

# **Badanie przepływu kąpieli metalowej przez kadź pośrednią urządzenia COS na modelu zimnym. Wyznaczenie wpływu zróżnicowanej szybkości wyciągania pasm na przepływ kąpieli w kadzi pośredniej**

## **I. Część teoretyczna**

Ciągłe odlewanie stali jest procesem, który w ciągu produkcyjnym wyznacza rytm i synchronizację wszystkich pozostałych węzłów produkcyjnych. W chwili obecnej odlewa się w sposób ciągły bardzo szeroki asortyment gatunków stali. Wraz z poszerzaniem się tego spektrum rosną również wymagania odnośnie jakości odlewanych wlewków. Wymagania dotyczą przede wszystkim czystości stali, głównie ilości i rozmieszczenia tlenkowych wtrąceń niemetalicznych. Wymagania stawiane ciekłej stali, która może być odlewana na maszynie COS są sformułowane jednoznacznie. Obok właściwie ustalonej temperatury kąpieli kluczową rolę odgrywa zawartość tlenu. Z tego względu ciąg technologiczny produkcji stali winien zapewnić ochronę metalu przed dostępem powietrza. Niedociągnięcia w tym zakresie mogą powodować poważne problemy produkcyjne objawiające się zarastaniem wylewów czy w skrajnym wypadku wyciekami metalu pod krystalizatorem. Skutki ekonomiczne tego typu zdarzeń odbijają się bardzo negatywnie na wynikach pracy stalowni. Regulacja zawartości tlenu w kąpieli przy braku urządzenia do próżniowego odgazowania kąpieli metalowej jest zadaniem niezwykle trudnym. W związku z powyższym w warunkach m. in. Stalowni Konwertorowej HTS należy wykorzystać wszystkie istniejące możliwości techniczne do obniżania zawartości tlenu w kąpieli. Jednym z takich rozwiązań jest uznanie kadzi pośredniej urządzenia COS za reaktor metalurgiczny, który powinien umożliwiać maksymalne usuwanie wtrąceń niemetalicznych. Spełnienie tak postawionego zadania wymaga dokonania zmian konstrukcyjnych kadzi pośredniej. Kierunki tych zmian powinny zostać wyznaczone w oparciu o badania na fizycznym modelu kadzi pośredniej. Metoda oparta o badania modelowe jest powszechnie stosowaną metodą przy badaniu przepływów w metalurgii żelaza.

### ***Rola kadzi pośredniej w procesie ciągłego odlewania stali***

Podstawowa funkcja kadzi pośredniej w urządzeniu do ciągłego odlewania stali polega na obniżeniu ciśnienia ferrostatycznego metalu oraz rozdzieleniu kąpieli na wymaganą liczbę odlewanych pasm. Jej obecność umożliwia ponadto sekwencyjne odlewanie pozwalając na wymianę kadzi głównych bez przerywania procesu. Realizacja wszystkich wymienionych czynników brana jest pod uwagę przy optymalizacji jej konstrukcji. Głównymi parametrami

są tu całkowita objętość robocza kadzi pośredniej oraz jej wysokość.

Wraz ze zdobywaniem doświadczeń eksploatacyjnych zwrócono uwagę na kadź pośrednią jako na reaktor metalurgiczny, w którym możliwe jest przeprowadzenie końcowej korekty składu chemicznego kąpieli polegającej na asymilacji wtrąceń niemetalicznych. Równocześnie stwierdzono, iż nieprawidłowości w eksploatacji kadzi pośredniej mogą prowadzić do istotnego pogorszenia parametrów odlewanej stali i w skrajnym przypadku powodować konieczność przerwania procesu ciągłego odlewania. Analiza licznych opracowań [1÷4] zajmujących się problemem kadzi pośredniej urządzenia COS pozwala wysunąć wnioski, iż zarówno zjawiska fizyczne czyli przepływ metalu przez kadź jak i reakcje chemiczne na granicy metal - żużel powinny być w pełni kontrolowane. Tylko w takim przypadku możliwe jest odlanie kęsisk o wymaganej jakości.

Parametrem pozwalającym w przybliżeniu ocenić przepływ kąpieli przez kadź pośrednią jest średni czas przebywania elementarnej objętości metalu w kadzi. Przy założeniu całkowitego braku mieszania kąpieli czyli występowaniu tzw. przepływu tłokowego (ang. *plug flow*), czas przebywania elementarnej objętości kąpieli można wyliczyć w oparciu o parametry technologiczne według wzoru:

$$t_R = \frac{V_{kp}}{\dot{V}} \quad (1)$$

gdzie:

$t_R$  - czas przebywania elementarnej objętości w kadzi pośredniej (ang. *residence time*), [min],

$V_{kp}$  - objętość kąpieli w kadzi pośredniej, [m<sup>3</sup>],

$\dot{V}$  - objętościowy przepływ kąpieli przez kadź pośrednią, [m<sup>3</sup>/min].

Objętościowy strumień przepływu  $\dot{V}$  wylicza się z kolei według wzoru:

$$\dot{V} = n_p \cdot V \cdot F \quad (2)$$

gdzie:

$n_p$  - liczba odlewanych pasm, [-],

$V$  - szybkość wyciągania pasma, [m/min],

$F$  - pole przekroju pojedynczego pasma, [m<sup>2</sup>].

Wyliczony według wzoru (1) czas  $t_R$  jest teoretycznie najdłuższym z możliwych

średnim czasem przebywania elementarnej objętości metalu w kadzi pośredniej. W praktyce osiąga on wartości o wiele mniejsze. Spowodowane jest to charakterem rzeczywistego przepływu kąpieli przez kadź, w której tworzą się tzw. strefy „martwe” zmniejszające efektywną objętość kadzi. Prowadzi to w konsekwencji do występowania przepływu, który można określić jako tunelowy. Kąpiel metalowa po wypłynięciu z króćca wylewowego kadzi głównej przemieszcza się natychmiast do strefy otworów wylewowych nad krystalizatorami. Zjawisko to powoduje, iż efektywny czas przebywania w strefie oddziaływania żużla kadziowego jest dużo krótszy niż wynika to ze wzoru (1).

Powodem dla którego należy dążyć do maksymalizacji czasu  $t_R$  jest występujące w kadzi pośredniej zjawisko asymilacji wtrąceń niemetalicznych, głównie wtrąceń tlenkowych typu  $Al_2O_3$ . Warunkiem prawidłowego przebiegu asymilacji wtrąceń jest stworzenie warunków umożliwiających dotarcie wtrąceń do strefy metal - żużel oraz utworzenie żużla zdolnego do ich asymilacji. Teoretyczne obliczenia czasu wypływania wtrąceń z kąpieli prowadzą do wniosku, iż jest on dużo dłuższy niż możliwy do osiągnięcia czas  $t_R$ . Z tego względu należy z góry założyć, iż transport wtrąceń musi częściowo odbywać się na drodze transportu konwekcyjnego. Osiągnięcie tego celu możliwe jest poprzez skierowanie strumienia kąpieli do granicy metal żużel przy pomocy odpowiednio uformowanych przegród zainstalowanych w kadzi. Korzystny wpływ przegród polega nie tylko na poprawie asymilacji wtrąceń ale również na zmniejszeniu objętości stref „martwych” w kadzi.

Praktyczna realizacja postawionego celu napotyka na trudności związane z kinetyką układu. Ruch kąpieli w strefie granicznej nie może prowadzić do zaburzeń w postaci zjawiska porywania żużla w głąb metalu czy przerywania warstwy żużla pokrywającej kąpiel.

Przeprowadzone rozważania prowadzą również do wniosku, iż jakość żużla odgrywa w procesie asymilacji rolę kluczową. Parametry, które mają tu znaczenie podstawowe to skład chemiczny żużla, jego lepkość oraz napięcie powierzchniowe metalu i asymilowanych wtrąceń.

### ***Fizyczny model kadzi pośredniej dla maszyny COS pracującej w Stalowni Konwertorowej HTS***

#### *Kryteria podobieństwa reaktora rzeczywistego i jego modelu fizycznego*

Stosowanie do badań wykonanych w skali, fizycznych modeli reaktorów rzeczywistych znalazło w metalurgii powszechne zastosowanie. Dotyczy to przede wszystkim

badania mieszania stali w kadzi, w urządzeniu do obiegowego odgazowania metodą RH oraz do badania przepływu kąpieli przez kadź pośrednią urządzenia COS [5, 6]. We wszystkich tych modelach stosuje się wodę. Wytłumaczenia tego faktu należy szukać nie w powszechnej jej dostępności lecz w zbliżonej wartości lepkości kinematycznej wody w 20 °C wynoszącej 1 cs oraz lepkości kinematycznej kąpieli metalowej w temperaturze 1600°C wynoszącej 0,9 cs. Lepkość kinematyczna jest stosunkiem lepkości do gęstości danej cieczy.

Spośród wielu możliwych do przyjęcia kryteriów podobieństwa przyjmuje się, że obok podobieństwa geometrycznego najważniejszą rolę przy badaniu procesu przepływu i mieszania kąpieli odgrywa podobieństwo liczby Frouda  $Fr$ . Liczba Frouda definiowana jest jako stosunek siły bezwładności  $F_b$  do siły grawitacji  $F_g$ .

$$Fr = \frac{F_b}{F_g} = \frac{V^2}{gL} \quad (3)$$

gdzie:

$V$  - prędkość, [m/s],

$g$  - przyspieszenie grawitacyjne, [m/s<sup>2</sup>],

$L$  - charakterystyczny wymiar liniowy, [m].

Stąd podobieństwo oparte o kryterium liczby Frouda przyjmuje postać:

$$\left(\frac{V^2}{gL}\right)_M = \left(\frac{V^2}{gL}\right)_R \quad (4)$$

gdzie:

$M$  - model,

$R$  - reaktor rzeczywisty.

Dokonując prostego przekształcenia otrzymuje się wyrażenie:

$$V_M^2 = \left(\frac{L_M}{L_R}\right) \cdot V_R^2 \quad (5)$$

Ponieważ stosunek  $\left(\frac{L_M}{L_R}\right)$  jest skalą w jakiej wykonano model, szybkość przepływu kąpieli w modelu powinna wynosić:

$$V_M = \sqrt{\lambda} \cdot V_R \quad (6)$$

gdzie:

$\lambda$  - skala modelu.

Z równania (6) wynika jednoznacznie, że im bardziej wielkość modelu zbliżona jest

do wymiarów reaktora rzeczywistego tym bardziej zbliżone są prędkości przepływów w reaktorze i modelu. W niektórych przypadkach wygodniejsze do kontroli jest badanie strumienia przepływu objętości kąpieli wyrażonego w m<sup>3</sup>/s. W takim przypadku proste przekształcenie równania (6) prowadzi do równania

$$\dot{V}_M = \lambda^{2,5} \cdot \dot{V}_R \quad (7)$$

gdzie:

$\dot{V}_M$  - strumień objętości kąpieli w modelu, [m<sup>3</sup>/s],

$\dot{V}_R$  - strumień objętości kąpieli w reaktorze rzeczywistym, [m<sup>3</sup>/s].

Spośród innych liczb kryterialnych, które znajdują zastosowanie przy modelowaniu przepływów wymienić należy liczbę Reynoldsa, Webera, Grashofa, Prandtla, Macha i Archimedes. Spełnienie wszystkich wynikających z nich kryteriów podobieństwa jest jednak w zaproponowanym sposobie przeprowadzenia eksperymentów niemożliwe. Z tego względu w dalszych rozważaniach uwzględnione zostanie podobieństwo wynikające z kryterium określonym liczbą Frouda.

## II. Cel ćwiczenia

Celem prowadzonego eksperymentu jest poprawa parametrów konstrukcyjnych kadzi pośredniej poprzez wprowadzenie do niej systemu przegród. Miara oceny każdego z testowanych wariantów są trzy następujące kryteria:

- a) wartość maksymalna sygnału rejestrowanego w krystalizatorze,
- b) procent udziału przepływu tłokowego,
- c) procent udziału strefy martwej.

*ad. a) Wartość maksymalna sygnału rejestrowanego w krystalizatorze*

Pierwsze z kryteriów odnoszące się do wartości maksymalnej mierzonego sygnału charakteryzuje proces mieszania kąpieli. Im wartość tego parametru jest większa tym lepsze są parametry przepływu. W celu ułatwienia oceny różnych wariantów według powyższego kryterium, wprowadzono normalizację sygnału maksymalnego, którą opisuje równanie:

$$A_i^{\max} = \frac{\gamma_i^{\max}}{\gamma_{bp}^{\max}} \quad (8)$$

gdzie:

$\gamma_i^{\max}$  - rzeczywista maksymalna wartość przewodnictwa właściwego zarejestrowana dla wariantu „I” rozmieszczenia przegród, [mS/cm],

$\gamma_{bp}^{\max}$  - maksymalna wartość przewodnictwa zarejestrowana dla kadzi bez zainstalowanych przegród, [mS/cm],

$A_i^{\max}$  - bezwymiarowa wartość maksymalna sygnału rejestrowanego w krystalizatorze.

*ad. b) Procent udziału przepływu tłokowego*

Drugie kryterium oceny przepływu kąpieli przez kadź definiuje równanie:

$$PF = \frac{t_{\text{opóźnienia}}}{t_R} \cdot 100\% \quad (9)$$

gdzie:

$PF$  - udział przepływu tłokowego, [%],

$t_{\text{opóźnienia}}$  - czas jaki upływa od momentu wprowadzenia znacznika do chwili zarejestrowania jego obecności w krystalizatorze, [s],

$t_R$  - teoretyczny czas przebywania znacznika w kadzi obliczany wg równania (1), [s].

Podobnie jak w przypadku kryterium pierwszego wartość udziału przepływu tłokowego powinna być jak największa.

*ad. c) Procent udziału strefy martwej*

Ostatnie z przedstawionych kryteriów pozwala ocenić kadź pod kątem występowania w niej tzw. strefy „martwej” czyli strefy słabego przepływu. Udział strefy „martwej” określa się jako procent znacznika pozostający w kadzi po upływie czasu równego  $2t_R$ .

$$S_m = \frac{V_{kp} \cdot c_{2t_R}}{m_{KOH}} \cdot 100\% \quad (10)$$

gdzie:

$S_m$  - udział strefy „martwej”, [%],

$c_{2t_R}$  - stężenie znacznika po upływie czasu  $2t_R$ , [kg/m<sup>3</sup>],

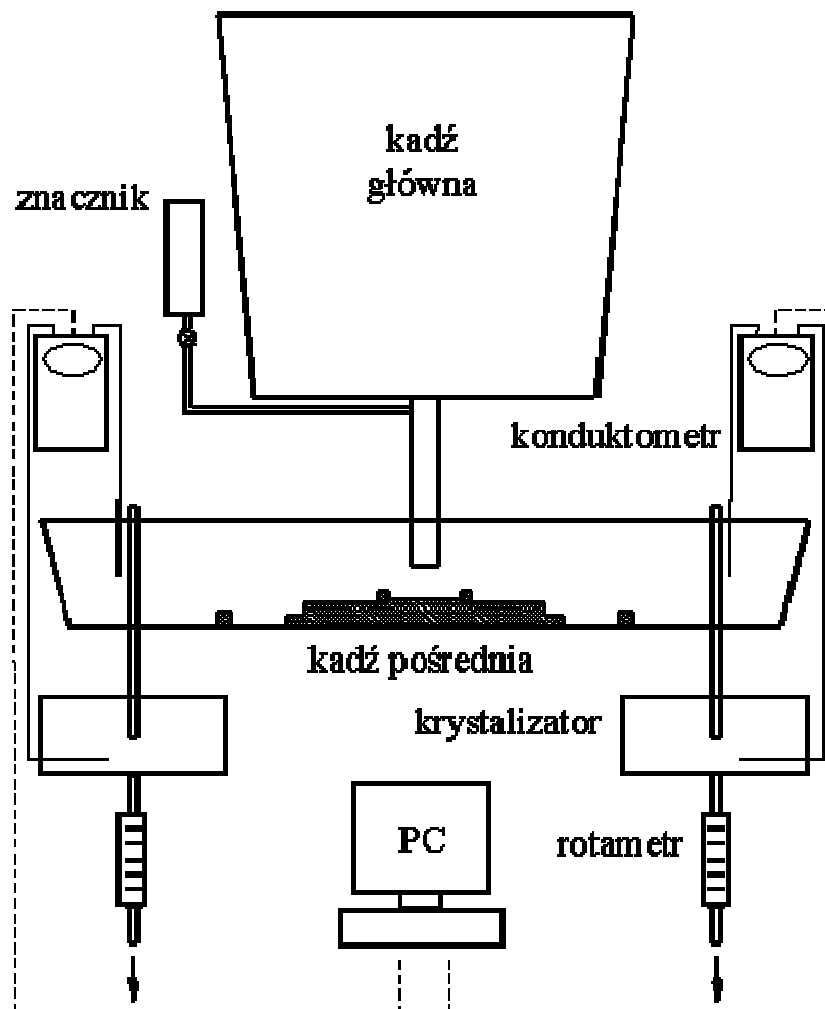
$m_{KOH}$  - początkowa masa wprowadzonego znacznika, [kg],

$V_{kp}$  - objętość kadzi pośredniej, [m<sup>3</sup>].

Udział procentowy strefy „martwej” powinien być ze zrozumiałych względów jak najmniejszy.

### III. Opis stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze umożliwiające symulację przepływu kąpieli w urządzeniu do ciągłego odlewania przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska laboratoryjnego do badań przepływu kąpieli przez kadź pośrednią urządzenia do ciągłego odlewania stali.

Główny element stanowi w nim model kadzi pośredniej wykonany w skali 1:8 w odniesieniu do kadzi pośredniej eksploatowanej w HTS. Model kadzi wyposażony został podobnie jak w kadzi rzeczywistej w zamknięcia zatyczkowe. Zarówno w modelu kadzi głównej jak i kadzi pośredniej zastosowano wykonane w skali wylewy zanurzeniowe. W celu kontroli natężenia przepływu kąpieli pod każdym z dwu krystalizatorów zainstalowano rotametry. Do oceny charakteru przepływu kąpieli przez kadź pośrednią zastosowano metodę znacznika. Wylew z kadzi głównej wyposażono w dozownik, który umożliwia wprowadzenie

do kadzi ustalonej objętości (10 ml) 5% roztworu KOH. Wprowadzone KOH zaburza przewodnictwo właściwe kąpielii w kadzi. Zmiany przewodnictwa rejestrowane są niezależnie w każdym z krystalizatorów. Pomiar przewodnictwa właściwego wykonuje się za pomocą konduktometrów CC3 17 z wyjściem cyfrowym, dzięki czemu wyniki pomiarów rejestrowane są w sposób automatyczny. Wynikiem każdego z przeprowadzonych eksperymentów jest uzyskanie krzywej typu RTD (ang. *residence time distribution*), która stanowi podstawę do oceny aktualnych warunków przepływu kąpielii przez kadź pośrednią.

#### IV. Przebieg ćwiczenia

W ramach ćwiczenia należy przeprowadzić symulację przepływu kąpielii przez kadź pośrednią w dwu wariantach - bez przegród oraz z przegrodami. Rodzaj stosowanych przegród oraz sposób ich rozmieszczenia w kadzi ustala każdorazowo prowadzący ćwiczenia. W oparciu o podobieństwo wynikające z liczby Frouda należy wyliczyć natężenie przepływu wody przyjmując, że szybkość odlewania na rzeczywistej maszynie dwupasmowej wynosi 1,2 m/min przy rozmiarach pasma 1500x220 oraz skala modelu wynosi 1:8

Właściwy pomiar polega na ustaleniu przepływu kąpielii przez kadź i zaburzeniu składu poprzez wprowadzenie do wylewu z kadzi głównej 10 ml porcji 5% KOH. Rejestracja zmian sygnału przewodnictwa właściwego wykonywana jest w krystalizatorach.

#### V. Opracowanie wyników

##### 1. Opracowanie wyników przy użyciu programu Tundish.net

Wyniki należy opracować przy użyciu programu **tundish.net** na stronie <http://tempus.metal.agh.edu.pl/~tkargul/tundish/>. Przygotowanie danych do obliczeń to bardzo ważna czynność. Należy zrobić to z dużą dokładnością, ponieważ tylko poprawnie przygotowane dane pozwolą na uzyskanie poprawnych wyników! Dane, czyli wartości przewodnictwa właściwego, umieszczone są w pliku tekstowym. Wymagania stawiane danym pomiarowym:

1. Ilość danych dla każdego krystalizatora musi być taka sama (1000 pomiarów)
2. Krok czasowy pomiędzy kolejnymi pomiarami 1[s]
3. Separator liczb dziesiętnych: kropka
4. Informacja o typie kadzi umieszczona na końcu pliku z danymi.

Obliczenia mogą wykonać tylko zarejestrowani użytkownicy. Aby się zarejestrować



należy w oknie logowania kliknąć znajdujący się u góry okienka napis " nowy użytkownik ". Na ekranie pojawi się formularz rejestracyjny. Wszystkie pola należy wypełnić. Pod podany adres email zostanie wysłana wiadomość o danych, które zostaną dodane do bazy danych. Jeśli przebieg rejestracji był prawidłowy zostaniemy poinformowani o tym stosownym komunikatem. Należy zapoznać się z informacjami jakie zostaną wyświetlone w formularzu. Najważniejsza z nich to ta mówiąca o nazwie pliku z danymi.

**Plik przesyłany na serwer musi mieć nazwę taką jak login użytkownika np: admin.txt.**

Hasła użytkowników znajdujące się w bazie danych są zakodowane, należy więc zapamiętać swoje hasło ponieważ jego odzyskanie nie będzie możliwe.

Szczegółowe informacje dotyczące sposobu wykonania obliczeń przy użyciu programu tundish.net dostępne na stronie <http://tempus.metal.agh.edu.pl/~tkargul/tundish/>.

## 2. Obliczenia dotyczące kryteriów oceny pracy kadzi

Obliczenia dotyczące kryteriów oceny pracy kadzi pośredniej należy przeprowadzić w oparciu o dane standaryzowane. Dzięki standaryzacji można wyeliminować wpływ błędów generowanych przez wahania ilości dodawanego znacznika, czy początkowego poziomu przewodnictwa właściwego użytej kąpieli. Każda z rzeczywistych krzywych RTD powinna być standaryzowana według następujących równań:

$$\gamma_i^s = \frac{1}{F_{rz}} \cdot (\gamma_i^{rz} - \gamma_0^{rz}) \quad (11)$$

$$F_{rz} = \sum_{i=0}^n (\gamma_i^{rz} - \gamma_0^{rz}) \cdot \Delta t$$

gdzie:

$\gamma_i^{rz}$  - rzeczywista wartość przewodnictwa w czasie  $t_i$  [mS/cm],

$\gamma_0^{rz}$  - wartość początkowa przewodnictwa dla  $t = 0$ , [mS/cm],

$\gamma_i^s$  - standaryzowana wartość sygnału, [-],

$\Delta t$  - odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi odczytami wartości przewodnictwa, [s],

$n$  - liczba zarejestrowanych odczytów równa 1000, [-],

$F_{rz}$  - pole pod krzywą RTD.

W opracowaniu wyników ćwiczenia należy zamieścić wykresy standaryzowanych sygnałów RTD dla obu wariantów wykonanego eksperymentu wygenerowanych przez

program tundish.net. Należy ocenić wpływ zróżnicowanej szybkości wyciągania pasm na przepływ kąpieli w kadzi pośredniej w oparciu o porównanie krzywych RTD z obu krystalizatorów. Wyniki liczbowe uzyskane dla wszystkich zdefiniowanych kryteriów oceny kadzi zestawić w formie tabeli.

### **Literatura.**

- [1] K. Saylor, D. Bolger - Preventing turbulence in the tundish, Steel Technology International, 1995/96, s. 187/191
- [2] U. Horbach, S. Ródl, H. Abratis, F. Höfer - Strömungsuntersuchungen in geregelten Verteilerausgüssen zur Vermeidung von Clogging, Stahi und Eisen, 115, 1995, nr 11, s. 71/76
- [3] J. E. Roush - Effect of an alternative tundish configuration on product cleanliness, Steelmaking Conference Proceedings, Vol.78, Nashville, Tennessee, USA, 2-5 April, 1995, s. 559/561
- [4] Y. He, Y. Sahai - The Effect of Tundish Wall Inclination on the Fluid Flow and Mixing: A Modeling Study, Metallurgical Transactions B, Vol. 18B, 1987, nr 3, s. 81/92
- [5] J. Chen, O. Gregory, A. Leggett, J. Mathieson, G. Williams - Study of a Tundish Using a 1/3-Scale Water Model, Steelmaking Conference Proceedings, Vol. 78, Nashville, Tennessee, USA, 2-5 April, 1995, s. 593/598
- [6] D. Mazumdar, G. Yamanoglu, R. Guthrie - Hydrodynamic performance of steelmaking tundish system: a comparative study of three different tundish designs, steel research, 68, 1997, nr 7, s. 293/300