

Zbigniew Konopka<sup>1</sup>, Małgorzata Cisowska-Łągiewka<sup>2</sup>, Andrzej Zyska<sup>3</sup>

Politechnika Częstochowska, Katedra Odlewnictwa, al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa

## KRZEPNIĘCIE SUSPENSJI KOMPOZYTOWEJ PODCZAS PŁYNIĘCIA W FORMIE

Przedstawiono badania leżności kompozytów na osnowie stopu AlMg10 z cząstkami grafitu, SiC i ich mieszaniny. Podczas pomiaru leżności mierzono temperaturę płynącego metalu za pomocą termoelementów Ni-NiCr umieszczonych w formie w określonych miejscach. W rejestracji temperatury zastosowano komputerową kartę pomiarową PCL 818. Odlewy spiral przedstawiono na rysunku 1, a pola temperatury na rysunkach 2-4. Z krzywych temperatury wyznaczono funkcje długości spiral i prędkości (rys. rys. 5-7). Na rysunku 8 pokazano temperaturę czoła strugi metalu. Zmianę udziału fazy stałej podczas płynięcia i krzepnięcia obliczono, przyjmując ją jako liniową funkcję temperatury, co przedstawiono na rysunku 9. Stwierdzono odmienne kinetyki płynięcia i krzepnięcia badanych kompozytów. Średnia prędkość płynięcia i leżność kompozytu z cząstkami grafitu jest wyższa niż dla kompozytu z cząstkami SiC. W kompozycie z grafitem przepływ ustaje przy udziale fazy stałej około 65% i tylko przy 45% fazy stałej w kompozycie z cząstkami SiC.

Słowa kluczowe: aluminium, kompozyty, krzepnięcie, leżność

## SOLIDIFICATION OF COMPOSITE SUSPENSION DURING FLOWING IN MOULD

The results of castability experiments of the AlMg10 alloy matrix composites with graphite, SiC and mixture of these particles were presented in this paper. During castability test the temperature of flowing metal was measured. The Ni-NiCr thermoelements were placed into cavity of sand spiral test mould. The temperature of composite suspension was registered out by means of computer measuring card PCL 818. The castability results and pictures of spiral test castings were presented (Fig. 1). On the ground of the temperature curves for each place of mould (Figs 2-4) the function of length spiral and instantaneous flow velocity were determined (Figs 5-7). In Figure 8 the temperature of metal stream front was presented. Using the solid phase fraction as a linear function of temperature the change of volume solid phase fraction during composites flow was calculated and presented in Figure 9. Different kinetics of flow and solidification of examined composites were observed. Average velocity and flow distance (castability) for composite with 10% vol. graphite particles are higher than for composite with SiC particles. Flow is finished at about 70% solid phase fraction in AlMg10-graphite composites and at only 45% solid phase fraction in composites with SiC particles.

Key words: aluminium, composites, solidification, castability

### WSTĘP

Właściwości kompozytów zależą od rozmieszczenia cząstek w objętości osnowy [1, 2]. Rozmieszczenie cząstek fazy zbrojącej w kompozycie jest funkcją parametrów mieszania oraz zjawisk towarzyszących procesom płynięcia i krzepnięcia [3, 4]. Obecność cząstek ceramicznych w krzepnącej osnowie powoduje, że proces jej krzepnięcia przebiega w innych warunkach termodynamicznych i fizycznych niż krzepnięcie metalu bez cząstek. Wprowadzenie cząstek ceramicznych do osnowy powoduje zmianę kinetyki krzepnięcia wywołaną odmiennymi w porównaniu do metalu osnowy właściwościami cieplnymi suspensji kompozytowej, jak: ciepło właściwe, przewodność cieplna, ilość ciepła krystalizacji i opór cieplny na granicy metal-forma [4]. Przemierzający się front krystalizacji oddziałuje na cząstki ceramiczne, powodując ich wchłanianie lub wypychanie zależnie od wielkości cząstek, co może powodować ich segregację i tworzenie się skupisk cząstek. [5]. Odpo-

wiednie poznanie procesów krzepnięcia kompozytów pozwala na sterowanie tym procesem i stworzenie takiego układu kompozytowego, który może zapewnić szereg korzystnych właściwości mechanicznych i użytkowych.

### METODYKA BADAŃ

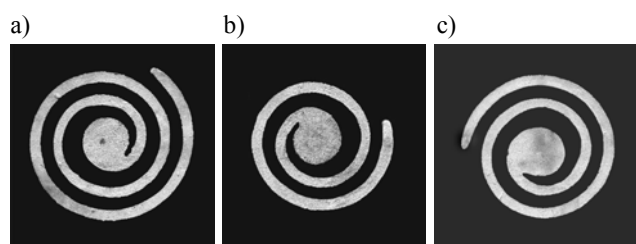
Do analizy procesów krzepnięcia podczas wypełniania wnęki formy odlewniczej wybrano kompozyty zawierające 10% obj. cząstek SiC, grafitu i mieszaninę cząstek SiC i grafitu o zawartości odpowiednio 8 i 2%, a średniej wielkości ziarna z przedziału 71÷100 µm. Osnowę kompozytu stanowił stop AlMg10. Ciekły stop o temperaturze 750°C mieszano mieszadłem śmigłowym, wprowadzając jednocześnie odpowiednie cząstki ceramiczne. Tak powstałe suspensje odlewano grawitacyjnie do uprzednio przygotowanych form próby leżności. Formy te były wykonane przy użyciu masy formierskiej ole-

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

jowej. W formach tych zainstalowano termoelementy NiCr o średnicy 0,3 mm w odległościach co 100 mm począwszy od wlewu głównego. Za pomocą termoelementów rejestrowano rozkład temperatur we wnęce formy podczas wypełniania, krzepnięcia i stygnięcia suspensji kompozytowych [3, 7, 8]. Z wykonanych pomiarów uzyskano krzywe przedstawiające zmiany temperatur w poszczególnych miejscach na długości wnęki formy w czasie.

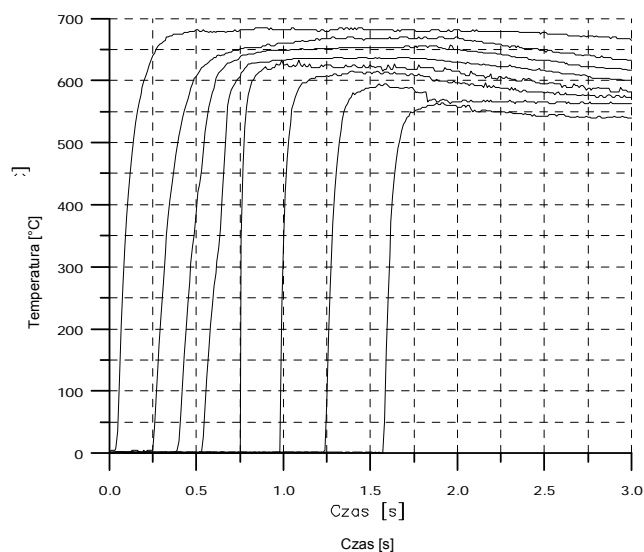
## WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 1 przedstawiono makrografie wykonanych odlewów kompozytowych, a uzyskane wyniki lejności kompozytów były następujące: AlMg10+10%grafit-720 mm, AlMg10+10%SiC-520 mm, AlMg10+8%SiC2%grafit -550 mm. Z wyników badań lejności można jednoznacznie stwierdzić, że lejność kompozytu zależy wyraźnie od rodzaju cząstek występujących w kompozycie. Największą lejnością charakteryzował się kompozyt zawierający cząstki grafitu. Zdecydowanie najgorszą lejność wykazał kompozyt z cząstkami węglika krzemu.



Rys. 1. Makrografie odlewów spiral: a) AlMg10+10%SiC, b) AlMg10+10%SiC, c) AlMg10+8%SiC+2%SiC

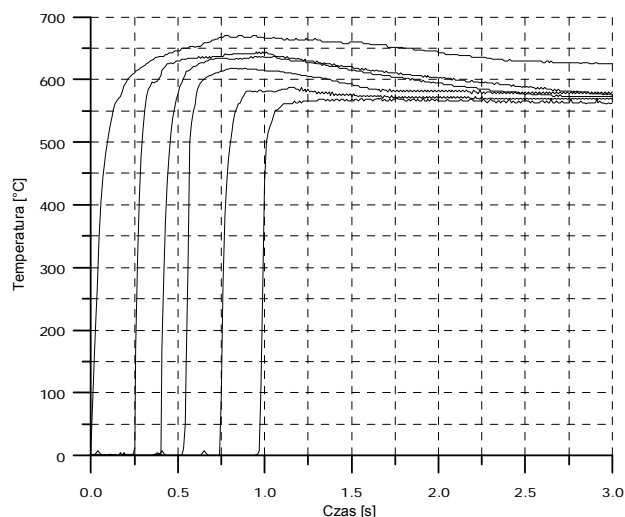
Fig. 1. Macrographs of spiral castings: a) AlMg10+10%SiC, b) AlMg10+10%SiC, c) AlMg10+8%SiC+2%SiC



Rys. 2. Krzywe temperatury dla kompozytu AlMg10+10%SiC zarejestrowane podczas badania lejności

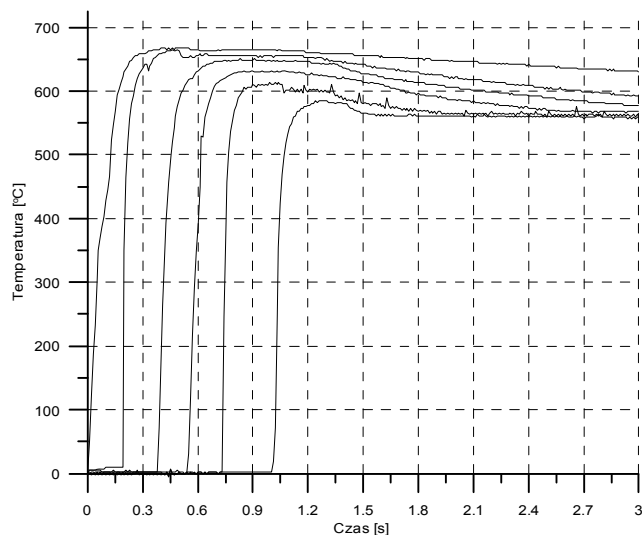
Fig. 2. Temperature curves for AlMg10+10%SiC registered during castability test

Przygotowanie odpowiedniego stanowiska pomiarowego pozwoliło uzyskać krzywe ilustrujące zmiany temperatury w poszczególnych miejscach wnęki formy podczas jej wypełniania oraz krzepnięcia i stygnięcia odlewów kompozytowych. Krzywe pól temperatury we wnękach form badanych kompozytów przedstawiają rysunki 2-4.



Rys. 3. Krzywe temperatury dla kompozytu AlMg10+10%SiC zarejestrowane podczas badania lejności

Fig. 3. Temperature curves for AlMg10+10%SiC registered during castability test



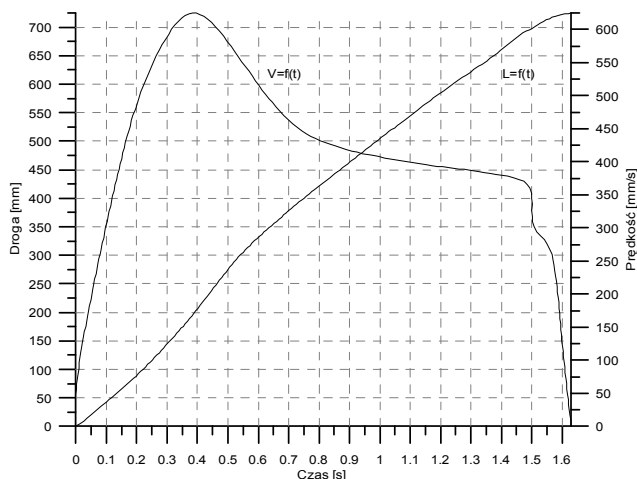
Rys. 4. Krzywe temperatury w czasie dla kompozytu AlMg10+8%SiC+2%SiC zarejestrowane podczas badania lejności

Fig. 4. Temperature curves for AlMg10+8%SiC+2%SiC registered during castability test

Z krzywych przedstawionych na rysunkach 2-4 wyznaczono chwilowe prędkości przepływu suspensji kompozytowych jako pochodne drogi po czasie. Funkcje długości spirali i prędkości płynięcia suspensji kompozytovej pokazano na rysunkach 5-7.

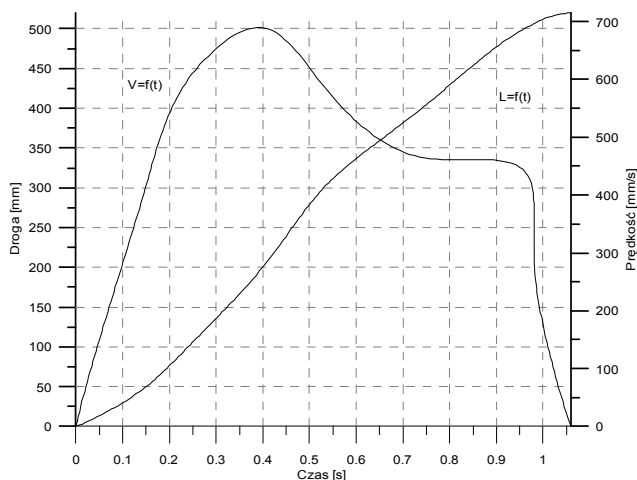
Na krzywych prędkości przepływu obserwuje się trzy charakterystyczne fazy płynięcia kompozytu. W począt-

kowej fazie przepływu obserwuje się występowanie piku prędkości, który powstaje prawdopodobnie jako „efekt działania układu wlewowego”, polegający na wzroście prędkości wywołanym podnoszeniem się metalu we wlewie [8]. W wielu publikacjach przedstawiających symulacje komputerowe lejności dla różnych metod, gdzie przyjmuje się w warunku początkowym stałą prędkość metalu na początku kanału, nie uwzględnia się tego wpływu [9]. Po osiągnięciu przez ciekłą suspensję prędkości maksymalnej następuje spadek i stabilizacja prędkości. W tej fazie metal płynie w przybliżeniu z ustaloną prędkością aż do końcowej fazy płynięcia, gdy prędkość dość gwałtownie spada. To gwałtowne zakończenie przepływu jest związane z pojawieniem się tzw. koncentracji krytycznej fazy stałej i jest charakterystyczne dla stopów o szerokim zakresie temperatur krzepnięcia.



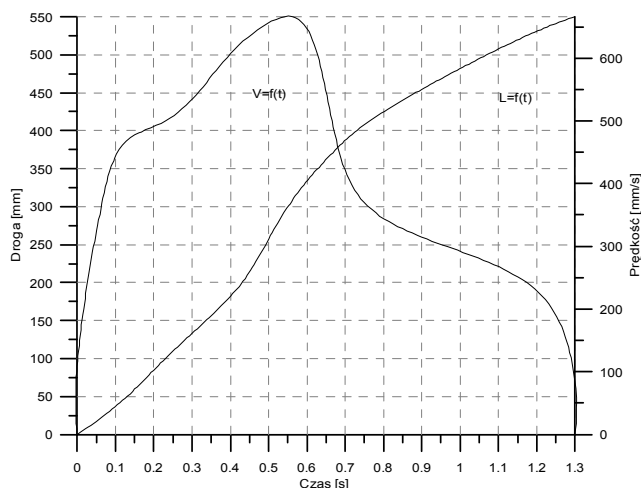
Rys. 5. Funkcje drogi i prędkości płynięcia suspensji kompozytowej AlMg10+10%C<sub>gr</sub>

Fig. 5. Distance and flow velocity functions for composite suspension AlMg10+10%C<sub>gr</sub>



Rys. 6. Funkcje drogi i prędkości płynięcia suspensji kompozytowej AlMg10+10%SiC

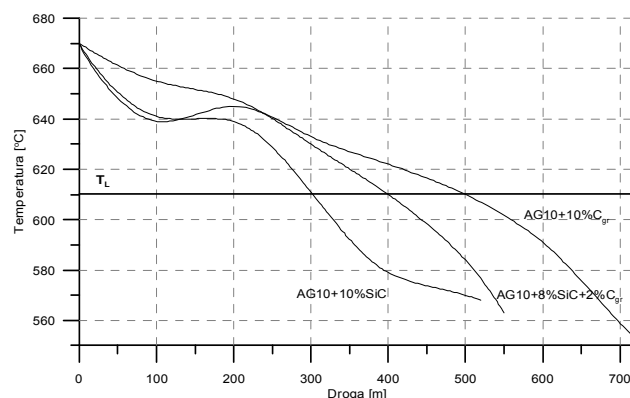
Fig. 6. Distance and flow velocity functions for composite suspension AlMg10+10%SiC



Rys. 7. Funkcje drogi i prędkości płynięcia suspensji kompozytowej AlMg10+8%SiC+2%C<sub>gr</sub>

Fig. 7. Distance and flow velocity functions for composite suspension AlMg10+8%SiC+2%C<sub>gr</sub>

Zarejestrowane krzywe z rysunków 2-4 umożliwiły wyznaczenie temperatury czoła strugi metalu na długości spirali, co przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Temperatura czoła strugi metalu

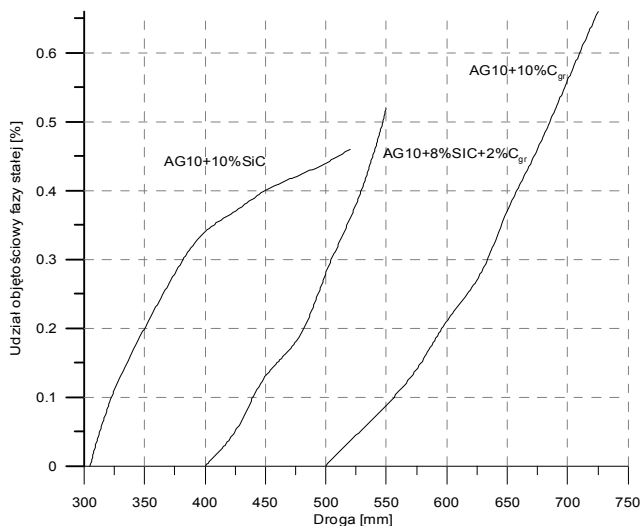
Fig. 8. Temperature of metal stream front

Najdłuższą drogę płynięcia wykazał kompozyt zawierający cząstki grafitu. Kompozyt z cząstkami węgla krzemu, jak i kompozyt hybrydowy przebyły prawie taką samą drogę w podobnym czasie. Różnice w lejności kompozytów wynikają głównie z kinetyki spadku temperatury (stygnięcia) podczas wypełniania wnęki formy odlewniczej. Kinetykę krzepnięcia kompozytów podczas płynięcia można ocenić, znając zależność ilości fazy stałej od temperatury. Z pomiarów określono temperaturę czoła strugi płynącego metalu (rys. 8). W teorii krystalizacji przyjmuje się różne funkcje temperaturowe ilości wykrystalizowanej fazy stałej w celu ilościowej oceny kinetyki procesu. W badaniach przyjęto najprostszy model liniowej funkcji udziału objętościowego fazy stałej  $S(T)$  z temperaturą, co przedstawiono równaniem [10]

$$S(T) = \frac{T_L - T}{T_L - T_S} \quad (1)$$

gdzie:  $T_L$ ,  $T_S$ ,  $T$  - odpowiednio równowagowa temperatura likwidus, solidus i chwilowa temperatura metalu.

Na rysunku 9 przedstawiono graficzny obraz zmiany udziału objętościowego fazy stałej na długości spiral dla badanych kompozytów obliczony z równania (1) i rysunku 8.



Rys. 9. Zmiana udziału objętościowego fazy stałej podczas płynięcia

Fig. 9. Change of the volume solid phase fraction during flow

Krzywe przedstawiające zmiany udziałów objętościowych fazy stałej potwierdzają odmienną kinetykę krystalizacji kompozytów z cząstkami SiC w porównaniu z cząstkami grafitu. Kompozyty z SiC wcześniej rozpoczynają krzepnięcie i wykazują większą szybkość wzrostu fazy stałej w porównaniu z kompozytami z grafitem. Dla kompozytu zawierającego cząstki SiC po osiągnięciu ok. 35% udziału fazy stałej następuje spowolnienie przyrostu tej fazy, a po osiągnięciu ok. 45% fazy stałej następuje zatrzymanie przepływu. Inaczej zachowuje się kompozyt zawierający cząstki grafitu, w którym przyrost fazy stałej jest dość równomierny, a zatrzymanie przepływu następuje dopiero przy ok. 65% fazy stałej.

Odmienne charaktery przepływu świadczą o dużym wpływie cząstek na przepływ suspensji oraz na procesy krzepnięcia takich układów. Należy przypuszczać, że cząstki SiC biorą aktywny udział w procesie krystalizacji kompozytu, czym można tłumaczyć mniejszą lejnosc i wzrost intensywnosci krystalizacji. Zagadnienie wpływu cząstek na krystalizację kompozytu wymaga jednak kontynuacji badań w tym zakresie, a szczególnie odnośnie do określenia wpływu cząstek na zarodkowanie i wzrost kryształów, a także wyznaczenia temperaturowej zależności ilości fazy stałej podczas krzepnięcia.

## LITERATURA

- [1] Śleziona J., Kształtowanie właściwości kompozytów stop Al-cząstki ceramiczne wytwarzanych metodami odlewniczymi, ZN Politechniki Śląskiej z. 47, Gliwice 1994.
- [2] Braszczyński J., Zyska A., Wpływ czasu i temperatury mieszania kompozytów AK7-SiC na rozkład cząstek w osnowie, Krzepnięcie Metali i Stopów 1998, 36.
- [3] Konopka Z., Cisowska M., Lejnosc kompozytu na osnowie stopu AlMg10 z cząstkami grafitu, Kompozyty (Composites) 2003, 3, 8.
- [4] Sobczak J., Kompozyty metalowe, Instytut Odlewnictwa, Kraków-Warszawa 2001.
- [5] Braszczyński J., Cisowska M., Próba oceny krzepnięcia kompozytów hybrydowych AlMg/SiC+C<sub>gr</sub>, Krzepnięcie Metali i Stopów 1999, 40.
- [6] Fraś E., Krystalizacja metali, WNT, Warszawa 2003.
- [7] Konopka Z., Cisowska M., Lejnosc kompozytu na osnowie stopu AlMg10 z cząstkami SiC, Archiwum Odlewnictwa 2003, 3, 9.
- [8] Konopka Z., Cisowska M., Ocena płynięcia ciekłego stopu AlMg10 w spiralnej próbie lejnosc, Archiwum Odlewnictwa 2002, 2, 4.
- [9] Sowa L., Bokota A., Analiza numeryczna krzepnących stopów dwuskładnikowych w pionowej próbie lejnosc, Archiwum Odlewnictwa 2004, 4, 14.
- [10] Mochnacki B., Suchy J., Modelowanie i symulacja krzepnięcia odlewów, WNT, Warszawa 1993.

Recenzent  
Michał Szweycer