

WPLYW MODYFIKACJI GEOMETRII WEWNĘTRZNEJ PODSTRUMIENIOWEGO REGULATORA TURBULENCJI NA PRZEPLYW STALI W SZEŚCIOOTWOROWEJ KADZI POŚREDNIEJ – SYMULACJA NUMERYCZNA

ADAM CWUDZIŃSKI, JAN JOWSA

Politechnika Częstochowska, Katedra Ekstrakcji i Recykulacji Metali,
ul. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, e-mail: cwudzinski@mim.pcz.czyst.pl

INFLUENCE OF MODIFICATION INTERNAL GEOMETRY OF UNDER FLUX CONTROLLER OF
TURBULENCE ON STEEL FLOW IN THE SIX-STRAND TUNDISH – NUMERICAL SIMULATION

Abstract

The paper presents results of computer simulation of steel flow in the six-strand tundish. The tundish was equipped with a under flux controller of turbulence. Authors used technique of CFD (Computational Fluid Dynamics) for showing influence different variants of controllers on field of steel flow and curves of RTD (Residence Time Distribution). The research was performed for three variants of modification internal geometry of under flux controller of turbulence.

Key words: tundish, steel flow, under flux controller of turbulence, RTD curves, numerical modeling

1. WSTĘP

Technika modelowania procesów metalurgicznych może odbywać się w dwojaki sposób: poprzez wykonywanie doświadczeń na obiekcie fizycznym oraz poprzez symulacje na obiektach wirtualnych. W obu przypadkach modelowanie może obejmować praktycznie wszystkie etapy składające się na otrzymanie gotowego wyrobu stalowego, od momentu wytopu surowki żelaza do procesów związanych z przeróbką plastyczną stali. W pracach (Krishnakumar K. i in. 1999, Li i Tsukihashi 2000, Han i in. 2001, Pieprzyca i Kudliński 2004, Seshadri i in. 2005, Dyja i in. 2006) modelowanie fizyczne wykorzystano do badania między innymi takich procesów kadziowych jak: VOD, LF, RH Degassing, a także procesu ciągłego odlewania stali oraz walcowania materiałów stalowych. Wymienione wyżej procesy metalurgiczne wraz z takimi jak, proces wytapiania

surowki oraz wdmuchiwanie gazu do pieca Elektrycznego poddawane są modelowaniu przy wykorzystaniu specjalnego oprogramowania (Kuziak 2003, Memoli 2004, Guthrie 2004, Irons 2005, Jowśa i in. 2006, Mróz 2006). Wymienione prace są tylko ułamkiem spośród szeroko dostępnej bibliografii naukowej opisującej powyższe techniki. Na rynku dostępnych jest wiele programów komputerowych wykorzystujących metody numeryczne do analizy złożonych zjawisk ruchu płynów zwanych aplikacjami CFD (Computational Fluid Dynamics). Wśród nich możemy wyróżnić takie, jak: Fluent, Phoenix, Ansys-CFX, Fidap, STAR-CD, STAR-CCM+, czy Comsol. Intensywny rozwój oprogramowania komputerowego sprzyja badaniom, które są odpowiedzią na wzrost konkurencyjności koncernów stalowych, polegającej głównie na poszukiwaniu nowych wydajniejszych technologii wytapiania, odlewania i walcowania stali, które zagwarantują

otrzymanie produktu o wysokiej jakości. Jednocześnie koncerny metalurgiczne dążą do obniżenia kosztów własnych produkcji wyrobów gotowych, co dodatkowo potęguje poszukiwanie nowych rozwiązań technologicznych. Laboratorium komputerowe istniejące w Katedrze Ekstrakcji i Recyrkulacji Metali korzysta z licencji programu Fluent. Zaimplementowane w nim algorytmy są skutecznie wykorzystywane do symulacji zjawisk zachodzących w piecu kadziowym, kadzi pośredniej i krystalizatorze maszyny COS.

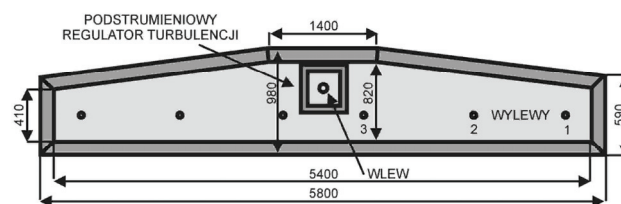
2. PROCES ODLEWANIA STALI

Ciągłe odlewanie stali (COS) jest dominującą technologią odlewania stali na świecie. Podczas ciągłego odlewania stali do priorytetowych zadań należy maksymalne wydłużanie sekwencji odlewniczej dostosowanej do możliwości produkcyjnych łukowych pieców elektrycznych czy konwertorów, jakimi dysponuje dany wydział stalowni i wydajności stanowisk pieców kadziowych. Przy wydłużeniu sekwencji odlewniczej powstają jednak problemy zużywania się materiałów ogniotrwałych, wynikające z kontaktu ciekłego metalu z materiałem ceramicznym, z którego wykonane są ściany i wylewy kadzi pośredniej oraz urządzenia sterujące przepływem stali np. przegrody, przelewy oraz podstrumieniowe regulatory turbulencji (PRT). Dodatkowo może pojawić się także problem zarastania lub wymywania wylewów kadzi pośredniej spowodowanym osadzaniem się wtrąceń niemetalicznych i przepływem stali. Wymienione zjawiska prowadzą do zmiany charakteru przepływu stali i zaburzeń prawidłowego transportu stali do poszczególnych krystalizatorów. Zakłócenia te mogą wpływać na tworzenie się naskórka krzepnącego w krystalizatorze pasma stali i ujawnić się w postaci wad powierzchniowych i wewnętrznych takich, jak: pęknięcia, segregacja na styku frontów krystalizacji, porowatość oraz wydzielenia w postaci wtrąceń niemetalicznych, pogarszając przez to jakość odlewanej wlewka ciągłego. Wyłożenie ogniotrwałe kadzi pośredniej jest narażone na degradację szczególnie w strefie zalewania i otworów wylewowych oraz wszędzie tam, gdzie wzrasta intensywność przepływu. Materiał ogniotrwały w obszarze zalewania kadzi pośredniej jest często chroniony przez wmontowanie w dno kadzi urządzeń w postaci płyty podstrumieniowej lub podstrumieniowego regulatora turbulencji (PRT). Dodatkową zaletą PRT jest modyfikacja przepływu stali, ochrona ścian bocznych

kadzi oraz minimalizacja burzliwości przepływu poza strefą oddziaływania PRT, co wynika z prac (Cwudziński i in. 2005a, 2005b, 2005c, Cwudziński i Jowsa 2006). W niniejszym artykule zamieszczono wyniki obliczeń dotyczące wpływu zmiany geometrii wewnętrznej PRT na modyfikację przepływu stali w kadzi pośredniej poprzez ocenę pól prędkości i krzywych czasu przebywania stali RTD (Residence Time Distribution).

3. CHARAKTERYSTYKA BADANEGO OBIEKTU

Wykorzystanym w badaniach obiektem jest sześciokątowa kadź pośrednia. Główne wymiary kadzi pośredniej i umiejscowienie podstrumieniowego regulatora turbulencji przedstawiono na rysunku 1. Kadź jest przeznaczona do odlewania wlewów kwadratowych i prostokątnych. W analizie rozpatrywano połowę obiektu ze względu na jego symetryczność. Dla celów opisowych przyjęto następującą numerację otworów wylewowych: otwór znajdujący się najbliżej regulatora posiada numer 3, otwór środkowy - numer 2 i otwór skrajny - numer 1.



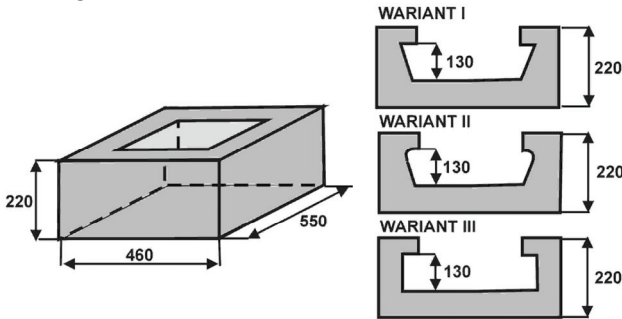
Rysunek 1. Wymiary kadzi pośredniej

Figure 1. Dimensions of tundish

Przyjęto, że kadź pośrednia będzie wyposażona w urządzenie sterujące przepływem stali w postaci podstrumieniowego regulatora turbulencji (PRT). Stal do kadzi wlewana jest w ten sposób, że w środek regulatora wpływa główny strumień stali. Pozytywne działanie PRT na przepływ metalu w kadzi pośredniej zostało potwierdzone w praktyce metalurgicznej i obecnie trwa poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych tego typu urządzeń. Różne propozycje geometrii regulatorów turbulencji przedstawili w swoich pracach (Morales i in. 2000, Lopez-Ramirez i in. 2001, Tripathi i Ajmani 2005, Kumar i in. 2005). W artykule zaprezentowano modyfikację geometrii wewnętrznej regulatora zachowującego takie same wymiary zewnętrzne, co przedstawiono na rysunku 2. Wyniki obliczeń dla pierwszego wariantu kształtu wewnętrznego regulatora przedstawiono w pracy (Cwudziński i Jowsa 2006). Regulator w pierwszym wariantcie ma pochylone



ścianki wewnętrzne. W drugim wariantie modyfikacji geometrii zaokrąglono naroża regulatora pomiędzy jego pochylonymi ściankami wewnętrznymi a kołnierzem. Promień zaokrąglenia dla tego wariantu wynosi 30 mm. W trzecim wariantcie ścianki wewnętrzne ustawione są pod kątem 90° w stosunku do dna regulatora.



Rysunek 2. Podstrumieniowy regulator turbulencji i warianty modyfikacji geometrii wewnętrznej regulatora

Figure 2. Under flux controller of turbulence and modification variants of internal geometry of controller

4. METODYKA BADAŃ

W badaniach symulacyjnych wykorzystano dwa programy komputerowe: Gambit i Fluent. W programie Gambit wygenerowano dla geometrii obiektu siatkę obliczeniową oraz przypisano rodzaje warunków brzegowych dla wszystkich płaszczyzn obiektu. Następnie w programie Fluent wykorzystując metodę objętości kontrolnych wykonano numeryczne rozwiązanie układu równań będących matematycznym modelem przepływu płynu w kadzi. Modelowanym płynem była ciekła stal o gęstości: 7010 kg/m³ i lepkości 0,007 kg/m·s. Symulacje wykonano dla warunków izotermicznych. Podstawowe równania modelu matematycznego są następujące:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\vec{\tau} = \mu \left[\left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

gdzie: $\vec{\tau}$ – tensor naprężeń [Pa], t – czas [s], \vec{v} – wektor prędkości [m/s], p – ciśnienie [Pa], ρ – gęstość [kg/m³], \vec{g} – przyspieszenie ziemskie [m/s²], μ – lepkość [kg/m·s], I – tensor jednostkowy.

Ze względu na burzliwy charakter przepływu stali przez kadź pośrednią wybrano model turbulencji k-ε opisany równaniami (4) i (5):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

gdzie: μ_t – dynamiczna lepkość turbulentna [kg/m·s], k – kinetyczna energia turbulencji [m²/s²], szybkość dyssypacji turbulencji [m²/s³], x_i – współrzędna kartezjańska, G – człon produkcji energii turbulencji. Stałe semiempiryczne modelu przyjmują następujące wartości: $C_1 = 1,44$, $C_2 = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

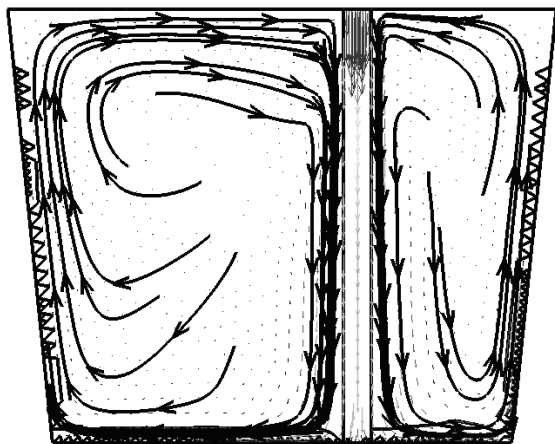
Proces iteracyjny wykonano stosując solver „segregated”. Kontrolowany poziom residuów znajdował się na poziomie 10⁻³. Przestrzegano także spełnienia nie przekraczalnych wartości parametru y^+ (30÷60) świadczących o prawidłowym doborze siatki w warstwach przyściennych, co szerzej opisano w pracy (Merder i in. 2003).

5. WYNIKI OBLICZEŃ

W wyniku obliczeń otrzymano rozkład pól ruchu metalu we wnętrzu kadzi pośredniej. Na rysunku 3 przedstawiono mapę ruchu metalu w kadzi bez regulatora (Cwudziński i Jowsa 2006). Porównując rysunek 3 z rysunkami 4-6 można zaobserwować wpływ regulatora na modyfikację przepływu. Z rysunków 4-6 widać, że metal pod działaniem PRT jest kierowany w kierunku przeciwnym do wpływającego strumienia stali. W obiekcie z regulatorem PRT pojawia się dodatkowa strefa cyrkulacji stali, która nie występuje w kadzi bez regulatora.

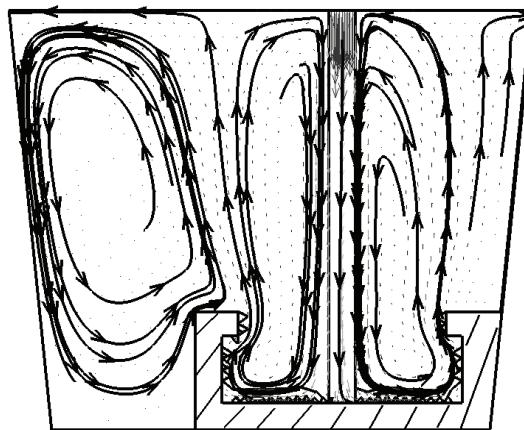
Następnym etapem badań było wykonanie charakterystycznych krzywych RTD dla oceny możliwości rafinacji wtrąceń niemetalicznych. W tym celu użyto wirtualnego znacznika za pomocą którego otrzymano krzywe RTD przedstawione na rysunkach 7-9. Znacznik był dodany w miejscu wpływania stali do kadzi pośredniej i następnie monitorowany na poszczególnych wylewach kadzi. W wyniku zmian stężenia znacznika w funkcji czasu na poszczególnych wylewach otrzymano krzywe RTD.





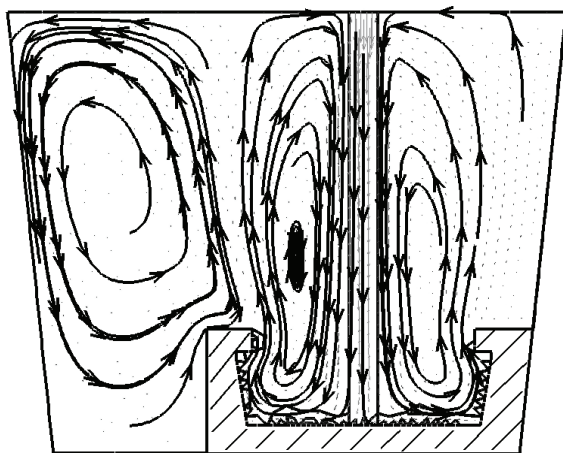
Rysunek 3. Kierunki przepływu stali na płaszczyźnie symetrii w kadzi pośredniej bez regulatora

Figure 3. Directions of steel flow on the symmetry plan in the tundish without controller



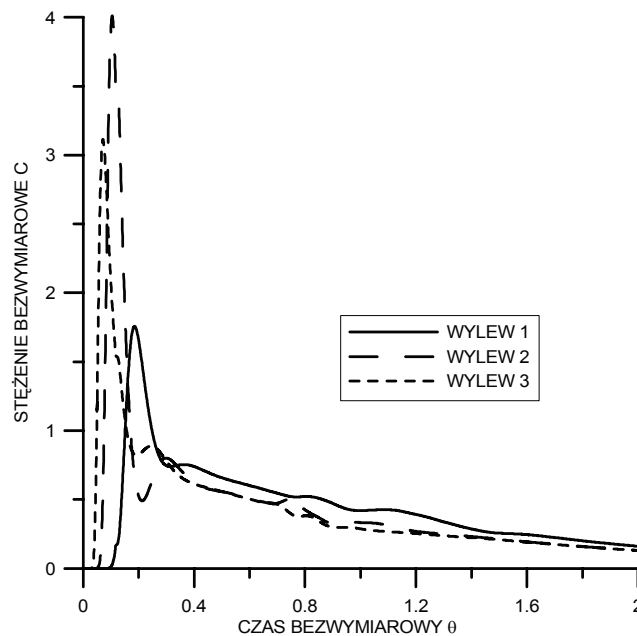
Rysunek 6. Kierunki przepływu stali na płaszczyźnie symetrii w kadzi pośredniej z regulatorem (wariant III)

Figure 6. Directions of steel flow on the symmetry plan in the tundish with controller (variant III)



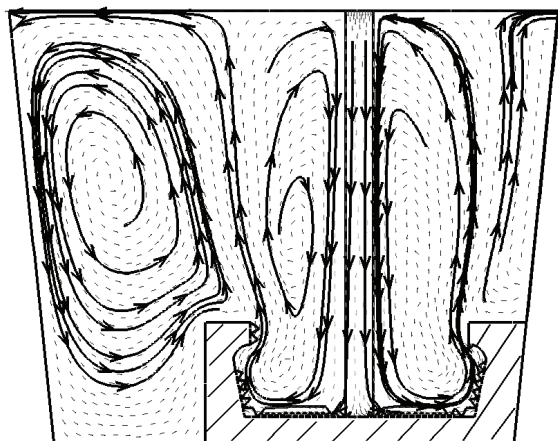
Rysunek 4. Kierunki przepływu stali na płaszczyźnie symetrii w kadzi pośredniej z regulatorem (wariant I)

Figure 4. Directions of steel flow on the symmetry plan in the tundish with controller (variant I)



Rysunek 7. Krzywa RTD ruchu stali w kadzi z podstrumieniowym regulatorem turbulencji (wariant I)

Figure 7. RTD curve of movement steel in the tundish with under flux controller of turbulence (variant I)

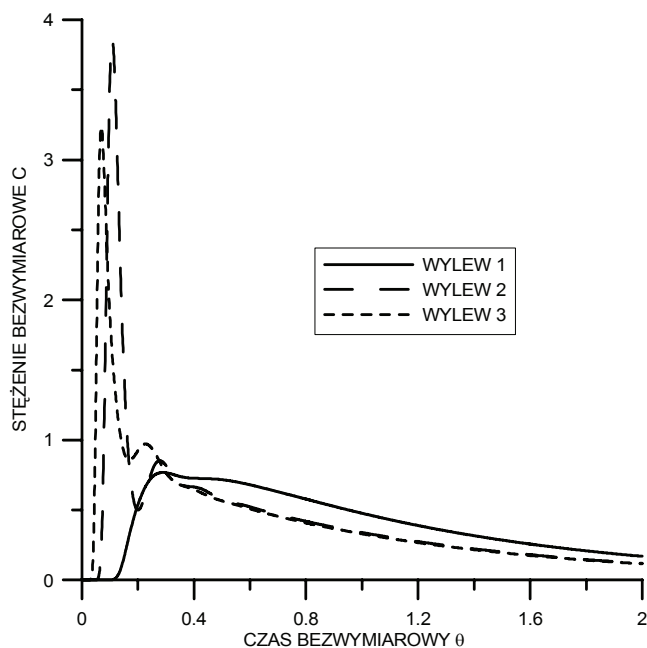


Rysunek 5. Kierunki przepływu stali na płaszczyźnie symetrii w kadzi pośredniej z regulatorem (wariant II)

Figure 5. Directions of steel flow on the symmetry plan in the tundish with controller (variant II)

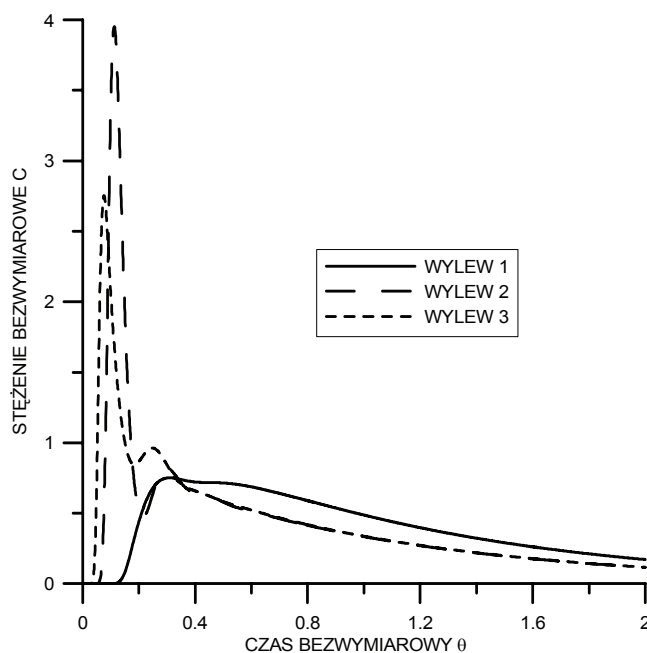
Z rysunków 7-9 widać, że modyfikacja wewnętrznych ścian istotnie wpływa na kształt krzywych RTD, szczególnie dotyczy to wylewu 1. Dla wylewu 2 i 3 występujące różnice są już mniej wyraźne. Z kształtu krzywych RTD jest możliwe określenie poszczególnych stref przepływu dla badanego obiektu.





Rysunek 8. Krzywa RTD ruchu stali w kadzi z podstrumieniowym regulatorem turbulencji (wariant II)

Figure 8. RTD curve of movement steel in the tundish with under flux controller of turbulence (variant II)



Rysunek 9. Krzywa RTD ruchu stali w kadzi z podstrumieniowym regulatorem turbulencji (wariant III)

Figure 9. RTD curve of movement steel in the tundish with under flux controller of turbulence (variant III)

Zazwyczaj w kadziach wyróżnia się trzy główne rodzaje przepływu: przepływ stagnacyjny, przepływ tłokowy i przepływ z idealnym mieszaniem. Poszczególne udziały stref przepływu dla badanego obiektu obliczono według wzorów przedstawionych w pracach (Sahai i Emi 1996, Mazumdar i Guthrie 1999) i wykorzystanych w pracy (Cwudziński i Jowsa 2006). Wyniki obliczonych udziałów po-

szczególnych przepływów w badanych kadziach pośrednich zaprezentowano w tabelicy 1. Otrzymane wyniki wielkości poszczególnych stref przepływu wskazują nieduże różnice pomiędzy rozpatrywanymi przypadkami kadzi. W kadzi pośredniej z regulatorem turbulencji (wariantu III) otrzymano najmniejszy udział przepływu stagnacyjnego, który jest najbardziej niepożądanym przepływem w kadzi pośredniej. Bowiern przepływ stagnacyjny w małym stopniu sprzyja rafinacji stali z wtrąceń niemetalicznych oraz powoduje lokalne obniżenie temperatury metalu prowadzące do powstania zakrzepów.

Tablica 1. Charakterystyka przepływu stali dla kadzi pośredniej z różnymi wariantami geometrii wewnętrznej podstrumieniowych regulatorów turbulencji

Table 1. Steel flow characteristics for tundish with different variants internal geometry of under flux controller of turbulence

Rozpatrywane warianty kadzi pośrednich	Średni udział [%]		
	Przepływ stagnacyjny	Przepływ tłokowy	Przepływ z idealnym mieszaniem
Kadz pośrednia z podstrumieniowym regulatorem turbulencji (wariant I)	39,36	6,2	54,23
Kadz pośrednia z podstrumieniowym regulatorem turbulencji (wariant II)	38,9	7,76	53,33
Kadz pośrednia z podstrumieniowym regulatorem turbulencji (wariant III)	38,5	8,13	51,1

6. PODSUMOWANIE

Opracowany model matematyczny przepływu stali w kadzi pośredniej oraz zawarte w programie Fluent algorytmy numeryczne pozwalają na ocenę hydrodynamiczną badanego obiektu. Wykorzystując dostępny algorytm zobrazowano proces przepływu stali przez każdą pośrednią oraz oceniono wpływ zastosowanych urządzeń sterujących przepływem. Otrzymano w rezultacie obliczeń numerycznych rozkłady pól wektorów prędkości stali w wnętrzu kadzi, a także opracowano krzywe RTD i wyliczono udziały poszczególnych przepływów. Reasumując, wyniki analizy hydrodynamicznej wskazują na nieznaczny wpływ dokonanych modyfikacji PRT na charakter przepływu stali w kadzi. Dlatego, aby uzyskać istotne zmniejszenie przepływu stagnacyjnego w kadzi pośredniej należy dokonać innego rodzaju modyfikacji regulatora np. poprzez zmianę



jego wielkości. Wykazano, że zastosowanie programu typu CFD jest przydatne przy projektowaniu i optymalizacji konstrukcji urządzeń przemysłowych. Istniejące i dostępne na rynku programy komputerowe mogą stanowić cenną pomoc dla prowadzonych badań nad wyjaśnieniem złożonych mechanizmów fizycznych w obiektach hutniczych oraz przy wdrażaniu nowych rozwiązań do przemysłu.

LITERATURA

- Cwudziński, A., Jowša, J., Warzecha, M., 2005a, Strefy turbulencji w kadzi pośredniej z podstrumieniowym regulatorem przepływu, *XIII Konf. Produkcja i Zarządzanie w Hutnictwie*, 91-94.
- Cwudziński, A., Jowša, J., Merder, T., 2005b, Wpływ podstrumieniowego regulatora przepływu na przepływ ciekłej stali w kadzi pośredniej, *XIII Konf. Produkcja i Zarządzanie w Hutnictwie*, 95-98.
- Cwudziński, A., Jowša, J., Merder, T., Warzecha, M., 2005c, Strefa wlewowa kadzi pośredniej z użyciem i bez podstrumieniowego regulatora przepływu (inhibitora turbulencji), *XV Int. Conf. Iron and Steelmaking*, 238-241.
- Cwudziński, A., Jowša, J., 2006, Przepływ stali w kadzi pośredniej z wbudowanym podstrumieniowym regulatorem turbulencji, *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*, 1, 7-10.
- Dyja, H., Knapieński, M., Markowski, J., Frączek, T., Kawalek, A., 2006, Fizyczne modelowanie procesu walcowania normalizującego blach grubych ze stali S355J2G3, *VII Międzynarodowa Konferencja Nowe Technologie i Osiągnięcia w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej*, 117-120.
- Guthrie, R. I. L., 2004, Fluid Flow in Metallurgy – Friend or Foe?, *Metall. Mater. Trans. B*, 35B, 417-437.
- Han, J. W., Heo, S. H., Kam, D. H., You, B. D., Pak, J. J., Song, H. S., 2001, Transient Fluid Flow Phenomena in a Gas Stirred Liquid Bath with Top Oil Layer – Approach by Numerical Simulation and Water Model Experiments, *ISIJ Int.*, 41, 1165-1173.
- Irons, G. A., 2005, Development in Electric Arc Furnace Steelmaking, *AIST Trans.*, 111-123.
- Jowša, J., Derda, W., Warzecha, M., Merder, T., Staniewski, I., Cwudziński, A., 2006, Modelowanie numeryczne wymiany masy, ciepła i pędu podczas ciągłego odlewania stali i w procesach metalurgii pozapiecowej, *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*, 73, 252-256.
- Krishnakumar, K., Ballal, N. B., Sinha, P. K., Sardar, M. K., Jha, K. N., 1999, Water Model Experiments on Mixing Phenomena in a VOD Ladle, *ISIJ Int.*, 39, 419-425.
- Kumar, A., Mazumdar, D., Koria, S. C., 2005, Experimental Validation of Flow and Tracer-Dispersion Models in a Four-Strand Billet-Casting Tundish, *Metall. Mater. Trans. B*, 36B, 777-785.
- Kuziak, R., Mazur, A., Zalecki, W., 2003, Zastosowanie metod symulacji fizycznej i matematycznego modelowania do przewidywania powstawania wad wlewka w procesie ciągłego odlewania stali, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 70, 274-283.
- Li, B., Tsukihashi, F., 2000, Modeling of Circulating Flow in RH Degassing Vessel Water Model Designed for Two- and Multi-legs Operations, *ISIJ Int.*, 40, 1203-1209.
- Lopez-Ramirez, S., Barreto, J. De J., Palafox-Ramos, J., Morales, R. D., Zacharias, D., 2001, Modeling Study of the Influence of Turbulence Inhibitors on the Molten Steel Flow, Tracer Dispersion, and Inclusion Trajectories in Tundish, *Metall. Mater. Trans. B*, 31B, 615-627.
- Mazumdar, D., Guthrie, R. I. L., 1999, The Physical and Mathematical Modelling of Continuous Casting Tundish Systems, *ISIJ Int.*, 39, 524-547.
- Memoli, F., Mapelli, C., Ravanelli, P., Corbella, M., 2004, Simulation of Oxygen Penetration and Decarburisation in EAF Using Supersonic Injection System, *ISIJ Int.*, 44, 1342-1349.
- Merder, T., Jowša, J., Warzecha, M., 2003, Wpływ gęstości siatki obliczeniowej na wyniki obliczeń modelu kadzi pośredniej, *IV Międz. Sesja Naukowa Nowe Technologie i Osiągnięcia w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej*, 74-78.
- Mróz, S., 2006, Utrata stabilności pasma podczas procesu walcowania w wykrojach, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 73, 261-266.
- Morales, R. D., Barreto, J. de J., Lopez-Ramirez, S., Palafox-Ramos, J., Zacharias, D., 2000, Melt Flow Control in a Multistrand Tundish Using a Turbulence Inhibitor, *Metall. Mater. Trans. B*, 31B, 1505-1515.
- Pieprzyca, J., Kudliński, Z., 2004, Modelowanie fizyczne zjawisk hydrodynamicznych zachodzących podczas ciągłego odlewania stali, *II Międz. Konf. Ciągłe Odlewanie Stali*, 257-264.
- Sahai, Y., Emi, T., 1996, Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes, *ISIJ Int.*, 36, 667-672.
- Seshadri, V., Silva, C. A., Da Silva, I. A., 2005, Physical modeling simulation of refining processes in Brazilian Steel Industry, *Scand. J. Metall.*, 34, 340-352.
- Tripathi, A., Ajmani, S. K., 2005, Numerical Investigation of Fluid Flow Phenomenon in a Curved Shape Tundish of Billet Caster, *ISIJ Int.*, 45, 1616-1625.

Received: September 23, 2006

Received in a revised form: October 26, 2006

Accepted: October 27, 2006

