

ZMIANY W ROZKŁADZIE MIEDZI JAKO PRZYCZYNA PRZEMIANY STRUKTURY W ODLEWACH WYKONYWANYCH W POLU MAGNETYCZNYM

J. SZAJNAR¹

Katedra Odlewnictwa Wydział Mechanicznego Technologicznego, Politechnika Śląska,
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice

STRESZCZENIE

W pracy określono zmiany w rozkładzie stężenia miedzi 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. Stwierdzono również, że ruch ciekłego metalu przed frontem krystalizacji jest przyczyną różnicowania się stężenia miedzi w kryształach kolumnowych.

Key words: molten metal flow, forced convection, copper concentration

1. WPROWADZENIE

Wymuszony ruch ciekłego metalu w formie jest przyczyną wielu zmian w procesie krystalizacji odlewu, wywołując m.in. zmianę warunków oddawania ciepła [1-3]. Powoduje również zmiany w rozkładzie składników stopowych.

W wyniku oddziaływania wymuszonej 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 [4-6]:

¹ dr inż., sekrmt3@polsl.gliwice.pl

- 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 stanowią przyczynę do 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.

2. BADANIA WŁASNE

Celem badań było określenie rozkładu miedzi wzdłuż przekroju poprzecznego wlewków walcowych odlanych ze stopów Al-Cu i wyznaczenie korelacji pomiędzy zmianami stężenia a miejscem przemiany struktury kolumnowej w równoosiową.

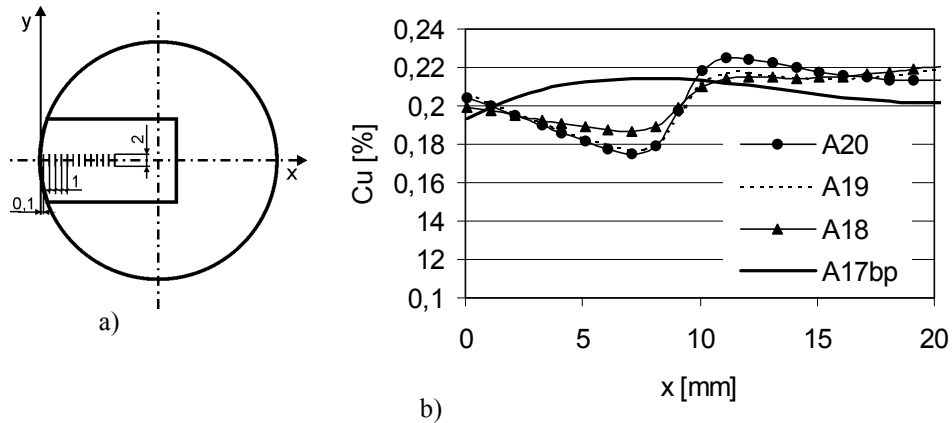
Zakres badań obejmował wykonanie wlewków ze stopów AlCu0,2, AlCu0,3 i AlCu0,5 o wymiarach $\phi 45 \times 180$ mm w wirującym polu magnetycznym (WPM) przy zmienianej na trzech poziomach wartości indukcji, co jest równoznaczne ze zmianami prędkości wirowania ciekłego metalu w formie (tab. 1).

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

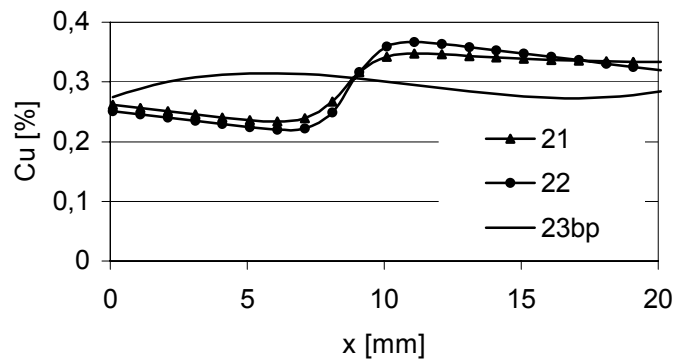
Indukcja pola magnetycznego B [T]	0,015	0,025	0,035
Max prędkość obwodowa ciekłego metalu V_{cm} [m/s]	0,55	0,89	1,15

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



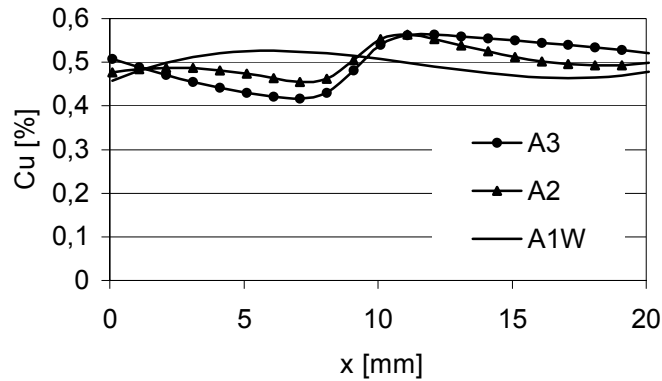
Rys. 1. Miejsce pomiaru stężenia miedzi (a) oraz jego aproksymowany rozkład w odlewach z AlCu0,2 (b) - odlewy tradycyjne (A17bp) i odlewy wykonane pod działaniem WPM przy różnej prędkości ciekłego metalu w formie: A18 - $V_{cm,max}=0,55$ m/s, A19 - $V_{cm,max}=0,89$ m/s, A20 - $V_{cm,max}=1,15$ m/s

Fig. 1. Place of alloy addition concentration measurement (a), and (b) approximated distribution of copper concentration in AlCu0,2 castings. Traditional castings (17pb) and castings made under rotating magnetic field influence at various velocity of liquid metal in a mould: A18 - $V_{cm}=0,55$ m/s, A19 - $V_{cm}=0,89$ m/s, A20 - $V_{cm}=1,15$ m/s



Rys. 2. Aproksymowany rozkład stężenia miedzi w odlewach z AlCu0,3 wzdłuż promienia wlewka walcowego przy różnej prędkości ciekłego metalu w formie: 21 - $V_{cm,max}=0,55$ m/s, 22 - $V_{cm,max}=1,15$ m/s, 23bp - krzepnięcie bez wymuszonej konwekcji

Fig. 2. Approximated distribution of copper concentration in AlCu0,3 castings, along radius of rolled ingot at various velocity of liquid metal in a mould: 21 - $V_{cm,max}=0,55$ m/s, 22 - $V_{cm,max}=1,15$ m/s, solidification without forced convection (23bp)



Rys. 3. Rozkład stężenia miedzi we wlewkach z AlCu0,5 po aproksymacji: A1W - odlew krzepnący tradycyjnie i odlewy krzepnące przy wymuszonym ruchu ciekłego metalu o prędkości ciekłej fazy: A2 - $V_{cm,max}=0,55$ m/s, A3 - $V_{cm,max}=1,15$ m/s

Fig. 3. Copper concentration distribution in AlCu0,5 ingots after approximation: A1W - casting solidifying without forced convection; castings solidifying at liquid metal forced movement of liquid phase velocity $V_{cm,max}=0,55$ m/s (A2), $V_{cm,max}=1,15$ m/s (A3)

3. ANALIZA WYNIKÓW

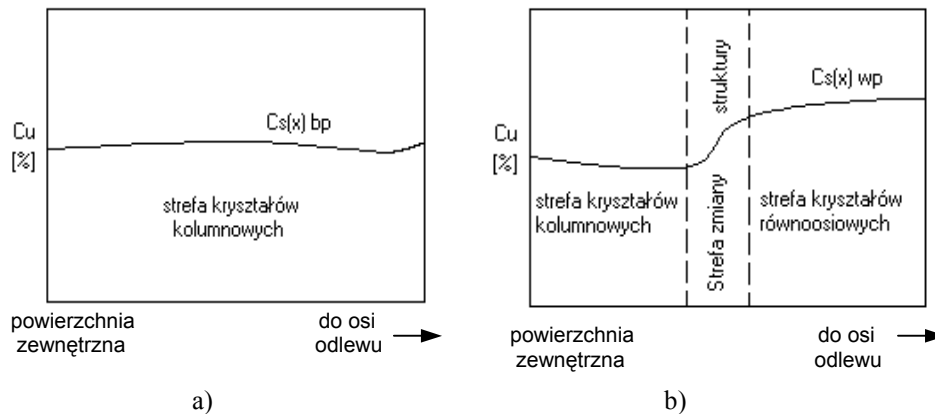
Ruch ciekłego metalu zmienia warunki wymiany masy na froncie krystalizacji czego efektem są różnice w rozkładzie stężenia miedzi w odlanych wlewkach (rys. 1-3). Zmiany te pociągają za sobą również zmiany w makrostrukturze odlewów.

Zmiana stężenia miedzi w odlewach krzepnących bez wymuszonej konwekcji, niezależnie od wartości stężenia nominalnego jest bardzo podobna dla wszystkich wyników pomiarów i można ją przedstawić krzywą pokazaną na rys. 4a. W odległości ok. 8 mm od powierzchni zewnętrznej (w strefie kryształów kolumnowych), zgodnie z rys. 1a, 2, 3, stwierdza się największe stężenie miedzi.

Krzywą rozkładu stężenia miedzi $Cu(x)$ w odlewach krzepnących w WPM można podzielić na trzy części (rys. 4b). Pierwsza obejmuje zmianę stężenia Cu w strefie kryształów kolumnowych, druga w tzw. strefie przejścia czyli w obszarze zmiany struktury kolumnowej w równoosiową, i trzecia w strefie kryształów równoosiowych. Najbardziej istotne dla niniejszej pracy są dwie pierwsze części, które zostaną kolejno przeanalizowane.

Część I – obejmuje strefę kryształów kolumnowych o długości ok. 8 mm, gdzie w wyniku wymuszonego ruchu ciekłego metalu występuje konwekcyjne „odrzućcie” składnika i w związku z tym stężenie Cu w tej strefie jest średnio zawsze niższe niż zmierzone odpowiednio na tej samej długości w odlewach krzepnących tradycyjnie. Te różnice są tym większe, im większe jest nominalne stężenie miedzi w stopie i im

większa jest prędkość ciekłej fazy przed frontem krystalizacji. Zubożenie fazy stałej w miedź w czasie krzepnięcia strefy kryształów kolumnowych powoduje wzbogacenie



Rys. 4. Schemat zmian stężenia miedzi we wlewkach z AlCu po aproksymacji wyników pomiarów oraz schemat zmian makrostruktury

Fig. 4. Changes of copper concentration in AlCu ingots after measurement results approximation and macrostructure changes

cieczy w ten składnik. Dowodem na to są wyniki pomiarów wartości stężenia Cu określone na podstawie analizy chemicznej w metalu wylanym z niezakrzepłej części wlewka w momencie zakończenia działania pola magnetycznego, tj. po 20 s (tab. 2).

Tabela 2. Stężenie miedzi w ciekłym metalu (AlCu_{0,2}) w chwili zakończenia działania WPM
Table 2. Copper concentration in liquid metal (AlCu_{0,2}) when the action of magnetic field is finished

Tzal. [K]	973	1023
	Cu [%]	
Odlew tradycyjny	0,206	0,199
Odlewy wykonywane przy działaniu WPM o indukcji B [T]:		
0,015	0,215	0,209
0,025	0,219	0,227
0,035	0,222	0,248

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.

Część II krzywej rozkładu stężenia to „strefa przemiany struktury”. Jest to obszar w odlewie zawarty w odległości pomiędzy 8 a 12 mm mierzonej od jego powierzchni zewnętrznej, który obejmuje miejsce transformacji struktury kolumnowej w równoosiową. W tym obszarze 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 V_{cm} wynikającym z ekranowania pola magnetycznego przez zakrzepniętą warstwę odlewu, a także zmniejszeniem prędkości krystalizacji wynikającej z warunków cieplnych [4]. 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 [1,4,7,8].

Z tego powodu rośnie stężenie bezpośrednio na froncie krystalizacji co potwierdzono wynikami obliczeń [4], ale też rośnie średnie stężenie w ciekłym metalu (tab. 2). Takie warunki krystalizacji wytworzone przez WPM wiążą się z szybkim wzrostem przechłodzenia stężeniowego przed frontem krystalizacji oraz utratą jego trwałości i są przyczyną transformacji struktury kolumnowej w równoosiową.

Wzrost stężenia na krzywej rozkładu miedzi pokrywa się z miejscem wystąpienia w odlewie zmiany struktury kolumnowej w równoosiową.

LITERATURA

- [1] J. Szajnar, J. Gawroński, M. Cholewa, Raport końcowy proj. bad. nr 7 T08B 030 17 KBN, Politechnika Śl. 2001.
- [2] A. Buchholz, S. Engler, *Comput. Materials Science*, 1996, vol. 7, pp. 221.
- [3] S. Chang, D.M. Stefanescu, *Metal. and Mat. Trans. A*, 1996, vol. 27A, pp. 2708.
- [4] J. Szajnar, *Transformacja struktury kolumnowej w równoosiową przy krzepnięciu odlewów z wymuszoną konwekcją wirującym polem magnetycznym*. Praca hab., Pol. Śl., Gliwice 2001.
- [5] J. Szajnar, J. Gawroński, *Acta Metallur. Slovaca*, vol. 4, no. 2, 1998, pp. 224.
- [6] J. Szajnar, *Krzepnięcie Metali i Stopów*, vol.1, nr 40, 1999, s. 213.
- [7] C.Y. Wang, C. Beckermann, *Met. and Metals Trans. A*, vol.27A, p.2784, 1996.
- [8] J.S. Suchy, *Segregacja pierwiastków podczas krzepnięcia kierunkowego*. Praca hab., Pol. Śl., Gliwice 1983.

CHANGES IN Cu DISTRIBUTION AS A REASON FOR STRUCTURE TRANSFORMATION IN CASTINGS SOLIDIFYING IN MAGNETIC FIELD

SUMMARY

This work describes copper distribution changes in AlCu castings stirred by rotating magnetic field. It is claimed, that the changes in Cu distribution caused by forced movement of the liquid phase are the main reason of columnar to equiaxed transformation (CET). Movement of the liquid metal in front of CET interface is also a reason for different Cu content in columnar crystals.

Recenzował Prof. Stanisław Jura