

# Egzogeniczna modyfikacja struktury czystego aluminium

T. Wróbel\*, J. Szajnar

Politechnika Śląska, Katedra Odlewnictwa, Towarowa 7, 44-100 Gliwice, PL

\* Kontakt korespondencyjny: e-mail: tomasz.wrobel@polsl.pl

Otrzymano 14.07.2011; zaakceptowano 27.07.2011

## Streszczenie

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z egzogeniczną modyfikacją struktury aluminium o czystości 99,5%, realizowanej poprzez intensyfikację ruchu ciekłego metalu krzepnącego w formie. W celu uzyskania wymuszonego ruchu krzepnącego metalu zastosowano wirujące pole elektromagnetyczne wytwarzane przez induktor zasilany prądem o częstotliwości od 5 do 100Hz. Uzyskane w wyniku oddziaływania pola elektromagnetycznego rozdrobnienie struktury pierwotnej porównywano z możliwym do uzyskania w rezultacie tradycyjnej modyfikacji, polegającej w przypadku aluminium na wprowadzeniu do kąpeli metalowej dodatków w postaci tytanu i boru.

**Słowa kluczowe:** Aluminium, Modyfikacja, Pole elektromagnetyczne, Tytan, Bor

## 1. Wprowadzenie

Strukturę pierwotną czystych metali niezależnie od rodzaju sieci krystalicznej, tworzą kryształy kolumnowe, usytuowane w przybliżeniu równoległe do kierunku przepływu ciepła. Zmianę tej niekorzystnej struktury m.in. z punktu widzenia późniejszej obróbki plastycznej wlewków, można uzyskać na drodze regulacji szybkości odprowadzania ciepła z odlewu, składu chemicznego oraz intensywności konwekcji ciekłego metalu [1, 2].

Skutecznym sposobem eliminowania strefy kryształów kolumnowych jest przeprowadzenie zabiegu modyfikacji, który polega na wprowadzeniu do kąpeli pewnych substancji, zwanych modyfikatorami, zwiększających gęstość ziaren w metalu poprzez hamowanie prędkości wzrostu ziaren, zmniejszenie napięcia powierzchniowego na granicy międzyfazowej ciecz – zarodek i kąta zwilżania zarodka z podkładkami oraz zwiększenia gęstości podkładek do zarodkowania heterogenicznego, dzięki utworzeniu nowych cząstek w ciekłym metalu. Prowadzi to do zwiększenia strefy kryształów równoosiowych zapewniającej przede wszystkim poprawę własności mechanicznych, zmniejszenie segregacji składników oraz ograniczenie skłonności metalu do

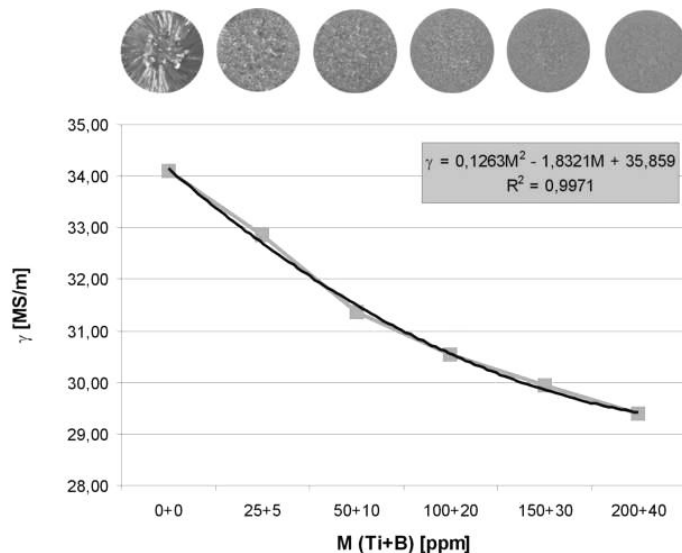
pęknięć na gorąco. Aktywnymi podkładkami do zarodkowania heterogenicznego aluminium są wysokotopliwe cząstki TiC, TiN, TiB, TiB<sub>2</sub>, AlB<sub>2</sub> i Al<sub>3</sub>Ti [1, 3÷7].

W przypadku odlewania aluminium dodatki modyfikujące wprowadza się najczęściej w postaci stopu wstępnego AlTi5B1, w którym stosunek Ti:B wynosi 5:1. Utworzone zostają wówczas podkładki w postaci fazy TiB<sub>2</sub> i Al<sub>3</sub>Ti [3÷7]. Rodzaj oraz ilość podkładek do zarodkowania heterogenicznego aluminium można regulować zmieniając stosunek Ti:B. Dla przykładu w pracy [7] przedstawiono możliwość zastosowania dodatków modyfikujących w postaci stopu wstępnego AlTi1.7B1.4, w którym stosunek Ti:B wynosi 1.2:1, co pozwala na zwiększenie ilości drobnych wydzieleni fazy TiB<sub>2</sub> oraz AlB<sub>2</sub> kosztem wydzieleni fazy Al<sub>3</sub>Ti.

Należy jednak zwrócić uwagę, że ten niewątpliwie skuteczny sposób modyfikacji struktury pierwotnej wlewków w odniesieniu do odlewania czystego aluminium posiada istotne ograniczenia, do których należy przede wszystkim konieczność zachowania czystości metalurgicznej metalu zgodnie z obowiązującymi normami [8], a Ti i B wprowadzane jako dodatki modyfikujące klasyfikowane są wówczas jako zanieczyszczenia.

Istnieje także konieczność zachowania na odpowiednim poziomie określonych własności fizycznych np. w przypadku

czystego aluminium przewodności elektrycznej, którą dodatek Ti segregując na granicach ziarn Al istotnie obniża (rys.1) [5 i 9].



Rys. 1. Wpływ modyfikacji Ti i B na strukturę i przewodność elektryczną  $\gamma$  czystego aluminium [5]

Ponadto obecność w strukturze podkładek do zarodkowania heterogenicznego aluminium, szczególnie w postaci trudno odkształcalnych faz m.in. borków tytanu, generuje możliwość powstawania punktowych pęknięć i w konsekwencji rozwarstwienia blach (folii) podczas walcowania [11].

W związku z tym znaczenia nabiera inny sposób zapewniający modyfikację struktury czystych metali, polegający na oddziaływaniu na krzepnący metal pola elektromagnetycznego [5, 12÷14].

Wymuszony polem elektromagnetycznym ruch ciekłego metalu oddziałuje na zmianę struktury odlewu w zróżnicowany sposób tj. poprzez zmianę warunków termicznych i stężeniowych na froncie krystalizacji zmniejszając lub całkowicie zatrzymując prędkość wzrostu kryształów kolumnowych [12 i 14] oraz przez [1, 12÷15]:

- odrywanie kryształów od ścianki formy, które przenoszone w głąb kąpieli mogą przekształcać się w kryształy równoosiowe,
- przenoszenie kryształów ze swobodnej powierzchni w głąb ciekłego metalu,
- przenoszenie w głąb ciekłego metalu kryształów powstających w zewnętrznej, przeschłodzonej warstwie kąpieli.
- fragmentację dendrytów przez koagulację i nadtapianie pod wpływem fluktuacji temperatury oraz odłamywanie wywołane energią ruchu ciekłego metalu.

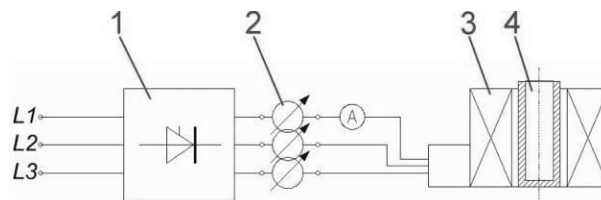
Jednakże jak wykazano w pracach [12÷14] wpływ wymuszonego polem elektromagnetycznym ruchu ciekłego metalu na zmiany w strukturze czystych metali, które krzepną przy płaskim froncie krystalizacji jest niewystarczający. Skuteczne oddziaływanie tak wywołanej wymuszonej konwekcji wymaga odpowiedniego, minimalnego stężenia domieszek tj. dodatku stopowego lub zanieczyszczeń w odlewie. Wynika

z tego, że oddziaływanie pola elektromagnetycznego może jedynie wspomagać rozdrobnienie struktury czystych metali wywołane w głównej mierze wprowadzeniem do ciekłego metalu niewielkiej ilości dodatku modyfikującego.

## 2. Zakres badań

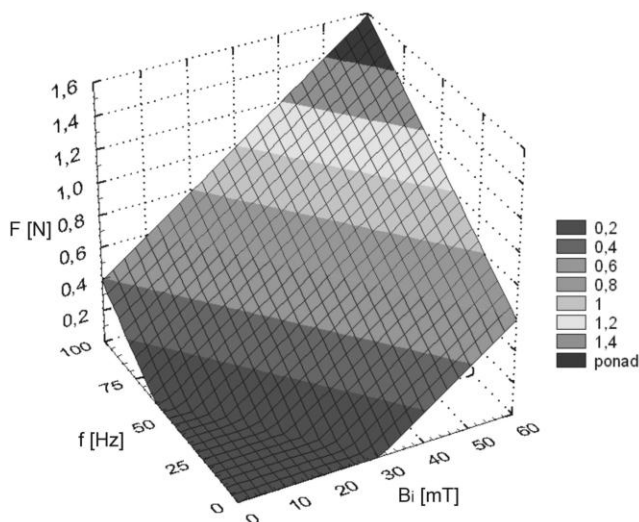
Celem badań było opracowanie metody odlewania czystego aluminium w polu elektromagnetycznym, która zapewni rozdrobnienie struktury pozwalające na wyeliminowanie konieczności wprowadzania do ciekłego metalu dodatków modyfikujących w postaci Ti i B.

Badania prowadzono wykonując wlewki walcowe z aluminium gatunku EN AW – Al99,5 o średnicy 25mm i wysokości 220mm w kokili grafitowej o grubości ścianki 10mm. Metal topiony był w piecu indukcyjnym w tyglu grafitowym i następnie po zmierzeniu temperatury termoparą NiCr – NiAl wlewany do formy (temperatura zalewania 740°C). Na rysunku 2 przedstawiony schemat stanowiska do odlewania czystego aluminium w wirującym polu elektromagnetycznym.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego: 1 – falownik, 2 – autotransformator, 3 – induktor, 4 – forma z ciekłym metalem, A – amperomierz

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono, że poprzez zastosowanie falownika umożliwiającego realizację zmiany częstotliwości prądu zasilającego induktor, można przy zachowaniu stałej wartości natężenia prądu (indukcji magnetycznej) regulować wartość siły wymuszającej ruch ciekłego metalu (rys. 3) i w rezultacie prędkość jego wirowania w formie.



Rys. 3. Wpływ częstotliwości ( $f$ ) prądu zasilającego induktor oraz indukcji magnetycznej ( $B_i$ ) na wartość siły wymuszającej ruch ciekłego metalu w formie o średnicy 25mm wg zależności:

$$F = 0,02B_i + 0,01f - 0,61,$$

przy współczynniku korelacji  $R = 0,92$  i  $R^2 = 0,85$

Plan eksperymentu obejmował wykonanie 21 wlewków próbnich z czystego Al w wirującym polu elektromagnetycznym w zakresie zmienności częstotliwości prądu zasilającego induktor od 5 do 100Hz z krokiem co 5Hz oraz bez udziału pola elektromagnetycznego. Dodatkowo w celach porównawczych wykonano wlewkę z Al o czystości 99,5% modyfikowaną Ti i B wprowadzonymi w ilości odpowiednio 25 i 5ppm.

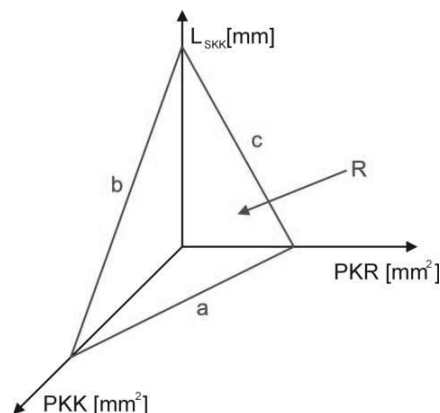
W celu dokonania oceny stopnia rozdrobnienia struktury wykonywanych wlewków, przeprowadzono badania metalograficzne makroskopowe polegające na przecięciu wlewków w odległości 100mm od podstawy i następnym szlifowaniu oraz trawieniu w odczynniku o następującym składzie: 50g Cu, 400ml HCl, 300ml HNO<sub>3</sub> i 300 ml H<sub>2</sub>O, w celu ujawnienia struktury.

W oparciu o przeprowadzoną przy użyciu programu komputerowego MultiScanBase v. 13.01 analizę makrostruktur badanych wlewków określono parametry wynikowe reprezentujące ich rozdrobnienie:

- SKR - udział procentowy strefy kryształów równoosiowych na przekroju poprzecznym wlewka, %,
- PKR - średnia powierzchnia kryształu równoosiowego, mm<sup>2</sup>,
- PKK - średnia powierzchnia kryształu kolumnowego, mm<sup>2</sup>,
- L<sub>SKK</sub> - szerokość strefy kryształów kolumnowych, mm.

Ponadto w celu jednoczesnego uwzględnienia średniej wielkości powierzchni kryształu równoosiowego (PKR)

i kolumnowego (PKK) oraz szerokości strefy kryształów kolumnowych (L<sub>SKK</sub>) jako parametrów pośrednio reprezentujących stopień rozdrobnienia struktury pierwotnej, wprowadzono opracowany w pracy [13] współczynnik (R), definiowany jako pole powierzchni trójkąta różnobocznego, powstałego w układzie współrzędnych kartezjańskich w wyniku połączenia trzech punktów charakterystycznych dla każdej próbki tj. PKR, PKK i L<sub>SKK</sub> (rys. 4). Według przyjętego kryterium wartość współczynnika (R) dążąca do minimum równoznaczna jest ze wzrostem stopnia rozdrobnienia struktury wlewka.



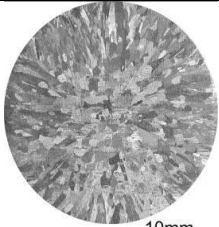
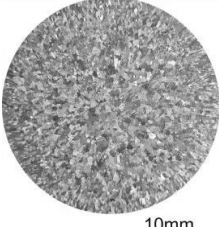
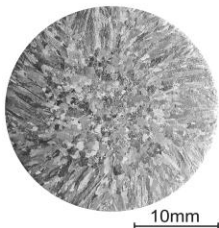
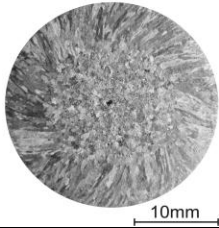
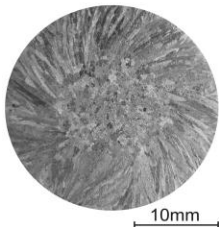
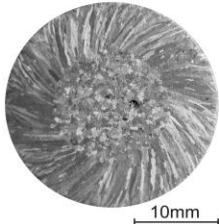
Rys. 4. Graficzna interpretacja współczynnika rozdrobnienia struktury (R)

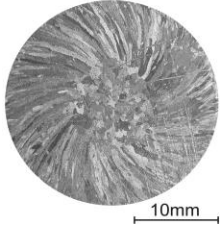
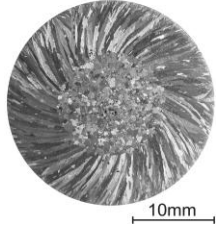
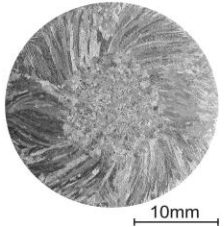
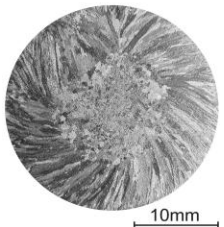
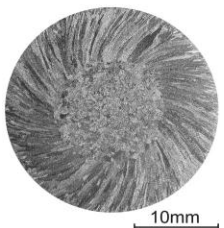
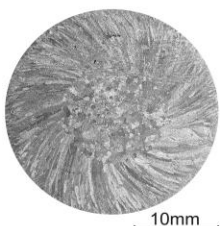
### 3. Wyniki badań

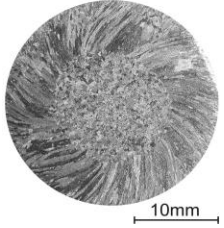
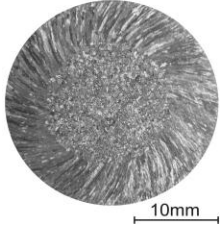
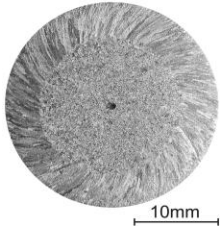
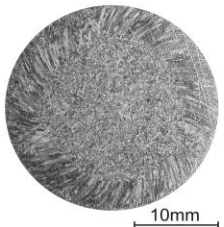
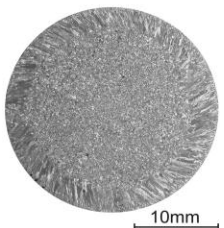
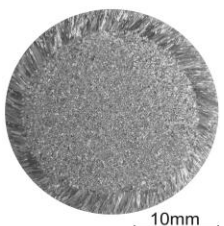
W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań metalograficznych makroskopowych wlewków z czystego aluminium gatunku EN AW – Al99,5. W stanie surowym struktura aluminium jest dwustrefowa i składa się głównie z kryształów kolumnowych oraz niewielkiej ilości dużych kryształów równoosiowych, znajdujących się w obszarze środkowym wlewka. Rozdrobnienie struktury objawiające się zwiększeniem strefy kryształów równoosiowych oraz zmniejszeniem wielkości makroziarna w tej strefie uzyskano w wyniku modyfikacji polegającej na wprowadzeniu do ciekłego metalu Ti i B w ilościach odpowiednio 25 i 5ppm.

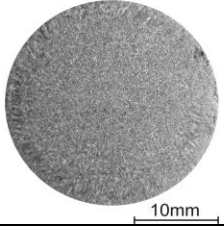
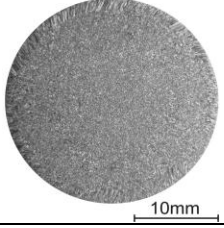
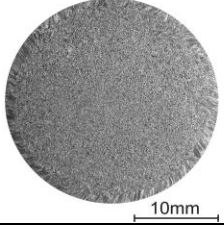
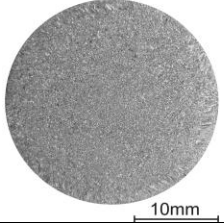
Rozdrobnienie struktury aluminium nastąpiło, także w wyniku oddziaływania na krzepnący metal wirującego pola elektromagnetycznego. Jednakże wówczas skuteczność modyfikacji struktury istotnie zależy od zastosowanej częstotliwości prądu zasilającego induktor wytwarzający pole elektromagnetyczne (rys.5÷7). Zastosowanie częstotliwości prądu zasilającego induktor  $f \leq 50$ Hz nie zapewnia wytworzenia korzystnej transformacji struktury czystego aluminium. Natomiast induktor zasilany prądem o częstotliwości większej od sieciowej, szczególnie około 100Hz, wytwarza wirujące pole elektromagnetyczne pozwalające na uzyskanie korzystniejszego rozdrobnienia struktury, także z punktu widzenia przyjętego kryterium minimalnej wartości współczynnika R, w porównaniu do otrzymanego po modyfikacji Ti i B (tab.1).

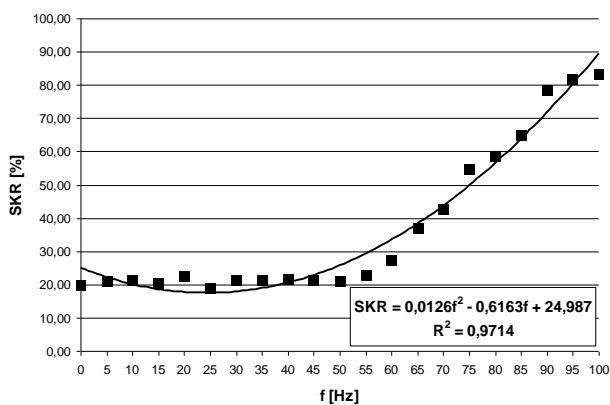
Tabela 1.  
Zakres i wyniki badań

Lp.	Parametry odlewania			Parametry rozdrobnienia struktury					Makrostruktura wlewka
	B <sub>i</sub> [mT]	f [Hz]	(Ti+B) [ppm]	SKR [%]	PKR [mm <sup>2</sup> ]	PKK [mm <sup>2</sup> ]	L <sub>SKK</sub> [mm]	R	
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-	-9-	-10-
1	-	-	-	19,94	0,64	6,50	5,37	17,66	 10mm
2	-	-	25+5	80,30	0,42	1,36	2,31	1,67	 10mm
3		5		21,01	0,44	6,42	5,23	16,89	 10mm
4		10		21,36	0,35	6,32	5,21	16,53	 10mm
	60		-						
5		15		20,66	0,33	6,40	5,44	17,46	 10mm
6		20		22,63	0,37	6,30	5,12	16,20	 10mm

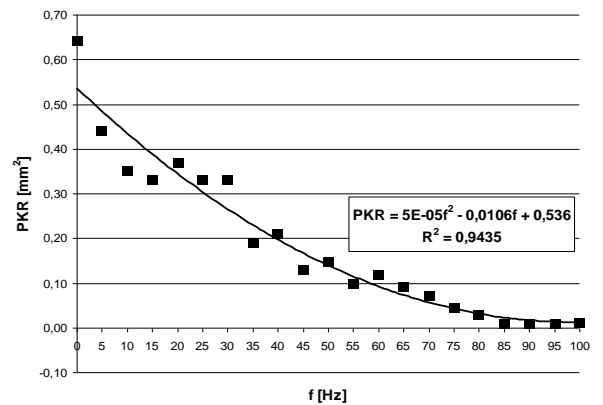
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-	-9-	-10-
7		25		18,90	0,33	6,23	6,00	18,74	
8		30		21,42	0,33	6,32	5,18	16,42	
9		35		21,44	0,19	6,12	5,15	15,78	
	60		-						
10		40		21,68	0,21	5,87	5,12	15,05	
11		45		21,46	0,13	5,57	5,13	14,30	
12		50		21,21	0,15	5,20	5,18	13,48	

-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-	-9-	-10-
13		55		22,87	0,10	4,33	5,10	11,05	
14		60		27,22	0,12	3,98	5,00	19,96	
15	60	65		37,05	0,09	3,24	4,44	7,20	
16		70		42,53	0,07	2,88	4,10	5,91	
17		75		54,63	0,04	2,10	3,70	3,89	
18		80		58,56	0,03	2,00	3,40	3,40	

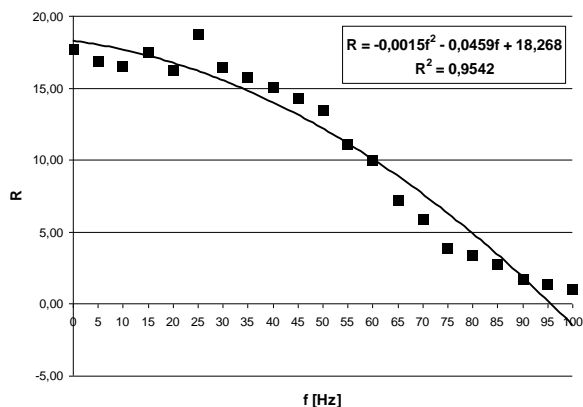
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-	-9-	-10-
19		85		64,70	0,01	1,78	3,05	2,71	
20		90		78,67	0,01	1,45	2,45	1,78	
	60								
21		95		81,78	0,01	1,22	2,22	1,35	
22		100		83,36	0,01	1,00	2,00	1,00	



Rys. 5. Wpływ częstotliwości (f) prądu zasilającego induktor wytwarzający pole elektromagnetyczne na wielkość strefy kryształów równoosiowych (SKR) we wlewkach z czystego Al



Rys. 6. Wpływ częstotliwości (f) prądu zasilającego induktor wytwarzający pole elektromagnetyczne na wielkość kryształu równoosiowego (PKR) we wlewkach z czystego Al



Rys. 7. Wpływ częstotliwości (f) prądu zasilającego induktor wytwarzający pole elektromagnetyczne na wartość współczynnika rozdrobnienia R we wlewkach z czystego Al

## 4. Podsumowanie

W oparciu o przeprowadzoną analizę wyników badań stwierdzono, że w celu wyeliminowania konieczności stosowania modyfikacji Ti i B, która obniża czystość metalurgiczną oraz przewodność elektryczną aluminium, a także może być przyczyną powstawania pęknięć w trakcie walcowania wlewków, proponuje się zastosowanie oddziaływania na krzepnący metal wirującego pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez induktor zasilany prądem o częstotliwości większej od sieciowej. Ten sposób modyfikacji, możliwy do zastosowania także w warunkach odlewania ciągłego, pozwala na uzyskanie wlewków z aluminium o czystości 99,5% o strukturze praktycznie niewykazującej obecności niekorzystnej z punktu widzenia własności użytkowych strefy kryształów kolumnowych.

## Podziękowania

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki.

# Exogenous inoculation of pure aluminum structure

## Abstract

In paper is presented problem concerning inoculation of pure aluminum 99,5% structure, which is realized mainly by intensification of liquid metal movement in mould. In aim of realization of forced movement during the crystallization of liquid metal was used rotate electromagnetic field, which is generated by induction coil fed with frequency of supply current from 5 to 100Hz. Effect of structure refinement obtained by influence of electromagnetic field was compared with refinement obtained by use of traditional inoculation, which consists in introducing of additions in form of titanium and boron to metal bath.

## Literatura

- [1] E. Fraś: Krystalizacja metali, WNT, Warszawa 2003.
- [2] B. Chalmers: The structure of ingots, Journal of the Australian Institute of Metals, vol. 8, 1963, p. 255.
- [3] J. Szymzal, E. Krzemień, T. Zając: Modyfikacja metali i stopów, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 1984.
- [4] S. Pietrowski: Modyfikacja tytanem, borem i fosforem siluminu AK20, Krzepnięcie Metali i Stopów, vol. 2, Nr 43, 2000, s. 451.
- [5] J. Szajnar, T. Wróbel: Inoculation of pure aluminum with an electromagnetic field, Journal of Manufacturing Processes, vol. 10, No. 2, 2008, p. 74.
- [6] T. Sritharan, H. Li: Optimizing the composition of master alloys for grain refining aluminium, Scripta Materialia, 9, 1996, p. 1053.
- [7] Z. Zamkotowicz, T. Stuczeński, B. Augustyn, M. Lech-Grega, W. Wężyk: S: Sedymentacja związków międzymetalicznych w ciekłych stopach aluminium gatunku AlSiCu(Ti), Mat. Konf. Odlewnictwo Metali Niezależnych – Nauka i Technologia, 2003, s. 77.
- [8] PN-EN 573-3, PKN, Warszawa, 2005.
- [9] J. Adamczyk: Inżynieria materiałów metalowych – cz.1, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2004.
- [10] J. Donnay, H. Ondik: Crystal date – Determinative Tables, NSRDS – JCPDS, 1973.
- [11] O. Keles, M. Dunder: Aluminium foil: its typical quality problems and their causes, Journal of Materials Processing Technology, 186, 2007, p. 125.
- [12] J. Szajnar, J. Gawroński: Oddziaływanie pola magnetycznego na transformację struktury kolumnowej odlewów, Przegląd Odlewnictwa, 4, 2005, s. 232.
- [13] T. Wróbel: Modyfikacja aluminium z udziałem pola elektromagnetycznego, Praca doktorska, Politechnika Śląska, 2007.
- [14] J. Szajnar: Oddziaływanie wybranych czynników fizycznych na proces krystalizacji i strukturę odlewów, Archives of Foundry Engineering – Monografia, vol. 9, Nr 1M, 2009.
- [15] R. Doherty, H. Lee, E. Feest: Microstructure of stir-cast metals, Materials Science and Engineering, 65, 1984, p. 181.