Dr hab. inż. Marcin Rywotycki, prof. AGH
Katedra Techniki Cieplnej i Ochrony Środowiska
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. Adama Mickiewicza 30
30- 059 Kraków
Tel 12 617 25 82
Email: rywotyc@agh.edu.pl

Kraków, 16.05.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: Rola hydrodynamiki strumienia zasilającego kadź pośrednią w interaktywności faz ciągłych.

Autor rozprawy: mgr inż. Hanna Suchan

Przewód doktorski w dyscyplinie: Inżynieria Materiałowa

Recenzja została opracowana na zlecenie przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Częstochowskiej, dr hab. inż. Rafała Prusaka, prof. PCz, zawarte w piśmie numer R -WIPiTM.BOD.511.1.2024, l.dz. 15/2024 z dnia 20.03.2024r.

1. Ocena strony formalnej pracy

Rozprawa doktorska składa się ze 198 stron, na których zawarto 4 rozdziały, spis rysunków, spis tabel oraz bibliografię. Autorka zamieściła w pracy 191 pozycji literaturowych, których zakres tematyczny został prawidłowo dobrany w związku z tematem realizowanej pracy. Przeprowadzona analiza źródeł literaturowych jest wystarczająco obszerna. W pracy zwarte jest 139 rysunków oraz 5 tabel. Praca została napisana poprawnym językiem technicznym. Autorka nie ustrzegła się jednak drobnych błędów, które pojawiły się w tekście pracy oraz niekonsekwencji w opisie, zostały one wymienione w dalszej części recenzji. Praca ma typowy układ, który jest podzielony na część teoretyczną i doświadczalną, zawiera obszerną analizę otrzymanych wyników oraz zakończona jest wnioskami. Temat rozprawy oraz jej zakres, a także zastosowane metody badawcze pozwalają zakwalifikować ją do dyscypliny Inżynieria Materiałowa.

2. Wartość naukowa i merytoryczna pracy.

Tematyką recenzowanej pracy jest rola hydrodynamiki strumienia zasilającego kadź pośrednią. Nowoczesne urządzenia do ciągłego odlewania stali są tak skonstruowane i eksploatowane, aby zapewnić jak najlepsze warunki odlewania stali zapewniające wysoką jakość produktu. Aktualną tendencją jest pełne wykorzystanie możliwości kadzi pośredniej w zakresie: usuwania wtrąceń niemetalicznych do żużla poprzez zabudowę jej wnętrza odpowiednimi elementami konstrukcyjnymi oraz odpowiednią konstrukcją wylewu zanurzeniowego. Wykorzystanie wylewu osłonowego jako urządzenia sterującego przepływem pozwala na regulacje ilości stref aktywnych oraz stref martwych w objętości kadzi pośredniej. Wpływający do kadzi pośredniej strumień zalewowy, formułuje hydrodynamikę ciekłej stali w całym jej obszarze i pozwala na odpowiednie sterowanie procesami występującymi w tym agregacie metalurgicznym. Wszelkie optymalizacje pracy kadzi pośredniej jako elementu układu ciągłego odlewania stali są kluczowe dla poprawy jakości produktu końcowego. Zastosowanie wylewu wielootworowego, który rozdzielając strumień główny stali, wpływa korzystnie na funkcjonowanie kadzi pośredniej. Przyczynia się to do poprawy jakości oraz ograniczenia zużycia energii, co jest bardzo ważne przy obecnych rygorystycznych normach środowiskowych. Biorąc pod uwagę powyższe, tematyka pracy jest nadzwyczaj aktualna i bardzo ważna oraz ma możliwość potencjalnych wdrożeń jej wyników w praktyce przemysłowej. Jednym z narzędzi wykorzystanych w pracy doktorskiej jest modelowanie numeryczne procesów zachodzących w kadzi pośredniej. Opracowanie takiego modelu nie jest proste, gdyż musi on uwzględniać wiele zjawisk powiązanych ze sobą. Stworzenie modelu numerycznego łączącego w sobie zagadnienia mechaniki płynów oraz wymiany ciepła jest bardzo czasochłonne i wymaga szerokiej znajomości procesów budowy takich modeli. Samo przeprowadzenie obliczeń z wykorzystaniem narzędzi CFD wymaga również bardzo długiego czasu obliczeń.

W rozdziale pierwszym (Wstęp) Autorka przedstawia proces ciągłego odlewania stali ze skupieniem się na kadzi pośredniej oraz wprowadza czytelnika w zagadnienia związane z tematem pracy doktorskiej. Rozdział drugi (Część literaturowa) składa się z 9 podrozdziałów, w których szczegółowo zostają omówione zagadnienia związane z technologią ciągłego odlewania stali, kadzią pośrednią, wylewem osłonowym, rolą fazy żużlowej, zjawiskiem zmywania fazy

żużlowej, formowania się wtrąceń niemetalicznych. Kolejne podrozdziały zawierają definicje liczb kryterialnych dla przepływów jednofazowych i wielofazowych. Analizie zostaje również poddana krzywa czasu przebywania RTD jako narzędzia oceny struktury hydrodynamicznej. Rozdział drugi zakończony jest podsumowaniem części literaturowej. Rozdział trzeci (Część doświadczalna) składa się z licznych podrozdziałów, w której zostały omówione poszczególne etapy badań realizowanych w ramach pracy doktorskiej. Tą część pracy rozpoczyna cel i teza pracy, które zostały zdefiniowane prawidłowo na podstawie przeprowadzonej analizy literatury. W ramach badań Autorka wytypowała 5 wielootworowych konstrukcji wylewu osłonowego zanurzonych na głębokość 0,1 i 0,4 m. Zdefiniowała 2 kryteria, na podstawie których będzie oceniała skuteczność działania wylewów. Pierwszy z nich to obniżenie procentowego udziału przepływu stagnacyjnego. Drugim jest zmniejszenie powierzchni tworzącego się oka żużlowego. W kolejnych częściach pracy przedstawiona została charakterystyka badanego obiektu, którymi są kadzie pośrednie w układzie jedno- i dwu-wylewowym. Przedstawiony plan badań jasno wyjaśnia przyjęty schemat przeprowadzonych badań. W kolejnych podrozdziałach pracy autorka przedstawiła szczegółowo opracowany model numeryczny od stworzenia geometrii przez stworzenie siatki objętości skończonych po zastosowane modele oraz algorytmy rozwiązywania układów równań. Model numeryczny został przygotowany z wykorzystaniem programów Gambit, Mesher oraz Fluent pakietu ANSYS. W kolejnym podrozdziale Autorka opisała zastosowany model fizyczny wykorzystamy w celu weryfikacji opracowanego modelu numerycznego. Kolejne podrozdziały opisują wyniki badań oraz ich analizę, zaczynając od doboru siatki obliczeniowej zastosowanej w modelu numerycznym przez omówienie wyników symulacji numerycznych dla układu izotermicznego i nie izotermicznego. Kolejne podrozdziały dotyczą modelowania układu wielofazowego, które stanowiło duże wyzwanie badawcze. W badaniach wykorzystywano zarówno modelowanie fizyczne, jak i te z zastosowaniem narzędzi CFD. Ostatni rozdział pracy stanowią wnioski. Autorka przedstawiła 7 wniosków, które tworzą podsumowanie przeprowadzonych prac.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników obliczeń oraz symulacji fizycznych a także wniosków można stwierdzić, że Autorka potwierdziła tezę pracy stanowiącej problem naukowy i użyła do tego właściwych metod badawczych

zarówno numerycznych, jak i fizycznych. Nie ustrzegła się jednakże przed kilkoma błędami, które zostały wymienione poniżej.

3. Uwagi szczegółowe i pytania do pracy

- str. 11 – „Podobnie jak w kadzi głównej oraz w kadzi pośredniej, w krystalizatorze również obecny jest żużel." Czy jest to ten sam żużel? Jaka jest rola zasypki?
- str. 16 ,17, 18 i dalej – skrót inhibitora turbulencji – IT czy TI? Czy skrót IT dotyczy innego rozwiązania w konstrukcji kadzi pośredniej?
- str. 22 Rys. 4 - Podpis pod rysunkiem. Który wariant to wylew podwójny? Co przedstawia wariant i)?
- str. 23 - „Konstrukcja wylewu wirowego w postaci komór sprzyja dyssypacji energii kinetycznej wewnątrz wylewu, natomiast umieszczenie ostrza w górnej części wylewu kreuje ruch wirowy ciekłej stali." Wymagane rozwinięcie i uzasadnienie tego stwierdzenia.
- str. 46 – „Ze względu na potrzebę uzyskania stali o jak najlepszej czystości, żużel pokrywający lustro ciekłej stali powinien być dobrany tak, by w jak największym stopniu absorbować wtrącenia niemetaliczne oraz chronić stal przed stratami cieplnymi." Jaką rolę dodatkowo pełni żużel na powierzchni ciekłej stali?
- str. 55 Rys 38 - Podpis pod rysunkiem wymaga doprecyzowania. Wskazana krótka informacja co przedstawiają rysunki po prawej i lewej stronie.
- str. 53 - Czy w analizowanym przypadku znajduje zastosowanie liczba Bodensteina? Jak ją zdefiniować dla analizowanego przypadku?
- str. 59 - „Dodatkowo, w warunkach przemysłowych kadź pośrednia wyposażona jest w podstrumieniowy regulator turbulencji wyhamowujący strumień zasilający urządzenie. Jednakże, analizowana w pracy kadź pośrednia pozbawiona jest tego urządzenia sterującego przepływem." Brak wyjaśnienia powodu usunięcia elementu konstrukcyjnego. Wskazana krótka informacja o powodach usunięcia.
- str. 59 - Czy druga z rozważanych kadzi jest użytkowana? Czy jest to propozycja Autorki?
- str. 62 - Konstrukcje wylewów osłonowych – Przykład a, b, c, e posiadają tylko kopułę rozprowadzająca strumień stali; tylko wariant d posiada

dodatkową przestrzeń. Co było przyczyną wyboru takich konstrukcji wylewów osłonowych?

- str. 63 - „Po analizie uzyskanych wyników wybrano 3 warianty kadzi pośrednich wyposażonych w nowe konstrukcje wylewu osłonowego, dla których przeprowadzono badania na szklanym modelu wodnym wykonanym w skali 2:5." Na stronie 60 - przedstawione są 2 warianty kadzi. Wskazane wyjaśnienie rozbieżności.
- str. 69 i str. 75 - Czy przeprowadzono analizę wpływu siatki na wynik rozwiązania numerycznego? Na podstawie jakich założeń wytypowano siatki do obliczeń? Czy były analizowane warianty z inną wielkością siatki dla tego samego typu elementów?
- str. 81 - „Na płaszczyźnie symetrii natomiast, można zaobserwować rozkład strumieni ciekłej stali oraz rozkład jej prędkości pod powierzchnią swobodną. Zastosowanie wylewów zanurzonych płycej w ciekłej stali, powoduje generowanie większych prędkości ciekłej stali w strefie zalewania, w stosunku do pozostałej części kadzi pośredniej, w wariantach z wylewami osłonowymi o 1 lub 2 otworach (maksymalna prędkość 0,26 m/s w wariancie bazowym) (rys.52a-d)." Rysunki od 52 i 53 nie są wykonane w płaszczyźnie symetrii.
- str. 82 - „W większości przypadków prezentowany przepływ jest niesymetryczny". W których wariantach jest symetryczny?
- str. 97 - Porównując wyniki uzyskane w symulacjach numerycznych przeprowadzonych w warunkach nieizotermicznych, średnie prędkości ciekłej stali nie różnią się znacznie od tych uzyskanych w warunkach izotermicznych. Jaka jest procentowa różnica w uzyskanych wynikach?
- str. 106 i 107 Jaka jest średnia różnica względna pomiędzy wynika obliczeń a wynikami pomiarów dla krzywych RTD typu E? Co jest powodem występowania tych różnic?
- str. 118 - „Przeprowadzenie symulacji numerycznych dla układu jednofazowego pozwoliło wytypować 3 wylewy osłonowe wywierające najbardziej korzystny wpływ na przepływ ciekłej stali w kadzi pośredniej jedno- i dwu-wylewowej. Ze względu na korzyści płynące ze stosowania zaproponowanych wylewów osłonowych, do badań w układzie wielofazowym wytypowano wylewy stosowane w wariancie 1 i 2."

I dalej

„Podobnie jak dla modelu wodnego, na którym przeprowadzono badania na układzie jednofazowym, do wykonania badań na układzie wielofazowym wytypowano wylewy osłonowe zastosowane w wariantach 2, 4 i 5."

Które warianty zostały wytypowane do analizy?

- str. 124 - „Analiza wybranych prędkości wykazała, że model numeryczny Volume Of Fluid pomimo ograniczeń dość dobrze odzwierciedla układ wielofazowy" Jaka jest różnica względna pomiędzy wynikami obliczeń a badaniami wodnymi? Czym są one spowodowane? Jakie wartości przyjmują prędkości dla innych wariantów?
- str. 143 Rys 111 - Brak informacji o przyjętym układzie współrzędnych utrudnia analizę wykresów. Gdzie zgaduje się początek układu współrzędnych w opracowanym modelu?

Wymienione powyżej błędy oraz niejasności nie wpływają na wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej i zostały przedyskutowane oraz wyjaśnione przez Doktorantkę podczas rozmowy.

W trakcie czytania pracy nasunęło mi się także kilka pytań dotyczących sposobu rozwiązania postawionego zagadnienia badawczego:

1. Co stanowiło podstawę wyboru wariantów do analizy dla wariantów układu wielofazowego?
2. Proszę wyjaśnić podstawy przyjęcia wartości strumieni Q w analizie układu wielofazowego?
3. Jaki jest rekomendowany sposób pracy kadzi pośrednich na podstawie analizy układu wielofazowego?
4. Proszę o opisanie budowy analizowanych kadzi. W jaki sposób zostały wyznaczone straty ciepła do otoczenia, które zostały zaczerpnięte z literatury?

4. Ocena końcowa pracy

Podsumowując, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska jest samodzielnym i oryginalnym rozwiązaniem trudnego zagadnienia badawczego. Praca stanowi obszerny i ciekawy materiał badawczy. Doktorantka wniosła

oryginalny wkład w rozwój wiedzy dotyczącej zagadnień związanych z eksploatacją kadzi pośredniej. Na podkreślenie zasługuje fakt dużego nakładu pracy związanego z przygotowaniem modelu numerycznego, wykonaniem czasochłonnych obliczeń oraz analizy otrzymanych wyników badań. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne nie umniejszają wartości pracy, powinny stanowić podstawę doskonalenia warsztatu badawczego Autorki pracy.

Reasumując, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pani magister inżynier Hanny Suchan spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określonym w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 roku poz. 85, z późn. zm.) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Częstochowskiej o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.

Marcin Rywotycki

Dr hab. inż. Marcin Rywotycki, prof. AGH