

Katowice 20.05.2024 r.

dr hab. inż. Tomasz Merder, prof. PŚ

Politechnika Śląska

Wydział Inżynierii Materiałowej

ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

e-mail: tomasz.merder@polsl.pl

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej **mgr inż. Hanny Suchan**

pt. „**Rola hydrodynamiki strumienia zasilającego kadź pośrednią w interaktywności faz ciągłych**”

Promotor rozprawy: *dr hab. inż. Adam Cwudziński, prof. PCz.*

1 Podstawa prawna opracowania recenzji

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo R-WIPiTM.BOD.511.12024 Pana dr hab. inż. Rafała Prusak, prof. PCz. – Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Częstochowskiej z dnia 20 marca 2024 roku.

2 Przedmiot i ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana praca jest napisana w języku polskim, ma klasyczny układ charakterystyczny dla rozpraw doktorskich tzn. można w niej wyróżnić dwie wydzielone części, część literaturową i doświadczalną/praktyczną. Rozprawa doktorska składa się z 4 rozdziałów (wstęp, część literaturowa, część doświadczalna, wnioski), liczy 198 stron maszynopisu A4. Rozprawa zawiera również spis treści, wykaz używanych skrótów i oznaczeń, spis rysunków (139 rysunków), spis tabel (5 tabel) oraz zamieszczony na końcu pracy wykaz literatury – liczący 191 pozycji, w tym 4, w których Doktorantka jest autorką lub współautorką. Cytowana literatura dobrze oddaje stan zagadnień związanych z tematyką zrealizowanej pracy.

3 Ocena doboru tematyki pracy

Współczesny proces ciągłego odlewania stali (COS) zaliczany jest do grupy progresywnych technologii stalowniczych. Pomimo wysokiego poziomu techniki stosowanej w tej metodzie jest ona ciągle rozwijana i modernizowana. Znaczący wpływ na ewolucję tej technologii ma rozwój nie

tylko w dziedzinie metalurgii stali, lecz także w dziedzinie materiałoznawstwa (ceramiczne materiały ogniotrwałe).

Kluczowym urządzeniem maszyny COS jest kadź pośrednia, której głównym zadaniem jest dystrybucja ciekłej stali do krystalizatorów, przy minimalizacji różnic właściwości fizycznych i fizykochemicznych dystrybuowanego metalu, związanych głównie z jego temperaturą odlewania. Obecnie kadź pośrednią identyfikuje się jako wysokotemperaturowy, przepływowy reaktor chemiczny, w którym realizują się procesy zarówno autonomiczne, jak i sprzężone, których efekty kształtują osiągnięty poziom metalurgicznej czystości odlewanej stali, a w konsekwencji końcowy wyrób stalowy.

Obecnie stosowanym sposobem optymalizacji pracy kadzi pośrednich (sterowania przepływem ciekłej stali w celu zapewnienia optymalnych warunków odlewania oraz otrzymywania wlewków ciągłych o wysokiej jakości i czystości metalurgicznej) jest zabudowa jej przestrzeni roboczej urządzeniami sterującymi przepływem (USP). Jednakże urządzenia te nie zapobiegają negatywnym skutkom zaburzenia przepływu ciekłej stali na etapie wymiany kadzi głównej podczas odlewania sekwencyjnego, a w konsekwencji wtórnym zanieczyszczeniom stali.

Zastąpienie USP poprzez odpowiedniej konstrukcji wylew osłonowy może pozytywnie wpływać na zmiany tej sytuacji. Jednocześnie zmodyfikowany wylew może sprzyjać poprawie warunków hydrodynamicznych przepływającej ciekłej stali przez kadź pośrednią. W oparciu o takie założenia Doktorantka sformułowała tezę pracy:

„Wylew osłonowy kadzi głównej wyposażony w głowicę z więcej niż jednym otworem wylewowym stymuluje strumień ciekłej stali zasilający kadź pośrednią, ograniczając objętość przepływu stagnacyjnego w jej przestrzeni roboczej i zapewniając interakcję faz ciągłych minimalizację zjawiska zmywania fazy żuźlowej z fazy metalicznej podczas ciągłego odlewania stali”.

Wybór do udowodnienia powyższej tezy metod modelowania numerycznego i fizycznego jest jak najbardziej uzasadniony. Podjęta tematyka pracy doktorskiej Pani mgr inż. Hanny Suchan jest ulokowana w perspektywnym obszarze badawczo-aplikacyjnym, a zatem jest aktualna.

4 Ocena pracy doktorskiej

Część literaturowa

Część pracy stanowiąca przegląd literatury obejmuje 9 podrozdziałów. Do opracowania części teoretycznej Doktorantka wykorzystwała głównie zagraniczną literaturę naukową. W podrozdziale 2.1 Doktorantka przedstawia rys historyczny rozwoju maszyny do ciągłego odlewania stali od pionowych do obecnie stosowanych z krystalizatorem łukowym oraz najnowszych maszyn horyzontalnych. Dość pobieżnie opisuje poszczególne jej urządzenia. W tym podrozdziale brakuje

rysunku poglądowego całej maszyny COS. W kolejnym Doktorantka opisała szczegółowo budowę kadzi pośredniej i jej zadania w procesie. Autorka opisała również poszczególne elementy zabudowy przestrzeni roboczej kadzi pośredniej w urządzenia sterujące przepływem ciekłej stali (tj. tamy, przegrody, inhibitory turbulencji, filtry ceramiczne oraz przegrody gazoprzepuszczalne - tzw. kurtyny gazowe). Charakteryzuje spełniane przez nie funkcje, dokumentując wynikami badań innych autorów. Doktorantka w podrozdziale dotyczącym wylewów osłonowych, który jest istotnym fragmentem części literaturowej pracy, opisuje różne ich rodzaje. Przedstawia zalety ich wykorzystania jako modyfikatorów przepływu ciekłej stali w przestrzeni roboczej kadzi pośredniej w celu polepszania warunków odlewania. W kolejnych podrozdziałach (2.5 i 2.6) opisuje zjawisko zmywania fazy żuźlowej, powstawanie tzw. „oka żuźlowego” i ich negatywny wpływ na jakość metalurgiczną otrzymywanych wlewków ciągłych. Równie istotnym fragmentem teoretycznej części rozprawy doktorskiej jest opis kryteriów podobieństwa stosowanych w modelowaniu fizycznym przepływów jednofazowych i wielofazowych. Autorka dysertacji przytacza liczby kryterialne, jakie muszą być spełnione, aby poprawnie odwzorować w modelu wodnym zachowanie faz ciekły metal – żużel. W podrozdziale 2.8 Doktorantka przedstawia dość pobieżny opis istotnego kryterium do oceny charakteru przepływu ciekłej stali przez kadź pośrednią, jakim są krzywe czasu przebywania (służące do określenia udziałów poszczególnych rodzajów przepływów). Podrozdział ostatni 2.9 stanowi podsumowanie części literaturowej, w którym Doktorantka wykazuje, iż możliwe jest zastąpienie standardowych stosowanych w przestrzeni roboczej kadzi pośredniej urządzeń sterowania przepływem wylewem osłonowym o zmodyfikowanej konstrukcji. Ta konkluzja jest punktem wyjścia do realizacji części badawczej, która została przedstawiona w kolejnych punktach rozprawy.

Część doświadczalna

Obiektem badań były dwie kadzie pośrednie jedno- i dwu -wylewowa różniące się geometrią przestrzeni roboczej, zabudową oraz pojemnością nominalną. Wyposażone one były w pięć wariantów zaprojektowanych przez Doktorantkę wylewów osłonowych. Charakteryzowały się one głowicą wyposażoną w więcej niż jeden otwór wypływowy. Do realizacji badań Doktorantka użyła dwóch technik badawczych modelowania numerycznego oraz fizycznego (z wykorzystaniem modeli wodnych).

Część badawczą Doktorantka podzieliła na pięć etapów, zgodnie z przedstawionym programem badań. Na początku Doktorantka przeprowadziła obliczenia wstępne w celu wyboru siatki obliczeniowej stosowanej w obliczeniach własnych, co jest bardzo istotne z punktu widzenia osiągniętych wyników badań. W etapie pierwszym przeprowadziła obliczenia numeryczne

z wykorzystaniem modelu jednofazowego przepływu ciekłej stali dla obu badanych kadzi wyposażonych w wylewy osłonowe: standardowy i 5 zaprojektowanych. Obliczenia wykonała dla warunków izotermicznych i nieizotermicznych. Dodatkowo analizie podała dwie wysokości zanurzenia wylewu osłonowego w ciekłej stali (0,1 i 0,4 m od powierzchni nominalnej ciekłej stali). Ten etap badań to wykonanie 144 symulacji numerycznych. W kolejnym etapie badań Doktorantka przeprowadziła badania w celu walidacji wyników symulacji numerycznych (warunki izotermiczne) z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem modelu wodnego (dla modelu kadzi jedno-wylewowej). Badania z wykorzystaniem modelu przeprowadzono dla 3 wybranych wariantów wylewów osłonowych plus wariant bazowy. Walidacji poddała krzywe czasu przebywania typu E oraz obliczone udziały poszczególnych rodzajów przepływów dla badanych wariantów. Na podstawie otrzymanych wyników badań Doktorantka podsumowała ten etap badań. Wyciągnięte konkluzje pozwoliły jej przejść do kolejnego etapu eksperymentów dla układów wielofazowych (woda/olej odpowiadających fazie ciekła stal/żużel). Badania te przeprowadzono z wykorzystaniem uproszczonego modelu wodnego kadzi pośredniej jedno-wylewowej przy użyciu techniki Shadow Sizing. Badania te przeprowadzono dla 3 wybranych wariantów wylewów osłonowych plus wariant bazowy. Obejmowały one oba etapy odlewania sekwencyjnego. Uzyskane wyniki zestawiono z wynikami symulacji numerycznych wykonanymi dla modelu wielofazowego Volume of Fluid (VOF) dla tej samej geometrii obiektu i mediów modelowych woda – olej. Pozytywna weryfikacja wielofazowego modelu numerycznego pozwoliła Doktorantce przejść do ostatniego etapu badań. Etap ten obejmował przeprowadzenie symulacji numerycznych z wykorzystaniem modelu VOF dla warunków rzeczywistych ciekła stal/żużel. Dotyczyły one obu etapów odlewania sekwencyjnego, a ich wyniki umożliwiły wybór optymalnej konstrukcji wylewu osłonowego dla obu badanych obiektów, co potwierdza oryginalność pracy.

Na podstawie wyników badań przeprowadzonych w rozdziale 3 Doktorantka w rozdziale 4 sformułowała wnioski. W tym miejscu należy podkreślić, że konsekwentnie realizowała założony program badań i dokonywała wyboru kolejnych kroków badawczych. Biorąc pod uwagę zakres prac wykonanych do realizacji celu i udowodnienia tezy uważam, że sposób prowadzenia badań był właściwy i dobrze uzasadniony.

Dodatkowo należy uwypuklić, iż zrealizowanie tak szerokiego programu badań wymagało od Doktorantki opanowania nowoczesnych technik obliczeniowych z wykorzystaniem programu komputerowego oraz zaawansowanej wiedzy z zakresu metalurgii i mechaniki płynów. Realizacja badań wymagała również opanowania wyrafinowanych technik badawczych z wykorzystaniem

modeli wodnych. Niezbędna w tym przypadku była wiedza z zakresu modelowania procesów, ze szczególnym uwzględnieniem kryteriów podobieństwa.

5 Zauważalne nieociągnięcia/Inne uwagi

Praca jest napisana w dużej części poprawnie językowo, rysunki i tabele umieszczone w tekście są czytelne. W pracy występują jednak liczne błędy edytorskie, znaczeniowe oraz kilka sformułowań nieprawidłowych pod względem stylistycznym, które nie umniejszają jakości merytorycznej recenzowanej pracy doktorskiej. Jednak powinny być poprawione w przypadku publikacji prezentowanych wyników badań. Poniżej wskazuję kilka z nich.

Uwagi krytyczne:

- Praca doktorska w języku polskim nie powinna zawierać opisów w języku angielskim (rys. 24).
- Praca doktorska jako opracowanie naukowe powinna zawierać ujednolicone jednostki miar, (najlepiej układ SI), np. (str. 32) „Mg” - (str. 59) „kg”, (str. 43) „m” - (rys. 29) „mm” – (str. 44) „cm”, (str. 44) „min” – „s”.
- Autorka dysertacji często używa sformułowań „w warunkach stacjonarnych i niestacjonarnych odlewania” (np. str. 8, 24, 48) czy „warunki ustalone i nieustalone odlewania sekwencyjnego” (str. 63), taki opis jest nieprecyzyjny. Autorce chodzi o etap odlewania sekwencyjnego pomiędzy wymianami kadzi głównych i etap przejściowy - podczas wymiany kadzi głównej, ale to należałoby dokładnie zdefiniować w pracy.
- W pracy występuje sformułowanie „wykonano/przeprowadzono badania na modelu wodnym” (np. str. 50, 58, 63, 64), podobnie jak „...symulacje numeryczne na modelu jednofazowym i wielofazowym...” (str. 58, 75) nie wykonujemy badań „na modelu” tylko z wykorzystaniem modelu.
- W pracy naukowej nie powinno się stosować opisu „zanurzenie płytsze i głębsze” opisując głębokość zanurzenia badanych wylewów osłonowych (str. 60, 73, 76 rys. 50-57, tab. 4) oraz używania sformułowania „skrajnych” (np. str. 64, 169), gdy analizujemy tylko dwie głębokości zanurzenia „0,1 i 0,4 m”.
- W recenzowanej pracy brak rysunku poglądowego lokalizacji w badanych kadziach pośrednich zaprojektowanych wylewów osłonowych. Jest opis, jednak łatwiej czytelnikowi byłoby zwizualizować położenie otworów w wylewach osłonowych względem przestrzeni roboczej kadzi, co w części badawczej jest ważne z punktu widzenia analizy otrzymanych wyników badań.
- W pracy występuje sformułowanie „...prędkość stacjonarna ...” (str. 70), należałoby wyjaśnić co Autorka ma na myśli.

- Autorka powinna unikać używania tych samych nazw wariantów symulacji dla kadzi jedno- i dwu-wylewowej („wariant bazowy, wariant 1 itd.”) przydatna byłaby tabela z oznaczeniami poszczególnych wariantów symulacji.
- Używane przez Autorkę pracy sformułowanie „cząstki” (np. rozdział 3.4.3) jest błędne dla opisu ciekłej fazy reprezentującej żużel (olej).

Przykładowe uwagi szczegółowe:

- str. 7, powinno być urządzeń sterujących przepływem,
- str. 7, zdanie zaczynające się od „Wymiana kadzi stalowniczej...” - błąd stylistyczny,
- str. 10, jest „płynny” powinno być ciekły,
- str. 10, zdanie zaczynające się od „Kontrola temperatury...” - błąd stylistyczny,
- str. 11, zdanie „... prędkość powierzchniowa ciekłej stali...” - błąd stylistyczny,
- str. 16, pierwszy akapit powinno być otwór filtra ceramicznego,
- str. 18, zdanie rozpoczynające się od „Odpowiednie zastosowanie przegrody...” - błąd stylistyczny,
- str. 17, ostatni akapit powinno być w osi wylewu,
- str. 20, jest „rys. 5a” powinno być (rys. 4a),
- str. 20, nad rysunkiem niepotrzebne słowa „w postaci”,
- str. 21, drugi akapit, powinno być, jednakże,
- str. 22, rys. 4 brak wyjaśnienia (i),
- str. 38, rys. 22 – podpis - powinno być wylewu zanurzeniowego,
- str. 44-46, pomyłona numeracja cytowanej literatury - brak cytowania [156],
- str. 49, pierwszy akapit powinno być cieczy,
- str. 53, „imitujących fazy” powinno być reprezentujące fazy,
- str. 69, powinno być użyte,
- str. 76, zdanie zaczynające się od „Linie przebiegające ...” - błąd stylistyczny,
- rys. 50-65, brak oznaczeń legendy i jednostek.

6 Uwagi do dyskusji

Po przestudiowaniu niniejszej rozprawy doktorskiej, nasuwają się pewne pytania i wątpliwości, które powinny zostać przedyskutowane i wyjaśnione podczas publicznej obrony pracy doktorskiej. Uwagi te mają charakter dyskusyjny i nie obniżają wartości pracy. Proszę o odniesienie się do następujących pytań:

1. Dlaczego przyjęto w obliczeniach numerycznych wartości strat ciepła takie same dla obu analizowanych kadzi pośrednich, choć różnią się one zasadniczo geometrią przestrzeni

roboczej oraz pojemnością nominalną (75 i 30 Mg), a tym samym warstwą wyłożenia ogniotrwałego? (Doktorantka na str.13 pisze „grubość warstwy roboczej zwiększa się wraz z pojemnością kadzi pośredniej”).

2. W pracy zostały przeprowadzone testy siatki obliczeniowej, jej wpływu na wynik obliczeń, dlatego przeprowadzono je tylko dla kadzi pośredniej jedno-wylewowej. Czy były przeprowadzone dla całej przestrzeni roboczej KP, czy uwzględniono płaszczyznę symetrii. Co było przesłanką do wytypowania położenia linii pomiarowych, na których analizowano prędkość ciekłej stali. Czy w obu obiektach i wszystkich wariantach obliczeniowych została użyta ta sama ilość komórek obliczeniowych?
3. Walidacja krzywych RTD typu E dla eksperymentu i symulacji numerycznych (rys. 74 e i f) wskazuje wyraźne przesunięcie krzywych wzdłuż osi czasu względem siebie oraz istotne różnice czasu dotarcia znacznika do wylewu (rys. 74 f). Dla pozostałych dwóch testowanych wariantów wylewów osłonowych (rys. 74 a i b oraz c i d) tak wyraźnego przesunięcia brak. Czym to może być spowodowane?
4. Doktorantka we wnioskach stwierdza, że najkorzystniejsze warunki hydrodynamiczne przepływu uzyskuje się w wariacie 1 wylewu osłonowego dla obu typów badanych kadzi pośrednich. Czy jednak analizując rysunki 56 b, 57 b, 64 b i 65 b nie należałoby się zastanowić nad niebezpieczeństwem wymywania wyłożenia ogniotrwałego w obszarze kadzi pośredniej poza rejonem wylewu?
5. Jaka jest opinia Doktorantki na temat zaprojektowanych w pracy wylewów osłonowych o tak skomplikowanej geometrii. Czy mogą one znaleźć zastosowanie w przemyśle. Jakie jest uzasadnienie ekonomiczne ich stosowania?

7 Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawione powyżej uwagi mogą posłużyć Autorce do udoskonalenia warsztatu naukowego oraz powinny przyczynić się do podniesienia poziomu planowanych publikacji. Nie obniżają one zarazem pozytywnej oceny recenzowanej pracy doktorskiej. Doktorantka posiada wiedzę, kompetencje prowadzenia badań doświadczalnych (modelowania fizycznego) i modelowania numerycznych, zgromadziła wiele wartościowych wyników badań mieszczących się w dyscyplinie naukowej Inżynieria Materiałowa. Opanowała również umiejętność analizy wyników badań i na ich podstawie formułowania stwierdzeń i wniosków.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Hanny Suchan p.t „Rola hydrodynamiki strumienia zasilającego kadź pośrednią w interaktywności faz ciągłych” spełnia wymagania stawiane rozprawą doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia

20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2020 roku poz. 85, z późn.zm.).
Wnioskuje zatem do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Częstochowskiej
o dopuszczenie pracy Pani mgr inż. Hanny Suchan do publicznej obrony w celu uzyskania stopnia
naukowego doktora w dyscyplinie naukowej Inżynieria Materiałowa.

Murder T.