48/2

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

WPŁYW KSZTAŁTU FRONTU KRYSTALIZACJI NA SKUTKI DZIAŁANIA WYMUSZONEJ KONWEKCJI

J. SZAJNAR¹

Katedra Odlewnictwa, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska 44-100 Gliwice, ul. Towarowa 7

STRESZCZENIE

Wymuszona konwekcja wywołuje w krzepnącym odlewie szereg zmian, których efektem jest poprawa jego jakości. W pracy przeprowadzono symulację przepływu ciekłego metalu wymuszonego przez wirujące pole magnetyczne. Podano model matematyczny i numeryczny krzepnięcia oparty na równaniu przewodnictwa ciepła i równaniach Naviera-Stokesa. Określono wpływ geometrii frontu krystalizacji na jakościowe zależności pomiędzy przepływem a zmianami w strukturze.

Key words: molten metal flow, forced convection, crystallization front, simulation

1. WPROWADZENIE

Z wyników badań eksperymentalnych wiadomo, że wymuszona konwekcja fazy ciekłej zmienia warunki krystalizacji w otoczeniu frontu krystalizacji powodując utratę stabilności powierzchni rozdziału faz przyśpiesza transformację struktury kolumnowej w równoosiową [1-3,15]. Jest również przyczyną zmiany kierunku wzrostu kryształów kolumnowych (rys. 1a). W pracach [4-5] wykazano, że przy wirowym ruchu ciekłego metalu wzrost kryształów kolumnowych odchyla się od kierunku radialnego a odchylenie ma zwrot przeciwny do kierunku wirowania cieczy.

Pozostaje do wyjaśnienia, które z omawianych zjawisk są decydujące w uzyskiwaniu struktury równoosiowej, czy wyrównywanie się temperatury w fazie ciekłej, czy zmiany w warstwie dyfuzyjnej powodowane wymuszoną konwekcją i czy możliwe jest różnicowanie się pola prędkości cieczy przed frontem krystalizacji. Bezpośrednie badania ruchów ciekłego metalu są z natury rzeczy bardzo utrudnione,

¹ dr inż., sekrmt3@polsl.gliwice.pl

dlatego coraz chętniej stosowane jest numeryczne modelowanie procesu krzepnięcia, rozwijane w kierunku formułowania modeli sprzężonych [7,8,9]. W niniejszej pracy, proponuje się model symulacji numerycznej procesu krystalizacji fazy stałej stopu dwuskładnikowego z uwzględnieniem wymuszonej konwekcji wirującym polem magnetycznym. Dokonano oceny pola prędkości fazy ciekłej przed frontem krystalizacji poprzez symulację numeryczną dla różnej geometrii paraboidalnego frontu krystalizacji.

Front krystalizacji (rys. 1b) przyjęto z pracy [15] i tworzą go kryształy, których czoła są elipsoidami o wymiarach a, b, R (tab. 1 z [15]), gdzie: a, b – duża i mała półoś elipsy, R – promień czoła kryształu.

Model krzepnięcia ciekłego metalu uwzględniający wzajemny wpływ zjawisk cieplnych i przepływowych jest złożony, bowiem związany jest z rozwiązywaniem równania przewodnictwa ciepła i równań Naviera-Stokesa.

Całość zadania, tzn. zarówno równanie przewodnictwa ciepła, jak i równania Naviera-Stokesa, rozwiązano metodą elementów skończonych [10,11]. Modelowaniu poddano odlew walcowy ze stopu AlCu.



Rys. 1. Kryształy kolumnowe we wlewkach z SnSb1 krzepnących przy wymuszonym, wirowym ruchu ciekłego metalu (a), kształt frontu krystalizacji (b)

Fig. 1.The columnar crystals in the SnSb1 ingots solidifying at the forced rotations of the liquid (a), shape of crystallization front (b)

2. MODEL MATEMATYCZNY

Proponowany model numerycznej symulacji krzepnięcia odlewu z uwzględnieniem ruchu ciekłego metalu opiera się na rozwiązywaniu następującego układu równań różniczkowych [8-10]:

- równań Naviera-Stokesa i równania ciągłości przepływu:

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_i \partial x_j} + \rho g_i \beta (T - T_z), \qquad \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \tag{1}$$

- równania przewodnictwa ciepła z członem konwekcyjnym:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T(x_i, t)}{\partial x_j} \right) - \rho c_{ef} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = 0,$$
(2)

gdzie: ρ - gęstość [kg/m³],

 v_i - współrzędna prędkości przepływu metalu [m/s],

g_i - współrzędna przyspieszenia ziemskiego [N/kg],

p - ciśnienie [N/m²],

T - temperatura [K],

 μ - współczynnik lepkości dynamicznej [Ns/m²],

 β - objętościowy współczynnik rozszerzalności cieplnej [1/K],

 T_z - temperatura zalewania metalu[K],

 c_{ef} - efektywne ciepło właściwe [J/(kgK)],

t - czas [s],

 λ - współczynnik przewodzenia ciepła [W/(mK)],

x_i - współrzędna wektora położenia [m],

(i, j)=1, 2) - zadanie dwuwymiarowe.

Dodatkowym założeniem jest przyjęcie zmiany gęstości z temperaturą: $\rho = \rho(T)$. W zaproponowanym modelu krzepnięcia źródło ciepła nie występuje jawnie w równaniu przewodnictwa, lecz znajduje się w efektywnym cieple właściwym (model pojemnościowy) [10,12].



Rys. 2. Przekrój poprzeczny układu odlew-kokila Fig. 2. Cross-section casting-permanent mould system



Rys.3. Schemat rozważanego układu (szczegół A na rys. 2 w powiększeniu) Fig.3. Scheme of the considered system (detail A on fig. 2)

Układ równań (1-2) uzupełniono warunkami początkowymi dla pól prędkości i temperatury oraz odpowiednimi warunkami brzegowymi zadanymi na powierzchniach ograniczających rozważany układ (rys. 3) (por. [8,10,12]).

Warunki początkowe dla pól prędkości i temperatury są następujące:

$$\mathbf{v}(x_i, t_0) = \mathbf{v}_0(x_i), \qquad T(x_i, t_0) = T_0(x_i).$$
(3)

Warunki brzegowe na wskazanych powierzchniach (rys. 3) wynosiły: - dla prędkości:

$$v_{n} \Big|_{\Gamma_{1-1}} = v_{cm}, \quad v_{t} \Big|_{\Gamma_{1-1}} = v_{t} \Big|_{\Gamma_{2-2}} = 0,$$

$$v_{n} \Big|_{r=0} = 0, \quad v_{t} \Big|_{\Gamma_{S}} = v_{n} \Big|_{\Gamma_{S}} = 0, \quad \frac{\partial v_{t}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0,$$

$$(4)$$

- dla temperatury:

$$\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\Gamma_{1-1}} = 0, \qquad \qquad \frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=0} = 0, \\
\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\Gamma_{2-2}} = 0, \qquad \qquad \lambda_M \frac{\partial T_M}{\partial n}\Big|_{\Gamma_M} = -\alpha_M \left(T_M\Big|_{\Gamma_M} - T_a\right).$$
(5)

gdzie: T_a - temperatura otoczenia [K],

 α_M - współczynnik wymiany ciepła między formą a otoczeniem [W/m²K].

Postawione zadanie rozwiązano metodą elementów skończonych [9,10,12].

3. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Obliczenia przeprowadzono dla odlewu ze stopu AlCu0,2 krzepnacego w kokili grafitowej. Własności termofizyczne stopu AlCu0,2 i materiału formy zaczerpniete z prac [1,3,13] podano w tab. 1. Wymiary układu odlew-kokila były następujące: średnica zewnętrzna 59mm, średnica wnęki 45mm, wysokość kokili 200mm, wysokość wlewka 180mm. Wyniki obliczeń prezentowane są w przekroju na wysokości 70mm od dna kokili. Rozważany wycinek przekroju pokazano na rys. 2, zaznaczając najistotniejsze wymiary: d = 0.059[m], $d_o = 0.045$ [m], b = 0.00025[m]. W celu dokonania oceny wpływu zmiany geometrii frontu krystalizacji na rozkład prędkości ciekłego metalu obliczenia przeprowadzono dla dwóch wartości a/b=8/1 i 4/1 (tab. 1 [15]). Przyjęto, że wnęka kokili wypełniona jest ciekłym metalem o temperaturze zalewania Tzal = 973 K. Początkowa temperatura kokili (T_M) wynosiła 300 K. Ciepło przemiany fazowej (L) wydzielające się pomiędzy temperaturami likwidusu (T_L) równą 931 K a solidusu (T_s) wynoszącą 928 K, wynosiło 390kJ/kg. Wymianę ciepła pomiędzy kokilą a otoczeniem modelowano warunkiem brzegowym Newtona przyjmując temperaturę otoczenia (T_{α}) równą 300 K, natomiast współczynnik przejmowania ciepła (α_{M}) wynosił 60W/(m²K). Przyjęto liniową zmianę gęstości (ρ) i współczynnika przewodzenia ciepła (λ) w przedziale temperatury likwidusu i solidusu. Zmianę współczynnika lepkości dynamicznej (μ) z temperaturą określono według zależności podanej w pracy [14].

	W/(mK)	J/(kgK)	kg/m ³
Faza ciekła	$\lambda_L = 95$	$c_{L} = 1290$	$\rho_{L} = 2390$
Faza stała	$\lambda_s = 210$	$c_{s} = 1090$	$\rho_s = 2550$
Kokila	$\lambda_{_M} = 96$	$c_{M} = 1100$	$\rho_{M} = 2200$

Tabela 1. Własności termofizyczne stopu i kokili Table 1. Thermophysical properties of mould and cast materials

Dla założonych parametrów termicznych uzyskano prędkości przyrostu fazy stałej, dla której powierzchnia krzepnięcia zajmowała położenie równe $l_s = r_o/2$ po około 15s trwania procesu krystalizacji. Dla takiej prędkości przesuwania się frontu krystalizacji wyznaczono rozkłady wektorów prędkości w obszarze kontrolnym (rys. 3.). Wymuszoną prędkość ruchu ciekłego metalu przyjęto równą V_{cm}max=0,55m/s. Pole

prędkości po osiągnięciu przez front odległości $l_s = r_o / 4$ i $l_s = r_o / 2$ od powierzchni zewnętrznej odlewu, prezentują w powiększeniu kolejne rysunki.



Rys. 4. Wektory prędkości [m/s] w pobliżu frontu krystalizacji po zakrzepnięciu warstwy o szerokości $l_s = r_o / 4$; a:b=4:1

Fig. 4. Velocity vectors [m/s] near crystallization front after solidified of layer $l_s = r_o / 4$; a:b=4:1



Rys. 5. Wektory prędkości [m/s] po zakrzepnięciu warstwy $l_s = r_o / 4$; a:b=8:1

Fig. 5. Velocity vectors [m/s] near crystallization front after solidified of layer $l_s = r_o / 4$; a:b=8:1



Rys. 6. Wektory prędkości [m/s] przy szerokości warstwy zakrzepłej $l_s = r_o/2$; a:b=4:1

Fig. 6. Velocity vectors [m/s] near crystallization front after solidified of layer $l_s = r_o / 2$; a:b=4:1



Rys. 7. Wektory prędkości [m/s] po zakrzepnięciu fazy stałej $l_s = r_o / 2$; a:b=8:1

Fig. 7. Velocity vectors [m/s] near crystallization front after solidified of layer $l_s = r_o / 2$; a:b=8:1

4. PODSUMOWANIE KOŃCOWE

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że pole prędkości ciekłego metalu zmienia się w zależności od charakterystycznych wymiarów (stosunku a:b) kryształów. Wyraźnie większa prędkość ciekłego metalu od strony napływu cieczy (rys. 4-7) może wywoływać zmniejszenie grubości warstwy dyfuzyjnej i z tej strony czoła kryształu występuje intensywniejsze konwekcyjne odsyłanie domieszki. Powoduje to zubożenie w składnik stopowy ciekłego metalu na czole komórki od strony napływu cieczy, a wzbogacenie warstwy dyfuzyjnej na czole komórki poprzedzającej po stronie przeciwnej napływu fazy ciekłej. Objawia się to mniejszym stężeniem miedzi w kryształach kolumnowych od strony napływu ciekłej fazy [1,16]. Ta asymetria jest przyczyną wzrostu komórek z tendencją kierowania się w stronę przeciwną do makroskopowego kierunku wymuszenia ruchu fazy ciekłej (rys. 1a). Zmiana geometrii frontu krystalizacji (wzrost a:b z 4:1 na 8:1) powoduje zmniejszenie różnic w rozkładzie i wielkości wektorów prędkości cieczy.

LITERATURA

- [1] Szajnar J., Krzepnięcie Metali i Stopów, nr 37, 1998, s. 139
- [2] Szajnar J., Gawroński J., Acta Metallur. Slovaca, vol. 4, no. 2,1998, pp. 224
- [3] Szajnar J., Krzepnięcie Metali i Stopów, vol.1, nr 40, 1999, s. 213
- [4] Szajnar J., Gawroński J., Archiw. Tech. Masz. i Autom., vol. 16, nr.1, 1996, s. 81
- [5] Szajnar J., Gawroński J., Krzepnięcie Metali i Stopów, nr 33, 1997, s. 127
- [6] Szajnar J., Krzepnięcie Metali i Stopów, nr 22, 1995, s. 160
- [7] Buchholz A., Engler S., Comput. Materials Science, 1996, vol. 7, pp. 221
- [8] Chang S., Stefanescu D.M., Metal. and Mater. Trans. A, 1996, vol. 27A, pp. 2708
- [9] Dantzig J. A., Int. J. for Num. Meth. in Engrg., 1989, vol. 28, pp. 1769
- [10] Dhatt G., Gao D.M., Int. J. for Num. Meth. in Engrg., 1990, vol. 30, pp. 821
- [11] Lewis R.W., Huang H.C., Mater. Science and Technol., 1990, vol. 6, pp. 482
- [12] Mochnacki B., Suchy J., Modelling and simulation of casting solidification, PWN, Warsaw, 1993.
- [13] Kurz W., Fisher, D.J., Fundamentals of solidification. Trans. Tech. Public., Swidzerland - Germany - UK - USA, 1989.
- [14] Sichen D., Bygden J., Seetharaman S., Metal. Trans. B, 1994, vol. 25B, pp. 519
- [15] Szajnar J., Archiwum Odlewnictwa, R. 1, nr 2, 2001, s.
- [16] Szajnar J., Gawroński J., Cholewa M., Raport końcowy proj bad. nr 7 T08B 030 17 KBN, Politehenika Śl. 2001

Praca jest wynikiem realizacji grantu nr 7 T08B 030 17 finansowanego przez KBN

THE INFLUENCE OF SHAPE OF CRYSTALLIZATION FRONT ON ACTION EFFECT OF FORCED CONVECTION

SUMMARY

Forced convection causes in solidifying cast a lot of changes which effect on quality improve. In the paper the simulation of the liquid metal flow forced by rotating magnetic field was made. A mathematical and a numerical solidification model based on equalization of heat (term) conductance and N-S equalizations, has been proposed. The influence of crystallization geometry front on dependencies in quality between the flow and changes in structure has been specified.

Recenzował Prof. Józef Gawroński