



11th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
ACHIEVEMENTS IN MECHANICAL & MATERIALS ENGINEERING

Przyczyny zmiany struktury kryształów kolumnowych w odlewach wykonywanych pod wpływem wymuszonej konwekcji

J. Gawroński, J. Szajnar

Katedra Odlewnictwa, Politechnika Śląska
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice, Poland

Konwekcja ciekłego metalu wymuszana przez pole magnetyczne wywołuje zmiany w warunkach oddawania ciepła przez odlew i w rozkładzie składników stopowych. W pracy określono zmiany w rozkładzie stężenia miedzi w strefie kryształów kolumnowych w odlewach z Al-Cu krystalizujących pod wpływem wymuszonej konwekcji wirującym polem magnetycznym (WPM). Stwierdzono, że zmiany w rozkładzie miedzi wywołane wymuszonym ruchem ciekłej fazy są powodem przemiany struktury kolumnowej w równoosiową oraz zmiany kierunku wzrostu tych kryształów.

1. WPROWADZENIE

W wyniku oddziaływania wymuszonej przez pole magnetyczne konwekcji i w zależności od rodzaju krystalizacji odlewu mogą wystąpić dwa przypadki rozdziału dodatku stopowego. Pierwszy – to ujednorodnienie składu chemicznego występujące przy krystalizacji objętościowej.

Drugi – to różnicowanie się stężenia dodatku stopowego na przekroju odlewu występujące przy krystalizacji kierunkowej kryształów kolumnowych.

Uzyskanie tych zmian wymaga jednak spełnienia dwóch podstawowych czynników [1-5]:

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

Zarówno zmiany wywołane wymuszoną konwekcją w warunkach oddawania ciepła przez odlew, jak i zmiany w rozkładzie składników stopowych są przyczyną przemiany struktury odlewu krzepnącego w polu magnetycznym.

Dotychczasowe badania wykazały [4], że zmiany w warunkach cieplnych krystalizacji wywołane wirującym polem magnetycznym, np. w odlewach z aluminium Al99,7 i stopów Al-Cu, są niewystarczające do spowodowania przemiany struktury kolumnowej w równoosiową. Zatem istnieje jeszcze inna przyczyna przemiany struktury i może być nią zmiana warunków rozdziału składnika stopowego na froncie krystalizacji wywołana przepływem ciekłego metalu generowanym przez pole magnetyczne.

W niniejszej pracy podjęto próbę określenia zmian w rozkładzie stężenia składnika stopowego wywołanych działaniem wymuszonej konwekcji oraz wpływu tych zmian na strukturę odlewu i kształt kryształów kolumnowych.

2. BADANIA WŁASNE

Celem badań było określenie rozkładu stężenia miedzi wzdłuż przekroju poprzecznego wlewków walcowych odlanych ze stopów Al-Cu, a w szczególności w kryształach kolumnowych. Postawiono hipotezę, że położenie miejsca przemiany struktury kolumnowej w równoosiową znajduje się w ścisłej korelacji ze zmianami stężenia miedzi w kryształach kolumnowych, a różnicowanie się stężenia miedzi względem osi kryształu kolumnowego stanowi przyczynę do zmiany jego kierunku wzrostu.

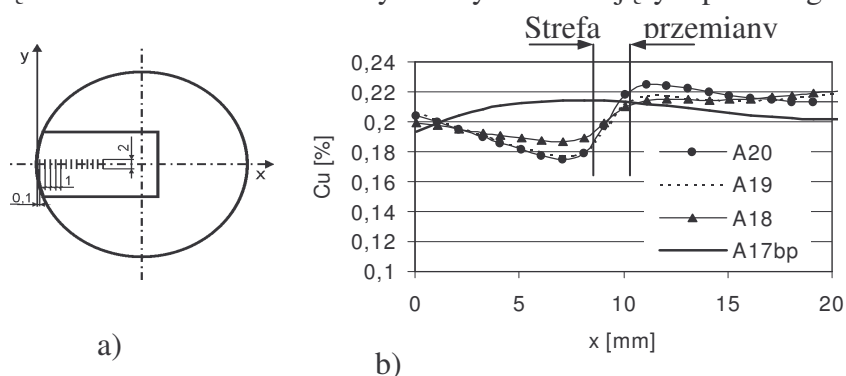
Zakres badań obejmował wykonanie wlewków ze stopów AlCu_{0,2} o wymiarach $\phi 45 \times 180$ mm w wirującym polu magnetycznym (WPM) przy zmienianej na trzech poziomach wartości indukcji (0,015 T; 0,025 T; 0,035 T), co jest równoznaczne ze zmianami prędkości wirowania ciekłego metalu w formie odpowiednio: 0,55 m/s; 0,89 m/s i 1,15 m/s.

Wlewki odlewano w kokili grafitowej o grubości ścianki 7 mm. Temperatura zalewania wynosiła 973K. Czas oddziaływania pola magnetycznego wynosił 20s. Próbki do analizy chemicznej wycinano w odległości 70 mm od dna wlewka. Analizę wykonano na mikroanalizatorze rtg. Stężenie określano wzdłuż promienia wlewka w odległościach co 1mm na długości 2 mm (rys. 1a) oraz wzdłuż linii prostopadłej do głównej osi metalograficznej (rys. 3). Wyniki badań przedstawiono na rys. 1b, 2 i 3.

Przeprowadzono również symulację krzepnięcia odlewu z uwzględnieniem przepływu ciekłego metalu przed frontem krystalizacji. Model krystalizacji uwzględniający wzajemny wpływ zjawisk cieplnych i przepływowych oparto na równaniach przewodnictwa ciepła i równaniu Naviera-Stokesa. Równania rozwiązano metodą elementów skończonych, przyjmując w modelu komórkowy i paraboloidalny kształt frontu krystalizacji. Wynikiem symulacji są wektory prędkości ciekłego metalu w pobliżu frontu krystalizacji (rys. 4). Szczegółowe rozwiązanie przedstawiono w pracach [4-6].

3. ANALIZA WYNIKÓW

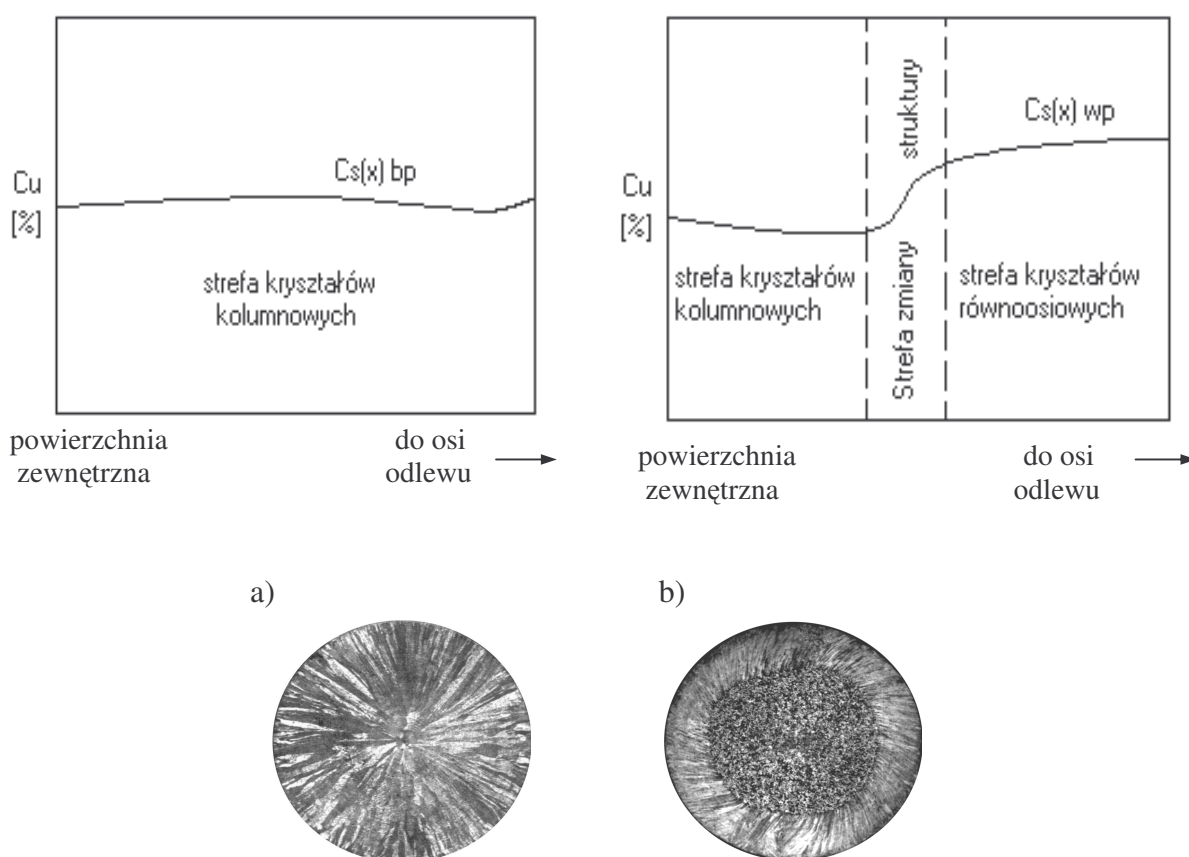
Wyniki badań wykazały, że zmiana stężenia miedzi w odlewach krzepnących bez wymuszonej konwekcji, niezależnie od wartości stężenia nominalnego znacznie różni się od rozkładu stężenia miedzi w odlewach wykonanych w wirującym polu magnetycznym.



Rys. 1. Miejsce pomiaru stężenia miedzi (a) oraz jego aproksymowany rozkład w odlewach z AlCu_{0,2} (b) - odlewy tradycyjne (A17bp) i odlewy wykonane pod działaniem WPM przy różnej prędkości ciekłego metalu w formie: A18 - $V_{cm,max}=0,55$ m/s, A19 - $V_{cm,max}=0,89$ m/s, A20 - $V_{cm,max}=1,15$ m/s

W pierwszej części krzywej rozkładu (rys. 1b), obejmującej zmianę stężenia Cu w strefie kryształów kolumnowych, można zauważyć wyraźne zmniejszanie się stężenia miedzi mierzonego w kierunku od powierzchni zewnętrznej do osi odlewu. Taka zmiana w rozkładzie stężenia dodatku stopowego związana jest z oddziaływaniem wymuszonego przez pole magnetyczne strumienia ciekłego metalu na front krystalizacji. W wyniku działania wymuszonego ruchu ciekłego metalu występuje konwekcyjne „odrzućcie” składnika w związku z tym stężenie Cu w tej strefie jest średnio zawsze niższe niż zmierzone odpowiednio na tej samej długości w odlewach krzepnących tradycyjnie. Wymuszony ruch ciekłej fazy wywołuje też większe różnice w rozkładzie miedzi w strefie kryształów kolumnowych. Te różnice są tym większe, im większe jest nominalne stężenie miedzi w stopie i im większa jest prędkość ciekłej fazy przed frontem krystalizacji (rys. 1b). Największe różnice w rozkładzie stężenia wywołuje działanie pola magnetycznego o maksymalnej indukcji $B=0,035$ T, generujące największą prędkość ciekłego metalu $V_{cm}=1,15$ m/s (próba A20 na rys. 1b).

Stwierdzono również, że najmniejsze stężenie miedzi występuje w odległości ok. 8 mm od powierzchni zewnętrznej (w strefie kryształów kolumnowych). Od tego miejsca gwałtownie zwiększa się stężenie dodatku stopowego, bowiem zanika konwekcyjne „odsyłanie” miedzi z frontu krystalizacji. Wiąże się to przede wszystkim ze znacznym, bo o około 50%, spadkiem

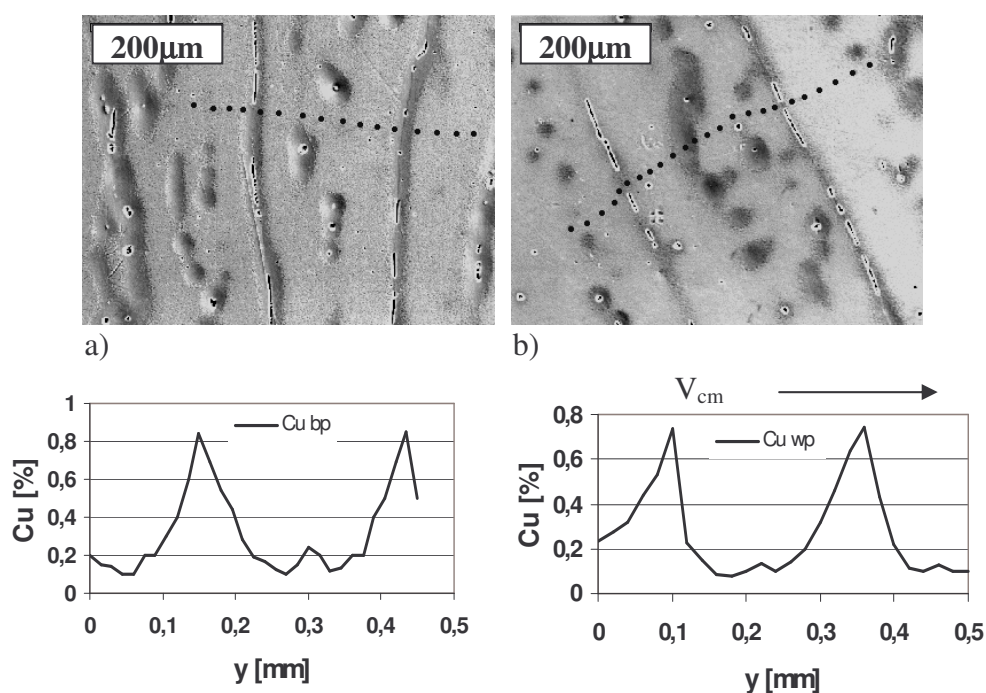


Rys. 2. Schemat zmian stężenia miedzi we wlewkach z AlCu po aproksymacji wyników pomiarów oraz schemat zmian makrostruktury: a) odlewanie tradycyjne, b) odlewanie w polu magnetycznym

prędkości ciekłego metalu V_{cm} wynikającym z ekranowania pola magnetycznego, polegającego na zmniejszeniu jego indukcji przez zakrzepniętą warstwę odlewu, a także zmniejszeniem prędkości krzepnięcia wynikającej z warunków cieplnych. Ponadto z obniżaniem się temperatury ciekłego metalu rośnie lepkość, a tym samym wzrasta szerokość strefy dyfuzyjnej tworząc warunki do mniej intensywnego konwekcyjnego „odsyłania” składnika z frontu krystalizacji. Z tego powodu rośnie stężenie bezpośrednio na froncie krystalizacji co potwierdzono wynikami obliczeń [4], ale też rośnie średnie stężenie w ciekłym metalu. Takie warunki krystalizacji wytworzone przez wirujące pole magnetyczne wiążą się z szybkim wzrostem przechłodzenia stężeniowego przed frontem krystalizacji oraz utratą jego trwałości i są przyczyną transformacji struktury kolumnowej w równoosiową.

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że wzrost stężenia na krzywej rozkładu miedzi pokrywa się z miejscem wystąpienia w odlewie zmiany struktury kolumnowej w równoosiową. Obszar ten nazwano strefą zmiany struktury kolumnowej w równoosiową (rys. 2b). Po tym obszarze występuje strefa kryształów równoosiowych.

Badania wykazały, że wymuszona konwekcja wywołana polem magnetycznym powoduje również różnicowanie się stężenia miedzi względem głównej osi krystalograficznej kryształu kolumnowego (rys. 3). Dzieje się tak dlatego, że strumień ciekłego metalu różnicuje szerokość warstwy dyfuzyjnej wokół kryształów tworzących powierzchnię rozdziału.

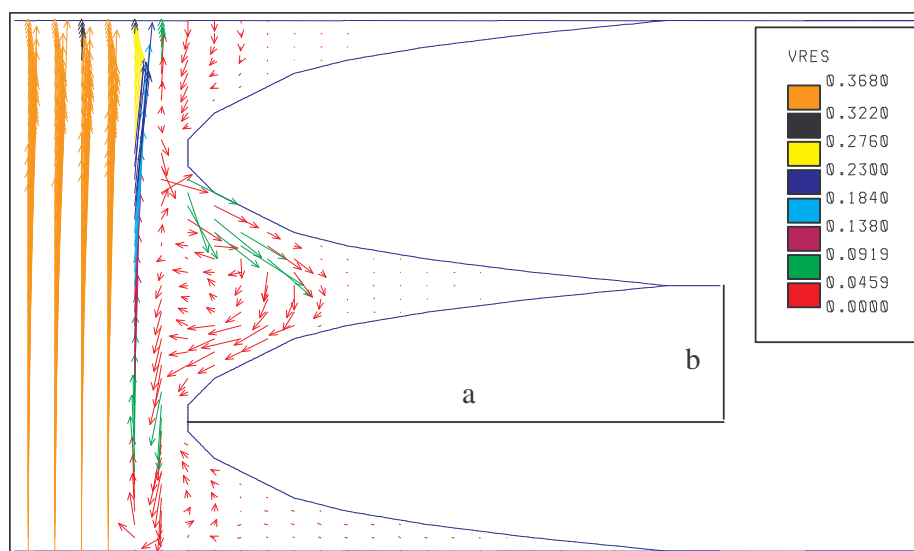


Rys. 3. Rozkład stężenia miedzi w kryształach kolumnowych w odlewach z AlCu0,2: tradycyjnych (a) i wykonanych pod wpływem WPM o indukcji $B=0,035T$ ($V_{cm}=1,15$ m/s) (b)

Wyraźnie większa prędkość ciekłego metalu od strony napływu cieczy (rys. 4) wywołuje 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 (rys. 4). Ta asymetria jest przyczyną wzrostu kryształów z tendencją kierowania się w stronę przeciwną do makroskopowego kierunku wymuszenia ruchu fazy ciekłej.



Rys. 4. Wektory prędkości [m/s] w pobliżu frontu krystalizacji przy szerokości warstwy zakrzepłej $l_s=r_0/4$; paraboloidalny front krystalizacji; a:b=4:1

4. WNIOSKI

1. Wzrost stężenia na krzywej rozkładu miedzi wzdłuż promienia wlewka pokrywa się z miejscem wystąpienia zmiany struktury kolumnowej w równoosiową.
2. Zmianę kierunku wzrostu kryształów kolumnowych można uzasadnić mniejszym stężeniem miedzi na tej części czoła kryształu, na której występuje intensywne konwekcyjne odsyłanie tego składnika spowodowane większą prędkością wymuszonego ruchu ciekłego metalu.

LITERATURA

1. J. Szajnar, J. Gawroński, M. Cholewa, Raport końcowy projektu badawczego nr 7 T08B 030 17 KBN, Politechnika Śl. 2001.
2. A. Buchholz, S. Engler, Comput. Materials Science, vol. 7, (1996) 221.
3. S. Chang, D.M. Stefanescu, Metal. and Mat. Trans. A, vol. 27A, (1996) 2708.

4. J. Szajnar, Transformacja struktury kolumnowej w równoosiową przy krzepnięciu odlewów z wymuszoną konwekcją wirującym polem magnetycznym. Praca habilit., Politechnika Śląska, Gliwice 2001.
5. J. Szajnar, Archiwum Odlewnictwa, vol. 1, No. 1, (2/2), (2001) 385.
6. J. Szajnar, Acta Metallurgica Slovaca, vol. 8, No. 2, (2002) 168.