

Kraków 28.12.2023 r.

Prof. dr hab. inż. Dariusz Kopyciński
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie
Wydział Odlewnictwa
ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Jureczko,
pt.: „Symulacja komputerowa procesu wypełniania wnęki formy
w metodzie Lost Foam z uwzględnieniem wpływu zgazowania
modelu i ewakuacji gazów”**

*Recenzja wykonana na zlecenie przewodniczącej Rady Dyscypliny Materiałowej
Prof. dr hab. inż. Mari Sozańskiej w Politechnice Śląskiej,
Wydział Mechaniczny Technologiczny w Gliwicach
(Nr pisma: RDIMa RMT.512.19.2023)*

1. Charakterystyka podjętej problematyki naukowo-badawczej

Zazwyczaj podczas zalewania wnęki formy ciekłym metalem uaktywniają się zjawiska odpowiadające za jakość kształtowanego odlewu. Technologia wytwarzania odlewów metodą pełnej formy związana jest z dodatkowym procesem spalania jednorazowego modelu, podczas którego dochodzi do wydzielania się produktów gazowych. Zjawisko to w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia lejułości ciekłego metalu i wydłuża czas odlewania. Niewątpliwie w takim przypadku spodziewać się należy powstawania wad w odlewie. Ponadto w metodzie Lost Foam należy zwrócić uwagę na kilka innych czynników technologicznych, które mogą wpływać na sam proces wypełniania formy przez ciekły metal. Okazuje się, że znane programy do symulacji procesów zalewania, krzepnięcia i stygnięcia odlewów wykonanych w technologii pełnej formy generują błędne wyniki. Zatem wdrożenie danych laboratoryjnych odpowiedzialnych za wypełnienie wnęki formy przez ciekły metal może pozwolić na uzyskanie parametrów symulacji komputerowej zbliżonych do tych otrzymywanych w rzeczywistym odlewie. Dlatego uważam, że temat podjęty przez doktoranta Michała Jureczko związany jest z ważnym zagadnieniem w Inżynierii Materiałowej i dotyczy otrzymywania odlewów wolnych od wad w technologii pełnej formy. Należy również podkreślić, że w rozprawie doktorskiej autor podejmuje się trudnego zadania jakim jest pozyskanie danych doświadczalnych odpowiedzialnych za proces wypełnienia wnęki formy przez ciekły metal. Ponadto zamierzeniem doktoranta jest zastosowanie uzyskanych danych doświadczalnych w wybranym programie do symulacji komputerowej procesu krystalizacji odlewu otrzymanego w technologii pełnej formy a następnie wdrożenie opracowanej techniki w warunkach przemysłowych Odlewni Rafamet. Praca doktorska powstała w ramach III edycji programu Doktorat Wdrożeniowy.

Biuro Dziekana

1

wpłynęło dnia 04.01.2024
RDIMa RMT 7151/2024
nr zał.

2. Ocena formalna pracy

Przedłożona do oceny praca doktorska napisana została w języku polskim i obok streszczenia polskiego zawiera również streszczenie w języku angielskim. W streszczeniu doktorant informuje, że praca ma wysoki potencjał wdrożeniowy, szczególnie chodzi tutaj o opracowaną i zweryfikowaną metodykę do pozyskiwania danych do symulacji komputerowej odlewania metodą pełnej formy. Czytelnik jest poinformowany, że badania zgazowania modeli jednorazowych prowadzono na prototypowym stanowisku do ilościowej oceny produktów zgazowania materiałów na modele zaproponowane w pracy. Ponadto ze streszczenia wynika, że doktorant zdecydował się wykorzystać do badań symulacyjnych i doświadczalnych próby lejności Ruffa. Na podstawie tej próby oceniał wpływ parametrów przedmiotowej technologii na lejność ciekłego metalu i czas zalewania wnęki formy. Wyniki prac doświadczalnych i symulacji komputerowej przedstawione w 7 rozdziale zawierają zestawienie i porównanie ilości produktów zgazowania badanych materiałów określonej na podstawie wartości ciśnienia w komorze spalania. Dodatkowo w rozdziale tym doktorant ocenił wyniki badań doświadczalnych i symulacyjnych przepuszczalności, analizę porównawczą wypełniania wnęki formy wirtualnej i rzeczywistej według zastosowanej próby lejności Ruffa oraz wyniki wpływu stosunku pola powierzchni do objętości modelu/odlewu na przebieg wypełniania formy ciekłym metalem. Praca doktorska z pozycji przedstawionego streszczenia wygląda bardzo interesująco i ma nowatorski charakter, co zresztą potwierdza się podczas analizy właściwej jej treści.

Treść recenzowanej pracy odpowiada tematowi przedstawionemu w tytule. Praca doktorska jest napisana na 137 stronach zawiera 98 rysunków i 30 tabel. Doktorant w pracy powołuje się na 98 pozycji literaturowych. Analizowana literatura jest aktualna. Praca posiada układ klasyczny, zatem obejmuje część dotyczącą przeglądu literatury oraz część główną - badawczą. Ogólnie tekst rozprawy posiada charakter techniczny i napisany jest poprawnym językiem polskim. Praca ogólnie sprawia wrażenie zwięzłej i przemyślanej.

3. Ocena merytoryczna pracy

Ze wstępu dołączonego do pracy doktorskiej dowiadujemy się, że zastosowanie pełnej formy w technologii otrzymywania odlewu z żeliwa szarego zmniejszają nawet do 30% koszty produkcyjne. Zatem jest to ważna informacja dotycząca redukcji również zużycia energii. Dalej dowiadujemy się, że badania zaplanowane w pracy mają charakter wdrożeniowy a ich celem jest zwiększenie efektywności procesu pełnej formy - technologii stosowanej w odlewni Rafamet. W rozdziale dotyczącym analizy literatury doktorant zwrócił uwagę na pojawiające się dodatkowe trudności uzyskania odlewów pozbawianych wad. Szczególnie dotyczy to bezpośredniej konwersji z tradycyjnej technologii do technologii pełnej formy, czyli problemu nieodpowiedniego zaprojektowania samej technologii. W związku z powyższym, kluczowym zadaniem pracy jest prawidłowe odprowadzanie gazów z wnęki formy. Dodatkowo z tej analizy wynika, że jedną z najczęstszych wad w procesie pełnej formy jest pojawienie się warstwy węgla błyszczącego i deformacja powierzchni odlewu. Na 19 i 20 stronie doktorant na podstawie literatury formułuje wniosek, że temperatura ciekłego metalu oraz jego skład chemiczny jest kluczowym parametrem

wpływającym na ilość węgla błyszczącego pojawiającego się na powierzchni odlewu, a tym samym na wady powierzchniowe odlewu. Przy czym pojawia się informacja, że sterowanie składem chemicznym w warunkach przemysłowych jest bardzo ograniczone. Wydaje się, że jest to wniosek dyskusyjny, ponieważ w powszechnym użyciu są nowoczesne metody analizy termicznej, które pozwalają na korektę składu chemicznego ciekłego metalu podczas wytopu żeliwa szarego. *Dlatego proszę doktoranta o wyjaśnienie tego zagadnienia w powiązaniu z metodą pełnej formy i wadami powierzchniowymi odlewów z żeliwa szarego.*

Również na 19 stronie, nagle w tekście pojawia się informacja o wadach w odlewach wielkogabarytowych otrzymywanych metodą pełnej formy. Uważam, ale już po przeczytaniu pracy, że temat opracowany przez doktoranta dotyczy również odlewów wielkogabarytowych. Natomiast wygląda na to, że doktorant nie do końca chciał się pochwalić tą wiedzą z czytelnikiem. *Proszę doktoranta o komentarz dotyczący zastosowania wyników pracy w odlewach wielkogabarytowych specjalnego przeznaczenia.* Dopiero na samym końcu rozdziału 4 w ostatnim piątym celu pracy dowiadujemy się, że praca dotyczy również technologii wytwarzania odlewów wielkogabarytowych. Dlatego uważam, że w części analizy literatury zabrakło opracowania dotyczącego wytwarzania odlewów wielkogabarytowych. Przyznaję, że w tej części pracy znalazły się zdania opisujące problemy pojawiające się podczas wytwarzania odlewów wielkogabarytowych metodą pełnej formy. Jednak informacje te sprawiają wrażenie dopisanych do wcześniej napisanego tekstu. Po prostu brakuje jednego rozdziału pracy opisującego technologie otrzymywania odlewów wielkogabarytowych. Do słabszej strony części teoretycznej pracy należą również słabej jakości rysunki dotyczące opisu zagadnień symulacji w programie Magma (rys. 2.2.3 i 2.2.4) oraz prezentowania krzywych ubytku masy polistyrenu (rys. 3.3). Według ogólnej wiedzy termograwimetryczną krzywą różniczkową DTG otrzymuje się poprzez zróżniczkowanie krzywej TG; $dm/dt = f(T) - \{ \% / \min \}$. *Proszę doktoranta o wyjaśnienie zapisu w tekście nad rys. 3.3 oraz o wyjaśnienie czy przedstawiony rysunek jest poprawny? Czy to czasami nie jest pomyłka redakcyjna?*

Natomiast większość tematów związanych z przedstawieniem metod pełnej formy, materiałów stosowanych na jednorazowe modele odlewnicze, wady odlewów oraz parametry technologiczne opisujące proces pełnej formy i pirolizę modelu polistyrenowego oceniam pozytywnie i nie mam do tej części zastrzeżeń. Analizę literatury zamyka czwarty rozdział pracy w którym doktorant sformułował poprawnie dwie tezy pracy oraz wyodrębnił pięć jej celów. W 5 rozdziale opisano materiały zastosowane w badaniach od jednorazowych materiałów na modele odlewnicze poprzez materiały formierskie i gatunki żeliwa, którym zalewano formy odlewnicze. Okazuje się, że żeliwo użyte do badań pochodziło z przetopu złomu żeliwa sferoidalnego oraz żeliwa szarego gatunku 250. Jednak autor nie podaje składu chemicznego żeliwa oraz podstawowych parametrów prowadzenia wytopu. W sumie samo to zagadnienie może wpływać na leżność ciekłego metalu i było analizowane ze szczególną starannością podczas stosowanej próby Ruffa. *Mam pytanie do doktoranta związane ze składem chemicznym żeliwa i temperaturą jego odlewania – czy te parametry były brane pod uwagę podczas badań szczególnie w kontekście wdrożenia dla odlewów wielkogabarytowych?*

W metodyce badań doktorant opisuje prototyp zaprojektowanego stanowiska do ilościowej oceny zgazowywania materiałów na jednorazowe modele odlewnicze. Bardzo wysoko oceniam projekt, wykonanie i zastosowanie tego stanowiska w realizacji pracy

doktorskiej. Doktorant w tym urządzeniu dokonywał pomiarów ilości produktów zgazowania badanego materiału na modele jednorazowe. Badanie polegało na porównaniu dwóch cykli procesu tj. pustej komory i z komorą wypełnioną próbką polistyrenu. Na tej podstawie doktorant mógł oszacować ilość produktów zgazowania badanej próbki. Dane z badań doświadczalnych były również wykorzystane w programie Magma do obliczania gęstości materiału przeznaczonego na modele jednorazowe. Na podkreślenie również zasługuje fakt, że doktorant w tej części pracy pokazał umiejętność obliczania gęstości gazu jako produktu pirolizy materiału próbki po zgazowaniu.

Następnym punktem rozważanym w metodyce badań była przepuszczalność masy formierskiej - ważne zadanie z punktu widzenia pojawienia się wad odlewniczych w przedmiotowej technologii. Badano próbki masy formierskiej o zróżnicowanym udziale osnowy i materiałów wiążących bez pokrycia i z pokryciem używanym w technologii pełnej formy. Badania przepuszczalności przeprowadzone zostały na maszynie typu LPIR-3e firmy Multiserw. W badaniach symulacyjnych przepuszczalności masy doktorant przyjął figurę sześcienną utworzoną z 27 ziaren piasku. Obliczenie porowatości dla sześcienu polegało na wyznaczeniu różnicy między objętością sześcienu, a objętością pozostałych ziaren o średnicy zastępczej obliczonej na podstawie analizy sitowej. Do tej części pracy nie mam zastrzeżeń. Dalej doktorant obliczył przepuszczalność modelowej masy formierskiej w środowisku oprogramowania ANSYS Fluent i wykonała analizę porównawczą z wartościami rzeczywistymi przepuszczalności masy formierskiej i jest to wartościowa część pracy. *Jednak doktorant niezbyt uważnie przygotował opis kroków symulacji w tym programie symulacyjnym i na 53 stronie można znaleźć kilka pomyłek lub braki w opisie wartości, współczynników i stałych.* Do analizy lejućności ciekłego metalu uwzględniającą technologię pełnej formy doktorant wybrał próbę Ruffa (stosowaną w ocenie lejućności staliwa). Według mnie jest to dobry wybór, metoda jest prosta do wykonania w technologii pełnej formy. *W opisie pod rys. 6.4.1.2 brakuje zdefiniowania oznaczeń wykorzystanych w schemacie pirolizy modelu polistyrenowego i spadku ciśnienia w zależności od odległości szczeliny gazowej.* Następnie doktorant pokazał wyniki symulacji wypełnienia wnęki formy dla modelu bez pokrycia i z pokryciem w technologii pełnej formy z zastosowaniem przeliczonych wyników badań przepuszczalności. Bez tego dodatkowego zabiegu program Magma nie daje dużych możliwości w tego rodzaju symulacji dla technologii pełnej formy. *Jedynie budzą zastrzeżenia słabej jakości (mało czytelne) rysunki etapów symulacji wypełnienia wnęki formy (rys. 6.4.1.4).* W dalszej kolejności doktorant opisał badania doświadczalne w postaci serii testowych wytopów. W ramach każdego wytopu została wykonana próba lejućności Ruffa [600x10x10]. W każdej formie rozmieszczono termoclementy, a formy zostały wykonane z masy o różnym udziale materiałów osnowy. *I w tym miejscu doktorant zaznacza, że temperatura odlewania była również zróżnicowana, jednak nie podaje wartości tej temperatury.* Ponadto wpływ zależności pola powierzchni do objętości modelu na proces wypełniania formy doktorant opisał stosując modele odzwierciedlające podstawowe bryły geometryczne: czworościan foremny, kule i sześcienn. Został wyznaczony iloraz pola powierzchni do objętości. Podobnie doktorant opracował modele, których geometria była wzorowana na cechach geometrycznych produkowanych w technologii pełnej formy w odlewni Rafamet. Również w tym wypadku zachowano zasadę doboru modeli o jednakowej objętości i masy przy różnym polu powierzchni i geometrii.

Mogę stwierdzić w tym miejscu, że dobrze przygotowana i przemyślana metodyka badań była kluczem zdobycia z pełnym sukcesem istotnych wyników doświadczalnych i też w przełożeniu na wyniki symulacji komputerowej potwierdzających założone tezy pracy.

W 7 rozdziale doktorant zaprezentował wyniki badań materiałów na jednorazowe testowe modele i te nazywane w pracy jako „zasadnicze”. *Moją wątpliwość budzi zdanie (str. 73), a mianowicie „...wartości gęstości produktów pirolizy otrzymane dla próbek zbadanych w etapie zasadniczym są bardzo zbliżone ponieważ wszystkie zostały wykonane z polistyrenu spienionego budowlanego...”* – proszę o wyjaśnienie w porównaniu z podaną tabelą 7.2.3 (w tabeli jest błędna jednostka gęstości produktów pirolizy). Proszę również wyjaśnić dlaczego dokonano wyboru (str. 74) próbek PR-4(EPP) oraz PR-6 i PR-8 (EPE) do zastosowania na jednorazowe modele i jaki związek ma ta informacja z wnioskami podanymi na 109 stronie.

Dalej doktorant zestawiał wyniki doświadczalne i symulacji komputerowej przepuszczalności badanej masy formierskiej. Następnie przedstawiono wyniki lejućności próby Ruffa – doświadczalne, jak i wynikające z obliczeń w programie Magma. Na 86 stronie pojawiają się informacje o wartościach temperatury zalewania. Proszę o komentarz doktoranta, co do wartości analizowanej temperatury zalewania, szczególnie w odniesieniu do odlewów wielkogabarytowych. Tych informacji właśnie według mnie brakowało w części teoretycznej i w tej części doktorant także specjalnie nie wyjaśnia przyjętych wartości. Dodatkowo w głównych wnioskach pracy (str. 114) pojawia się temperatura ciekłego metalu jako parametru (jednego z wielu) wpływającego na przebieg wypełniania wnęki formy w rozpatrywanej technologii.

W dalszej części doktorant przedstawił wyniki badań wpływu zależności pola powierzchni do objętości modelu na proces wypełniania formy. Po opracowaniu metodyki implementacji danych laboratoryjnych w programach symulacyjnych oraz walidacji uzyskanych wyników doktorant zastosował uzyskaną wiedzę do przeprowadzenia symulacji komputerowej krzepnięcia wybranych czterech odlewów wielkogabarytowych produkowanych w technologii pełnej formy. Dane wrażliwe dla firmy Rafamet zostały ukryte. *Moje pytanie dotyczy weryfikacji wyników symulacyjnych porowatości otrzymanej w rzeczywistych odlewach i tej otrzymanej w obliczeniach (jak tą wartość porównano) i czy zdanie ze 105 strony „...podobnie dla odlewu nr 3 symulowany czas wypełniania był dłuższy od rzeczywistego...” - jest prawdziwe?*

4. Wniosek końcowy

W pracy doktorskiej przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych na prototypowym stanowisku do określania ilości produktów zgazowania modeli jednorazowego. Stwierdzam, że przy wykorzystaniu tej metody można precyzyjnie określić ilość produktów pirolizy materiału modelu i dalej z sukcesem jest możliwe wykorzystanie tych wyników do implementacji w programach symulacyjnych. Ponadto proste staje się określenie różnicy ciśnienia dla alternatywnych materiałów formy na jednorazowe modele odlewnicze. W pracy również opracowano symulację komputerową dotyczącą przepuszczalności masy formierskiej, co stanowiło podstawę oceny próby lejućności w technologii pełnej formy. Do tego należy dodać udaną analizę ilorazu pola powierzchni do objętości modelu i wpływ tego

parametru na proces wypełniania wnętrza formy w technologii pełnej formy. Wyniki przeprowadzonych badań zostały wdrożone dla odlewów wielkogabarytowych produkowanych w technologii pełnej formy. *Uwzględniając powyższe stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie trudnego problemu naukowego, którego implementacja w warunkach przemysłowych przyniesie niewątpliwie pozytywne efekty ekonomiczne. Doktorant opanował wiedzę teoretyczną i metody badawcze niezbędne do samodzielnego prowadzenia badań naukowych z dyscypliny Inżynieria Materiałowa oraz wykazał się umiejętnością w ich prowadzeniu.* Uwagi krytyczne (feedback) przedstawione w recenzji nie umniejszają wartości pracy, raczej stanowią podstawę doskonalenia warsztatu badawczego doktoranta.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Michała Jureczko spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez aktualną ustawę Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa w Politechnice Śląskiej w Katowicach o dopuszczenie mgr inż. Michała Jureczko do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Prof. Dariusz Kopyciński

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)