

Modyfikacja stopów Al-Si przy użyciu metody mieszania elektromagnetycznego

Inoculation of Al-Si alloys using the electromagnetic stirring method

Jan Szajnar¹, Tomasz Wróbel¹, Dariusz Bartocha¹, Marcin Stawarz¹

¹ Politechnika Śląska, Katedra Odlewnictwa, ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice

¹Silesian University of Technology, Foundry Department, ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice, Poland

E-mail: tomasz.wrobel@polsl.pl

Received: 10.03.2016. Accepted in revised form: 30.06.2016.

© 2016 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/ioid.2016.06

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki dotyczące modyfikacji metodą mieszania elektromagnetycznego wybranych podutektycznych stopów aluminium z krzemem gatunku AlSi2 i AlSi7. Celem realizacji procesu modyfikacji zastosowano mieszadło zasilane prądem o podwyższonej częstotliwości, wytwarzające wirujące pole elektromagnetyczne. Skuteczność modyfikacji oceniono na podstawie wyników badań metalograficznych makro- i mikroskopowych. Ponadto przedstawiono możliwość aplikacji uzyskanych wyników badań w procesie poziomego odlewania ciągłego stopów Al-Si.

Słowa kluczowe: aluminium, krzem, wlewek, odlewanie ciągłe, pole elektromagnetyczne

Abstract

In this research paper results concerning the inoculation method based on electromagnetic stirring of hypoeutectic aluminum with silicon alloys AlSi2 and AlSi7 grade are presented. The inoculation process used a stirrer supplied by current with a high frequency, generating a rotating electromagnetic field. The efficiency of inoculation was estimated in the results of the metallographic macro- and microscopic research. Moreover, the possibility of using the obtained results in horizontal continuous casting process of Al-Si alloys was presented.

Keywords: aluminum, silicon, ingot, continuous casting, electromagnetic field

1. Wprowadzenie

Analizując dane dotyczące struktury wlewka, można stwierdzić, że z uwagi na niewielką szerokość strefy kryształów zamrożonych właściwości użytkowe odlewu zależą przede wszystkim od szerokości i długości kryształów kolumnowych, wymiaru kryształów równoosiowych i wielkości obszaru, który zajmują na powierzchni przekroju wlewka, a także od odległości międzydendrytycznych oraz międzyfazowych w ziarnach np. eutektyki lub monotektyki. Dla przykładu można odnieść się w tym miejscu do powszechnie znanego prawa Halla-Petcha opisującego wpływ wielkości ziarna na wartość granicy plastyczności [1]:

1. Introduction

On the basis of the analysis of data concerning the structure of the ingot, it was determined that due to the small width of chilled crystals zone, the usable properties of casting depend mainly on the width and length of the columnar crystals, the size of equiaxed crystals and content of the cross-sectional area of the ingot, as well as on interdendritic or interphase distance in grains such as eutectic or monotectic. For example, one can refer here to the well-known Hall-Petch law describing the influence of grain size on yield strength [1]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

gdzie:

σ_y – granica plastyczności, MPa,

σ_0 – w przybliżeniu granica plastyczności monokryształu, dla Al wnosząca 11,1 MPa,

k – stała materiałowa charakteryzująca opór granic ziaren dla ruchu dyslokacji w początkowym etapie odkształcenia plastycznego (wytrzymałość granic ziaren), dla Al wynosząca $0,05 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$,

d – wielkość ziarna, mm.

Ponieważ prawo Halla-Petcha dotyczy metali i stopów o strukturze roztworów stałych, dlatego w przypadku stopów krzepnących z przemianą eutektyczną np. z grupy Al-Si przy opisie wpływu rozdrobnienia struktury na wartość granicy plastyczności należy uwzględnić wartość odległości międzyfazowej w eutektyce [2]:

$$\sigma_y = \sigma_0 = k_1 d^{-\frac{1}{2}} + k_2 \lambda^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

gdzie:

k_1 i k_2 – stałe materiałowe, $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$,

λ – odległość międzyfazowa w eutektyce.

Niestety, w przypadku odlewania stopów, w stanie surowym występuje wprawdzie struktura równoosiowa, ale jednocześnie charakteryzująca się dużym rozmiarem poszczególnych ziaren [3,4]. Zgodnie z przedstawionymi danymi tego typu gruboziarnista struktura nadaje odlewom niskie właściwości mechaniczne oraz przede wszystkim utrudnia przeróbkę plastyczną wlewków ciągłych i półciągłych.

Zmianę tej niekorzystnej struktury odlewów można uzyskać przez zmniejszenie temperatury zalewania czy też zwiększenie szybkości odprowadzania ciepła z odlewu/wlewka np. poprzez zastosowanie tworzywa formy o większym współczynniku przewodzenia ciepła [3] lub częściej realizując zabieg tradycyjnej modyfikacji, polegającej na wprowadzeniu do ciekłego metalu dodatków modyfikujących [3–8] lub/i oddziaływania czynników zewnętrznych np. drgań infra- i ultradźwiękowych [3,9,10] lub pola elektromagnetycznego [3,4 i 11–14].

W związku z tym w pracy przedstawiono możliwość prowadzenia modyfikacji wybranych podeutektycznych stopów aluminium z krzemem poprzez zastosowanie metody mieszania elektromagnetycznego. Metoda ta, wykorzystując wymuszoną oddziaływaniem pola elektromagnetycznego konwekcję ciekłego metalu krzepnącego w formie lub w krystalizatorze, prowadzi do rozdrobnienia struktury odlewu/wlewka przede wszystkim poprzez ter-

where:

σ_y – yield strength, MPa,

σ_0 – approximate yield strength of the monocrystal, for Al amount to 11.1 MPa,

k – material constant characterizing the resistance of grain boundaries for the movement of dislocations in the initial stage of plastic deformation (strength of grain boundaries), for Al amount to $0.05 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$,

d – grain size, mm.

Because the Hall-Petch law concerns only metals and alloys with the structure of solid solutions, therefore the solidification of alloys with an eutectic transformation, for example the Al-Si group, in describing the influence of refinement of structure on the value of yield strength should take into account the value of the interphase distance in eutectic [2]:

where:

k_1 and k_2 – material constants, $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$,

λ – interphase distance in eutectic, mm.

Unfortunately, in the case of casting alloys in the initial state there is present an equiaxed structure which also contains coarse grains [3,4]. According to presented data, this type of structure gives low mechanical properties of castings and is mainly unfavourable for the plastic forming of continuous and semi-continuous ingots.

This structure can be eliminated by reducing the pouring temperature, controlling the heat removal rate from the casting [3], realizing inoculation, which consists in the introduction of additives to liquid metal [3–8] and/or influence of external factors for example infra- and ultrasonic vibrations [3,9,10] or electromagnetic field [3,4 and 11–14].

Therefore, in this research paper, results concerning the inoculation method based on the electromagnetic stirring of selected hypoeutectic aluminum with silicon alloys are presented. This method of inoculation with the use of the electromagnetic field is based on forced movement of liquid metal in mould or in continuous casting mould. These results in the refinement of the structure by thermal and mechanical erosion of the crystallization front. A detailed description of the phenomenon of fragmentation of dendrites in the application of the electromagnetic stirring method is presented in the papers [11–14].

miczną i mechaniczną erozję frontu krystalizacji. Szczegółowy opis zjawiska fragmentacji dendrytów w wyniku stosowania metody mieszania elektromagnetycznego przedstawiono w pracach [11–14].

2. Zakres badań

Materiał do badań stanowiły podeutektyczne stopy Al-Si gatunku EN AC-AISi2MgTi oraz EN AC-AISi7Mg (tab. 1), które odlewano w temperaturze odpowiednio 720°C i 700°C do form grafitowych o średnicy 30 mm, wysokości 200 mm i grubości ścianki 10 mm.

2. Range of studies

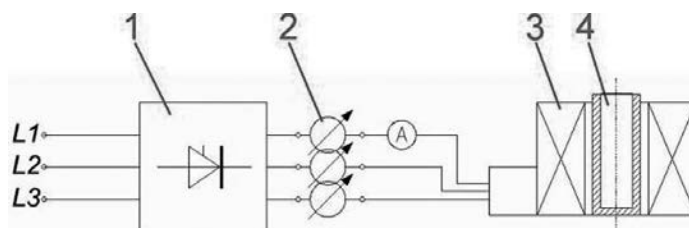
The range of studies included two hypoeutectic Al-Si alloys EN AC-AISi2MgTi and EN AC-AISi7Mg grade (Tab. 1), which was poured into graphite mould with 30 mm diameter, 200 mm length and 10 mm thick of wall. The pouring temperature was set at 720°C and 700°C.

Tabela 1. Skład chemiczny badanych stopów Al-Si
Table 1. Chemical composition of studied Al-Si alloys

Zawartość składników, % wag. / The content of components, wt. %									
Si	Mn	Fe	Mg	Ti	Cu	Zn	V	Ni	Al
EN AC-AISi2MgTi									
2,05	0,50	0,50	0,45	0,05	0,20	0,10	0,03	0,01	reszta/ rest
EN AC-AISi7Mg									
7,10	0,15	0,60	0,70	0,15	0,60	0,30	0,02	0,03	reszta/ rest

Celem realizacji modyfikacji przy użyciu metody mieszania elektromagnetycznego zastosowano induktor wytwarzający wirujące pole elektromagnetyczne. W oparciu o wyniki badań przedstawionych w pracach [4,14] zastosowano zasilanie induktora prądem o natężeniu 8 A i częstotliwości 100 Hz, co pozwala na uzyskanie w jego wnętrzu indukcji magnetycznej wynoszącej około 60 mT. Schemat stanowiska do odlewania ciekłego metalu do formy grafitowej umieszczonej w polu elektromagnetycznym przedstawiono na rysunku 1.

The modification of inoculation was applied using a stirrer generating the rotating electromagnetic field. Based on the results presented in papers [4,14] there was applied a supply current with an intensity of 8 A and a frequency of 100 Hz. These parameters make it possible to obtain a value of magnetic induction inside the inductor equal to 60 mT. The scheme of cast liquid metal to graphite mould placed in an electromagnetic field is presented on Figure 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska do odlewania w polu elektromagnetycznym: 1 – falownik, 2 – autotransformator, 3 – mieszadło elektromagnetyczne, 4 – forma grafitowa, A – amperomierz

Fig. 1. Scheme of stand to cast with influence of electromagnetic field: 1 – inverter, 2 – autotransformer, 3 – induction coil, 4 – mould containing liquid metal, A – ammeter

Wpływ modyfikacji realizowanej przez zastosowanie metody mieszania elektromagnetycznego na strukturę wlewków ze stopów Al-Si oceniano na podstawie wyników badań metalograficznych makro- i mikroskopowych. Do badań makrostruktury próbki po szlifowaniu trawiono w odczynniku o następującym składzie chemicznym:

The degree of Al-Si alloys structure refinement was estimated on the basis of results of metallographic macro- and microscopic studies. The analyzed surface of Al-Si alloys ingots to macroscopic analysis after grinding was etched using the following solutions:

50 g Cu,
300 ml HNO₃,
400 ml HCl,
300 ml H₂O.

Natomiast do badań mikrostruktury próbki po szlifowaniu i polerowaniu trawiono w odczynniku o następującym składzie chemicznym:

0,5 cm³ HF,
99,5 cm³ H₂O

lub przy zastosowaniu procesu polerowania i trawienia elektrolitycznego z użyciem urządzenia LectroPol-5 firmy STRUERS oraz odczynnika A2 o następującym składzie chemicznym:

8 cm³ HClO₄,
10 cm³ C₄H₉OCH₂CH₂OH,
73 cm³ C₂H₅OH,
9 cm³ H₂O.

Obserwacje mikrostruktury prowadzono przy użyciu mikroskopu świetlnego NIKON.

W kolejnym etapie badań zastosowano metodę mieszania elektromagnetycznego w procesie poziomego odlewania ciągłego wlewków o średnicy 30 mm (rys. 2). W tym przypadku mieszadło elektromagnetyczne zostało umieszczone wewnątrz chłodzonego wodą krystalizatora (rys. 3). Z uwagi na problemy technologiczne (częste „zrywanie” wlewka) proces odlewania ciągłego został ograniczony do stopu AlSi2, który wyciągano z prędkością 30–100 mm/min przy kombinacji ruchu (wyciągania) wlewka w sekwencji przód-postój 1 : 2 s.

50 g Cu,
300 ml HNO₃,
400 ml HCl,
300 ml H₂O.

Whereas, macroscopic analysis samples after grinding and polishing were etched with the use of solutions:

0,5 cm³ HF,
99,5 cm³ H₂O

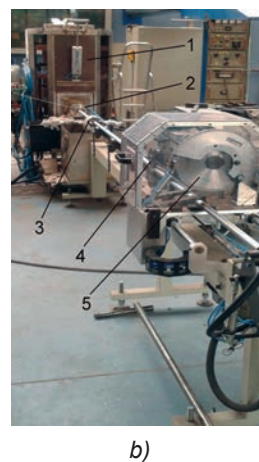
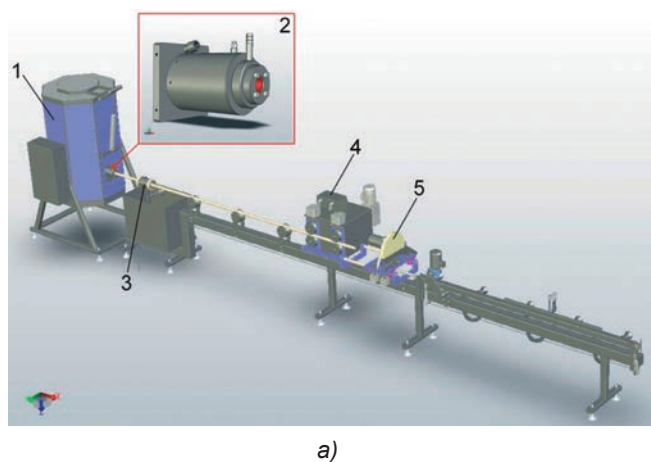
or with use of electrolytic polishing and etching process on LectroPol-5 – STRUERS device and solution A2:

8 cm³ HClO₄,
10 cm³ C₄H₉OCH₂CH₂OH,
73 cm³ C₂H₅OH,
9 cm³ H₂O.

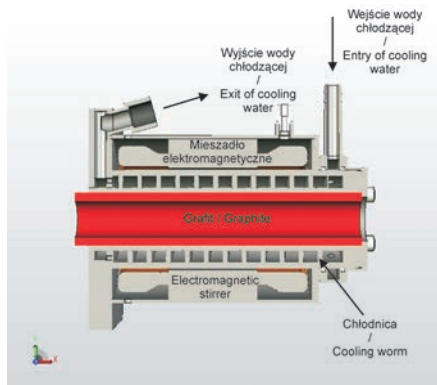
Microstructure observation was performed using a Nikon light microscope.

The next stage of the research used a method of electromagnetic stirring in the horizontal continuous casting process of 30 mm in diameter ingots (Fig. 2). In this case the electromagnetic stirrer was placed inside a water cooled continuous casting mould (Fig. 3). Due to technological problems (frequent “breaking” of the ingot) the continuous casting process was limited to the manufacture of alloy AlSi2 ingot. In this cast process was used a velocity of ingot movement 30–100 mm/min at combination of ingot motion in the sequence of forward-stops 1 : 2 s.

3. Wyniki badań



Rys. 2. a) Schemat i b) widok stanowiska do poziomego odlewania ciągłego Al i jego stopów: 1 – piec indukcyjny (kadź pośrednia), 2 – krystalizator, 3 – układ chłodzenia wtórnego, 4 – system wyciągania wlewka, 5 – system cięcia wlewka
Fig. 2. a) Scheme and b) view of stand of horizontal continuous casting: 1 – induction furnace (tundish), 2 – continuous casting mould, 3 – system of recoiling, 4 – system of ingot drawing, 5 – system of ingot cutting



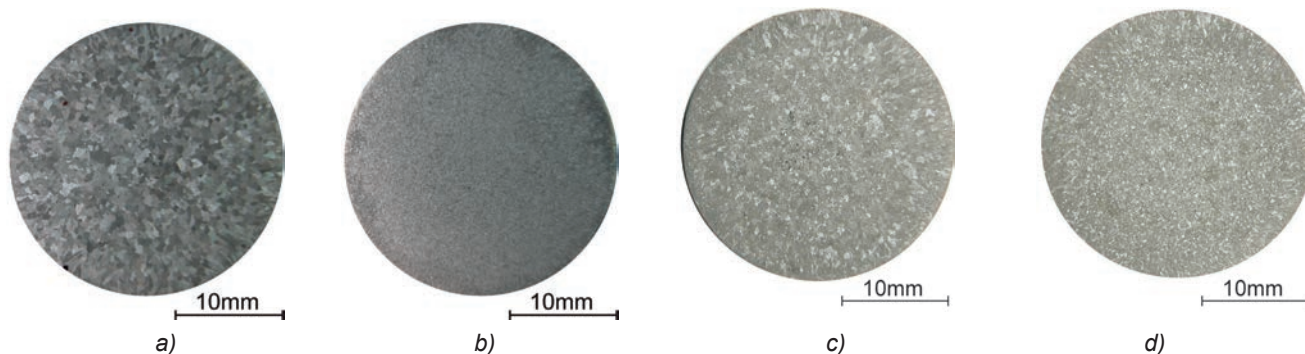
Rys. 3. Przekrój wzdłużny chłodzonego wodą i wyposażonego w mieszadło elektromagnetyczne krystalizatora do odlewania ciągłego Al i jego stopów

Fig. 3. View of water cooled continuous casting mould contains electromagnetic stirrer

Na rysunku 4 przedstawiono makrostruktury wlewków, odpowiednio ze stopu AlSi2 i AlSi7 w stanie surowym oraz po modyfikacji wirującym polem elektromagnetycznym. Stwierdzono, że zastosowanie mieszania elektromagnetycznego zapewnia widoczne rozdrobnienie struktury, tzn. uzyskano przejście od struktury równoosiowej, gruboziarnistej w stanie surowym do równoosiowej, drobnoziarnistej po modyfikacji.

3. Results of studies

In Figure 4 macrostructures of ingots suitable of AlSi2 and AlSi7 alloy in initial state and after inoculation with use of the electromagnetic stirring are presented. On the basis of obtained results it was affirmed that inoculation by the electromagnetic stirring guarantees visible refinement of structure i.e. was obtained transition from coarse equiaxed structure in initial state to fine grained equiaxed structure after inoculation.



Rys. 4. Makrostruktura badanych wlewków: a) AlSi2 w stanie surowym, b) AlSi2 po modyfikacji, c) AlSi7 w stanie surowym, d) AlSi7 po modyfikacji

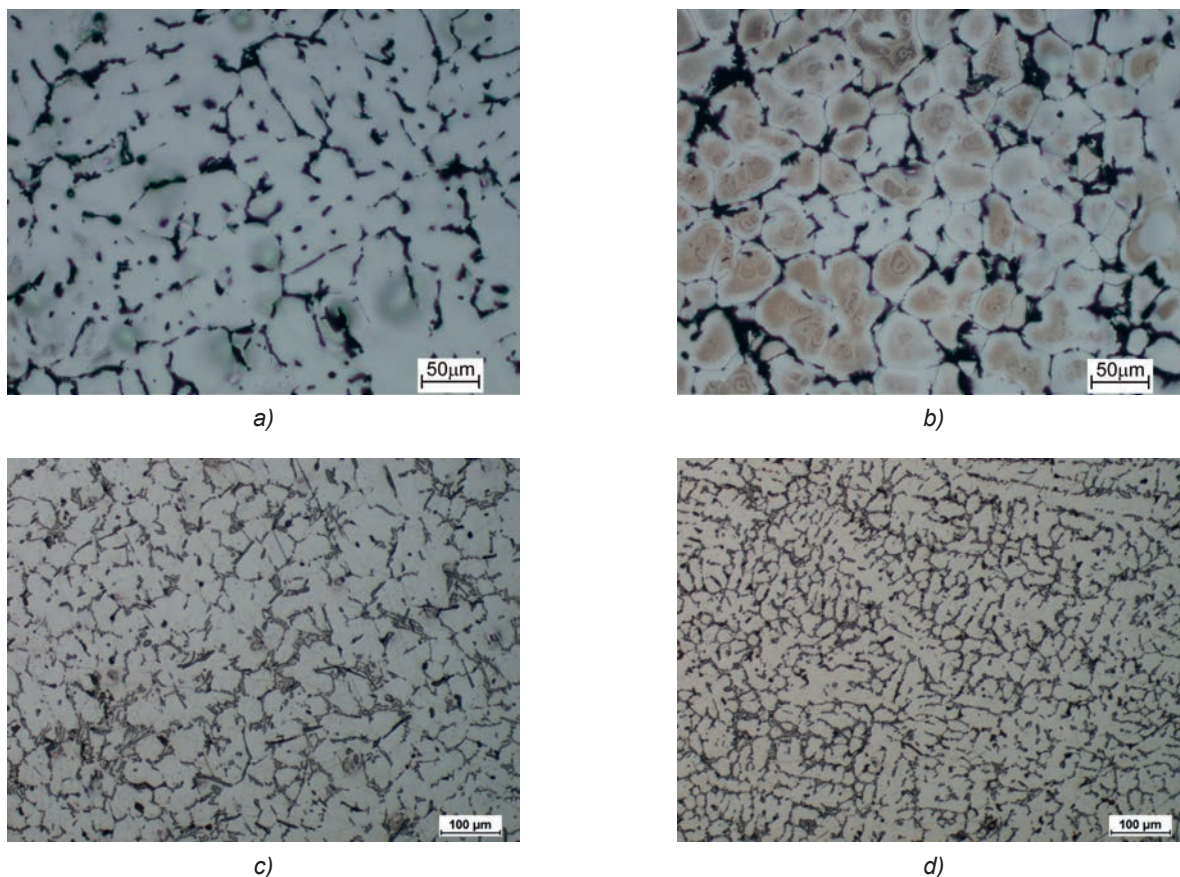
Fig. 4. Macrostructure of continuous ingots: a) AlSi2 in initial state, b) AlSi2 after inoculation, c) AlSi7 in initial state, d) AlSi7 after inoculation

Natomiast na rysunku 5 przedstawiono mikrostruktury wlewków, odpowiednio ze stopu AlSi2 i AlSi7 w stanie surowym oraz po modyfikacji wirującym polem elektromagnetycznym. Podobnie jak w przypadku analizy makrostruktury, jest widoczny przede wszystkim wpływ mieszania elektromagnetycznego na rozdrobnienie fazy $\alpha(\text{Al})$. Ponadto w przypadku stopu AlSi7 zastosowany zabieg modyfikacji korzystnie wpłynął na morfologię wydzielań eutektyki $\alpha(\text{Al}) + \beta(\text{Si})$ (rys. 6).

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe makrostruktury – w stanie surowym oraz po modyfikacji wiru-

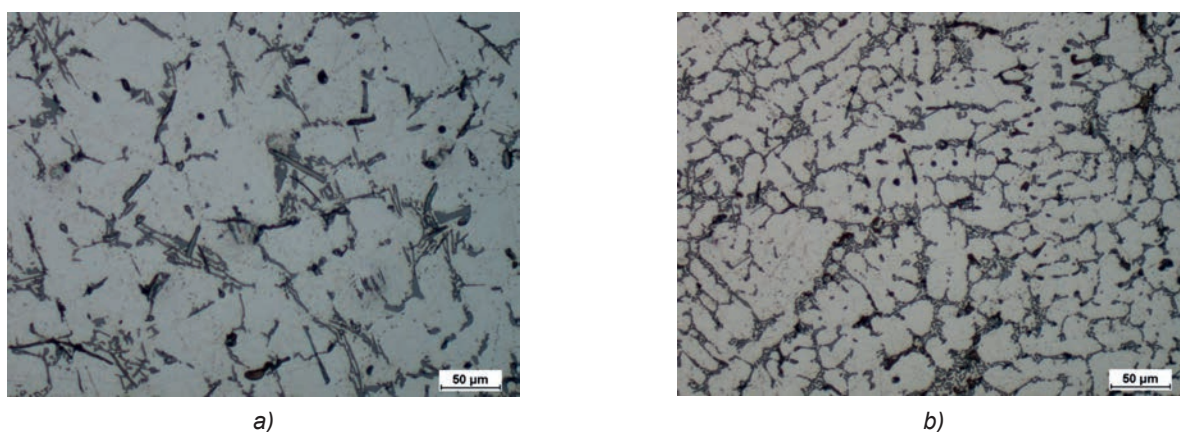
Whereas in Figure 5 microstructures of ingots suitable of AlSi2 and AlSi7 alloy in initial state and after inoculation with use of electromagnetic stirring are presented. As in the case of the analysis of the macrostructure it is primarily affected by the electromagnetic stirring refinement of phase $\alpha(\text{Al})$. Moreover, in the case of the AlSi7 alloy used, inoculation influences positively the morphology of the eutectic $\alpha(\text{Al}) + \beta(\text{Si})$ (Fig. 6).

In Figure 7 macrostructures of AlSi2 alloy continuous ingots in initial state and after inoculation by the electromagnetic stirring are presented. On the other hand, in



Rys. 5. Mikrostruktura badanych wlewków: a) AISi2 w stanie surowym, b) AISi2 po modyfikacji, c) AISi7 w stanie surowym, d) AISi7 po modyfikacji

Fig. 5. Microstructure of continuous ingots: a) AISi2 in initial state, b) AISi2 after inoculation, c) AISi7 in initial state, d) AISi7 after inoculation



Rys. 6. Mikrostruktura wlewka ze stopu AISi7: a) w stanie surowym i b) po modyfikacji metodą mieszania elektromagnetycznego – $\alpha(\text{Al})$ + eutektyka $\alpha(\text{Al}) + \beta(\text{Si})$

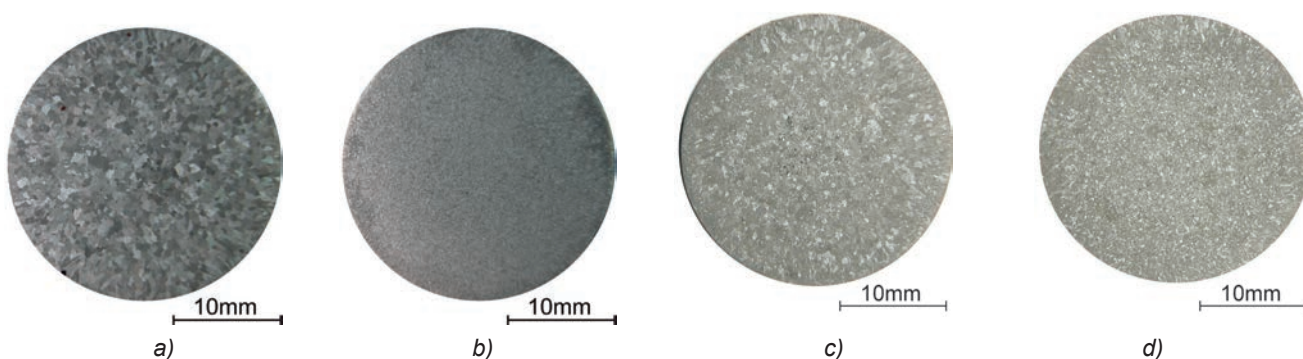
Fig. 6. Microstructure of AISi7 alloy continuous ingot: a) in initial state and b) after inoculation by electromagnetic stirring – $\alpha(\text{Al})$ + eutectic $\alpha(\text{Al}) + \beta(\text{Si})$

jącym polem elektromagnetycznym – wlewków ze stopu AISi2 odlewanych sposobem ciągłym. Z kolei w tabeli 2 i na rysunku 8 przedstawiono łączny wpływ modyfikacji oraz prędkości wyciągania wlewka ciągłego na wielkość makroziarna PKR. Stwierdzono, że zwiększenie

Table 2 and in Figure 8 common influence of inoculation and velocity of ingot movement on the average area of macro-grain PKR are presented. On the basis of obtained results it was affirmed that the velocity of ingot movement influences the structure of AISi2 alloy in the

prędkości wyciągania wpływa na strukturę stopu AlSi2 w stanie niemodyfikowanym, tzn. wraz z jej wzrostem następuje przejście od struktury równoosiowej stosunkowo drobnoziarnistej przez równoosiową gruboziarnistą do złożonej z dużych kryształów równoosiowych i kolumnowych. Ponadto prędkość wyciągania wpływa na skuteczność modyfikacji przy użyciu mieszania elektromagnetycznego wlewków ciągłych ze stopu AlSi2. Stwierdzono, że ze wzrostem średniej prędkości wyciągania maleje skuteczność modyfikacji prowadzonej tą metodą. Jednakże pomimo tego należy zauważyć, że zastosowana modyfikacja poprzez mieszanie elektromagnetyczne niweluje niekorzystny wpływ wzrostu prędkości odlewania na strukturę, a zatem i właściwości użytkowe wlewków ciągłych.

initial state i.e. with an increase in velocity of ingot movement is present in transition from relatively fine grained equiaxed structure through coarse equiaxed structure to coarse containing equiaxed and columnar macro-grains. Moreover, the velocity of the ingot movement influences the efficiency of inoculation by electromagnetic stirring. On the basis of obtained results it was affirmed that the efficiency of inoculation decreased with an increase in the velocity of ingot movement. However, it should be noted that inoculation by electromagnetic stirring eliminates the adverse effects of increased casting speed on the structure, and moreover, on the properties of the continuous ingot.

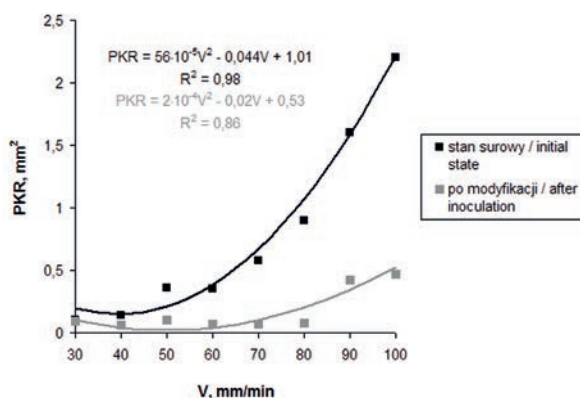


Rys. 7. Makrostruktura wlewków ciągłych ze stopu AlSi2: a) w stanie surowym przy prędkości wyciągania 30 mm/min, b) po modyfikacji przy prędkości wyciągania 30 mm/min, c) w stanie surowym przy prędkości wyciągania 100 mm/min, d) po modyfikacji przy prędkości wyciągania 100 mm/min

Fig. 7. Macrostructure of AlSi7 alloy continuous ingots: a) in initial state at velocity 30 mm/min, b) after inoculation at velocity 30 mm/min, c) in initial state at velocity 100 mm/min, d) after inoculation at velocity 100 mm/min

Tabela 2. Wyniki pomiarów średniej wielkości makroziarna PKR w strukturze wlewków ciągłych ze stopu AlSi2
Table 2. Results of average area of macro-grain PKR measurements in structure of AlSi2 alloy continuous ingots

Prędkość wyciągania wlewków V, mm/min / Velocity of ingot movement V, mm/min	Średnia wielkość makroziarna PKR, mm ² / Average area of macro-grain PKR, mm ²	
	Stan surowy / Initial state	Po modyfikacji polem elektromagnetycznym / After electromagnetic field inoculation
30	0,10	0,09
40	0,14	0,06
50	0,36	0,10
60	0,35	0,07
70	0,58	0,07
80	0,90	0,08
90	1,60	0,42
100	2,20	0,47



Rys. 8. Wpływ prędkości wyciągania (V) i modyfikacji wlewką ciągłego ze stopu AlSi2 na średnią wielkość makroziarna (PKR)

Fig. 8. Influence of velocity of ingot movement (V) and inoculation on average area of macro-grain (PKR) of AlSi2 alloy continuous ingot

4. Wnioski

Analiza uzyskanych wyników badań pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Modyfikacja stopów AlSi2 i AlSi7 metodą mieszania elektromagnetycznego rozdrabnia strukturę wlewków.
2. Zwiększenie prędkości wyciągania wlewką ze stopu AlSi2 w procesie poziomego odlewania ciągłego powoduje zwiększenie wielkości ziarna (PKR), co jest skutkiem zmniejszenia gradientu temperatury na froncie krystalizacji.
3. Metoda rozdrabniania struktury oparta na zjawisku termicznej i mechanicznej erozji frontu krystalizacji wywołanej oddziaływaniem na krzepnący metal pola elektromagnetycznego może stanowić konkurencję dla powszechnie stosowanej modyfikacji przy użyciu dodatków np. Ti, B i Sr, szczególnie z punktu widzenia kosztów procesu modyfikacji.

4. Conclusions

Based on the conducted studies the following conclusions have been formulated:

1. Inoculation realized by electromagnetic stirring guarantees improvement in structure refinement of ingots of AlSi2 and AlSi7 alloys.
2. Increasing velocity of ingot movement in horizontal continuous casting of AlSi2 alloy causes an increase in the average area of macro-grain PKR, which is due to a reduced temperature gradient at the crystallization front.
3. Method of structure refinement based on thermal and mechanical erosion of crystallization front caused by the influence of the electromagnetic field on solidifying metal, may be in competition with additives commonly used for inoculation, e.g. Ti, B, Sr, especially from the point of view of the cost of the inoculation process.

Podziękowania

Praca została przygotowana przy finansowym wsparciu Narodowego Centrum Nauki.

Acknowledgements

The financial support from the Polish National Science Centre is kindly acknowledged.

Literatura/References

1. Adamczyk J. 2004. *Inżynieria materiałów metalowych*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
2. Paul J., H. Exner, D. Müller-Schwelling. 1982. „Microstructure and mechanical properties of cast and heat-treated eutectic Al-Si alloys”. *Zeitschrift für METALLKUNDE* 43 (1) : 50–55.
3. Fraś E. 2003. *Krystalizacja metali*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.

4. Wróbel T., J. Szajnar. 2013. „Modification of pure Al and AlSi2 alloy primary structure with use of electromagnetic stirring method”. *Archives of Metallurgy and Materials* 58 (3) : 941–944.
5. Easton M., D. StJohn. 1999. „Grain refinement of aluminum alloys: Part I. The nucleant and solute paradigms – a review of the literature”. *Metallurgical and Materials Transactions A* 30 (6) : 1613–1623.
6. Easton M., D. StJohn. 1999. „Grain refinement of aluminum alloys: Part II. Confirmation of, and a mechanism for, the solute paradigm”. *Metallurgical and Materials Transactions A* 30 (6) : 1625–1633.
7. Li H., T. Sritharan, Y.M. Lam, N.Y. Leng. 1997. „Effects of processing parameters on the performance of Al grain refinement master alloy Al-Ti and Al-B in small ingots”. *Journal of Materials Processing Technology* 66 (1–3) : 253–257.
8. Pietrowski S. 2001. *Siluminy*. Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej.
9. Abramov V., O. Abramov, V. Bulgakov, F. Sommer. 1998. „Solidification of aluminium alloys under ultrasonic irradiation using water-cooled resonator”. *Materials Letters* 37 (1–2) : 7–34.
10. Abu-Dheir N., M. Khraisheh, K. Saito, A. Male. 2005. „Silicon morphology modification in the eutectic Al-Si alloy using mechanical mold vibration”. *Materials Science and Engineering: A* 393 (1–2) : 109–117.
11. Doherty R., H.-I. Lee, E. Feest. 1984. „Microstructure of stir-cast metals”. *Materials Science and Engineering* 65 (1) : 181–189.
12. Szajnar J., T. Wróbel. 2009. Wykorzystanie pola elektromagnetycznego w procesie krystalizacji odlewów. W *Postępy Teorii i Praktyki Odlewniczej – Monografia*, red. J. Szajnar J., 399–418. Katowice: Polska Akademia Nauk, Komisja Odlewnictwa. Gliwice: Archives of Foundry Engineering
13. Wróbel T. 2010. Modyfikacja struktury czystego aluminium z udziałem pola elektromagnetycznego. W *Tendencje Optymalizacji Systemu Produkcyjnego w Odlewniach – Monografia*, red. S. Pietrowski, 253–262. Katowice: Polska Akademia Nauk, Komisja Odlewnictwa. Gliwice: Archives of Foundry Engineering.
14. Wróbel T. 2013. „The influence of electromagnetic stirring on primary structure of pure Al and Al-Si alloy”. *Advanced Materials Research* 746 : 478–483.

