

KOMPOZYTY ODLEWANE NA OSNOWIE STOPU Al-Si ZBROJONE FAZAMI
MIĘDZYMETALICZNYMI

CAST Al-Si MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH INTERMETALLIC PHASES

Jan Szajnar, Mirosław Cholewa, Tomasz Wróbel, Tomasz Szuter

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Odlewnictwa, ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice
Silesian University of Technology, The Faculty of Mechanical Engineering, Department of Foundry Engineering,
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice

E-mail: miroslaw.cholewa@polsl.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań mikrostruktury oraz wybranych właściwości mechanicznych kompozytu na osnowie stopu EN AC-AISi11 ze zbrojeniem w postaci cząstek stopu Cr-Fe-C (kompozyt ex situ) oraz węglikoazotków Ti, Zr, V (kompozyt in situ). Badania mikrostruktury prowadzono przy użyciu mikroskopu świetlnego i elektronowego skaningowego z systemem EDS. W ramach badań właściwości użytkowych określono twardość, odporność na zużycie ściernie, udarność oraz wytrzymałość na rozciąganie, granicę plastyczności i wydłużenie kompozytu w stanie surowym oraz po obróbce cieplnej, tj. utwardzaniu wydzieleniowym oraz wyżarzaniu. Ponadto przedstawiono technologię odlewu tarczy hamulcowej z kompozytu zbrojonego fazami międzymetalicznymi.

Słowa kluczowe: kompozyt, aluminium, krzem, węgliki, azotki, właściwości mechaniczne, tarcza hamulcowa

Abstract

In the present paper research results of microstructure and selected mechanical properties of composite on EN AC-AISi11 alloy matrix with reinforcement in the form of particle of Cr-Fe-C alloy (composite ex situ) and carbonitrides Ti, Zr, V (composite in situ) are presented. Metallographic studies were performed with the use of light microscope and with scanning electron microscope with EDS. Within the studies of performance characteristics measurements of hardness, abrasive wear resistance, impact resistance, tensile strength, yield point and elongation in as cast state and after heat treatment i.e. precipitation hardening and annealing were taken. Moreover the manufacturing method of brake disc casting from the studied composite with intermetallic phases reinforcement is presented.

Keywords: composite, aluminum, silicon, carbides, nitrides, mechanical properties, brake disc

Wprowadzenie

Kompozyty z osnową aluminiową są bardzo atrakcyjnym materiałem konstrukcyjnym, który charakteryzuje się wysokimi właściwościami trybologicznymi i mechanicznym w połączeniu z bardzo korzystną proporcją wytrzymałości do jego gęstości. Właściwości użytkowe tych kompozytów zależą od rodzaju, wielkości i udziału objętościowego cząstek fazy wzmacniającej, a także od doboru osnowy oraz techniki wytwarzania. Najczęściej stosowaną metodą otrzymywania kompozytów MMC (*Metal Matrix Composite*) jest technika *ex situ*, polegająca na przygotowaniu w odrębnym procesie fazy zbrojącej, którą następnie wprowadza się do materiału osnowy np. metodą mieszania. Natomiast w technice *in situ* faza

Introduction

Composites with aluminium matrix are a very attractive construction material characterised by high tribological and mechanical properties along with a favourable ratio of strength and density. The performance characteristics of these composites depend from the type, size and volume fraction of the reinforcement phase particles, and also from the choice of the matrix and manufacturing method. The most frequently used method of manufacturing the MMC (*Metal Matrix Composite*) composites is the *ex situ* technique consisting in preparing the reinforcement phase in a separate process which is then introduced into the matrix material by e.g. stirring method. However, in the *in situ* technique the reinforcement

wzmacniająca powstaje w wyniku reakcji chemicznych zachodzących pomiędzy składnikami stopu w kąpieli metalowej [1–7].

Kompozyty na osnowie stopów aluminium zbrojone cząstkami ceramicznymi i fazami międzymetalicznymi znajdują zastosowanie w przemyśle maszynowym, motoryzacyjnym oraz lotniczym [2, 3, 5 i 6].

Na właściwości mechaniczne kompozytów istotnie wpływają: rodzaj, wielkość i kształt faz zbrojących oraz struktura osnowy. W związku z tym, istnieje możliwość kształtowania właściwości użytkowych odlewu kompozytowego na osnowie stopów Al-Si zarówno poprzez dobór techniki wytwarzania np. *ex situ* i/lub *in situ*, jak i poprzez obróbkę cieplną np. utwardzanie wydzieleniowe.

Zakres badań

Celem pracy było określenie wpływu rodzaju zbrojenia w postaci węglików i azotków Cr, Ti, Zr oraz V, wprowadzanych w pierwszym przypadku w technice *in situ* oraz w drugim zarówno w technice *ex situ*, jak i *in situ*, na wybrane właściwości mechaniczne kompozytu odlewane na osnowie stopu EN AC-ALSi11 w stanie surowym oraz po obróbce cieplnej.

W ramach pracy wykonano kompozytowe odlewy próbne walcowe o średnicy 20 mm i wysokości 180 mm, wprowadzając zbrojenie w postaci 10% aktywowanych powierzchniowo związkami boru i sodu cząstek *ex situ* ze stopu Cr-Fe-C o granulacji 1 mm i składzie chemicznym Cr \approx 66%, Fe \approx 28%, C \approx 6% oraz w technice *in situ* w postaci zapraw AlTiC (Ti = 3%, C = 0,15%), AlTiB (Ti = 5%, B = 1%), AlZr (Zr = 10%) i AlV (V = 10%). Dodatkowo do wytworzenia kompozytu *in situ* zastosowano przedmuchiwanie kąpieli metalowej zdysocjowanym termicznie azotem.

Dla wykonanych odlewów kompozytowych przeprowadzono obróbkę cieplną, tj. w pierwszym wariantcie utwardzanie wydzieleniowe polegające na przesycaaniu z temperatury 520°C i starzeniu w temperaturze 180°C oraz w drugim wariantcie wyżarzanie w temperaturze 520°C z chłodzeniem na wolnym powietrzu.

Przeprowadzono badania metalograficzne mikroskopowe zarówno przy użyciu mikroskopu świetlnego Nikon, jak i elektronowego skaningowego InspectF z systemem EDS. Zgłady metalograficzne trawiono w odczynniku [8]: Mi1Al o składzie: 0,5 cm³ kwasu fluorowodorowego i 90,5 cm³ wody.

W ramach badań właściwości użytkowych odlanych kompozytów, określono wytrzymałość na rozciąganie R_m , umowną granicę plastyczności $R_{p0,2}$ oraz wydłużenie A_5 na podstawie statycznej próby rozciągania. Dodatkowo wyznaczono udarność KCV, twardość HB oraz odporność na zużycie ściernie typu metal-minerał wg ASTM G65-00 [9], której miarą był ubytek masy próbki Δm .

phase is obtained as a result of chemical reactions between the components of the alloy in the melt [1–7].

Composites on aluminium alloy matrices reinforced with ceramic particles and intermetallic phases are used in engineering, automotive and aerospace industries [2, 3, 5 i 6].

The mechanical properties of composites are significantly affected by: the type, size and shape of the reinforcing phases and the matrix structure. Consequently, it is possible to influence the performance characteristics of the composite Al-Si alloy matrix casts both by the choice of the manufacturing technique e.g. *ex situ* and/or *in situ*, and by the heat treatment e.g. precipitation hardening.

Scope of the research

The aim of the research was to describe the influence of the type of the reinforcement consisting of carbides and nitrides Cr, Ti, Zr and V, in the first case introduced with the *in situ* technique, and in the second case with both the *ex situ* and *in situ* techniques, on the chosen mechanical properties of the composite cast on EN AC-ALSi11 alloy matrix in as cast state and after heat treatment.

Within the research test composite cylindrical casts 20 mm in diameter and 180 mm high were produced with reinforcement of 10% of boron and sodium compounds surface activated *ex situ* Cr-Fe-C alloy particles of 1 mm grain size and chemical composition Cr \approx 66%, Fe \approx 28%, C \approx 6% and with *in situ* technique in the form of AlTiC mortars (Ti = 3%, C = 0.15%), AlTiB (Ti = 5%, B = 1%), AlZr (Zr = 10%) and AlV (V = 10%). Additionally, in the production of the *in situ* composite blowing the melt with thermally dissociated nitrogen was used.

The produced composite casts were subject to heat treatment, i.e. in the first case precipitation hardening consisting in quenching from 520°C and aging in 180°C and in the second case annealing in 520°C with cooling in the open air.

Metallographic microscopic studies were conducted with the use of both Nikon light microscope as well as the InspectF scanning electron microscope with EDS system. Metallographic sections were etched in the reagent [8]: Mi1Al composed of: 0.5 cm³ of hydrofluoric acid and 90.5 cm³ of water.

Within the studies of performance characteristics of the cast composites the following properties were defined: tensile strength R_m , yield point $R_{p0,2}$ and elongation A_5 based on a static tensile test. Moreover, the KCV impact resistance, HB hardness and metal-mineral abrasive wear resistance according to ASTM G65-00 [9], which was measured by the weight loss of the sample Δm were determined.

Natomiast w celu wykonania technologicznie użytecznego odlewu tarczy hamulcowej z kompozytu na osnowie stopu EN AC-ALSi11 zbrojonego fazami międzymetalicznymi, zastosowano metody odlewania kokilowego oraz wytapianych modeli.

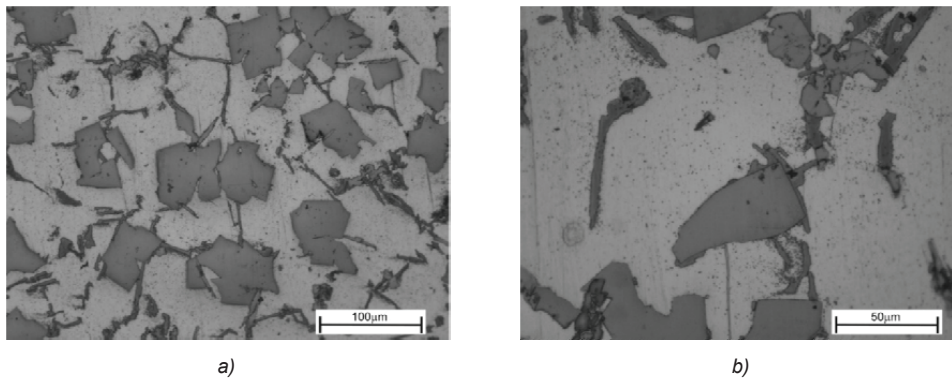
Wyniki badań i ich analiza

Mikrostrukturę kompozytu odlewane go na osnowie stopu EN AC-ALSi11 ze zbrojeniem w postaci cząstek stopu Cr-Fe-C o strukturze węglkowej, głównie Cr_xC_y oraz rzadziej Fe_xC_y (kompozyt *ex situ*) i/lub węglikoazotkami Ti, Zr oraz V (kompozyt *in situ*) przedstawiono na rysunku 1 i 2. Natomiast na rysunku 3 i 4 oraz w tabeli 1 i 2 przedstawiono mikrostrukturę badanych kompozytów wraz z wynikami punktowej mikroanalizy składu chemicznego w wybranych, charakterystycznych obszarach.

However, for the production of a technologically useful cast of a brake disc made of EN AC-ALSi11 alloy matrix composite reinforced with intermetallic phases the methods of die-casting and lost-wax casting were used.

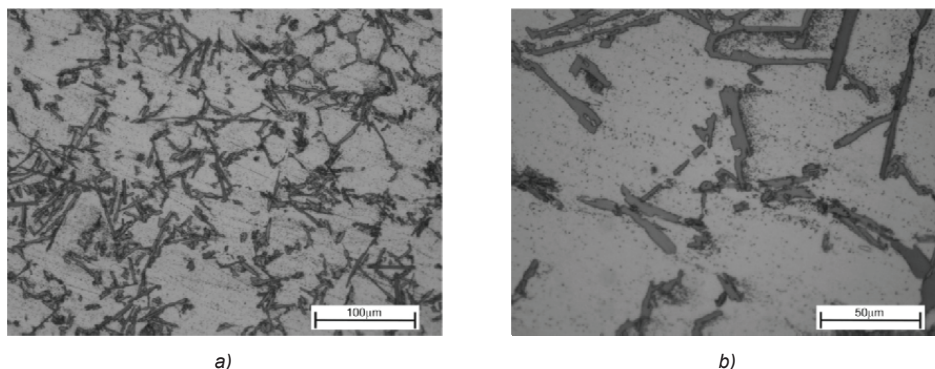
The results of the research and analysis

The microstructure of the EN AC-ALSi11 alloy matrix composite reinforced with Cr-Fe-C alloy particles of carbide structure, mainly Cr_xC_y and less frequently Fe_xC_y (ex situ composite) and/or carbonitrides Ti, Zr and V (in situ composite) are presented in Figures 1 and 2. And Figures 3 and 4, and Tables 1 and 2 present the microstructure of the studied composites along with the results of punctual microanalysis of the chemical composition in chosen, characteristic fields.



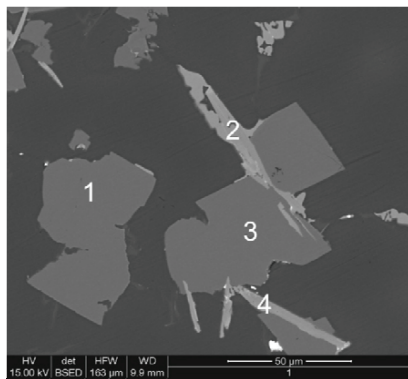
Rys. 1. Mikrostruktura kompozytu odlewane go na osnowie stopu EN AC-ALSi11 – α (Al) + (α (Al) + β (Si)) – zbrojone go cząstkami węglkowymi stopu Cr-Fe-C oraz węglikoazotkami Ti, Zr i V

Fig. 1. Microstructure of EN AC-ALSi11 alloy matrix cast composite – α (Al) + (α (Al) + β (Si)) – reinforced with carbide particles of Cr-Fe-C alloy and carbonitrides Ti, Zr and V



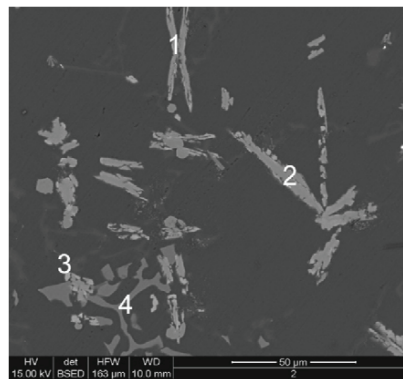
Rys. 2. Mikrostruktura kompozytu odlewane go na osnowie stopu EN AC-ALSi11 – α (Al) + (α (Al) + β (Si)) – zbrojone go węglikoazotkami Ti, Zr i V

Fig. 2. Microstructure of EN AC-ALSi11 alloy matrix cast composite – α (Al) + (α (Al) + β (Si)) – reinforced with carbonitrides Ti, Zr and V



Rys. 3. Mikrostruktura kompozytu odlewanego na osnowie stopu EN AC-ALSi11 zbrojonego cząstkami węglkowymi stopu Cr-Fe-C oraz węglikoazotkami Ti, Zr i V (punkty 1–4 to miejsca wykonania analiz chemicznych, patrz tab. 1)

Fig. 3. Microstructure of EN AC-ALSi11 alloy matrix cast composite reinforced with carbide particles of Cr-Fe-C alloy and carbonitrides Ti, Zr and V (marks 1–4 are fields of microanalysis of chemical composition, see Table 1)



Rys. 4. Mikrostruktura kompozytu odlewanego na osnowie stopu EN AC-ALSi11 zbrojonego węglikoazotkami Ti, Zr i V (punkty 1–4 to miejsca wykonania analiz chemicznych, patrz tab. 2)

Fig. 4. Microstructure of EN AC-ALSi11 alloy matrix cast composite reinforced with carbonitrides Ti, Zr and V (marks 1–4 are fields of microanalysis of chemical composition, see Table 2)

Tabela 1. Wyniki mikroanalizy składu chemicznego w obszarach widocznych na rysunku 3
Table 1. Results of microanalysis of chemical composition in the fields presented in Figure 3

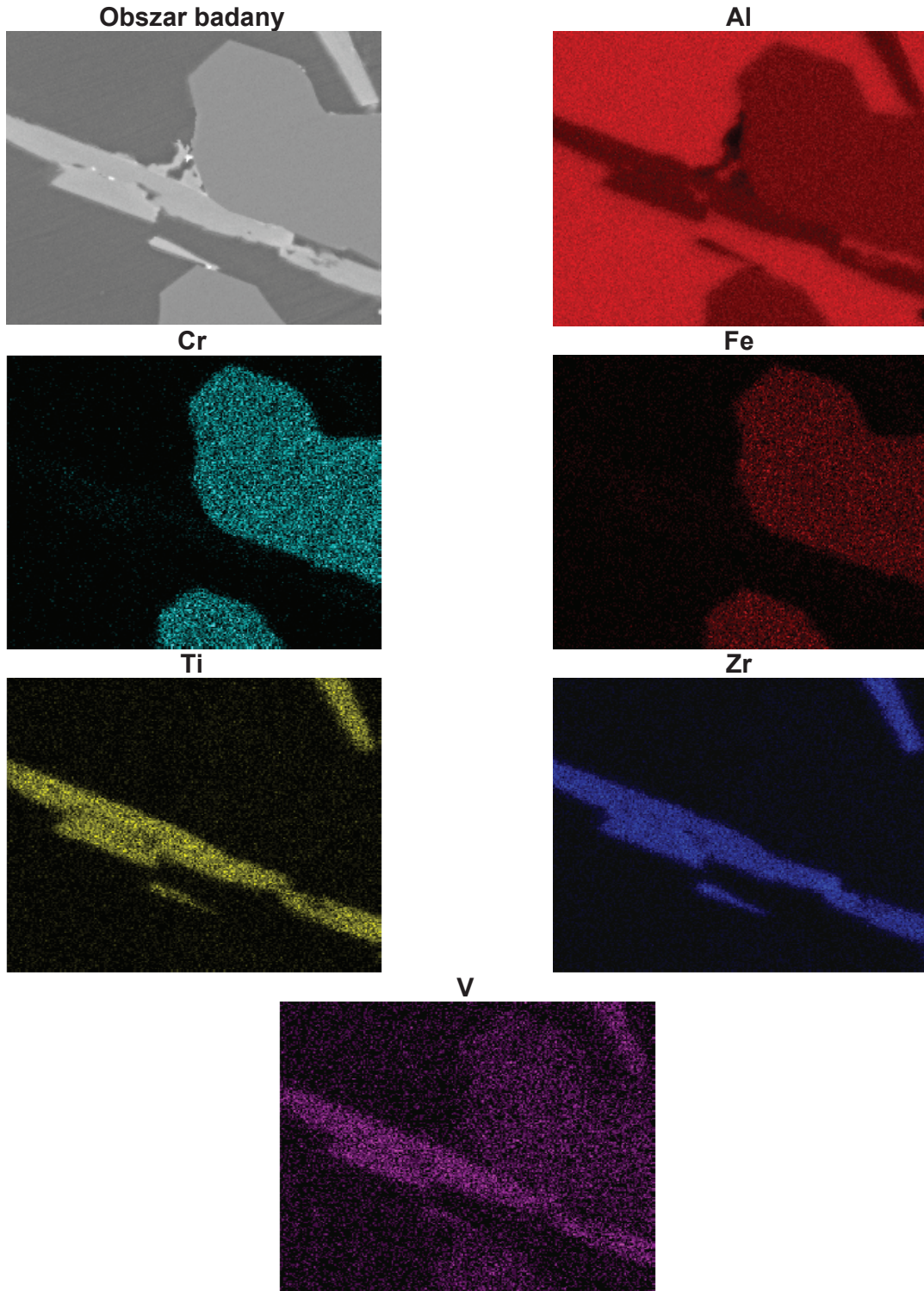
Pierwiastek Element	Stężenie składników (% mas.) w obszarze nr The concentration of ingredients (wt. %) in the field no			
	1	2	3	4
Al	63,4	47,6	63,2	43,2
Si	9,0	6,1	8,6	12,7
Zr	-	29,1	-	30,2
Ti	-	12,7	-	11,6
V	1,6	1,7	1,6	1,4
Cr	13,5	0,9	14,8	1,0
Fe	12,5	1,9	11,8	-

Tabela 2. Wyniki mikroanalizy składu chemicznego w obszarach widocznych na rysunku 4
Table 2. The results of microanalysis of chemical composition in the fields presented in Figure 4

Pierwiastek Element	Stężenie składników (% mas.) w obszarze nr The concentration of ingredients (wt. %) in the field no			
	1	2	3	4
Al	50,3	50,4	52,4	63,4
Si	6,2	6,6	7,6	9,6
Zr	21,9	21,8	31,7	-
Ti	14,3	14,1	6,6	-
V	7,3	7,2	1,7	7,6
Mn	-	-	-	1,1
Fe	-	-	-	18,3

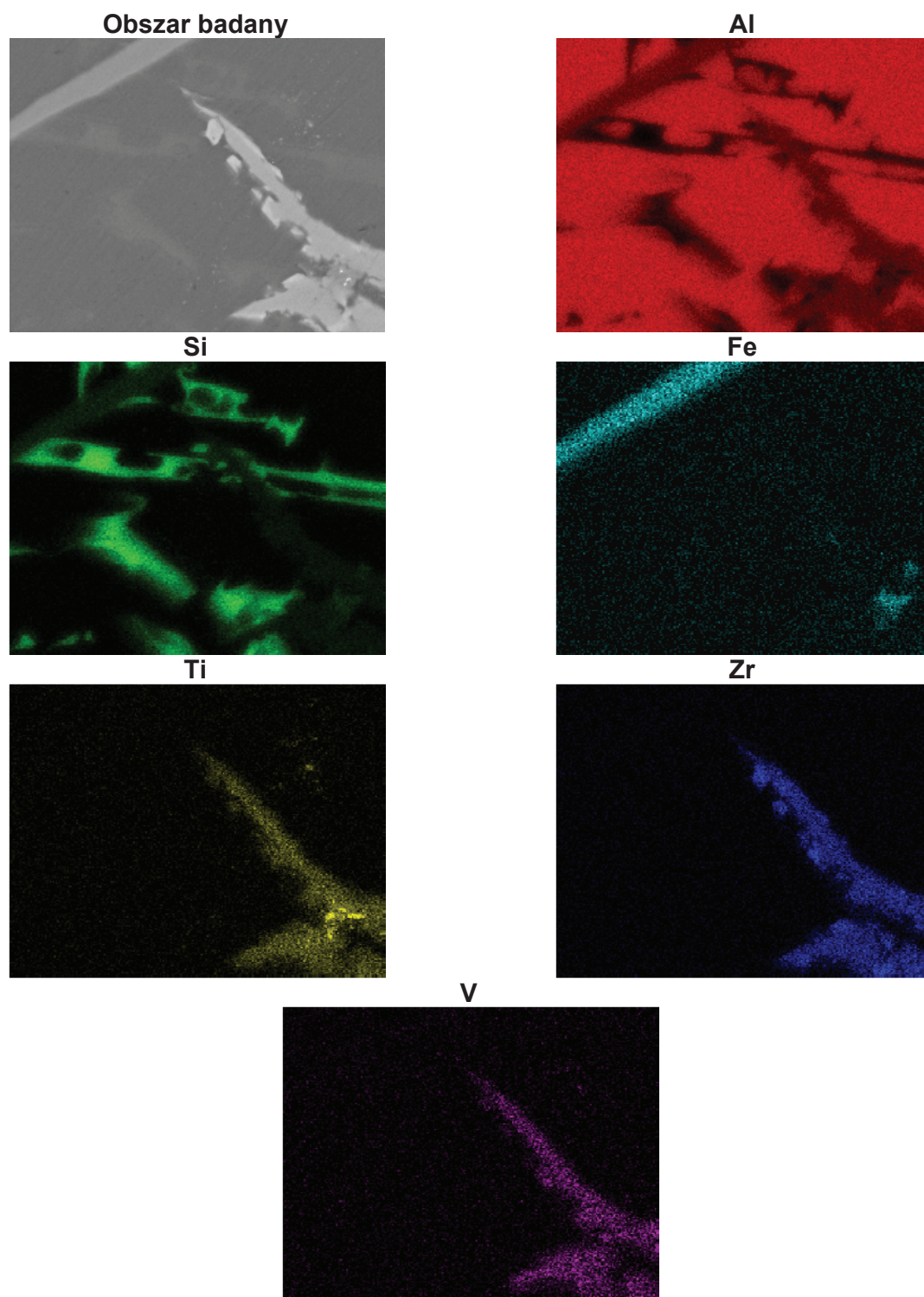
Wynik powierzchniowej mikroanalizy składu chemicznego przedstawiono na rysunku 5 i 6. Obok osnowy widoczne są fazy zbrojące w postaci cząstek węglkowych stopu Cr-Fe-C i/lub węglikoazotków Ti, Zr oraz V.

The result of the surface microanalysis of the chemical composition is presented in Figures 5 and 6. Next to the matrix there are reinforcing phases consisting of carbide Cr-Fe-C alloy particles and/or carbonitrides Ti, Zr and V visible.



Rys. 5. Powierzchniowy rozkład pierwiastków w kompozycie odlewany na osnowie stopu EN AC-AISi11 zbrojonego cząstkami węglkowymi stopu Cr-Fe-C oraz węglikoazotkami Ti, Zr i V

Fig. 5. Surface distribution of elements in EN AC-AISi11 alloy matrix cast composite reinforced with carbide particles of Cr-Fe-C alloy and carbonitrides Ti, Zr and V

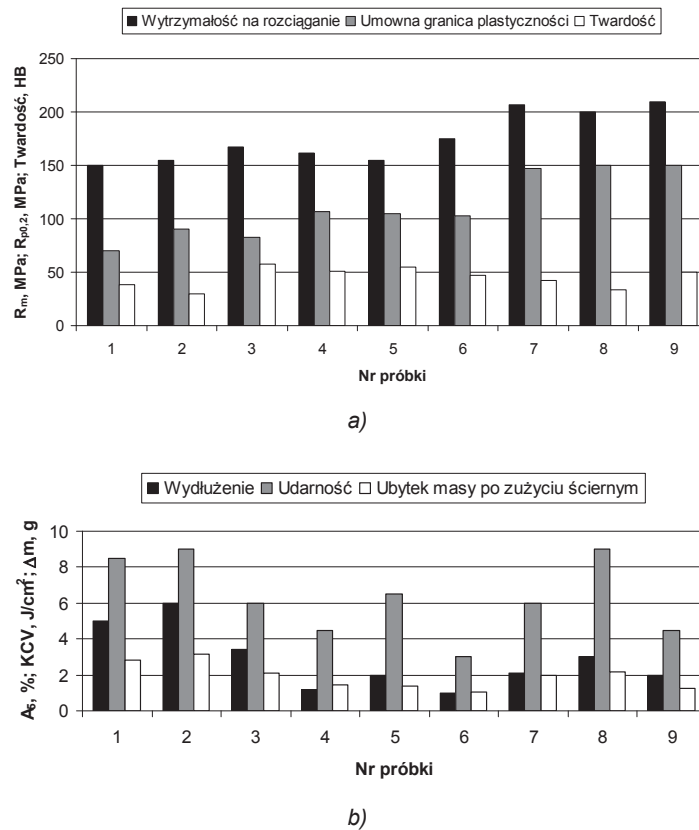


Rys. 6. Powierzchniowy rozkład pierwiastków w kompozycie odlewany na osnowie stopu EN AC-ALSi11 zbrojonego węglikoazotkami Ti, Zr i V

Fig. 6. Surface distribution of elements in EN AC-ALSi11 alloy matrix cast composite reinforced with carbonitrides Ti, Zr and V

Technika wytworzenia kompozytu, tj. *ex-situ* lub/ *in-situ* wpływając na rodzaj, wielkość oraz kształt faz zbrojącej istotnie oddziałuje również na jego właściwości użytkowe (rys. 7).

The manufacturing technology i.e. *ex-situ* and/or *in-situ* influencing the type, size and shape of the reinforcing phase also substantially influences its performance characteristics (Fig. 7).



Rys. 7. Właściwości mechaniczne badanych próbek: 1 – stop EN AC- $AlSi11$ w stanie surowym, 2 – stop EN AC- $AlSi11$ po wyżarzaniu, 3 – stop EN AC- $AlSi11$ po utwardzaniu wydzieleniowym, 4 – kompozyt odlewany na osnowie stopu EN AC- $AlSi11$ zbrojony cząstkami węglowymi stopu Cr-Fe-C oraz węglikoazotkami Ti, Zr i V w stanie surowym, 5 – tj. próbka nr 4, ale po wyżarzaniu, 6 – tj. próbka nr 4, ale po utwardzaniu wydzieleniowym, 7 – kompozyt odlewany na osnowie stopu EN AC- $AlSi11$ zbrojony węglikoazotkami Ti, Zr i V w stanie surowym, 8 – tj. próbka nr 7, ale po wyżarzaniu, 9 – tj. próbka nr 7, ale po utwardzaniu wydzieleniowym

Fig. 7. Mechanical properties of studied samples: 1 – EN AC- $AlSi11$ alloy in initial state, 2 – EN AC- $AlSi11$ alloy after annealing, 3 – EN AC- $AlSi11$ alloy after precipitation hardening, 4 – EN AC- $AlSi11$ alloy matrix cast composite reinforced with carbide particles of Cr-Fe-C alloy and carbonitrides Ti, Zr and V in initial state, 5 – i.e. sample 4 but after annealing, 6 – i.e. sample 4 but after precipitation hardening, 7 – EN AC- $AlSi11$ alloy matrix cast composite reinforced with carbonitrides Ti, Zr and V in initial state, 8 – i.e. sample 7 but after annealing, 9 – i.e. sample 7 but after precipitation hardening

Kompozyty charakteryzują się wyższymi właściwościami wytrzymałościowymi w porównaniu do stopu EN AC- $AlSi11$. Jednocześnie obecność zbrojenia, szczególnie *ex situ*, decyduje o obniżeniu właściwości plastycznych w porównaniu do stopu bazowego Al-Si. Szczególnie wysoka wytrzymałość na rozciąganie, granica plastyczności oraz twardość możliwa jest do uzyskania w wyniku jednoczesnego użycia zbrojenia w postaci cząstek węglowych stopu Cr-Fe-C oraz węglikoazotków Ti, Zr i V. Natomiast najwyższą odporność na zużycie ścierne typu metal-minerał uzyskano w kompozycie, w którym fazę zbrojącą stanowiły jedynie cząstki stopu Cr-Fe-C. Ponadto stwierdzono,

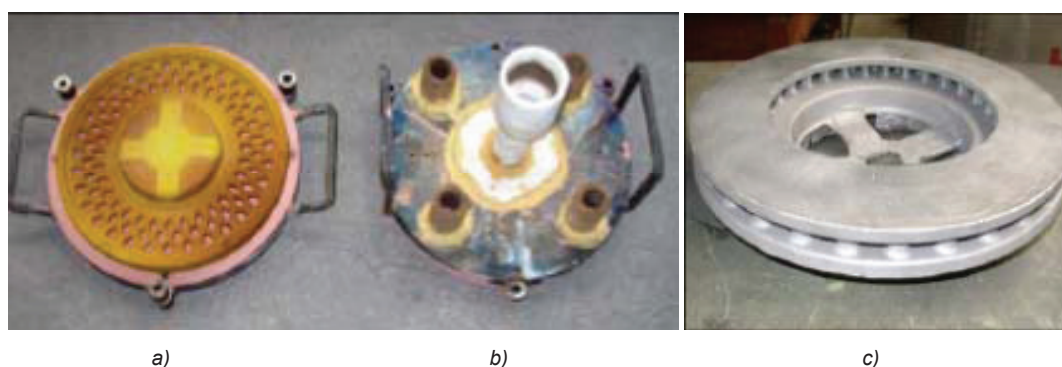
Composites are characterised by higher resistance in comparison to EN AC- $AlSi11$ alloy. At the same time the presence of the reinforcement, especially *ex situ*, decides about lowering the plastic properties in comparison to the basic Al-Si alloy. Especially the high tensile strength, yield point and hardness are possible to obtain as a result of simultaneous usage of carbide particles of Cr-Fe-C alloy and carbonitrides Ti, Zr and V as a reinforcement. The highest metal-mineral abrasive wear resistance can be achieved in a composite in which the reinforcement phase consisted only of Cr-Fe-C alloy particles. Moreover, it was stated that the strength properties of the compos-

że właściwości wytrzymałościowe kompozytów można nieznacznie zwiększyć stosując zabieg utwardzania wydzieleniowego. Jednakże uzyskany tym sposobem wzrost wytrzymałości jest niewielki, co decyduje o braku ekonomicznego uzasadnienia do jego przeprowadzenia. Z kolei zastosowanie zabiegu wyżarzania kompozytu zapewnia wzrost jego właściwości plastycznych, bez pogorszenia wytrzymałości.

Ponadto w ramach prowadzonych badań wykonano z badanego kompozytu na osnowie stopu EN AC-AISi11 zbrojonego fazami międzymetalicznymi (*ex-situ* i *in-situ*) odlew tarczy hamulcowej. Z uwagi na zwiększoną odporność na zużycie ściernie kompozytu, konieczne było uzyskanie elementu o wysokiej jakości powierzchni i dokładnym odwzorowaniu kształtu. W związku z tym zastosowano metodę odlewania kokilowego (rys. 8) oraz wytapianych modeli (rys. 9). Stwierdzono, że umożliwiają one wykonanie technologicznie użytecznych odlewów kompozytowych tarcz hamulcowych.

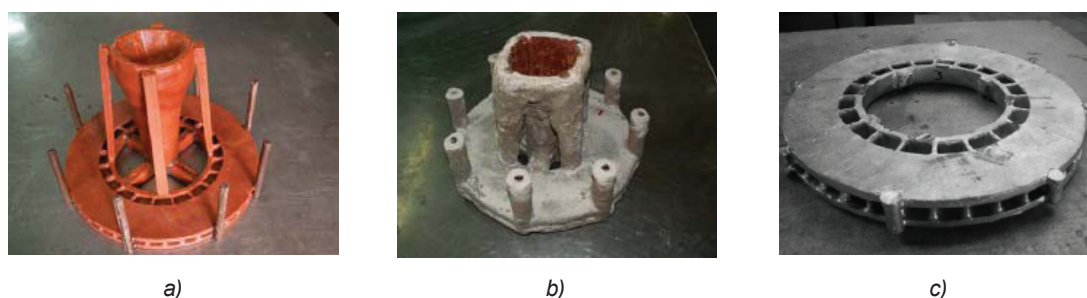
ities can be slightly increased by using precipitation hardening treatment. However, the increase in resistance obtained in this way is small which decides about the lack of economic justification for its conduct. On the other hand, performing annealing of the composite provides increase of its plastic properties without reducing strength.

What is more, within the conducted research a cast of a brake disc was produced from the studied EN AC-AISi11 alloy matrix composite reinforced with intermetallic phases (*ex-situ* and *in-situ*). Due to higher abrasive wear resistance it was necessary to produce an element characterised by high quality of the surface and carefully reproduced shape. Thus, the methods of die-casting (Fig. 8) and lost-wax casting (Fig. 9) were used. It was found that they allow to produce technologically useful composite castings for brake discs.



Rys. 8. Dolna części kokili z rdzeniem (a), górna części kokili z układem zasilania (b) oraz kokilowy odlew kompozytowej tarczy hamulcowej (c)

Fig. 8. The bottom part of permanent mould with core (a), upper part of permanent mould with gating system (b) and composite cast of a brake disc (c)



Rys. 9. Model (a), forma (b) oraz odlew kompozytowy tarczy hamulcowej wykonany z zastosowaniem metody wytapianych modeli (c)

Fig. 9. The model (a), mould (b) and composite cast of a brake disc with use of lost-wax process (c)

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że połączone oddziaływanie wprowadzanego zbrojenia *ex situ* z przedmuchiwaniem kąpieli metalowej zdysocjowanym termicznie azotem, pozwoliło na uzyskanie kompozytu o wysokich właściwościach wytrzymałościowych w porównaniu do tradycyjnego stopu Al-Si. Dodatkowo wykazano, że zastosowanie odpowiedniej obróbki cieplnej umożliwiło zwiększenie właściwości mechanicznych kompozytu *ex situ* i/lub *in situ*.

Dalsze badania ukierunkowane na zastosowanie technologii odlewania kokilowego i metody wytapianych modeli umożliwiły wykonywanie technologicznie użytecznych kompozytowych tarcz hamulcowych. W obu metodach istnieje możliwość łatwego kształtowania skomplikowanej geometrii kanałów wentylacyjnych. Dodatkowo zastosowanie odlewania kokilowego stwarza możliwość sterowania jakością powierzchni tarczy poprzez zastosowanie odpowiednich rdzeni oraz pokryć kokili. Ponadto odlewanie kokilowe w porównaniu do odlewania z zastosowaniem metody wytapianych modeli posiada dodatkowe zalety wynikające z możliwości uzyskania dużej prędkości krystalizacji sprawiającej, iż kokila działa jak typowy modyfikator, korzystnie rozdrabniając mikrostrukturę – szczególnie w obszarze bieżni tarczy hamulcowej.

Podziękowania

Prezentowane opracowanie jest częścią merytoryczną badań zrealizowanych w projekcie zamawianym PBZ-KBN-114/T08/2004 pt. „Nowoczesne tworzywa i procesy technologiczne w odlewnictwie”, zad. II 4.1.

Literatura/References

1. Rajnesh T. (2005). Synthesis and terminological characterization of in situ cast Al-TiC composites. *Wear*, 259(1–6), 569–576.
2. Fraś, E., Kolbus, A., Janas, A. (2003). Wpływ rodzaju fazy wzmacniającej na naprężenie płynięcia plastycznego wybranych kompozytów MMCs o osnowie aluminiowej. *Kompozyty*, 3(6), 120–124.
3. Fraś, E., Janas, A., Kolbus, A. (2001). Odlewany kompozyt aluminiowy *in situ* umacniany cząstkami borków i tytanu. *Kompozyty*, 1(1), 23–27.
4. Gawroński, J., Szajnar, J., Cholewa, M. i in. (2005). Krzepnięcie i krystalizacja kompozytów z cząstkami oraz kompozytów powierzchniowych. *Przegląd Odlewnictwa*, 55(4), 216–230.
5. Cholewa, M. (1999). Kształtowanie struktury osnowy kompozytu z osnową aluminiowo-krzemową. *Krzepnięcie Metali i Stopów*, 1(40), 93–102.
6. Perzyk, M., Mysza, D. (2000). Opis metody wprowadzania i osadzania elementów zbrojących do osnowy technicznie użytecznych odlewów kompozytowych. *Krzepnięcie Metali i Stopów*, 2(44), 267–272.
7. Cholewa, M., Formanek, B. (2006). Kompozyty z metaliczną osnową i dyspersyjnym wzmocnieniem wytwarzane w połączonych procesach *in* i *ex situ*. *Archiwum Odlewnictwa*, 6(22), 119–126.
8. Sękowski, K., Piaskowski, J., Wojtowicz, Z. (1972). *Atlas struktur znormalizowanych stopów odlewniczych*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
9. ASTM G65-00: Test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. ASTM International, (1994).

Summary

On the basis of the conducted research it was shown that the combined influence of the introduced *ex situ* reinforcement along with blowing the melt with thermally dissociated nitrogen, allowed for producing composite characterised by high resistance in comparison to traditional Al-Si alloy. It was further found that the use of an appropriate heat treatment can increase the mechanical properties of the *ex situ* and/or *in situ* composite.

Further studies focused on applying die-casting and lost-wax casting methods made it possible to produce technologically useful composite brake discs. In both methods, complex geometry of ventilation ducts can be easily shaped. In addition, the use of die-casting makes it possible to control the quality of the disc surface by the use of appropriate cores and the mold covers. In addition, die-casting, compared to lost-wax casting method have the additional advantage of being able to achieve a high rate of crystallization, which makes the mould act as a typical modifier, preferably grinding the microstructure – especially in the area of brake disc track.

Acknowledgements

The present study is a part of the substantive research carried out in the ordered project PBZ-KBN-114/T08/2004 titled “Modern materials and manufacturing processes in casting”, ex. II 4.1.

