47/2

Archives of Foundry,
Year 2001, Volume 1, № 1 (2/2)
Archiwum Odlewnictwa,
Rok 2001, Rocznik 1, Nr 1 (2/2)
PAN – Katowice PL ISSN 1642-5308

ZMIANA GEOMETRII FRONTU KRYSTALIZACJI W STREFIE KRYSZTAŁÓW KOLUMNOWYCH W ODLEWACH KRZEPNĄCYCH POD WPŁYWEM POLA MAGNETYCZNEGO

J. SZAJNAR[1]
Katedra Odlewnictwa, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska
44-100 Gliwice, ul. Towarowa 7

STRESZCZENIE

Opracowano model frontu krystalizacji z uwzględnieniem zmian stężenia miedzi wywołanych działaniem konwekcji wymuszonej wirującym polem magnetycznym. Zmiany geometrii frontu oparto na modelu komórkowym Kurza-Fishera i zmodyfikowanym modelu paraboidalnym użytym w kryterium stabilności marginalnej Mullinsa-Sekerki. Wyznaczony kształt powierzchni rozdziału wykorzystano do przeprowadzenia symulacji przepływu ciekłego metalu przed frontem krystalizacji [1].

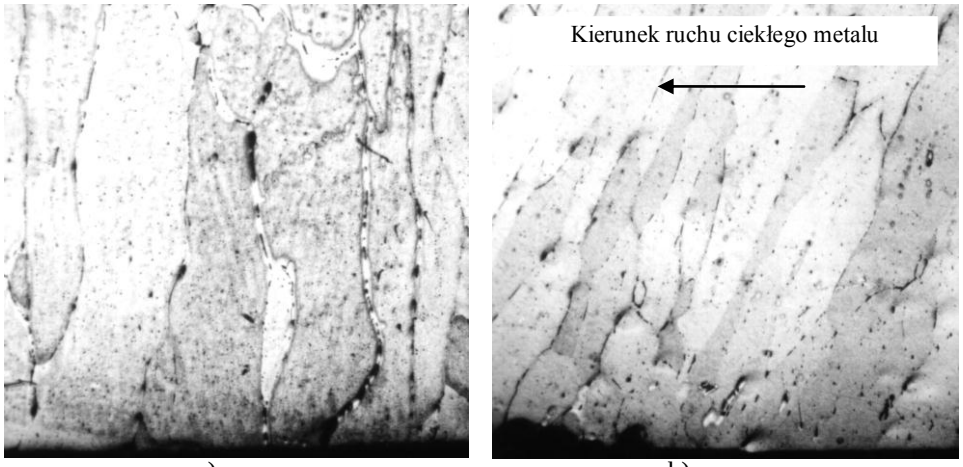
Key words: columnar crystals zone, forced convection, magnetic field, solidification

1. WPROWADZENIE

Wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że przy płaskim froncie krystalizacji wpływ wymuszonej konwekcji praktycznie nie powoduje zmian w strukturze odlewów z Al99,99 i Zn99,99 [2-4]. Skuteczne oddziaływanie wymuszonego ruchu ciekłego metalu, objawiające się zmniejszeniem szerokości strefy kryształów kolumnowych i zmianą kierunku wzrostu, zarejestrowano w odlewach z AlCu dopiero po przekroczeniu pewnej minimalnej wartości stężenia miedzi (>0,05%Cu).

W pracy przedstawiono analizę geometrii frontu krystalizacji dla odlewów z AlCu0,2 o średnicy 45mm i wysokości 180mm krzepnących w kokili grafitowej. Badane odlewy krzepną przy komórkowym froncie krystalizacji (rys. 1).

[1] *dr inż., sekrmt3@polsl.gliwice.pl*



a) b)

Rys. 1. Struktura komórkowa strefy kryształów kolumnowych w odlewach z AlCu0,2 wykonanych tradycyjnie (a) i krzepnących przy wymuszonej konwekcji (b); pow. 25x

Fig. 1. Cellular structure in columnar crystals zone of AlCu0,2 casts traditional made (a) and solidification with forced convection (b)

2. OKREŚLENIE GEOMETRII FRONTU KRYSTALIZACJI

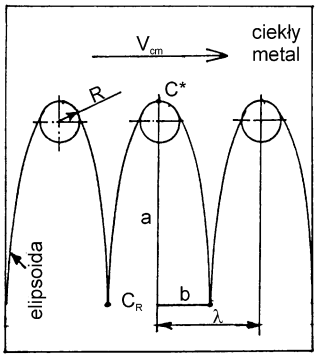
Celem pracy było wyznaczenie niektórych parametrów geometrycznych czoła kryształów tworzących komórkowy lub komórkowo-dendrytyczny front krystalizacji w odlewach krzepnących przy wymuszonej konwekcji. Wyniki tych obliczeń wykorzystano do symulacji wymuszonego przepływu ciekłego metalu przed frontem krystalizacji [1].

Uzależnienie geometrii powierzchni międzyfazowej od zmiany stężenia dodatku stopowego wzdłuż szerokości strefy kryształów kolumnowych zrealizowano w oparciu o zmodyfikowany modelu frontu krystalizacji Kurza-Fishera [6], w którym powierzchnię rozdziału tworzą komórki o elipsoidalnej powierzchni główki (rys. 2). Uproszczoną zależność na promień czoła kryształu *R* otrzymuje się z kryterium stabilności marginalnej Mullinsa-Sekerki [5,7]:

$$R = 2\pi\left[\Gamma/(mG_C - G_T)\right]^{1/2} \tag{1}$$

gdzie: Γ - współczynnik Gibbs'a - Thomson'a
G_c - gradient stężenia,
G_T - gradient temperatury na froncie krystalizacji,
m - współczynnik kierunkowy linii likwidus
lub z pomiarów.

Front krystalizacji tworzą kryształy jak na rys. 2. Najistotniejszymi parametrami frontu są wielkości ‘a’ i ‘b’, które określają osie elipsy.



Rys. 2. Model powierzchni rozdziału faz
Fig. 2. Model of crystallization front

Do obliczenia parametrów ‘a i b’ zastosowano procedury wynikające z modelu Kobayashi’ego na stężenie składnika stopowego w miejscu styku kryształów [8]. Często przyjmuje się, co potwierdzono wieloma pomiarami, że $C_R \approx C_E$ nawet dla takich stopów jakie były użyte w niniejszych badaniach. Stężenie C^* na czole komórki definiuje funkcja Ivantsov’a [9]:

$$Iv = -Pe_c \exp(Pe_c)\, E_i(-Pe_c) \qquad (2)$$

W zmodyfikowanym modelu Kurza-Fishera powierzchnia czoła dendrytu jest elipsoidą obrotową, więc dużą półoś można obliczyć z równania

$$a = [\, m\,(C^* - C_R)\,] / G_s \qquad (3)$$

a małą półoś

$$b = (a\,R)^{1/2} \qquad (4)$$

gdzie: C_R - stężenie składnika stopowego w miejscu styku kryształów. Przyjęto średni wynik pomiarów stężenia miedzi w stopach AlCu0,2 na granicach ziaren $Cu = C_R = 2{,}93\%$

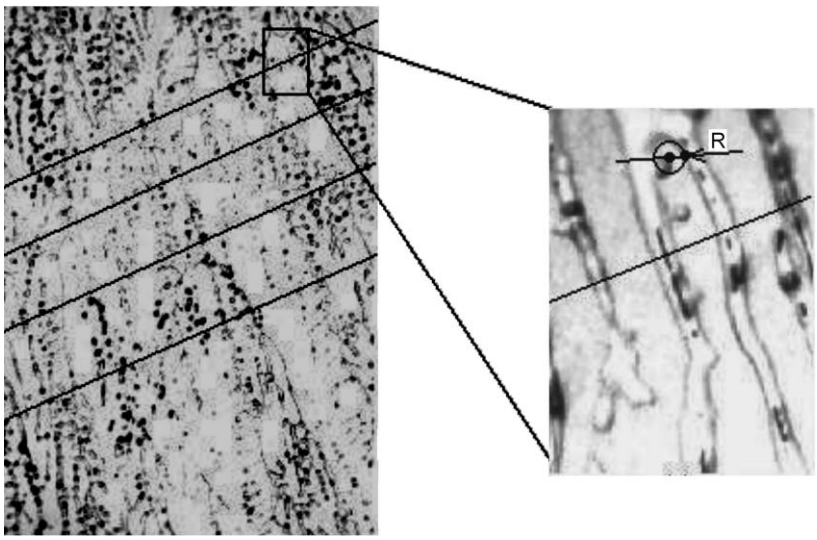
G_s - gradient temperatury w fazie stałej, wyznaczony na podstawie wyników symulacji (tab. 1).

Obliczenia parametru a

1. Wyznaczenie promienia czoła komórki *R*

Promień czoła komórki *R* zmierzono na odpowiednio przygotowanym zgładzie metalograficznym. Procedura pomiaru miała następujący przebieg: najpierw w odległości ok. 10mm od powierzchni zewnętrznej wlewka wytypowano na mikrozgładzie czoło kryształu, następnie polerowano powierzchnię próbki zbierając warstwę około 5μm i w czoło wpisywano okrąg o stosownym promieniu (rys. 3).

Polerowanie i pomiar powtarzano do chwili gdy czoło osiągnęło maksymalny wymiar. Następne pomiary po kolejnym polerowaniu wykazywały mniejszy promień *R*. Maksymalny promień wpisanego koła w czoło komórki przyjmowano za wynik pomiarów (tab. 1).



a) b)

Rys. 3. Mikrostruktura odlewu z AlCu0,2 w strefie przemiany struktury: a) pow.25x, b) pow. 50x
Fig. 3. Microstructure of AlCu0,2 casts in change zone of structure: a) mag. 25x, b) 50x

2. Obliczenie stężeniowej liczby Pecleta

$$Pe_C = \frac{R \cdot Vp1}{2D} \tag{5}$$

gdzie:
R - promień krzywizny czoła komórki (z pomiarów, tab. 1),
Vp1 – prędkość krystalizacji przyjęty z wyników symulacji (tab. 1),
D – współczynnik dyfuzji ($D=5{,}45*10^{-3}[mm^2/s]$)

3. Obliczenie stężenia na wierzchołku komórki

$$C^* = \frac{C_o}{1+(1-k_o)Pe_C \exp(Pe_C)E_i(-Pe_C)} \tag{6}$$

gdzie:
C_o – stężenie początkowe,
k_{ef} – równowagowy współczynnik rozdziału faz (tab. 1)

Pe_C – stężeniowa liczba Pecleta,
$E_i(-Pe_C)$ - funkcja aproksymująca (wykładnicza funkcja całkowa) [10], dla $Pe_C>1$

$$E_i(-Pe_C) = -\frac{\exp(-Pe_C)\cdot\begin{bmatrix}0{,}2677 + 8{,}6347Pe_C + \\ +18{,}0590Pe_C^2 + 8{,}57331Pe_C^3 + Pe_C^4\end{bmatrix}}{Pe_C\begin{pmatrix}3{,}9585 + 21{,}0996Pe_C + \\ +25{,}63296Pe_C^2 + 9{,}5733Pe_C^3 + Pe_C^4\end{pmatrix}}$$

W zależności (6) zamiast stężenia nominalnego wykorzystano wyniki pomiarów rozkładu stężenia miedzi wzdłuż promienia odlewu Cu(x) [11] i przyjęto, że

$$C_o = Cu(x)/k_{ef}$$

W ten sposób uzależniono stężenie na wierzchołku komórki również od położenia frontu krystalizacji w odlewie uzyskując

$$C^*(x) = \frac{Cu(x)}{\left[\ 1 + (1-k_{ef})Pe_C \exp(Pe_C)E_i(-Pe_C)\ \right]k_{ef}} \tag{7}$$

4. Obliczenie ‘a’ i ‘b’ z zależności (3) i (4).

Wyniki obliczeń dla strefy od x=6,1 do x=12,1mm, mierzonej od powierzchni zewnętrznej odlewu przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń dla odlewu z AlCu0,2 wykonanego pod wpływem WPM o indukcji B=0,015T i V_{cm}=0,55m/s

Table 1. Statement results of measurements and calculation for AlCo0,2 cast made under influence rotating magnetic field

x [mm]	Cu(x) [%]	k_{ef}	R [mm]	Vp1 [mm/s]	Pe_C	G_s [K/mm]	C* [%]	a [mm]	b [mm]
6,1	0,191	0,860	0,022	0,59	1,191	7,8	0,218	0,9	0,141
7,1	0,19	0,855	0,022	0,54	1,09	6,91	0,216	1,02	0,150
8,1	0,19	0,855	0,022	0,51	1,029	6	0,217	1,18	0,161
9,1	0,191	0,860	0,022	0,52	1,05	5,03	0,221	1,4	0,175
10,1	0,203	0,914	0,022	0,55	1,11	3,88	0,226	1,82	0,200
11,1	0,208	0,936	0,022	0,61	1,231	3,1	0,228	2,27	0,223
12,1	0,208	0,937	0,022	0,71	1,433	2,46	0,229	2,86	0,251

3. PODSUMOWANIE

Z uzyskanych rezultatów obliczeń (tab. 1) wynika, że przy zmianie położenia frontu krystalizacji z pozycji $x=6{,}1mm \approx r_o/4$ (r_o – promień wlewka) do miejsca w odległości x=12,1mm od powierzchni zewnętrznej ($x \approx r_o/2$) stosunek a/b zmienia się od 6,4 do 11,4. Tak wyznaczone parametry geometryczne frontu krystalizacji można zastosować do obliczeń symulacyjnych procesu krzepnięcia z uwzględnieniem wymuszonej konwekcji.

LITERATURA

[1] Szajnar J., Arch. Odlewnictwa, R. 1, nr 2, 2001
[2] Szajnar J., Krzepnięcie Metali i Stopów, nr 37, 1998, s. 139
[3] Szajnar J., Krzepnięcie Metali i Stopów, vol.1, nr 40, 1999, s. 213
[4] Szajnar J., Krzepnięcie Metali i Stopów 2000, vol. 2, nr 42, s. 33
[5] Wołczyński W., Praca hab., ZN Politechnika Śl., Hutnictwo, 1993
[6] Kurz W., Fisher D., Acta Metall. vol. 29, 1981, s. 11
[7] Mullins W.W., Sekerka R.F., J.Appl.Phys, 35, 1964, s. 444
[8] Kobayashi S., Trans. Iron Steel Instit. Japan, 1988, vol. 28, s. 728
[9] Kurz W., Fisher D.J., Fundamentals solidification, Trans.Tech.Publ. Paris, 1984
[10] Majchrzak E., Pr. hab., ZN Politechniki Śl. Mechanika, z. 102, Gliwice, 1991
[11] Szajnar J. i in., Raport końcowy proj. bad. nr 7 T08B 030 17 KBN, Politechnika Śl., 2001

Praca jest wynikiem realizacji grantu nr T08B 030 17 finansowanego przez KBN

THE CHANGE OF GEOMETRY OF CRYSTALLIZATION FRONT IN COLUMNAR CRYSTALS ZONE IN SOLIDIFICATION CASTS WITH MAGNETIC FIELD

SUMMARY

In the paper, the theoretical model of crystallization front was worked out, taking into consideration changes in Cu concentration caused by forced convection. The changes of front geometry were based on the modyficated by K-F parabolic model of crystallization front. Calculated interface shape was used for making simulation of liquid metal flow in front of interface.

Recenzował Prof. Józef Gawroński