

Anna Dulęba*, Mirosław Cholewa

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Odlewnictwa, ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice, Poland

* Corresponding author. E-mail: Anna.Duleba@polsl.pl

Otrzymano (Received) 22.02.2010

MORFOLOGIA I SEGREGACJA FAZY WZMACNIAJĄCEJ W ODLEWANYM KOMPOZYCIE AISi-CrFeC

W pracy przedstawiono technologiczną i materiałową koncepcję wytwarzania kompozytów. Osnowę stanowił stop AISi12Cu2Fe, do którego wprowadzono cząstki CrFe36C9. Kompozyty zostały wytworzone w technice *ex situ* poprzez wprowadzenie cząstek do ciekłego stopu aluminium w piecu indukcyjnym i mieszanie zawiesiny kompozytowej w tyglu. Udział wagowy cząstek wynosił 10%, a czas mieszania 90 s. Wytworzoną zawiesinę kompozytową zalewano do form skorupowych. Proces kształtowania struktury podczas krzepnięcia odlewu kompozytowego jest zależny od wielu czynników, m.in. od wielkości i udziału objętościowego faz wzmacniających, a także od rodzaju i własności użytego wzmocnienia. Dlatego własności kompozytów mogą być kontrolowane poprzez zmianę typu, zawartości czy wielkości cząstek wzmacniających. Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu wielkości wprowadzanych cząstek CrFeC na rozmieszczenie fazy węglkowej w osnowie kompozytu. Analizowano segregację grawitacyjną. Koncepcję technologiczną przeprowadzonych badań oparto na założeniu, że chromowa osnowa wprowadzanych do stopu aluminium cząstek CrFeC ulegnie rozpuszczeniu, a powstałe fazy węglkowe stanowiąc będą rzeczywiste wzmocnienie kompozytu. Przeprowadzono badania struktury kompozytów, które obejmowały: ocenę udziału objętościowego fazy wzmacniającej, obserwacje zglądów na mikroskopie optycznym i skaningowym. Dokonano ilościowej analizy rozmieszczenia fazy wzmacniającej. Ilościową analizę fazową wykonano metodami dyfrakcji promieni rentgenowskich na dyfraktometrze. Do identyfikacji faz zastosowano analizę punktową.

Słowa kluczowe: kompozyt, dyspersja, fazy wzmacniające, struktura

MORPHOLOGY AND SEGREGATION REINFORCED PHASE IN AISi-CrFeC COMPOSITE CAST

In this paper technological and material conception of composites manufacturing was shown. As the matrix of composites used the aluminium alloy with silicon AISi12Cu2Fe. As the reinforcing particles used CrFe36C9. Composites was produced in *ex situ* technique through the pour particples (10%) into liquid aluminium matrix in inductive furnace and stirring composite suspension in the crucible. The time of stirring was 90 s. The composite suspension was cast into the shell moulds. The process of forming the structure in the time of solidification of the composite cast is depending of many factors, first of all on the size and volume fraction of the reinforcing phases as well as on the kind and the properties of the using reinforcement. Therefore the properties of composites can be controlled through changes in the type, content and dimension of reinforcing particles. The purpose to this investigation was definition influence to particles dimension CrFeC into distribution of reinforcing carbide phase in the matrix composites. Segregation by gravity was investigated. Technological conception of investigations was based on assumption that chromic matrix of CrFeC particples become dissolve in aluminium composite matrix, and carbide phases were became real reinforcement of composite. The investigation of composite structure was executed. The examination of composites structure included: estimation of reinforced phases volume fraction, optical microscopy, scanning microscopy of fractures. Quantitative phase analysis with use method X-ray diffraction on diffractometer was carried. To identification of phases point analysis was used.

Keywords: composite, dispersion, reinforced phases, structure

WPROWADZENIE

Zagadnienie krystalizacji odlewanych kompozytów metalowych jest tematem badań prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych i badawczych zarówno w kraju (m.in. w Katedrze Odlewnictwa Politechniki Śląskiej), jak i zagranicą [1-15]. Proces krystalizacji związany jest z segregacją składników strukturalnych osnowy oraz cząstek wzmocnienia. Wprowadzenie do ciekłego stopu cząstek wzmacniających zmienia własności ter-

mofizyczne układu oraz zwiększa lepkość ciekłej zawiesiny. Cząstki wzmacniające wpływają na zarodkowanie, a ich oddziaływanie z frontem krystalizacji skutkuje zróżnicowaną strukturą odlewu [8-17]. Poznanie specyfiki procesu krystalizacji odlewów kompozytowych pozwala na kształtowanie mikrostruktury osnowy oraz sterowanie rozmieszczeniem cząstek.

W grupie metalowych materiałów kompozytowych aluminiowe kompozyty dzięki swojej niskiej gęstości i korzystnym własnościom użytkowym znalazły najszersze zastosowanie praktyczne [4, 6]. Stopy aluminium mimo korzystnych własności fizycznych, takich jak mała gęstość, dobra przewodność cieplna i elektryczna, duża odporność korozyjna, wykazują wiele wad, a mianowicie małą wytrzymałość, głównie zmęczeniową, oraz twardość, czy też niewielką odporność na zużycie ściernie. Jedną z możliwości podwyższenia tych własności jest wzmacnianie stopów aluminium cząstkami. Dobór morfologii i udziału cząstek wzmacniających wynika głównie z oczekiwanych własności i możliwości technologicznych wytworzenia materiałów kompozytowych [6].

Proces kształtowania struktury odlewu kompozytowego zależy zarówno od morfologii i udziału fazy zbrojącej, jak i od rodzaju oraz właściwości stosowanej osnowy i zbrojenia, a także morfologii i mechanicznych własności faz strefy przejściowej. Dzięki ocenie korelacji między osnową i zbrojeniem można optymalizować strukturę materiału kompozytowego [8-14].

Ważną rolę w kształtowaniu struktury kompozytu wywierają techniki ich wytwarzania. Cząstki wzmacniające są z reguły niezwiązane przez ciekły metal, co w połączeniu z różnicą gęstości komponentów i oddziaływaniem frontu krystalizacji na cząstki fazy wzmacniającej stwarza niebezpieczeństwo nierównomiernego ich rozłożenia w osnowie, dlatego też tak ważne jest dobranie odpowiednich parametrów wytwarzania metalowych materiałów kompozytowych.

CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu wielkości wprowadzanych cząstek CrFeC na rozmieszczenie fazy węglkowej w osnowie kompozytu. Analizowano segregację grawitacyjną.

Koncepcję technologiczną przeprowadzonych badań oparto na założeniu, że chromowa osnowa wprowadzanych do stopu aluminium cząstek CrFeC ulegnie rozpuszczeniu, a powstałe fazy węglkowe stanowiąc będą wzmocnienie kompozytu.

Na rozmieszczenie faz wzmacniających w osnowie podczas krzepnięcia zawiesiny może wpływać segregacja grawitacyjna zależna od różnicy gęstości masy komponentów, od wielkości i morfologii cząstek, a zatem od lepkości w strefie granicznej. Ponadto na rozmieszczenie cząstek wpływa także ich oddziaływanie z frontem krystalizacji, co związane jest również z wielkością i morfologią cząstek oraz z prędkością krystalizacji.

Uwzględniając zarówno wymienione zjawiska, jak i wyniki własnych badań eksperymentalnych związanych z opracowywaniem technologii wytwarzania zawiesiny kompozytowej, poszukiwano możliwości sterowania rozmieszczeniem fazy wzmacniającej w odlewie. W tym celu przeprowadzono badania ekspe-

rymentalne wytwarzania odlewów kompozytowych z różną wielkością cząstek wzmacniających, objętych następującym zakresem:

- wytworzenie ciekłych zawiesin kompozytowych;
- wykonanie odlewów próbnych o jednakowym udziale wzmocnienia przy różnej wielkości cząstek wzmacniających;
- przygotowanie próbek do badań mikrostruktury;
- badania mikrostruktury mikroskopem świetlnym Nikon EPIPHOT - TME - analizy ilościowe w programie Multi Scan Base;
- badania mikrostruktury elektronowym mikroskopem skaningowym DSM 940 firmy OPTON wyposażonym w mikroanalizator rentgenowski EDS LINK ISIS;
- analiza rentgenowska dyfraktometrem RTG Pert Pro firmy Panalytical (krok zapisu 2θ od 20 do 120°, lampa rentgenowska z anodą kobaltową $\lambda_{Co} = 1,788 \text{ \AA}$);
- badania mikrotwardości na Microhardness tester FM - 700.

METODYKA BADAŃ, WYNIKI I ICH ANALIZA

Do wykonania odlewów próbnych zastosowano odlewniczy stop aluminium AlSi12Cu2Fe (tab. 1) z dodatkiem zaprawy AlTi5B1. Fazę wzmacniającą stanowiły cząstki CrFe36C9. Zastosowano aktywator zjawisk powierzchniowych w postaci wodnego roztworu tlenków boru i sodu.

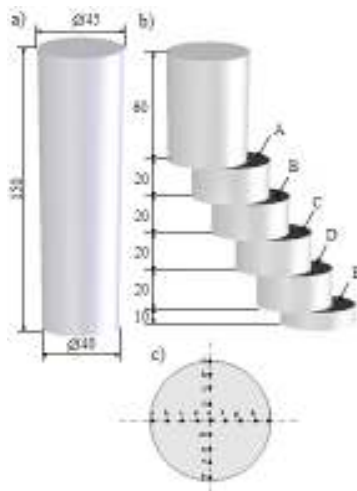
Stop AlSi12Cu2Fe topiono w tyglowym piecu indukcyjnym. Zawiesiny kompozytowe *ex situ* wytworzono metodą mechanicznego mieszania. Kompozyty posiadały 10% udział wagowy cząstek. Czas mieszania wynosił 90 s. Kompozyty odlewano grawitacyjnie z temperatury 700°C do form skorupowych. Czynnikiem zmiennym była wielkość cząstek. Przyjęto trzy wielkości cząstek CrFe36C9: 100, 200, 315 μm .

TABELA 1. Skład chemiczny AlSi12Cu2Fe wg PN-EN 1706:2001

TABLE 1. Chemical composition of AlSi12Cu2F used to investigation according to norm PN-EN 1706:2001

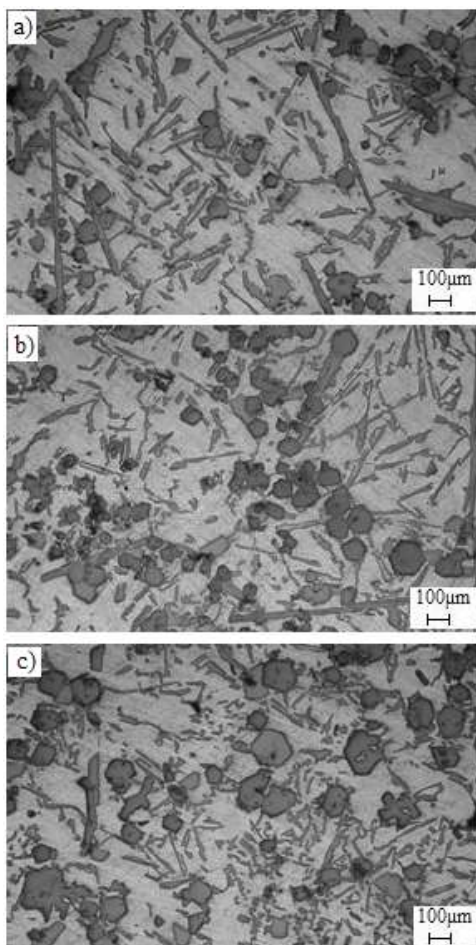
EN AC - AlSi12Cu2Fe (AK132)	
Skład chemiczny	Zawartość pierwiastka w %
Si	12,42
Cu	2,01
Mg	0,18
Mn	0,16
Fe	0,89
Ti	0,04
Zn	0,42
Ni	0,05
Pb	0,05
Sn	0,02
Cr	0,01

W ramach badań wykonano odlewy próbne o wymiarach przedstawionych na rysunku 1.



Rys. 1. Wymiary próbných odlewów kompozytowych (a), powierzchnie zglądów z analizowanymi obszarami (b), punkty pomiarowe na kolejnych przekrojach (c)

Fig. 1. Dimensions of experimental composite casts (a), cutting places in samples (b), measurement points in analysis areas (c)



Rys. 2. Mikrografie otrzymaných mikrostruktur odlewów kompozytowych AlSi12Cu2Fe/CrFe36C9 o różnej wielkości cząstek: a) 100 μm b) 200 μm, c) 315 μm (szare obszary - osnowa, ciemne wielokątne obszary - cząstki, podłużne iglaste obszary - krzem)

Fig. 2. Structure of AlSi12Cu2Fe/CrFe36C9 composite casts with different particles size: a) 100 μm, b) 200 μm, c) 315 μm

W pierwszym etapie badań otrzymane próbki poddano obserwacjom z użyciem mikroskopu świetlnego przy powiększeniu 100x. Na rysunku 2 przedstawiono mikrografie optyczne zglądów z powierzchni przekrojów zlokalizowanych w obszarze pomiarowym E, obrazujące rozmieszczenie cząstek w osnowie.

Na podstawie analizy ilościowej przeprowadzonej w programie Multi Scan Base określono wartości średnie parametrów stereologicznych dla analizowanych obszarów (rys. 1b) w kolejnych odlewach (rys. 3) - tabela 3. W każdej próbce wykonano sześć cięć i na przeciętych powierzchniach (A-E) wykonano zglądy metalograficzne (rys. 1b). Na każdym zglądzie dokonano pomiaru udziału powierzchniowego fazy wzmacniającej. Na każdym obszarze próbki dokonano 17 pomiarów (rys. 1c) w miejscach równomiernie rozłożonych na zglądzie. Całkowite pole obserwacji na jednym obszarze wynosiło $60826644 \mu\text{m}^2$.

TABELA 3. Średnie wartości wybranych parametrów stereologicznych

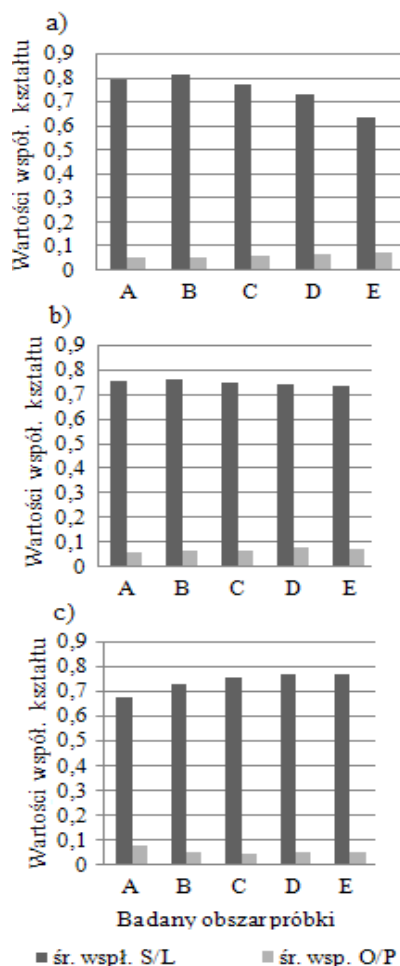
TABLE 3. Mean values of stereological parameters in composite casts

Badany obszar	Średnie wartości wybranych parametrów stereologicznych badanego kompozytu						
	$P, \mu\text{m}^2$	$L, \mu\text{m}$	$S, \mu\text{m}$	$O, \mu\text{m}$	S/L 1/1	O/P 1/ μm	
1	A	75099,68	1375,78	1110,64	3990,10	0,79	0,05
	B	67392,12	1224,26	1002,05	3565,66	0,81	0,05
	C	108489,23	2347,67	1812,01	6610,88	0,77	0,06
	D	119562,37	2895,49	2076,19	8012,77	0,73	0,07
	E	194227,43	5373,58	3387,98	14339,38	0,64	0,07
2	A	250753,17	5556,65	4194,45	15512,40	0,75	0,06
	B	262948,85	6123,85	4655,02	17119,17	0,76	0,06
	C	267053,88	6513,93	4869,27	18074,59	0,75	0,07
	D	199362,11	5076,40	3768,51	14012,09	0,74	0,08
	E	240644,43	5975,64	4396,38	16470,30	0,74	0,07
3	A	101729,63	3110,39	2069,48	8320,14	0,67	0,08
	B	216028,11	4191,94	3053,77	11578,47	0,72	0,05
	C	260092,59	4596,06	3461,65	12807,05	0,76	0,05
	D	248334,18	4819,03	3709,37	13559,91	0,77	0,06
	E	267497,80	5231,31	4005,86	14602,73	0,77	0,05

1 - wielkość CrFeC 100 μm
 2 - wielkość CrFeC 200 μm
 3 - wielkość CrFeC 315 μm
 P - powierzchnia
 L - długość
 S - szerokość
 O - obwód

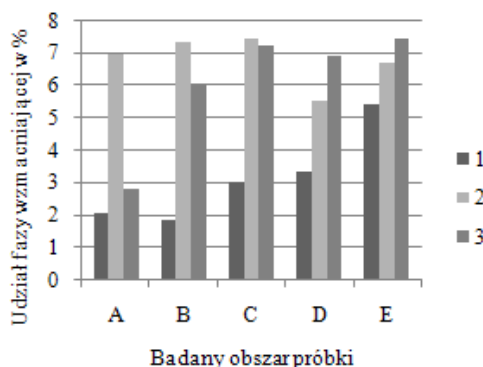
Współczynnik kształtu S/L (szerokość/długość) określa rozwinięcie powierzchni fazy wzmacniającej. Im niższa wartość współczynnika, tym bardziej rozwinięta jest powierzchnia wydzielania. Najwyższą wartość współczynnika S/L osiąga dla obszaru B w próbkach 1 i 2 (odpowiednio 100 i 200 μm wielkości cząstek), a najniższą dla obszaru E (tab. 3, rys. 3). W próbce 3 (315 μm wielkość cząstek) najwyższą wartość współczynnika S/L osiąga obszar E (czyli przeciwnie do próbek 1 i 2), a najniższą odnotowano dla obszaru A. Dla badanych odlewów, przy wielkościach wpro-

wadzanych cząstek 100 i 200 μm , współczynnik O/P (obwód/powierzchnia) (tab. 3, rys. 3) osiąga najwyższą wartość dla obszaru B, a w dalszej kolejności dla obszaru A. Współczynnik O/P osiąga najwyższe wartości w próbce 3 dla obszaru E. Współczynnik O/P dla pozostałych obszarów wszystkich odlewów osiąga wartości porównywalne.



Rys. 3. Współczynnik kształtu S/L oraz O/P w poszczególnych przekrojach odlewów kompozytowych dla różnych wielkości cząstek: a) 100 μm , b) 200 μm , c) 315 μm

Fig. 3. Coefficient of shape S/L and O/P for individual sections of casts with different particles size: a) 100 μm , b) 200 μm , c) 315 μm



Rys. 4. Udział procentowy fazy wzmacniającej w poszczególnych obszarach odlewów kompozytowych

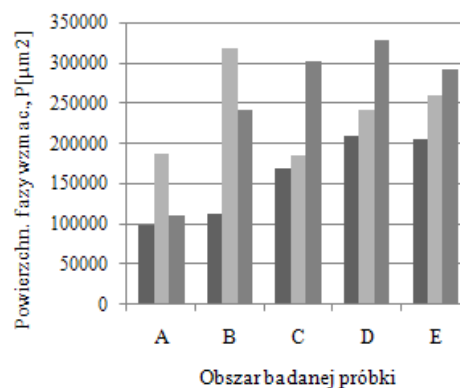
Fig. 4. Percentage content reinforced phase in individual sections of composite casts

Udział procentowy fazy wzmacniającej w otrzymanych odlewach kompozytowych w badanych obszarach przedstawiono za pomocą histogramu na rysunku 4 (tab. 4).

TABELA 4. Udział procentowy fazy wzmacniającej w poszczególnych przekrojach odlewów kompozytowych
TABLE 4. Percentage content reinforced phase in individual sections of composite casts

Badany obszar	Powierzchniowy udział fazy wzmacniającej, %		
	Wielkości wprowadzanych cząstek		
	100 μm	200 μm	315 μm
A	2,10	7,01	2,84
B	1,88	7,35	6,04
C	3,03	7,46	7,27
D	3,34	5,57	6,94
E	5,43	6,73	7,48

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki analizy udziału powierzchniowego fazy wzmacniającej w wybranych punktach pomiarowych badanych obszarów (tab. 5).



Rys. 5. Sumaryczna powierzchnia fazy wzmacniającej w środku geometrycznym odlewu - punkt pomiarowy e

Fig. 5. Total surface reinforced phase - point e

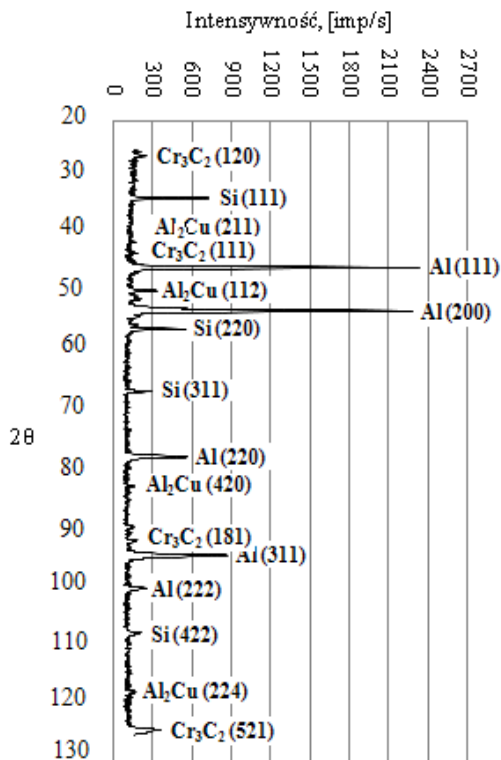
TABELA 5. Powierzchnia fazy wzmacniającej w środku geometrycznym badanych odlewów (punkt e)

TABLE 5. Surface of reinforced phase in the geometrical centre of casts (point e)

Badany obszar	Powierzchnia fazy wzmacniającej w punkcie pomiarowym e , $P \mu\text{m}^2$		
	100 μm	200 μm	315 μm
A	99109,50	188141,46	111592,85
B	112705,46	320145,72	242251,50
C	169623,23	186163,80	302984,76
D	210521,78	242764,11	329870,85
E	206444,15	261952,24	293172,25

W celu zidentyfikowania składu fazowego otrzymanego materiału przeprowadzono analizę metodą rentgenowską na dyfraktometrze posiadającym pionowy układ ogniskowania. Identyfikację fazową wykonano przy wspomaganii programem komputerowym PCSWIN z wykorzystaniem baz danych w postaci kartotek JCPDS - International Centre for Diffraction Data 2000.

Skład fazowy wytworzonych kompozytów pokazano na rysunku 6. W wyniku analizy fazowej stwierdzono obecność faz węglików, m.in. Cr_3C_2 oraz Cr_7C_3 , we wszystkich otrzymanych odlewach kompozytowych. Intensywności występowania poszczególnych faz były zbliżone we wszystkich odlewach.



Rys. 6. Wynik rentgenowskiej analizy fazowej kompozytu Al-Si12Cu2Fe/CrFe36C9 w obszarze E przy wielkości wprowadzanych cząstek 200 μm

Fig. 6. X-ray diffraction of AlSi12Cu2Fe/CrFe36C9 composite cast in areas E with particles size 200 μm

W celu kolejnej analizy składu fazowego w strukturze otrzymanych kompozytów przeprowadzono analizę punktową w danych obszarach próbek, której wyniki zostały przedstawione na rysunku 7 (tabele 7-9).

TABELA 7. Analiza punktowa w odlewie kompozytowym przy wielkości cząstek 100 μm w obszarze E

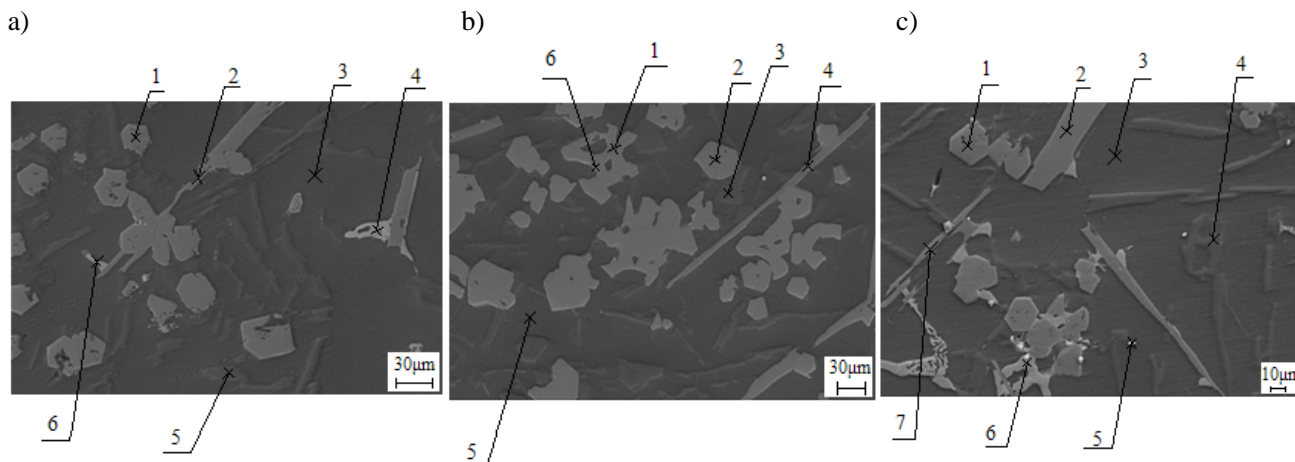
TABLE 7. Point of analysis in composite cast with particle size 100 μm in area E

Punkt nr	Zawartość pierwiastka wagowo i atomowo w %					
		Al	Si	Cr	Fe	Cu
1	% wag.	62,05	09,64	03,88	24,43	-
	% at.	72,89	10,88	02,36	13,87	-
2	% wag.	61,77	09,84	03,87	24,52	-
	% at.	72,61	11,11	02,36	13,92	-
3	% wag.	-	100,0	-	-	-
	% at.	-	100,0	-	-	-
4	% wag.	57,48	16,39	-	26,13	-
	% at.	66,95	18,34	-	14,71	-
5	% wag.	93,01	-	-	-	06,99
	% at.	96,91	-	-	-	03,09
6	% wag.	51,50	03,81	-	08,19	19,31
	% at.	68,47	04,86	-	05,26	10,90

TABELA 8. Analiza punktowa w odlewie kompozytowym przy wielkości cząstek 200 μm w obszarze E

TABLE 8. Point of analysis in composite cast with particle size 200 μm in area E

Punkt nr	Zawartość pierwiastka wagowo i atomowo w %					
		Al	Si	Cr	Fe	Cu
1	% wag.	60,42	09,63	09,02	20,93	-
	% at.	71,53	10,95	05,54	11,97	-
2	% wag.	56,77	16,06	-	27,16	-
	% at.	66,53	18,09	-	15,38	-
3	% wag.	93,01	-	-	-	06,99
	% at.	96,91	-	-	-	03,09
4	% wag.	38,45	-	-	-	50,73
	% at.	59,18	-	-	-	33,16
5	% wag.	-	100,0	-	-	-
	% at.	-	100,0	-	-	-
6	% wag.	47,68	-	-	-	52,32
	% at.	68,22	-	-	-	31,78



Rys. 7. Mikrostruktura kompozytu AlSi12Cu2Fe/CrFe36C9 z wyszczególnionymi punktami do analizy, przy różnych wielkościach cząstek: a) 100 μm , b) 200 μm , c) 315 μm

Fig. 7. Structure of AlSi12Cu2Fe/CrFe36C9 composite cast with points to analysis with different particles size: a) 100 μm , b) 200 μm , c) 315 μm

TABELA 9. Analiza punktowa w odlewie kompozytowym przy wielkości cząstek 315 μm w obszarze ETABLE 9. Point of analysis in composite cast with participle size 315 μm in area E

Punkt nr		Zawartość pierwiastka wagowo i atomowo w %				
		Al	Si	Cr	Fe	Cu
1	% wag.	61,50	09,67	08,12	20,71	-
	% at.	72,34	10,93	04,96	11,77	-
2	% wag.	58,30	16,47	-	25,23	-
	% at.	67,55	18,33	-	14,13	-
3	% wag.	93,01	-	-	-	06,99
	% at.	96,91	-	-	-	03,09
4	% wag.	64,74	35,26	-	-	-
	% at.	65,65	34,35	-	-	-
5	% wag.	82,85	-	-	-	-
	% at.	74,12	-	-	-	-
6	% wag.	47,87	-	-	-	52,13
	% at.	68,38	-	-	-	31,62
7	% wag.	74,72	11,04	-	14,25	-
	% at.	81,04	11,50	-	07,47	-

W ramach badań uzupełniających na otrzymanych mikrostrukturach dokonano pomiarów mikrotwardości. Charakterystyczne sześciokątne wydzielenia, oznaczone odpowiednio: na rysunkach 7a punktem 2, 7b i 7c punktem 1, posiadały średnią mikrotwardość w wysokości 1100 μHV . Większe (wielokształtne) wydzielenia, takie jak przykładowo pokazano na rysunku 7a oznaczone punktem 1, posiadały średnią mikrotwardość rzędu 1300 μHV .

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzona analiza ilościowa pozwoliła na liczbowe określenie stopnia zróżnicowania udziału powierzchniowego fazy wzmacniającej w różnych obszarach otrzymanych odlewów. Dla odlewu kompozytowego z wielkością wprowadzanych cząstek 200 μm odnotowano największy sumaryczny udział pola powierzchni fazy wzmacniającej, czego przyczyną mogła być np. odmienna morfologia cząstek CrFeC.

Wyniki analizy rentgenowskiej oraz pomiaru twardości potwierdziły obecność faz międzymetalicznych i faz węglkowych w strukturze otrzymanych kompozytów, powstałych m.in. w wyniku rozpuszczania osnowy cząstek CrFe36C9 w osnowie AlSi12Cu2Fe.

Prezentowany proces technologiczny wytwarzania kompozytów stwarza możliwość doboru różnych, metalicznych cząstek wzmocnienia w zależności od potrzeb technologicznych i użytkowych. Uzyskane wstępne wyniki badań w zakresie możliwości sterowania rozmieszczeniem fazy wzmacniającej w osnowie kompozytów są przedmiotem dalszych badań autorów. Następnym otrzymanych wyników badań będzie

korekta parametrów technologicznych w celu optymalizacji właściwości użytkowych.

LITERATURA

- [1] Braszczyński J., Zyska A., Problemy krzepnięcia kompozytów odlewanych, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 1998, 18, nr spec.
- [2] Chen N., Zhang H., Gu M., Jin Y., Effect of thermal cycling on the expansion behavior of Al/SiC_p composite, *Journal of Materials Processing Technology* 2009, 209.
- [3] Yilmaz S.O., Comparison on abrasive wear SiCrFe, CrFeC and Al₂O₃ reinforced Al2024 MMCs, *Tribology International* 2007, 40.
- [4] Hemanth J., Quartz (SiO₂p) reinforced chilled metal matrix composite (CMMC) for automotive applications, *Materials and Design* 2009, 30.
- [5] Baron C., Bartocha D., Szajnar J., The determination of the composite layer thickness with the use of software Nova-Flow&Solid and Preforma 1.1, *Archives of Foundry Engineering* 2008, 1(8).
- [6] Miracle D.B., Metal matrix composites - From science to technological significance, *Composites Science and Technology* 2005, 65.
- [7] Ünlü B.S., Atik E., Tribological properties of journal bearings manufactured from particle reinforced Al composites, *Materials and Design* 2009, 30.
- [8] Cholewa M., Heat flow description during crystallization process of cast dispersive composites, *Archives of Foundry Engineering* 2007, 1(7).
- [9] Cholewa M., Przykładowe założenia w badaniu krzepnięcia odlewanych kompozytów dyspersyjnych, *Kompozyty (Composites)* 2006, 6, 3.
- [10] Cholewa M., Formanek B., Dulęba A., Stawarz M., Aluminium composites casting in rotating magnetic field, *Archives of Foundry Engineering* 2008, 8, 1.
- [11] Cholewa M., Model of heat flow during crystallisation of cast composites, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 2007, 25.
- [12] Cholewa M., Structure evaluation of cast dispersive AlSi-CrxCy composites, *Archives of Foundry Engineering* 2008, 8, Spec., 3.
- [13] Cholewa M., Kondracki M., Stawarz M., Technological aspects of AlSi-Cr_xC_y composite casting manufacturing with use of permanent moulds, *Archives of Foundry Engineering* 2008, 8, Spec. 3.
- [14] Perzyk M., Myszka D., Cholewa M., Opis metody wprowadzania i osadzania elementów zbrojących do osnowy technicznie użytecznych odlewów kompozytowych, *Krzepnięcie Metali i Stopów* 2000, 44, 2.
- [15] Hyla I., Ślężona J., Możliwości sterowania rozmieszczeniem zbrojenia w procesie krzepnięcia kompozytów zbrojonych cząstkami, *Krzepnięcie Metali i Stopów* 1998, 38.
- [16] Stefanescu D.M., Dhindaw B.K., Kacar S.A., Moitra A., Behavior of ceramic particles at the solid/liquid metal interface in metal matrix composites, *Metall. Trans.* 1988, 19A(11).
- [17] Garvin J.W., Udaykumar H.S., Particle-solidification front dynamics using a fully coupled approach, Part I. Methodology, *J. Cryst. Growth* 2003, 252(1).