



Politechnika  
Częstochowska



Wydział Inżynierii Produkcji  
i Technologii Materiałów

**Dr hab. inż. Andrzej Zyska, prof. PCz**  
Instytut Metalurgii i Technologii Metali  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów  
Politechnika Częstochowska  
ul. Armii Krajowej 19  
42-200 Częstochowa

Częstochowa 08.12.2023 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Michała Jureczko pt.:

**„Symulacja komputerowa procesu wypełniania wnęki formy w metodzie Lost Foam z uwzględnieniem wpływu zgazowania modelu i ewakuacji gazów”**

zrealizowanej pod opieką promotora Dr hab. inż. Dariusza Bartochy, prof. PŚ

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejsza recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo Pani Prof. dr hab. inż. Marii Sozańskiej, Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej nr RDIMa.RMT.512.19.2023 z dnia 27.10.2023 roku, w którym poinformowano mnie, że uchwałą Rady Dyscypliny zostałem powołany na recenzenta w tym przewodzie oraz załączono komplet dokumentów wymaganych do dokonania oceny.

### 2. Ocena problematyki badawczej rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska Pana mgr inż. Michała Jureczko jest opracowaniem z zakresu inżynierii materiałowej dotyczącym oceny i poprawy zgodności wyników symulacji numerycznych wypełniania wnęki formy w technologii Lost Foam/Full Mold poprzez adaptację własnych danych eksperymentalnych do środowiska programu MagmaSoft.

Podjęta w pracy problematyka badawcza jest ważna i aktualna zarówno pod względem poznawczym jak i praktycznym. Technologia pełnej formy jest metodą stosunkowo nowatorską i niezbyt docenianą w branży odlewniczej. Jej potencjał ekonomiczny (m.in. skrócenie czasu i kosztów wykonania modeli, wyeliminowanie oprzyrządowania formierskiego) oraz technologiczny (możliwość otrzymywania wewnętrznych powierzchni odlewu bez stosowania rdzeni, brak pochyleń odlewniczych i podziału formy, itp.) sprawiają, że jest ona szczególnie dedykowana do produkcji odlewów jednostkowych o dużej masie. Wdrożenie do produkcji tego typu odlewów wymaga jednak realizacji szeregu prac

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 15.12.2023  
RDYMa.RMT.512.19.2023  
nr ..... zał. ....



projektowo-symulacyjnych w programach CAD/CAE. Dokładność i poprawność wyników symulacji numerycznych uwarunkowane są od algorytmów rozwiązujących równia różniczkowe, warunków brzegowo-początkowych oraz danych termofizycznych przyjętych do obliczeń. W przypadku technologii pełnej formy modelowanie zjawisk fizycznych zachodzących podczas wypełniania wnęki formy jest znacznie bardziej skomplikowane niż w innych metodach odlewniczych. W procedurze obliczeniowej równania ruchu ciekłego metalu należy uwzględnić efekty termiczne i ciśnieniowe pirolizy spienionego polistyrenu. Pole prędkości ciekłego metalu we wnęcie formy determinowane jest przez ciśnienie w szczelinie pomiędzy czołem strugi metalu a modelem polistyrenowym, a jego wartość zależy z kolei od prędkości ewakuacji gazów przez pokrycie ochronne do formy odlewniczej. Dlatego też bardzo istotnym jest precyzyjne ustalenie właściwości, w tym głównie przepuszczalności masy formierskiej z pokryciem ochronnym oraz wyznaczenie charakterystyk temperaturowo-czasowych zgazowania różnych gatunków polistyrenu stosowanych na modele odlewnicze. Odzworowanie na drodze symulacji komputerowych rzeczywistej dynamiki procesu pirolizy i kinetyki płynięcia ciekłego metalu przynosi wymierne korzyści ekonomiczne i technologiczne. Pozwala na optymalizację geometrii układu wlewowego oraz punktów zasilania, a w efekcie finalnym przyczynia się do ograniczenia lub eliminacji wad w odlewach. Aspekt ekonomiczny ma szczególne znaczenie w odniesieniu do odlewów wielkogabarytowych, dla których jak wspomniano, technologia pełnej formy jest polecana.

W problematykę walidacji technologii lost foam w komercyjnych programach odlewniczych wpisuje się praca Doktorska Pana mgr inż. Michała Jureczko. Jest ona wartościowym studium teoretyczno-poznawczym traktującym o doborze polimerów spienionych na modele jednorazowe, ich gazotwórczości i oddziaływaniu na kinetykę wypełniania wnęki formy z uwzględnieniem wpływu ziarnistości osnowy masy formierskiej i rodzaju pokrycia ogniotrwałego. Praca wpisuje się także w aktualny nurt badań dotyczący optymalizacji technologii pełnej formy, równocześnie jest próbą pogłębienia problemu zgodności wyników symulacji numerycznych i możliwości implementacji danych eksperymentalnych do programów komputerowych. Ponadto, dużą wartością recenzowanej dysertacji jest realizacja prac badawczych w warunkach przemysłowych i ich aplikacja do procesu produkcyjnego Odlewni Rafamet.

### **3. Ocena językowej i redakcyjnej formy Rozprawy**

Przedłożona do oceny praca obejmuje 136 stron i została podzielona na dwie zasadnicze części: część literaturową i część badawczą. Część literaturowa obejmuje 26 stron, natomiast część badawcza pomijając spisy tabel, rysunków i wykaz literatury 84 strony. W większości rozdziałów wyróżniono podrozdziały, co korzystnie wpłynęło na czytelność pracy. W rozprawie zamieszczono 30 tabel i 98 rysunków. Studium literaturowe wraz z zakresem badań tworzą spójną całość i odpowiadają wymogom pracy naukowej. Rozdziały przedstawione są w prawidłowej kolejności i logicznie ze sobą powiązane. Taki układ pozwala czytelnikowi na właściwe zagłębienie się w problematykę badawczą rozprawy.



Integralny element pracy stanowią rysunki, które w zdecydowanej większości opracowano prawidłowo, ale część z nich nie posiada wystarczającej ostrości, a w opisie osi i legendach zastosowano zbyt małą czcionkę. Praca zawiera dużą ilość rysunków i dla niektórych Autor zdecydował się na zbyt niskie pomniejszenie, co niestety wpływa negatywnie na ich odczyt i możliwość interpretacji. Całość dysertacji jest dobrze opracowana i napisana zrozumiałym językiem z użyciem właściwej terminologii. Oczywiście w tak dużym opracowaniu pojawiają się błędy stylistyczne i gramatyczne, ale ich ilość nie wpływa na ogólną poprawność redakcyjną.

#### **4. Ocena merytorycznej zawartości Pracy**

Pan mgr inż. Michał Jureczko, w części pierwszej rozprawy opisał najistotniejsze zagadnienia bezpośrednio związane z tematyką badawczą. We wstępie, uzasadniającym zasadność podjęcia badań w zakresie symulacji komputerowej procesu wypełniania wnęki formy w metodzie pełnej formy, Doktorant przedstawił główne zalety analizowanej technologii, jej specyficzne cechy na tle innych metod odlewniczych, zwrócił uwagę na konieczność prowadzenia badań laboratoryjnych nad kinetyką zgazowania modeli jednorazowych oraz doбором parametrów technologicznych odlewania w celu zapewnienia wysokiej jakości odlewów produkcyjnych. Podkreślił również istotne znaczenie programów symulacyjnych w analizie zjawisk fizykochemicznych przebiegających podczas wypełniania wnęki formy i możliwości optymalizacji technologii, wskazując jednocześnie na ich zamkniętą strukturę, która nie pozawala użytkownikowi na większą ingerencję w bazę danych materiałowych i ogranicza możliwości wykorzystania własnych wyników eksperymentalnych.

W kolejnych rozdziałach przeglądu literaturowego, Doktorant opisał etapy wytwarzania odlewów w technologii pełnej formy, jej odmiany (Lost Form, Full mold i Replicast) oraz ogólnie scharakteryzował materiały polimerowe, które potencjalnie mogą być stosowane na modele jednorazowe. Doktorant wymienił istotne problemy wynikające z obecności modelu polistyrenowego podczas formowania i zalewania ciekłym metalem, a także konieczność uwzględnienia na etapie projektowania układów wlewowych, zwiększonych oporów formy wynikających z degradacji termicznej modelu. W tym zakresie odczuwa się jednak pewien niedosyt informacji i brak własnych komentarzy. Szkoda, że Doktorant, który zapewne posiada duże doświadczenie zawodowe, nie podjął polemiki odnośnie wspomnianych oporów formy i geometrii układu wlewowego w porównaniu do klasycznych rozwiązań bez modelu jednorazowego, a także zagęszczenia materiału formierskiego i jego wpływie na jakość powierzchni surowej odlewu, czy też jak sam pisze, istotnego znaczenia poziomu metalu w zbiorniku wlewowym w trakcie zalewania formy.

W rozdziałach 2.1.3 Doktorant przedstawił bliższą charakterystykę polistyrenu ekspandowanego jako podstawowego materiału na modele odlewnicze prawidłowo wyróżniając jego najistotniejsze zalety związane z całkowitą degradacją i rozpadem do produktów gazowych, łatwością obróbki mechanicznej przy użyciu maszyn CNC i ploterów termicznych oraz wysoką dostępnością na rynku polskim i w krajach zachodnich. W



następnym podrozdziale 2.1.4 – *Wady odlewów w procesie pełnej formy* Doktorant skoncentrował się zasadniczo na opisie tylko jednej, ale typowej dla tej technologii - wady węgla błyszczącego. Podał potencjalne przyczyny jej występowania i wskazał na trudności związane z jej eliminacją. Na uwagę zasługuje fakt, że podrozdział ten został opracowany z wykorzystaniem własnych, opublikowanych wyników badań.

Za najbardziej wartościowy uważam rozdział 2.1.5. W rozdziale tym z należytą uwagą omówiono najistotniejsze parametry technologiczne w procesie pełnej formy. Doktorant odniósł się do gęstości polistyrenu ekspandowanego zarówno w aspekcie efektów pirolizy i prędkości zalewania form jak również właściwości mechanicznych, które muszą zapewnić prawidłowy przebieg procesu formowania i obróbki kształtowej modeli wielkogabarytowych. Poruszył również problemy z zakresu technologii formy dotyczące przygotowania masy formierskiej, czasu wiązania w różnych warunkach temperaturowych, możliwości wykorzystania regeneratu piasku kwarcowego, a także oddziaływania grubości pokrycia ogniotrwałego na gazoprzepuszczalność formy i penetrację ciekłego metalu do masy formierskiej.

W kolejnym rozdziale 2.2 Doktorant, w sposób właściwy przedstawił komercyjne programy do symulacji procesów odlewniczych wraz z głównymi etapami symulacji, oraz wyróżnił czynniki technologiczne wpływające na warunki i wyniki symulacji wypełniania wnętrza formy w technologii Lost Foam. Podkreślił również, że aktualnie dostępne moduły obliczeniowe dla technologii pełnej formy są w fazie rozwoju i wymagają udoskonalenia.

Bardzo istotnym z punktu widzenia głównego celu pracy jest rozdział 3, w którym przeanalizowano mechanizm zgazowania modeli jednorazowych w początkowej fazie zalewania układu wlewowego oraz w fazie wypełniania wnętrza formy. Doktorant dokonał bliższej oceny czynników wpływających na degradację termiczną polistyrenu oraz czynników oddziaływających na przebieg całego procesu wypełniania formy. W rozdziale tym zamieszczono także interesujące wyniki badań termogravimetrycznych, w których określono temperaturowy zakres zgazowania polistyrenu oraz pozostałości po pirolizie dla różnych szybkości nagrzewania.

Opracowany na podstawie 98 pozycji literaturowych przegląd stanu zagadnienia jest wartościowym źródłem informacji nt. teoretycznych i technologicznych aspektów metody pełnej formy. Dobór literatury jest prawidłowy, a zawarte treści dobrze opracowane. Na uznanie zasługują komentarze i krytyczne osądy Pana mgr inż. Michała Jureczko, szczególnie w drugiej części przeglądu literatury, co świadczy o jego szerokiej wiedzy w tematyce problemu.

Drugą część rozprawy rozpoczynają: zwięzłe uzasadnienie podjęcia problematyki badawczej oraz dwie tezy i szczegółowe cele pracy. Cele pracy zostały określone w sposób jasny i jednoznaczny, i są logicznym wynikiem krytycznego studium literaturowego oraz badań własnych Autora. Tezy pracy sformułowano prawidłowo, przy czym pierwsza z nich:

*„Możliwe jest określenie wpływu takich zmiennych procesowych technologii Lost Foam jak: rodzaj materiału modelu jednorazowego, masa formierska, pokrycie ogniotrwałe, i*



*temperatura metalu na proces wypełniania formy, a tym samym na jakość końcową odlewów.”*

jest dość ogólna i szkoda, że nie ujmuje w sposób bardziej adekwatny szeroko zaplanowanych badań symulacyjno-doświadczalnych.

W dalszej części opracowania Doktorant prezentuje materiały na jednorazowe modele odlewnicze, materiały formierskie pochodzące z cyklu produkcyjnego Odlewni Rafamet, zastosowaną aparaturę pomiarową oraz metodykę badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Wśród zaplanowanych prac badawczych trzy z nich uważam za szczególnie wartościowe. Pierwsza dotyczy opracowania koncepcji, zaprojektowania i budowy stanowiska do zgazowania materiałów na modele odlewnicze. Główną zaletą zastosowanego rozwiązania jest prosty sposób pomiaru, który jednocześnie pozwala na precyzyjne wyznaczenie kinetyki pirolizy i ocenę całkowitych efektów spalania. Druga grupa prac związana jest z weryfikacją doświadczalną wyników symulacji płynięcia ciekłego metalu we wnęce formy. W tym celu Doktorant bardzo trafnie wytypował do testów porównawczych próbę lejności Ruffa, szczególnie w jej zmodyfikowanej, dwuprętowej wersji. Kształt prób umożliwia zarówno ilościową ocenę zgodności wyników symulacji numerycznych jak również porównanie lejności metalu odlewanego do form z modelem jednorazowym i bez modelu. Trzecia grupa prac dotyczy opracowania modeli bryłowych odlewów o charakterystyce konstrukcyjnej uwzględniającej rzeczywistą geometrię odlewów produkowanych przez Odlewnie Rafamet. Zaprojektowane modele 3D oprócz walorów aplikacyjnych posiadają również cechę fizykalną ujętą w drugiej tezie pracy.

Dalsza część rozprawy przedstawia kluczowe wyniki badań i opisy, które są realizacją ustalonych celów pracy i stanowią oryginalny wkład własny Pana mgr inż. Michała Jureczko w zakresie walidacji modelu numerycznego procesu wypełniania wnęki formy w technologii Lost Foam. Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta zaliczam:

- wyznaczenie charakterystyk zgazowania materiałów polimerowych stosowanych na modele odlewnicze i opracowanie metodyki obliczania całkowitych ciśnień spalania wraz z implementacją otrzymanych wyników do programu MagmaSoft;
- przeprowadzenie przy użyciu programu Ansys Fluent analizy porównawczej przepuszczalności modelowych mas formierskich i mas stosowanych w procesie produkcyjnym;
- wykonanie badań symulacyjnych nad wpływem ziarnistości masy formierskiej i rodzaju pokrycia ogniotrwałego na stopień wypełnienia wnęki formy oraz prędkość strugi ciekłego metalu
- ustalenie rzeczywistej kinetyki zgazowania modeli polistyrenowych podczas odlewania prób lejności Ruffa;
- wykazanie rozbieżności pomiędzy rzeczywistymi badaniami lejności a symulacją procesu wypełniania wnęki form dla zmodyfikowanej próby Ruffa;



- weryfikację danych materiałowych i dobór zakresu zmian objętościowego natężenia przepływu gazów w celu poprawy zgodności wyników symulacji numerycznych;
- wyznaczenie różnic pomiędzy symulowanymi i rzeczywistymi czasami wypełniania wnęki formy dla odlewów laboratoryjnych, quasi-przemysłowych oraz przemysłowych z uwzględnieniem w obliczeniach szerokiego zakresu zmian przepuszczalności masy formierskiej oraz pokrycia ogniotrwałego.

Wyżej wymienione osiągnięcia naukowe są efektem dobrze zaplanowanej konstrukcji pracy oraz dość obszernych pomiarów i analiz. Pan mgr inż. Michał Jureczko rozwiązując problem badawczy wykazał się umiejętnościami w zakresie: prowadzenia badań laboratoryjnych, projektowania odlewów w programach CAD, wykonywania symulacji numerycznych w programie Ansys Fluent oraz przede wszystkim bardzo dobrą znajomością środowiska programu MagmaSoft, co pozwoliło mu na przeprowadzenie licznych i przemyślanych symulacji potwierdzających słuszność postawionych tez rozprawy. Zrealizowane prace są jednocześnie dowodem bogatego warsztatu badawczego Doktoranta oraz jego ugruntowanej wiedzy teoretycznej i praktycznej.

#### **Uwagi krytyczne i pytania do Rozprawy:**

W ramach pracy wykonano szereg symulacji numerycznych procesu wypełniania wnęki formy, ale część otrzymanych wyników pozostawiono bez komentarza lub głębszej analizy, dotyczy to głównie rozdziałów 7.5 i 7.7.

W rozdziałach z badaniami symulacyjnymi odczuwa się brak jednoznacznych informacji dotyczących parametrów materiałowych i warunków przyjętych do obliczeń. Doktorant często pisze, że symulacje wykonano dla zaimplementowanych właściwości masy formierskiej, ale nie podaje konkretnych wartości, ewentualnie trzeba je odszukiwać w innych rozdziałach.

W celu wykazania rozbieżności wyników i swego rodzaju deficytu modułu obliczeniowego MAGMAlostfoam, Doktorant mógł pokusić się o wyznaczenie błędów symulacji całkowitych czasów wypełniania wnęki formy dla modeli laboratoryjnych i quasi-przemysłowych (rozd. 7.7), podobnie jak wykonał to dla odlewów przemysłowych.

- w rozdziale: *Próba lejności Ruffa. Badania symulacyjne* Doktorant przedstawia wyniki badań wpływu ziarnistości osnowy masy formierskiej i pokrycia ochronnego na stopień wypełnienia wnęki formy. Czym spowodowany jest spadek lejności dla prób z pokryciami ochronnymi i ziarnem o frakcji pośredniej (0,32/020/0,16) w porównaniu do tych samych prób, ale z frakcjami skrajnymi (rysunki 7.5.2 i 7.5.3) ?

- w jakim stopniu wyniki modelowych badań przepuszczalności otrzymane w programie Ansys Fluent, Doktorant wykorzystał do symulacji komputerowej procesu wypełniania wnętrza formy ?
- na stronie 57 Doktorant pisze, że *implementacja wyników przeprowadzonych badań przepuszczalności odpowiednio przeliczonych polegała na wprowadzeniu uzyskanych danych do bazy programu symulacyjnego MagmaSoft*. W jaki sposób dokonano przeliczenia wyników przepuszczalności pokrycia ochronnego na bezwymiarową wartość Gas Permeability ?
- czy w ramach symulacji numerycznych uwzględniano wpływ różnych temperatur zalewania formy na stopień jej wypełnienia ?
- w rozdziale 7.6 dokonano weryfikacji danych materiałowych i ustalono dość szerokie zakresy zmian wartości objętościowego natężenia przepływu gazów w formach wirtualnych z modelami bez pokrycia i z pokryciem ochronnym. Czym kierował się Doktorant dobierając takie zakresy zmian i jaki jest ich związek z eksperymentalnymi pomiarami przepuszczalności ?

## 5. Wniosek końcowy

W świetle powyższej oceny elementów rozprawy wyrażam opinię, że dysertacja Pana mgr inż. Michała Jureczko stanowi samodzielne i wartościowe rozwiązanie ważnego zagadnienia naukowego i wykazuje Jego dobrą wiedzę teoretyczno-metodyczną oraz badawczą w obszarze technologii pełnej formy i inżynierii materiałowej.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Michała Jureczko spełnia wymagania określone w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami). Wnoszę o dopuszczenie Jej do publicznej obrony na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej.

*A. Zyska*