

## WŁAŚCIWOŚCI MOSIĄDZU MO59 KRZEPNĄCEGO W WIRUJĄCYM POLU MAGNETYCZNYM

GAWROŃSKI Józef, SZAJNAR Jan  
Katedra Odlewnictwa, Politechnika Śląska  
44-100 Gliwice, ul. Towarowa 7, POLAND  
KALANDYK Zbigniew, LACHOWSKI Mirosław  
Instytut Metali Nieżelaznych  
44-100 Gliwice, ul. Sowińskiego 5, POLAND

### STRESZCZENIE

W pracy przeprowadzono próby odlewania mosiądzów ołowiowych do form grafitowych przy zastosowaniu wirującego pola magnetycznego (WPM). Porównano właściwości i struktury wlewków okrągłych ( $\varnothing 45 \times 180\text{mm}$ ) odlewanych tradycyjnie bez oddziaływania pola magnetycznego oraz z wykorzystaniem wirującego pola magnetycznego przy różnych parametrach. Stwierdzono korzystne działanie wirującego pola magnetycznego na rozdrobnienie struktury i rozłożenie ołowiu w mosiądzu oraz porowatość gazową.

### 1. WPROWADZENIE

Przy masowej produkcji wlewków do przeróbki plastycznej wymagana jest wysoka jednorodność stopu oraz określona struktura. Oprócz tradycyjnych zabiegów technologicznych jak dobór parametrów odlewania i optymalizacja konstrukcji krystalizatora, coraz częstsze zastosowanie do poprawy właściwości odlewanych stopu znajdują sposoby aktywnego oddziaływania zewnętrznymi czynnikami fizycznymi na proces krzepnięcia. Do sposobów korzystnie kształtujących pierwotną strukturę metali i stopów zaliczyć można między innymi odlewanie w zmiennym polu magnetycznym. Cechą charakterystyczną tej metody jest wymuszony ruch metalu w formie odlewniczej lub krystalizatorze podczas krzepnięcia, co decyduje o rozdrobnieniu i ujednorodnieniu struktury krystalicznej w odlewach.

Krzepnięcie odlewu w tych warunkach, uważane jako krzepnięcie dynamiczne, doczekało się opisu w licznych opracowaniach dotyczących przede wszystkim odlewania pod działaniem drgań mechanicznych [1-6] i w wielu opracowaniach dotyczących innych sposobów generowania ruchu w krzepnących cieczach [7,8]. Znacząca ilość publikacji dotyczy również odlewania pod działaniem zmiennego pola magnetycznego [11-22]. Zawarte w literaturze wyniki badań nad określeniem wpływu ruchu ciekłego metalu na jakość odlewu pozwalają wyodrębnić występowanie trzech zasadniczych zjawisk, a to:

- 1) zjawiska cieplne, zmieniające pole temperatur w krzepącym odlewie,
- 2) zjawiska związane z dynamicznym pobudzeniem tworzenia zarodków krystalizacji,

3) zjawiska mechaniczne, kształtujące odmiennie niż tradycyjnie front krzepnięcia i rosnące kryształy.

Wymienione zjawiska występują razem w procesie krystalizacji i krzepnięcia odlewu, z tym że ilościowy wpływ poszczególnych zjawisk na strukturę odlewu jest trudny do określenia.

Tworzenie się struktury pierwotnej we wlewkach rozważać można jako proces powstawania trzech stref krystalicznych na przekroju odlewu (strefa kryształów zamrożonych, kolumnowych i równoosiowych). Wymiary tych stref uwarunkowane są, poza odlewniczymi czynnikami technologicznymi oraz stanem fizykochemicznym ciekłego metalu, również działaniem zewnętrznych czynników fizycznych, w tym także wirującego pola magnetycznego wywołującego celowy i sterowany ruch krzepnącego metalu.

Głównym celem wywoływania wymuszonej konwekcji w krzepnących wlewkach jest wyeliminowanie lub ograniczenie strefy kryształów kolumnowych, bowiem jej istnienie zmniejsza np. szybkość wyciskania, a także obniża jakość wyrobów gotowych.

Proces krystalizacji odlewu pod wpływem pola magnetycznego można przedstawić analizując kolejne etapy tworzenia się odlewu, poczynając od zalewania formy ciekłym metalem [13, 18].

W czasie zalewania formy rozpoczyna się stygnięcie ciekłego metalu i oddawanie ciepła przegrzania. Jednocześnie na ściankach formy, po osiągnięciu przez warstwę przyścienną ciekłego metalu wymaganego przechłodzenia, rozpoczyna się proces krystalizacji związany z heterogenicznym powstawaniem zarodków i wzrostem kryształów. W okresie wypełniania formy działa wirujące pole magnetyczne wymuszające intensywny obrotowy ruch ciekłej fazy, najpierw względem ścianki formy, a następnie względem utworzonego już frontu krystalizacji.

W związku ze zmianą warunków wymiany ciepła na powierzchni rozdziału (większy współczynnik wymiany  $\alpha$ ), z warstwy przyściennej ciekłego metalu zostaje w jednostce czasu odprowadzona większa ilość ciepła do ścianki formy, a zatem w tej strefie panuje większe przechłodzenie. Wystąpienie większego lokalnego przechłodzenia w warstwie odlewu objawia się zwiększoną ilością mniejszych heterogenicznych zarodków krystalizacji, na których nastąpił wzrost kryształów kolumnowych o mniejszych wymiarach.

Zahamowanie wzrostu kryształów kolumnowych (krystalizacji kierunkowej) jest wynikiem nagromadzenia się w środkowej części odlewu cząstek fazy stałej i rozpoczęcia krystalizacji objętościowej. Źródłem cząstek fazy stałej, w tym także zarodków, mogą być wszystkie te zjawiska, które zostały przedstawione w pracach [9-10], a dotyczące tworzenia się strefy kryształów równoosiowych w odlewie. Do tych mechanizmów należą:

- przenoszenie przez ruch konwekcyjny kryształów zamrożonych do środkowej części odlewu,
- odrywanie się kryształów od ścianki formy pod wpływem konwekcji ciekłego metalu,
- fragmentacja ("rozmnażanie") kryształów przez koagulację oraz nadtapianie pod wpływem fluktuacji temperatury, a także odłączanie mechaniczne wywołane ruchem cieczy,
- zarodkowanie metalu w zewnętrznej, przechłodzonej warstwie cieczy, stykającej się z frontem krystalizacji kryształów kolumnowych.

Można również przyjąć hipotezę zbliżoną do teorii kryształów zamrożonych B. Chalmersa [9] i teorii kryształów równoosiowych A. Ohno [10], że wymuszony ruch cieczy względem ścianki formy (również frontu krystalizacji) powoduje odrywanie wzrastających ziaren, a w tych miejscach powstają nowe zarodki i kryształy, lecz z cieczy bardziej przechłodzonej, zatem w większej ilości i o mniejszych wymiarach. Oderwane kryształy przenoszone są przez będący w ruchu ciekły metal do środkowej części odlewu, gdzie mogą stać się nowymi ośrodkami krystalizacji, a w szczególności w przechłodzonej warstwie fazy ciekłej przylegającej do frontu krystalizacji.

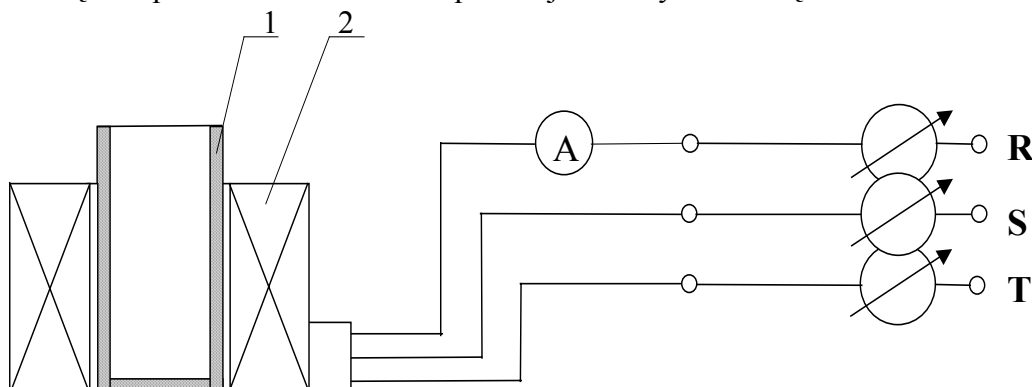
Wymienione mechanizmy zachodzą również w wyniku naturalnych zjawisk przebiegających w

czasie krzepnięcia odlewu i wywoływanych między innymi różnicę temperatury i gęstości ciekłego metalu, różnym sposobem napełniania wnętrza formy itp. Powyższe mechanizmy znacznie się intensyfikują w wyniku wymuszonego (przez pole magnetyczne) ruchu ciekłej fazy, a skutkiem tego jest zmniejszenie stref kryształów kolumnowych i rozdrobnienie kryształów równoosiowych.

## 2. BADANIA WŁASNE

Pozytywne wyniki wcześniejszych prac [12-18] z zakresu wykorzystania mieszania elektromagnetycznego przy odlewaniu czystych metali, skłoniły do próby zastosowania tego sposobu odlewania dla stopów wieloskładnikowych, jakimi są mosiądze ołowione.

Celem pracy było zbadanie wpływu wirującego pola magnetycznego na strukturę i jednorodność strukturalną oraz porowatość wlewków o przekroju kołowym z mosiądzu MO59.



Rys.1. Schemat stanowiska badawczego: 1 - forma grafitowa, 2 - induktor wytwarzający wirujące pole magnetyczne

Fig. 1. Scheme of testing installation: 1 – graphite mould, 2 – magnetic field inductor

Badania prowadzono w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach na stanowisku wykonanym w Katedrze Odlewnictwa Politechniki Śląskiej (rys. 1). Odlewy próbne o wymiarach  $\phi 45 \times 180\text{mm}$  wykonywano w formie grafitowej (1) umieszczonej we wnętrzu induktora (2) wytwarzającego wirujące pole magnetyczne.

Proces topienia prowadzono w piecu indukcyjnym tyglowym o pojemności 10 kg Cu, używając wsadu złomowego. Po roztopieniu wsadu mierzono temperaturę, ściągano żużel i zalewano dwie formy: jedną umieszczoną w induktorze wytwarzającym pole magnetyczne, a drugą bez induktora w celu otrzymania próbek wzorcowych. Temperatura zalewania mosiądzu wynosiła każdorazowo  $1000^{\circ}\text{C}$ . Czas oddziaływania pola liczone od chwili zakończenia zalewania formy. Zestawienia parametrów przeprowadzonego eksperymentu przedstawiono w tab. 1.

Po wybiciu odlewu z kokili i ich ostudzeniu pobierano próbki w postaci poprzecznie wyciętych krążków o grubości 10mm. Miejsce pobrania próbek - 1/3 wysokości wlewka, mierząc od podstawy.

Tabela 1.  
Plan eksperymentu  
Table 1.

Experimental conditions

Nr próby	Sposób odlewania	Czas działania pola w [s]	Indukcja pola magnetycznego w [mT]
0	Bez WPM	-	-
1	W WPM	20	50
2	W WPM	30	50
3	W WPM	35	30

### 2.1. Pomiary gęstości i porowatości próbek

Pomiary przeprowadzono na dolnej części wlewków, które ważono w powietrzu i w wodzie destylowanej. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono gęstości  $\gamma$  próbek odlanych w polu i próbek wzorcowych. Wyniki zawarto w tab. 2.

Tabela 2.  
Wyniki pomiarów gęstości i porowatości próbek  
Table 2.

Density and porosity of the samples

Nr próby	$G_p$ [g]	$G_w$ [g]	$\gamma = \gamma_w G_p / (G_p - G_w)$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$p = (\gamma_m - \gamma) / \gamma_m$ * 100%
0	661,9	580,5	8,13	5,47
1	573,9	506,5	8,51	1,05
2	600,7	530,2	8,52	0,93
3	643,3	567,7	8,51	1,05

$G_p$  - masa próbki w powietrzu,

$G_w$  - masa próbki w wodzie,

$\gamma_w$  - gęstość wody,

$\gamma_m$  - gęstość teoretyczna mosiądzu,

$p$  - porowatość mosiądzu.

### 2.2. Badania metalograficzne

Badania polegały na wykonaniu zglądów metalograficznych oraz zdjęć makro i mikrostruktur, a także na określeniu rozłożenia ołowiu w badanych próbkach.

Zdjęcia wybranych makro i mikrostruktur przedstawiono na rys. 2 - 4.

a)

b)

Rys.2. Makrostruktura odlewu: a) tradycyjnego - bez WPM, b) wykonanego pod działaniem WPM. Pow. 2x

Fig. 2. Billet macrostructure: a) traditionally casted without RMF, b) casted with using RMF

Rys.3a. Mikrostruktura strefy kryształów kolumnowych odlewu tradycyjnego. Pow. 60x

Fig 3a. Microstructure of the columnar crystals zone of the traditionally casted billet. Mag, 60x

Rys.3b. Mikrostruktura strefy kryształów kolumnowych odlewu wykonanego w WPM. Pow. 60x  
Fig. 3b. Microstructure of the columnar crystals zone billet casted with using RMF. Mag. 60x

Rys.4a. Rozłożenie ołowiu w odlewie tradycyjnym. Pow. 300x  
Fig. 4a. Lead particles distribution in traditionally casted billet. Mag. 300x

Rys.4b. Rozłożenie ołowiu w odlewie wykonanym pod działaniem WPM, pow. 300x  
Fig. 4b. Lead particles distribution in the billet casted with using RMF. Mag. 300x

### 3. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

Pomiary gęstości wykazały, że próbki odlewane bez udziału pola magnetycznego charakteryzowały się gęstością wynoszącą  $8,13 \text{ g/cm}^3$ . Gęstości próbek odlewanych w wirującym polu magnetycznym przy różnych parametrach odlewania były zbliżone do siebie i wynosiły  $8,51 \pm 8,52 \text{ g/cm}^3$ . Wyniki te świadczą o korzystnym wpływie wymuszonej konwekcji (wirowego ruchu ciekłego metalu w formie) na wzrost gęstości odlewanych mosiądzów. Potwierdzają tą tezę również wyniki obliczeń porowatości badanych próbek.

Badania metalograficzne wykazały, że próbki odlane w WPM posiadają mniej rozległą strefę kryształów kolumnowych niż odlewy tradycyjne (rys. 2) i kryształy w tej strefie są mniejsze (rys. 3a i 3b). Podobnego rzędu rozdrobnienie struktury stwierdzono w strefie środkowej odlewów wykonanych w WPM.

Na podstawie badań metalograficznych stwierdzono, że rozłożenie ołowiu w odlewach wykonanych pod działaniem WPM jest bardziej równomierne (rys. 4a i b) w poszczególnych strefach krystalicznych, ale tych wydzielen jest więcej w środkowej części odlewów.

### LITERATURA

- [1] Abramow W.: Kristallizacja metali w ultrazwukowym polu. *Metalurgia*, Moskwa 1972.
- [2] Angelow C.: Primienienie ultrazwuka w promyszlennosti. *Maszynostrojenie - Technika*, Moskwa - Sofia 1975.
- [3] Campbell J.: Review of the Effects of Vibration During Solidification. *Crosworth Research and Develop LTD, Worcester* 1977.
- [4] Fischer T. P.: *British Foundryman* 1973, vol. 66, no. 3, p. 71-82.
- [5] Sutyryn G. W.: O wlijanii wibracji niskoj czastoty na skorost zaro\_dienija centrow kristallizciji. *Izw. AN SSSR Metalurgy* 1974, nr 4.
- [6] Shukala D. P.: *Indian Foundry Journal* 1980, no. 1, p. 1-7.
- [7] Mikelson A. E.: *Elektrodinamiczeskoje wozbuzhdenije i izmierenije kolebanij w metalach*. Zinatie, Riga 1979.
- [8] Gruzin W. B., Bugrow N. C., Markow A. W.: *Izw. AN SSSR, Czernaja Metalurgija* 1970, nr 5, s. 56-62.
- [9] Chalmers B.: *Journal Austr. Institute Metall.* 1963, t. 8, s. 225.
- [10] Ohno A.: *The Solidification of Metals*, Chijin Shoken, Tokyo 1980.
- [11] Wertie A.: *Magnitnaja gidrodinamika w metalurgii*. *Metalurgija*, Moskwa 1975.
- [12] Gawroński J., Szajnar J.: *Krzepnięcie Metali i Stopów* 1988, z. 13, s.5-17.
- [13] Szajnar J.: *Krzepnięcie Metali i Stopów* 1992, z. 16, s.191-202.
- [14] Szajnar J., Gawroński J.: *Krzepnięcie Metali i Stopów* 1992, z. 17, s.164-171.
- [15] Wertie A.: *MGD - Technologie w przemyśle czernych metali*. *Metalurgija*, Moskwa 1990.
- [16] Izmailow W. A., Ermołajewa N. T., Tokar W. S.: *Cwietnyje Metally* 1994, nr 7, s. 52-59.
- [17] Gawroński J., Szajnar J., Kalandyk Z., Lachowski M.: *Struktura i porowatość gazowa miedzi we wlewkach odlewanych pod wpływem pola magnetycznego*. *Mat. VII Konferencji "Metale nieżelazne w przemyśle okrętowym"*, Szczecin 1996.
- [18] Szajnar J.: *Praca doktorska*, Politechnika Śląska 1986.
- [19] Szajnar J., Gawroński J.: *Krzepnięcie Metali i Stopów* 1994, z. 20, s.21-28.
- [20] Szajnar J.: *Growth Direction of Columnar Crystals from the Rotating Liquid Metal*. *Proc. II Inter. Confer. "Engineering and Functional Materials"*, Lwów 1997.
- [21] Szajnar J.: *Krzepnięcie Metali i Stopów* 1996, z. 27, s.42-49.
- [22] Szajnar J., Gawroński J.: *Krzepnięcie Metali i Stopów* 1997, z. 30, s.213-220.

## **PROPERTIES OF MO59 BRASS SOLIDIFICATION IN ROTARY MAGNETIC FIELD.**

### **ABSTRACT**

In this work the results of investigation of lead brass casting to graphite mould using the rotating magnetic field (RMF) are presented. The properties and structures of round billets ( $\phi 45 \times 180\text{mm}$ ) in comparison with traditionally casted ones. The advantageous influence of RMF action on structure refinement, lead distribution and gas porosity has been started.