



Prof. dr hab. inż. Tadeusz Pacyniak prof. zw.
tadeusz.pacyniak@p.lodz.pl
Katedra Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji
Wydział Mechaniczny
Politechnika Łódzka

RECENZJA
rozprawy doktorskiej

mgr inż. Pawła Krzysztofa Krajewskiego, zatytułowanej

***„Zależność przewodności cieplnej wybranych mas formierskich
od temperatury”***

wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Odlewnictwa
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Prof. dr hab. inż. TADEUSZ PACYNIAK prof.zw.

Politechnika Łódzka

Katedra Technologii Materiałowych

i Systemów Produkcji

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Pawła Krzysztofa Krajewskiego**, zatytułowanej
„*Zależność przewodności cieplnej wybranych mas formierskich od temperatury*”

wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Odlewnictwa

Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

1. Charakterystyka ogólna pracy

W ostatnich latach wraz z rozwojem technologii informatycznych coraz większe znaczenie w trakcie przygotowania procesów odlewniczych odgrywają metody numeryczne. Modelowanie komputerowe procesów odlewniczych z wykorzystaniem metod numerycznych pozwala na odtworzenie zjawisk fizyko-chemicznych, czy kinetyki procesów zachodzących w odlewie czy formie. Rozwój nauki wsparty możliwościami obliczeniowymi umożliwia połączenie wielu obszarów nauki takich jak np.: matematyka, fizyka, chemia czy też termodynamika, które stanowią podstawę algorytmów stosowanych w metodach obliczeniowych pozwalających na opisanie procesów odlewniczych. Za pomocą symulacji komputerowych można wpływać na poprawę jakości odlewów, przeprowadzić procesy optymalizacji procesu odlewania, zredukować zużycie energii co wpływa na obniżenie kosztów produkcji. Aby symulacje komputerowe przybliżyły z dużą dokładnością procesy rzeczywiste, należy dobrze zdefiniować ogólnie pojęte warunki brzegowe oraz stałe materiałowe. W procesach odlewniczych w układzie odlew-forma odlewnicza mamy do czynienia z nieustaloną wymianą ciepła, dlatego niezbędna jest znajomość stałych materiałowych w funkcji temperatury.

Recenzowana praca wpisuje się tematykę współczesnych badań, a dotyczy zagadnień związanych z badaniami w stanie nieustalonej wymiany ciepła, właściwości

termofizycznych mas formierskich, w szczególności mas wilgotnych o osnowie kwarcowej z dodatkiem bentonitu w kontakcie z ciekłym stopem.

Autor w swojej pracy m.in. opracował metodykę pomiaru właściwości termofizycznych wybranej grupy mas formierskich w warunkach nieustalonego transportu ciepła, zmodyfikował metodykę analizy zarejestrowanych pól temperatury w formie odlewniczej, opracował pełen zakres zmian współczynnika przewodzenia ciepła w zależności od temperatury oraz przeprowadził weryfikacje otrzymanych wyników z wynikami modelowania numerycznego.

Problematykę recenzowanej dysertacji należy więc uznać jako trafną zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i utylitarnego ze względu na możliwości zastosowania wyników badań i opracowań Autora w metodach obliczeniowych.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Pawła Krzysztofa Krajewskiego zatytułowana „Zależność przewodności cieplnej wybranych mas formierskich od temperatury” liczy 238 stron o co najmniej 100 stron za dużo, które uzupełnia bogata bibliografia (218 pozycje), oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

Uważam, że dobór literatury przez Doktoranta pozwala wnosić o Jego dobrym merytorycznym przygotowaniu do podjęcia problematyki związanej z realizowaną tematyką pracy. Pozycje literaturowe są aktualne, większość publikowana jest po 2000 r. Język rozprawy jest poprawny, konstrukcja pracy jest logiczna, prawidłowo określone tezy i cele pracy.

Poziom edycyjny pracy nie budzi większych zastrzeżeń, tekst jest sformatowany poprawnie, a rysunki staranne i czytelne, zawarto również wykaz ważniejszych skrótów i symboli, który ułatwia czytanie pracy ze zrozumieniem.

2. Ocena części literaturowej

Przegląd literaturowy zawarty jest w rozdziałach od 1 do 3 pracy jako część teoretyczna. W rozdziałach tych Autor opisał zagadnienia związane z tematyką pracy przedstawiając kolejno:

- wprowadzenie zawierające istotę podjętej tematyki,

- metody pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła materiałów, ich podział na metody wykorzystujące grzejniki elektryczne jako źródła ciepła oraz metody badań pola temperatury formy odlewniczej nagrzewanej ciepłem odlewu,
- podsumowanie w formie krytycznej analizy aktualnego stanu wiedzy w odniesieniu do przedstawionych metod badawczych wraz z wynikami badań.

Układ tej części pracy jest prawidłowy, a sam opis dość wyczerpujący, choć autor nie ustrzegł się błędów głównie edytorskich. W treści pracy Autor wielokrotnie przedstawiając literaturowe wyniki badań w formie wykresów wprowadzał współczynnik determinacji R^2 , który jest miarą jakości dopasowania modelu, w oprogramowaniu Microsoft Excel definiowany jako kwadrat współczynnika korelacji, co zostało przedstawione np. na Rysunku 1.2 na stronie 25. W mojej ocenie skoro nie przeprowadzał badań to nie powinien na tym etapie pracy współczynnika tego określać. Na rysunku 1.8 znajdującym się na stronie 33, który przedstawia wykres czasu krzepnięcia oraz względną zmianę czasu krzepnięcia odlewu płyty aluminiowej w funkcji przewodności cieplej Autor przy opisie osi rzędnych oraz odciętej zastosowane jednostki opisał w nawiasach kwadratowych. Ponadto rysunki w dysertacji pisanej w języku polskim powinny być przetłumaczone na język polski, natomiast na rys. 2.12 na stronie 53 pozostawiono opis oryginalny w języku angielskim, co spowodowało, że Autor w treści pracy mówiąc o czujniku posługuje się sformułowaniem „sensor”. Brak tłumaczenia występuje również na rys. 2.15 na stronie 59, który na dodatek charakteryzuje się bardzo słabą czytelnością - jakością. Przedstawiając w formie schematów urządzeń elektrotechnicznych powinno używać się do opisu poszczególnych elementów systemu pełnych opisów lub kodów literowych według IEC 750, a na Rysunku 2.18 na stronie 63 Autor przedstawił schemat metody gorącego drutu (ang. Hot Wire) stosując do opisanie zasilania literę P zamiast np. zapisu „zasilanie” lub używając kodu literowego G wg IEC 750. Ponadto w pracy pojawiły się rysunki, do których brakło jakiegokolwiek odniesienia, bądź też komentarza, przykładem są rysunki od Rys. 3.6 str. 87 do Rys. 3.9 str. 89.

W pracy Autor przedstawia wiele zależności matematycznych opisujących różne zjawiska związane z treścią pracy, ale nie do końca przekonująco wyjaśnia potrzebę ich

występowania. Przykładem może powiązanie zależności 2.41 z zależnością 2.42 na stronie 54 związaną ze spadkiem temperatury powierzchni czujnika a współczynnikiem przewodzenia ciepła. Podobnie na stronie 60 Autor wprowadził bez uzasadnienia w zależności 2.48 dwie wartości bezwymiarowe: V oraz ω , których również brakło w wykazie symboli i oznaczeń. W opisie zależności można znaleźć nieprecyzyjne zdefiniowane funkcje. Przykładem jest funkcja $\text{erf}(u)$ przedstawiona w zależności 2.91 stronie 78, której Autor nie zdefiniował jako funkcję błędów Gaussa, nazywając „funkcją $\text{erf}(u)$ ”.

W pracy znaleźć można lapsusy językowe, np. „Analiza krzywych z rysunku 1.6 pokazuje (...)” zamiast sformułowania np.: że z analizy wynika Innym przykładem błędu językowego jest opis Rysunku 2.3 na stronie 41 „Schemat aparatu” zamiast urządzenia.

Ogólnie jednak należy stwierdzić, że zebrane dane stanowią dobrze prezentujący się zbiór informacji odpowiadający tematowi pracy.

Część literaturowa kończy się podsumowaniem, z którego wynika potrzeba podjęcia takiego właśnie tematu i określenia tez i celów pracy.

Oceniając tę część pracy stwierdzam, że tak przedstawiona część literaturowa stanowi wystarczającą podstawę teoretyczną do realizacji podjętego tematu.

3. Teza i cel rozprawy

W rozdziale 4 zatytułowanym „Tezy i cele pracy” Autor określił dwie tezy pracy oraz cztery cele pracy. Pierwsza z tez dotyczy wpływu wilgotności form odlewniczych na zakres i charakter zmian ich współczynnika przewodzenia ciepła. Druga teza dotyczy istotności znajomości pełnej charakterystyki temperaturowej zależności współczynnika przewodzenia ciepła, uwzględniającej proces parowania wody, która wpływa na wysoką jakość numerycznego modelowania procesu stygnięcia i krzepnięcia odlewu w formie wilgotnej.

Doktorant określił dwa cele poznawcze i dwa utylitarne. Pierwszy cel poznawczy dotyczy ustalenia, jaki jest wpływ wilgotności mas formierskich na kształtowanie zakresu zmian współczynnika przewodzenia ciepła oraz opracowania jego pełnego zakresu zmienności od momentu zalania formy do końca krzepnięcia odlewu. Drugi

z celów poznawczych mający cechy utylitarnego dotyczy wykazania słuszności przyjętej przez Autora metodyki badawczej poprzez analizę wyników badań eksperymentalnych z wynikami modelowania numerycznego.

Pierwszym celem utylitarnym było opracowanie metodyki pomiaru właściwości termofizycznych badanych mas formierskich z wykorzystaniem metody nagrzewania formy ciepłem odlewu w warunkach nieustalonego transportu ciepła. Drugi z celów utylitarnych dotyczy opracowania zmodyfikowanej metodyki analizy zarejestrowanych pól temperatury w formie odlewniczej pozwalająca na uzyskanie ciągłego przebiegu współczynnika dyfuzji temperatury.

Postawione w tymże rozdziale dwie tezy są adekwatne do postawionych celów. Również zakres badań opisany w rozdziale 5 w podrozdziale 5.1 „Zakres badawczy pracy” jest poprawny i pozwala na zrealizowanie postawionych celów i udowodnienia tez rozprawy doktorskiej.

4. Ocena części merytorycznej rozprawy

Autor rozprawy w części doświadczalnej przedstawił metodykę badań, użyte materiały, wymienił wykorzystaną aparaturę badawczą, opisał sposób wzorowania termoelementów oraz metodykę opracowania wyników pomiaru temperatury. W tej części przedstawił również proces przygotowania form eksperymentalnych oraz form cylindrycznych. Na tym etapie opisu metodyki brakuje wyjaśnienia jaki był cel stosowania dwóch rodzajów form i ile w nich było umieszczonych termoelementów oraz w jakiej odległości umiejscowione w formie. W mojej ocenie brakuje zestawienia planu eksperymentów, który jednoznacznie zdefiniowałby dla konkretnego eksperymentu jakie zastosowano stopy, wymiary i kształt form, stan masy formierskiej (sucha, podsuszana czy wilgotna), rozkład i ilość termoelementów. Zestawienie takie zdecydowanie ułatwiłoby analizę późniejszych wyników badań. Ponadto w opisie metodyki badawczej zabrakło informacji na temat przyjętych parametrów (np. dokładności siatki itp.) do modelowania numerycznego – symulacji w oprogramowaniu ProCAST, co ma istotny wpływ na otrzymane wyniki badań.

Doktorant dość szczegółowo przedstawił w jaki sposób przeprowadził obliczenia bezwymiarowego parametru u porównując obliczone przez siebie wyniki badań za pomocą aproksymacji szeregiem Maclurina z danymi literaturowymi wyznaczonymi

w oparciu o funkcję błędów Gaussa, które zastosował do obliczeń współczynnika dyfuzji temperatury masy formierskiej w funkcji temperatury, a następnie akumulacji ciepła oraz współczynnika przewodzenia ciepła.

Chcę podkreślić, że opracowana metoda obliczeniowa zastosowana w przeprowadzonych badaniach zdecydowanie podnosi wartość pracy. Dobór zarówno rodzaju badań, jak i technik badawczych, wykorzystanie metod analitycznych, potwierdza dojrzałość naukową Autora rozprawy.

W tej części pracy Doktorant przedstawił wyniki swoich badań, dla trzech badanych metali cynku, aluminium i miedzi odlewanych do form w stanie wilgotnych, podsuszanych i suchym w postaci graficznej przedstawiających:

- pole temperatury układu odlew – forma w funkcji czasu,
- pole temperatury w przekroju masy formierskiej dla wybranych momentów czasu z zakresu od początku zalewania do końca krzepnięcia,
- pochodną temperatury względem czasu w centrum odlewu oraz jej fragmenty dla początku i końca krzepnięcia,
- zależność współczynnika dyfuzji temperatury masy formierskiej w funkcji czasu,
- zależność współczynnika dyfuzji temperatury masy formierskiej w funkcji temperatury,
- zależność współczynnika przewodzenia ciepła masy formierskiej w funkcji czasu,
- zależność współczynnika przewodzenia ciepła masy formierskiej w funkcji temperatury,
- krzywe nagrzewania masy formierskiej w punktach pomiarowych oraz ich pierwsze pochodne względem czasu.

Zabrakło mi w tej części pracy jakiegokolwiek słowa wprowadzającego, komentarza co ułatwiłoby interpretację wyników, co jest również spowodowane brakiem dobrze opracowanej metodyki badawczej o czym wspomniałem wcześniej. Co prawda podrozdziałach zatytułowanych „Dyskusja wyników (...), znajduję wyjaśnienia, które pozwalają na zrozumienie przeprowadzonych eksperymentów.

Przy analizie tej części pracy nasuwają się następujące uwagi:

1. dlaczego nie badano wilgotności badanych mas skoro praca mówi o istotności wilgotności na właściwości termofizyczne mas formierskich?,
2. dlaczego wykonując eksperymenty zastosowano różne formy odlewnicze o różnych wymiarach odlewów płyt, w których zastosowano różne ilości termoelementów usytuowane w różnych odległościach?,
3. w jakim celu na wykresach z krzywymi nagrzewania masy formierskiej przedstawiono dodatkowo pierwsze pochodne?,
4. dlaczego do przeprowadzenia walidacji numerycznej wyników badań Autor wytypował tylko serię badań dla stopu miedzi (Cu-2) odlanego do formy wilgotnej a nie podsuszanej?
5. co Autor rozumie mówiąc o „średniej całkowitej” określając wartość współczynnika wymiany ciepła (str. 198 drugi akapit)?.

Merytoryczną część pracy kończą wnioski, dotyczące oceny metody badawczej, oceny krytycznych punktów metody, charakterystyki uzyskanych wyników.

We wnioskach opisanych w części III. *Charakterystyka uzyskanych wyników* pewną wątpliwość budzi wniosek 2, który nie wynika ze zrealizowanych badań Autora, mówi on, że zmiany współczynnika przewodzenia ciepła mogą wpływać na cechy pierwotne struktury odlewu, w szczególności na wielkości ziaren. W pracy nie przedstawiono, żadnych informacji na temat mikrostruktur (struktur) otrzymanych odlewów.

Powyższe uwagi, pomimo, że dość liczne, nie umniejszają merytorycznej wartości pracy. Do szczególnych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- opracowanie metodyki pomiaru właściwości termofizycznych mas formierskich w warunkach nieustalonego transportu ciepła,
- zmodyfikowanie metodyki analizy zarejestrowanych pól temperatury w formie odlewniczej,
- opracowanie pełnego zakresu zmian współczynnika przewodzenia ciepła wraz z walidacją otrzymanych wyników z wynikami modelowania numerycznego.

5. Ocena końcowa

Przytoczone uwagi krytyczne w niczym nie umniejszają pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy zarówno pod względem zastosowanych metod badawczych, jak też uzyskanych wyników i ich interpretacji. Doktorant zrealizował zakres merytoryczny pracy. Wykazał się wiedzą, umiejętnością w prowadzeniu eksperymentów oraz opracowania i analizy wyników, a także wyciągania wniosków.

Należy podkreślić, że opracowanie metodyki badań właściwości termofizycznych mas formierskich w warunkach nieustalonego transportu ciepła jest niewątpliwie istotnym osiągnięciem autorskim Doktoranta.

Wniosek końcowy

Na podstawie powyższej opinii o rozprawie doktorskiej mgra inż. Pawła Krzysztofa Krajewskiego, zatytułowanej „Zależność przewodności cieplnej wybranych mas formierskich od temperatury” reprezentującej dyscyplinę **Metalurgia** stwierdzam, że wykazał się on wiedzą umożliwiającą prowadzenie samodzielnych badań naukowych, a oceniana praca jest samodzielnym rozwiązaniem problemu badawczego, stanowi wkład w postęp wiedzy i spełnia wymogi stawiane przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 poz. 595 ze zm. Dz. U z 2005 r, nr 164 poz. 1365), przedkładałam więc Wysokiej Radzie Wydziału Odlewnictwa Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie wniosek o dopuszczenie **mgra inż. Pawła Krajewskiego** do publicznej obrony.

Łódź, 17. 12. 2018 r.

