

Krzysztof KONOPKAPOLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI,
ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice**Układ pomiarowy do badania zależności dynamiki mieszania płynnego metalu od pola magnetycznego**

Dr inż. Krzysztof KONOPKA

Adiunkt w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Główne kierunki działalności naukowo-badawczej to systemy pomiarowe, metrologiczne właściwości systemów pomiarowych, pomiary i sterowanie w procesach metalurgicznych związane z nagrzewaniem indukcyjnym (hartowanie, odlewanie, topienie, nagrzewanie).



e-mail: krzysztof.konopka@polsl.pl

Streszczenie

Referat przedstawia koncepcję oraz prototyp układu do eksperymentalnego wyznaczenia wielkości charakteryzujących ruch płynnego metalu wywołany mieszaniem elektromagnetycznym w procesie odlewania ciągłego aluminium. Mieszanie metalu w trakcie krystalizacji ma istotny pozytywny wpływ na strukturę odlewu. Badania mają na celu uzyskanie zależności eksperymentalnych, które umożliwią weryfikację wyników uzyskanych w wyniku modelowania procesu odlewania.

Słowa kluczowe: mieszanie elektromagnetyczne, ruch płynnego metalu, odlewanie ciągłe.

Measurement system for studying dependencies between magnetic field and liquid metal mixing dynamics**Abstract**

The paper presents a concept and a prototype experimental system for determination of the velocity of liquid metal caused by electromagnetic stirring in continuous casting process of aluminum. Stirring during the crystallization of a metal has a significant positive impact on the structure of the casting. The concept is based on the observation that the vertical magnetic field results in a conical uplift of a liquid metal. The height of the cone depends on the velocity at which the metal is stirred by a magnetic field. The paper presents the design of a measuring system for determining the height of the liquid metal cone. It also presents a prototype built and the results obtained. The prototype was constructed to verify the proposed concept and to perform practical tests showing if the results could be useful. The purpose of the research is to obtain experimental dependencies that enable the verification of the results obtained in the modeling of the casting process.

Keywords: electromagnetic stirring, liquid metal motion, continuous casting.

1. Wstęp

Odlewanie ciągłe jest procesem metalurgicznym, w którym ciekły metal dostarczany jest w sposób ciągły do specjalnej formy odlewniczej, nazywanej krystalizatorem i również w sposób ciągły usuwany jest z przeciwnej strony formy. Krystalizator chłodzony jest wodą. W wyniku intensywnego chłodzenia metal krzepnie w trakcie przechodzenia przez krystalizator. Gwałtowne chłodzenie pozwala na uzyskanie materiału drobnziarnistego o dobrych właściwościach mechanicznych. Jednocześnie dzięki ciągłemu wyciąganiu odlewu z formy produkcja ma charakter ciągły i możliwe jest uzyskanie produktu o dowolnym wymiarze. Technologia odlewania ciągłego stosowana jest do odlewania wałków, prętów, rur, belek, płyt i arkuszy ze stopów żelaza, stali i metali nieżelaznych.

Jak wspomniano, technologia odlewania ciągłego znacząco wpływa na własności wlewków poprzez jednorodność i czystość

materiału, a także możliwość uzyskania wymaganej struktury krystalicznej. Jeszcze lepsze rezultaty uzyskuje się, jeśli w trakcie krzepnięcia metal jest mieszany.

Mieszanie metalu w procesie odlewania ciągłego najczęściej uzyskuje się wykorzystując pole elektromagnetyczne. W literaturze można znaleźć różne rozwiązania takich mieszadeł, z różnie kształtowanym polem magnetycznym [1, 4, 5, 6]. Prace przedstawione w niniejszym artykule związane są z badaniami mieszania elektromagnetycznego w linii odlewania ciągłego aluminium. W linii tej, w celach badawczych, zastosowano dwa różne mieszadła – układ mieszający polem wzdłużnym oraz układ mieszający polem wirującym. Omawiana linia ma umożliwiać między innymi badanie wpływu mieszania metalu na jego strukturę. Przykład takich badań przedstawia praca [1], gdzie badano wpływ mieszania polem wirującym na strukturę kryształów aluminium. W przytoczonej pracy, podobnie jak w innych, bada się w praktyce wpływ parametrów pola elektromagnetycznego na strukturę metalu. Nie wiadomo natomiast dokładnie, jak pole elektromagnetyczne wpływa na mieszanie metalu. Wiele doświadczeń pokazuje, że w rzeczywistości proces mieszania przebiega inaczej niż zakładano podczas projektowania mieszadła. Podstawowy proces badawczy wygląda w ten sposób, że zadawane są określone parametry elektryczne (natężenie i częstotliwość prądu) dla induktora mieszadła, a następnie badana jest struktura odlewu. Nie ma w zasadzie możliwości pomiarów parametrów pośrednich. Wyniki uzyskane z takich doświadczeń pozwalają określić tendencję zmian. Jednak zależności liczbowe pomiędzy natężeniem i częstotliwością prądu induktora a strukturą metalu są prawdziwe dla konkretnej konfiguracji krystalizatora i mieszadła. Bezpośrednio na strukturę metalu wpływa przede wszystkim jego ruch. Przydatne zatem byłoby znalezienie zależności pomiędzy polem magnetycznym a polem prędkości, a następnie między polem prędkości a strukturą metalu. Pozwoliłoby to metalurgom na określenie bardziej uniwersalnych zależności między mieszaniem a strukturą metalu. Efektom badań mogą być wytyczne projektowania instalacji odlewniczych określające, jakie mieszanie metalu jest w nich potrzebne, na przykład w formie pola prędkości. Na ich podstawie konstruktorzy mogliby tak zaprojektować układ mieszania i tak ukształtować pole magnetyczne, aby uzyskać pożądany ruch metalu.

Procesy zachodzące w trakcie odlewania metali są złożone. Równaniami analitycznymi można opisać tylko uproszczone przypadki, które są rzadko przydatne w praktyce [2]. Najczęściej urządzenia odlewnicze projektuje się bazując na wcześniejszych doświadczeniach oraz kosztownych doświadczeniach fizycznych, wspomagając się modelowaniem komputerowym. Fizyczna i chemiczna strona procesów odlewniczych jest w zasadzie rozpoznana. Jednak uwzględnienie w modelu symulacyjnym wszystkich pól bardzo komplikuje obliczenia i szacowany czas obliczeń jest na tyle długi, że praktycznie nierealizowalny. W praktyce dostępne na rynku programy symulacyjne są wyspecjalizowane do równoczesnych obliczeń jednego lub kilku wybranych pól [2].

Gdyby wyznaczono nawet przybliżone zależności między polem magnetycznym a polem prędkości ciekłego metalu, to można by w pierwszym kroku projektowania mieszadła, w oparciu o programy symulacyjne określić, jakie mieszanie, czyli jaki rozkład pola prędkości jest potrzebny do uzyskania założonej struktury odlewu. Następnie należałoby określić, jaki rozkład pola magnetycznego spowoduje takie pole prędkości. Przy projektowaniu induktorów generujących odpowiednie pole magnetyczne można wspomagać się innymi programami symulacyjnymi.

Zależności pomiędzy polem magnetycznym a polem prędkości ciekłego metalu są złożone. Można znaleźć publikacje prezentują-

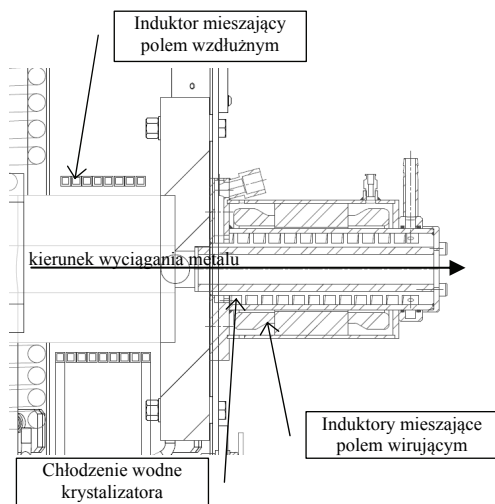
ce analityczne zależności opisujące wybrane aspekty tego zjawiska, niewiele materiałów przedstawia jednak badania empiryczne potwierdzające te zależności. Doświadczenia związane z konstruowaniem krystalizatorów z mieszaniem magnetycznym pokazują, że wyniki analiz i symulacji często nie pokrywają się z uzyskanymi w praktyce efektami. Efektem jest określona struktura metalu i z reguły trudno stwierdzić, który z wielu czynników miał decydujący wpływ na odlew. Z tego powodu zrodził się pomysł doświadczonego zweryfikowania analiz i symulacji dotyczących samego mieszania polem magnetycznym i poszukiwania modelu najlepiej odzwierciedlającego rzeczywiste obserwacje. Dzięki temu w kolejnym kroku można będzie poszukiwać zależności pomiędzy mieszaniem a strukturą odlewu. Doświadczenia mają prowadzić do sprecyzowania zależności analitycznych wystarczająco dobrze opisujących rzeczywiste zjawiska lub do wyznaczenia tych zależności doświadczalnie, przykładowo w postaci tablic zależności.

Pierwszy problem, jaki należało rozwiązać, to metoda pomiaru takiego parametru opisującego ruch płynnego metalu w krystalizatorze, który pozwoli na ocenę poprawności symulacji i który można zmierzyć dostępnymi środkami. Z doświadczeń związanych z budową indukcyjnych pieców tyglowych wynika, że pole magnetyczne skierowane pionowo powoduje powstanie wyrzuczenia płynnego metalu, które ma w przybliżeniu kształt stożka. Wysokość tego stożka zależy od prędkości, z jaką metal jest mieszany. Jeśli zatem udało się zmierzyć wysokość tego stożka, to uzyska się wielkość zależną od prędkości, z jaką mieszany jest metal przez pole magnetyczne.

Artykuł przedstawia projekt stanowiska do pomiaru wysokości opisanego stożka płynnego metalu. Przedstawia również zbudowany prototyp oraz uzyskane wyniki. Prototyp powstał w celu zweryfikowania zaproponowanej koncepcji pomiaru oraz praktycznego sprawdzenia, czy uzyskane wyniki mogą być przydatne.

2. Koncepcja pomiarów oraz budowa stanowiska

Jak wspomniano we wstępie, przedstawione badania związane są z funkcjonującą linią odlewania ciągłego aluminium, w której zastosowano dwa różne mieszadła – układ mieszający polem wzdłużnym, oraz układ mieszający polem wirującym, z możliwością załączania każdego mieszadła oddzielnie lub jednocześnie. Przekrój krystalizatora z opisanym układem mieszadeł przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Przekrój krystalizatora
Fig. 1. Cross-section of the crystallizer

Przedstawione badania dotyczyły prędkości metalu jaką uzyskuje on za pomocą układu mieszającego który generuje pole magnetyczne wzdłuż krystalizatora. We współpracy z firmą

ELKON z Rybnika zbudowano stanowisko badawcze. Koncepcja budowy stanowiska wynikała z obserwacji, że w przypadku ustawienia pola magnetycznego pionowo, na powierzchni roztopionego metalu tworzy się stożek wywołany ruchem metalu w górę. Wykonano zatem cewkę taką samą jak w krystalizatorze, aby można było odnieść wyniki uzyskane ze stanowiska do analiz struktury odlewów. Cewkę tą ustawiono pionowo a w środku umieszczano tygły ceramiczne o różnych średnicach.

Ze względów technologicznych tuleje w krystalizatorach wykonywane są najczęściej z grafitu. Przygotowano zatem również grafitowe tuleje dopasowane do tygli, aby sprawdzić na ile tłumienie pola magnetycznego przez grafit wpływa na mieszanie.

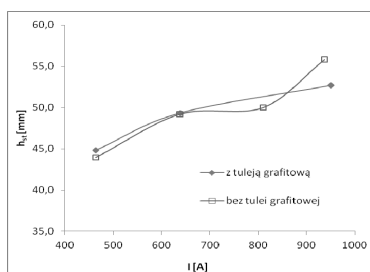
Pozostał problem pomiaru wysokości stożka płynnego metalu. Z uwagi na to, że tygły są nieprzewodzące i dodatkowo osłonięte izolacją termiczną nie było możliwości zastosowania metod optycznych. Postanowiono wykorzystać przewodnictwo płynnego metalu. Idea pomiaru polega na tym, że przygotowano dwie elektrody ze stali nierdzewnej. Zamknięcie obwodu elektrycznego przez płynny metal powoduje wyzwolenie pomiaru. Jedna elektroda zanurzona jest na stałe w metalu, a druga zamocowana jest do układu mierzącego odległość i umieszczona w osi pionowej tygla. Podczas opuszczania drugiej elektrody, w momencie jej zetknięcia z roztopionym metalem zapamiętywane jest przesunięcie. Dokonując dwóch pomiarów, pierwszego bez pola magnetycznego, z płaską powierzchnią metalu, oraz z zadaniem polem magnetycznym i ustabilizowanym stożkiem, uzyskuje się wysokość stożka wywołaną polem magnetycznym.

Schemat opisanego stanowiska badawczego oraz zdjęcie prototypu przedstawiają rys. 4 i 5. Pierwsze próby wykonane na przedstawionym prototypie stanowiska pozwoliły zweryfikować przyjętą koncepcję oraz dopracować metodę. Okazało się, że w otoczeniu tlenowym na powierzchni aluminium tworzy się warstwa tlenków, które tworzą bąble uniemożliwiające wykonanie pomiaru. Dopiero przeprowadzenie prób w atmosferze argonu pozwoliło na zrealizowanie pomiarów wg zaproponowanej metody. Dotychczas uzyskane wyniki widoczne w tabeli 1 oraz na rys. 2 i 3 pokazują, że jest wyraźna zależność pomiędzy wysokością stożka a natężeniem prądu w induktorze. W możliwym do uzyskania zakresie wartości prądu zależność ta jest w przybliżeniu liniowa, natomiast możliwa jest zmiana tej zależności przy poszerzeniu zakresu w górę. Ciekawa okazała się niewielka różnica między wynikami uzyskanymi dla układu z tuleją grafitową i bez niej wobec znanego powszechnie tłumienia pola magnetycznego przez grafit. Związane jest to z faktem, że grafit ma formę tulei a nie tygla, przez co linie pola magnetycznego w większości omijają ekran, którym jest tuleja.

Tab. 1. Zestawienie wyników pomiarowych. I, f – prąd i częstotliwość w induktorze, P – moc pieca, h_{st} – wysokość stożka wzgl. dna, h_{poz} – wysokość lustra metalu wzgl. dna, Φ – średnica tygla

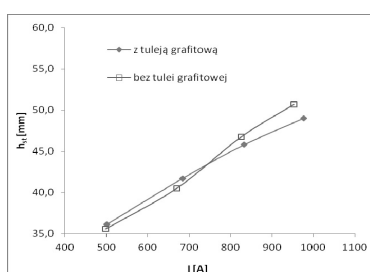
Tab. 1. Measurement results. I, f – current and frequency in the inductor, P – furnace power, h_{st} – height of the cone relative to the bottom, h_{poz} – height of the metal surface relative to the bottom, Φ – diameter of the crucible

$\Phi = 40 \text{ mm}, h_{poz} = 38,25 \text{ mm}$							
Z tuleją grafitową				Bez tulei grafitowej			
I	f	P	h_{st}	I	f	P	h_{st}
A	kHz	kW	mm	A	kHz	kW	mm
951	3,60	6,7	52,7	938	3,55	6,5	55,8
638	3,54	3,5	49,3	638	3,54	2,9	49,2
464	3,54	1,8	44,8	464	3,54	1,8	43,9
$\Phi = 70 \text{ mm}, h_{poz} = 27,41 \text{ mm}$							
Z tuleją grafitową				Bez tulei grafitowej			
I	f	P	h_{st}	I	f	P	h_{st}
A	kHz	kW	mm	A	kHz	kW	mm
977	3,70	11,4	49,0	954	3,61	7,2	50,7
832	3,66	8,6	45,8	825	3,63	5,2	46,7
685	3,67	5,8	41,7	670	3,64	3,4	40,5
501	3,67	3,0	36,1	498	3,60	2,2	35,6



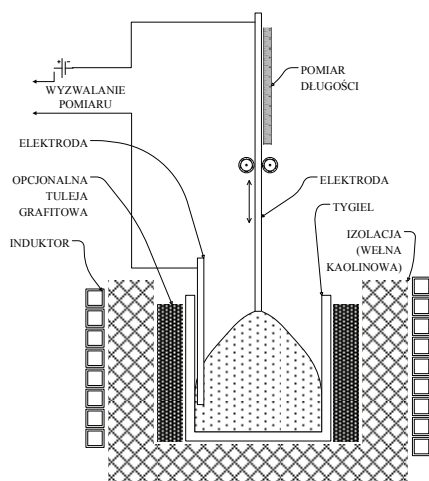
Rys. 2. Wykres wysokości stożka płynnego metalu h_{st} w funkcji prądu w induktorze I dla tygla o średnicy $\Phi = 40$ mm

Fig. 2. Cone height of the molten metal h_{st} as a function of the current in the inductor I, the crucible having a diameter $\Phi = 40$ mm



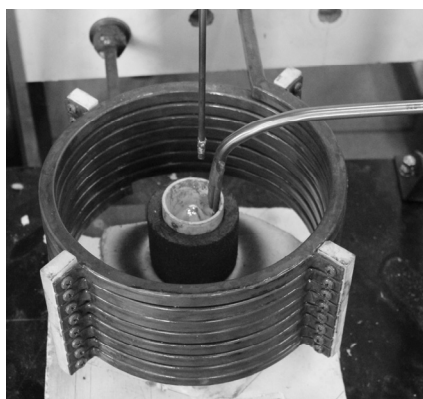
Rys. 3. Wykres wysokości stożka płynnego metalu h_{st} w funkcji prądu w induktorze I dla tygla o średnicy $\Phi = 70$ mm

Fig. 3. Cone height of the molten metal h_{st} as a function of the current in the inductor I, the crucible having a diameter $\Phi = 70$ mm



Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 4. Schematic diagram of the test stand



Rys. 5. Zdjęcie prototypu stanowiska badawczego

Fig. 5. Photo of the test stand prototype

3. Podsumowanie

Obecnie przemysł stawia dostawcom surowców coraz wyższe wymagania odnośnie jakości, struktury, powtarzalności. W przypadku odlewania z różnych metali elementów, które nie zmieniają przekroju stosowane jest odlewanie ciągle, które samo w sobie daje wylewki o lepszych właściwościach, przede wszystkim o drobniejszym ziarnie. Dodatkową poprawę jakości można osiągnąć stosując mieszanie metalu podczas krystalizacji za pomocą pola magnetycznego [1]. Oprócz poprawy jakości, mieszanie magnetyczne daje też poprawę wydajności. Przykładowo podczas odlewania aluminium przy zewnętrznych ściankach tworzą się niepożądane kryształy kolumnowe. Dlatego po odlaniu zewnętrzna warstwa jest często zdejmowana, na przykład poprzez toczenie. Zmniejszenie warstwy kryształów kolumnowych znacząco wpływa zatem na wydajność produkcji.

Parametry procesu odlewania są nadal często dobierane na zasadzie wiedzy eksperckiej uzyskanej w oparciu o doświadczenie. Modelowanie z uwagi na nieakceptowalnie długi czas obliczeń ograniczone jest zazwyczaj do kilku parametrów. Szczególnie trudne jest symulowanie procesu odlewania ciągłego z mieszaniem magnetycznym, chociażby z uwagi na konieczność zamodelowania turbulentnego ruchu cieczy w polu magnetycznym. Stąd podejmowane są próby empirycznego określenia przydatnych zależności [1]. W nurt ten wpisują się przedstawione w artykule badania.

Uzyskane wyniki dają podstawę do poszukiwania zależności pomiędzy polem magnetycznym a intensywnością mieszania metalu w krystalizatorze. W kolejnym kroku można dokonać porównania z wynikami uzyskanymi w symulacjach [3].

Docelowo, mając model zależności pomiędzy polem magnetycznym a polem prędkości ciekłego metalu który zgadza się z wynikami doświadczeń, można będzie zamodelować ruch tego metalu w krystalizatorze i tak dobrać parametry mieszania, aby jego strefa sięgała jak najgłębiej.

4. Literatura

- [1] Wróbel T., Szajnar J.: Influence of supply voltage frequency of induction coil on inoculation efficiency of pure aluminium structure, Archives of Foundry Engineering, Vol. 10 Issue 2/2010 pp. 203–208.
- [2] Kapturkiewicz W., Fraś E., Burbelko A. A.: Dlaczego modelowanie komputerowe jest w odlewnictwie potrzebne? Przegląd Odlewnictwa, nr 1/2005, s. 15–23.
- [3] Przyłucki R., Gola S., Oleksiak B., Blacha L.: Influence of an induction furnace's electric parameters on mass transfer velocity in the liquid phase, Metalurgija, Vol. 51 Issue: 1/2012, pp. 67-70.
- [4] Moffatt H. K.: Electromagnetic stirring. Phys. Fluids A 3 (5), 1991.
- [5] El-Kaddah N., Natarajan T.T.: Electromagnetic Stirring of Steel: Effect of Stirrer Design on Mixing in Horizontal Electromagnetic Steering of Steel Slabs. 2nd International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 1999.
- [6] Smagór A.: Analiza pracy mieszadeł elektromagnetycznych do mieszania stali w liniach ciągłego odlewania stali. Rozprawa doktorska, Katowice 2010.

otrzymano / received: 20.11.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.01.2014

artykuł recenzowany / revised paper