

**Anna Dolata-Grosz\*, Maciej Dyzia, Józef Śleziona**

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

*\* Corresponding author. E-mail: anna.dolata-grosz@polsl.pl*

Otrzymano (Received) 20.02.2008

## ROZMIESZCZENIE CZĄSTEK ZBROJĄCYCH W KOMPOZYCIE AK12/SiC+C KSZTAŁTOWANE PODCZAS KRZEPNIĘCIA ODLEWU

Zagadnienia dotyczące krzepnięcia odlewów to ostatni etap wytwarzania zawiesin kompozytowych. Poznanie zjawisk towarzyszących temu procesowi pozwala na kształtowanie zróżnicowanej struktury wytwarzanych materiałów. Z kolei od struktury ściśle zależą właściwości finalnego wyrobu. Proces kształtowania struktury w trakcie krzepnięcia odlewu kompozytowego zależy od wielu czynników, przede wszystkim od wielkości i udziału objętościowego fazy zbrojącej oraz rodzaju i właściwości stosowanej osnowy i zbrojenia. Jak wykazały wyniki badań, istotny jest również materiał formy, w której krzepnie zawieszona kompozytowa. W artykule przedstawiono wyniki obserwacji procesu krzepnięcia kompozytu o zbrojeniu heterofazowym (AK12/SiC+C). Zawieszoną kompozytową odlewano do formy grafitowej i formy piaskowej. W trakcie badań rejestrowano temperaturę i czas krzepnięcia kompozytów oraz temperaturę formy. Do rejestracji zmian zachodzących podczas krzepnięcia zawiesin kompozytowych wykorzystano system fotometryczny ThermoCAM<sup>TM</sup>E25. Pokazano krzywe krzepnięcia uzyskane dla kompozytów oraz rozkład temperatury na ściankach form, zarejestrowany dla początku i końca krzepnięcia kompozytu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono istotny wpływ materiału formy na rozmieszczenie heterofazowego zbrojenia w osnowie.

**Słowa kluczowe:** odlewy kompozytowe, stop aluminium, węgiel krzemowy, węgiel szklisty, krzepnięcie

## DISTRIBUTION OF REINFORCING PARTICLES IN AK12/SiC+C COMPOSITE FORMED VIA CAST SOLIDIFICATION

The problems on solidification of castings are the last stage of composite suspensions production. A description and understanding of the phenomena that accompany those processes allows the forming of a varied structure of the materials produced, which strictly determines the properties of the final product. The process of forming the structure in the time of solidification of the composite cast is depending on 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. The results of examination shown that material of the mould in which composite suspension is solidification is also important. In the article the observation result of solidification process of AK12/ SiC+C heterophase composite are presented. The composite suspension was cast into the graphite and sand mould. In the research the temperature and time of composite solidification and temperature of mould have been register. The ThermoCAM<sup>TM</sup>E25 system for changing registered in the time of composite solidification has been used. Gotten curves of composite solidification were analysed. The profile of the temperature on the walls of moulds, recorded for the start and the finish of composite solidification were presented. On the basis of gotten results, the essential influence of material of the mould on the distribution of heterophase reinforcements in the matrix have been stated.

**Keywords:** cast composites, aluminium alloys, silicon carbide, glassy carbon particles, solidification

## WPROWADZENIE

Od wielu lat zagadnienie krzepnięcia odlewów jest tematem badań prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych i badawczych w kraju i za granicą [1-12]. Krzepnięciu odlewu towarzyszy proces krystalizacji, czyli etap tworzenia się struktury pierwotnej odlewu. Polega on na powstawaniu zarodków krystalizacji i ich wzroście. Towarzyszy temu segregacja składników, za-

chodzi również niebezpieczeństwo pojawienia się defektów struktury. Na proces stygnięcia ciekłego stopu w formie i końcową strukturę, która z kolei determinuje właściwości finalne wyrobu, ma wpływ wiele czynników, w tym również materiał formy.

Wprowadzenie do ciekłego stopu cząstek ceramicznych dodatkowo zaburza ten trudny do opisu proces

i powoduje zmianę większości czynników. Zmianie ulegają przede wszystkim właściwości termofizyczne oraz lepkość ciekłej suspensji. Cząstki zbrojące wpływają na zarodkowanie, a ich oddziaływanie z frontem krystalizacji skutkuje zróżnicowaną strukturą odlewu [2-4]. Zatem poznanie specyfiki procesu krzepnięcia odlewów kompozytowych oraz zjawisk towarzyszących temu procesowi pozwala na kształtowanie zróżnicowanej struktury rozmieszczenia cząstek w osnowie.

Na podstawie badań własnych autorów artykułu stwierdzono, że struktura i rozkład zbrojenia kształtowane w czasie krzepnięcia odlewów kompozytowych jest w korelacji z wielkością i udziałem objętościowym, a także rodzajem i właściwościami stosowanego zbrojenia [5-9]. Jak wykazały przeprowadzone badania, właściwości stosowanych cząstek są szczególnie istotne w kompozytach heterofazowych, w których stosowane zbrojenie posiada różne charakterystyki fizykochemiczne. W istotny sposób wpływają na zmianę temperatury i czasu krzepnięcia osnowy, co ma swoje konsekwencje w strukturze kompozytu. Stwierdzono, że w tych samych warunkach odprowadzania ciepła, poprzez odpowiedni dobór składu fazowego zbrojenia, możliwe jest kształtowanie zróżnicowanej struktury odlewu.

## METODYKA BADAŃ

Proces kształtowania się struktury rozmieszczenia cząstek w osnowie, w różnych warunkach odprowadzania ciepła przeanalizowano dla kompozytu heterofazowego, w którym jako zbrojenie stosowano mieszaninę cząstek węgla krzemowego o wielkości 50  $\mu\text{m}$  i węgla szklanego o wielkości 100  $\mu\text{m}$ . Na osnowę wykorzystano odlewniczy stop aluminium z krzemem AK12. Udział objętościowy zbrojenia wynosił 20%. W celu uzyskania odmiennych warunków krzepnięcia wykorzystano dwie formy: grafitową oraz piaskową.

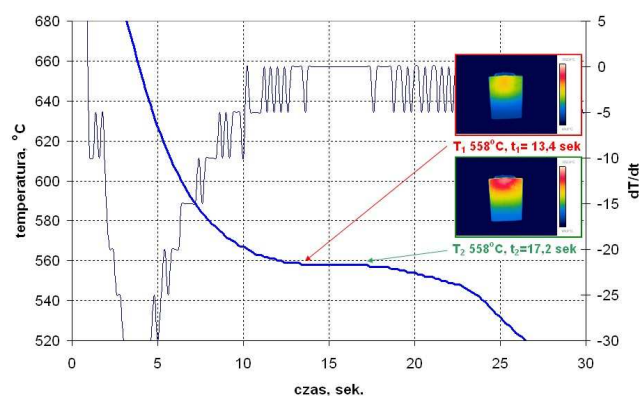
Zawiesiny kompozytowe wytworzono znaną i opisaną w publikacjach metodą mechanicznego mieszania ciekłego stopu, do którego wprowadzano odpowiednio przygotowane i preparowane cząstki zbrojące [10, 11]. Zawiesiny kompozytowe poddano odgazowaniu i homogenizacji pod obniżonym ciśnieniem, a następnie odlewano grawitacyjnie do wcześniej przygotowanych form.

Proces krzepnięcia zawiesiny kompozytowej AK12/SiC+C w różnych warunkach odprowadzania ciepła zarejestrowano, wykorzystując system fotometryczny kontroli i pomiaru temperatury - ThermoCAM<sup>TM</sup>E25. System wyposażony w kamerę termowizyjną, wyświetlacz LCD oraz wskaźnik laserowy połączony z rejestratorem SPIDER 8 i wykorzystano do monitorowania, rejestracji, a zarazem wizualizacji zmian temperatury, jakie zachodzą w czasie krzepnięcia kompozytów. W trakcie badań rejestrowano temperaturę i czas krzepnięcia kompozytów oraz temperaturę formy. Uzyskane dane pozwoliły na wyznaczenie krzywych krzepnięcia,

które pokazano na rysunkach 1 i 5. Dodatkowo rejestrowano obrazy termiczne z 10 s przystankiem czasowym na podstawie, których możliwe jest określenie rozkładu temperatury na powierzchni zewnętrznej formy na każdym etapie procesu krzepnięcia. Celem tych badań było uzyskanie informacji o kierunkach odprowadzania ciepła podczas studzenia odlewu w zależności od właściwości materiału próbnika (grafitowy, piaskowy) i powiązanie tego efektu z uzyskanym rozmieszczeniem cząstek w osnowie kompozytu. W artykule pokazano jedynie wybrane obrazy termiczne i rozkład temperatury na powierzchni formy dla początku i końca krzepnięcia zawiesiny kompozytowej (rys. rys. 2, 3, 6, 7). Makrostrukturę i mikrostrukturę wlewków kompozytowych, krzepniętych w różnych warunkach odprowadzania ciepła, z widocznym rozmieszczeniem cząstek na przekroju poprzecznym odlewu pokazano na rysunkach 4 i 8.

## WYNIKI I ANALIZA BADAŃ

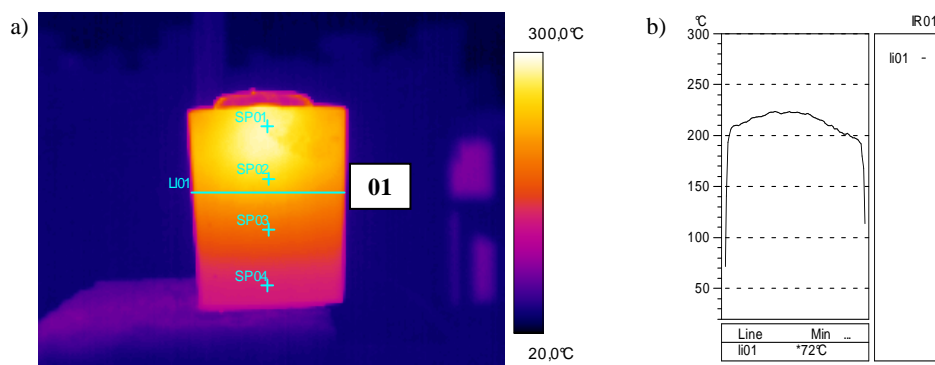
Analiza krzywej krzepnięcia kompozytu AK12/SiC+C w formie grafitowej wykazała, że proces przebiega w bardzo krótkim czasie wynoszącym 4,2 s w temperaturze 558°C (rys. 1). Analizując rozkład temperatury na powierzchni zewnętrznej formy grafitowej w czasie krzepnięcia wlewka kompozytowego, można stwierdzić, że nastąpiło w miarę równomierne przegrzanie formy. Różnica temperatury pomiędzy punktem SP01 a SP03 w chwili rozpoczęcia procesu krzepnięcia wynosiła 92°C (rys. 2), a po zakończeniu krzepnięcia 122°C (rys. 3). W trakcie krzepnięcia kompozytu w punkcie SP01 temperatura ścianki zewnętrznej formy wzrosła o 63°C, w punkcie SP02 o 27°C, a w punkcie SP03 o 33°C.



Rys. 1. Krzywa studzenia kompozytu AK12/SiC+C krzepnącego w formie grafitowej

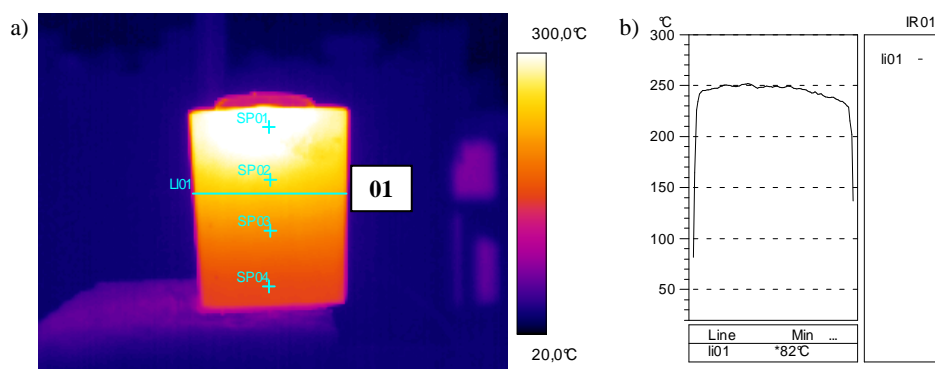
Fig. 1. The cooling curves of AK12/SiC+C composite solidify in graphite mould

Takie warunki odprowadzania ciepła przez formę wykonaną z grafitu doprowadziły do uzyskania struktury z równomiernym rozmieszczeniem cząstek na przekroju wlewka kompozytowego (rys. 4).



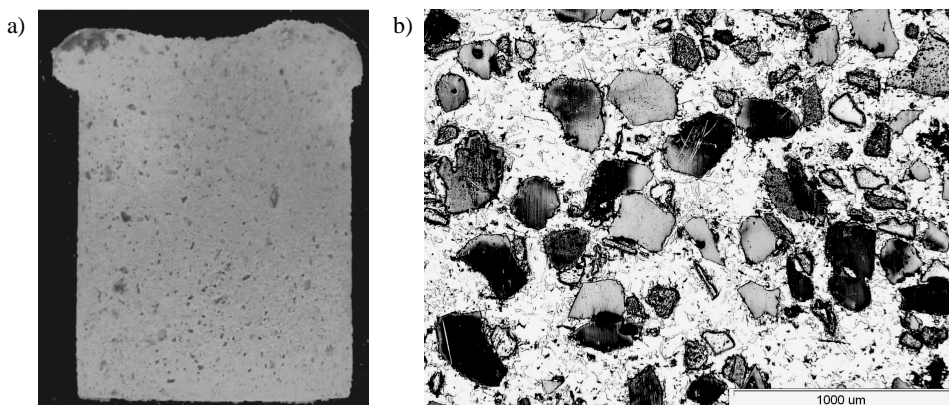
Rys. 2. Rozkład temperatury na powierzchni zewnętrznej formy grafitowej; początek krzepnięcia:  $T_1 = 558^\circ\text{C}$ ,  $t_1 = 13,4$  s: a) obraz termiczny; b) rozkład temperatury wzdłuż linii 01

Fig. 2. Temperature profile on the outside surface of graphite mould; start of solidification:  $T_1 = 558^\circ\text{C}$ ,  $t_1 = 13.4$  s; a) thermal image; b) temperature profile along line 01



Rys. 3. Rozkład temperatury na powierzchni zewnętrznej formy grafitowej; koniec krzepnięcia:  $T_1 = 558^\circ\text{C}$ ,  $t_1 = 17,2$  s: a) obraz termiczny; b) rozkład temperatury wzdłuż linii 01

Fig. 3. Temperature profile on the outside surface of graphite mould; finish of solidification:  $T_1 = 558^\circ\text{C}$ ,  $t_1 = 17.2$  s; a) thermal image; b) temperature profile along line 01

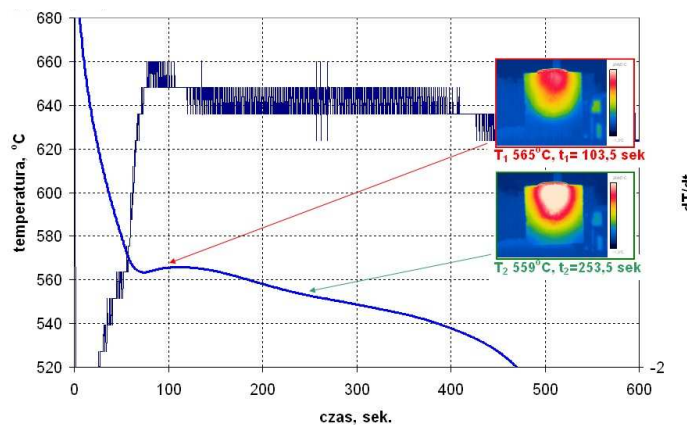


Rys. 4. Kompozyt AK12/SiC+C krzepnący w formie grafitowej: a) makrostruktura wlewka kompozytowego z widocznym rozmieszczeniem cząstek w osnowie; b) mikrostruktura, OM

Fig. 4. The AK12/SiC+C composite solidify in graphite mould: a) macrostructure of composite ingot with particles displacement visible in the matrix; b) microstructure, OM

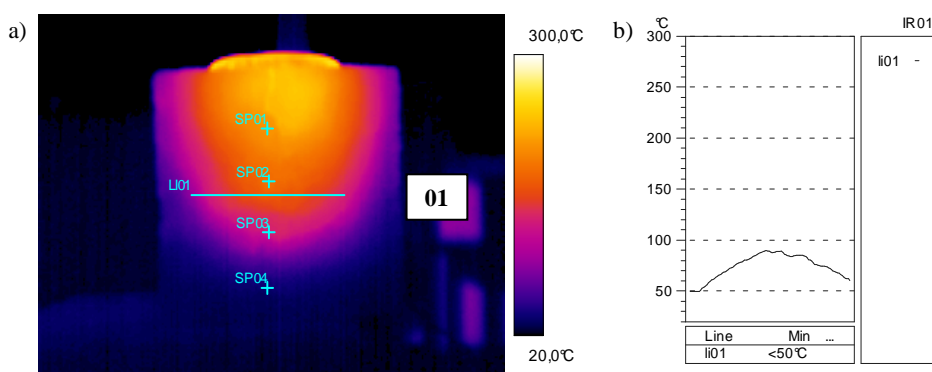
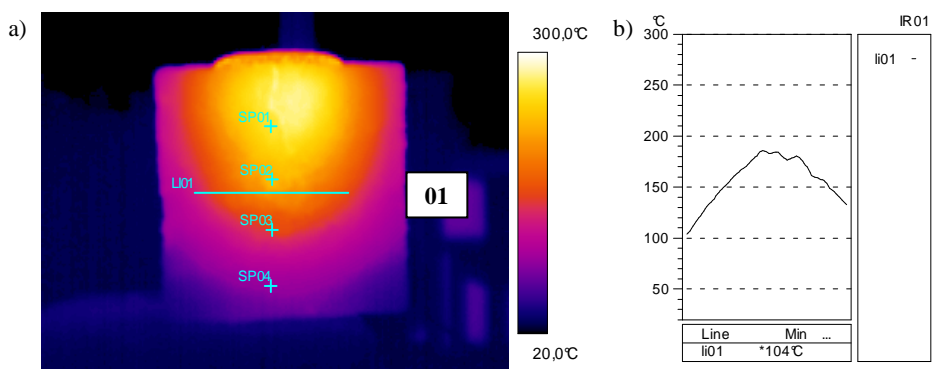
Z kolei zawiesina kompozytowa AK12/SiC+C, którą odlano do formy piaskowej, krzepła w zakresie temperatury  $565\div 559^\circ\text{C}$  w czasie 150 s (rys. 5). Rozkład temperatury na powierzchni zewnętrznej formy piaskowej w czasie krzepnięcia wlewka kompozytowego wskazuje na kierunkowe odprowadzanie ciepła (rys. 6). Różnica temperatury pomiędzy punktem SP01 ( $117^\circ\text{C}$ ) a SP03 w chwili rozpoczęcia procesu krzepnięcia wy-

nosiła  $57^\circ\text{C}$ , a po zakończeniu krzepnięcia  $98^\circ\text{C}$ . W trakcie krzepnięcia w punkcie SP01 temperatura ścianki zewnętrznej formy wzrosła o  $113^\circ\text{C}$ , w punkcie SP02 o  $103^\circ\text{C}$ , a w punkcie SP03 o  $72^\circ\text{C}$ . Zarówno długi czas krzepnięcia, jak i warunki odprowadzania ciepła przez formę piaskową doprowadziły do uzyskania struktury warstwowej (rys. 8).



Rys. 5. Krzywa studzenia kompozytu AK12/SiC+C krzepnącego w formie piaskowej

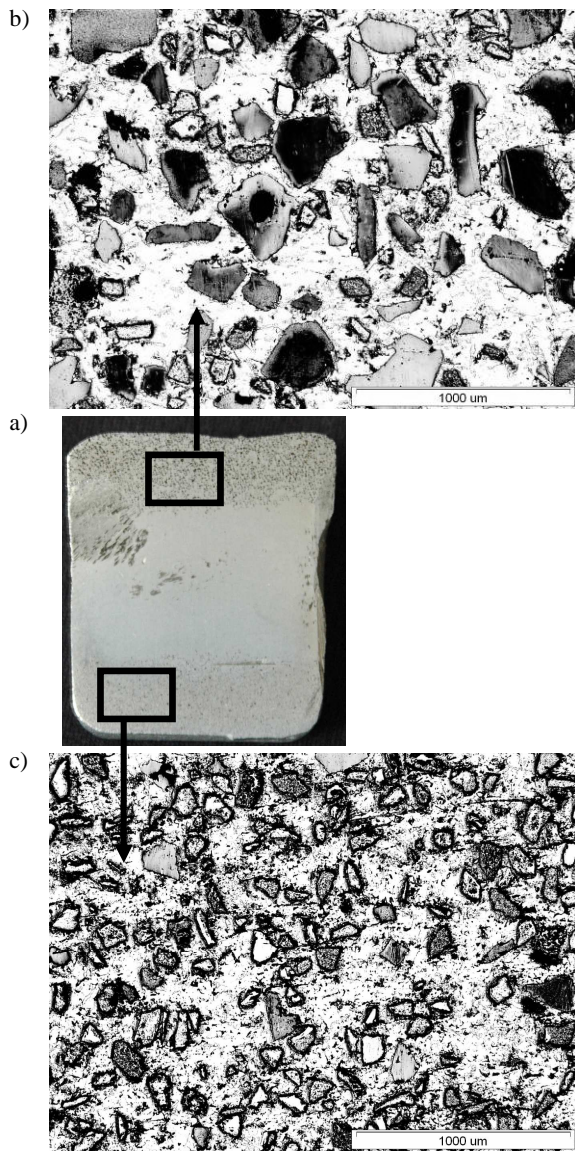
Fig. 5. The cooling curve of AK12/SiC+C composite solidify in sand mould

Rys. 6. Rozkład temperatury na powierzchni zewnętrznej formy piaskowej; początek krzepnięcia:  $T_1 = 565^{\circ}\text{C}$ ,  $t_1 = 103,5$  s: a) obraz termiczny; b) rozkład temperatury wzdłuż linii 01Fig. 6. Temperature profile on the outside surface of sand mould; start of solidification:  $T_1 = 565^{\circ}\text{C}$ ,  $t_1 = 103.5$  s: a) thermal image; b) temperature profile along line 01Rys. 7. Rozkład temperatury na powierzchni zewnętrznej formy piaskowej; koniec krzepnięcia:  $T_1 = 559^{\circ}\text{C}$ ,  $t_1 = 253,5$  s: a) obraz termiczny; b) rozkład temperatury wzdłuż linii 01Fig. 7. Temperature profile on the outside surface of sand mould; finish of solidification:  $T_1 = 559^{\circ}\text{C}$ ,  $t_1 = 253.5$  s: a) thermal image; b) temperature profile along line 01

Jak widać na rysunkach 2 i 3 oraz rysunkach 6 i 7, rozkłady temperatury na powierzchni próbnika na początku i końcu krzepnięcia kompozytów wyraźnie różnią się. Znacznie większa zdolność do akumulacji ciepła przez grafit umożliwia szybkie nagrzanie praktycznie całej jego objętości. Natomiast w przypadku próbnika wykonanego z masy piaskowej występuje wyraźne kierunkowe odprowadzenie ciepła, widoczne nawet po około 250 s (temperatura około  $180^{\circ}\text{C}$ ), w odróżnieniu od

próbnika grafitowego, gdzie praktycznie cały próbnik już po 15 s osiąga temperaturę  $220^{\circ}\text{C}$ . Wyraźnie również widać na rysunku 1 i 5 zmiany w przebiegu krzywej krzepnięcia. Z jednej strony może to być wywołane zarówno przez materiał próbnika (różnice we współczynnikach akumulacji ciepła, współczynnikach przewodzenia i odprowadzenia ciepła), jak i zjawiskami zachodzącymi w metalu (krzepnięcie, segregacja cząstek). Można zatem przypuszczać, że struktura rozmieszcze-

nia cząstek (SiC i C) w osnowie może być kształtowana nie tylko poprzez szybkie odprowadzenie ciepła, ale również kierunkowe. Dobierając zatem materiały na formę, można by kształtować rozmieszczenie cząstek w odlewie, dobierając z kolei materiał i ich wielkość, uzyskać strefowe-warstwowe lub gradientowe rozmieszczenie.



Rys. 8. Kompozyt AK12/SiC+C krzepnący w formie grafitowej: a) makrostruktura wlewka kompozytowego z widocznym rozmieszczeniem cząstek w osnowie; b) i c) mikrostruktura odpowiednio górnej i dolnej części wlewka; OM

Fig. 8. The AK12/SiC+C composite solidify in graphite mould: a) macrostructure of composite ingot with particles displacement visible in the matrix; b) and c) microstructure of upper and lower part of ingot; OM

## PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań krzepnięcia zawiesin kompozytowych stwierdzono, że materiał formy istotnie wpływa na rozmieszczenie heterofazowego zbrojenia, typu SiC+C, w osnowie stopu

aluminium. Potwierdza to, że, stosując odpowiedni materiał formy, możliwe jest kształtowanie struktury i rozmieszczenia cząstek w odlewie. Jak wykazały przeprowadzone badania, formy szybko odprowadzające ciepło (dużym współczynnikiem przewodzenia i akumulacji ciepła), takie jak grafit czy kokila metalowa, zapewniają uzyskanie równomiernego rozkładu cząstek ceramicznych w osnowie. Dłuższy czas krzepnięcia zawiesiny kompozytowej sprzyja segregacji cząstek zbrojących. Analiza mikrostruktury wytworzonych odlewów wykazała, że w dolnej części wlewka lokują się cząstki węgla krzemu (rys. 4c) (efekt sedymentacji). Natomiast w górnych partiach odlewu zidentyfikowano zwiększony udział cząstek węgla szklanego (rys. 4b). Takie rozmieszczenie cząstek zbrojących w aluminiowej osnowie należy wiązać zarówno z czasem krzepnięcia kompozytu, jak i różnicami występującymi we właściwościach termofizycznych komponentów oraz fizykochemicznych zbrojenia ( $\rho_{SiC} = 3,15 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{Cg} = 1,4 \text{ g/cm}^3$ ). Zatem odlewanie zawiesin heterofazowych (np. AK12/SiC+C) do form ceramicznych, które wydłużają czas krzepnięcia, pozwala uzyskać strukturę warstwową. Odpowiednia konstrukcja formy, np. metalowo-ceramiczna, może pozwolić na uzyskanie w odlewach kompozytowych struktury gradientowej. Zagadnienie to jest tematem dalszych prac badawczych autorów artykułu.

## Podziękowania

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2008 jako projekt badawczy PBZ-KBN-114/T08/2004.*

## LITERATURA

- [1] Braszczyński J., Cisowska M., Próba oceny krzepnięcia kompozytów hybrydowych AlMg/SiC+Cgr, *Krzepnięcie Metali i Stopów* 1999, 40.
- [2] Braszczyński J., Zyska A., Analysis of the influence of ceramic particles on the solidification process of metal matrix composites, *Materials Science and Engineering* 2000, A278, 195-203.
- [3] Nagarajan S., Dutta B., Surappa M.K., The effect of SiC particles on the size and morphology of eutectic silicon in cast A356/SiCp composites, *Composite Science and Technology* 1999, 59, 897-902.
- [4] Fraś E., Oddziaływanie cząstek z frontem krystalizacji, *Archiwum Odlewnictwa* 2006, 6, 18 (1/2), 339-344.
- [5] Konopka Z., Cisowska-Łągiewka M., Zyska A., Krzepnięcie suspensji kompozytowej podczas płynięcia w formie, *Kompozyty (Composites)* 2005, 4, 5.
- [6] Dolata-Grosz A., Dyzia M., Śleziona J., Structure and technological properties of AlSi12 - (SiC+Cgp) composites, *Archives of Foundry Engineering* 2008, 8, 1, 43-46.
- [7] Dolata-Grosz A., Dyzia M., Śleziona J., Solidification curves and structure of heterophase composite, *Archives of Materials Science and Engineering* 2008, 29, 1, 10-15.
- [8] Dolata-Grosz M., Dyzia M., Śleziona J., Solidification and structure of heterophase composite, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 2007, 20, 1-2, 103-106.

- [9] Dolata-Grosz A., Dyzia M., Śleziona J., Myalski J., Analiza procesu krzepnięcia kompozytu heterofazowego, *Archiwum Odlewnictwa, Rocznik 6, Nr 22, PAN-Katowice*, 145-151.
- [10] Myalski J., Śleziona J., Dyzia M., Charakterystyka krzepnięcia kompozytów o osnowie aluminium zbrojonych cząstkami ceramicznymi, *Archiwum Odlewnictwa 2003, 3, 10*, 61-66.
- [11] Dolata-Grosz A., Wieczorek J., Śleziona J., Dyzia M., Możliwości wykorzystania technik próżniowych do podnoszenia jakości zawiesin kompozytowych, *Archiwum Odlewnictwa 2006, 6, 18(1/2)*, 285-290.
- [12] Śleziona J., Wieczorek J., Dolata-Grosz A., Wpływ procesu odgazowania na strukturę kompozytów aluminiowych zawierających cząstki węgla szklстого i węgla krzemu, *Inżynieria Materiałowa 2006, 3(151)*, 665-667.