Imię i nazwisko recenzenta:
dr hab. inż. Dawid Myszka, prof. PW
Dane adresowe:
Politechnika Warszawska
Instytut Technik Wytwarzania
ul. Narbutta 85
02-524 Warszawa

Warszawa, 12.06.2026r.

Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Damian Robert Gruszka
(imię i nazwisko doktoranta)

pod tytułem
Badanie mechanizmów procesowych oraz materiałowych addytywnego wytwarzania form i rdzeni metodą Binder Jetting

przygotowanej pod kierunkiem:

prof. dr hab. inż. Rafał Dańko
(imię i nazwisko promotora)

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.
Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (z późn. zm.).

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Daniela Roberta Gruszki pt. *„Badanie mechanizmów procesowych oraz materiałowych addytywnego wytwarzania form i rdzeni metodą Binder Jetting"* została przygotowana w dyscyplinie inżynieria materiałowa i podejmuje tematykę związaną z wykorzystaniem technologii przyrostowych w odlewnictwie, ze szczególnym uwzględnieniem procesu Binder Jetting (BJ) stosowanego do wytwarzania piaskowych form i rdzeni odlewniczych.

Problematyka pracy wpisuje się w aktualne kierunki rozwoju nowoczesnego odlewnictwa, w których coraz większe znaczenie odgrywają technologie przyrostowe umożliwiające wykonywanie skomplikowanych geometrycznie form, ograniczenie zużycia oprzyrządowania oraz skrócenie czasu wdrażania nowych wyrobów. Szczególne znaczenie mają przy tym zagadnienia związane z optymalizacją parametrów procesu druku, ograniczaniem emisji substancji szkodliwych oraz ponownym wykorzystaniem materiałów formierskich zgodnie z założeniami gospodarki obiegu zamkniętego.

Rozprawa liczy 147 stron i została podzielona na dziewięć głównych rozdziałów obejmujących przegląd literatury, sformułowanie celu i tez badawczych, opis metodyki badań, prezentację wyników wraz z dyskusją oraz podsumowanie końcowe. Układ pracy jest logiczny

i przejrzysty, a kolejność prezentowanych zagadnień odpowiada klasycznemu schematowi rozprawy eksperymentalnej. Na uwagę zasługuje obszerny rozdział literaturowy poświęcony technologiom przyrostowym, materiałom stosowanym w procesie Binder Jetting oraz zagadnieniom regeneracji mas formierskich. Jednocześnie należy zauważyć, że część przeglądowa jest miejscami nadmiernie rozbudowana i zawiera obszerne opisy technologii addytywnych, które pozostają jedynie pośrednio związane z głównym przedmiotem badań. W rezultacie proporcje pomiędzy częścią ogólną a częścią bezpośrednio dotyczącą procesu Binder Jetting wydają się nie w pełni zrównoważone.

Głównym celem pracy była ocena wpływu wybranych właściwości fizykochemicznych spoiw furanowych oraz parametrów procesu Binder Jetting na właściwości technologiczne i emisyjne drukowanych form i rdzeni odlewniczych, a także analiza możliwości regeneracji zużytej osnowy i jej ponownego wykorzystania w procesie druku. Dodatkowym elementem pracy było studium przypadku dotyczące zastosowania form konformalnych wyposażonych w układ chłodzenia.

Zakres przeprowadzonych badań jest szeroki i obejmuje analizę właściwości osnowy piaskowej, charakterystykę spoiw, badania wytrzymałościowe drukowanych kształtek, ocenę emisji gazów, badania regeneracji mas formierskich oraz półprzemysłową weryfikację działania form konformalnych. Należy podkreślić, że Autor wykonał znaczną liczbę badań eksperymentalnych, co świadczy o dużym nakładzie pracy i dobrym opanowaniu warsztatu badawczego. Jednocześnie można odnieść wrażenie, że praca koncentruje się przede wszystkim na identyfikacji zależności technologicznych i optymalizacji parametrów procesu, natomiast w mniejszym stopniu na pogłębionej analizie fundamentalnych mechanizmów materiałowych, które zostały zaakcentowane już w samym tytule rozprawy.

W ocenie recenzenta rozprawa posiada wyraźny charakter aplikacyjny i wdrożeniowy. Jej mocną stroną jest kompleksowe podejście do zagadnień związanych z technologią Binder Jetting oraz próba połączenia aspektów materiałowych, środowiskowych i technologicznych. Pewien niedosyt budzi natomiast ograniczony stopień pogłębienia analiz mechanistycznych oraz stosunkowo niewielki zakres modelowania zjawisk zachodzących podczas formowania połączeń międzyziarnowych, degradacji termicznej spoiwa czy transportu gazów w strukturze formy. W konsekwencji część uzyskanych wyników ma charakter przede wszystkim potwierdzający znane już w literaturze zależności technologiczne, podczas gdy elementy stanowiące oryginalny wkład do rozwoju wiedzy naukowej mogłyby zostać wyraźniej wyeksponowane.

Pomimo wskazanych uwag należy stwierdzić, że rozprawa podejmuje ważny i aktualny problem badawczy, a jej wyniki mogą znaleźć praktyczne zastosowanie w obszarze nowoczesnych technologii odlewniczych wykorzystujących metody addytywne.

Dobór i wykorzystanie źródeł literaturowych

Przegląd literatury przedstawiony w rozprawie mgr inż. Daniela Roberta Gruszki obejmuje szeroki zakres zagadnień związanych z technologiami addytywnymi stosowanymi w odlewnictwie, procesem Binder Jetting, właściwościami spoiw furanowych, emisją produktów rozkładu termicznego materiałów organicznych oraz regeneracją mas formierskich. Analizowana bibliografia liczy blisko 200 pozycji, obejmujących zarówno publikacje naukowe, normy, materiały konferencyjne, jak i opracowania techniczne. Świadczy to o znacznym nakładzie pracy włożonym przez Doktoranta w rozpoznanie stanu wiedzy dotyczącego badanego zagadnienia.

Na pozytywną ocenę zasługuje uwzględnienie licznych publikacji zagranicznych dotyczących technologii Binder Jetting oraz nowoczesnych metod wytwarzania form i rdzeni odlewniczych. Autor wykazuje dobrą orientację w aktualnych kierunkach rozwoju technologii addytywnych oraz problematyce środowiskowej związanej z emisją substancji lotnych podczas

procesów odlewniczych. Szczególnie wartościowe jest zebranie i uporządkowanie informacji dotyczących właściwości spoiw oraz metod regeneracji zużytych mas formierskich, co stanowi istotne tło dla dalszych badań eksperymentalnych.

Jednocześnie należy zauważyć, że część literaturowa pracy jest bardzo obszerna, a miejscami przyjmuje charakter przeglądowo-opisowy. Znaczna liczba stron została poświęcona ogólnej charakterystyce technologii przyrostowych, z których część ma jedynie pośredni związek z tematyką rozprawy. W konsekwencji proporcje pomiędzy prezentacją szerokiego tła technologicznego a szczegółową analizą literatury bezpośrednio związanej z procesem Binder Jetting nie zawsze wydają się optymalne.

Pewien niedosyt budzi również stopień krytycznej analizy przywoływanych źródeł. W wielu fragmentach Autor koncentruje się na przedstawieniu wyników uzyskanych przez innych badaczy, natomiast rzadziej podejmuje próbę ich wzajemnej konfrontacji, wskazania rozbieżności interpretacyjnych czy identyfikacji ograniczeń stosowanych metod badawczych. W rezultacie przegląd literatury pełni przede wszystkim funkcję informacyjną, podczas gdy jego potencjał do budowy bardziej wyrafinowanego uzasadnienia naukowego dla postawionych tez badawczych nie został w pełni wykorzystany.

W kontekście celu pracy szczególnie pożądane byłoby szersze omówienie publikacji dotyczących mechanizmów formowania mostków spoiwa pomiędzy ziarnami osnowy, modelowania transportu cieczy w ośrodkach porowatych, kinetyki degradacji termicznej żywic oraz numerycznych metod opisu emisji gazów podczas zalewania form. Są to bowiem zagadnienia bezpośrednio związane z deklarowanym badaniem mechanizmów procesowych i materiałowych technologii Binder Jetting, a ich głębsza analiza mogłaby stanowić silniejsze uzasadnienie naukowe dla przyjętego programu badawczego.

Pewne zastrzeżenia budzi również relatywnie niewielkie wykorzystanie literatury w późniejszych rozdziałach pracy. W dyskusji wyników odwołania do wcześniejszych badań występują, jednak nie zawsze prowadzą do pogłębionej konfrontacji uzyskanych rezultatów z danymi literaturowymi. W wielu przypadkach dyskusja koncentruje się na opisie zaobserwowanych zależności technologicznych, podczas gdy szersze odniesienie do wyników innych autorów mogłoby zwiększyć wartość poznawczą przedstawionych analiz. Przykładem ograniczonego wykorzystania literatury w dyskusji jest analiza wyników regeneracji osnowy. Autor wykazał wysoką skuteczność regeneracji mechaniczno - termicznej oraz możliwość wykorzystania regeneratu do produkcji nowych form, jednak nie przeprowadził pogłębionego porównania uzyskanych parametrów z wynikami publikowanymi przez innych badaczy. Szersza analiza porównawcza pozwoliłaby określić rzeczywistą pozycję uzyskanych rezultatów na tle aktualnego stanu wiedzy oraz lepiej uzasadnić praktyczne znaczenie przedstawionych rozwiązań.

Należy stwierdzić, że Doktorant wykazał się dobrą znajomością literatury przedmiotu i zgromadził obszerny materiał źródłowy dotyczący technologii Binder Jetting oraz współczesnych technologii odlewniczych. Jednocześnie część literaturowa mogłaby zostać bardziej ukierunkowana na zagadnienia bezpośrednio związane z problemem naukowym rozprawy, a stopień krytycznej analizy publikowanych wyników oraz ich wykorzystania w dyskusji rezultatów własnych badań mógłby być większy. Uwagi te nie podważają wartości merytorycznej przeglądu literatury, wskazują jednak obszary, w których rozprawa mogłaby zostać dodatkowo wzmocniona od strony naukowej.

Tezy badawcze

W rozprawie sformułowano trzy tezy badawcze odnoszące się do wpływu chłodzenia konformalnego na jakość odlewów, skuteczności regeneracji mechaniczno - termicznej mas formierskich pochodzących z technologii Binder Jetting oraz możliwości ponownego wykorzystania regeneratu do wytwarzania form i rdzeni odlewniczych o wymaganych

właściwościach technologicznych. Tezy te są bezpośrednio związane z głównym celem pracy i odzwierciedlają najważniejsze obszary prowadzonych badań eksperymentalnych.

Pozytywnie należy ocenić fakt, że Autor sformułował tezy w sposób jednoznaczny i umożliwiający ich eksperymentalną weryfikację. Zostały one również konsekwentnie powiązane z programem badań oraz podsumowane w końcowej części rozprawy, gdzie podjęto próbę oceny stopnia ich potwierdzenia. Dzięki temu zachowana została logiczna spójność pomiędzy celem pracy, zakresem badań i przedstawionymi wnioskami.

Jednocześnie należy zauważyć, że przedstawione tezy mają w znacznej mierze charakter technologiczny i aplikacyjny. Koncentrują się one przede wszystkim na wykazaniu skuteczności określonych rozwiązań procesowych oraz możliwości osiągnięcia pożądanych efektów użytkowych. W mniejszym stopniu odnoszą się natomiast do wyjaśnienia mechanizmów fizycznych i materiałowych odpowiedzialnych za obserwowane zjawiska. W konsekwencji tezy te przypominają bardziej założenia optymalizacyjne lub wdrożeniowe niż klasyczne hipotezy naukowe prowadzące do rozwiązania fundamentalnego problemu badawczego.

Najwięcej wątpliwości budzi teza pierwsza, zakładająca poprawę jakości powierzchni odlewów i ograniczenie wad odlewniczych dzięki zastosowaniu kanałów konformalnych z chłodzeniem powietrzem. Zależność taka jest intuicyjnie oczekiwana z punktu widzenia procesów wymiany ciepła i była wielokrotnie sygnalizowana w literaturze dotyczącej chłodzenia form odlewniczych. W rezultacie teza ta ma bardziej charakter potwierdzający znane zależności technologiczne niż formułujący nowy problem naukowy wymagający rozwiązania.

Podobne uwagi można odnieść do tez dotyczących regeneracji osnowy i ponownego wykorzystania regeneratu. W obu przypadkach Autor zakłada możliwość skutecznego odzysku materiału oraz zachowania odpowiednich właściwości technologicznych form drukowanych metodą Binder Jetting. Są to zagadnienia istotne z punktu widzenia praktyki przemysłowej, jednak sformułowane tezy nie wskazują jednoznacznie, jakie nowe mechanizmy lub zależności materiałowe miały zostać odkryte lub wyjaśnione w toku badań.

W opinii recenzenta większą wartość naukową miałyby tezy odnoszące się bezpośrednio do zależności pomiędzy właściwościami reologicznymi spoiwa, kinetyką jego rozprzestrzeniania w ośrodku porowatym, geometrią tworzonych mostków międzyziarnowych oraz właściwościami mechanicznymi i emisyjnymi gotowych form. Takie ujęcie pozwoliłoby w większym stopniu powiązać przeprowadzone badania z deklarowanym w tytule rozprawy badaniem mechanizmów procesowych i materiałowych.

Pomimo powyższych uwag należy stwierdzić, że przedstawione tezy zostały poprawnie powiązane z zakresem przeprowadzonych badań i w większości zostały zweryfikowane eksperymentalnie. Ich sformułowanie mogłoby jednak w większym stopniu eksponować aspekt poznawczy pracy oraz prowadzić do głębszego wyjaśnienia mechanizmów zachodzących w technologii Binder Jetting, co zwiększyłoby naukowy charakter rozprawy.

Zastosowana metodyka badań

Metodyka badań zastosowana w rozprawie została opracowana w sposób kompleksowy i obejmuje szeroki zakres metod eksperymentalnych wykorzystywanych do oceny właściwości materiałów formierskich przeznaczonych do technologii Binder Jetting. Autor przeprowadził badania właściwości fizykochemicznych spoiw, analizę właściwości technologicznych drukowanych form i rdzeni, ocenę emisji gazów podczas procesów termicznej degradacji spoiw, badania regeneracji osnowy oraz studium przypadku dotyczące zastosowania chłodzenia konformalnego form odlewniczych. Tak szeroki zakres prac badawczych świadczy o dużym nakładzie pracy eksperymentalnej oraz dobrym opanowaniu warsztatu badawczego.

Na pozytywną ocenę zasługuje wykorzystanie różnorodnych metod badawczych, obejmujących pomiary lepkości i zwilżalności spoiw, analizę termiczną TG-MS, badania wytrzymałości na zginanie, analizę gazotwórczości, badania strat prażenia oraz obserwacje mikrostrukturalne prowadzone z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej SEM/EDS. Uzupełnieniem programu badawczego były eksperymenty przeprowadzone w warunkach półprzemysłowych, których celem była ocena funkcjonowania form konformalnych podczas zalewania ciekłym metalem. Takie podejście pozwoliło na wieloaspektową ocenę technologii Binder Jetting zarówno od strony materiałowej, jak i użytkowej.

Szczególnie wartościowym elementem metodyki jest połączenie badań laboratoryjnych z próbami realizowanymi w warunkach zbliżonych do przemysłowych. Dzięki temu Autor nie ograniczył się wyłącznie do oceny właściwości pojedynczych materiałów, lecz podjął próbę weryfikacji ich zachowania w rzeczywistym procesie odlewniczym. Pozwala to lepiej ocenić praktyczne znaczenie uzyskanych wyników oraz zwiększa aplikacyjną wartość rozprawy.

Jednocześnie należy zauważyć, że pomimo szerokiego zakresu badań zastosowana metodyka koncentruje się przede wszystkim na pomiarze efektów technologicznych, takich jak wytrzymałość, gazotwórczość, emisja substancji lotnych czy skuteczność regeneracji osnowy. W mniejszym stopniu wykorzystano metody umożliwiające bezpośrednią analizę mechanizmów procesowych i materiałowych, które zostały wyeksponowane już w tytule rozprawy. Brakuje mi między innymi ilościowej charakterystyki geometrii połączeń międzyziarnowych, analizy rozkładu spoiwa w strukturze wydruku czy modelowania procesów transportu cieczy i gazów w porowatym ośrodku formy.

Pewien niedosyt budzi również ograniczone wykorzystanie metod analizy statystycznej wyników. W pracy przedstawiono dużą liczbę danych eksperymentalnych, jednak nie zawsze towarzyszy im pełna informacja dotycząca rozrzutu wyników, niepewności pomiarowych czy istotności statystycznej obserwowanych różnic. Dotyczy to zwłaszcza porównania właściwości mechanicznych oraz emisyjnych materiałów wytwarzanych przy różnych parametrach procesu. Szersze uwzględnienie aspektów metrologicznych zwiększyłoby wiarygodność części prezentowanych wniosków.

W kontekście deklarowanego celu pracy można również wskazać, że metodyka badań mogłaby zostać rozszerzona o narzędzia modelowania numerycznego lub symulacyjnego, pozwalające na głębsze wyjaśnienie mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowane zależności. Szczególnie interesujące byłoby wykorzystanie modeli opisujących przepływ spoiwa w ośrodku ziarnistym, procesy pirolizy żywic czy transport gazów podczas zalewania form. Pozwoliłoby to przejść od obserwacji zależności technologicznych do bardziej fundamentalnego opisu badanych zjawisk.

Podsumowując, zastosowaną metodykę badań należy ocenić pozytywnie. Jest ona szeroka, dobrze zaplanowana i adekwatna do realizacji postawionych celów praktycznych. Jednocześnie jej charakter pozostaje w dużej mierze eksperymentalno - technologiczny, podczas gdy zakres metod służących bezpośredniemu wyjaśnianiu mechanizmów materiałowych i procesowych mógłby być szerszy. Nie zmienia to jednak faktu, że przeprowadzone badania dostarczyły obszernego materiału eksperymentalnego stanowiącego podstawę do sformułowania wartościowych wniosku dotyczących technologii Binder Jetting.

Dyskusja wyników

Dyskusja wyników stanowi jeden z najważniejszych elementów każdej rozprawy doktorskiej, ponieważ pozwala ocenić nie tylko poprawność przeprowadzonych badań, lecz przede wszystkim zdolność Doktoranta do interpretacji uzyskanych rezultatów i ich osadzenia w aktualnym stanie wiedzy. W recenzowanej pracy Autor przedstawił obszerny materiał eksperymentalny obejmujący zagadnienia związane z właściwościami spoiw, parametrami procesu Binder Jetting, emisją produktów rozkładu termicznego, regeneracją osnowy oraz

zastosowaniem form konformalnych. Dyskusja została uporządkowana zgodnie z głównymi obszarami badawczymi i zachowuje logiczną strukturę odpowiadającą wcześniej przedstawionemu programowi badań.

Na pozytywną ocenę zasługuje fakt, że Autor podejmuje próbę powiązania właściwości fizykochemicznych spoiw z właściwościami użytkowymi drukowanych form i rdzeni. Szczególnie interesujące są rozważania dotyczące wpływu lepkości i zwilżalności żywic na jakość procesu drukowania oraz zależności pomiędzy ilością dozowanego spoiwa a wytrzymałością mechaniczną i gazotwórczością form. W wielu przypadkach przedstawione interpretacje są logiczne i zgodne z podstawami wiedzy materiałowej oraz technologii odlewniczej.

Pozytywnie należy również ocenić próbę powiązania wyników analizy termicznej TG-MS z obserwowaną emisją produktów pirolizy podczas zalewania form. Autor wykazał, że główne procesy rozkładu spoiwa zachodzą w zakresie temperatur 200–600°C, a uzyskane wyniki wykorzystał następnie do interpretacji działania form konformalnych oraz oceny wpływu chłodzenia na emisję substancji lotnych. Takie podejście świadczy o umiejętności łączenia wyników uzyskanych różnymi metodami badawczymi.

Jednocześnie należy zauważyć, że znaczna część dyskusji koncentruje się na opisie zaobserwowanych zależności technologicznych, podczas gdy w mniejszym stopniu podejmowana jest próba wyjaśnienia mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowane zjawiska. W wielu miejscach Autor stwierdza występowanie określonej zależności – na przykład wpływu ilości spoiwa na wytrzymałość lub gazotwórczość - jednak nie rozwija szerzej rozważań dotyczących mikrostrukturalnych przyczyn tych zmian. Powoduje to, że część dyskusji przyjmuje charakter raportowania wyników eksperymentalnych, a nie ich pogłębionej interpretacji naukowej.

Pewien niedosyt budzi również stopień wykorzystania literatury naukowej podczas interpretacji uzyskanych rezultatów. Odwołania do wcześniejszych badań są obecne, jednak stosunkowo rzadko prowadzą do szczegółowego porównania wyników własnych z rezultatami innych autorów. W konsekwencji czytelnik nie zawsze otrzymuje jednoznaczną odpowiedź, czy obserwowane zależności mają charakter uniwersalny i potwierdzają aktualny stan wiedzy, czy też stanowią nowe obserwacje wynikające ze specyfiki badanego systemu materiałowego i zastosowanej technologii.

W szczególności dotyczy to zagadnień związanych z regeneracją osnowy oraz wykorzystaniem regeneratu w procesie Binder Jetting. Autor wykazał skuteczność regeneracji mechaniczno - termicznej oraz możliwość wykorzystania odzyskanego materiału do ponownego druku form i rdzeni, jednak analiza ta mogłaby zostać wzbogacona o szersze porównanie z wynikami publikowanymi przez innych badaczy oraz bardziej szczegółowe omówienie mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowaną skuteczność procesu regeneracji.

Pewne ograniczenia widoczne są również w części poświęconej formom konformalnym. Autor wykazał korzystny wpływ chłodzenia na jakość powierzchni odlewów oraz ograniczenie emisji produktów rozkładu spoiwa, jednak analiza ta ma głównie charakter jakościowy. W opinii recenzenta większą wartość naukową miałoby pogłębienie rozważań dotyczących wpływu chłodzenia na lokalne warunki krzepnięcia, rozkłady temperatury w formie oraz mechanizmy odpowiedzialne za poprawę jakości odlewów.

Dyskusję wyników należy jednak ocenić w podsumowaniu jako poprawną, logiczną i opartą na obszernym materiale eksperymentalnym. Autor wykazał umiejętność interpretacji uzyskanych rezultatów oraz ich powiązania z praktycznymi aspektami technologii Binder Jetting. Jednocześnie należy zauważyć, że potencjał poznawczy zgromadzonych wyników nie został w pełni wykorzystany. Szersze odniesienie do literatury, pogłębienie analizy mechanizmów materiałowych oraz większy nacisk na wyjaśnianie przyczyn obserwowanych

zjawisk pozwoliłyby nadać dyskusji bardziej naukowy charakter i w większym stopniu podkreślić oryginalny wkład Autora w rozwój wiedzy dotyczącej technologii addytywnego wytwarzania form i rdzeni odlewniczych.

Prezentacja wyników – jakość tabel, wykresów i grafiki

Sposób prezentacji wyników badań w recenzowanej rozprawie należy ocenić pozytywnie. Tabele, wykresy oraz materiał graficzny zostały przygotowane starannie i w większości przypadków umożliwiają prawidłową interpretację prezentowanych wyników. Na uwagę zasługuje duża liczba ilustracji dokumentujących przebieg badań oraz uzyskane rezultaty eksperymentalne, co ułatwia śledzenie toku rozumowania Autora.

Wykresy i zestawienia tabelaryczne są zasadniczo czytelne i poprawnie opisane, choć w niektórych przypadkach możliwe byłoby bardziej syntetyczne przedstawienie danych oraz wyraźniejsze zaakcentowanie najważniejszych zależności wynikających z przeprowadzonych badań. Również część materiału ilustracyjnego pełni głównie funkcję dokumentacyjną, podczas gdy jego szersze wykorzystanie w analizie ilościowej mogłoby zwiększyć wartość poznawczą prezentowanych wyników.

Całość opracowania cechuje dobra kultura edytorska i poprawność formalna. Prezentacja wyników spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stanowi odpowiednie uzupełnienie przeprowadzonych analiz eksperymentalnych.

Uwagi krytyczne do dyskusji

Pomimo obszernego materiału eksperymentalnego oraz poprawnie przeprowadzonych badań, część poświęcona dyskusji wyników pozostawia pewien niedosyt z punktu widzenia rozprawy doktorskiej w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Przedstawione rozważania są na ogół logiczne i poprawne merytorycznie, jednak w wielu miejscach mają charakter przede wszystkim technologiczny i opisowy, podczas gdy oczekiwać można głębszej analizy mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowane zjawiska. Poniżej kilka uwag, na które recenzent spodziewa się odpowiedzi Doktoranta:

1. W dyskusji stosunkowo rzadko podejmowana jest próba wyjaśnienia mechanizmów materiałowych leżących u podstaw obserwowanych zależności. Dotyczy to zwłaszcza wpływu parametrów procesu Binder Jetting na właściwości mechaniczne drukowanych form i rdzeni. Autor wykazuje występowanie określonych zależności pomiędzy ilością spoiwa, wytrzymałością i gazotwórczością, jednak analiza przyczyn tych zmian ogranicza się najczęściej do opisu jakościowego. W tym kontekście pojawia się pytanie jakie mechanizmy materiałowe powinny być uważane za dominujące w procesie kształtowania wytrzymałości drukowanych form Binder Jetting i który z nich w największym stopniu odpowiada za obserwowany spadek wytrzymałości przy zwiększaniu ilości dozowanego spoiwa?
2. Moim zdaniem niewystarczająco wykorzystano potencjał zgromadzonego materiału mikrostrukturalnego. Wyniki obserwacji SEM/EDS mogły zostać szerzej powiązane z właściwościami mechanicznymi badanych materiałów oraz wykorzystane do ilościowej oceny jakości połączeń międzyziarnowych tworzonych podczas procesu Binder Jetting. Jest niezwykle interesujące naukowo i praktycznie np. czy jest możliwe wskazanie jednego parametru mikrostrukturalnego najlepiej korelującego z wytrzymałością drukowanych form? Czy na podstawie wykonanych badań możliwe jest ilościowe określenie zależności pomiędzy geometrią mostków spoiwa a wytrzymałością mechaniczną wydruków?
3. W wielu fragmentach dyskusji brakuje szerszego odniesienia do wyników publikowanych przez innych autorów. Uzyskane rezultaty są wprawdzie konfrontowane

z literaturą, jednak porównania te mają najczęściej charakter ogólny. Bardziej szczegółowa analiza podobieństw i różnic pomiędzy wynikami własnymi a danymi literaturowymi pozwoliłaby lepiej ocenić stopień nowości uzyskanych rezultatów oraz ich miejsce w aktualnym stanie wiedzy. Pojawia się pytanie o to, które z uzyskanych wyników uważa Autor za najbardziej różniące się od danych prezentowanych w literaturze światowej i czym tłumaczy występowanie tych różnic np. w kontekście możliwości wykorzystania regeneratu po regeneracji mechaniczno - termicznej przy zachowaniu dobrych właściwości technologicznych form drukowanych metodą Binder Jetting.

4. Stosunkowo ograniczona jest dyskusja dotycząca niepewności pomiarowych oraz powtarzalności uzyskanych wyników. W pracy przedstawiono znaczną liczbę danych eksperymentalnych, jednak tylko w niewielkim stopniu odniesiono się do możliwego wpływu zmienności procesu na interpretację uzyskanych rezultatów. Szersze uwzględnienie aspektów metrologicznych zwiększyłoby wiarygodność przedstawionych wniosków. Który z analizowanych parametrów procesu Binder Jetting jest, zdaniem Autora, najbardziej wrażliwy na zmienność procesu technologicznego i jaki wpływ mogłaby mieć ta zmienność na końcowe wnioski przedstawione w rozprawie? Czy przeprowadzono analizę pozwalającą oszacować granice wiarygodności uzyskanych wyników?
5. Rozdział poświęcony formom konformalnym stanowi interesujące studium przypadku, jednak analiza uzyskanych efektów koncentruje się głównie na ich praktycznych konsekwencjach. W opinii recenzenta wartościowe byłoby pogłębienie rozważań dotyczących wpływu chłodzenia na lokalne warunki wymiany ciepła, przebieg krzepnięcia oraz mechanizmy odpowiedzialne za poprawę jakości powierzchni odlewów. Czy można wskazać jakie zjawisko fizyczne jest kluczowe dla poprawy jakości odlewów uzyskanych dzięki zastosowaniu chłodzenia konformalnego: zwiększenie szybkości odprowadzania ciepła, zmiana lokalnej kinetyki krzepnięcia czy może ograniczenie degradacji termicznej spoiwa? W jaki sposób można byłoby eksperymentalnie zweryfikować dominujący udział każdego z tych mechanizmów?

Przedstawione uwagi mają charakter dyskusyjny i wynikają przede wszystkim z wysokiego potencjału poznawczego zgromadzonego materiału badawczego. Nie podważają one poprawności przeprowadzonych badań ani zasadności sformułowanych wniosków, wskazują jednak obszary, w których dyskusja mogłaby zostać pogłębiona, co dodatkowo zwiększyłoby naukową wartość rozprawy oraz lepiej wyeksponowało wkład Autora w rozwój wiedzy dotyczącej technologii Binder Jetting.

3. Wniosek końcowy

Na podstawie szczegółowej analizy rozprawy doktorskiej mgr inż. Daniela Roberta Gruszki pt. *„Badanie mechanizmów procesowych oraz materiałowych addytywnego wytwarzania form i rdzeni metodą Binder Jetting”* stwierdzam, co następuje:

a) Ocena poziomu wiedzy teoretycznej Doktorantki w dyscyplinie inżynieria materiałowa

Przedłożona rozprawa potwierdza, że Doktorant posiada szeroką wiedzę teoretyczną w zakresie inżynierii materiałowej, ze szczególnym uwzględnieniem technologii odlewniczych, materiałów formierskich, procesów addytywnych oraz zagadnień związanych z regeneracją mas formierskich i emisją substancji lotnych. Autor wykazał dobrą znajomość aktualnego stanu wiedzy oraz umiejętność korzystania z krajowej i zagranicznej literatury naukowej. Pomimo

pewnych zastrzeżeń dotyczących stopnia krytycznej analizy źródeł literaturowych, poziom wiedzy teoretycznej prezentowany w rozprawie należy ocenić jako w pełni odpowiadający wymaganiom stawianym kandydatom do stopnia doktora.

b) Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Rozprawa dowodzi, że Doktorant posiada umiejętność samodzielnego planowania i realizacji badań naukowych. Autor opracował rozbudowany program eksperymentalny, obejmujący badania właściwości materiałowych, analizę procesów termicznych, ocenę emisji gazów, regenerację osnowy oraz badania półprzemysłowe związane z wykorzystaniem form konformalnych. Na szczególne podkreślenie zasługuje duży zakres przeprowadzonych eksperymentów oraz konsekwencja w realizacji przyjętego programu badawczego. Pomimo że część analiz mogłaby zostać pogłębiona od strony mechanizmów materiałowych, nie ulega wątpliwości, że Doktorant wykazał zdolność do samodzielnego prowadzenia badań oraz interpretacji uzyskanych wyników.

c) Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego

Największe wątpliwości recenzenta dotyczą stopnia oryginalności części przedstawionych rezultatów. Znaczna część pracy ma charakter aplikacyjny i koncentruje się na optymalizacji parametrów procesu Binder Jetting oraz ocenie możliwości wykorzystania regeneratu i form konformalnych w praktyce odlewniczej. W mniejszym stopniu rozprawa wnosi nową wiedzę dotyczącą fundamentalnych mechanizmów materiałowych i procesowych zachodzących podczas addytywnego wytwarzania form i rdzeni. Jednocześnie należy podkreślić, że Autor przeprowadził kompleksowe badania obejmujące wzajemnie powiązane aspekty materiałowe, technologiczne i środowiskowe procesu Binder Jetting. Uzyskane wyniki stanowią wartościowe uzupełnienie aktualnego stanu wiedzy oraz posiadają wymierny potencjał aplikacyjny dla przemysłu odlewniczego. Oryginalny charakter pracy przejawia się przede wszystkim w kompleksowym ujęciu analizowanego zagadnienia oraz w połączeniu badań dotyczących spoiw, emisji gazów, regeneracji osnowy i zastosowania chłodzenia konformalnego w jednym spójnym programie badawczym.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

……..

(podpis recenzenta)