

**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 Śleziona<sup>3</sup>, Jakub Wieczorek<sup>4</sup>**

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

## STRUKTURA HETEROFAZOWYCH ALUMINIOWYCH ODLEWÓW KOMPOZYTOWYCH ZAWIERAJĄCYCH WĘGLIKI CHROMU I TYTANU

Przedstawiono proces otrzymywania i strukturę odlewanych kompozytów aluminium z kompozytowymi proszkami zawierającymi heterofazowe umocnienie w postaci węgla chromu i tytanu. Fazy zbrojące otrzymano, stosując mieszaninę proszków kompozytowych typu NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC, uzyskaną w procesie samorozwijającej się syntezy wysokotemperaturowej (SHS). Strukturę i skład fazowy kompozytowego proszku zastosowanego do modyfikacji stopu aluminium pokazano na rysunkach 1-3.

Do wytworzenia kompozytów typu AlMg10/NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC zastosowano dwie odlewnicze metody: metodę mechanicznego mieszania zawiesiny kompozytowej, którą przeprowadzono w temperaturze 720°C i metodę odlewania odśrodkowego z zastosowaniem pionowej osi wirowania. Uzyskane odlewy charakteryzowały się złożoną strukturą faz o różnej morfologii i składzie chemicznym. Opracowany proces wytwarzania kompozytów pozwala w różnych wariantach technologicznych na modyfikację struktury stosowanych odlewniczych stopów aluminium.

**Słowa kluczowe:** stop aluminium, proszki kompozytowe, fazy międzymetaliczne, mechaniczne mieszanie, odlewanie odśrodkowe, struktura

## STRUCTURE OF HETEROPHASES ALUMINIUM CAST COMPOSITES CONTAINED CHROMIUM AND TITANIUM CARBIDES

The process of producing and the structure of aluminium matrix cast composites with composite powders containing chromium and titanium carbides has been presented in the article. The reinforcing phases were using by NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC powder mixtures formed in a self-propagating high-temperature synthesis process (SHS). The structure and phase composition of the composite powder used for the matrix alloy modification are shown in Figures 1-3. A composite alloys AlMg10/NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC was produced by two casting methods: mechanical mixing at 720°C and centrifugal casting with vertical rotational axis, after which its structure was determined. Optical microscopy, electron scanning microscopy and X-ray phase analysis were used to characterize the microstructure of the composites produced. The structure of the composite casts obtained by the mechanical mixing processes are presented in Figures 4 and 5. The fabricated AlMCs are characterized by the complex structure of different morphology and chemical constitution reinforcing phases.

The designed process allows for the structure modification of the applied casting aluminium alloys in different technological variants. The macrostructure and microstructure of aluminium cast composite obtaining by the centrifugal method are presented in Figure 6.

**Key words:** aluminium alloy, composite powders, intermetallic phases, mechanical mixing, centrifugal casting, structure

## WPROWADZENIE

Kompozyty wytwarzane metodami *in situ* określane są jako nowa generacja materiałów kompozytowych. W odróżnieniu od kompozytów *ex situ* [1-4] charakteryzuje je wysoka stabilność termodynamiczna, przeciwdziałająca reakcjom chemicznym na granicy osnowa-cząstka wzmacniająca, ograniczająca degradację struktury w trakcie pracy w podwyższonych temperaturach

[5-14]. Metody *in situ* pozwalają na uzyskanie zbrojenia o różnorodnej budowie i różnych właściwościach. Dyspersyjna faza zbrojąca może mieć postać cząstek lub włókien o plastycznej lub kruchej charakterystyce. Wśród metod wytwarzania najpowszechniej stosowane są metody metalurgii proszków [15-19], a od kilkunastu lat, przede wszystkim ze względów ekonomicznych,

<sup>1,2,4</sup> dr inż., <sup>3</sup> prof. dr hab. inż.

TABELA 1. Właściwości wybranych węglików  
TABLE 1. Properties of selected carbides

Węgliki	Gęstość g/cm <sup>3</sup>	$T_f$ °C	Rozszerzalność liniowa $\alpha \cdot 10^6/K$	Pojemność ciepna J/mol · K	Przewodnictwo cieplne J/m · s · K	Przewodnictwo elektryczne 10 <sup>-6</sup> S/m	$HV_{\mu}$ GPa
TiC	4,90	3140	7,4÷9,3	33,8	36,0	1,8 · 10 <sup>6</sup>	18÷32
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	6,70	1890	10,8	97,8	15	1,3 · 10 <sup>6</sup>	13

również techniki odlewnicze [5-7, 9-14]. Metodami odlewniczymi otrzymuje się kompozyty na osnowie: Al, Ti, Cu, NiAl oraz TiAl z dyspersyjnymi cząstkami TiC, TaC, ZrC, B<sub>4</sub>C, SiC, TiB<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, AlN, BN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, których wielkość w zależności od techniki wytwarzania kształtuje się na poziomie od 0,1 do kilkunastu  $\mu\text{m}$ , a udział objętościowy wynosi 5÷55%.

W danych literaturowych istnieją sygnałne informacje o kompozytach aluminiowych zawierających fazy węglkowe różniące się od węgliku krzemu, węgliku aluminium i węgliku tytanu [16-21]. Brak jest informacji o wytwarzaniu i zastosowaniu dwóch faz węglkowych do hybrydowego umocnienia stopów aluminium.

Założono, że węgliki chromu i tytanu, ze względu na właściwości fizykochemiczne, mogą być efektywnym umocnieniem w kompozytowych stopach aluminium, zwłaszcza przeznaczonych do odlewania odśrodkowego wyrobów [2, 3, 14]. Wybrane właściwości faz węglkowych zastosowanych w badaniach własnych zebrano w tabeli 1.

Węgliki chromu Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> z osnową NiCr w postaci proszku jest najczęściej stosowany do natryskiwania plazmowego lub naddźwiękowego powłok o dużej odporności na zużycie np.: abrazyjne, erozyjne w temperaturach otoczenia i podwyższonych [17-22]. Powłoki z węglków chromu są przeznaczone do eksploatacji w urządzeniach energetycznych do temperatury 800°C. Węgliki tytanu o większej mikrotwardości (tab. 1), w porównaniu z węglkiem chromu Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, powinien wpływać na poprawę właściwości tribologicznych wyrobów.

Zastosowanie kompozytowego proszku NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>--TiC do modyfikacji stopu Al-Mg jest przedmiotem badań technologicznych i strukturalnych przedstawionych w artykule. Przypuszczano, że ze względu na różnicę w gęstości proszków faz węglkowych chromu i tytanu będzie można wytworzyć odlewy ze strukturą warstwową i hybrydowym umocnieniem. Zawartość w składzie chemicznym proszku kompozytowego roztworu stałego NiCr 80/20 powinna ulec rozpuszczeniu w stopie aluminiowym z wytworzeniem dodatkowego dyspersyjnego umocnienia z faz międzymetalicznych z układu Ni-Al lub Ni-Cr-Al [23]. Na końcową strukturę odlewu będzie również wpływać stabilność faz węglkowych w roztopionym stopie Al-Mg.

## CEL I ZAKRES BADAŃ

**Celem zrealizowanych badań** była analiza struktury odlewów kompozytowych zawierających węgliki chromu i tytanu wytworzonych metodą mechanicznego mieszania oraz kompozytu ukształtowanego w procesie odlewania odśrodkowego.

Założono, że cykl zaplanowanych badań powinien dostarczyć informacji o zachodzących zmianach morfologii i składu fazowego proszków w reakcji ze stopem AlMg10 oraz przydatności kompozytowego aluminiowego stopu z fazami węglkowymi dla procesu odlewania odśrodkowego.

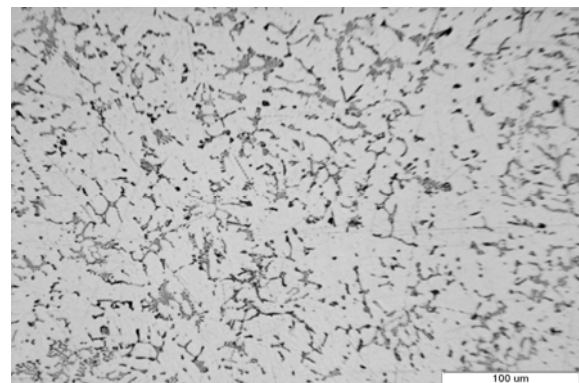
### Zakres badań obejmował:

- określenie struktury i składu fazowego kompozytowego proszku z węglkami chromu i tytanu,
- wytworzenie kompozytu z aluminiową osnową i węglkami,
- określenie struktury i składu fazowego kompozytu wytworzonego metodą mechanicznego mieszania,
- wykorzystanie zawiesiny kompozytowej w procesie odlewania odśrodkowego i wytworzenie tulei z warstwowym rozmieszczeniem faz zbrojących.

## MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

### Materiał osnowy

Jako materiał osnowy wytworzonych kompozytów stosowano odlewniczy stop aluminium z magnezem - AlMg10 (AG10). Strukturę stopu osnowy kompozytów poddanych badaniom strukturalnym pokazano na rysunku 1.

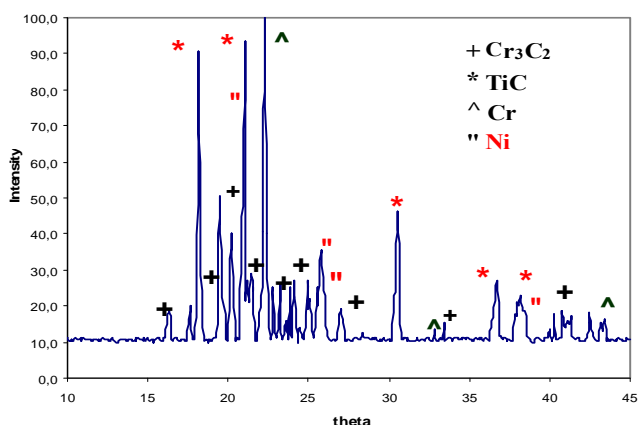


Rys. 1. Mikrostruktura stopu aluminium (AlMg10) zastosowanego na osnowę wytwarzanych kompozytów

Fig. 1. Microstructure of aluminium alloy (AlMg10) used on the composites matrix

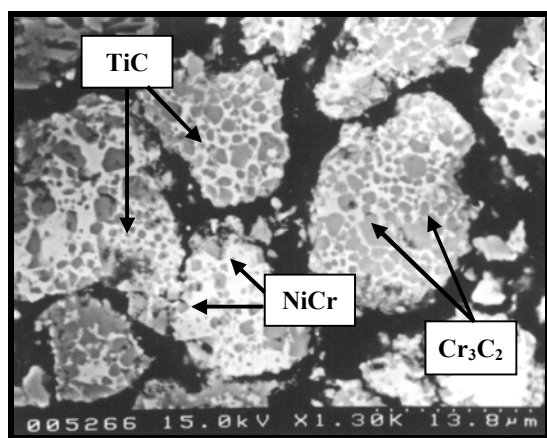
## Material zbrojenia

Do wytworzenia kompozytów zastosowano proszek kompozytowy, zawierający węgliki chromu i tytanu oraz fazę roztworu stałego NiCr (NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC). Proszek kompozytowy otrzymano w procesie samorozwijającej się syntezy wysokotemperaturowej (SHS) [18-20]. Skład fazowy oraz morfologię proszku zastosowanego do modyfikacji stopu osnowy pokazano na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Dyfraktogram proszku kompozytowego NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC zastosowanego do modyfikacji stopu AlMg10

Fig. 2. The diffraction pattern of initial NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC composite powder used for the AlMg10 alloy modification



Rys. 3. Morfologia proszku kompozytowego NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC zastosowanego do badań, powierzchnia proszku, zgląd, SEM

Fig. 3. The morphology of NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC composite powder used for the research, the powder surface, polished section, SEM

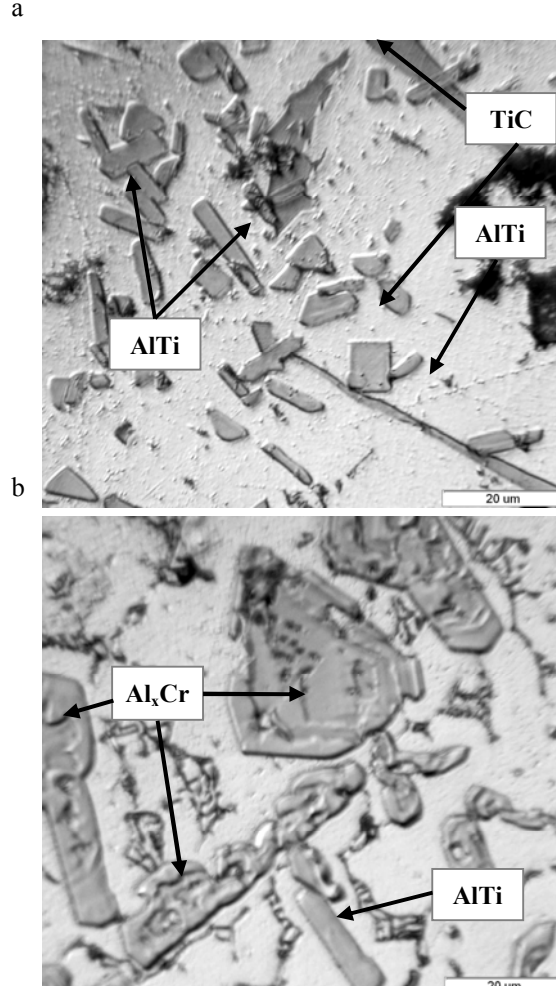
Proszek kompozytowy, o wielkości 20÷40 µm, wprowadzono do mieszanego mechanicznie ciekłego aluminium w zakresie temperatur od 720 do 740°C [1]. Uzyskaną zawiesinę kompozytową mieszano w czasie 10 minut i odlewano do formy grafitowej. W ten sposób wytworzono odlewy o różnym udziale objętościowym proszku kompozytowego odpowiednio: 15, 7,5 i 5%. Z otrzymanych kompozytów pobrano materiał do badań strukturalnych. Następnie wlewki kompozytowe przetopiono i odlewano do wirującej formy w celu uzyskania

odlewów odśrodkowych [2, 3]. Z wytworzonych tulei wycięto pierścienie (rys. 6a), które poddano analizie rozmieszczenia na przekroju poprzecznym odlewu.

Strukturę proszków oraz odlewów kompozytowych obserwowano na zglądach metalograficznych na mikroskopie Reichert MF2. Wybrane zglądy analizowano na mikroskopie skaningowym Hitachi z wyposażeniem EDX w systemie Voyager Firmy Norton. Skład fazowy proszków i odlewów kompozytowych badano na dyfraktometrze Philips z lampą miedzianą i węglowym filtrem wiązki. Dyfraktogramy analizowano z uwzględnieniem kart ASTM i programem X-Pert Software.

## WYNIKI BADAŃ STRUKTURALNYCH

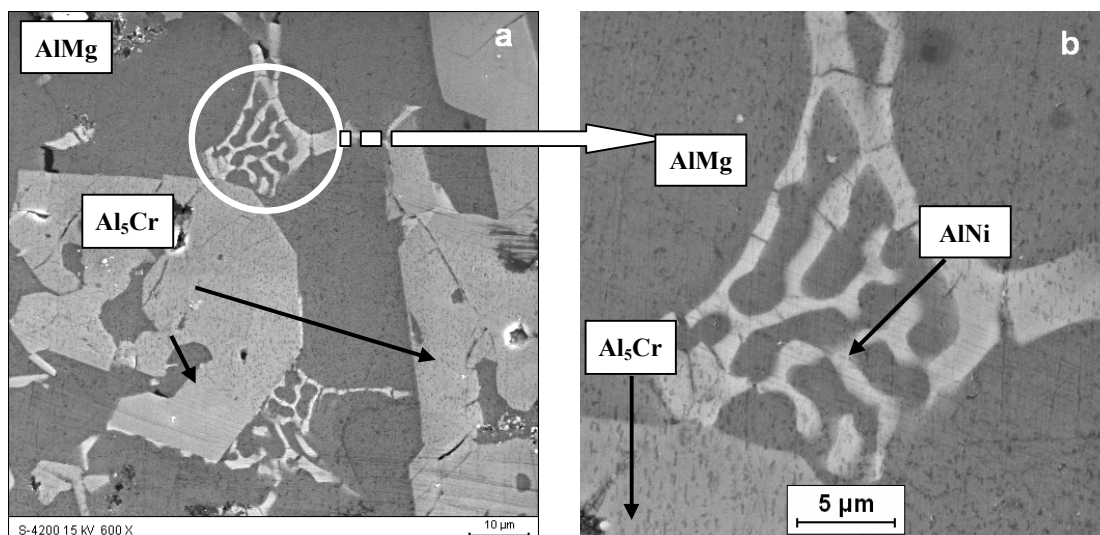
Heterofazową strukturę odlewu otrzymanego w wyniku wprowadzenia proszku kompozytowego NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC do stopu AlMg10 przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



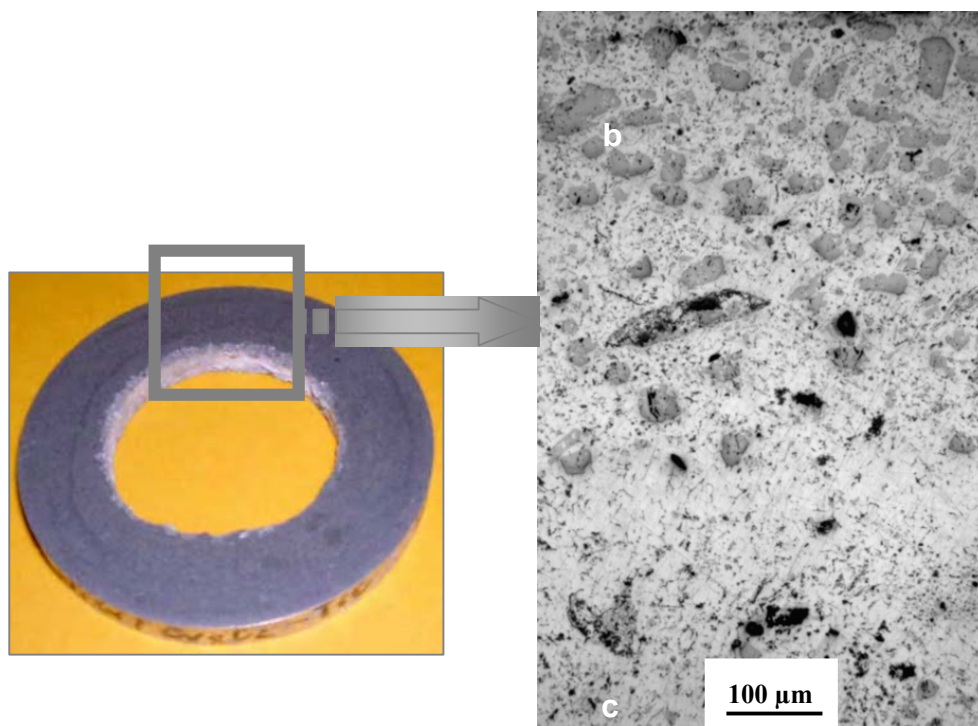
Rys. 4. Struktura kompozytowego odlewu AlMg10 z proszkiem kompozytowym NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC po odlewaniu grawitacyjnym

Fig. 4. The structure of composite casts, AlMg10 with NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC, composite powder after gravitational casting

Na podstawie badań strukturalnych oraz analizy rentgenowskiej potwierdzono obecność w osnowie alu-



Rys. 5. Struktura kompozytowego odlewu AlMg10 z proszkiem NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC uzyskana metodą mechanicznego mieszania  
 Fig. 5. The structure of composite casts, AlMg10 with NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC powder obtained by mechanical mixing method



Rys. 6. Struktura aluminium odlewu z proszkiem kompozytowym NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC uzyskana w procesie odlewania odśrodkowego: a) makrostruktura, b) obszar warstwy zewnętrznej, c) obszar warstwy wewnętrznej  
 Fig. 6. The structure of aluminium cast with NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-TiC composite powder obtaining by the centrifugal method: a) macrostructure, b) outside layer, c) inside layer

miniowej fazy o różnej dyspersji, morfologii i składzie chemicznym (rys. 4-6). Analiza rentgenowska składu fazowego odlewów, której szczegółowe wyniki przedstawiono w publikacji [24], wskazuje na małą odporność korozyjną węgla tytanu w stopie AlMg10 i jego przemianę do fazy AlTi. Badania rentgenowskie potwierdziły również występowanie węgla Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> [15, 16, 24]. Powstałe w procesie rozpuszczania wydzielania, większe od wielkości ziaren węgla chromu w proszku kompozytowym, są fazami typu Al<sub>5</sub>Cr i Al<sub>2</sub>Cr.

Z kolei wiążąca osnowa NiCr w kompozytowym proszku jest reaktywna w roztopionym aluminium, powoduje destrukcję jego kształtu oraz powstanie faz typu NiAl (rys. 5).

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdziły, że istnieje technologiczna możliwość wytwarzania kompozytowych odlewów z osnową aluminium umocnioną węg-

likami chromu i tytanu. Mając na uwadze właściwości roztopionego aluminiowego kompozytu i parametry technologiczne procesu odlewania odśrodkowego, korzystnie jest wytwarzać stop z 7,5% udziałem faz umacniających (rys. 6). Wytworzone kompozyty typu AIMCs charakteryzują się strukturą o różnej dyspersji faz, które powstały z rozpuszczania węglików i NiCr w osnowie aluminiowej. Kontynuowane badania uwzględniają korektę parametrów technologicznych wytwarzania kompozytów oraz badania właściwości mechanicznych i tribologicznych. 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 [9-12, 24].

## LITERATURA

- [1] Śleziona J., Kształtowanie właściwości kompozytów stop Al-cząstki ceramiczne wytwarzanych metodami odlewniczymi, ZN Politechniki Śląskiej, Hutnictwo nr 47, Gliwice 1994.
- [2] Dolata-Grosz A., Śleziona J., Czynniki determinujące kształtowanie struktury w kompozytach Al-cząstki ceramiczne w procesie odlewania odśrodkowego, Inżynieria Materiałowa 2003, 6 (137), 613-616.
- [3] Dolata-Grosz A., Śleziona J., Wieczorek J., Dyzia M., Structure and functional quality properties of composites sleeves obtaining by centrifugal casting, Acta Metallurgica Slovaca 2002, 8, 2, 283-288.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Fraś E., Janas A., Kolbus A., Odlewany kompozyt aluminiowy *in situ* umacniany cząstkami borków tytanu, Kompozyty (Composites) 2001, 1, 1, 23-27.
- [7] Fraś E., Janas A., Wierzbiński S., Kolbus A., Odlewane aluminiowe kompozyty *in situ*, umacniane węglnikami tytanu, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa Zapewnienie jakości w odlewnictwie 2000, Krzepnięcie Metali i Stopów PAN 2000, 2, 43, 167-176.
- [8] Fraś E., Janas A., Kolbus A., Górny M., Synteza kompozytów *in situ* Al-TiC oraz Cu-TiC z wykorzystaniem gazu reaktywnego, Inżynieria Materiałowa 2000, 21, 2, 48-55.
- [9] 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.
- [10] Dolata-Grosz A., Formanek B., Śleziona J., Wieczorek J., Al-FeAl-TiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite with hybrid reinforcement, COMMENT 2005, 13th Int. Sc. Con. Achievements in Materials and Mechanical Engineering AMME 2005, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, w druku.
- [11] Dyzia M., Śleziona J., Dolata-Grosz A., Wieczorek J., Application of Al-FeOTiO<sub>2</sub> System to the Preparing of In-Situ Aluminium Composites Reinforced with Ceramic and Intermetallic Phases, European Congress on Advanced Materials and Process, Euromat 2002, Lozanna.
- [12] 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.
- [13] Zyska A., Braszczyńska-Malik K.N., Struktura kompozytów Al-(TiB<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>p</sub> wytwarzanych metodą *in situ*, Kompozyty (Composites) 2004, 4, 11, 236-240.
- [14] Yoshimi Watanabe, Tatsuru Nakamura, 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.
- [15] Formanek B., Swadźba L., Szymański K., Microstructure and corrosion resistance of HVOF sprayed chromium and chromium carbides coatings, Materials Week, Cincinnati, USA, October 1996.
- [16] Formanek B., Szymański K., Szczucka-Lasota B., Bierska B., Kompozytowe proszki i natryskiwane cieplnie powłoki z osnową NiCr i fazami międzymetalicznymi, Inżynieria Materiałowa 2003, 6 (137), 412-416.
- [17] Formanek B., Bielajew K., Szymański K., Szala J., Talaiko T., Struktura kompozytowego proszku NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, TiC otrzymywanego w procesie samorozwijającej się syntezy wysokotemperaturowej, IX Seminarium Naukowe Nowe Technologie i Materiały w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Katowice, maj 2001, 287-290.
- [18] Formanek B., Szymański K., Szczucka-Lasota B., Structure of composite powders with Ni-Cr matrix and FeAl phases, carbides and aluminium oxide, Kompozyty (Composites) 2002, 2, 5, 278-282.
- [19] He J., Ice M., Lavernia E.J., Synthesis and Characterization of Nanostructures Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr Elsevier Science, Nanostructure Materials 1998, 10, 8, 1271-1283.
- [20] Pandey A.B., Mishra R.S., Mahajan Y.R., Effect of isothermal heat treatment on the creep behavior of an Al-TiCp composite, Materials Science and Engineering 1996, A206, 270-278.
- [21] Velgosova O., Besterci M., Influence of stain rate and temperature on fracture mechanism of dispersion strengt, hened Al-12Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> system, Materials Letters 2003, 57, 4014-4017.
- [22] Schuster J.C., Du Y., Thermodynamic description of the system Ti-Cr-C, Calphad 1999, 23, 3, 393-408.
- [23] Morsi K., McShane H., McLean M., Effect of specimen size on the composition of hot extrillion reaction synthesized NiAl, Journal of Materials Science Letters 2000, 19, 331-332.
- [24] Dolata-Grosz A., Formanek B., Śleziona J., Aluminium ma-trix cast composites (AIMCCs) with hybrid reinforcement, 46th Int. Sc. Con. Foundry - Solidification and Crystallisation FOUND 2005 in Comment 2005, Archieve of Foundry 2005, 5, 15 (w druku).

Recenzent  
Józef Gawroński