

**MODYFIKACJA STRUKTURY CZYSTEGO ALUMINIUM
CZYNNIKAMI WEWNĘTRZNYMI I ZEWNĘTRZNYMI**J. SZAJNAR¹, T. WRÓBEL²Zakład Odlewnictwa, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych,
Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących wspomagania procesu modyfikacji tytanem i borem poprzez oddziaływanie pola magnetycznego na proces krzepnięcia czystego aluminium. Uzyskane wyniki pokazują ścisłą relację między wielkością strefy kryształów równoosiowych będącą miarą rozdrobnienia struktury a parametrami odlewania tj. częstotliwością pulsacji pola, indukcją magnetyczną zależną od wartości natężenia prądu zasilającego induktor oraz ilości modyfikatora typu AlTi5B1.

Key words: aluminium, inoculation, magnetic field, titanium, boron

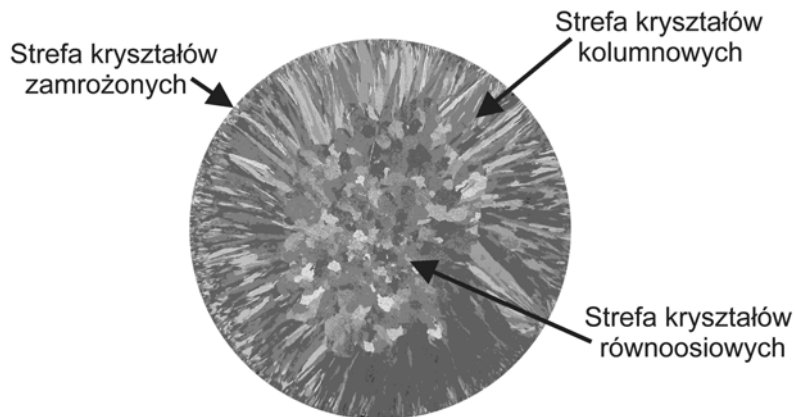
1. WPROWADZENIE

Jakość odlewów przeznaczonych do obróbki plastycznej ocenia się poprzez stopień rozdrobnienia i ujednorodnienia struktury, którego miarą jest udział procentowy strefy kryształów równoosiowych zwiększany kosztem redukcji strefy kryształów kolumnowych (rys.1). Problem ten dotyczy istotnie produkcji odlewów z czystych metali np. Al lub Cu, gdzie w tradycyjnych warunkach krzepnięcia tj. w krystalizatorze przy odlewaniu ciągłym, tworzy się struktura prawie wyłącznie złożona z kryształów kolumnowych. Rozdrobnienie struktury można uzyskać na drodze modyfikacji czynnikiem wewnętrznym polegającym na wprowadzeniu do kąpieli metalowej pierwiastków modyfikujących (w przypadku aluminium jest to najczęściej dodatek tytanu wprowadzany łącznie z borem). Jednak w przypadku odlewów z czystych metali

¹ dr hab. inż. prof. nzw. w Pol. Śl., jan.szajnar@polsl.pl

² mgr inż., tomasz.wrobel@polsl.pl

ten sposób ograniczony jest koniecznością wprowadzania modyfikatora w ilości nie przekraczającej dopuszczalnej przez normę zawartości zanieczyszczeń [1÷4].



Rys. 1. Makrostruktura przekroju poprzecznego wlewka.
Fig. 1. Macrostructure of ingot cross-section.

W związku z tym wpływ niewielkiej ilości pierwiastków modyfikujących, gwarantującej utrzymanie odpowiedniej czystości metalu, może zostać wzmocniony przez drugi sposób rozdrobnienia struktury tj. wykorzystanie czynnika zewnętrznego jakim jest oddziaływanie pola magnetycznego na proces krystalizacji odlewu. Wyżej wymienione oddziaływanie zależy od wartości indukcji pola magnetycznego B , czyli od prędkości ruchu ciekłego metalu w formie V_{cm} , gdyż z pewnym przybliżeniem można zapisać, że [4]:

$$V_{cm} \approx B / \rho \quad (1)$$

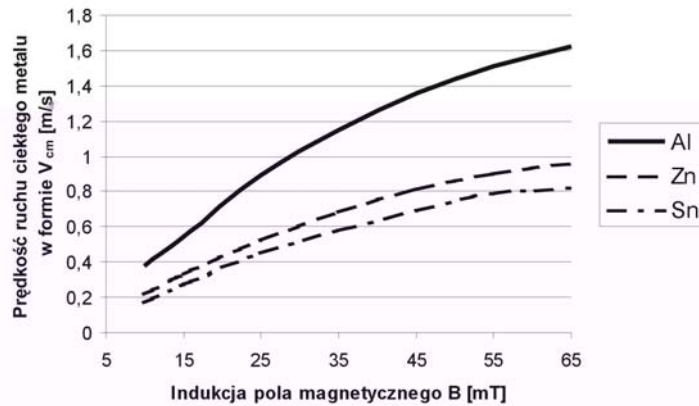
gdzie:

ρ – gęstość metalu.

Zależność prędkości ruchu ciekłego metalu w formie od wartości indukcji magnetycznej przedstawiono na rys.2.

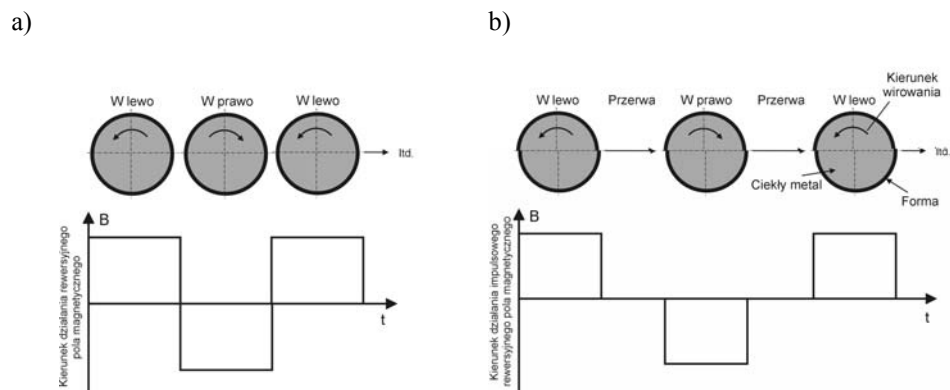
Wymuszony ruch ciekłego metalu oddziałuje na zmianę struktury odlewu w dwojaki sposób:

- 1) Wywołując zmianę warunków termicznych i stężeniowych na froncie krystalizacji zmniejsza lub całkowicie zatrzymuje prędkość wzrostu kryształów kolumnowych [4],
- 2) tworzy przyczyny powstawania dodatkowych zarodków krystalizacji poprzez dyspersję kryształów pływających w cieczy, erozję frontu krystalizacji, przenoszenie kryształów ze swobodnej powierzchni w głąb ciekłego metalu itp. [4, 5].



Rys.2. Zależność maksymalnej prędkości obwodowej V_{cm} ciekłego metalu w formie cylindrycznej o średnicy 45mm od indukcji B pola magnetycznego [4].
 Fig.2. Dependence of maximum peripheral velocity of liquid metal – V_{cm} in a cylindrical mould of inside diameter 45mm on magnetic field induction – B [4].

W badaniach użyto zmodyfikowany sposób odlewania w rewersyjnym polu magnetycznym polegający na zastosowaniu przerwy w wytwarzaniu pola magnetycznego pomiędzy zmianą kierunku jego wirowania (rys.3) i pozwalającego w związku z tym na generowanie w ciekłym metalu większych sił elektrodynamicznych [6, 7].



Rys.3. Schemat działania rewersyjnego (a) i impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego (b).
 Fig.3. Scheme of reverse (a) and impulse reverse magnetic field (b) influence on liquid metal.

Badania wstępne wykazały, że współdziałanie obu mechanizmów tworzenia dodatkowych zarodków krystalizacji tj. poprzez oddziaływanie pola magnetycznego i poprzez wprowadzenie niewielkiej, mniejszej niż zalecanej w tradycyjnym procesie

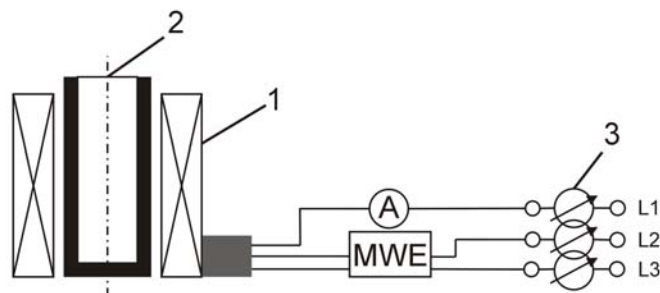
modyfikacji ilości modyfikatora powinno być przyczyną rozdrobnienia struktury krystalicznej metali o dużej czystości. Nie jest to możliwe przy zastosowaniu jednej z tych metod, muszą być stosowane obie razem [4, 7 i 8].

2. CEL I PRZEBIEG BADAŃ

Celem badań było określenie skuteczności wspólnego oddziaływania impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego oraz niewielkiej, dopuszczalnej przez normę PN-EN 573-3 ilości modyfikatora typu AlTi5B1 na stopień rozdrobnienia struktury odlewów z czystego aluminium.

W eksperymencie zostało wykorzystane stanowisko badawcze (rys.4) w którego skład wchodziły:

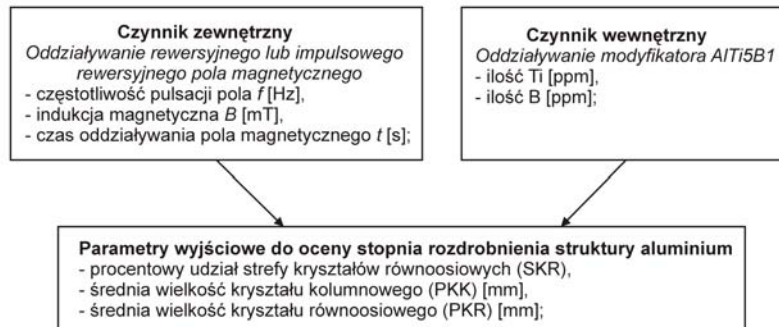
- induktor wytwarzający pole magnetyczne (1) – pełni on funkcje wzbudnika,
- forma z ciekłym metalem (2),
- autotransformator (3) – reguluje napięcie trójfazowe zasilające wzbudnik; dokonuje zmiany wartości indukcji,
- amperomierz (A) – zastosowany do pomiaru prądu zasilającego induktor,
- multiwibrator (MWE) – zmienia za pomocą przekaźników kierunek wirowania pola magnetycznego powodując jego rewersję.



Rys.4. Schemat stanowiska badawczego: 1- induktor wytwarzający pole magnetyczne, 2- forma, 3- transformator, A- amperomierz, MWE- multiwibrator.

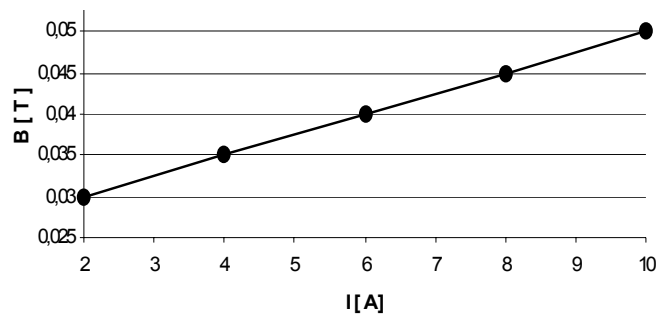
Fig.4. Test stand scheme: 1- magnetic field coil, 2- mould, 3- three-phase transformer, A- ammeter, MWE- multivibrator.

W celu określenia wpływu zmiennej ilości modyfikatora typu AlTi5B1 oraz podstawowych parametrów odlewania w impulsowym rewersyjnym polu magnetycznym na parametry rozdrobnienia struktury (rys.5), wykonano wlewki walcowe z aluminium EN AW-Al 99,98 o średnicy 45 mm i wysokości 180 mm w kokili grafitowej o grubości ścianki 7 mm. Metal topiony był w piecu indukcyjnym tyglowym i następnie po zmierzeniu temperatury termoparą NiCr-NiAl wlewany do



Rys.5. Schemat prowadzonych badań.
Fig.5. Scheme of investigations.

formy (temperatura zalewania 740°C). Zalewanie formy odbywało się przy działającym impulsowym rewersyjnym polu magnetycznym o częstotliwości pulsacji 0.5, 1 i 1.5 Hz, natężeniu prądu zasilającego induktor 2, 8 i 10A 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, zależnej od wartości natężenia prądu zasilającego induktor określano przed zalaniem formy na jej wewnętrznej ściance za pomocą teslomierza TH26 (rys.6).



Rys.6. Zależność indukcji magnetycznej – B od wartości natężenia prądu zasilającego induktor – I.
Fig.6. Magnetic induction – B in function of current intensity – I.

Odlewy wyjęte z kokili przecinano w odległości 55 mm od dna wlewka i następnie szlifowano oraz trawiono w celu ujawnienia struktury w odczynniku o następującym składzie: 50g Cu, 400ml HCl, 300ml HNO₃ i 300 ml H₂O. Ujawnioną strukturę odlewów fotografowano. Następnie korzystając z programu Multi Scan Base (program do przetwarzania i analizy obrazów) określono średnią wielkość kryształu

kolumnowego PKK [mm], średnią wielkość kryształu równoosiowego PKR [mm] oraz powierzchnię strefy kryształów równoosiowych [mm²], na podstawie której wyznaczono procentowy udział tej strefy na przekroju poprzecznym odlewu – SKR [%]. Rzeczywiste stężenie pierwiastków modyfikujących Ti i B w odlewach z EN AW-Al 99,98, określono przy użyciu optycznej spektrometrii emisyjnej.

Kolejny etap badań obejmował wykonanie odlewów z aluminium EN AW-Al 99,5 pod wpływem impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego o parametrach zoptymalizowanych na podstawie wcześniejszych badań. Ponadto ograniczono ilość wprowadzanego do ciekłego metalu modyfikatora (Ti+B) do poziomu 25+5ppm. Pełny zakres badań zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Zakres badań

Table 1. Range of investigations

Nr wytopu	f [Hz]	B [mT]	t [s]	Typ pola	Ti** [ppm]	Ti*** [ppm]	Zgar Ti [%]	B** [ppm]	B*** [ppm]	Zgar B [%]	Al	
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99,98	
01	-	-	-	-	200	136	32	40	23	57,5		
02	-	-	-	-	50	35	30	10	5	50		
1	1	45	30	IRPM	200	132	34	40	11	72,5		
5	1	45	30		50	42	16	10	5	50		
7	1	30	30		200	146	27	40	23	42,5		
9	0,5	45	30		200	144	28	40	19	52,5		
19	0,5	30	10		50	71	-	10	3	70		
20	0,5	30	30		50	55	-	10	3	70		
22	0,5	30	10		200	141	29,5	40	24	40		
24	0,5	45	10		50	31	38	10	5	50		
26	1	30	10		50	26	48	10	2	80		
03	0,5	45	30		-	-	-	-	-	-		-
1A	1,5	45	30		200	130	35	40	25	62,5		
9A	0,5	50	30		200	136	32	40	17	42,5		
24A	0,5	50	30		50	35	30	10	5	50		
00	-	-	30		-	-	-	-	-	-		-
05	0,5	50	30	IRPM	-	-	-	-	-	-		
3P	-	-	-	-	25	-	-	5	-	-		
4P	0,5	50	30	IRPM	25	-	-	5	-	-		
5P	0,5	50	30	RPM	-	-	-	-	-	-		
6P	0,5	50	30	RPM	25	-	-	5	-	-		

* IRPM – impulsowo rewersyjne pole magnetyczne, RPM – rewersyjne pole magnetyczne
 ** – założona ilość
 *** – rzeczywista ilość

3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Wyniki badań obejmujące pomiary procentowego udziału strefy kryształów równoosiowych SKR oraz średniej wielkości kryształu kolumnowego PKK i równoosiowego PKR (rys.7) przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Wyniki badań geometrii kryształów kolumnowych i równoosiowych
 Table 2. Results of columnar and equiaxed crystals geometry measurements

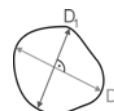
Nr wytopu	PKK*		PKR**		SKR [%]
	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	
0	19.11	1.12	2.02	2.10	1.78
01	17.32	1.08	1.23	1.49	23.12
02	20.96	1.42	1.45	1.98	2.40
1	11.03	0.93	0.89	0.96	26.30
5	18.02	1.11	1.67	1.34	7.38
7	8.98	0.77	1.78	1.29	20.12
9	9.56	0.89	1.32	1.53	28.34
19	16.78	1.09	2.03	1.87	4.32
20	15.71	1.24	2.11	2.01	4.13
22	10.88	1.09	1.23	1.69	11.42
24	19.56	1.04	1.50	1.74	3.56
26	14.68	1.12	2.34	2.07	4.15
03	20.04	1.23	2.16	2.34	7.19
1A	11.97	1.10	1.45	1.66	20.0
9A	9.12	0.96	0.88	1.09	38.63
24A	12.88	1.13	1.89	1.67	9.07
00	10.07	0.77	3.01	2.78	24.34
05	8.92	0.81	0.42	0.51	32.05
3P	3.62	0.38	1.21	1.17	51.44
4P	8.37	0.86	0.37	0.31	45.74
5P	9.77	0.92	0.51	0.42	28.06
6P	8.52	0.86	0.39	0.40	37.12

* - wymiary charakterystyczne kryształu kolumnowego (rys. 7a)
 ** - wymiary charakterystyczne kryształu równoosiowego (rys. 7b)

a)



b)

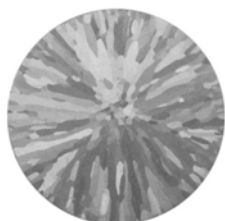


Rys.7. Wymiary charakterystyczne kryształów kolumnowych (a) i równoosiowych (b).
 Fig.7. Typical dimension of columnar crystals (a) and equiaxed crystals (b).

3.1. Badania metalograficzne makroskopowe

Wybrane wyniki badań metalograficznych przedstawiono na rys. 8÷19. Wspólne oddziaływanie impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego oraz modyfikatora (Ti+B), pozwoliło na zwiększenie rozdrobnienia struktury odlewów (tab. 2, rys.11) w porównaniu do próbki wzorcowej (rys.8) oraz próbek wykonywanych z udziałem tylko jednego z czynników modyfikujących strukturę aluminium EN AW-Al 99,98 (rys.9 i 10). Natomiast, dla odlewów z aluminium EN AW-Al 99,5 wspólne oddziaływanie impulsowego

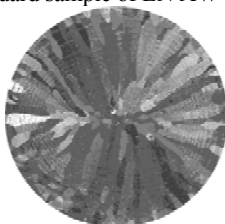
rewersyjnego pola magnetycznego i modyfikacji (Ti+B) (tab. 2, rys.16) zapewnia uzyskanie większej strefy kryształów równoosiowych SKR w porównaniu do próbki wzorcowej (rys. 12) i porównywalnej z uzyskaną w próbce poddanej tylko modyfikacji czynnikiem wewnętrznym ale o znacznie mniejszej wielkości makroziarna (rys.13). Ponadto stosowanie impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego (rys.14) pozwala na uzyskanie większego stopnia rozdrobnienia struktury aluminium w stosunku do odlewów wykonanych pod wpływem rewersyjnego pola magnetycznego (rys.15).



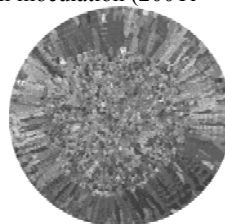
Rys. 8. Makrostruktura próbki 0.
Próbka wzorcowca EN AW-A1 99,98.
Fig. 8. Macrostructure of sample number 0.
Standard sample of EN AW-A1 99,98.



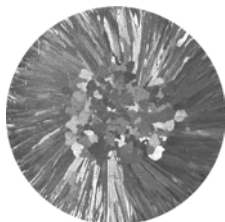
Rys. 9. Makrostruktura próbki 01.
Próbka modyfikowana (200Ti + 40B)[ppm].
Fig. 9. Macrostructure of sample number 01.
Casting with inoculation (200Ti + 40B)[ppm].



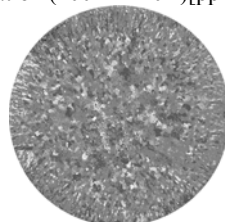
Rys. 10. Makrostruktura próbki 03.
Wykonywanej pod wpływem IRPM
 $f = 0,5[\text{Hz}]$, $B = 50[\text{mT}]$, $t = 30[\text{s}]$.
Fig. 10. Macrostructure of sample number 03.
Casting with influence of IRPM.



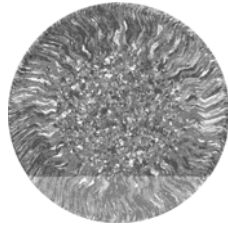
Rys. 11. Makrostruktura próbki 9A.
Wykonywanej pod wpływem IRPM
 $f = 0,5[\text{Hz}]$, $B = 50[\text{mT}]$, $t = 30[\text{s}]$
i modyfikowanej (200Ti + 40B)[ppm].
Fig. 11. Macrostructure of sample number 9A
Casting with influence of IRPM and with
inoculation (200Ti + 40B)[ppm].



Rys. 12. Makrostruktura próbki 00.
Próbka wzorcowca EN AW-A1 99,5.
Fig. 12. Macrostructure of sample number 00.
Standard sample of EN AW-A1 99,5.

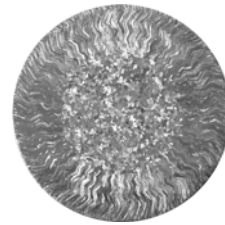


Rys. 13. Makrostruktura próbki 3P.
Próbka modyfikowana (25Ti + 5B)[ppm].
Fig. 13. Macrostructure of sample number 3P.
Casting with inoculation (25Ti + 5B)[ppm].



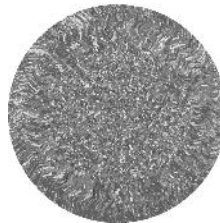
Rys. 14. Makrostruktura próbki 05.
Wykonywanej pod wpływem IRPM
 $f = 0,5[\text{Hz}]$, $B = 50[\text{mT}]$, $t = 30[\text{s}]$.

Fig. 14. Macrostructure of sample number 05.
Casting with influence of IRPM.



Rys. 15. Makrostruktura próbki 5P.
Wykonywanej pod wpływem RPM
 $f = 0,5[\text{Hz}]$, $B = 50[\text{mT}]$, $t = 30[\text{s}]$.

Fig. 15. Macrostructure of sample number 5P.
Casting with influence of RPM.



Rys. 16. Makrostruktura próbki 4P. Wykonywanej pod wpływem IRPM
 $f = 0,5[\text{Hz}]$, $B = 50[\text{mT}]$, $t = 30[\text{s}]$ i modyfikowanej (25 Ti + 5 B) [ppm].

Fig. 16. Macrostructure of sample number 4P. Casting with influence of
IRPM and with inoculation (25Ti + 5B)[ppm].

3.2. Analiza statystyczna wyników badań

W celu określenia zależności pomiędzy parametrami struktury odlewów a zmiennymi czynnikami odlewania, poszukiwano zależności statystycznych metodą regresji krokowej. Poszukiwano zależności opisanej ogólnym równaniem:

$$\text{SKR} = f(f, B, M) \quad (2)$$

gdzie:

SKR – procentowy udział strefy kryształów równoosiowych na przekroju poprzecznym odlewów [%],

f – częstotliwość pulsacji pola magnetycznego [Hz],

B – indukcja pola magnetycznego [mT],

M – ilość modyfikatora Ti+B [ppm].

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano zależność:

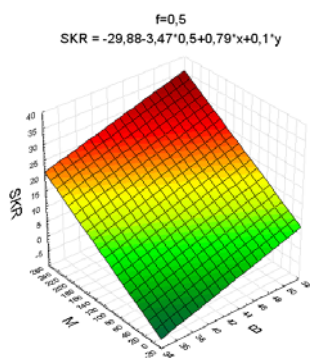
$$\text{SKR} = -3,47 \cdot f + 0,79 \cdot B + 0,1 \cdot M - 29,88 \quad (3)$$

o następujących parametrach statystycznych:

- współczynnik korelacji wielowymiarowej: $R = 0,915$,

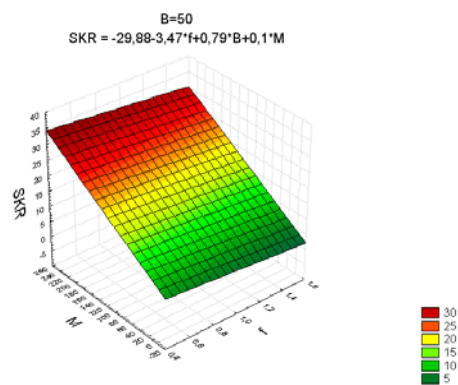
- $R^2 = 0,838$,
- test Fishera: $F = 13,83$,
- wartość średnia SKR: $x = 15,04$,
- odchylenie standardowe: $s = 11,46$,
- błąd standardowy estymacji: $B = 5,4$.

Graficzną interpretację zależności (3) dla wybranych wartości zmiennych przedstawiono na rys.19, 20 i 21.



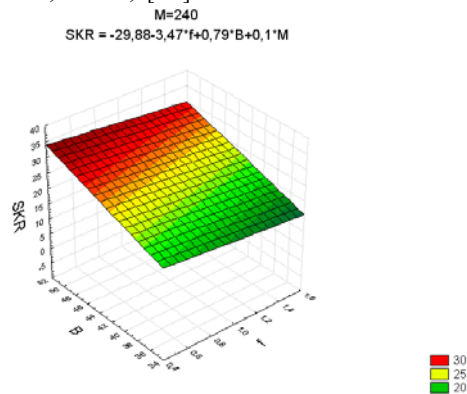
Rys. 19. Strefa kryształów równoosiowych – SKR w funkcji indukcji magnetycznej – B i ilości modyfikatora – M, dla $f=0,5$ [Hz].

Fig. 19. Equiaxial crystal zone content – SKR in magnetic induction – B and quantity of inoculant – M function, for $f=0,5$ [Hz].



Rys. 20. Strefa kryształów równoosiowych – SKR w funkcji częstotliwości pulsacji – f i ilości modyfikatora – M, dla $B=50$ [mT].

Fig. 20. Equiaxial crystal zone content – SKR in pulse frequency – f and quantity of inoculant – M function, for $B=50$ [mT].



Rys. 21. Strefa kryształów równoosiowych – SKR w funkcji częstotliwości pulsacji – f i indukcji magnetycznej – B dla $M=(200Ti+40B)$ [ppm].

Fig. 21. Equiaxial crystal zone content – SKR in pulse frequency – f and magnetic induction – B function.

Zmniejszenie częstotliwość pulsacji pola magnetycznego oraz wzrost indukcji magnetycznej powodują zwiększenie strefy kryształów równoosiowych. 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. Ponadto na stopień rozdrobnienia struktury istotnie wpływa ilość wprowadzanego do ciekłego aluminium modyfikatora (Ti+B). Natomiast, czas oddziaływania pola jest czynnikiem, który praktycznie nie wpływa istotnie na wielkość rozdrobnienia struktury badanych odlewów (tab.2) i ostatecznie nie został zakwalifikowany do zmiennych parametrów odlewania występujących w ustalonej zależności (3).

4. WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników badań i obliczeń stwierdzono, że:

1. Oddziaływanie impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego na proces krzepnięcia odlewów z czystego aluminium wspomaga rozdrobnienie ich struktury wywołane w głównej mierze działaniem modyfikatora typu AlTi5B1, wprowadzanego w niewielkiej ilości, takiej aby wymagania normy PN-EN 573-3 dotyczące czystości aluminium były spełnione.
2. Zmniejszenie częstotliwości pulsacji pola magnetycznego oraz wzrost wartości indukcji magnetycznej zwiększa skuteczność oddziaływania impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego na stopień rozdrobnienia struktury czystego aluminium.
3. Wykonywanie odlewów pod wpływem impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego zapewnia uzyskanie większej strefy kryształów równoosiowych w porównaniu do odlewów wykonywanych pod wpływem rewersyjnego pola magnetycznego.
4. Oddziaływanie tylko samego pola magnetycznego (IRPM) wywołuje mniejszy przyrost szerokości strefy kryształów równoosiowych niż oddziaływanie tylko samego dodatku modyfikatora.

LITERATURA

- [1] J. Szajnar: *Określenie wpływu wirującego rewersyjnego pola magnetycznego na proces krzepnięcia odlewu*. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1986.
- [2] J. Szajnar, J. Gawroński: *The influence of stirring liquid metal in mould by means of magnetic field on the structure and the characteristic of castings*. Conf. Proceedings 2nd Inter. Scien. Confer. AMME, Silesian University of Technology Gliwice, Institute of Engineering Materials and Biomaterials, Gliwice, 1993, p.209.
- [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] J. Szajnar: *The columnar crystals shape and castings structure cast in magnetic field*. Journal of Materials Processing Technology, 157-158, 2004, p.761.
- [6] J. Szajnar, M. Stawarz, T. Wróbel: *Inoculation of pure aluminium structure with Ti+B addition in impulse magnetic field*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 14, 2006, p.64.
- [7] J. Szajnar, M. Stawarz, T. Wróbel: *Wpływ oddziaływania impulsowego rewersyjnego pola magnetycznego oraz modyfikacji Ti+B na strukturę aluminium*. Archiwum Odlewnictwa, Nr 18 (1/2), vol. 6, 2006.
- [8] J. Szajnar, T. Wróbel: *Influence of magnetic field and inoculation on colimnar structure transformation*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 17, 2006, p.209.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006 ÷ 2008 jako projekt badawczy 3 T08B 024 30.

MODIFICATION OF PURE ALUMINIUM STRUCTURE BY INTERNAL AND EXTERNAL FACTORS

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 AlTi5B1.

Recenzował Prof. Józef Gawroński