

---

**PRACE**

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

***Scientific Works***  
of Institute of Ceramics  
and Building Materials

---

**Nr 24**  
(styczeń–marzec)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

**Rok IX**

**Warszawa–Opole 2016**

---

*IZABELA MAJCHROWICZ\**  
*JACEK PIEPRZYCA\*\**  
*HARALD KANIA\*\*\**

## Badania przepływu ciekłej stali w kadzi pośredniej wyposażonej w inhibitory turbulencji – modelowanie fizyczne

**Słowa kluczowe:** kadź pośrednia, regulacja strumienia stali.

Celem pracy było określenie wpływu kształtu wewnętrznych inhibitorów turbulencji na charakter przepływu stali w kadzi pośredniej w oparciu o badania modelowe. Badania laboratoryjne w modelowej kadzi pośredniej z udziałem opracowanych kształtek wykonano na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej w Katowicach, który dysponuje instalacją do symulacji fizycznych przepływu. Badania te przeprowadzono z udziałem trzech wariantów konstrukcyjnych kształtek. Wykazano, że istnieją istotne różnice w sposobie generowania charakteru przepływu cieczy w modelu kadzi pośredniej przez inhibitor turbulencji o różnej budowie.

### 1. Wstęp

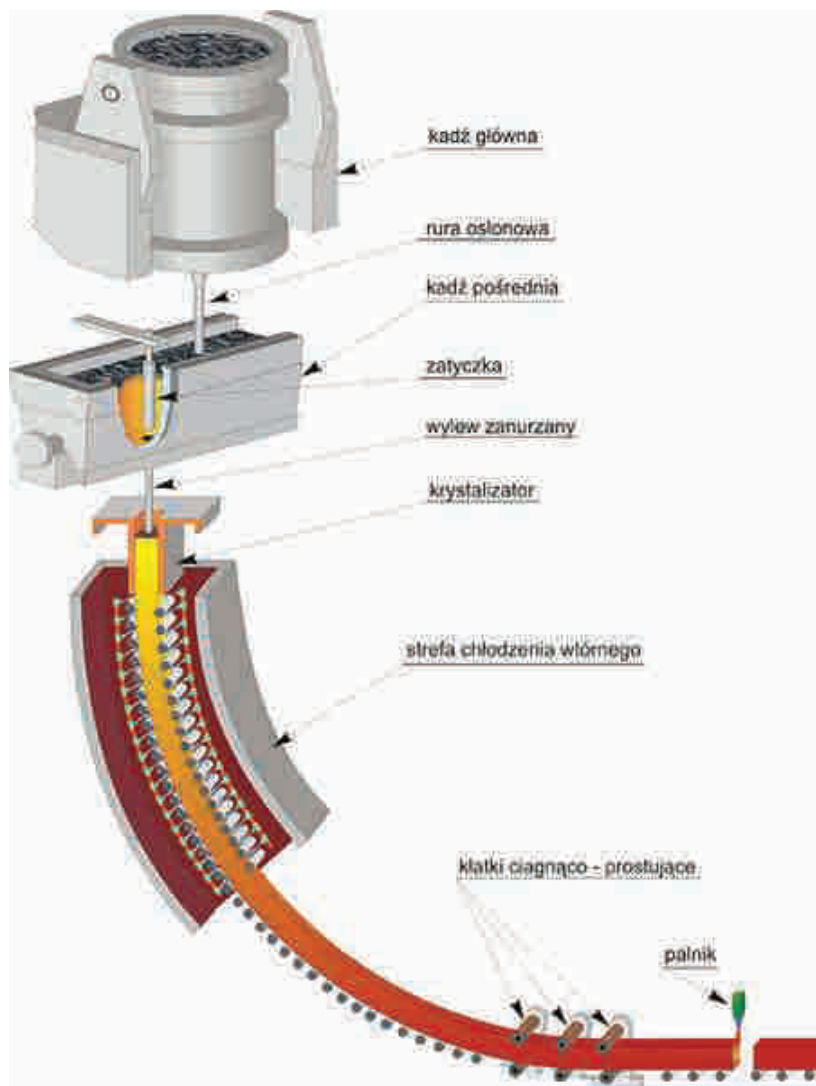
Ciągłe odlewanie z powodzeniem wyparło wiele urządzeń do tradycyjnego odlewania wlewków w ostatnich 20 latach, zapewniając osiągnięcie znacznych korzyści jakościowych i technicznych. Odlewa się w ten sposób coraz szerszy zakres gatunków stali, zapewniając dostawę mniejszego wymiarowo wsadu do walcowni wykańczających, z pominięciem tradycyjnych i drogich walcowni wstępnego przerobu wlewków odlewanych do wlewnic. W rezultacie nastąpiło znaczne zmniejszenie kosztów, co przy większych uzyskach wlewków ciągłych ze stali ciekłej przyniosło dalsze oszczędności. Aktualnie, ponad 90% stali produkuje się w systemie ciągłego odlewania, którego schemat przedstawiono na rycinie 1.

---

\* Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach, i.majchrowicz@icimb.pl

\*\* Dr hab. inż., Politechnika Śląska w Katowicach, jacek.pieprzyca@polsl.pl

\*\*\* Dr inż., Instytut Metalurgii Żelaza w Gliwicach, hkania@imz.pl



Ź r ó d ł o: *Najlepsze dostępne techniki (BAT) wytyczne dla produkcji żelaza i stali, huty zintegrowane*, red. M. Niesler, A. Laczowski, Warszawa 2005, [ippc.mos.gov.pl/custom/BAT8\\_1.doc](http://ippc.mos.gov.pl/custom/BAT8_1.doc) (20.02.2016).

Ryc. 1. Schemat procesu ciągłego odlewania stali

W procesie tym ciekła stal jest odlewana z konwertora do kadzi, z której transportowana jest po rafinacji pozapiecowej na maszynę odlewniczą, gdzie stal jest odlewana do kadzi pośredniej urządzenia do ciągłego odlewania stali (COS). Jest to kadź pośrednia z regulowaną szybkością wypływu stali. Stąd przechodzi do chłodzonego wodą miedzianego krystalizatora, który wykonuje ruchy oscylacyjne w dół i w górę, co zapobiega przywieraniu stali do ścianki krystalizatora. Krystalizator nadaje metalowi żądany kształt. Gdy metal opuszcza krystalizator, tworzy się naskórek zakrzepłej stali i duża liczba rolek (walców ciągnących) sprowadza odlaną stal po łuku lub wzdłuż krzywej eliptycznej do pozycji poziomej. W tym miejscu ciągłe pasmo jest cięte na kawałki za pomocą palnika. W ten sposób są odlewane kęsiska płaskie, kęsiska kwadratowe i kęsy [1].

Kadz pośrednia, zwana również rynną lub korytem rozlewniczym, stanowi drugi po kadzi głównej zbiornik płynnej stali. Rozkład temperatury i stężenie pierwiastków stopowych w kadzi są parametrami decydującymi o jakości stali.

Ważnym elementem charakteryzującym poprawną pracę kadzi pośredniej w trakcie procesu ciągłego odlewania stali jest sposób przepływu i mieszania się w niej ciekłej stali. Główne zadania stawiane kadziom pośrednim dotyczą równomiernego rozdzielenia ciekłej stali do poszczególnych wylewów, właściwej jej homogenizacji zarówno pod względem temperaturowym, jak i chemicznym oraz zapewnienie wymaganego przebiegu procesu mikrorafinacji na drodze pochłaniania wtrąceń niemetalicznych na powierzchni podziału faz ciekła stal–żużel rafinacyjny. Spełnienie tych zadań osiąga się między innymi poprzez uzyskanie w kadzi pośredniej wymaganych warunków hydrodynamicznych przepływu ciekłej stali. Charakteryzują się one z punktu widzenia hydrodynamiki występowaniem trzech stref przepływu. Strefa przepływu turbulentnego obejmuje obszar wlewowy w kadzi pośredniej i odpowiedzialna jest za właściwy przebieg homogenizacji stali. Następnie kształtuje się strefa przepływu tłokowego, w której następuje laminarny przepływ stali do poszczególnych wylewów. Od objętości tej strefy zależy przebieg procesu wypływania wtrąceń niemetalicznych i pochłanianie ich przez zasypkę rafinacyjną utworzoną na powierzchni lustra ciekłej stali. Trzecią niepożądaną strefą przepływu w kadzi pośredniej jest strefa przepływów martwych. Charakteryzuje się ona brakiem mieszania ciekłej stali, a zbyt duży obszar jej występowania w przestrzeni roboczej kadzi pośredniej jest przyczyną zakłóceń procesu.

Właściwe proporcje występowania poszczególnych stref przepływu ciekłej stali oraz minimalizacja strefy przepływów martwych w przestrzeni roboczej kadzi pośredniej odgrywają bardzo ważną rolę we właściwej ich pracy. Zwłaszcza w przypadku odlewania stali na urządzeniach ciągłego odlewania stali wyposażonych w niesymetryczne kadzie pośrednie jest to istotny problem. Niesymetryczne kadzie pośrednie stanowią szczególną grupę tych elementów konstrukcyjnych urządzenia COS. Charakteryzują się najczęściej nieparzystą liczbą wylewów i ze względu na taką konstrukcję nierówno miernym ich oddaleniem od strefy wlewowej kadzi pośredniej. Skutkuje to występowaniem znacznego opóźnienia czasu dotarcia ciekłej stali do skrajnego wylewu i występowania w jego rejonie obszernej strefy martwej.

W celu poprawy przepływu stali w kadzi pośredniej, od początku lat 90. XX w., zaczęto stosować inhibitory turbulencji. W trakcie odlewania w stanie ustalonym, kształtki te przyjmują strumień stali, przekierowują go z powrotem i zmniejszają obszary występowania silnych wirów i turbulencji. Dzięki temu, fale na powierzchni kąpieli stalowej ulegają ograniczeniu i uzyskuje się wysokie rozproszenie energii w obszarze wlotu strumienia stali, a co za tym idzie – warunki separacji w kadzi pośredniej poprawiają się. Z kolei w trakcie odlewania w stanie nie-

ustalonym, dzięki wymienionym uprzednio kształtkom, ogranicza się turbulencje i rozprysk stali. Ogólnie inhibitory turbulencji spełniają następujące funkcje:

- strumień stali w kadzi pośredniej jest hamowany i tłumiony. Ograniczeniu ulegają obszary dużej prędkości przepływu strumienia stali oraz wielkość wirów, prowadząc do ujednorodnienia przepływu;
- strumień stali kierowany jest z powrotem w górę i dzięki temu rozdziela się na powierzchni kąpieli. Żużel transportowany jest promieniście od miejsca, w którym wpływa strumień stali, co ogranicza zjawisko uwięzienia żużla w kąpieli stalowej;
- strumień stali biegnący w górę poprawia oddzielanie cząstek wtrąceń niemetalicznych, ponieważ odległość tych cząstek do warstwy żużla jest zmniejszona;
- następuje większa ochrona wyłożenia ogniotrwałego kadzi pośredniej przed erozją, co prowadzi do zwiększenia jego trwałości;
- zwiększa się przepływ tłokowy i poprawia jednorodność rozkładu temperatury kąpieli stalowej;
- następuje optymalizacja rozkładu czasu przebywania kąpieli stalowej w kadzi pośredniej;
- unika się rozprysku stali i zmniejsza efekty przepływu w stanie nieustalonym w trakcie zmiany kadzi pośredniej [2].

Rodzaj, wielkość i miejsce zainstalowania inhibitorów przepływu są dobierane indywidualnie do danej kadzi. Spowodowane jest to tym, że w urządzeniach do ciągłego odlewania stali stosuje się rozmaitego rodzaju kadzie pośrednie, o różnym kształcie, pojemności i ilości odlewanych żył. Cechy te oddziałują w dużym stopniu na powstawanie warunków hydrodynamicznych, które są odmienne dla każdej kadzi. Dodatkowo, na warunki te wpływają również szybkość odlewania i ilość stali w kadzi [3–4].

Celem pracy było określenie wpływu kształtu wewnętrznego inhibitorów turbulencji na charakter przepływu stali w kadzi pośredniej w oparciu o badania modelowe.

## 2. Opis stanowiska do modelowania fizycznego

Badania laboratoryjne przepływu strumienia w modelowej kadzi pośredniej z udziałem opracowanych kształtek wykonano na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej w Katowicach, który dysponuje instalacją do symulacji fizycznych przepływu. Zaprojektowany i zbudowany model fizyczny ma charakter zimnego modelu segmentowego, w którym jako ciecz modelowa wykorzystywana jest woda. Segmentem głównym jest model kadzi pośredniej, a segmentami pomocniczymi – modele kadzi głównych, instalacja hydrauliczna modelu łącząca segment główny z pomocniczymi oraz apa-

ratura kontrolno-pomiarowa. Model kadzi pośredniej wykonany jest według zasad zawartych w teorii podobieństwa o zgodności liczb kryterialnych w modelu i obiekcie rzeczywistym. Dominującym kryterium, określającym podobieństwa dynamiczne jest w tym przypadku liczba Frouda, wyrażona zależnością:

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot L} \quad (1)$$

gdzie:

$v$  – prędkość,  $m \cdot s^{-1}$ ,

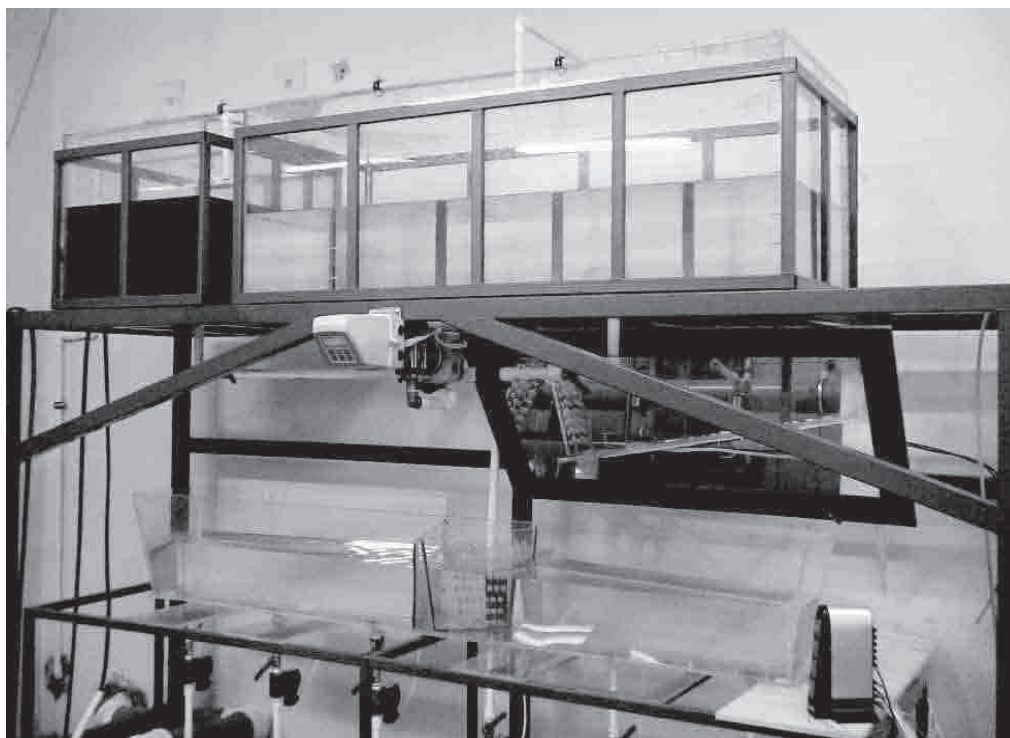
$g$  – przyspieszenie ziemskie,  $m \cdot s^{-2}$ ,

$L$  – odległość charakterystyczna,  $m$ .

Podobieństwo kinematyczne wyznaczono na podstawie teorii skal. Skala geometryczna modelu  $S_L = 0,5$ .

W segmentach pomocniczych nie są zachowane warunki podobieństwa, jednak ich właściwe działanie ma wpływ na przebieg eksperymentu w segmencie głównym [5–7].

Widok wykonanego modelu fizycznego kadzi pośredniej przedstawiono na rycinie 2.



Źródło: Ryc. 2–9 badania własne.

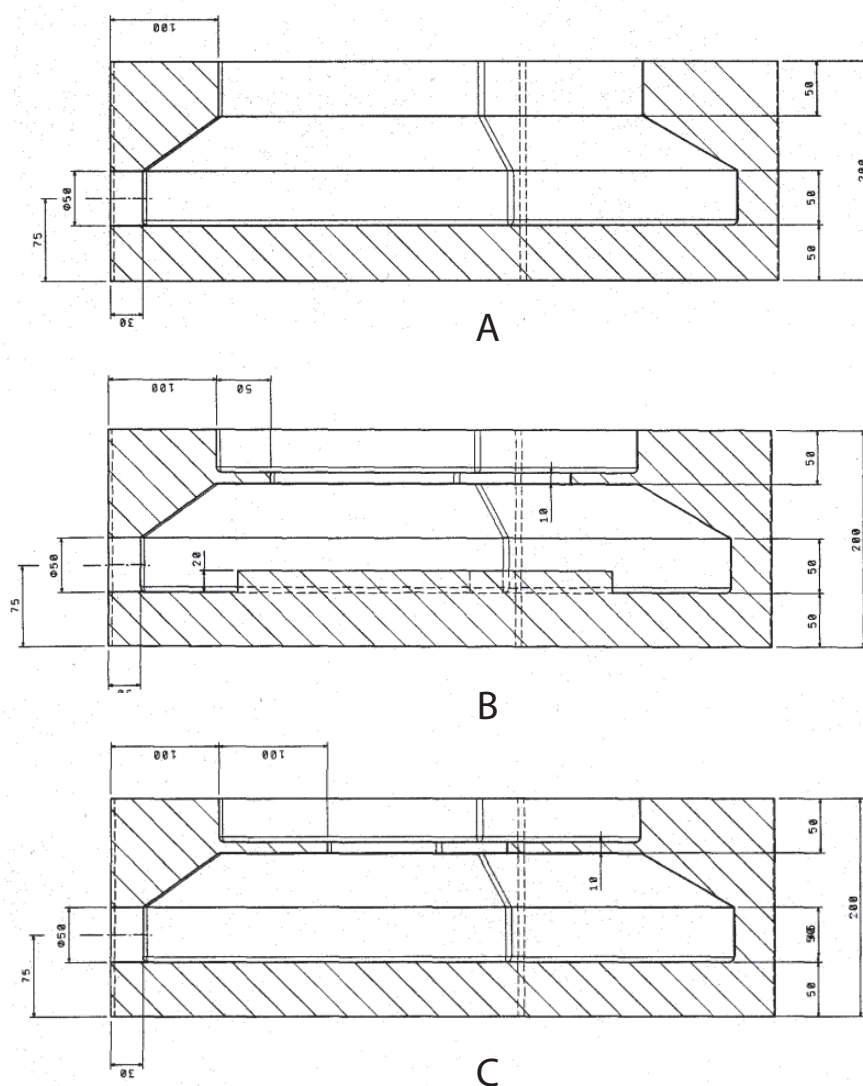
Ryc. 2. Widok wodnego modelu fizycznego kadzi pośredniej

Jako znacznik umożliwiający wizualizację zjawisk hydrodynamicznych zachodzących w modelu kadzi pośredniej zastosowano wodny roztwór  $KMnO_4$ . Model

wyposażony jest w aparaturę kontrolno-pomiarową realizującą przepływ sygnałów zarówno z modelu, jak i do modelu. Pozwala to na łatwą jego obsługę oraz na rejestrację i archiwizację uzyskiwanych danych w czasie rzeczywistym.

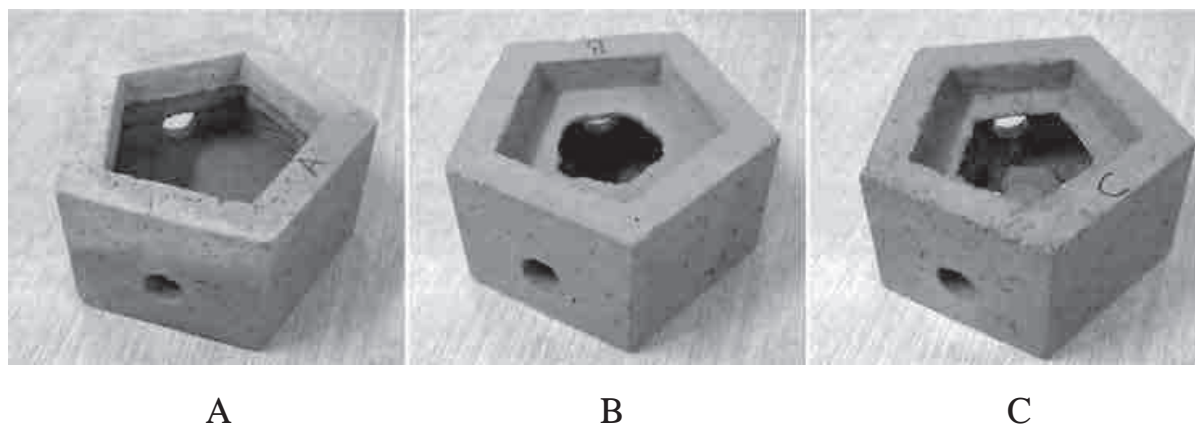
### 3. Modelowanie przepływu strumienia stali w kadzi pośredniej

Badania modelowe przeprowadzono dla trzech wariantów konstrukcyjnych inhibitorów turbulencji, których przekrój i widok przedstawiono na rycinach 3 i 4.

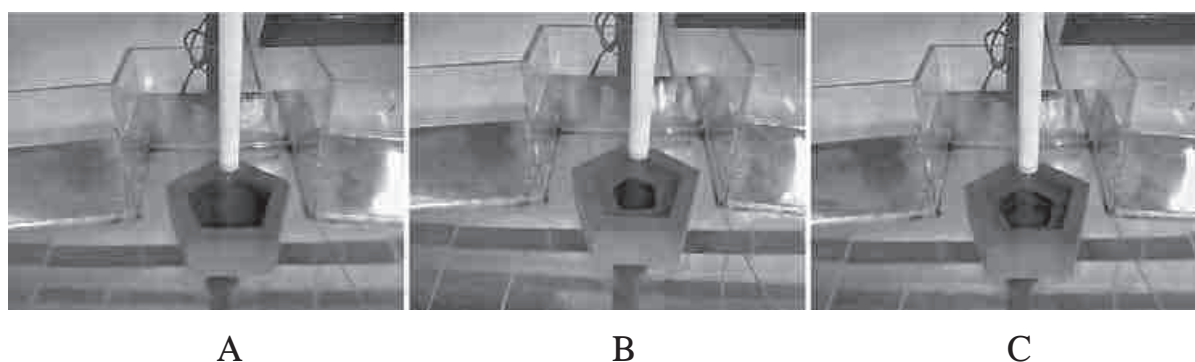


Ryc. 3. Przekrój ścianek i oznaczenie inhibitorów turbulencji

Lokalizację modeli inhibitorów turbulencji w modelu kadzi pośredniej dobrano tak, by otwory przelewowe skierować do strefy korytowej modelu kadzi pośredniej. Taka lokalizacja umożliwiła ocenę tworzenia się strefy tłokowej przepływu, zasięg generowanych strumieni przepływu oraz ewentualnych stref martwych. Lokalizację modeli inhibitorów turbulencji ilustruje rycina 5.



Ryc. 4. Widok i oznaczenie inhibitorów turbulencji

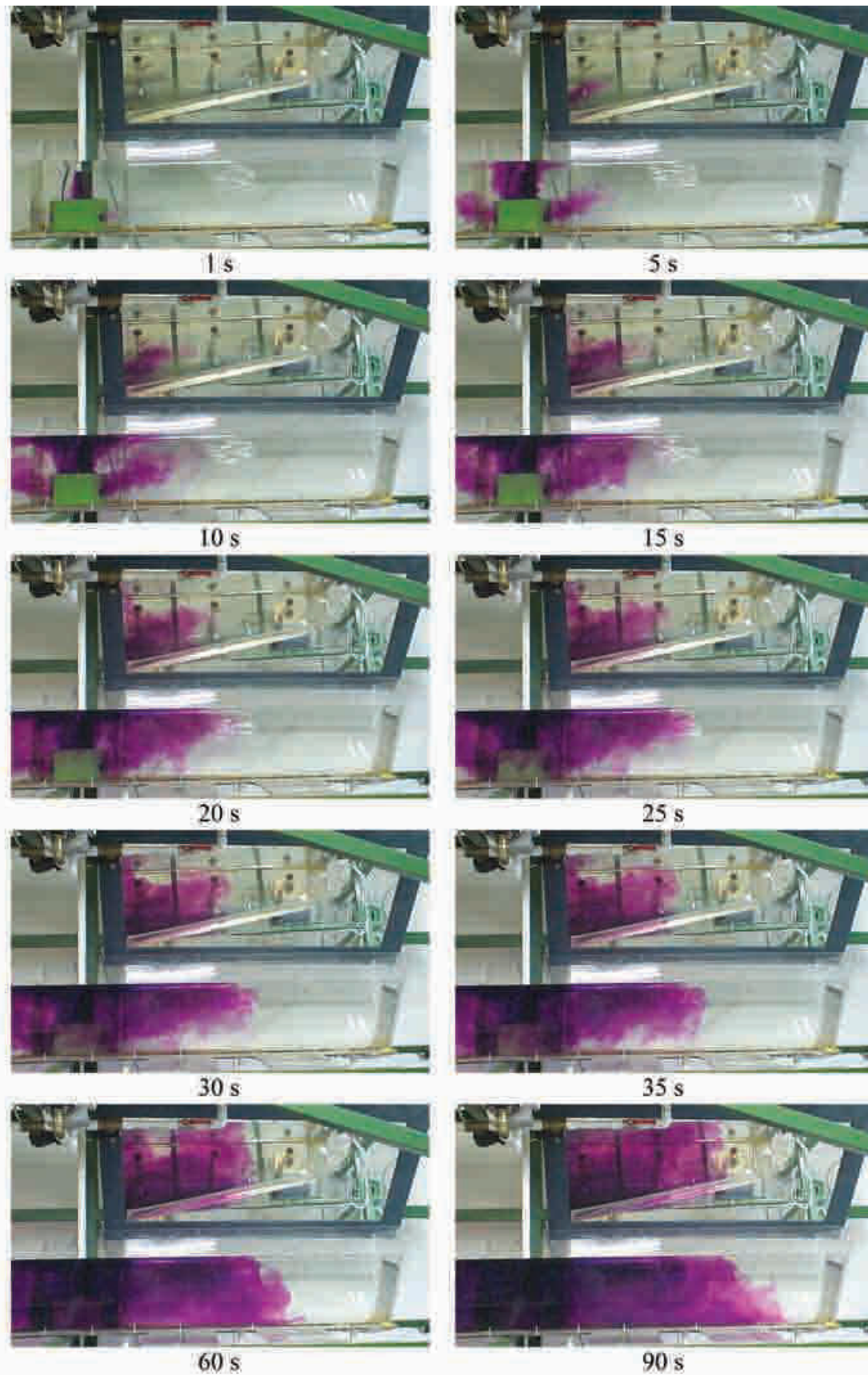


Ryc. 5. Lokalizacja modeli inhibitorów turbulencji w modelu kadzi pośredniej

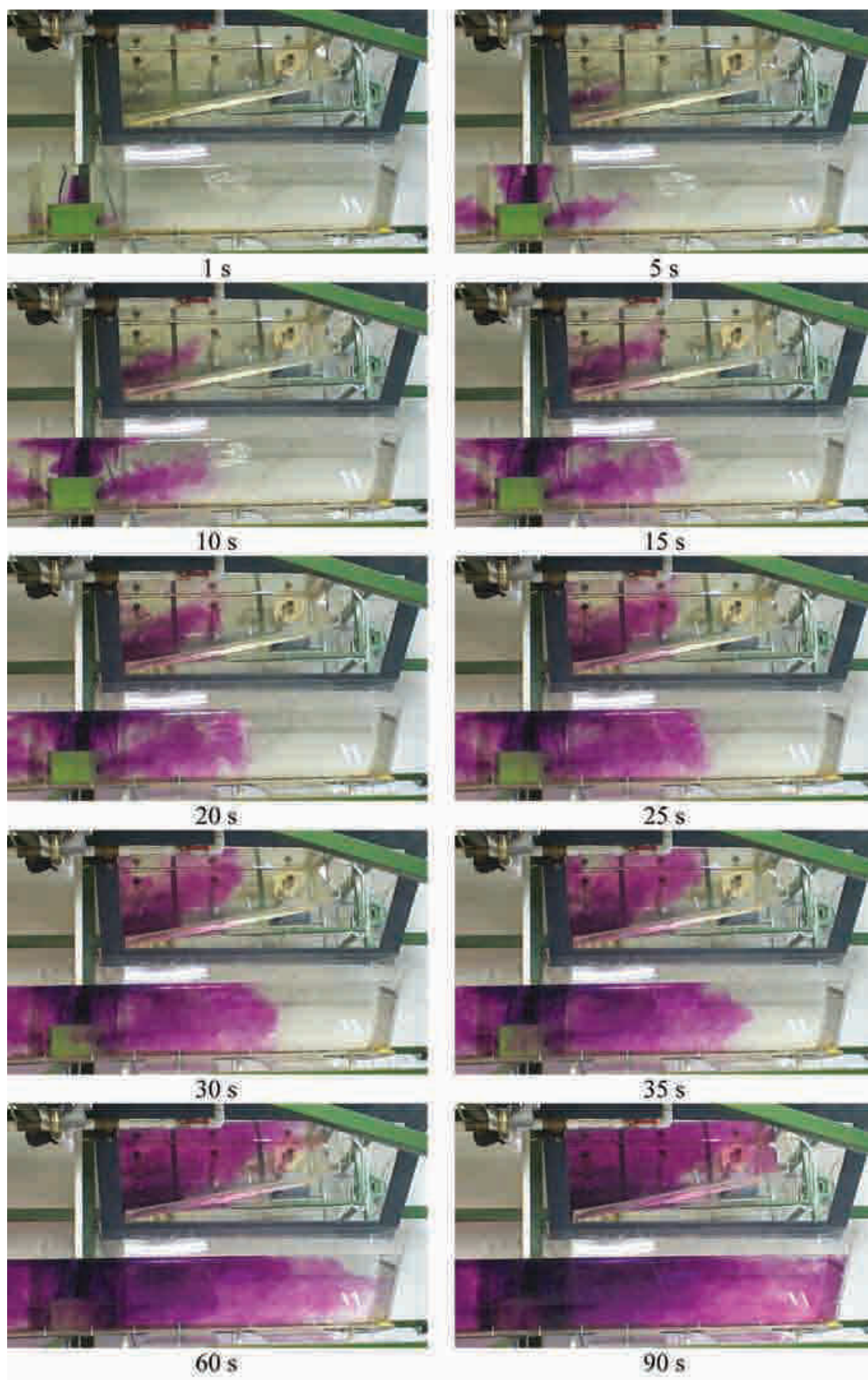
Dla każdego wariantu konstrukcyjnego inhibitora turbulencji wykonano serie eksperymentów mających charakter wizualizacji, według określonej w pierwszej fazie badań metodyki. Polegała ona na tym, że do modelu kadzi pośredniej z zainstalowanym w niej inhibitorem turbulencji wprowadzano ciecz modelową (wodę) do poziomu nominalnego, określonego warunkami podobieństwa. Następnie ustalano wymaganą prędkość przepływu cieczy modelowej przez układ: model kadzi głównej – model kadzi pośredniej – model krystalizatora. Z uwagi na to, że wykorzystywany model fizyczny urządzenia COS ma charakter segmentowy i z punktu widzenia badanych zjawisk, które zachodzą w modelu kadzi pośredniej, tylko model kadzi pośredniej spełnia wymagane warunki podobieństwa geometrycznego. Po wyregulowaniu kinetyki przepływu cieczy modelowej w modelu urządzenia COS wprowadzano do niej znacznik w postaci wodnego roztworu  $\text{KMnO}_4$ . Przebieg eksperymentów był rejestrowany za pomocą kamery wideo. Przykładowe rezultaty przeprowadzonych badań dla poszczególnych wariantów konstrukcyjnych inhibitora turbulencji ilustrują ryciny 6–8.

W celu porównania charakteru przepływu cieczy modelowej w modelu kadzi pośredniej w zależności od zastosowanego wariantu konstrukcyjnego inhibitora turbulencji, wielkości strefy przepływu turbulentnego, kinetyki tworzenia się strefy przepływu tłokowego oraz wielkości stref martwych, zestawiono rezultaty poszczególnych serii badań na rycinie 9.

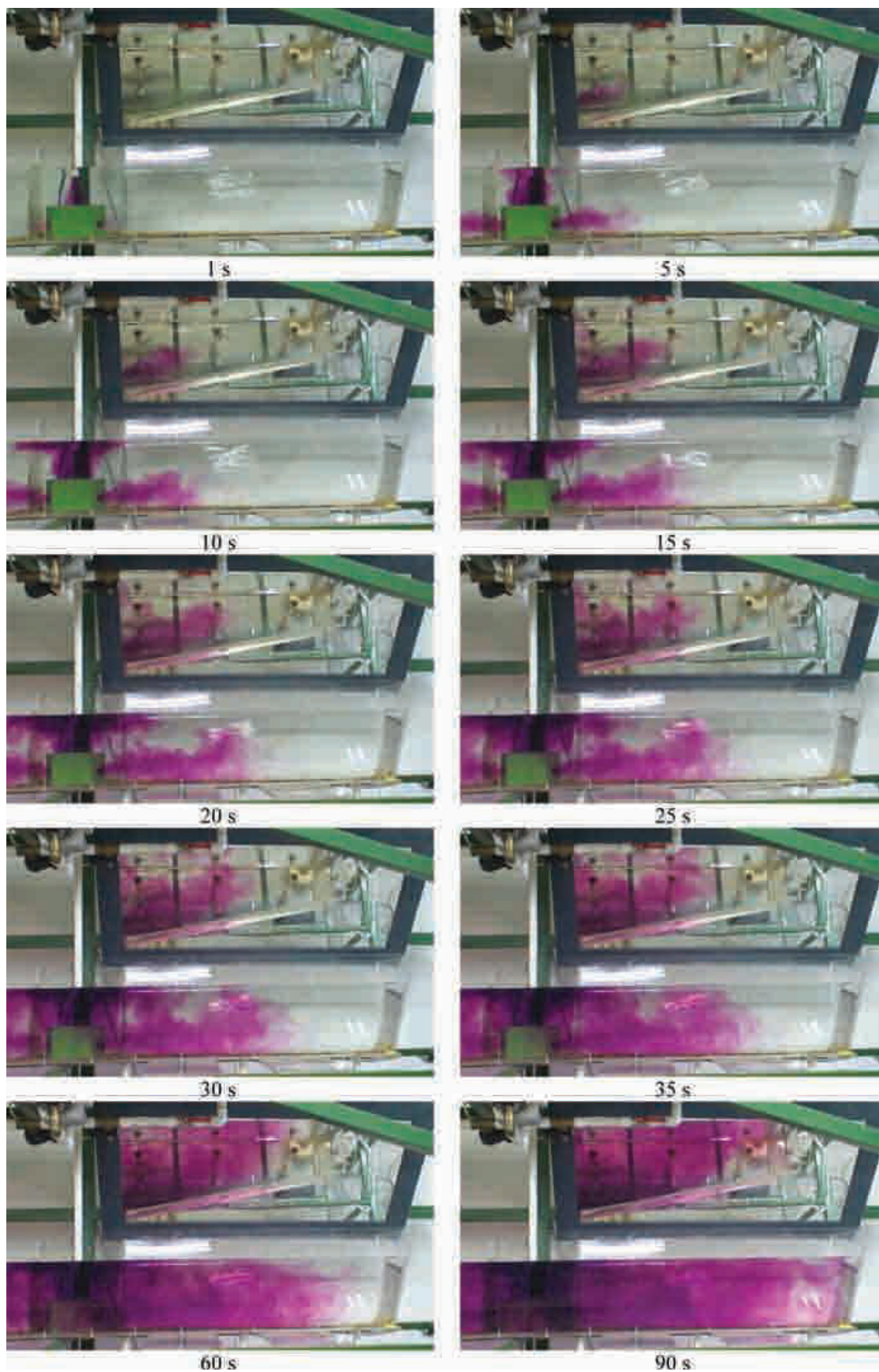




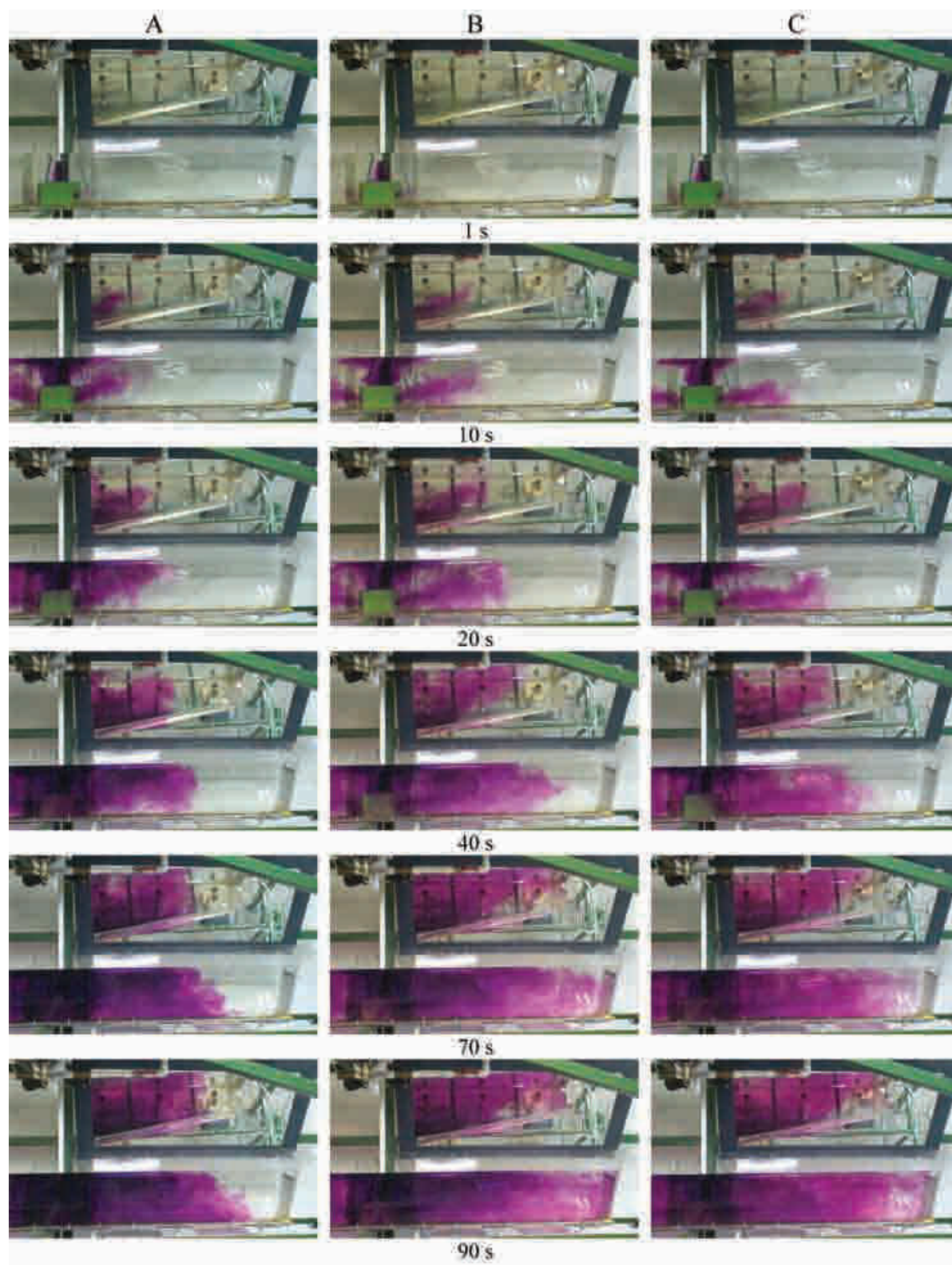
Ryc. 6. Przepływ cieczy modelowej w modelu kadzi pośredniej dla wariantu A inhibitora turbulencji



Ryc. 7. Przepływ cieczy modelowej w modelu kadzi pośredniej dla wariantu B inhibitora turbulencji



Ryc. 8. Przepływ cieczy modelowej w modelu kadzi pośredniej dla wariantu C inhibitora turbulencji



Ryc. 9. Zestawienie rezultatów badań poszczególnych wariantów konstrukcyjnych inhibitora turbulencji

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów określono charakter i kinetykę generowanych strumieni przepływu, które można scharakteryzować w następujący sposób:

**Wariant A** – przepływ cieczy modelowej charakteryzuje się stosunkowo niską kinetyką w porównaniu z wariantami B i C. Wynika to z dużego przekroju poprzecznego otworu wlewowego do inhibitora turbulencji. Takie rozwiązanie powoduje odpowiednie tworzenie się strefy przepływu turbulentnego, co może mieć korzystny wpływ na wymaganą homogenizację stali zarówno pod względem temperaturowym, jak i chemicznym. W znacznym stopniu ogranicza także niebezpieczeństwo wtórnego zanieczyszczenia stali wtrąceniami niemetalicznymi pochodzącymi z strefy podziału faz stal – żużel. Powoduje również mniejsze ciśnienie w przestrzeni roboczej inhibitora turbulencji, co ogranicza kinetykę wypływu przez boczne otwory przelewowe. Ma to niekorzystny wpływ na proces tworzenia się strefy przepływu tłokowego i może być powodem powstawania stref martwych w kadzi pośredniej. Postrzeżono także nieznaczny wznoszący kierunek strumienia cieczy modelowej wypływającej z bocznych otworów przelewowych.

**Wariant B** – zaobserwowano bardzo silny strumień wznoszący cieczy modelowej z otworu wlewowego inhibitora turbulencji, niebezpiecznie oddziałujący na jej powierzchnię. Wynika to z małego przekroju poprzecznego otworu wlewowego do inhibitora. W warunkach rzeczywistych może to być przyczyną wtórnego zanieczyszczenia stali wtrąceniami niemetalicznymi pochodzącymi z strefy podziału faz stal – żużel. Taki przekrój otworu wlewowego powoduje również wzrost ciśnienia cieczy modelowej w części roboczej inhibitora turbulencji, co generują wysoką kinetykę wypływu przez boczne otwory przelewowe do strefy korytowej modelu kadzi pośredniej. Sprzyja to tworzeniu się właściwej strefy przepływu tłokowego oraz zmniejsza ryzyko powstawania stref martwych.

**Wariant C** – na podstawie przeprowadzonych badań modelowych można stwierdzić, że charakter przepływu cieczy modelowej jest bardzo zbliżony do wariantu B. Różnice są tak nieistotne, że wnioski można sformułować podobnie jak w poprzednim wariantcie. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że wariant C rozwiązania konstrukcyjnego inhibitora turbulencji jest bardziej wymagający z punktu widzenia centrowania wylewu zanurzeniowego z kadzi głównej. Niewielkie rozmiary płyty podstrumieniowej, umieszczonej na dnie inhibitora turbulencji, wyposażonej dodatkowo w element kołowy, wymagają bardzo dokładnego skierowania strumienia stali do takiej konstrukcji inhibitora. Może to stanowić problem w warunkach przemysłowych.

## 4. Podsumowanie

W podsumowaniu można stwierdzić, że istnieją istotne różnice w sposobie generowania charakteru przepływu cieczy modelowej w modelu kadzi pośredniej przez inhibitor turbulencji w wariantcie konstrukcyjnym A a pozostałymi dwoma rozwiązaniami. Z punktu widzenia charakteru strefy przepływu turbulentnego korzystniejszym rozwiązaniem wydaje się wariant A. Natomiast jeśli chodzi

o strefę przepływu tłokowego, warianty B i C charakteryzują się większą kinetyką\*.

## Literatura

- [1] Kudliński Z., *Technologie odlewania stali*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
- [2] Odenthal H.-J., Bölling R., Pfeifer H., Holzhauser J.-F., Wahlers F.-J., *Optimisation of the fluid flow in a continuous casting tundish by physical and numerical modelling*, [w:] *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Continuous Casting Conference*, 14–16.10.2002, Birmingham (UK), s. 513–522.
- [3] Morales R.D., Lopez-Ramirez J., Palafox-Ramos J., *Mathematical simulation of the influence of buoyancy forces on the molten steel flow in a continuous casting tundish*, „Modelling Simulation Materials Science and Engineering” 2000, Vol. 8, s. 781–801.
- [4] Lopez-Ramirez S., Palafox-Ramos J., Morales R.D., Barron-Meza M.A., Toledo M.V., *Effects of tundish size, tundish design and casting flow rate on fluid flow phenomena of liquid steel*, „Steel Research International” 1998, Vol. 69, s. 423–428.
- [5] Müller L., *Zastosowanie analizy wymiarowej w badaniach modeli*, PWN, Warszawa 1983.
- [6] Merder T., Pieprzycza J., *Optimization of two-strand industrial Tundish work with use of turbulence inhibitors: physical and numerical modeling*, „Steel Research International” 2012, No. 11, s. 1029–1038.
- [7] Pieprzycza J., Saternus M., Merder T., *Modelowanie fizyczne procesów metalurgicznych*, [w:] *Polska metalurgia w latach 2011–2014: monografia*, red. K. Świątkowski i in., Komitet Metalurgii Polskiej Akademii Nauk, Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków 2014, s. 1–14.

IZABELA MAJCHROWICZ  
JACEK PIEPRZYCA  
HARALD KANIA

### STUDIES OF LIQUID STEEL FLOW IN A TUNDISH EQUIPPED WITH A TURBULENCE INHIBITORS – PHYSICAL MODELING

**Keywords:** tundish, steel flow control.

The aim of the study was to determine the effect of the shape of the turbulence inhibitors on the nature of liquid steel flow in the tundish, based on model tests. Laboratory studies of flow in the tundish equipped with developed turbulence inhibitors were performed at the Department of Materials Science and Metallurgy, University of Silesia in Katowice. Tests were conducted using three structural variants of inhibitors. It has been shown that there are significant differences in the nature of the fluid flow in the tundish equipped with flow controller with a different structures.

---

\* Praca została sfinansowana ze środków na działalność statutową Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych.