

WPLYW GŁĘBOKOŚCI ZANURZENIA RURY OSŁONOWEJ KADZI STALOWNICZEJ NA STRUKTURĘ PRZEPIYU CIEKŁEJ STALI W KADZI POŚREDNIEJ

W pracy zaprezentowano wyniki symulacji numerycznej przepływu ciekłej stali przez kadełko pośrednie. Celem badań było sprawdzenie wpływu zmiany głębokości zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej na obraz przepływu ciekłej stali w kadzi pośredniej. W ramach symulacji komputerowych uzyskano graficzny rozkład pól ruchu, intensywności turbulencji oraz temperatury ciekłej stali. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, iż zmiana głębokości zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej wpływa na kształt struktury przepływu ciekłej stali w objętości roboczej badanego obiektu. Symulacje numeryczne wykonano w programie Ansys-Fluent.

Słowa kluczowe: ciągłe odlewanie stali, kadełko pośrednie, przepływ stali, rura osłonowa kadzi stalowniczej, modelowanie numeryczne

INFLUENCE OF LADLE SHROUD IMMERSION DEPTH ON STRUCTURE FLOW OF LIQUID STEEL IN TUNDISH

The paper presents results of numerical simulation of the flow of liquid steel through the tundish. The aim of the study was examined the influence of changing the ladle shroud immersion depth on image flow of liquid steel in tundish. Within computer simulations obtained graphical distribution of fields movement, turbulence intensity and temperature of liquid steel. Based on obtained results it was found that a change the ladle shroud immersion depth influences on shape of the structure flow of liquid steel in working volume of examined objects. Numerical simulations were made in Ansys-Fluent.

Keywords: continuous casting of steel, tundish, flow of liquid steel, ladle shroud, numerical modeling

1. WSTĘP

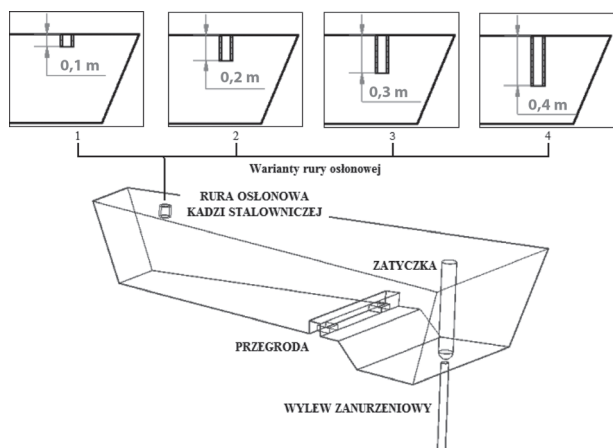
Analizując proces ciągłego odlewania stali należy stwierdzić, iż istotą procesu jest ciągły dopływ ciekłej stali do krystalizatora, który realizowany jest za pomocą kadzi pośredniej. Optymalizowanie warunków pracy kadzi pośredniej jest więc ważnym aspektem badawczym z punktu widzenia całego procesu COS. Udoskonalając warunki pracy kadzi pośredniej, należy zwrócić uwagę na hydrodynamiczną strukturę przepływu ciekłej stali, mając na uwadze lepszą homogenizację cieplną i chemiczną ciekłej stali. Naukowcy z branży metalurgicznej stale poszukują rozwiązań pozwalających na stabilizowanie i kontrolowanie przepływu ciekłej stali w kadzi pośredniej [1÷3]. Na szeroką skalę stosuje się urządzenia sterujące przepływem (USP). USP to przegrody, tamy, czy podstrumieniowe regulatory turbulencji. Nowym trendem badań dotyczącym optymalizacji procesów COS jest sterowanie przepływem ciekłej stali w kadzi pośredniej poprzez ingerencję w kształt rury osłonowej kadzi stalowniczej doprowadzającego ciekłą stal z kadzi stalowniczej do kadzi pośredniej [4÷7].

Wykonywanie badań eksperymentalnych w warunkach przemysłowych charakteryzuje się znacznymi utrudnieniami (wysoka temperatura, ciągłość procesu), dlatego szerokie zastosowanie znalazły obliczenia

numeryczne odzwierciedlające faktyczne warunki ciągłego odlewania stali [8]. W niniejszej pracy zostały zaprezentowane wyniki symulacji numerycznej, opisujące wpływ zmiany głębokości zanurzenia rury osłonowej w ciekłej stali na pracę kadzi pośredniej.

2. CHARAKTERYSTYKA BADANEGO OBIEKTU

Badanym obiektem jest jednowylewowa kadełko pośrednie typu klinowego o pojemności 30 t (Rys. 1). Mianem typu klinowego opisuje się kadełko pośrednie jedno-wylewowe rozszerzające się w kierunku strefy wylewowej [9÷11]. Opracowano cztery modele kadzi pośredniej cechujące się odmienną głębokością zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej w ciekłej stali: 0,1, 0,2, 0,3 i 0,4 m. Prezentowane wirtualne modele wyposażone są w przegrodę cechującą się wysokością 0,12 m i zawiera dwa okna przelewowe. Głównym zadaniem tej przegrody jest wyhamowanie fali ciekłej stali, podczas startu sekwencji odlewania. Stosowanie tej przegrody nie wpływa znacząco na hydrodynamikę przepływu ciekłej stali (udział przepływu stagnacyjnego w kadzi



Rys. 1. Model kadzi pośredniej z badanymi wariantami zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej

Fig. 1. Model of tundish with examined variants of ladle shroud immersion depth

pośredniej bez przegrody wynosi 34,3%, natomiast z przegrodą 34,1%), co szerzej omówiono w pracy [12]. W obszarze wylewu zanurzeniowego zainstalowana jest zatyczka, której celem jest kontrolowanie strumieni ciekłej stali wpływających do wylewu zanurzeniowego. Wewnętrzna średnica rury osłonowej kadzi stalowniczej była równa 0,07 m (rura osłonowa o takiej średnicy jest stosowana w warunkach przemysłowych).

3. METODYKA BADAŃ

Wirtualne modele kadzi pośredniej zawierały od 168000 do 173000 objętości kontrolnych tworzących siatkę obliczeniową. Symulację komputerową przepływu ciekłej stali wykonano, programem Ansys-Fluent, który stosuje metodę numerycznego całkowania elementów kontrolnych [14]. W badanych wariantach zastosowano model matematyczny przepływu ciekłej stali rozwiązując równania różniczkowe zachowania pędu, energii i ciągłości przepływu, a także uwzględniając turbulentny przepływ ciekłej stali (model Realizable k-ε) [15, 16]. Obliczenia numeryczne przeprowadzono symulując odlewania wlewka płaskiego o wymiarze $1,5 \times 0,225$ m. Prędkość odlewania kształtowała się na poziomie 0,015 m/s. Ciekła stal charakteryzująca się temperaturą 1823 K wlewana jest do kadzi pośredniej za pośrednictwem rury osłonowej kadzi stalowniczej z prędkością 1,316 m/s. Górna powierzchnia wirtualnych modeli kadzi pośredniej imitowała granicę ciekłej stali z powietrzem. Kinetyczna energia turbulencji równa była $0,0173 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Natomiast dyssypację kinetyczną energii turbulencji wyliczono na poziomie $0,065137 \text{ m}^2/\text{s}^3$. W symulacji uwzględniono aspekt wymiany ciepła pomiędzy odlewającym stopem, a otoczeniem kadzi pośredniej, szerzej przedstawiono w pracy [13]. W obliczeniach przyjęto wielkości fizykochemiczne ciekłej stali, które zostały określone następująco: ciepło właściwe $750 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, przewodność cieplna $41 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ oraz lepkość $0,007 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$. Gęstość ciekłej stali opisano za pomocą wzoru 1.

$$\rho = 8300 - 0,7105T \quad (1)$$

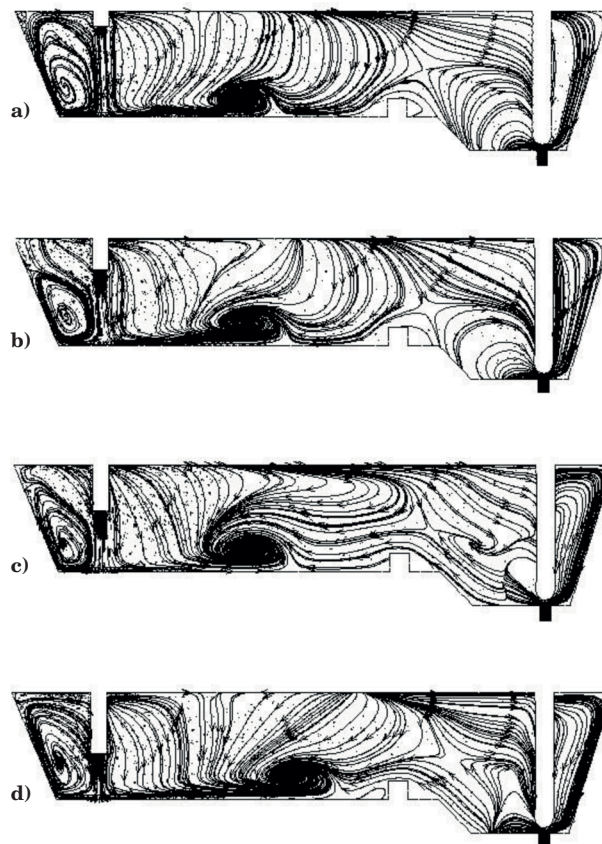
gdzie:

ρ – gęstość (kg/m^3),
 T – temperatura (K).

4. WYNIKI BADAŃ

Uwzględniając cztery przypadki głębokości zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej przeprowadzono symulacje numeryczne przepływu ciekłej stali przez kadź pośrednią. We wszystkich czterech symulacjach założono takie same parametry wejściowe. Rezultatem obliczeń było otrzymanie pól ruchu, intensywności turbulencji i temperatur ciekłej stali w kadzi pośredniej.

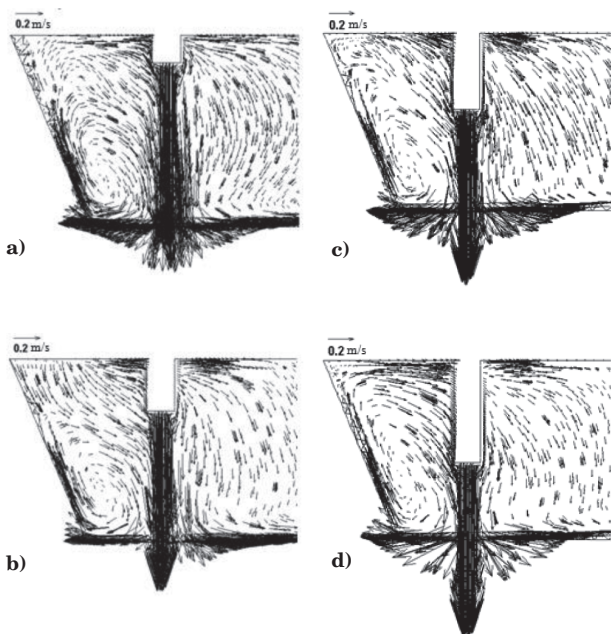
Pola ruchu wskazują na złożoność przepływu ciekłej stali w kadzi pośredniej w każdym z prezentowanych wariantów. Rozkład przepływu stali można podzielić na strefę wlewową (strefa oddziaływania strumienia zasilającego), wylewową (strefa za przegrodą, zawierająca system zamykania zatyczkowego) i centralną (znajdująca się za strefą wlewową, natomiast przed strefą wylewową). W rozpatrywanych obiektach przepływ strumienia głównego ciekłej stali przemieszcza się wzdłuż dna kadzi pośredniej tworząc w strefie wlewowej pionowe strumienie cyrkulacyjne oraz w centralnej części kadzi pośredniej poziome strumienie cyrkulacyjne (Rys. 2). Analizując proponowane warianty zauważono, że głębsze zanurzenie rury osłonowej kadzi stalowniczej powoduje zwiększenie zawartości główne-



Rys. 2. Pola przepływu stali w kadzi pośredniej dla rozpatrywanych wariantów głębokości zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej w ciekłej stali: a) 0,1 m, b) 0,2 m, c) 0,3 m, d) 0,4 m

Fig. 2. Field of steel flow in tundish with examined variants of the ladle shroud immersion depth in liquid steel: a) 0.1 m, b) 0.2 m, c) 0.3 m, d) 0.4 m

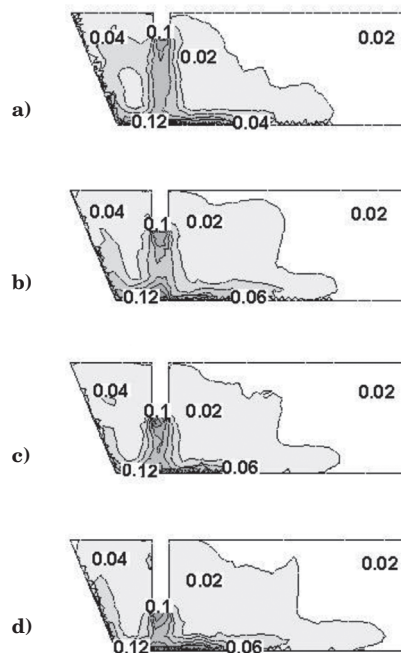
go strumienia ciekłej stali (Rys. 3). Analiza pól ruchu przepływu ciekłej stali wykazała, iż ze wzrostem głębokości zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej w ciekłej stali do 0,4 m strumień cyrkulacji w centralnej części kadzi pośredniej przesuwają się wzdłuż dna kadzi w kierunku strefy wylewowej (Rys. 2). W strefie centralnej charakter przepływu stali jest opadający, co może niekorzystnie wpływać na procesy flotacji wtrąceń niemetalicznych do fazy żuźlowej. W wariantach z rurą osłonową kadzi stalowniczej zanurzoną na głębokość 0,3 m w ciekłej stali w strefie centralnej kadzi strumienie pionowe opadające przekształcają się w strumienie poziome. W strefie wylewowej rozkład strumienia ciekłej stali przemieszcza się wzdłuż górnej powierzchni kąpieli metalowej oraz ściany bocznej w kierunku wylewu zanurzeniowego. W wariantach z rurą osłonową kadzi stalowniczej zanurzoną na głębokość 0,3 i 0,4 m w ciekłej stali zauważono powiększenie obszaru, w którym oddziałują strumienie wsteczne docierające do strefy centralnej kadzi pośredniej.



Rys. 3. Pola wektorów prędkości (m/s) w strefie wlewowej rozpatrywanych wariantów głębokości zanurzenia wylewu osłonowej kadzi stalowniczej w ciekłej stali: a) 0,1 m, b) 0,2 m, c) 0,3 m, d) 0,4 m

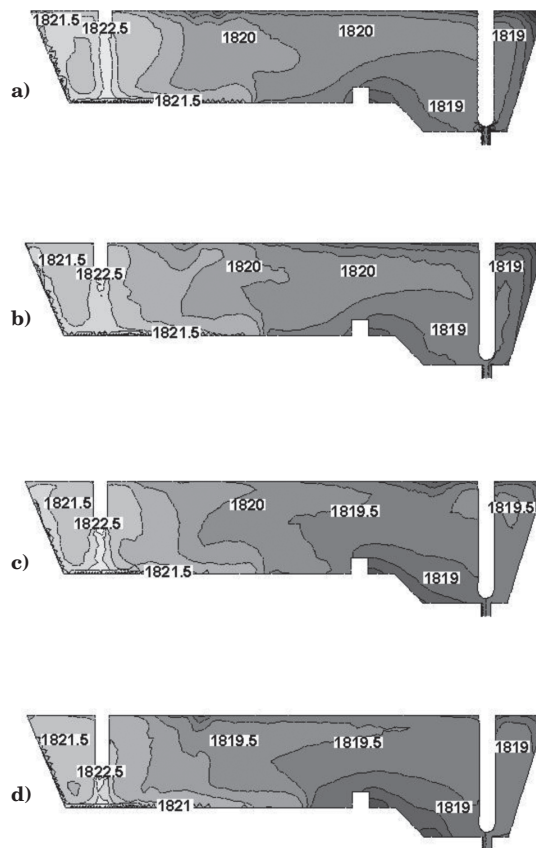
Fig. 3. Fields of velocity vectors (m/s) in tundish pouring zone with examined variants of the ladle shroud immersion depth in liquid steel: a) 0.1 m, b) 0.2 m, c) 0.3 m, d) 0.4 m

Intensywność turbulencji jest wypadkową prędkości przepływu ciekłej stali i kinetycznej energii turbulencji [17]. Intensywność turbulencji w rozpatrywanych wariantach głębokości zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej przedstawiono na płaszczyźnie prezentującej strefę wlewową (Rys. 4). W pozostałych strefach kadzi intensywność turbulencji nie przekracza wartości 0,02. Pola intensywności turbulencji w poszczególnych wariantach różnią się od siebie. Wraz ze wzrostem głębokości zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej w ciekłej stali podwyższona intensywność turbulencji rozszerza się wzdłuż dna kadzi pośredniej w kierunku przegrody. Szczególnie widoczne jest to porównując płaszczyzny centralne kadzi pośredniej z rurami osłonowymi zanurzonymi na głębokość 0,1 m i 0,4 m w ciekłej stali. Powiększenie obszaru o podwyższonej



Rys. 4. Izolinie rozkładu intensywności turbulencji w kadzi pośredniej rozpatrywanych wariantów głębokości zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej w ciekłej stali: a) 0,1 m, b) 0,2 m, c) 0,3 m, d) 0,4 m

Fig. 4. Isolines of turbulence intensity in tundish with examined variants of the ladle shroud immersion depth in liquid steel: a) 0.1 m, b) 0.2 m, c) 0.3 m, d) 0.4 m



Rys. 5. Izolinie pól temperatur (K) w kadzi pośredniej rozpatrywanych wariantów głębokości zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej w ciekłej stali: a) 0,1 m, b) 0,2 m, c) 0,3 m, d) 0,4 m

Fig. 5. Isolines of liquid steel temperature (K) in tundish with examined variants of the ladle shroud immersion depth in liquid steel: a) 0.1 m, b) 0.2 m, c) 0.3 m, d) 0.4 m

turbulencji w większym stopniu oddziałuje na dno kadzi pośredniej, co może powodować nadmierną erozję wymurówki obiektu.

Modyfikacja głębokości zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej w ciekłej stali wpłynęła na rozkład izoterm przedstawiających pola temperatur w kąpielach metalowej w kadzi pośredniej (Rys. 5). W wariantach zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej na głębokość 0,1 m i 0,2 m w ciekłej stali rozkład pól temperatur o wartości 1820 K w strefie centralnej kadzi dociera do zatyczki w strefie wylewowej. Zanurzenie rury osłonowej kadzi stalowniczej na głębokość 0,3 m i 0,4 m spowodowało powstanie pól temperatur pomiędzy przegrodą, a obniżeniem dna kadzi pośredniej charakteryzujących się niższą temperaturą, w stosunku do rozkładu pól temperatur uzyskanych stosując głębokość zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej 0,1 m i 0,2 m (co jest spowodowane poszerzeniem oddziaływania strumienia wstecznego w wariantach z rurą osłonową kadzi stalowniczej zanurzonym na głębokość 0,3 i 0,4 m w ciekłej stali). Symulacje numeryczne dla analizowanych wariantów odlewania wykazały, iż temperatura na wylewie kadzi pośredniej wynosiła 1819 K niezależnie od analizowanej głębokości zanurzenia.

5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie różnych wariantów głębokości zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej powoduje zmiany w przepływie ciekłej stali przez kład pośrednią. Graficzne zaprezentowanie rozkładu pól ruchu ciekłej stali, intensywności turbulencji oraz temperatur

umożliwia poznanie zjawisk hydrodynamicznych, jakie występują w kadzi pośredniej. Analiza przeprowadzonych symulacji numerycznych umożliwiła sformułowanie stwierdzeń, które przedstawiają się następująco:

- Charakter przepływu ciekłej stali w centralnej części kadzi pośredniej dla rozpatrywanych wariantów jest opadający.
- Wariant z rurą osłonową kadzi stalowniczej zanurzonym na głębokość 0,3 m w ciekłej stali powoduje w strefie centralnej przekształcenie strumienia pionowych opadających w strumienie poziome.
- Zmiana zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej na głębokość 0,4 m w ciekłej stali powoduje przesunięcie strumienia cyrkulacji zlokalizowanego przy dnie w strefie centralnej kadzi w kierunku systemu zatyczkowego.
- Podwyższony rozkład pól intensywności turbulencji rozszerza się wraz ze wzrostem głębokości zanurzenia rury osłonowej kadzi stalowniczej w strefie wylewowej wzdłuż dna kadzi pośredniej w kierunku strefy systemu zatyczkowego.
- Ze względu na proces COS najkorzystniejszym wariantem jest rura osłonowa kadzi stalowniczej zanurzony na głębokość 0,1 m w ciekłej stali ponieważ cechuje go ograniczony zakres oddziaływania strumienia wstecznych i strefy o podwyższonej turbulencji. Wariant ten charakteryzuje się najkorzystniejszym stopniem homogenizacji cieplnej ciekłej stali w kadzi pośredniej, spośród badanych wariantów badawczych.

Praca została wykonana z wykorzystaniem Infrastruktury PLGrid i w ramach badań statutowych Katedry Ekstrakcji i Recykulacji Metali.

LITERATURA

- [1] T. Merder, J. Pieprzycza, Z. Kudliński, L. Bulkowski, U. Galisz, H. Kania, Modelowanie przepływu stali w kadzi pośredniej urządzenia COS w stalowni Baildon Gonar-Bis Sp. z o.o., Hutnik-Wiadomości Hutnicze, 76 (3) (2009) 178-184.
- [2] T. Merder, Modelowanie wpływu podstrumieniowego regulatora turbulencji na przepływ stali w kadzi pośredniej COS, Hutnik-Wiadomości Hutnicze, 78 (12) (2011) 968-971.
- [3] T. Merder, J. Jowsa, A. Bogusławski, Modelowanie przepływu ciekłej stali w kadzi pośredniej typu „Delta”, Prace IMŻ 58 (4) (2006) 87-89.
- [4] G. Solorio-Diaz, R. Davila-Morales, J. d.J. Barreto-Sandoval, H.J. Vergara-Hernandez, A. Ramos-Banderas, S.R. Galvan, Numerical modelling of dissipation phenomena in a new ladle shroud for fluidynamic control and its effect on inclusions removal in a slab tundish, Steel Res. Int. 85 (5) (2014) 863-874.
- [5] J. Zhang, J. Li, Y. Yan, Z. Chen, S. Yang, J. Zhao, Z. Jiang, A comparative study of fluid flow and mass transfer in a trumpet-shaped ladle shroud using large eddy simulation, Metall. and Mater. Trans. B. 47 (1) (2016) 495-507.
- [6] R.D. Morales, S. Garcia-Hernandez, J. d.J. Barreto, C. Ceballos-Huerta, I. Calderon-Ramos, E. Gutierrez, Multiphase flow modeling of slag entrainment during ladle change-over operation, Metall. and Mater. Trans. B 47 (4) (2016) 2595-2606.
- [7] J. Zhang, S. Yang, J. Li, W. Yang, Y. Wang, X. Guo, Large eddy simulation on flow structure in a dissipative ladle shroud a tundish, ISIJ Int. 55 (8) (2015) 1684-1692.
- [8] A. Cwudziński, I. Staniewski, M. Rapała, T. Pasamonik, T. Horyń, R. Kostka, Weryfikacja modelu matematycznego wymiany ciepła podczas przepływu ciekłej stali w kadzi pośredniej do odlewania wlewków kwadratowych, Hutnik-Wiadomości Hutnicze 78 (11) (2011) 916-919.
- [9] S. Joo, R.I.L. Guthrie, Inclusion behavior and heat-transfer phenomena in steelmaking tundish operations: Part I. Aqueous modeling, Metall. Trans. B 24 (1993) 755-765.
- [10] S. Joo, J.W. Han, R.I.L. Guthrie, Inclusion behavior and heat-transfer phenomena in steelmaking tundish operations: Part II. Mathematical model for liquid steel in tundish, Metall. Trans. B, 124 (1993) 767-777.
- [11] S. Joo, J.W. Han, R.I.L. Guthrie, Inclusion behavior and heat-transfer phenomena in steelmaking tundish operations: Part III. Applications-computational approach to tundish design, Metall. Trans. B 24 (1993) 779-788.
- [12] A. Cwudziński, J. Jowsa, Modification of interval geometry of slab tundish and steel flow, Acta Metallurgica Slovaca (13) (2007) 289-293.
- [13] A. Cwudziński, J. Jowsa, Numerical simulation heat transfer in the slab tundish, Metall. Found. Eng. 33 (2) (2007) 97-103.
- [14] P.K. Jha, P.S. Rao, A. Dewan, Effect of height and position of dams on inclusion removal in a six strand tundish, ISIJ Int. 48 (2) (2008) 154-160.
- [15] A. Cwudziński, Numerical and physical prediction of hydrodynamic conditions in one strand slab tundish, Metall. Res. Technol. 111 (1) (2014) 45-55.
- [16] A. Cwudziński, Numerical and physical modeling of liquid steel active flow in tundish with subflux turbulence controller and dam, Steel Res. Int. 85 (5) (2014) 902-917.
- [17] A. Cwudziński, J. Jowsa, Przepływ stali w kadzi pośredniej z wbudowanym podstrumieniowym regulatorem turbulencji, Hutnik-Wiadomości Hutnicze 73 (1) (2006) 7-10.