

**WPLYW ODDZIAŁYWANIA IMPULSOWEGO  
REWERSYJNEGO POLA MAGNETYCZNEGO ORAZ  
MODYFIKACJI Ti + B NA STRUKTURĘ ALUMINIUM**J. SZAJNAR<sup>1</sup>, M. STAWARZ<sup>2</sup>, T. WRÓBEL<sup>3</sup>Zakład Odlewnictwa, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych,  
Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska  
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice**STRESZCZENIE**

W pracy przedstawiono badania nad wspólnym oddziaływaniem modyfikacji tytanem i borem oraz impulsowego pola magnetycznego na stopień rozdrobnienia struktury aluminium. Uzyskane wyniki pokazują ścisłą relację między wielkością strefy kryształów równoosiowych a parametrami odlewania tj. częstotliwością pulsacji pola, mocą pola magnetycznego reprezentowaną pośrednio przez natężenie prądu zasilającego induktor oraz ilością modyfikatora typu AlTi5B.

*Key words: aluminium, inoculation, impulse magnetic field*

**1. WPROWADZENIE**

Najistotniejszym czynnikiem mającym wpływ na jakość odlewów jest ich struktura pierwotna kształtująca się w procesach krzepnięcia i krystalizacji.

Strefa kryształów kolumnowych jako efekt krzepnięcia warstwowego (kierunkowego), przebiegającego przy dodatnim gradiencie temperatury na froncie krystalizacji, jest szczególnie niepożądana w odlewach ciągłych i półciągłych przeznaczonych do obróbki plastycznej. Powoduje ona znaczne obniżenie prędkości wyciskania wlewków w prasach oraz rozwarstwianie wlewków w strefie zewnętrznej podczas walcowania.

W związku z powyższym dąży się do uzyskania możliwie jak największej strefy kryształów równoosiowych powstającej na skutek krzepnięcia objętościowego, przebiegającego przy ujemnym gradiencie temperatury w fazie ciekłej. Dobierając odpowiednio niektóre zmienne czynniki procesu krzepnięcia odlewu (np. gradient

---

<sup>1</sup> dr hab. inż. prof. nadzw. w Pol. Śl., jan.szajnar@polsl.pl

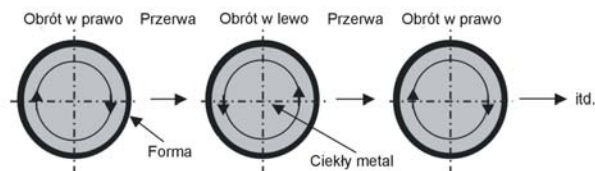
<sup>2</sup> dr inż., marcin.stawarz@polsl.pl

<sup>3</sup> mgr inż., tomasz.wrobel@polsl.pl

temperatury w odlewie  $G$ , prędkość krzepnięcia  $V$ , stężenie początkowe  $C_0$ ) można w ograniczonym zakresie tworzyć warunki szybkiego przejścia z krzepnięcia warstwowego do krzepnięcia objętościowego. Efektem tych zmian może być zwiększenie strefy kryształów równoosiowych z równoczesnym zmniejszaniem szerokości strefy kryształów kolumnowych lub jej całkowitą likwidacją. Przytoczone wyżej zmienne czynniki procesu krzepnięcia występują również przy krystalizacji odlewów pod wpływem wymuszonej konwekcji ciekłego metalu np. przy zastosowaniu pola magnetycznego. Wymuszony polem magnetycznym ruch ciekłego metalu jest przyczyną tworzenia się dodatkowych zarodków krystalizacji poprzez dyspersję kryształów pływających w cieczy, erozję frontu krystalizacji, przenoszenie kryształów ze swobodnej powierzchni w głąb ciekłego metalu itp. [1,2].

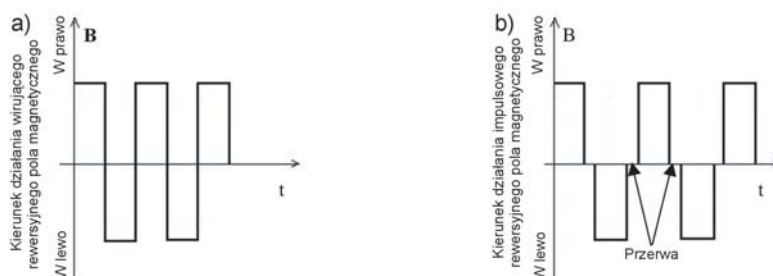
Odlewanie metali w zmiennym polu magnetycznym, czyli wykorzystujące indukcyjne mieszanie jest obecnie jedną z metod umożliwiających otrzymanie odlewów o wysokiej jakości gdyż efektem działania takiego pola jest rozdrobnienie struktury i jej ujednorodnienie. Jak już wspomniano wcześniej, lepszą jakość odlewów otrzymać można dążąc do uzyskania struktury o kryształach równoosiowych. Jeśli zostaną w odpowiedni sposób dobrane czynniki w procesie krzepnięcia odlewu oraz parametry pola magnetycznego, można wtedy uzyskać zwiększoną strefę kryształów równoosiowych wraz z jednoczesnym zmniejszeniem strefy kryształów kolumnowych lub też z zupełnym jej brakiem. Badania nad oddziaływaniem różnych rodzajów pola magnetycznego od wielu lat są prowadzone w Zakładzie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej, w szczególności obejmują one aluminium i jego stopy [3].

Stosowanie mieszania indukcyjnego ciekłego metalu w formie lub krystalizatorze nie zawsze powoduje zmniejszenie szerokości kryształów kolumnowych głównie ze względu na niemożność zastosowania induktorów o odpowiednio dużej mocy do wymuszania ruchu [4,5]. Stąd pojawiała się konieczność zmiany rodzaju stosowanego pola magnetycznego, aby możliwe było stosowanie induktorów zasilanych większą mocą niż dotychczas. Opracowano nowy sposób oddziaływania wirującego rewersyjnego pola magnetycznego polegający na zastosowaniu przerwy w wytwarzaniu pola magnetycznego pomiędzy zmianą kierunku jego wirowania (rys.1, 2) i pozwalającego w związku z tym na generowanie w ciekłym metalu dużo większych sił elektrodynamicznych impulsowo działających. Różnice pomiędzy zasadą działania wirującego rewersyjnego pola magnetycznego a impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego przedstawia schemat na rys. 2.



Rys. 1. Schemat oddziaływania impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego na ciekły metal  
Fig. 1. Schema of work impulse reverse magnetic field on liquid metal

Oddziaływanie pola elektromagnetycznego na ciekły metal w czasie krzepnięcia odlewu i w konsekwencji tego na wielkość strefy kryształów równoosiowych, może zostać wzmocnione przez wprowadzenie pierwiastków modyfikujących.



Rys. 2. Schemat działania wirującego rewersyjnego pola magnetycznego (a) oraz impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego (b)

Fig. 2. Schema of work reverse magnetic field (a) and impulse reverse magnetic field (b)

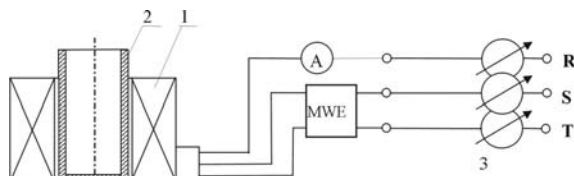
## 2. CEL I PRZEBIEG BADAŃ

Celem badań było określenie wpływu podstawowych parametrów impulsowego pola magnetycznego i zmiennej ilości modyfikatora (Ti + B) na rozdrobnienie struktury odlewów z aluminium. W eksperymencie zostało wykorzystane stanowisko badawcze (rys.3) w którego skład wchodziły:

- stojan silnika asynchronicznego 1 - pełni on funkcję wzbudnika, wirnik zostaje zastąpiony wsadem metalowym, który stanowi forma z ciekłym metalem 2,
- autotransformator 3 - reguluje napięcie trójfazowe zasilające wzbudnik; dokonuje zmiany wartości indukcji,
- amperomierz – zastosowany do pomiaru prądu zasilającego induktor,
- multiwibrator MWE – zmienia za pomocą przekaźników kierunek wirowania pola magnetycznego powodując jego rewersję. Zbudowany jest z dwóch układów scalonych gwarantujących uzyskanie stabilności generowanych impulsów [6].

Badania prowadzono wykonując wlewki walcowe z aluminium EN AW-Al 99,98 o średnicy 45 mm i wysokości 180 mm w kokili grafitowej o grubości ścianki 6 mm. Metal topiony był w piecu indukcyjnym tyglowym i następnie po zmierzeniu temperatury termoparą NiCr-NiAl wlewany do formy (temperatura zalewania 740°C). Zalewanie formy odbywało się przy działającym impulsowym rewersyjnym polu magnetycznym o częstotliwości pulsacji 0,4 i 1 Hz, natężeniu prądu zasilającego induktor 2 i 8A i czasie oddziaływania pola 10 i 30s liczonego od końca zalewania. Ilość wprowadzanego modyfikatora (Ti+B) wynosiła 200+40 i 50+10 ppm. Wartość indukcji magnetycznej określano przed zalaniem formy na jej wewnętrznej ściance za pomocą teslomierza TH26. Ujawnioną strukturę odlewów fotografowano cyfrowym aparatem fotograficznym Nikon. Następnie korzystając z programu Multi Scan Base (program do przetwarzania i analizy obrazów) określono szerokość strefy kryształów

kolumnowych SKK [mm<sup>2</sup>], na podstawie której wyznaczono procentowy udział strefy kryształów równoosiowych SKR [%]. Rzeczywiste stężenie pierwiastków modyfikujących Ti i B w odlewach próbnych, określono przy użyciu optycznej spektrometrii emisyjnej.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego: 1- induktor wytwarzający pole magnetyczne, 2- forma, 3- transformator, A- amperomierz, MWE- multiwibrator  
 Fig. 3. Test stand scheme: 1- magnetic field coil, 2- mould, 3- three-phase transformer, A- ammeter, MWE- multivibrator

### 3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Wyniki badań obejmujące pomiary procentowego udziału strefy kryształów równoosiowych SKR oraz rzeczywiste stężenie pierwiastków modyfikujących Ti i B przedstawiono w tabelicy 1. Natomiast wybrane wyniki badań metalograficznych przedstawiono na rys. 4÷9.

Wspólne oddziaływanie impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego oraz modyfikatora, pozwoliło na zwiększenie rozdrobnienia struktury odlewów w stopniu większym aniżeli w przypadku stosowania wyłącznie modyfikacji tytanem i borem (tab.1, rys. 4÷9).

Zmniejszenie częstotliwości pulsacji pola magnetycznego powoduje zwiększenie strefy kryształów równoosiowych (tab.1). Wynika to z dużych prędkości ruchu jakie osiąga ciekły metal w formie, a co za tym idzie większych sił rozrywających kryształy kolumnowe tworzące front krystalizacji. Powstają w ten sposób dodatkowe zarodki krystalizacji.

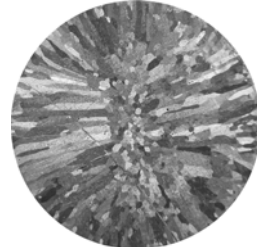
Tablica 1. Zakres i wyniki badań

Table 1. Range and results of investigations

Nr wytupu	f [Hz]	I [A]	B [mT]	t [s]	Założona ilość Ti [ppm]	Rzeczywista ilość Ti [ppm]	Zgar Ti [%]	Założona ilość B [ppm]	Rzeczywista ilość B [ppm]	Zgar B [%]	SKR [%]
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,78
01	-	-	-	-	200	136	32	40	23	57,5	23,12
02	-	-	-	-	50	35	30	10	5	50	2,40
1	1	8	45	30	200	132	34	40	11	72,5	26,30
5	1	8	45	30	50	42	16	10	5	50	7,38
7	1	2	30	30	200	146	27	40	23	42,5	20,12
9	0,4	8	45	30	200	144	28	40	19	52,5	28,34
19	0,4	2	30	10	50	71	-	10	3	70	4,32
20	0,4	2	30	30	50	55	-	10	3	70	4,13
22	0,4	2	30	10	200	141	29,5	40	24	40	11,42
24	0,4	8	45	10	50	31	38	10	5	50	3,56
26	1	2	30	10	50	26	48	10	2	80	4,15



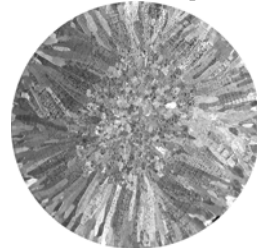
Rys. 4. Makrostruktura próbki 0  
 $f=0\text{Hz}$ ,  $I=0\text{A}$ ,  $t=0\text{s}$ ,  $M=0\text{ppm}(\text{Ti+B})$   
 Fig. 4. Macrostructure of sample number 0



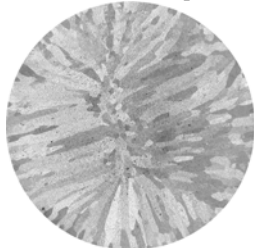
Rys. 5. Makrostruktura próbki 01  
 $f=0\text{Hz}$ ,  $I=0\text{A}$ ,  $t=0\text{s}$ ,  $M=200+40\text{ppm}(\text{Ti+B})$   
 Fig. 5. Macrostructure of sample number 01



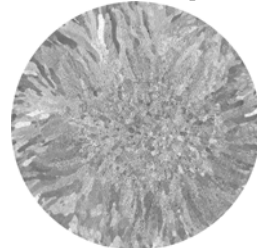
Rys. 6. Makrostruktura próbki 02  
 $f=0\text{Hz}$ ,  $I=0\text{A}$ ,  $t=0\text{s}$ ,  $M=50+10\text{ppm}(\text{Ti+B})$   
 Fig. 6. Macrostructure of sample number 02



Rys. 7. Makrostruktura próbki 1  
 $f=1\text{Hz}$ ,  $I=8\text{A}$ ,  $t=30\text{s}$ ,  $M=200+40\text{ppm}(\text{Ti+B})$   
 Fig. 7. Macrostructure of sample number 1



Rys. 8. Makrostruktura próbki 5  
 $f=1\text{Hz}$ ,  $I=8\text{A}$ ,  $t=30\text{s}$ ,  $M=50+10\text{ppm}(\text{Ti+B})$   
 Fig. 8. Macrostructure of sample number 5



Rys. 9. Makrostruktura próbki 9  
 $f=0,4\text{Hz}$ ,  $I=2\text{A}$ ,  $t=10\text{s}$ ,  $M=50+10\text{ppm}(\text{Ti+B})$   
 Fig. 9. Macrostructure of sample number 9

Natomiast wzrost natężenia prądu zasilającego induktor, równoznaczny ze wzrostem indukcji pola magnetycznego powoduje zwiększenie udziału procentowego stref kryształów równoosiowych, co wyraźnie jest widoczne dla górnego zakresu parametrów (tab.1). Dotychczasowe badania wykazały, że najintensywniej ze wszystkich parametrów procesu na udział procentowy strefy kryształów równoosiowych wpływa ilość modyfikatora Ti+B. W obu analizowanych przypadkach wprowadzenie 200ppmTi+40ppmB zapewnia wyraźnie większe rozdrobnienie niż w przypadku wprowadzenia czterokrotnie mniejszej ilości tego samego modyfikatora (tab.1). Stwierdzono, że czas oddziaływania pola jest parametrem, który praktycznie nie wpływa istotnie na wielkość rozdrobnienia struktury badanych odlewów.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników badań i obliczeń stwierdzono, że:

1. Stosowanie impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego w połączeniu z oddziaływaniem modyfikatora (Ti+B) zapewnia zwiększenie strefy kryształów równoosiowych w odlewach.
2. Stopień rozdrobnienia struktury najsilniej zależy od ilości dodatku modyfikatora wprowadzonego do aluminium.
3. Wzrost częstotliwości pulsacji oraz zmniejszenie natężenia prądu zasilającego induktor obniża efektywność oddziaływania impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego na rozdrobnienie struktury.
4. Parametrem mającym najmniejszy wpływ na rozdrobnienie struktury jest czas oddziaływania pola magnetycznego.

#### LITERATURA

- [1] J.Szajnar, J.Gawroński: *Oddziaływanie pola magnetycznego na transformację struktury kolumnowej odlewów*. Przegląd Odlewnictwa, Nr 4, 2005.
- [2] J.Szajnar: *Określenie wpływu wirującego rewersyjnego pola magnetycznego na proces krzepnięcia odlewu*. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1986.
- [3] J.Szajnar, J.Gawroński: *Sposób wykonywania odlewów, zwłaszcza z aluminium i jego stopów*. Patent PL nr 134 861 z dnia 5.03.1987.
- [4] J.Szajnar: *Transformacja struktury kolumnowej w równoosiową przy krzepnięciu odlewów z wymuszona konwekcją wirującym polem magnetycznym*. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika z. 138, Gliwice 2001.
- [5] P.Ponikwia: *Odlewanie stopów aluminium w impulsowym polu magnetycznym*. Praca dyplomowa inżynierska, Zakład Odlewnictwa Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
- [6] P.Kasperczyk: *Projekt i wykonanie induktora do wytwarzania pulsacyjno-rewersyjnego pola magnetycznego*. Praca dyplomowa, Politechnika Śl., Gliwice 2003.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2007  
jako projekt badawczy 3 T08B 024 30.

#### INFLUENCE OF IMPULSE MAGNETIC FIELD REACTION AND INOCULATION WITH Ti + B ADDITION ON ALUMINIUM STRUCTURE

##### SUMMARY

The work presents results of investigations on common influences of addition inoculant titanium and boron and impulse magnetic field on size reduction of pure aluminium structure. The results of investigations show relationship between area of equiaxial zone and pouring parameters: pulse frequency of magnetic field, power of magnetic field represent indirectly by the current intensity which supplies inductor and quantity of inoculant sort AlTi5B.

Recenzował: Prof. Mirosław Cholewa