46/44

Solidification of Metals and Alloys, Year 2000, Volume 2, Book No. 44 Krzepnięcie Metali i Stopów, Rok 2000, Rocznik 2, Nr 44 PAN – Katowice PL ISSN 0208-9386

EFEKTYWNY WSPÓŁCZYNNIK ROZDZIAŁU STĘŻEŃ WE WLEWKACH Z AlCu0,5 KRZEPNĄCYCH POD WPŁYWEM WIRUJĄCEGO POLA MAGNETYCZNEGO

J. SZAJNAR¹ Katedra Odlewnictwa, Politechnika Śląska

STRESZCZENIE

Przeprowadzono badania nad rozkładem stężenia miedzi we wlewkach walcowych z AlCu0,5 krzepnących przy wirowym ruchu ciekłego metalu wytwarzanym przez wirujące pole magnetyczne. Stwierdzono znaczne różnice w rozkładzie stężeń pomiędzy strefą kryształów kolumnowych a równoosiowych w odlewach krzepnących przy wymuszonej konwekcji. Wyznaczono efektywny współczynnik rozdziału faz, uzależniając jego wartość od prędkości krystalizacji i prędkości ciekłego metalu w formie oraz od położenia frontu krystalizacji.

1. WPROWADZENIE

Stosowanie pola magnetycznego w czasie krzepnięcia odlewu ma na celu wytworzenie ruchu ciekłego metalu. Ruch ciekłego metalu jest przyczyną najczęściej pozytywnych zmian w strukturze odlewów. Te pozytywne zmiany to przede wszystkim zmniejszenie lub likwidacja strefy kryształów kolumnowych, usunięcie porowatości i zmiany w rozkładzie składników stopowych.

Uzyskanie tych zmian wymaga jednak spełnienia dwóch podstawowych czynników [1-4]:

-stężenie składnika stopowego w stopie musi być powyżej pewnej minimalnej wartości, -prędkość strumienia ciekłego metalu przed frontem krystalizacji powinna przekroczyć tzw. prędkość minimalną.

¹ Dr inż., e-mail: sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl

Spełnienie wyżej wymienionych warunków ważne jest przy krzepnięciu odlewów z szerokim zakresem czynników gradientowo-kinetycznych, ale takich, przy których tworzy się strefa kryształów kolumnowych.

Wymuszony ruch ciekłego metalu przed frontem krystalizacji w istotny sposób zmienia warunki krzepnięcia odlewu poprzez zmianę zjawisk zachodzących na powierzchni rozdziału, a także procesów transportu masy i ciepła głównie w fazie ciekłej. Należy tu wymienić przede wszystkim rozdział składników stopowych między fazami ciekłą i stałą na froncie krzepnięcia określany najczęściej współczynnikiem rozdziału k_o, procesy dyfuzyjne dążące do ujednorodnienia składu chemicznego fazy ciekłej, określane wartością współczynnika dyfuzji D_L .

W praktyce często wpływ wymuszonej konwekcji ciekłej fazy ujmowany jest zmianą grubości warstwy dyfuzyjnej. Transport składnika segregującego w tej warstwie odbywa się wyłącznie poprzez dyfuzję. Poza tą warstwą jednorodność chemiczna ciekłej fazy wywoływana jest przez mieszanie cieczy. Literatura ujmuje wartości współczynników k_o i D dla warunków równowagowych, przedstawianych na stosownych wykresach równowagi fazowej danego stopu. Wartości tych współczynników są mało przydatne dla analizy procesu krzepnięcia odlewu przy wymuszonej konwekcji.

Krzepnięcie rzeczywistego odlewu w warunkach naturalnych związane jest z przebiegiem procesów nierównowagowych i niestacjonarnych. Precyzyjna analiza tych procesów wymaga uzależnienia parametrów krystalizacji od zmieniających się warunków krzepnięcia odlewu na powierzchni rozdziału faz. Stąd proponuje się korzystanie z zależności na tzw. efektywny współczynnik rozdziału uzalżniony od prędkości krystalizacji [5-7]:

$$k_{ef} = \frac{k_o}{k_o + (1 - k_o) \exp\left(-\frac{V\delta}{D}\right)}$$

gdzie:

D – współczynnik dyfuzji, δ - szerokość warstwy dyfuzyjnej, k_o – współczynnik rozdziału faz, V – predkość krystalizacji,

ale jego użycie wymaga znajomości szerokości warstwy dyfuzyjnej δ . Ta wielkość z kolei trudna jest do dokładnego wyznaczenia. Szerokość warstwy dyfuzyjnej nie jest wielkością mierzalną, dlatego jej wartość możemy określić z zależności analitycznych, często przy wykorzystaniu liczb kryterialnych. Jej wartość zmienia się bardzo szerokim zakresie i jak podaje literatura zależy od intensywności mieszania. Przy mieszaniu mechanicznym lub magnetycznym jej wartość zawarta może być w przedziale od 0,01 do 0,3mm i tak Ki-Bae i in. [8] podają, że δ dla Si i Fe wynosi odpowiednio 0,01÷0,005mm i 0,01÷0,065mm, a Vandenblucke i in. [9] podaje δ = 0,05÷0,3mm oraz dla krzepnięcia bez mieszania od 1 do 3mm.

W niniejszej pracy zaproponowano uzależnienie efektywnego współczynnika rozdziału k od miejsca położenie frontu krystalizacji i od prędkości ruchu ciekłego metalu w formie oraz praktyczny sposób jego wyznaczania w oparciu o analizę stężenia składnika stopowego w fazie stałej w czasie krzepnięcia odlewu walcowego w tradycyjnych warunkach i pod wpływem wirującego pola magnetycznego tj. przy wirowym ruchu ciekłego metalu w formie. Tak wyznaczone wartości wspólczynnika k(x) pozwolą na traktowanie analizy trwałości frontu krystalizacji przy użyciu np. stężeniowego kryterium trwałości frontu jako procesu niestacjonarnego.

2. BADANIA WŁASNE

Celem badań było określenie rozkładu miedzi wzdłuż przekroju poprzecznego wlewka walcowego odlanego z AlCu0,5 i wyznaczenie korelacji pomiędzy zmianami stężenia oraz efektywnym współczynnikiem rozdziału k(x) a prędkością ruchu ciekłego metalu przed frontem krystalizacji V_{cm} i prędkością krystalizacji V.

Zakres badań obejmował wykonanie wlewków o wymiarach ϕ 45 x 180mm w wirującym polu magnetycznym (WPM) przy zmienianej na trzech poziomach wartości indukcji co jest równoznaczne ze zmianami prędkości wirowania ciekłego metalu w formie (tab. 1).

Tabela 1. Wartości indukcji B wirującego pola magnetycznego i maksymalnej prędkości obwodowej ciekłego metalu V_{cm} w formie

 Table 1. Magnetic induction B of rotating magnetic field and maximum peripheral velocity of liquid metal V_{cm} in mould

indukcja pola magnetycznego B [T]	0,015	0,025	0,035
max prędkość obwodowa ciekłego metalu V_{cm} [m/s]	0,55	0,9	1,1

Wlewki odlewano w kokili grafitowej o grubości ścianki 7mm. Temperatura zalewania wynosiła 973K. Czas oddziaływania pola magnetycznego wynosił 15s. Próbki do analizy chemicznej wycinano w odległości 70mm od dna wlewka. Analizę wykonano mikroanalizatorze rtg ICXA733 Jeol. Stężenie określano wzdłuż promienia wlewka, w odległościach co 1mm na długości 2mm. Wyniki badań przedstawiono na rys. 1 i 2.



- Rys. 1. Rozkład stężenia Cu we wlewkach z AlCu0,5: a) odlew wzorcowy, b) odlew wykonany pod działaniem WPM o indukcji B=0,015T, Vcm=0,55m/s
- Fig. 1. Copper concentraction in AlCu0,5 ingots: a) traditional casting, b) the casting made in rotating magnetic field (RMF) B=0,015T, Vcm=0,55m/s



Rys. 2. Rozkład stężenia Cu we wlewkach z AlCu0,5 wykonanych pod działaniem WPM o indukcji: a) B=0,025T, V_{c.m}=0,9m/s; b) B=0,035T, V_{c.m}=1,1m/s
Fig. 2. Copper concentraction in AlCu0,5 ingots made in RMF: a) B=0,025T, b) B=0,035T

3. ANALIZA WYNIKÓW

Ruch ciekłego metalu zmienia warunki wymiany masy na froncie krystalizacji czego efektem są różnice w rozkładzie stężenia miedzi w odlanych wlewkach (rys. 1, 2). Zmiany te pociągają za sobą również zmiany w makrostrukturze odlewów (rys. 3, 4). Przy najmniejszej prędkości ruchu ciekłej fazy ($V_{cm} = 0.55$ m/s) nie uzyskano zmniejszenia szerokości strefy kryształów kolumnowych, ale też nie rejestruje się znaczących różnic w rozkładzie stężenia Cu w próbkach wykonanych przy wymuszonej konwekcji i bez jej wpływu (rys. 1a, b). Krzepnięcie odlewu przy większych prędkościach wirowania ciekłego metalu w formie daje zmniejszenie szerokości strefy kryształów kolumnowych i równocześnie rozkład Cu jest bardziej jednorodny (rys. 2a, b). Jednocześnie średnie stężenie Cu w tej strefie jest mniejsze niż w odlewach tradycyjnych (tab. 2).



345

- Rys. 3. Makrostruktura odlewów z AlCu0,5 wykonanych: A4) przy Vcm=0 odlew wzorcowy; A6) przy Vcm=0,55m/s;
- Fig. 3. Macrostructure of AlCu0,5 ingots casted without influence of magnetic field (A4) and casted in rotating magnetic field Vcm=0,55m/s (A6)



- Rys. 4. Makrostruktura odlewów z AlCu0,5 wykonanych: A5) przy Vcm=0,9m/s; A7) przy Vcm=1,1m/s
- Fig. 4. Macrostructure of AlCu0,5 ingots casted in magnetic field: Vcm=0,9m/s (A5) and Vcm=1,1m/s (A7)

	odlew	odlewy wykonane w WPM o indukcji						
	wzorcowy	B=0,015T	B=0,025T	B=0,035T				
strefa kryształów	0,505	0507	0,467	0,479				
kolumnowych C _{skk}								
strefa kryształów	0,446	0489	0,478	0,526				
równoosiowych C _{skr}								

Tabela 2. Średnie stężenie Cu w strefie kryształów kolumnowych i równoosiowych Table 2. Average copper concentraction in columnar crystals zone and eqiaxed crystals zone

$C_{skk} - C_{skr} = \Delta C$ 0,057 0,018 -0,011 -0,047
--

W tab. 3 podano wartości efektywnego współczynnika rozdziału stężeń k(x) obliczonego z pierwotnej definicji tej wielkości tj. k_{ef} =Cs/Co. Współczynnik uzależniono od położenia frontu krystalizacji i obliczono wg zależności

k(x)=Cs(x)/Co

gdzie:

Cs(x) – stężenie Cu we wlewku na przekroju poprzecznym (kol.2,3 tab. 3), Co – średnie stężenie Cu w odlewie.

Tabela 3. Stężenie Cu, współczynnik rozdziału faz *k*(*x*) oraz prędkości (*Vbp*, *Vwp*) krystalizacji i ciekłego metalu przed powierzchnią międzyfazową *Vcm* w czasie tworzenia się strefy kryształów kolumnowych

Table 3. Copper	concentraction,	distribution	coefficient $k(x)$	c), velocity	of solidification	(Vbp,	Vwp)
and vel	ocity of liquid	metal at the	interface Vcm				

Х	% Cu (bp)	% Cu (wp)	współczynnik	współczynnik	Vcm	Vbp	Vwp
[mm			rozdziału faz	rozdziału faz	[m/s]	[mm/s]	[mm/s]
]			k(x) bp	k(x) wp			
0,1	0,486	0,461	0,954	0,871	1,3	4	3,1
1,1	0,491	0,480	0,963	0,908	1,1	3,5	2,6
2,1	0,495	0,485	0,971	0,918	1,0	3	2,21
3,1	0,498	0,489	0,977	0,924	0,92	2,2	1,7
4,1	0,500	0,491	0,980	0,928	0,88	1,75	1,48
5,1	0,501	0,493	0,982	0,932	0,83	1,3	1,08
6,1	0,501	0,495	0,982	0,935	0,78	1,06	0,9
7,1	0,500	0,496	0,980	0,937	0,74	0,88	0,75
8,1	0,498	0,497	0,976	0,939	0,70	0,75	0,67
9,1	0,495	0,498	0,970	0,941	0,67	0,6	0,55
10,1	0,490	0,499	0,962	0,943	0,64	0,51	0,53
11,1	0,485	0,500	0,952	0,945	0,62	0,4	0,47
12,1	0,479	0,500	0,940	0,946	0,6	0,35	0,45

x – odległość od powierzchni bocznej odlewu, Vbp, Vwp – prędkość krystalizacji przy odlewaniu tradycyjnym (bp) i pod wpływem wirującego pola magnetycznego (wp), Vcm – maksymalna prędkość obwodowa ciekłego metalu w formie.



Rys. 5. Zmiana k(x), Vwp i Vcm w zależności od odległości od powierzchni zewnętrznej odlewu x (dla próby A7 przy B=0,035T, Vcm=1,1m/s)
Fig. 5. Relationship of change of k(x), Vwp and Vcm versus outside

cast surface (for simple A7 with B=0,035T, Vcm=1,1m/s)

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że istnieje ścisła korelacja pomiędzy zmianami w rozkładzie stężenia miedzi wywołanymi ruchem ciekłego metalu a szerokością strefy kryształów kolumnowych. Rejestrowane w odlewach krzepnących przy wirowym ruchu ciekłej fazy mniejsze stężenie jest przyczyną mniejszej strefy kryształów kolumnowych. Można to tłumaczyć wolniej narastającym przed frontem krystalizacji przechłodzeniem stężeniowym. Dzieje się tak tylko do pewnego miejsca w odlewie tzn. do takiego położenia frontu krystalizacji (x=8÷10mm), przy którym stężenie miedzi zaczyna być większe niż stężenie w tym samym miejscu w odlewach wykonywanych tradycyjnie. Krzepnięcie pierwszej warstwy odlewu, tj. x=0+8mm, związane jest z konwekcyjnym odsyłaniem składnika z frontu krystalizacji w głąb cieczy. Ciecz wzbogaca się w miedź w większy stopniu niż przy krzepnięciu tradycyjnym. W efekcie od pewnej grubości warstwy zakrzepłej (ok. 8mm), w końcowej części strefy kryształów kolumnowych , stężenie miedzi jest coraz większe. Zostają stworzone warunki do szybko narastającego przechłodzenia stężeniowego, następuje utrata trwałości frontu i zjawisko zarodkowania przed frontem krystalizacji. Odlew z krzepnięcia kierunkowego przechodzi w krzepnięcie objętościowe.

Przedstawiony w pracy sposób obliczania efektywnego współczynnika rozdziału faz wiąże jego wartość z rzeczywistymi warunkami odlewania. Wartość współczynnika w danym miejscu odlewu można wyznaczyć na podstawie wykresu (rys. 5) w zależności od prędkości krystalizacji i intensywności ruchu ciekłej fazy.

LITERATURA

- [1] J. Szajnar, J. Gawroński: Krzepnięcie Metali i Stopów 1997, nr 30, s. 213.
- [2] J. Szajnar: Krzepnięcie Metali i Stopów 1998, nr 37, s.139.
- [3] J. Szajnar, J. Gawroński: Acta Metalurgica Slovaca 1998, vol. 4, no. 2, s.139.
- [4] J. Szajnar: Krzepnięcie Metali i Stopów 1999, vol. 1, nr 40, s.213.
- [5] E. Fraś: Krzepnięcie metali i stopów, WNT, Warszawa (1992)
- [6] W. Kurz, D. Fisher, Fundamentals solidification, Trans. Tech. Public., Paris, 1984.
- [7] HurleD.T., Jakeman E., J. Cryst. Growth, 1968, no. 3-4, s. 574.
- [8] Ki-Bae i in.: *Effects of fluid flow on the solute redistribution of high purity aluminium ingot,* Proc. 62nd World Foundry Congres, Philadelphia 1996.
- [9] L. Vandenbulcke, G. Vuillard: J. Cryst. Growth 1976, No. 36, p. 47.

Praca jest wynikiem realizacji proj. bad. nr7 T08B 030 17 finansowanego przez KBN

EFFECTIVE DISTRIBUTION COEFFICIENT IN AICu0,5 INGOTS OF SOLIDIFICATION IN ROTATING MAGNETIC FIELD

SUMMARY

The paper contains an analysis of copper distribution in AlCu0.5 ingots solidificating under influence of rotating magnetic field. It has been found there is large difference in distribution between columnar crystals zone and equiaxed crystals in casts solidificating in forced convection. It has been also calculated effective partition coefficient and its value depended on crystallization rate, velocity of liquid metal in mould and crystallization front location.

Reviewed by prof. Stanisław Jura