and some results was shown. Composites were manufactured with use of *in situ* technique with internal reaction from gas phase and *ex situ* technique - with use of powder metallurgy. In the *ex situ* technique composite powder addition was used. In powder preparation self-propagation high-temperature synthesis was used. Powders were produced with use of mechanical agglomeration. In *in situ* technique planned composition was reached by use of chemical-activated allotropic form of nitrogen. Casting were pured into sand and graphite moulds. For *ex situ* composites required dispersion of reinforcement and matrix crystallization was assisted with external electromagnetic field. Improvement of reinforcing particles distribution can be observed. Composite structure was studied with use of light microscopy, scanning microscopy, X-rays methods and chemical quantitative analysis (EDX) for selected composite micro-regions with high AlN phase content. It was pointed out that composite with regulated reinforcing phase dispersion can be manufactured with alternative use of chemically activated gas generator and powder agglomerates. Advantages of both *ex situ* and *in situ* techniques - powder and gas were presented. Electromagnetic field processing positive influence on reinforcing phase distribution and matrix crystallization process was proved. Presented results confirmed justness of assumptions and composite manufacturing conception.

Keywords: casting, composite, dispersion, solidification, structure

## WPROWADZENIE

Przesłankami podjęcia tematu opracowania jest dążenie do optymalizacji własności odlewanych materiałów kompozytowych poprzez sterownię dystrybucją i dyspersją cząstek wzmocnienia oraz strukturą osnowy kompozytu. Zaproponowano wspomaganie technologii wytwarzania kompozytu *ex situ* przez użycie pola elek-

tromagnetycznego. Wykorzystanie pola magnetycznego zarówno w kształtowaniu rozłożenia cząstek w osnowie kompozytu, jak również do kształtowania struktury stopów i osnowy kompozytów jest stosowane w wielu, między innymi autorskich, rozwiązaniach technologicznych. Przykłady zastosowań wirujących i/lub wirują-

cych, rewersyjnych pól zawarto w opracowaniach [1-7]. Wykorzystywano odpowiednio konfigurowane pola głównie do modyfikacji struktury stopów na bazie aluminium, również do odlewania tulei kompozytowych AlSi-Cp<sub>gr</sub> [6, 7]. Dzięki uzyskanej korzystnej, równomiernej dyspersji cząstek grafitu otrzymano materiały o szczególnych własnościach trybologicznych. Pola magnetyczne znalazły ponadto najszerze zastosowanie w sterowaniu strukturą w procesach odlewania ciągłego. Pozytywne doświadczenia autorów w stosowaniu pól elektromagnetycznych stanowią podstawę do opracowania zmodyfikowanej metody wytwarzania kompozytów w stanie ciekłym i krzepnących z wymuszonym ruchem zawiesziny kompozytowej w połączonych technikach odlewniczych i metalurgii proszków. W tym zakresie stosowane procesy wytwórcze posiadają pewne ograniczenia. Kompozyty *ex situ*, w szczególności zaś wytwarzane w połączonych technikach *in-ex situ* [8], wymagają wysokiej dbałości o sterowanie zjawiskami segregacyjnymi z uwagi na znaczne zróżnicowanie wielkości i morfologii cząstek. Poza segregacją grawitacyjną komponenty wzmacniające ulegają między innymi segregacji międzydendrytycznej na skutek transportowania cząstek przed frontem krystalizacji.

## KONCEPCJA MATERIAŁOWA I TECHNOLOGICZNA WYTWARZANIA KOMPOZYTÓW

Wytwarzanie kompozytów opiera się na materiałowej i technologicznej koncepcji wytwarzania kompozytu zamieszczonej w opracowaniach [8-10]. W ogólnym założeniu wytworzenie ciekłej dyspersji oparto na wykorzystaniu reakcji wewnętrznej gaz-składniki osnowy [9] oraz na użyciu proszków reaktywnych [10]. Wykorzystanie różnych odmian proszków kompozytowych do wytwarzania kompozytów odlewanych przedstawiono w opracowaniach [10-14].

W przypadku stosowania proszków cząstki wzmacniające osnowę powstają podczas reakcji zainicjowanej w procesie mechanicznej syntezy. Kompozytowy proszek Al-AlN zawiera drobnodispersyjne cząstki, będące produktami reakcji fizykochemicznych, zachodzących w osnowie proszku o składzie zbliżonym do osnowy odlewanych kompozytu. W przyjętej koncepcji materiałowej założono, że azotek aluminium będzie głównym komponentem umacniającym aluminiową osnowę. Fazy azotkowe, zwłaszcza azotku aluminium, zostały użyte z uwagi na ich korzystne własności fizykochemiczne. Azotek aluminium posiada heksagonalną strukturę i dobrą zwilżalność przez aluminium. W konsekwencji wskazanych własności azotek aluminium powinien być efektywnym umacniającym składnikiem struktury i powinien również zapewniać korzystne własności w wybranych skojarzeniach trybologicznych. Przyjęto także, że tanim substratem do syntezy azotku

aluminium będzie mieszanina proszku i wiórów aluminiowych. Również dobór pozostałych parametrów technologicznych wytwarzania kompozytowych proszków zapewniał różną wielkość aglomeratów i ziaren azotku.

Zakładając uzyskanie w ostatecznym wyniku materiału o korzystnych własnościach wytrzymałościowych i jednocześnie trybologicznych, wymagane jest współistnienie w osnowie faz wzmacniających o znacznym zróżnicowaniu morfologii i własności fizycznych. Skłania to do opracowania nowych technologicznych metod wytwarzania odlewów kompozytowych. Jednym z kluczowych elementów podobnych technologii może być wykorzystanie pól elektromagnetycznych w procesie tworzenia ciekłych dyspersji kompozytowych i ich odlewania. W proponowanym zastosowaniu wykorzystanie pola magnetycznego nabiera nowego, złożonego, znaczenia technologicznego. W procesie tworzenia dyspersji może intensyfikować zjawiska zwilżania, ograniczać segregację komponentów, poprawiać dystrybucję cząstek w osnowie oraz kształtować strukturę osnowy.

W proponowanej alternatywnej technice *in situ* zastosowano generator elektryczny do wytwarzania aktywnych chemicznie gazów [9]. Generator pozwala na wytwarzanie ozonu i/lub atomowego azotu z gazów czystych technicznie, ale także z powietrza, po uprzednim jego przygotowaniu. Metoda opiera się na przedmuchiwanie kąpeli aktywnym gazem za pomocą krótkiej lancy oraz doborze składników osnowy o wysokiej reaktywności w stosunku do aktywnego gazu, a także zapewnieniu korzystnych warunków immersyjnego zwilżania produktów reakcji. Zaletami procesu są:

- wysoka stabilność termodynamiczna powstających faz, a w konsekwencji brak reakcji na granicy osnowa-umocnienie;
- wysoka czystość powierzchni międzyfazowej uzyskiwana poprzez minimalizację ilości związków na granicy kontaktu;
- dobra zwilżalność fazy umacniającej metalem osnowy;
- możliwość uzyskania cząstek o różnej wielkości, równomiernie rozmieszczonych w całej objętości osnowy;
- potencjalna możliwość sterowania wymiarami cząstek wzmacniających poprzez dobór parametrów kinetyki reakcji.

## CEL I ZAKRES BADAŃ

Głównym celem podjętych badań było wytworzenie aluminiowego kompozytu z dyspersyjnymi fazami azotku aluminium o zadanej strukturze. Dodatkowym celem było również określenie i porównanie struktur wytworzonych materiałów. Wstępne analizy struktur w założeniu mają służyć dopracowaniu procesów technologicznych wytwarzania do wymagań użytkowych.

Proponowane materiały Al-AlN, głównie ze względu na wielkość cząstek wzmacniających, mogą stanowić potencjalne umocnienie dyspersyjne osnowy dla dodatkowego wzmacniania kompozytu cząstkami ceramicznymi oraz metaloceramicznymi. Dzięki temu można precyzyjnie sterować trybologicznymi własnościami kompozytu w zależności od przeznaczenia materiału. Zakres badań obejmował:

- opracowanie koncepcji materiałowych i technologicznych wytwarzania ciekłej dyspersji i odlewów kompozytowych;
- przeprowadzenie badań wstępnych dla określenia parametrów cyklu technologicznego wytwarzania kompozytu umocnionego fazami azotkowymi;
- opracowanie metody wytwarzania kompozytowych aglomeratów proszkowych Al-AlN;
- określenie struktury i składu fazowego wytworzonych kompozytów.

## MATERIAŁY I METODY BADAWCZE

W technice *ex situ* zastosowany proszek Al-AlN otrzymywano w dwóch etapach. Spiek AlN był wytwarzany metodą syntezy wysokotemperaturowej i rozdrabniany w kruszarce szczękowej oraz w młynie rotacyjno-wibracyjnym w ciągu 2 godz. Następnie był aglomerowany mechanicznie z udziałem proszku aluminiowego przez następne 2 godz. Kompozytowe proszki Al-AlN wprowadzono do ciekłego stopu AlMg2 w ilości 40% wag. Odlewy próbne wykonano w formie grafitowej. W technice *in situ* zastosowano osnowę, której skład podano w tabeli 1. Osnowę stanowił stop AlCu4 uzupełniony dodatkami modyfikującymi zjawiska powierzchniowe i strukturę odlewu. Zastosowano standardowe zabiegi obróbki metalurgicznej ciekłego stopu oraz typowe parametry technologiczne wytwarzania. Przyjęto wysoką wartość temperatury obróbki gazowej 1270 K, co wynika z konieczności intensyfikowania zachodzących reakcji. Suche i oczyszczone powietrze z instalacji sprężonego powietrza, po obróbce jonizacyjnej, wprowadzano laną pod lustro kąpieli:

- przepływ gazu:  $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0,17 \text{ m}^3/\text{min}$ );
- ciśnienie gazu: 0,025 MPa;
- czas obróbki gazowej stopu: 240 s.

TABELA 1. Skład chemiczny stopu AM4 po wprowadzeniu dodatków stopowych i modyfikujących

TABLE 1. Chemical composition of AM4 alloy after introduction of alloy and modifying additions

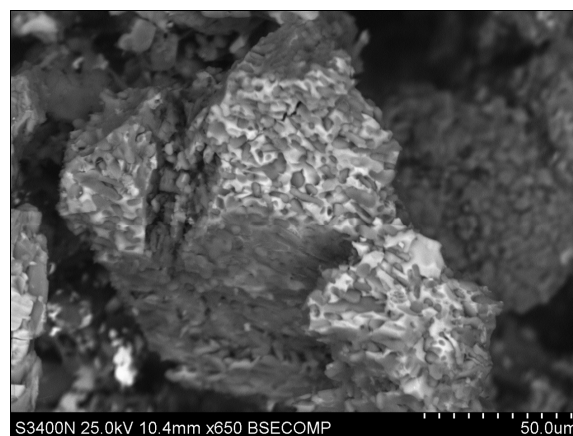
Stop	Składniki stopowe, % wag.				
znak	Cu	Mg	Sb	Ti	B
AlCu4TiMg	4,2±4,5	0,15±0,4	0,45	0,28	0,05

Oceniając wstępnie strukturę kompozytów wytworzonych w technice *ex situ* stwierdzono, że fazy zbrojąca mają tendencję do tworzenia aglomeratów skupiają-

cych zwłaszcza fazy o najmniejszej dyspersji. Obecność nieciągłości odlewu (pustek) i niejednorodna dystrybucja faz umacniających są uzależnione od parametrów technologicznych otrzymywania kompozytu: rodzaju fazy zbrojenia, jej zwilżalności stopem osnowy, sposobu mieszania, warunków krzepnięcia oraz formowania struktury kompozytu w kolejnych etapach procesu krystalizacji. Realizując jeden z celów badań, wykonano odlewy, które po przetopieniu poddano w procesie krzepnięcia działaniu wirującego pola magnetycznego o indukcji na powierzchni formy  $B = 0,1 \text{ mT}$ , przy prędkości kątowej  $\omega = 157 \text{ s}^{-1}$  w czasie 20 s.

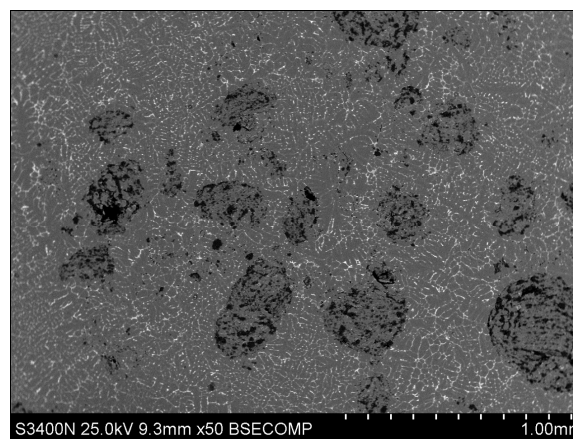
## WYNIKI BADAŃ. SKŁADY FAZOWE I STRUKTURY

Na rysunku 1 pokazano postać pojedynczego ziarna proszku kompozytowego użytego do tworzenia kompozytu *ex situ*. W osnowie białego aluminium widoczne są drobnodyspersyjne równoosiowe cząstki fazy azotkowej. Na rysunku 2 pokazano strukturę kompozytu AlMg2-AlN uzyskanego bez stosowania pola magnetycznego w procesie krzepnięcia.



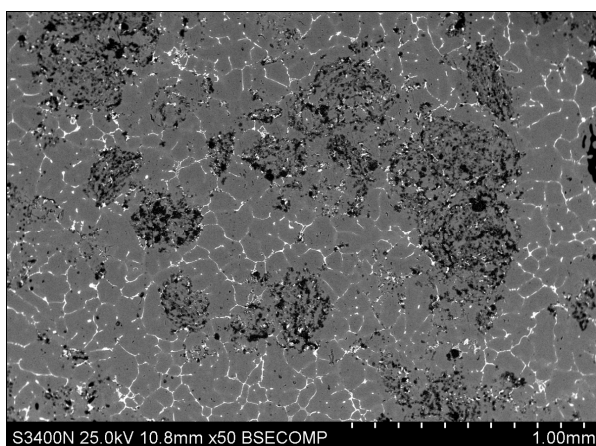
Rys. 1. Morfologia syntezowanego proszku azotku aluminium. Wysoka dyspersja wydzielen AlN w osnowie Al

Fig. 1. Morphology of synthetic aluminium nitride powder. High dispersion of AlN phase in Al matrix is observed



Rys. 2. Struktura kompozytowego odlewu AlMg-AlN

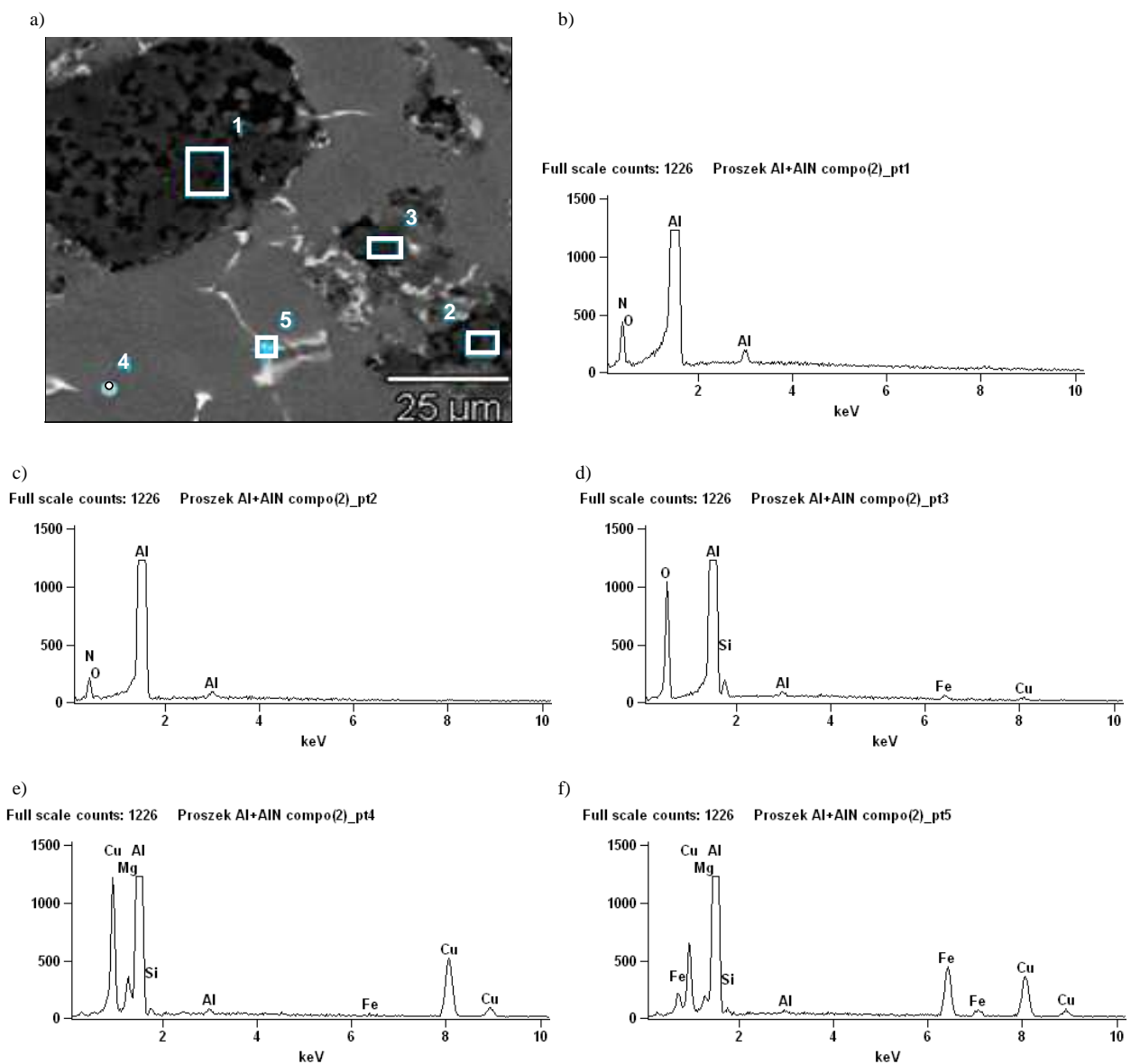
Fig. 2. Structure of AlMg-AlN composite casting



Rys. 3. Struktura kompozytowego odlewu AlMg-AlN po obróbce w polu elektromagnetycznym

Fig. 3. Structure of AlMg-AlN composite casting after processing in electromagnetic field

Rysunek 3 przedstawia analogiczny kompozyt uzyskany z użyciem pola magnetycznego podczas krzepnięcia odlewu próbnego. Przy jednakowych powiększeniach stwierdzono zanik granic między osnową i ziarnami aglomeratu proszkowego. Widoczne „wyspy” zostały znacznie rozproszone w osnowie, a przestrzenie między elementarnymi cząstkami wzmacniającymi uległy wyraźnemu zwiększeniu. Skutek zabiegu, aczkolwiek pozytywny, wymaga jednak intensywniejszych zabiegów technologicznych. Uzyskany efekt w przeprowadzonych badaniach wstępnych uznano za wystarczający do kontynuacji badań. Wskazana jest jednak ilościowa analiza wpływu parametrów pola na strukturę. Należy podkreślić zaletę techniki, polegającą na potencjalnie bardzo wysokich udziałach cząstek wzmacniających lokowanych w osnowie przy zastosowaniu proponowanej techniki. Na rysunku 4 pokazano wybra-



Rys. 4. Mikroanaliza rozmieszczenia pierwiastków w mikroobszarach kompozytu *ex situ* AlMg-AlN - EDX. Rysunki b)-f) odpowiadają punktom pomiarowym odpowiednio 1-5 z rys. 4a)

Fig. 4. Microanalysis results in *ex situ* composite AlMg-AlN showing elements distribution micro-regions - EDX. Figures b)-f) relate to measuring points 1-5, respectively in fig. 4a)

ny fragment struktury z typowymi składnikami strukturalnymi poddany analizie składu fazowego (rys. 4a). Ze względu na ograniczenia techniczne - uchwycenia cząstek fazy azotkowej w analizie punktowej (por. rys. 1), jej skład detekowany nie uwzględnia obecnie liczbowego udziału azotu w cząstkach wzmacniających, jednak jego obecność potwierdzają wykresy zamieszczone na rysunkach 4b i c. Ponadto potwierdzono współistnienie fazy tlenkowej (rys. 4d), co jest w pełni uzasadnione procesem wytwórczym proszku. Podobnie potwierdzono składy pozostałych składników strukturalnych osnowy kompozytu, co przedstawiają rysunki 4e i f oraz tabela 2, prezentująca udziały masowe i atomowe poszczególnych punktów pomiarowych w charakterystycznych składowych elementach struktury.

TABELA 2. Udziały masowe i atomowe głównych składników w elementach struktury kompozytu *ex situ* AlMg-AlN

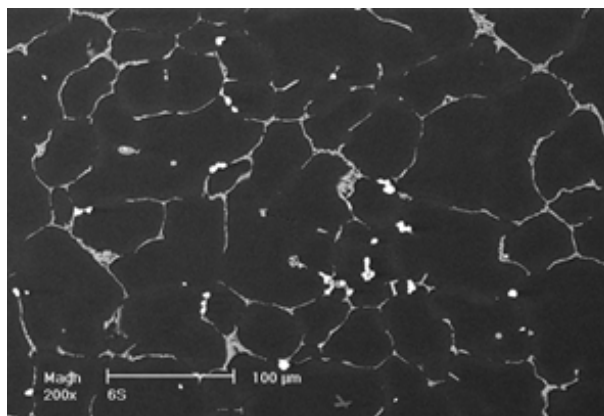
TABLE 2. Mass and atomic fraction of main elements in structural components of AlMg-AlN *ex situ* composite

Udział masowy, %					
Element:	Mg	Al	Si	Fe	Cu
1		100,00			
2		100,00			
3		94,42	3,41	1,03	1,14
4	2,36	77,00	0,70	0,18	19,76
5	0,93	73,32	0,81	10,24	14,70
Udział atomowy, %					
1		100,00			
2		100,00			
3		95,69	3,32	0,51	0,49
4	2,96	86,74	0,75	0,10	9,45
5	1,19	84,94	0,90	5,73	7,23

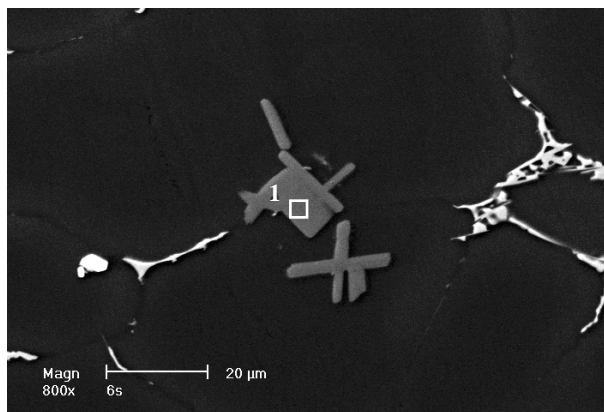
Na zamieszczonych mikrografiach (rys. 5) pokazano typowe składniki strukturalne wytworzonego kompozytu AlCu4-AlTiN: roztwór miedzi w aluminium, fazę Al<sub>2</sub>Cu oraz dodatkową fazę AlTiN [10], której identyfikację przedstawiono na rysunku 6. Wydzielenia posiadały następujący procentowy udział atomowy pierwiastków: 13,35% N, 69,33% Al, 17,32% Ti, co wskazuje na złożony azotek glinu i tytanu. Ponieważ wskazane fazy mogą posiadać zmienną zawartość składników, aż do stechiometrycznej, stąd prawdopodobnie różna morfologia wydzieleni. Biorąc pod uwagę wielkość i rodzaj uzyskanej fazy, nawet przy niewielkim, np. 1,5%, udziale może być czynnikiem umacniającym dyspersyjnie.

Na podstawie przedstawionych mikrografii można stwierdzić poprawność zwilżania immersyjnego oraz niepełne podobieństwo krystalizujących faz wzmacniających.

a)

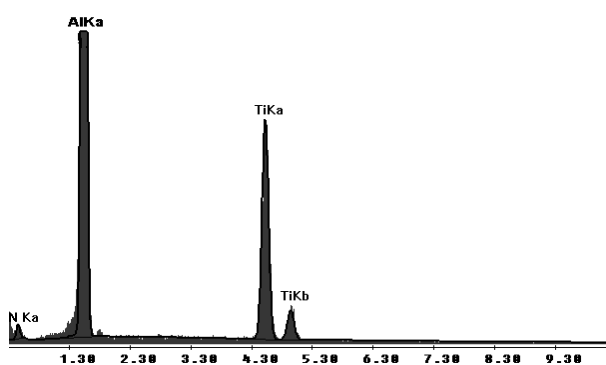


b)



Rys. 5. Mikrografie skaningowe struktury kompozytu AlCu4-AlTiN; biała faza Al<sub>2</sub>Cu występująca po granicach ziarn. Szare wydłużone prostokąty to faza wytworzona na skutek gazowej obróbki o składzie podanym na rysunku 6

Fig. 5. Scanning micrographs of AlCu4-AlTiN composite structure; white Al<sub>2</sub>Cu phase precipitates at grain boundaries. Grey elongated rectangle-shape phase precipitates during gas-processing; its chemical composition is shown in figure 6



Pierwiastek pkt. pom. 1	udział wag., %	udział atom., %
N	6,48	13,35
Al	64,79	69,33
Ti	28,73	17,23
Suma	100,00	100,00

Rys. 6. Wyniki punktowej analizy elementu z rys. 5b w obszarze o kształcie prostokąta barwy szarej. Obok widoczne podobne wydzielenia o kształcie pałeczek i rozety

Fig. 6. Results of point analysis of elements distribution in region from figure 5b. Next to the analyzed rectangle similar phases are observed with shape of bars and rosette

Morfologia tylko części wydzielen jest zgodna z oczekiwanymi, a wielkość cząstek na obecnym etapie badań jest zadowalająca. Intuicyjnym celem w obu prezentowanych technikach jest uzyskanie materiału kompozytowego z cząstkami wzmacniającymi o zróżnicowanej wielkości.

## PODSUMOWANIE

Zastosowanie procesów mechanicznego stopowania do wytwarzania kompozytowych proszków z osnową aluminiową i fazami ceramicznymi lub o bardziej złożonym składzie fazowym, a następnie kompozytów MMCs jest efektywnym procesem. Należy mieć na uwadze, że ten sposób wytwarzania kompozytowych proszków pozwala na zmniejszenie wielkości fazy zbrojącej nawet do wymiarów nanometrycznych. Przedstawione w artykule badania wytwarzania odlewu aluminiowego z dyspersyjnymi cząstkami azotku aluminium uwidaczniają występowanie aglomeratów w strukturze kompozytu oraz wskazują na potencjalne wykorzystanie pól elektromagnetycznych w ograniczaniu występowania podobnych zjawisk. Aglomeraty pierwotne oraz wtórne faz zbrojących mogą również powstawać w kolejnych procesach przetwarzania kompozytów, np. z zastosowaniem technik odlewania w formach wirujących czy też w formach o małym przewodnictwie cieplnym. Połączone metody wytwarzania kompozytów: odlewnicza i metalurgii proszków pomimo pewnych ograniczeń stwarzają warunki poprawy strukturalnych własności kompozytów dyspersyjnych przy wykorzystaniu obróbki ciekłego kompozytu polem elektromagnetycznym. Prezentowane warianty technologiczne procesu pozwalają na wytwarzanie kompozytów w połączonych technikach *ex situ* oraz *in situ*, stwarza to możliwość doboru cząstek wzmocnienia o odmiennych właściwościach cieplnych i morfologicznych w zależności od potrzeb technologicznych i użytkowych. Uzyskane korzystne wyniki badań w zakresie sposobów zapobiegania powstawaniu aglomeratów, a także deaglomeracji są przedmiotem dalszych badań autorów. Ich przedmiotem będzie korekta parametrów technologicznych i struktury kompozytów dla optymalizacji właściwości wytrzymałościowych i trybologicznych. Ponadto przewiduje się doskonalenie stosowanych technik odlewniczych. Określenie struktury wytworzonych kompozytów z zastosowaniem metod metalografii ilościowej pozwala na efektywne określenie wpływu parametrów pola magnetycznego na uzyskanie wymaganej dystrybucji i wysokiej dyspersji cząstek wzmacniających w osnowie. Otrzymane wyniki badań pozwoliły potwierdzić słuszność przyjętej koncepcji materiałowej i technologicznej wytwarzania ciekłej dyspersji kompozytowej i jej krystalizacji z zastosowaniem pola magnetycznego.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu badawczego zamawianego PBZ/KBN/114/T08/2004 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Zadanie II.4.1).

## LITERATURA

- [1] Sakwa W., Gawroński J., Szajnar J., Effect of Rotating Reversing Magnetic Field on the Solidification of Aluminium Casting, *Giessereiforschung* 1988, 40, 1, 17-22.
- [2] Szajnar J., Gawroński J., Cholewa M., Wpływ wymuszonego ruchu i temperatury ciekłego metalu na kąt odchylenia kryształów kolumnowych w odlewach krzepnących w polu magnetycznym, *Arch. Tech. Masz. i Autom.* 1996, 16, 1, 81-88.
- [3] Sakwa W., Gawroński J., Szajnar J., Zmiany w procesie krystalizacji wywołane działaniem wirującego rewersyjnego pola magn., *Mater. III Konf. Odlew.*, Budva, 1987, Jugosławia, 23-31.
- [4] Szajnar J., Gawroński J., Cholewa M., Wpływ warunków krystalizacji stopu na strukturę krystaliczną strefy powierzchniowej odlewów krzepnących przy wymuszonej konwekcji, *Proceedings III Inter. Scientific Conf. AMME, Gliwice 5-7.12. 1994.* Materials Science Committee of the Polish Academy of Science, The Faculty of Mechanical Engineering of the Silesian Technical University, Gliwice 1994, 329-334.
- [5] Szajnar J., Analysis of columnar crystals growth during the solidification in magnetic field, *Proc. 2nd Inter. Conf. Comput. Modell. of Free and Mov. Boundry, Computational Mech. Publicat. Southampton, Mediolan 1993*, 294-300.
- [6] Gawroński J., Krajczy B., Szajnar J., Cholewa M., Odlewane kompozyty aluminiowo-grafitowe, *Krzep. Metali i Stopów* 1988, 3, 230-242.
- [7] Cholewa M., Gawroński J., Dyspersyjne kompozyty aluminiowo-grafitowe, *KMiS* 1992, 16, 49-58.
- [8] Cholewa M., Formanek B., Kompozyty z metaliczną osnową i dyspersyjnym wzmocnieniem wytwarzane w połączonych procesach *in i ex situ*, *Archiwum Odlewnictwa* 2006, 22, 119-126.
- [9] Cholewa M., Aluminum alloys modified by chemically activated gases, *Acta Metallurgica Slovaca* 2002, 8, 2, 158-162.
- [10] Formanek B., Maciejny A., Szymański K., Śleziona J., Metaloceramic powder for modification of composite casting structure, *8th Int. Sci. Conf. Achievement in Mechanical & Materials Engineering* 1999.
- [11] Śleziona J., Formanek B., Olszówka-Myalska A., Wprowadzenie drobnodispersyjnych cząstek ceramicznych do ciekłych stopów aluminium, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 2001, 21, 177-184.
- [12] Śleziona J., Formanek B., Olszówka-Myalska A., Wytwarzanie kompozytów na osnowie stopów aluminium zbrojonych drobnodispersyjnymi cząstkami ceramicznymi i międzymetalicznymi, *Inżynieria Materiałowa* 2002, 2, 122-128.
- [13] Dolata-Grosz A., Śleziona J., Myalski J., Formanek B., Wieczorek J., Formowanie struktury kompozytowych odlewów aluminiowych z wielofazowym umocnieniem, *Inżynieria Materiałowa* 2006, 3 (151), 688-691.
- [14] Dolata-Grosz A., Formanek B., Wieczorek J., Śleziona J., Myalski J., Application of composite powders with iron and titanium aluminides to the preparing of *in situ* AMCCs, *European Congress on Advanced Materials and Processes, Euromat 2005*, 5-8 September, Praga.