

Harald KANIA

Instytut Metalurgii Żelaza

Jacek PIEPRZYCA

Politechnika Śląska w Katowicach

## MODELOWANIE FIZYCZNE MIESZANIA CIEKŁEJ STALI GAZAMI OBOJĘTNYMI W TRÓJWYLEWOWEJ KADZI POŚREDNIEJ URZĄDZENIA COS

*Artykuł poświęcony jest zagadnieniu regulacji przepływu stali za pomocą kształtek gazoprzepuszczalnych zabudowanych w trójwylewowej kadzi pośredniej o pojemności nominalnej 10 t. Model kadzi pośredniej do badań symulacyjnych został zaprojektowany i wykonany w skali liniowej 1:2 na podstawie dokumentacji technicznej przemysłowego urządzenia COS. Asymetryczna budowa przemysłowej kadzi pośredniej jest powodem powstawania niekorzystnych warunków hydrodynamicznych przepływu, co skutkuje brakiem jednorodności stali na poszczególnych żyłach. Prowadzone w ramach projektu rozwojowego badania modelowania fizycznego nad optymalizacją przepływu stali w korytowej kadzi pośredniej, mogą przyczynić się do rozwiązania zaistniałego problemu, ponieważ dzięki odpowiedniemu usytuowaniu kształtek gazoprzepuszczalnych, uzyskać można właściwą homogenizację ciekłej stali w kadzi pośredniej zarówno pod względem temperaturowym jak i chemicznym.*

*Słowa kluczowe: Modelowanie fizyczne, COS, kadź pośrednia, kształtki gazoprzepuszczalne*

## PHYSICAL MODELLING OF INERT GAS STIRRING OF LIQUID STEEL IN THREE-OUTLET TUNDISH OF CONTINUOUS CASTING MACHINE

*This article is dedicated to the issue of steel flow regulation using gas-permeable fittings installed in a three-outlet tundish with nominal capacity of 10 t. The tundish model for simulation investigations was designed and made in line scale of 1:2, based on technical documentation of the industrial continuous casting machine. The asymmetrical design of the industrial tundish is the reason for unfavourable hydrodynamic conditions of flow, which results in lack of steel homogeneity in individual strands. The physical modelling research on optimisation of steel flow in a trough tundish carried out as a part of the developmental project may contribute to solving this problem, as the appropriate location of gas-permeable fittings allows obtaining correct homogenisation of liquid steel in a tundish in terms of both temperature and chemical features.*

*Key words: physical modelling, continuous casting machine, tundish, gas-permeable fittings*

### 1. WSTĘP

W ramach realizacji prac badawczych prowadzonych przez Instytut Metalurgii Żelaza i Politechnikę Śląską w Katowicach w projekcie rozwojowym nr N R07 0021 06 finansowanym przez NCBiR [1], podjęto próbę rozwiązania problemu uzyskania jednakowej temperatury powierzchni wlewków stalowych na 3 żyłach odlewanych przez asymetryczną kadź pośrednią. Problem ten niejednokrotnie próbowano rozwiązać w przeszłości, zabudowując w kadzi pośredniej regulatory przepływu w postaci: przegród i tam przelewowych pomiędzy otworami wylewowymi, czy różnej konstrukcji turbostopów (z i bez otworów) umiejscowionych pod rurą osłonową, w celu takiego ukierunkowania strumienia stali, by jej czas retencji w przestrzeni roboczej kadzi pośredniej był zbliżony dla wszystkich trzech żył. Skutkiem niewłaściwych warunków hydrodynamicznych

przepływu stali przez kadź pośrednią jest jej niedostateczne wymieszanie, co może być powodem zamarzania wylewu zanurzeniowego żyły najdalej usytuowanej od źródła zasilania (rury osłonowej) i konieczność przerywania odlewania na tej żyły. Zdarzenia tego typu najczęściej mają miejsce w przypadku odlewania najmniejszych przekrojów (kw. 100 i 120 mm) charakteryzujących się najmniejszą przepustowością wylewów zanurzeniowych. Zatem problem ten ma również bezpośredni wpływ na wydajność całego procesu COS. Pomiary temperatury wykonane kamerą termowizyjną w pracy [2] wykazały różnice temperatury powierzchni wlewków pomiędzy żyłą 1. (najdalej usytuowaną od rury osłonowej) a żyłami 2. i 3.

Prace modelowe miały za zadanie określenie optymalnego sposobu przeprowadzenia zabiegu przedmuchiwania stali gazem obojętnym w kadzi pośredniej o budowie asymetrycznej w celu uzyskania homogeni-

zacji temperaturowej w całej objętości kąpeli stalowej. Dotyczyły opracowania konstrukcji i lokalizacji w przestrzeni roboczej kadzi pośredniej kształtek gazoprzepuszczalnych. Założeniem było, by gaz obojętny objął możliwie cały strumień stali przepływający przez kadź pośrednią i kierował go do najdalszego wylewu, tak by wszystkie 3 wylewy były zasilane w nową porcję ciekłej stali w tym samym czasie. Ponadto, zastosowanie przedmuchiwanie stali gazem obojętnym (kształtką Ar) wspomaga wynoszenie w górę cząstek wtrąceń niemetalicznych poprawiając „czystość metalurgiczną” stali. Prace prowadzono w ten sposób by mieć na uwadze fakt, że konstrukcja i zabudowa instalacji do przedmuchiwanie stali gazem obojętnym powinna być jak najprostszą, nie może nadmiernie ingerować w konstrukcję kadzi pośredniej i powinna być wykonana przy jak najmniejszym nakładzie inwestycyjnym.

## 2. PODSTAWY TEORETYCZNE MIESZANIA STALI GAZAMI OBOJĘTNYMI

Powszechnie stosowanym sposobem mieszania ciekłej stali jest jej przedmuchiwanie gazami obojętnymi. Gaz najczęściej wprowadzany jest przez kształtki gazoprzepuszczalne umieszczone w dnie kadzi lub przez lancę wprowadzaną od góry.

Kształtki gazoprzepuszczalne wytwarzane są z ziarnistych materiałów ogniotrwałych dzięki zastosowaniu nowoczesnych technologii. Podstawowymi surowcami do ich produkcji są korund charakteryzujący się ognioodpornością pod obciążeniem w zakresie 1860÷1900 °C lub mulit korundowy ( $MgO \cdot Al_2O_3$ ) o ognioodporności pod obciążeniem 1900÷1920 °C. Porowatość materiałów na kształtki gazoprzepuszczalne, zwana porowatością otwartą, waha się w zakresie 25÷40%. Promień kapilar (porów) w tego typu materiałach zależny jest od zastosowanej do produkcji frakcji ziarnowej materiału ogniotrwałego i wyrażony jest zależnością:

$$r = 0,22R \quad (1)$$

gdzie:

$R$  – średni wymiar sypkich frakcji materiału do wyrobu kształtki.

Przykładowe wartości parametrów materiału na kształtki gazoprzepuszczalne przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Parametry materiału na kształtki gazoprzepuszczalne

Table 1. Parameters of material for gas-permeable fittings

Wymiar frakcji materiału mm	Porowatość otwarta %	Współczynnik gazoprzepuszczalności
0,0 ÷ 0,5	28,2	100
0,5 ÷ 1,0	27,6	200
1,0 ÷ 3,0	25,0	960

Z technologicznego punktu widzenia istotne jest uzyskanie optymalnej średnicy pęcherzyków gazu, ich ilości oraz szybkości wypływania. Te parametry mają decydujące znaczenie z punktu widzenia efektywności prowadzonego procesu przedmuchiwanie.

Średnica pęcherzyka gazu w trakcie jego wypływania zwiększa się od wartości krytycznej (w momencie

wyjścia z kapilary) do wartości końcowej (w momencie opuszczenia kąpeli metalowej). Przyczyną zwiększania się średnicy pęcherzyka jest z jednej strony rozszerzalność cieplna gazu w kąpeli metalowej, a z drugiej zmieniające się ciśnienie ferrostatyczne wzdłuż słupa stali. Wymiar pęcherzyka w momencie wyjścia z kapilary materiału gazoprzepuszczalnego określa się zależnością [3]:

$$d = \left( \frac{108\eta_m \vartheta_g}{\pi g \rho_m} \right)^{0,25} \quad (2)$$

gdzie:

$\eta_m$  – lepkość dynamiczna, Pa·s

$\vartheta_g$  – rozchód gazu przez kapilarę,  $cm^3 \cdot s^{-1}$

$g$  – przyspieszenie ziemskie,  $cm \cdot s^{-2}$

$\rho_m$  – gęstość metalu,  $g \cdot cm^{-3}$

Z powyższej zależności wynika, że średnica pęcherzyka gazu w momencie wyjścia z kapilary materiału gazoprzepuszczalnego nie zależy od jej średnicy. Badania empiryczne pozwoliły jednak na sformułowanie zależności wiążącej krytyczną średnicę pęcherzyka ze średnicą kapilary. Można ją przedstawić w postaci równania [4]:

$$\frac{d}{D} = 1,82 - 200 \left( \frac{\rho_g}{\rho_m - \rho_g} \right)^{0,96} We^{0,36} \quad (3)$$

gdzie:

$d$  – średnica pęcherzyka, m

$D$  – średnica kapilary, m

$\rho_g$  – gęstość gazu,  $kg \cdot m^{-3}$

$\rho_m$  – gęstość metalu,  $kg \cdot m^{-3}$

$We$  – kryterium Webera

Innym parametrem określającym efektywność przedmuchiwanie kąpeli metalowej gazami obojętnymi jest wspomniana wyżej szybkość wypływania pęcherzyka gazu. Szybkość tę opisuje zależność:

$$\omega = \sqrt[6]{\frac{hg^2 \sigma_{m-g}}{a^2(\rho_m - \rho_g)}} \quad (4)$$

gdzie:

$h$  – wysokość słupa stali, m

$\sigma_{m-g}$  – napięcie międzyfazowe metal-gaz,  $N \cdot m^{-1}$

$a$  – współczynnik oporu środowiska,  $\approx 1,3$

Stwierdzono, że czas wypływania pęcherzyka w ciekłym żelazie (stali) o wysokości słupa  $h = 2$  m, przy przedmuchiwanie przez kapilarę o średnicy  $D = 0,0005$  m wynosi 6 s i jest o rząd wielkości mniejszy niż wynikałoby to z równania Stokesa.

W warunkach przemysłowych, celem osiągnięcia wspomnianych powyżej parametrów technologicznych oraz zapewnienie bezpiecznego prowadzenia procesu przedmuchiwanie stali argonem, gaz doprowadzany jest pod określonym ciśnieniem. Ogólna postać wzoru na minimalne ciśnienie argonu w przedmuchiwanie kąpeli metalowej ma postać [4]:

$$P = P_{atm} + \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \rho_m h_m + \rho_z h_z + \frac{2\sigma}{r} \quad (5)$$

gdzie:

$\Delta p_1$  – stały opór układu doprowadzającego argon,  $kg \cdot m^{-1} / s^2$

$\Delta p_2$  – stała ciśnienia kształtki porowatej,  $kg \cdot m^{-1} / s^2$

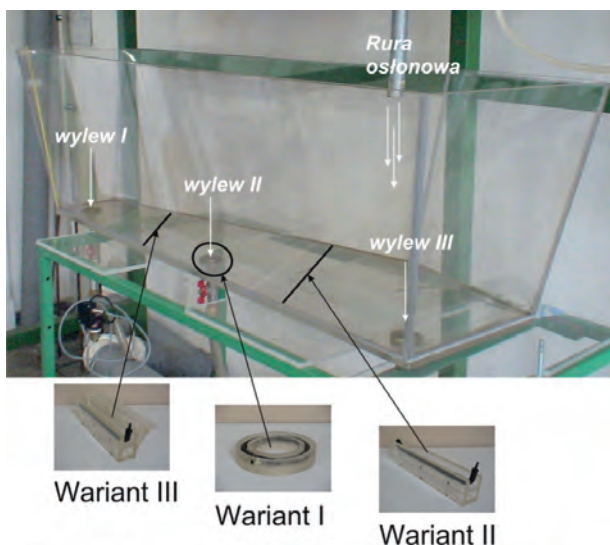
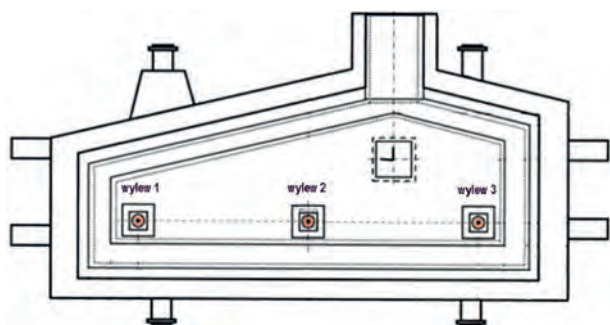
$\Delta p_3$  – nadmiar ciśnienia dla utrzymania ciągłego i stabilnego przedmuchiwanie,  $kg \cdot m^{-1} / s^2$

$\rho_m h_m$  – ciśnienie ferrostatyczne,  $kg \cdot m^{-1} / s^2$

$\rho_z h_z$  – ciśnienie żużla,  $kg \cdot m^{-1} / s^2$ .

### 3. BADANIA MODELOWE

Do badań modelowych wykorzystano wodny model fizyczny urządzenia COS zainstalowany w laboratorium modelowania procesów metalurgicznych w Katedrze Metalurgii Politechniki Śląskiej. Model ten wykonano w oparciu o pomiary własne i dokumentację eksploatacyjną w jednej z krajowych hut kadzi pośredniej (rys. 1a), co szczegółowo opisano w innych publikacjach [5÷8]. W celu realizacji badań dotyczących mieszania stali gazami obojętnymi w 3 wylewowej kadzi pośredniej do wspomnianego modelu fizycznego urządzenia COS skonstruowano i wykonano model kadzi w skali liniowej  $S_L = 0,5$  oraz modele kształtek gazoprzepuszczalnych. Modele te wykonano w IMŻ zgodnie z zasadami teorii podobieństwa. Metodą analizy wymiarowej wyznaczono liczby kryterialne charakteryzujące warunki hydrodynamiczne panujące w trakcie procesu odlewania w rzeczywistej kadzi pośredniej. Jako dominujące kryterium podobieństwa przyjęto liczbę Froude'a ( $Fr$ ). Na jej podstawie oraz korzystając z metody skal wyznaczono wartości parametrów przepływu cieczy modelowej w modelu kadzi pośredniej (zapewniając zachowanie podobieństwa dynamicznego i kinetycznego przepływu cieczy modelowej). Analogicznie postępowano w trakcie konstrukcji modeli kształtek gazoprzepuszczalnych. Obliczeń dokonywano dla następujących rzeczywistych parametrów odlewania: przekrój



Rys. 1. Schemat przemysłowej kadzi pośredniej (a) oraz modele kształtek gazoprzepuszczalnych i kadzi pośredniej wraz z oznaczeniem wariantów eksperymentów (b)

Fig. 1. Diagram of industrial tundish (a) and models of gas-permeable fittings and tundish with experimental variants marked on (b)

poprzeczny odlewanych wlewków –  $\varnothing 170$  mm, liniowa prędkość odlewania 1,7 m/min. Na rys. 1b przedstawiono fotografie modelu kadzi pośredniej z wariantami usytuowania kształtek gazoprzepuszczalnych.

Usytuowanie poszczególnych kształtek gazoprzepuszczalnych było następujące:

- dla wariantu I – kształtka gazoprzepuszczalna w postaci korka zlokalizowana wokół wylewu nr 2,
- dla wariantu II – kształtka gazoprzepuszczalna w postaci belki zlokalizowana pomiędzy strefą wlewową (rurą osłonową) a wylewem nr 2,
- dla wariantu III – kształtka gazoprzepuszczalna w postaci belki zlokalizowana pomiędzy wylewem nr 2 i wylewem nr 1.

W badaniach modelowych czynnikiem symulującym ciekłą stal była woda. Jako znacznik (barwnik) wykorzystano wodny roztwór  $KMnO_4$ . Przebieg eksperymentów rejestrowano za pomocą kamer w dwóch płaszczyznach: od strony ściany przedniej modelu oraz od strony ściany bocznej w rejonie wylewu nr 1. Eksperymenty przeprowadzono dla trzech wariantów konstrukcji kształtek gazoprzepuszczalnych oraz ich lokalizacji. Stosowano również różne wartości objętościowego natężenia przepływu gazu obojętnego. Jako analogu gazu w badaniach użyto powietrza. W artykule przedstawiono rezultaty badań dla wartości objętościowego natężenia przepływu powietrza  $Q = 0,4 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Badania modelowe o charakterze wizualizacji przeprowadzono również w wyżej przedstawionym modelu kadzi pośredniej nie wyposażonej w żadne regulatory przepływu (wariant 0). Taka koncepcja miała na celu wyeliminowanie czynników innych niż mieszanie cieczy modelowej gazem obojętnym.

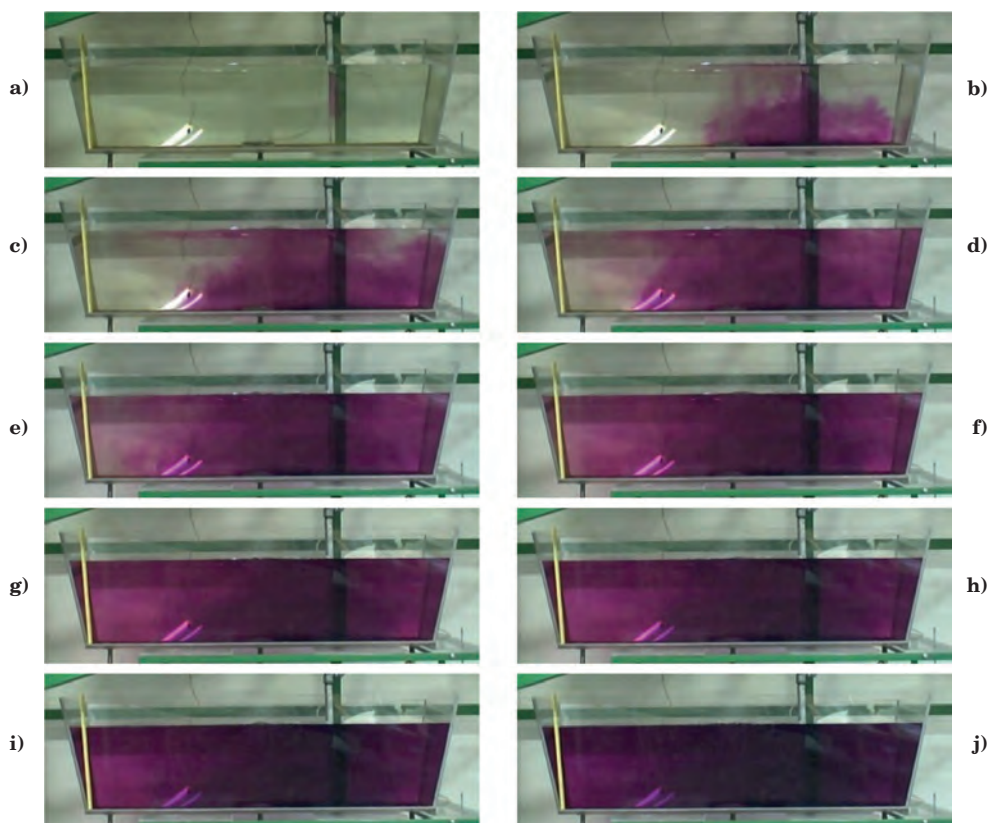
### 4. WYNIKI BADAŃ MODELOWYCH

Wyniki badań modelowych przepływu cieczy modelowej przez model 3 wylewowej kadzi pośredniej wyposażonej w kształtki gazoprzepuszczalne dla wariantów zabudowy I, II i III przedstawiono na rysunkach od 2 do 4.

### 5. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ MODELOWYCH

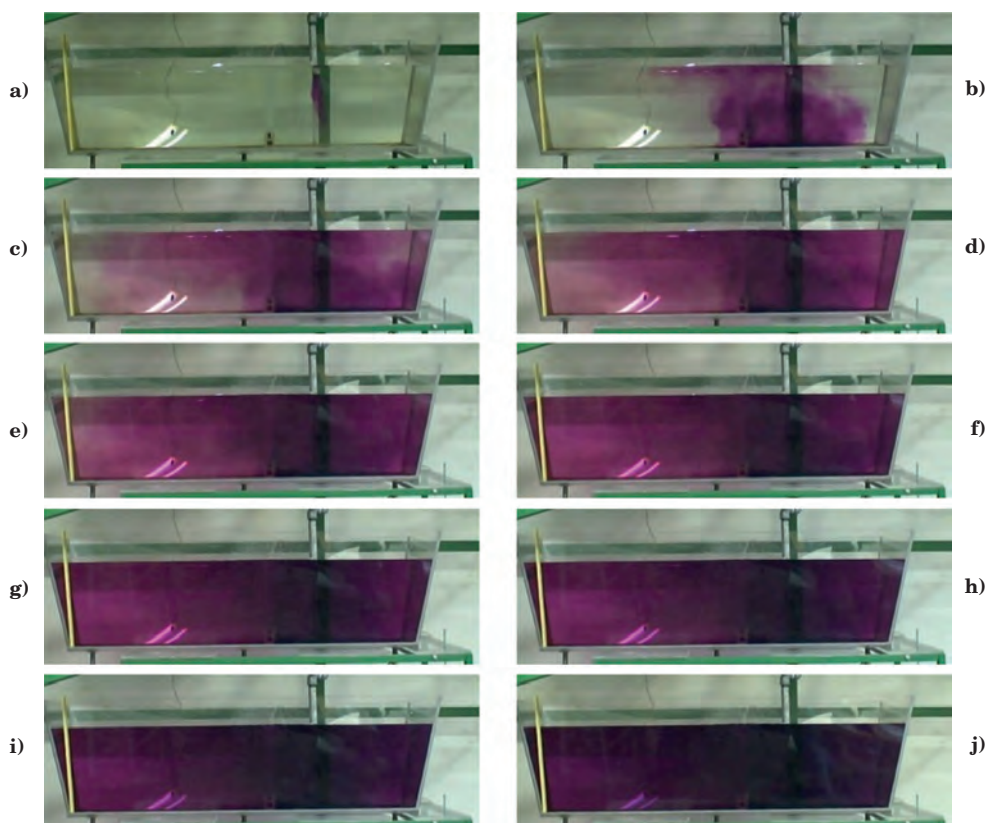
W rezultacie przeprowadzonych eksperymentów w warunkach izotermicznych stwierdzono:

**Wariant I** – obejmował badania w modelu kadzi pośredniej wyposażonej w kołową kształtkę gazoprzepuszczalną (koncepcja korka Ar), umieszczoną wokół wylewu nr 2 (rys. 2). Stosunkowo skupiony strumień gazów powoduje na powierzchni lustra cieczy modelowej intensywne falowanie, które w warunkach rzeczywistych może prowadzić do przerwania ciągłości warstwy żużla i wtórnego zanieczyszczenia stali. Jednak ten problem można zminimalizować poprzez właściwy dobór natężenia przepływu gazu. Przedmuchiwanie kąpielii stalowej w ten sposób chroni wylew przed zarastaniem i może korzystnie wpływać na czystość uzyskiwanych wlewków ciągłych. Poważnym problemem może być jednak budowa instalacji przedmuchiwania ponieważ podobne kształtki powinny być zainstalowane wokół każdego z wylewów.



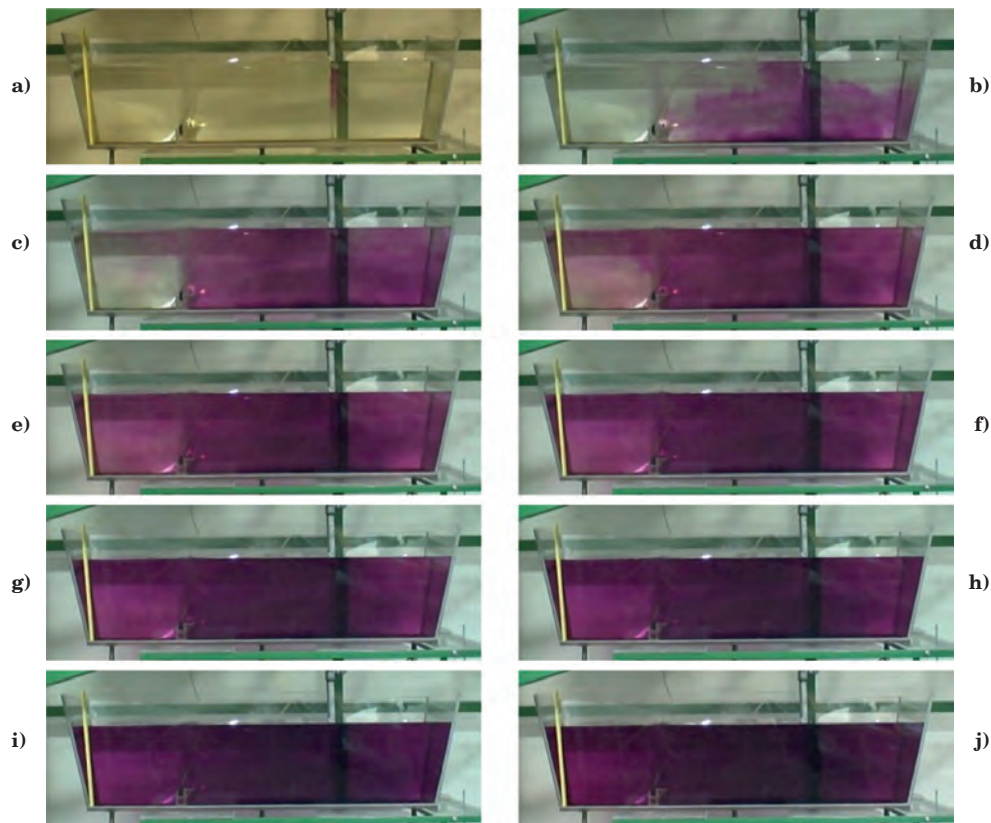
Rys. 2. Rozchód znacznika w modelu kadzi pośredniej (wariant I) w czasie: a) po 1 s; b) po 10 s; c) po 20 s; d) po 30 s; e) po 40 s; f) po 50 s; g) po 60 s; h) po 70 s; i) po 90 s; j) po 120 s

Fig. 2. Marker propagation in tundish model (variant I) after: a) 1 s; b) 10 s; c) 20 s; d) 30 s; e) 40 s; f) 50 s; g) 60 s; h) 70 s; i) 90 s; j) 120 s



Rys. 3. Rozchód znacznika w modelu kadzi pośredniej (wariant II) w czasie: a) po 1 s; b) po 10 s; c) po 20 s; d) po 30 s; e) po 40 s; f) po 50 s; g) po 60 s; h) po 70 s; i) po 90 s; j) po 120 s

Fig. 3. Marker propagation in tundish model (variant II) after: a) 1 s; b) 10 s; c) 20 s; d) 30 s; e) 40 s; f) 50 s; g) 60 s; h) 70 s; i) 90 s; j) 120 s



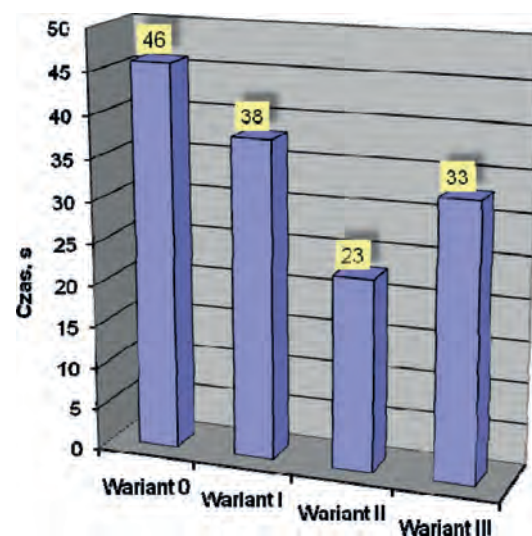
Rys. 4. Rozchód znacznika w modelu kadzi pośredniej (wariant III) w czasie: a) po 1 s; b) po 10 s; c) po 20 s; d) po 30 s; e) po 40 s; f) po 50 s; g) po 60 s; h) po 70 s; i) po 90 s; j) po 120 s

Fig. 4. Marker propagation in tundish model (variant III) after: a) 1 s; b) 10 s; c) 20 s; d) 30 s; e) 40 s; f) 50 s; g) 60 s; h) 70 s; i) 90 s; j) 120 s

**Wariant II** – obejmował badania na modelu kadzi pośredniej wyposażonej w kształtkę gazoprzepuszczalną w postaci belki umieszczonej pomiędzy strefą wlewową (rura osłonowa), a wylewem nr 2 (rys. 3). Takie rozwiązanie konstrukcyjne ma na celu uproszczenie instalacji gazowej w rzeczywistej kadzi pośredniej, gdyż ogranicza jej obszar do jednego punktu. Zaobserwowano korzystny wpływ przedmuchiwania gazem na charakter mieszania się cieczy modelowej w obszarze przestrzeni roboczej modelu kadzi pośredniej. W porównaniu z eksperymentem przeprowadzonym dla modelu kadzi bez zastosowania przedmuchiwania kąpieli gazem obojętnym, homogenizacja cieczy modelowej zachodzi znacznie szybciej. Również w tym przypadku ma miejsce znaczne skrócenie różnic czasu dotarcia znacznika do poszczególnych wylewów. Lokalizacja kształtki gazoprzepuszczalnej pozwala na stosowanie większych wartości natężenia przepływu gazu. Spowodowane jest to tym, że właśnie w miejscu umieszczenia kształtki gazoprzepuszczalnej w tym wariantcie eksperymentu zachodzi w kadzi pośredniej zmiana charakteru przepływu cieczy modelowej z strefy przepływu turbulentnego do strefy przepływu tłokowego. Unoszące się pęcherzyki gazu napotykają w związku z tym na pewien opór. Ogranicza to niebezpieczeństwo przerwania ciągłości warstwy żuźla na powierzchni stali w warunkach rzeczywistych oraz korzystnie wpływa na proces homogenizacji stali.

**Wariant III** – obejmował badania na modelu kadzi pośredniej wyposażonej w kształtkę gazoprzepuszczalną w postaci belki umieszczonej pomiędzy wylewem nr 2 i wylewem nr 1 (rys. 4). Takie rozwiązanie

konstrukcyjne posiada podobne cechy do wariantu II. W rezultacie badań modelowych o charakterze wizualizacji zaobserwowano jednak znacznie gorszą w porównaniu z wariantem II skuteczność tego rozwiązania. W znacznie mniejszym stopniu ogranicza ono różnice w czasie dotarcia znacznika do poszczególnych wylewów a, zwłaszcza wylewu nr 1. Lokalizacja kształtki gazoprzepuszczalnej pomiędzy wylewami nr 2 i nr 1 jest zdecydowanie bardziej wrażliwa na zmianę natę-



Rys. 5. Czasy dotarcia znacznika do wylewu 1 w poszczególnych wariantach eksperymentu

Fig. 5. Times after which marker reaches nozzle 1 in individual experiment variants

żenia przepływu gazu. Zbyt intensywny przepływ powoduje generowanie tamy gazowej odcinającej wręcz przestrzeń roboczą modelu kadzi pośredniej w rejonie wylewu nr 1. Wpływa to niekorzystnie na pracę całej kadzi pośredniej.

## 6. WNIOSKI

Przedmuchiwanie stali gazami obojętnymi w kadzi pośredniej urządzenia COS ma istotne znaczenie nie tylko z punktu widzenia jej ostatecznej rafinacji, ale również korzystnie wpływa na jej homogenizację. Ma to szczególne znaczenie w nietypowych kadziach pośrednich do których należą kadzie pośrednie asymetryczne. Uzyskane w ramach wcześniejszych badań [2] w warunkach przemysłowych informacje oraz rezultaty wcześniej przeprowadzonych badań modelowych dotyczących przepływu stali przez analizowaną 3 wylewową kadź pośrednią nie wyposażoną w żadne regulatory przepływu tj. bez mieszania ciekłej stali gazami obojętnymi (wariant 0), wskazują na znaczące różnice w czasie osiągnięcia przez znacznik poszczególnych wylewów. Może to prowadzić do niestabilnej pracy kadzi

pośredniej, a w skrajnych przypadkach do zamarzania wylewów. W badanym przypadku dotyczy to szczególnie wylewu nr 1, co jest potwierdzeniem obserwacji przemysłowych. Prowadzenie zabiegu przedmuchiwania ciekłej stali w sensie jej mieszania może znacznie ograniczyć to niebezpieczeństwo.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że na podstawie przedstawionych rezultatów badań modelowych prowadzonych w warunkach izotermicznych, w przypadku stosowania przedmuchiwania stali gazami obojętnymi w badanej kadzi pośredniej, optymalnym rozwiązaniem jest wariant II, w którym znacznik docierał najszybciej do wylewu 1. Prowadzenie procesu przedmuchiwania stali gazami obojętnymi w kadzi pośredniej zgodnie z założeniami przyjętymi w tym wariantcie zapewnia właściwy stopień homogenizacji stali, nie zaburza w sposób nadmierny warunków hydrodynamicznych przepływu ciekłej stali przez kadź pośrednią oraz co nie jest bez znaczenia, konstrukcja instalacji i sposób ewentualnego wdrożenia tego rozwiązania jest najbardziej korzystny, zarówno z technicznego jak i ekonomicznego punktu widzenia. Należy również pamiętać, że przedmuchiwanie stali argonem w warunkach rzeczywistych wiąże się z obniżeniem jej temperatury.

## LITERATURA

1. Kania H. i zespół: „Opracowanie technologii ciągłego odlewania wlewków okrągłych na podstawie wyników modelowania numerycznego i fizycznego”, Praca badawcza IMŻ nr NR-PR-0017, niepublikowane.
2. Gabelus J., Mazur A., Wittchen W., Węgrzyn W.: „Opracowanie mapy przestrzennego rozkładu temperatury stali w niesymetrycznej kadzi pośredniej przy różnym przygotowaniu kadzi do ciągłego odlewania i różnych warunkach przepływu stali”. Praca badawcza IMŻ NR-PC-00091/8/BS/2003, niepublikowane.
3. „Argon In der Metalurgie”, BASF, 1966, t.17.
4. Каблукowski A.F. i inni.: „Рафинирование стали инертным газом”, Wyd. Металлургия, Moskwa, 1975.
5. Kania H., Pieprzyca J., Lipiński J.: „Modelowanie fizyczne przepływu ciekłej stali w kadzi pośredniej typu T dla dwużyłowego urządzenia COS.”, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, tom 59, nr 3, 2007, s. 6-15.
6. Pieprzyca J., Merder T., Lipiński J., Łaskawiec D.: Model fizyczny urządzenia COS do badań w warunkach izotermicznych i nieizotermicznych, Hutnik – Wiadomości Hutnicze, Nr 10, 2010, s. 567-571.
7. Merder T., Pieprzyca J., Kania H., Ochab B., Wende R.: Analiza warunków pracy trzy-żyłowej kadzi pośredniej z zastosowaniem techniki CFD., Hutnik – Wiadomości Hutnicze, Nr 3, 2011, s. 224-227.
8. Pieprzyca J.: Optimization of the work of the three-strand tundish – physical modelling, Proceedings of the 2011 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting, Nancy, Francia, September 2011.