



Zbigniew Konopka*, Małgorzata Łągiewka, Andrzej Zyska, Maciej Nadolski

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Poland

** Corresponding author. E-mail: konopka@mim.pcz.czest.pl*

Otrzymano (Received) 04.02.2008

ROLA CZĄSTEK GRAFITU W WYMIANIE CIEPŁA NA GRANICY METAL-FORMA PODCZAS PRZEPEŁYWU KOMPOZYTU W KANALE FORMY

Przedstawiono wyniki obliczeń współczynnika wymiany ciepła na granicy metal-forma podczas płynięcia stopu AlMg10 i porównawczo kompozytów na osnowie stopu AlMg10 z 10 i 20% udziałem stałych cząstek grafitu jako zbrojenia w kanale spiralnej próby leżności. Na podstawie pomiarów temperatury metalu podczas płynięcia wyznaczono prędkości płynięcia i krzywe stygnięcia. Te dane pomiarowe wykorzystano do obliczenia wartości współczynników wymiany ciepła w danym miejscu strugi i długości kanału formy. Przedstawiono graficzną prezentację obliczeń zmiany współczynnika wymiany ciepła w czasie i na długości kanału. Przedstawiono porównanie uzyskanych wartości i analizę wpływu cząstek grafitu na wymianę ciepła. Stwierdzono, że cząstki grafitu w zawieszynie kompozytowej powodują spadek wartości współczynnika wymiany ciepła na granicy metal-forma. Podczas płynięcia i stygnięcia metalu maleje wartość współczynnika wymiany ciepła na czole strugi wywołanego obniżaniem się temperatury i prędkości. Krzepnięcie metalu hamuje spadek jego temperatury i jednocześnie prędkości przepływu, co ma decydujący wpływ na spadek wartości współczynnika wymiany ciepła.

Słowa kluczowe: kompozyty współczynnik wymiany ciepła, analiza termiczna, stopy aluminium

THE SIGNIFICANCE OF GRAPHITE PARTICLES IN THE HEAT EXCHANGE AT THE METAL-MOULD INTERFACE DURING THE COMPOSITE FLOW ALONG THE MOULD CHANNEL

Calculation results concerning the heat transfer coefficient at the metal-mould interface during flow of the AlMg10 alloy and AlMg10 matrix alloy composites with 10 and 20% volume fractions of solid graphite particles as reinforced in the channel-like cavity of the spiral castability test mould. The experimental cooling curve as well as changes of flow velocity have been determined on the basis of the measured metal temperature during flow. The cooling curve equation for the examined alloy, derived from the heat balance condition in a casting-mould system and taking into account experimental data concerning changes in metal temperature and its flow velocity, has enabled evaluation of the heat transfer coefficient at a given point of a metal stream along the mould channel. Graphic representations of changes of this coefficient against time and the channel length have been presented. Graphite particles in composite suspension cause decrease of heat transfer coefficient at the metal - mould interface. The value of heat transfer coefficient at the stream front decreases during metal flow and cooling due to the drop in its temperature and velocity. Solidification of metal retards this temperature and velocity decrease, which is decisive for the decrease of the heat transfer coefficient value.

Keywords: heat exchange, heat transfer coefficient, thermal analysis, aluminium alloys

WPROWADZENIE

Wymiana ciepła między metalem a powierzchnią wewnętrzną formy odlewniczej opisywana jest matematycznie warunkiem brzegowym II rodzaju (Newtona). W warunku tym występuje współczynnik wymiany ciepła, który ujmuje przekazywanie ciepła w wyniku mechanizmu konwekcji i promieniowania. Przepływ zawiesziny kompozytowej w kanale formy zależy od właściwości reologicznych układu. Na prędkość przepływu zawiesziny istotny wpływ ma udział stałych cząstek w mieszaninie, ich kształt i wielkość, a także siły adhezji między cząstkami zbrojenia i ciekłą osnową

związane ze zjawiskiem zwilżania [1, 2]. W technologii odlewniczej wymiana ciepła występuje między ciekłym metalem i powierzchnią formy podczas przepływu metalu bądź zakrzepłą powierzchnią odlewu a szczeliną gazowo-powietrzną [1, 2]. Wyróżnione przypadki dotyczą ważnego etapu zalewania i wypełniania wnęki formy oraz stygnięcia krzepnącego odlewu w formach metalowych, w których szczelina tworzy się w wyniku skurczu metalu i nieznacznej podatności formy. Szczelinę tworzą dodatkowo powłoki ochronne i izolacyjne na powierzchni formy i produkty ich zgazowania w wy-

sokiej temperaturze [3-5]. Wymiana ciepła w układzie metal-forma odlewnicza ma więc istotny wpływ na kinetykę stygnięcia i krzepnięcia odlewu, co z kolei decyduje o jego strukturze i właściwościach. Wymiana ciepła między metalem a powierzchnią formy ma złożony charakter, ponieważ jest efektem działania różnych mechanizmów przekazywania ciepła, głównie konwekcji i promieniowania [6]. Wymiana ciepła określana jest wartością współczynnika wymiany ciepła. Znajomość tego współczynnika jest konieczna w określaniu warunków brzegowych III rodzaju niezbędnych w matematycznym opisie krzepnięcia odlewów i numerycznej symulacji tego procesu [7].

Współczynnik wymiany ciepła jest funkcją wielu zmiennych i zależy on od właściwości termofizycznych płynu, jak: rozszerzalność cieplna, gęstość, lepkość, oraz prędkości i charakteru przepływu, a także zmiany stanu skupienia (krystalizacja) [8]. Brak matematycznego opisu złożonego zjawiska przejmowania ciepła uniemożliwia analityczne i numeryczne obliczenie wartości współczynnika wymiany dla zadanych warunków. Do tej pory wartości współczynnika wymiany ciepła wyznacza się na podstawie badań modelowych z zastosowaniem analizy wymiarowej i teorii podobieństwa [9]. Najlepszym rozwiązaniem wydaje się być zastosowanie pomiarów parametrów przepływu i stygnięcia metalu do wyznaczenia wartości tego współczynnika.

METODYKA I WYNIKI BADAŃ

Współczynnik wymiany ciepła oblicza się metodą analityczno-doświadczalną, która polega na rozwiązaniu równania bilansu ciepła oddanego przez płynący metal i przejętego przez formę i wykorzystaniu danych pomiarowych pola prędkości i temperatury metalu w kanale formy. Dla uproszczenia opisu i rozwiązania przyjęto, że metal nie krzepnie podczas płynięcia, a ciepło przepływa tylko w kierunku prostopadłym do ścianek formy i nie występują gradienty temperatury w tym kierunku. Przy takich założeniach otrzymuje się równanie różniczkowe zwyczajne, którego całka szczególna wyznacza nieznaną temperaturę metalu podczas płynięcia dla danej temperatury zalewania i właściwości układu [1]. Jeżeli temperaturę i prędkość metalu można wyznaczyć doświadczalnie, to przekształcenie uzyskanego rozwiązania umożliwi obliczenie zmian wartości współczynnika wymiany ciepła na granicy metal-forma podczas płynięcia z następującej zależności [3]:

$$\alpha(t) = R \rho'_1 c'_1 \frac{\ln \frac{v_{zal}}{v_1(t)}}{t - \frac{z}{w(t)}} \quad (1)$$

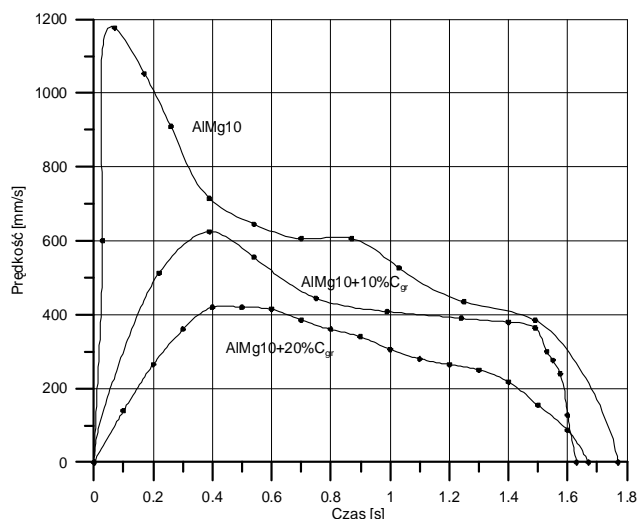
gdzie: R - sprowadzona grubość ścianki odlewu, ρ'_1 i c'_1 - odpowiednio gęstość i ciepło właściwe ciekłego

metal, $v_{zal} = T_{zal} - T_{2p}$ - nadwyżka temperatury zalewania, $v_1(t) = T_1(t) - T_{2p}$ - nadwyżka temperatury metalu (zmienna), T_{2p} - temperatura początkowa formy, z - odległość od czoła strugi, $w(t)$ - prędkość metalu (zmienna), t - czas.

Pomiary temperatury i prędkości kompozytów i stopu AlMg10 podczas płynięcia wykonano w formach odlewniczych dla spiralnej próby lejności. Odlew próby spiralnej ma przekrój trapezu o wymiarach podstaw 9 i 5 mm i wysokości 8 mm, a jego sprowadzona grubość ścianki wynosi $R = 1,85 \cdot 10^{-3}$ m. Ciekłe kompozyty i stop odlewano grawitacyjnie z temperatury 973 K do form wykonanych z masy formierskiej na osnowie piasku kwarcowego o średniej wielkości ziarna 0,09 mm ze spoiwem olejowym. Masa cechuje się dużą trwałością i nadaje się bezpośrednio do formowania, ponieważ jej spoiwo nie wysycha. Wysoka wytrzymałość na ściskanie i na ścinanie oraz dobra przepuszczalność i płynność masy na wilgotno zapewniają odlewom bardzo wysoką dokładność wymiarową i wysoką gładkość powierzchni.

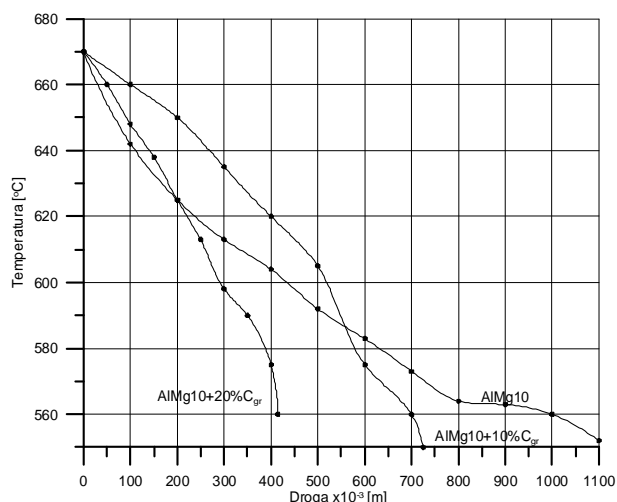
W formach próby spiralnej zainstalowano termoelementy Ni-CrNi wykonane z drutu o średnicy 0,3 mm ze spoiną o średnicy 0,5 mm, pokrytą warstwą pokrycia, umieszczone w odległościach co 100 mm od wlewu głównego w miejscach, które są znacznikami długości w próbie spiralnej. Ilość termoelementów i odległości, w jakich zostały zainstalowane, określono na podstawie wcześniejszych prób [9]. Pierwszy termoelement był umieszczony tuż za wlewem głównym. Rejestrację pomiaru temperatury w czasie płynięcia metalu w kanale formy wykonano za pomocą komputerowej laboratoryjnej karty pomiarowej PCL 818 o maksymalnej częstotliwości próbkowania 100 kHz z 16 kanałami unipolarnymi. Do pomiarów wykorzystano program akwizycji danych Visual LAB. Zastosowana programowa częstotliwość próbkowania każdego kanału temperaturowego wynosiła 100 Hz. Wykonywano pomiary, z których uzyskano krzywe przedstawiające zmiany temperatury płynącego metalu w czasie w poszczególnych miejscach na długości wnęki formy. W czasie płynięcia czoło strugi metalu styka się z kolejnymi spoinami termoelementów, które rejestrują ten moment. W rezultacie, znając dokładne rozmieszczenie termoelementów w kanale formy, wyznacza się rzeczywistą, chwilową prędkość płynięcia metalu, a także długość zalanego kanału (lejność) w czasie. Natomiast rzeczywista temperatura metalu i spoiny rejestrowana jest po pewnym czasie od momentu kontaktu spoiny z metalem. Taka zwiłoka czasowa, znana jako stała czasowa danego układu metal-spoina termoelementu, jest rezultatem bezwładności cieplnej termoelementu. W badaniach pola temperatury płynącego metalu obliczono stałą czasową, której wartość dla badanego układu wynosi 0,28 sekundy. W ten sposób wyznacza się długość kanału zalanego w czasie t , co wyznacza chwilową prędkość płynięcia metalu w kanale formy $w(t)$ oraz temperaturę metalu $v_1(t)$.

W obliczeniach współczynnika wymiany ciepła $\alpha(t)$ przyjęto następujące właściwości ciekłego metalu: $\rho_{\text{AlMg}} = 2300 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{AlMg10C}} = 2270 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{AlMg20C}} = 2240 \text{ kg/m}^3$, $c_{\text{AlMg}} = 1300 \text{ J/kgK}$, $c_{\text{AlMg10C}} = 1292 \text{ J/kgK}$, $c_{\text{AlMg20C}} = 1290 \text{ J/kgK}$. Wyniki wykonanych pomiarów prędkości płynięcia i temperatury czoła strugi metalu przedstawiono na rysunkach 1-3 [10].



Rys. 1. Prędkość czoła strugi badanych materiałów w kanale próby lejności

Fig. 1. The velocity of stream front for examined materials flowing along the castability test mould



Rys. 2. Temperatura czoła strugi metalu na długości kanału formy

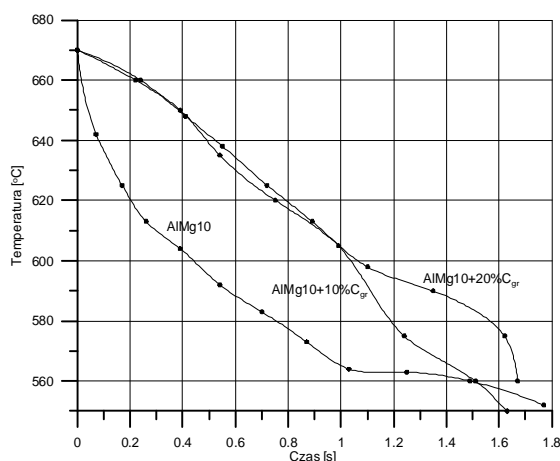
Fig. 2. Temperature of metal front stream along the mould channel

Wartości mierzonych wielkości wykorzystane do obliczeń współczynnika wymiany ciepła zestawiono w tabeli 1.

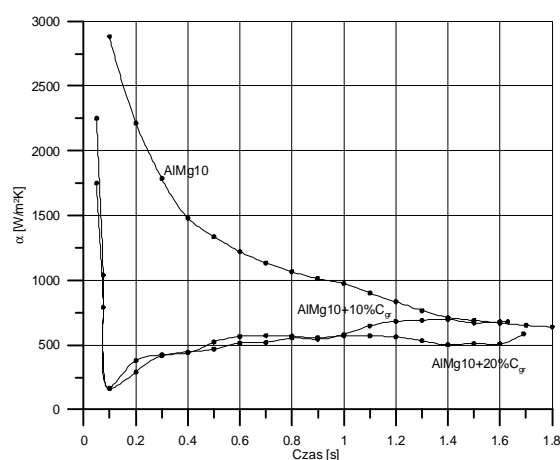
Przyjmując różne wartości zmiennej w równaniu (1), oblicza się wartości współczynnika wymiany ciepła w dowolnym miejscu kanału formy. Na rysunku 4 przedstawiono zmianę współczynnika wymiany ciepła na czole strugi i w wybranych miejscach kanału formy, a na rysunku 5 zmianę tego współczynnika na czole strugi metalu na długości kanału formy.

TABELA 1. Wielkości pomiarowe płynięcia metalu w formie i obliczone wartości współczynnika wymiany ciepła na czole strugi α
TABLE 1. Measured values of metal flow parameters and calculated values of heat transfer coefficient at the stream front α

Czas s	AlMg10+10%C _{gr}			AlMg10+20%C _{gr}			AlMg10		
	$v_1(t)$ K	$w(t)$ m/s	α_c W/m ² K	$v_1(t)$ K	$w(t)$ m/s	α_c W/m ² K	$v_1(t)$ K	$w(t)$ m/s	α_c W/m ² K
0	650	0	∞	650	0	∞	650	0	∞
0,1	648	0,30	167	648	0,14	165	617	1,15	2882
0,2	641	0,48	378	643	0,26	290	600	1,00	2214
0,3	635	0,59	422	635	0,36	416	590	0,83	1786
0,4	629	0,62	446	629	0,42	439	584	0,71	1481
0,5	623	0,58	461	619	0,41	523	576	0,66	1337
0,6	614	0,52	515	610	0,41	566	568	0,63	1245
0,7	608	0,46	518	603	0,38	574	563	0,61	1134
0,8	599	0,43	554	597	0,36	569	557	0,61	1067
0,9	593	0,41	545	592	0,34	556	551	0,60	1012
1,0	584	0,41	581	584	0,31	573	545	0,55	975
1,1	570	0,40	648	578	0,28	571	543	0,50	902
1,2	559	0,39	682	573	0,26	562	543	0,45	833
1,3	551	0,39	690	571	0,25	533	543	0,42	765
1,4	543	0,38	697	570	0,22	502	543	0,40	711
1,5	540	0,35	671	563	0,15	512	539	0,38	690
1,6	532	0,12	679	558	0,09	510	537	0,25	669
1,7	530	0,00	680	540	0,00	580	533	0,12	651
1,8							532	0,00	640

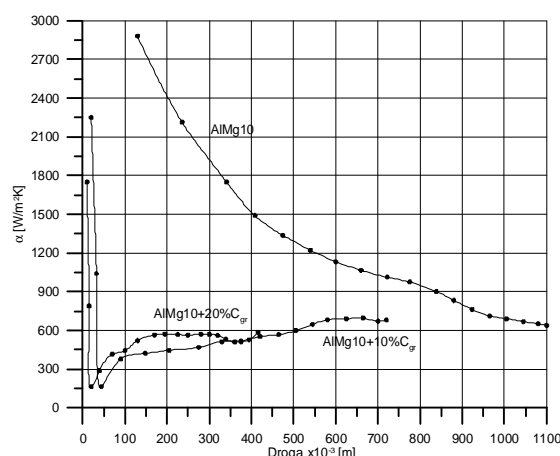


Rys. 3. Temperatura czoła strugi badanych materiałów w funkcji czasu
Fig. 3. Temperature of stream front of examined materials versus time



Rys. 4. Współczynnik wymiany ciepła na granicy metal-forma podczas płynięcia

Fig. 4. Heat transfer coefficient on the metal-mould interface during flow



Rys. 5. Zmiana współczynnika wymiany ciepła czoła metalu na długości kanału formy

Fig. 5. Change of heat transfer coefficient at the stream front along the mould channel

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Pomiary temperatury metalu podczas płynięcia w kanale formy pozwolą na obliczenie współczynnika

wymiany ciepła na granicy metal-forma. Zastosowana w badaniu metoda teoretyczno-doświadczalna uwzględniła w obliczeniu współczynnika wymiany ciepła rzeczywistą zmianę temperatury i prędkości płynięcia metalu w kanale formy. Równanie (1) formalnie nie uwzględnia krzepnięcia metalu podczas płynięcia, ale przyjęcie w obliczeniach rejestrowanych zmian temperatury i prędkości metalu takie oddziaływanie uwzględniają. Tym samym obliczone wartości współczynnika wymiany ciepła na granicy metal-forma podczas płynięcia odzwierciedlają rzeczywiste warunki wymiany ciepła. Uzyskane wyniki są zgodne z teorią wymiany ciepła przy wymuszonym przepływie przez kanał formy odlewniczej. Przepływowi metalu przez kanał formy towarzyszy intensywne stygnięcie przy ściankach formy, które zwiększa lepkość metalu w tym miejscu. W efekcie takiego pola temperatury metal ma większą prędkość w osi strugi niż przy ściankach. Profil prędkości stygnącego metalu w przekroju poprzecznym kanału nie jest paraboliczny, co zmniejsza odcinek stabilizacji hydrodynamicznej i termicznej. Na długości odcinków stabilizacji hydrodynamicznej i termicznej ustalają się odpowiednio profil prędkości i wartość miejscowego współczynnika wymiany ciepła. Zmniejszeniu prędkości przepływu metalu przy ściankach formy towarzyszy zmniejszenie wartości współczynnika wymiany ciepła. Wzrost zawartości cząstek grafitu w kompozycie wywołuje spadek prędkości przepływu i zmniejszenie szybkości stygnięcia, szczególnie w początkowej fazie płynięcia. W rezultacie obserwuje się gwałtowny spadek wartości współczynnika wymiany ciepła w porównaniu z wartością tego współczynnika dla stopu osnowy. Rysunki 4 i 5 potwierdzają takie zmiany obliczonego współczynnika wymiany ciepła. Nie obserwuje się istotnych różnic w wymianie ciepła w grupie kompozytów. Wyraźne obniżenie intensywności wymiany ciepła podczas przepływu zawieszin kompozytowych skutkuje zmniejszeniem prędkości krzepnięcia kompozytów w porównaniu ze stopem osnowy. Krzepnięcie metalu z jednej strony hamuje spadek jego temperatury w wyniku wydzielania ciepła krzepnięcia, z drugiej zaś wywołuje silny spadek prędkości płynięcia. Na podstawie wykonanych pomiarów, obliczeń i analizy można sformułować następujące wnioski:

- współczynnik wymiany ciepła na granicy metal-forma można obliczyć, wykorzystując dane doświadczalne pola prędkości i temperatury metalu podczas płynięcia w kanale formy;
- podczas płynięcia i stygnięcia metalu następuje spadek wartości współczynnika wymiany ciepła na czołe strugi wywołany spadkiem temperatury i prędkości;
- krzepnięcie metalu hamuje spadek jego temperatury i jednocześnie prędkości przepływu, co ma decydujący wpływ na spadek wartości współczynnika wymiany ciepła;

- obecność cząstek grafitu w zawieszynie kompozyto-
wej wywołuje spadek wartości współczynnika wy-
miany ciepła na granicy metal-forma w porównaniu
z wartością tego współczynnika dla stopu AlMg10.

LITERATURA

- [1] Longa W., Solidification of castings (in Polish), Śląsk, Katowice 1985.
- [2] Balandin G.F., Principles of theory of castings formation (in Russian), Maszynostroenie, Moskwa 1979.
- [3] Longa W., Solidification of castings in metal mould (in Polish), Śląsk, Katowice 1978.
- [4] Braszczyński J., Theory of foundry processes (in Polish), PWN, Warszawa 1989.
- [5] Fleming M.C., Solidification processing, Mc Graw-Hill Book, New York 1973.
- [6] Wiśniewski S., Wiśniewski T., Heat exchange (in Polish), WNT, Warszawa 2000.
- [7] Mochnacki B., Suchy J., Numerical methods in computations of foundry processes, Polish Foundrymen's Technical Association, Kraków 1995.
- [8] Puzyrewski R., Sawicki J., Principles of fluid mechanics and hydraulics (in Polish), PWN, Warszawa 1987.
- [9] Zierep J., Similarity criteria and modeling principles in fluid mechanics (in Polish), PWN, Warszawa 1978.
- [10] Konopka Z., Łągiewka M., Solidification of AlMg10 alloy during flow in casting mould, Hutnik 2006, 6, 285.