



**POLITECHNIKA  
RZESZOWSKA**  
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



WYDZIAŁ  
MECHANICZNO-  
TECHNOLOGICZNY  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Stalowa Wola, 12.12.2023 r.

dr hab. inż. Andrzej TRYTEK, prof. PRz  
POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. Ignacego Łukasiewicza  
Wydział Mechaniczno-Technologiczny  
Zakład Wytwarzania Komponentów i Organizacji Produkcji  
ul. Kwiatkowskiego 4, 37-450 Stalowa Wola

### RECENZJA

rozprawy doktorskiej

mgra inż. Michała JURECZKO

pt.: „*Symulacja komputerowa procesu wypełniania wnętrza formy w metodzie lost foam z  
uwzględnieniem wpływu zgazowania modelu i ewakuacji gazów*”.

której promotorem jest dr hab. inż. Dariusz Bartocha prof. PŚ

Zlecenie wykonania recenzji, otrzymano 07.11.2023 r. od Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Marii Sozańskiej pismem RDJMa.RMT.512.19.2023, a dnia 27.10.2023 r.

#### 1. Tematyka rozprawy

Narzędzia informatyczne i symulacje procesów są obecnie niezbędne do rozwiązywania problemów w technologiach wytwarzania odlewów. Te nowoczesne rozwiązania są skuteczne, a dzięki ich zastosowaniu odlewy charakteryzują się coraz niższymi wskaźnikami wad. Przyczynia się to do skrócenia czasu przygotowania i wykonania odlewów oraz obniżenia kosztów produkcji. Zastosowanie programu symulacyjnego o jego dużej skuteczności przewidywania i prognozowania pozwala na optymalizację parametrów technologii wytwarzania formy i rdzenia oraz zalewania formy i krzepnięcia metalu.

Wzrost wymagań ze strony odbiorców odlewów oraz wytyczne dotyczące ochrony środowiska powodują, że programy symulacyjne nie uwzględniają wielu czynników. Stąd też prowadzonych jest wiele prac badawczych w ośrodkach naukowych oraz rozwojowych w przedsiębiorstwach produkcyjnych nad dalszym doskonaleniem narzędzi informatycznych.

Trudnym procesem do przeprowadzenia symulacji komputerowej o dużym stopniu doskonałości jest odlewanie metodą lost foam/full mold. W procesie oprócz standardowych parametrów należy uwzględniać wpływ zgazowania modelu na strugę ciekłego metalu i odprowadzanie dużej ilości gazów poprzez formę. Obecnie stosowane modele matematyczne do symulacji tego procesu nie są wystarczające. Dlatego uważam, że tematyka podjęta w rozprawie doktorskiej mgra inż. Michała Jureczko pt.: „*Symulacja komputerowa procesu wypełniania wnętrza formy w metodzie lost foam z uwzględnieniem wpływu zgazowania modelu i ewakuacji gazów*”, jest bardzo trafna i niezbędna dla branży odlewniczej w Polsce pod względem naukowym i przemysłowym. Utylitarnym aspektem jest realizacja tej pracy w warunkach produkcyjnych Odlewni Rafamet Sp. z o.o..

Biuro Dziekana

1

wpłynęło dnia 18.12.2023  
RDJMa/RMT/212151/2023  
nr 286

## 2. Charakterystyka i układ pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Jureczko liczy 136 stron. Składa się z dwóch zasadniczych części: w części teoretycznej znajdują się 3 rozdziały a w części praktycznej 7 rozdziałów, spis tabel i rysunków oraz spis literatury. W pracy zamieszczono 30 tabel oraz 94 rysunki i 16 równań. Literatura zawiera 98 pozycji krajowych i zagranicznych. Na końcu pracy zamieszczono streszczenia w języku polskim i angielskim.

### 2.1. Część teoretyczna

W części teoretycznej rozprawy (rozdziały 1 i 2), Autor scharakteryzował odlewanie metodą formy pełnej. Omówił metodę zalewania do formy otwartej i zamkniętej, rozkład modeli jednorazowych w metodzie formy pełnej, etapy wykonania odlewów w procesie Full Mould, Lost Foam oraz Replicast. Scharakteryzował materiały stosowane na modele jednorazowe do odlewania metodą formy pełnej (polistyren spieniony, polistyren ekstrudowany, pianka polietylenowa niesieciowana i inne). Przedstawił wady które są charakterystyczne dla odlewów wykonywanych metodą formy pełnej. Omówił parametry technologiczne odlewania z wykorzystaniem procesu pełnej formy, w tym szczególnie uwzględniając przebieg zmian prędkości zalewania od gęstości materiału modelu odlewniczego. Obszernie scharakteryzował oprogramowanie komputerowe stosowane do symulacji procesu formy pełnej (Flow 3D, Magmasoft, Procast, Adstefan, Intecast) oraz czynniki technologiczne wpływające na warunki symulacji.

Rozdział 3 pracy Autor poświęcił zagadnieniu pirolizy modelu polistyrenowego. Omówił model wymiany ciepła podczas zalewania form z modelem polistyrenowym, a także krzywe ubytku masy modelu w zależności od szybkości nagrzewania.

Przeprowadzona analiza literatury oraz doświadczenie Autora z pracy w odlewni pozwoliły na postawienie w rozdziale 4 dwóch tez:

- *„Możliwe jest określenie wpływu takich zmiennych procesowych technologii Lost Foam jak: rodzaj materiału modelu jednorazowego, masa formierska, pokrycie ogniotrwale i temperatura metalu na proces wypełniania formy, a tym samym jakość końcową odlewów.*
- *Zauważalna i możliwa do implementacji jest w procesie projektowania technologii jest zależność procesu wypełniania formy od stosunku pola powierzchni zewnętrznej modelu (pole ewakuacji gazów z formy) do objętości modelu polistyrenowego (ilość produktów zgazowania modelu).”*

Autor dla postawionych tez opracował założenia projektowe oraz plan badawczy i na tej podstawie sformułował 5 głównych celów pracy zwierających: opracowanie koncepcji i budowę stanowiska do zgazowywania materiałów na modele, opracowanie implementacji danych, opracowanie geometrii odlewów testowych, opracowanie geometrii odlewów próbnych, praktyczna ocena możliwości implementacji wyników.

### 2.2. Część praktyczna

W rozdziale 5 Doktorant scharakteryzował 7 materiałów na jednorazowe modele odlewnicze, które zastosował do badań. Przedstawił również materiały formierskie zastosowane do wykonywania próbek i form (osnowę, spoiwo) oraz materiały pomocnicze stosowane na pokrycia form. Badania wstępne materiałów formierskich oraz modelowych polegały na ocenie przepuszczalności osnowy piaskowej o zróżnicowanej ziarnistości z pokryciem i bez pokrycia, ocenie przepusz-

czalności mas formierskich składających się z świeżego piasku oraz regeneratu. Do badań zmodyfikowanej próby lejności Ruffa przygotowano 6 form o różnym składzie masy formierskiej (świeży piasek, regenerat, żywica/utwardzacz). Na formy testowe zastosowano materiały produkcyjne stosowane w Odlewni Rafamet.

Metodykę badawczą Autor przedstawił w rozdziale 6. Dla potrzeb realizacji badań Doktorant opracował własną koncepcję i wykonał stanowisko pomiarowe umożliwiające ilościową ocenę procesu zgazowania modeli jednorazowych. Stanowisko umożliwia pomiar i rejestrację temperatury oraz ciśnienia w komorze spalania. Badania przepuszczalności masy formierskiej z powłokami ochronnymi i bez powłok wykonano w celu wykorzystania ich w programie symulacyjnym. Badania symulacyjne przepuszczalności wykonano przyjmując jako bryłę modelową: sześciąt utworzony z 27 modelowych ziaren piasku. Próbę lejności Ruffa, w metodzie formy pełnej, Doktorant wykonał z zastosowaniem programu do symulacji odlewania MagmaSoft oraz eksperymentalnie. W kolejnym etapie badań Autor ocenił wpływ pola powierzchni do objętości modelu odlewniczego na proces wypełniania wnętrza formy. W tym celu opracował dwa zestawy modeli: laboratoryjny i quasi-przemysłowy. Modele laboratoryjne to trzy bryły: czworościan, kula i sześciąt, które zaprojektowano tak aby przy jednakowej objętości i masie posiadały różną geometrię i pole powierzchni. Modele quasi-przemysłowe opracowano na wzór odlewów produkowanych w Odlewni Rafamet o takiej samej objętości i zróżnicowanym polu powierzchni. Kształt tych modeli to prostopadłościan, prostopadłościan z wydrążonym wnętrzem i kratownica.

W rozdziale 7 przedstawiono wyniki badań. Wyniki badań zależności ciśnienia od temperatury podczas zgazowywania materiału modeli jednorazowych w formie graficznej oraz tabelarycznej przedstawiono dla badań testowych oraz badań zasadniczych. Na tej podstawie obliczono gęstość produktów zgazowywanego materiału. Wyniki badań przepuszczalności masy formierskiej zestawiono dla próbek bez pokrycia i z pokryciem. Komputerową symulację przepuszczalności przeprowadzono dla 3 zastępczych średnic ziaren. Wyniki symulacji porównano z rzeczywistymi wartościami przepuszczalności i przedstawiono w formie tabelarycznej oraz graficznej. Ocenę lejności –próbę Ruffa wykonano poprzez badania symulacyjne z zaimplementowanymi wynikami przepuszczalności odpowiedniego rodzaju masy formierskiej z uwzględnieniem pokrycia i ilości produktów zgazowywania materiału modelu jednorazowego. Weryfikację wyników symulacji lejności wykonano poprzez wykonanie eksperymentalnej zmodyfikowanej próby Ruffa. W celu określenia wpływu zależności pola powierzchni do objętości modelu/odlewu na proces wypełniania formy przedstawiono porównanie czasów wypełniania wnętrza formy dla symulacji oraz prób rzeczywistych. Czas wypełniania form oceniono dla modeli laboratoryjnych i quasi-przemysłowych w warunkach symulacji programu MagmaSoft oraz w rzeczywistości.

Rozdział 8 – symulacje przemysłowe, przedstawia próbę wdrożenia opracowanej metodyki badań i jej rezultatów. Doktorant na bazie uzyskanych wyników z symulacji, pomiarów oraz wykonania odlewów rzeczywistych dokonał implementacji danych do programu symulacyjnego i przeprowadził weryfikację na modelach cyfrowych odlewów rzeczywistych wykonywanych w Odlewni Rafamet.

W rozdziale 9 Autor przeprowadził analizę wyników badań i dokonał ich oceny oraz spostrzeżeń w zakresie: ilości gazów i kinetyki zgazowywania, symulacji komputerowej przepuszczalności,

symulacji wypełniania wnęki formy (próba Ruffa), badań eksperymentalnych, walidacji przeprowadzonych badań.

Pracę Doktorant zakończył w rozdziale 10 syntetycznymi wnioskami, które odnoszą się do wpływu parametrów procesu na odlewanie metodą Lost Foam, geometrii modelu/odlewu na proces ewakuacji gazów oraz symulacji komputerowej i walidacji wyników eksperymentów.

### 3. Ocena rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Jureczko zawiera drobne błędy, literówki oraz graficzne na przedstawianych rysunkach. Nie są to błędy istotne i nie mają wpływu na całość pracy. Zostały one oznaczone w pracy oraz przesłane autorowi i nie są przytaczane w recenzji.

Warto przytoczyć kilka uwag i sugestii, na które Doktorant powinien zwrócić uwagę i wykorzystać w dalszych opracowaniach naukowych i publikacjach.

- Opis materiałów stosowanych na modele jednorazowe powinien zleżeć się w podpisie rysunku lub bezpośrednio na nim (str. 15, rys. 2.1.2.1).
- W tabeli 2.2.1 wśród programów do symulacji procesów odlewania brak programu Nova-Flow&Solid (str. 24).
- Niezbyt wystarczająca jakość rysunków 2.2.3 i 2.2.4 na stronie 26 i 27 oraz rys. 6.4.1.4, str. 57.
- W rozdz. 4.2. cele pracy Autor pisze: „*Obszar planowanych badań przedstawiony został we wstępie do niniejszej pracy doktorskiej*”. Bardziej zasadne byłoby przedstawienie tego planu w tym rozdziale, ponieważ plan jest opracowywany dla osiągnięcia określonych celów.
- Rysunek koncepcji stanowiska (rys. 6.1.1b) na stronie 39; nieczytelne są poszczególne elementy w przekroju.
- Na rysunku 6.1.2, str. 41, rys. 6.1.5, str. 43, rys. 6.1.7, str. 44 brak oznaczeń punktów pomiaru dla linii zmian temperatury.
- Na rysunku 6.1.6, str. 43 na osi Y jest „temperatura” a powinno być „ciśnienie”.
- W tabeli 6.1.2, str. 47 są użyte jednostki miar: g, cm<sup>3</sup>, kg/m<sup>3</sup>; należałoby te jednostki ujednolicić.
- W tabeli 6.3.1, str. 51, średnicę zastępczą podano z dokładnością do 9 cyfr po przecinku, w tym przypadku wystarczyłoby 4 cyfry.
- W rozdziale 7.4. brak informacji/definicji o parametrze „*viscous resistance*”, który został użyty do dalszych obliczeń.
- Na rysunkach symulacji komputerowej wypełniania wnęki formy 7.5.1.-7.5.3., 7.6.4.-7.6.14 oraz 7.7.1-7.7.3 i 7.7.5.-7.7.7 zastosowano różne skale wartości, co utrudnia porównanie oraz interpretację wyników.

Przedstawione powyżej uwagi nie mają wpływu na wartość naukową i merytoryczną niniejszej pracy.

### 4. Osiągnięcia Doktoranta

Zaprezentowana w rozprawie metodyka badawcza jest oryginalnym opracowaniem przygotowanym do realizacji postawionych celów i udowodnienia tez.

Doktorant opracował koncepcję i zbudował stanowisko pomiarowe do oceny zgazowywania jednorazowych modeli z polistyrenu, które umożliwia pomiary temperatury i ciśnienia oraz ich rejestrację.

Autor opracował własne założenia konstrukcyjne i technologiczne modeli oraz odlewów, a także zmodyfikował próbę technologiczną Ruffa, które umożliwiły przeprowadzenie badań technologii Lost Foam w warunkach laboratoryjnych i produkcyjnych Odlewni Rafamet Sp. z o.o..

Autor przygotował plan badawczy w którym uwzględnił wiele zmiennych parametrów procesu wypełniania wnęki formy w metodzie Lost Foam. Opracował model do komputerowej symulacji oceny przepuszczalności masy formierskiej dla wyznaczonej średnicy ziaren osnowy piaskowej.

Przeprowadzenie szczegółowych pomiarów ilości wydzielanych gazów w zależności od geometrii wymagało zastosowania nowych modeli odlewniczych. Doktorant opracował dwa nowe typy modeli: laboratoryjne (trzy bryły: czworościan, kula i sześciąt) oraz quasi-przemysłowe o takiej samej objętości i zróżnicowanym polu powierzchni (trzy bryły).

## 5. Uwagi i pytania do Doktoranta

Podsumowując rozprawę doktorską mgr inż. Michała Jureczko proszę o odpowiedź na poniższe pytania:

1. W rozdziałach 7.1. i 7.2. przedstawiono wpływ temperatury na ciśnienie podczas nagrzewania formy. Jak można wyjaśnić znaczące różnice w przebiegu krzywych zmian ciśnienia w formach z modelami jednorazowymi oraz charakterystyczne piki na wykresach rys. 7.1.5., 7.2.3, 7.2.5., 7.2.6., 7.2.7 ?
2. Rysunek 6.4.2.2 na str. 59 przedstawia formę z modelami polistyrenowymi oraz rozmieszczeniem termopar. Jaki wpływ na przepuszczalność formy i odprowadzenie gazów podczas zalewania miały wpływ wykonane rowki do umieszczenia termopar ?
3. W rozdziale 8 dotyczącym symulacji przemysłowych zastosowano 4 bryły geometryczne odlewów rzeczywistych. Z uzyskanych wyników przedstawiono graficznie tylko rozkład porowatości tych odlewów. Natomiast w tabeli 8.1 zestawiono czasy zalewania odlewu rzeczywistego oraz symulacji automatycznej i sparametryzowanej. Wydaje się, że istotne dla tego opracowania byłoby przedstawienie wyników symulacji wypełniania wnęk form w metodzie Lost Foam dla obu metod symulacji (automatycznej i sparametryzowanej) np. w takim samym czasie od rozpoczęcia zalewania form, co byłoby dodatkowym graficznym potwierdzeniem przeprowadzonych badań i ich weryfikacji. Czy Doktorant może przedstawić taką symulację/informację graficzną ?

## 6. Wnioski końcowe

Rozprawa mgr inż. Michała Jureczko pt.: „Symulacja komputerowa procesu wypełniania wnęki formy w metodzie lost foam z uwzględnieniem wpływu zgazowania modelu i ewakuacji gazów” **spełnia wymagania dotyczące prac doktorskich:**

- Przedstawione w pracy tezy Doktorant dowiódł poprzez uzyskane wyniki badań i ich zastosowanie praktyczne w symulacji.
- Badania Autor przeprowadził na podstawie własnej opracowanej koncepcji badawczej i szczegółowego planu badawczego.
- Doktorant opracował koncepcję i zastosował nowe stanowisko badawcze modele matematyczne do symulacji i modele odlewnicze do prób.
- Przygotował modele matematyczne do symulacji badań przepuszczalności.

- Opracował założenia konstrukcyjne technologiczne modeli odlewniczych, które umożliwiły przeprowadzanie badań w warunkach produkcyjnych.
- Uzyskane wyniki Doktorant zaimplementował do programu symulacyjnego i wdrożył opracowaną metodykę w warunkach produkcyjnych.
- Uzyskane rezultaty niniejszej pracy wnoszą nową wiedzę do praktyki odlewniczej w obszarze technologii wykonywania odlewów metodą Lost Foam, w szczególności w obszarze symulacji tego procesu i są oryginalnym wkładem naukowo-badawczym.
- Wyniki przeprowadzonych badań zostały wdrożone w warunkach produkcyjnych Odlewni Rafamet Sp. z o.o..

Recenzowana rozprawa doktorska mgra inż. Michała Jureczko pt.: *„Symulacja komputerowa procesu wypełniania wnętrza formy w metodzie lost foam z uwzględnieniem wpływu zgazowania modelu i ewakuacji gazów”*, jest oryginalnym opracowaniem. Autor dokonał analizy literatury, na podstawie której przygotował koncepcję i opracował plan eksperymentów badawczych, postawił tezę oraz uzasadnił jej słuszność na podstawie uzyskanych wyników. Dowiódł umiejętności samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych i planowania zadań badawczych. Na podkreślenie wartości tej pracy zasługuje aspekt wdrożeniowy wyników badań bezpośrednio do produkcji przemysłowej. Przedstawione w niej osiągnięcia Doktoranta mają duże znaczenie naukowe i rozwojowe dla branży odlewniczej.

Mając na uwadze powyższe stwierdzenia uważam, że rozprawa doktorska mgra inż. Michała Jureczko pt.: *„Symulacja komputerowa procesu wypełniania wnętrza formy w metodzie lost foam z uwzględnieniem wpływu zgazowania modelu i ewakuacji gazów”* spełnia wymagania ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami. **Wnioskuje, do Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej, o dopuszczenie do publicznej obrony mgra inż. Michała Jureczko.**

Prof. Andrzej Trytek

/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)