

OKREŚLENIE WARUNKÓW SKUTECZNEGO STOSOWANIA POLA MAGNETYCZNEGO W PROCESACH WYKONYWANIA ODLEWÓW

JAN SZAJNAR, JÓZEF GAWROŃSKI
Katedra Odlewnictwa, Politechnika Śląska
44-100 Gliwice, ul. Towarowa 7

1. Wprowadzenie

Odlewanie w polu magnetycznym to wykonywanie odlewów, które krzepną przy wymuszonym ruchu ciekłego metalu. Charakter ruchu wytworzonego w ciekłym metalu, opisany przez pole prędkości, wielkość i rozkład sił elektrodynamicznych, rozkład ciśnienia, itp., zależy od sposobów i środków generujących go w krzepnącym metalu.

Istnieje szereg sposobów generowania wymuszonego ruchu ciekłej fazy w klasycznej formie odlewniczej lub krystalizatorze do ciągłego odlewania. Stosuje się wiele rozwiązań technicznych, które wykorzystują najczęściej dwa podstawowe sposoby:

- kondukcyjny, wykorzystujący oddziaływanie zewnętrznego pola magnetycznego i przepływu prądu przez ciekły metal,
- indukcyjny, wykorzystujący tylko zmienne zewnętrzne pole magnetyczne.

Stosunkowo łatwe w praktycznym zastosowaniu, z uwagi na brak bezpośredniego kontaktu urządzenia wytwarzającego pole z ciekłym metalem i stąd najczęściej stosowane, są tzw. sposoby indukcyjnego mieszania.

Metody indukcyjnego mieszania oparte są na oddziaływaniu:

- pola elektromagnetycznego wytworzonego przez wielozwojową cewkę,
- wędrującego pola magnetycznego,
- wirującego pola magnetycznego,
- wirującego rewersyjnego pola magnetycznego.

W publikacjach określa się, że oddziaływanie sił pola magnetycznego na ciekły metal w czasie krystalizacji wywołuje w nim intensywny proces mieszania i właśnie proces mieszania jest przyczyną najczęściej pozytywnych zmian w strukturze odlewu [1-7]. Te pozytywne zmiany to przede wszystkim zmniejszenie lub likwidacja strefy kryształów kolumnowych, a także: rozdrobnienie kryształów równoosiowych, zmniejszenie segregacji, usunięcie porowatości osiowej i inne.

Zawarte w literaturze dotychczasowe wyniki badań nad określeniem wpływu ruchu ciekłego metalu na jakość struktury odlewu opierają się na analizie trzech zasadniczych zjawisk, a mianowicie:

- zjawisk cieplnych, zmieniających pole temperatury w krzepnącym odlewie,
- zjawisk związanych z dynamicznym pobudzeniem tworzenia zarodków krystalizacji,
- zjawisk mechanicznych, kształtujących odmiennie niż tradycyjnie front krzepnięcia i rosnące kryształy.

Dotychczasowe wyniki badań autora i dane literaturowe tworzą podstawy do stwierdzenia, że zmienne pole magnetyczne oddziałuje na proces krystalizacji powodując:

- przenoszenie przez ruch konwekcyjny kryształów zamrożonych do środkowej części odlewu,
- odrywanie się kryształów od ścianki formy pod wpływem konwekcji ciekłego metalu,
- fragmentacja ("rozmnażanie") kryształów przez koagulację oraz nadtapianie pod wpływem fluktuacji temperatury, a także odłączanie mechaniczne wywołane ruchem cieczy (odrywanie, łamanie),
- zarodkowanie metalu w zewnętrznej, przechłodzonej warstwie cieczy, stykającej się z frontem krystalizacji kryształów kolumnowych.

Mozna również przyjąć hipotezę zblizoną do teorii tworzenia się kryształów zamrożonych B. Chalmersa [8] i teorii kryształów równoosiowych A. Ohno [9], że wymuszony ruch cieczy względem ścianki formy (również frontu krystalizacji) powoduje odrywanie wzrastających ziaren, a w tych miejscach powstają nowe zarodki i kryształy, lecz z cieczy bardziej przechłodzonej, zatem w większej ilości i o mniejszych wymiarach. Oderwane kryształy przenoszone są przez będący w ruchu ciekły metal do środkowej części odlewu, gdzie mogą stać się nowymi ośrodkami krystalizacji, a w szczególności w przechłodzonej warstwie fazy ciekłej przylegającej do frontu krystalizacji.

Wymienione mechanizmy zachodzą również w wyniku naturalnych zjawisk przebiegających w czasie krzepnięcia odlewu i wywoływanych między innymi różnicami temperatury i gęstości ciekłego metalu, różnym sposobem napełniania wnęki formy itp. Powyższe mechanizmy znacznie się intensyfikują w wyniku wymuszonego (np. przez pole magnetyczne) ruchu ciekłej fazy.

Jak już wcześniej wspomniano, skutkiem oddziaływania wymuszonej przez pole magnetyczne konwekcji jest najczęściej zmniejszenie strefy kryształów kolumnowych i rozdrobnienie kryształów równoosiowych.

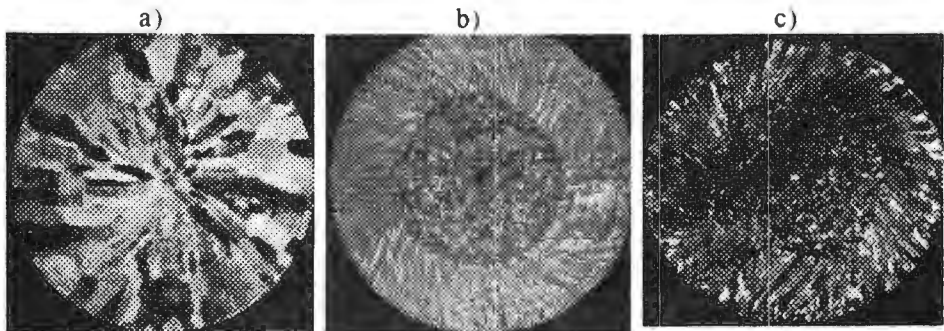
2. Warunki efektywnego stosowania pola magnetycznego przy krzepnięciu odlewów

Na tle powyższych wyników nieco inaczej przedstawiają się rezultaty szczegółowych badań wykonanych w Katedrze Odlewnictwa Politechniki Śląskiej, dotyczących efektów oddziaływania pola magnetycznego na krzepnący odlew. Mianowicie stwierdzono, że zmienne pole magnetyczne nie w każdym przypadku powoduje zmniejszenie strefy kryształów kolumnowych w odlewie. Skutki działania pola

magnetycznego uzależnione są w pierwszej kolejności od czystości metalu. Stwierdzono bowiem, że przy tzw. technicznie bardzo czystych metalach (Al99,99; Zn99,99) oddziaływanie pola (wymuszonej konwekcji) nie zmienia struktury odlewu (rys. 1a). Oznacza to, że mimo iż ulegają zmianie warunki oddawania ciepła w odlewie w wyniku wymuszonego ruchu ciekłego metalu, to nie jest to warunek wystarczający do uzyskania zmian w procesie krystalizacji.

Zatem na pewnym etapie badań postawiono tezę, że warunkiem koniecznym i wystarczającym do uzyskania zmniejszenia szerokości strefy kryształów kolumnowych w odlewach krzepnących przy wymuszonej konwekcji jest zawartość w czystym metalu lub stopie zanieczyszczeń lub dodatku stopowego powyżej minimalnej ilości.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że np. dla Zn99,99 dodatek Al w ilości już 0,05% powoduje widoczne skutki wpływu pola magnetycznego na strukturę wlewków (rys. 1c). Podobne wyniki uzyskano dla aluminium i innych metali. Badania warunków tworzenia się strefy kryształów kolumnowych przeprowadzono dla wlewków o wymiarach $\phi 45 \times 180$ mm odlewanych z różnych metali i stopów do kokili grafitowej [10-16]. Zestawienie wyników badań przedstawiono na rys. 2.



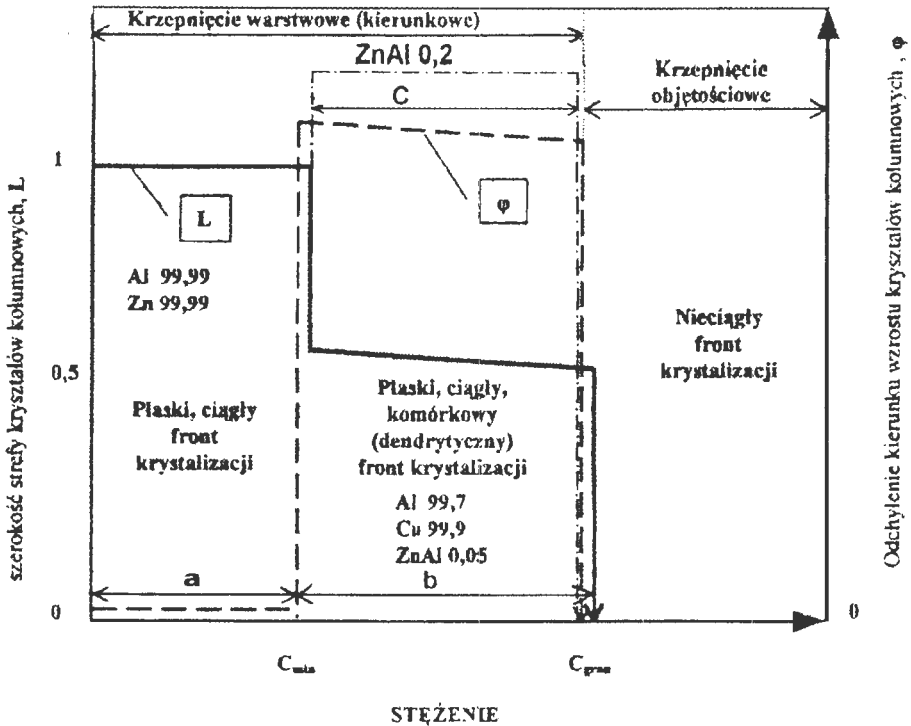
Rys. 1. Makrostruktura wlewków odlanych pod działaniem wirującego pola magnetycznego:

a) Zn99,99; b) Al99,7; c) ZnAl0,05

Fig. 1. Macrostructure of castings solidification with rotating magnetic field

W sumie uzyskano wyniki trojakiemu rodzaju. Określają one skutki oddziaływania pola magnetycznego sprowadzone tylko do analizy szerokości strefy kryształów kolumnowych [10-16]:

- a - przypadek - przy stężeniu składnika stopowego lub zanieczyszczeń w czystym metalu poniżej pewnej minimalnej wartości ($C_0 < C_{min}$) zmian w strukturze odlewu nie rejestruje się (rys. 2),



Rys. 2. Zmiana szerokości strefy kryształów kolumnowych i kierunku wzrostu kryształów w tej strefie w zależności od ilości dodatku stopowego przy krzepnięciu odlewu pod wpływem wymuszonej konwekcji

Fig. 2. The width of columnar crystals zone and direction of crystals growth as function of alloy addition in casting solidified in forced convection

- b - przypadek - przy stężeniu składnika stopowego lub zanieczyszczeń w metalu powyżej pewnej minimalnej wartości ($C_o > C_{min}$) notuje się zmniejszenie szerokości strefy kryształów kolumnowych z równoczesnym zwiększeniem wielkości strefy kryształów równoosiowych.

- c - przypadek - przy stężeniu składnika stopowego lub zanieczyszczeń w metalu jak wyżej ($C_o > C_{min}$) notuje się skutek odwrotny do drugiego czyli zwiększenie szerokości strefy kryształów kolumnowych z równoczesnym zmniejszeniem wielkości strefy kryształów równoosiowych.

Zestawiając te wyniki widzimy, że oddziaływanie wymuszonej konwekcji na proces krzepnięcia, a w szczególności krystalizacji i w konsekwencji na jakość struktury nie jest tak jednoznaczne jak twierdzono dotychczas.

W wielu pracach stwierdza się, że odlewy wykonywane pod wpływem pola magnetycznego krzepną wolniej i stąd mniejsza jest w nich strefa kryształów kolumnowych [4,6,17]. Zatem można by przyjąć, że skoro odlewy wykonywane pod wpływem pola magnetycznego krzepną wolniej to każdorazowo można uzyskać w każdym stopie lub metalu zmniejszenie strefy kryształów kolumnowych. Okazuje się jednak, że jest to pogląd błędny, gdyż nie tłumaczy on warunków powstawania strefy kryształów kolumnowych dla przypadku trzeciego, gdzie mimo wolniejszego przyrostu warstwy zakrzepłej w odlewach wykonywanych w polu szerokość tej strefy jest większa.

Na podstawie badań własnych stwierdzono, że o szerokości strefy kryształów kolumnowych decyduje nie tylko prędkość krystalizacji ale również, czy przede wszystkim, trwałość frontu krystalizacji podczas procesu krzepnięcia [17,18].

Na trwałość frontu krystalizacji, określaną zarówno kryterium stężeniowym jak i dynamicznym, wpływają dwa podstawowe parametry:

- warunki wzrostu utożsamiane z warunkami termicznymi i kinetycznymi krzepnięcia odlewu, tj. gradientem temperatury na froncie krystalizacji G i prędkością krystalizacji V .

- warunki materiałowe - parametr materiałowy, w którym istotną rolę odgrywa stężenie C_0 . W przypadku klasycznego odlewania do form, bez oddziaływania pola magnetycznego na ciekły metal, na transformację struktury kolumnowej w równoosiową wpływają czynniki gradientowo-kinetyczne i materiałowe. W tych warunkach możemy wpływać na strukturę odlewu, przy danym stopie, tylko szybkością chłodzenia poprzez materiał formy.

Stosując pole magnetyczne (wymuszony ruch ciekłego metalu) w procesie odlewania mamy również dodatkową możliwość wpływania na warunki oddawania ciepła z odlewu (głównie gradient temperatury G) czyli możemy wpływać na czynniki gradientowo-kinetyczne oraz także na parametr materiałowych (prawa strona nierówności) kryterium trwałości frontu krystalizacji (głównie współczynnik rozdziału faz k) [17,18]

$$\frac{G}{V} \geq \frac{m \cdot C_0}{D} \cdot \frac{k_0}{k} - 1$$

gdzie: G - gradient temperatury,

V - prędkość krystalizacji,

m - współczynnik kierunkowy linii likwidus,

k_0 - współczynnik rozdziału faz,

D - współczynnik dyfuzji,

C_0 - stężenie początkowe.

Stosując wymienione wyżej kryterium trwałości frontu krystalizacji możemy kontrolować warunki wzrostu kryształów podczas krystalizacji kierunkowej. Natomiast stosując to kryterium w odlewaniu tradycyjnym i pod wpływem pola magnetycznego możemy przewidywać miejsce utraty trwałości frontu krystalizacji a tym samym określać, z pewnym przybliżeniem, szerokość strefy kryształów kolumnowych w odlewie i czas tworzenia się tej strefy.

3. Podsumowanie

1. Efektywne stosowanie zmiennego pola magnetycznego możliwe jest w metalach lub stopach, w których zawartość zanieczyszczeń lub dodatku stopowego jest powyżej pewnej minimalnej ilości.
2. O zmianach w strukturze, w tym głównie o szerokości strefy kryształów kolumnowych w odlewach w wykonywanych w polu magnetycznym decyduje nie prędkość krystalizacji a stabilność procesu i czas tworzenia się tej strefy.
3. Skutki oddziaływania pola magnetycznego analizować i prognozować można stosując kryteria trwałości frontu krystalizacji.
4. Zmieniając warunki oddziaływania pola magnetycznego (indukcję, czas oddziaływania) zmieniamy w krzepnącym odlewie czynniki gradientowo-kinetyczne (gradient temperatury, prędkość przemieszczania się frontu krystalizacji) a także materiałowe (współczynnik rozdzielu k), tym samym możemy w pewnym zakresie tworzyć przesłanki do zmiany struktury odlewu.

Literatura

- [1] Fredriksson H., The Scandinavian Journal of Metallurgy 15, no. 3, 1986, p. 127-133.
- [2] Ki-Bae K. i in., Effects of fluid flow on the solute redistribution of high purity aluminum ingot, Proc. 62nd World Foundry Congress, Philadelphia, 1996, p. 2-11.
- [3] Paradies C., Glikzman M., Dendrite fragmentation by forced flow over mushy zone. Proc. Confer. 121 FMS Annual Meeting, San Diego, 1992, p. 35-44.
- [4] Gawroński J., Szajnar J., Krzepnięcie Metali i Stopów, 1987, nr 13, s. 4-22.
- [5] Sakwa W., Gawroński J., Szajnar J., Giessereiforschung, 1987, nr 2, s. 13-21.
- [6] Gorbaczew I. P., Nikitin N. W., Magnitnaja Gidridinamika, 1984, no. 4, pp. 32.
- [7] Izmailov W. A., Ermolajewa N. T., Tokar W. S., Cvietynye Metally, 1994, nr 7, s. 52-59.
- [8] Chalmers B., Journal Austral. Institute Metal, 1963, vol. 8, s. 225.
- [9] Ohno A., The Solidification of Metals, Chijin Shoken, Tokyo, 1980.
- [10] Szajnar J., Zmiany w strukturze i właściwościach odlewów z AlMn1 wykonanych pod działaniem pola magnetycznego, Mat. XIX Symp. Nauk. AGH Kraków, 1993, s. 101-105.
- [11] Szajnar J. i in., Kierowanie krystalizacją odlewu w polu magnetycznym, Raport końcowy projektu badawczego nr 3 0862 91 01 KBN, Politechnika Śl. Gliwice, 1993.
- [12] Szajnar J., Analysis of columnar crystals growth during the solidification in magnetic field, Proc. II Conf. "Moving Boundaries '93", Milano 23-25 June 1993, Wessex Institute of Technology Southampton, University of Portsmouth, s. 319-327.
- [13] Szajnar J., Gawroński J., Magnetické pole jako modifikátor struktury slitin, Mater. XII medzinarodna konfer. "Ockovadla a predzliatiny", Strojenska fakulta Vysokej Skoly dopravy a spojov v Žilinie, Rajecke Teplice, 12-14.09.1994, s. 125-129.
- [14] Szajnar J., Krzepnięcie Metali i Stopów, 1996, nr 27, s. 4-22.
- [15] Szajnar J., Model teoretyczny i weryfikacja doświadczalna procesu wzrostu kryształów kolumnowych podczas krzepnięcia odlewów w polu elektromagnetycznym, Rap. końcowy proj. bad. nr 3 P407 020 07 KBN, Politechnika Śl. Gliwice, czerwiec 1995.
- [16] Szajnar J., Gawroński J., Krzepnięcie Metali i Stopów, 1998, nr 37, s. 138-148.
- [17] Szajnar J., Krzepnięcie Metali i Stopów, 1999, nr 40, s. 213-224.
- [18] Szajnar J., Krzepnięcie Metali i Stopów, 1997, nr 33, s. 213-220.

Recenzował: Stanisław Jura