

Dr hab. inż. Błażej Bałasz, prof. uczelni
Katedra Inżynierii Systemów Technicznych
i Informatycznych
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
Politechnika Koszalińska

Koszalin, dnia 17.03.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Kwiatkowskiego pt.: „Opracowanie technologii druku 3D filtrów ceramicznych wytwarzanych metodą Binder Jetting z wykorzystaniem proszków AL_2O_3 ”

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Marek Hebda, prof. uczelni.

Podstawa opracowania: Uchwała nr 50/D/2024 z dnia 20 grudnia 2024 r. Rady Naukowej dyscypliny
Inżynieria Materiałowa Politechniki Krakowskiej, o powołaniu na recenzenta w przedmiotowym
postępowaniu

1. Uzasadnienie podjęcia tematu pracy i jej opis ogólny

Opiniowana rozprawa doktorska dotyczy opracowania procesu wytwarzania przyrostowego elementów ceramicznych w technologii Binder Jetting. Wytwarzanie przyrostowe jest coraz częściej wybieraną technologią, głównie ze względu na większą swobodę projektowania i optymalizacji struktury przestrzennej gotowych wyrobów, jak również minimalizację kosztów zużycia materiałów i energii w procesie. W procesach przyrostowych straty materiałowe to najczęściej kilka procent wsadowej ilości materiału użytego do procesu, natomiast energochłonność procesu należy oceniać w całym cyklu procesu, od przygotowania materiału w postaci proszku w procesie atomizacji, jak również ponowne przetworzenie odpadowego proszku do ponownego użycia. Oceniając swobodę projektowania elementów do wytworzenia w technologiach przyrostowych, należy pamiętać, iż jak w każdej technologii są pewne ograniczenia, które zawarte są w wytycznych ogólnie zwanych zasadami projektowania dla wytwarzania przyrostowego (DfAM – Design for Additive Manufacturing) z uwzględnieniem ich odmian. Tym nie mniej, w przypadku zagadnień optymalizacji struktury przestrzennej wyrobu, dostajemy możliwość wytwarzania i testowania kolejnych iteracji wyrobu, bez konieczności ponoszenia kosztów na wytworzenie niezbędnego oprzyrządowania technologicznego (np. specjalnych form, uchwytów i narzędzi) lub modyfikacji programów technologicznych. Kolejnym ważnym aspektem związanym z wytwarzaniem przyrostowym jest opracowanie coraz to nowych materiałów a tym samym poszukiwanie optymalnych parametrów procesu, w celu uzyskania wysokiej jakości wyrobów końcowych. Przedstawiona krótka

problematyka wytwarzania przyrostowego w pełni potwierdza zasadność podjęcia przez doktoranta problematyki pracy. Optymalizacja struktury przestrzennej ceramicznych filtrów odlewniczych do odlewania precyzyjnego nadstopów niklu (superstopów) potwierdza nowatorski charakter pracy o dużym stopniu poznawczym, zwłaszcza w zakresie inżynierii materiałowej i wykorzystania technologii Binder Jetting dla wytwarzania materiałów ceramicznych, jak również o dużym charakterze użytkowym, będącym podstawą do realizacji doktoratu wdrożeniowego. Recenzowana praca stanowi modelowe podejście do rozwiązania tak postawionego problemu.

Zakres pracy, jaki Doktorant przyjął do realizacji obejmował:

- Dobór proszków ceramicznych Al_2O_3 spełniających wymogi technologii Binder Jetting z uwzględnieniem morfologii proszku, rozkładu wielkości cząstek, podatności na spiekanie.
- Opracowanie parametrów procesu wytwarzania elementów ceramicznych w technologii Binder Jetting z uwzględnieniem wpływu wartości głównych parametrów procesu i doboru ich najkorzystniejszych wartości pod kątem jakości wyrobu (minimalizacji błędów kształtu i poprawa jakości struktury).
- Opracowanie procesu spieku wytworzonych struktur ceramicznych z uwzględnieniem dwóch metod spieku: konwencjonalnej i mikrofalowej wraz z porównaniem ich efektywności.
- Opracowanie demonstracyjnych filtrów ceramicznych o złożonych geometriach, wytworzenie w procesie o założonych wcześniej parametrach, ocenę cech jakościowych i wytrzymałościowych, oraz przeprowadzenie procesów odlewania precyzyjnego w celu zbadania ich właściwości filtracyjnych i trwałości.

Zaproponowany zakres pracy wydaje się być logiczny i spójny, a jego poprawne zrealizowanie powinno doprowadzić do osiągnięcia celów pracy. Na podkreślenie zasługuje przyjęte kompleksowe podejście uwzględniające badania materiałowe, mechaniczne oraz projektowe. Zakres pracy jest więc bardzo obszerny, a przyjęte metody badawcze, urządzenia pomiarowe i technologiczne oraz metody projektowania elementów, potwierdzają bardzo dobre przygotowanie Doktoranta do realizacji postawionego zakresu pracy.

Praca liczy 156 stron, składa się z 10-ciu rozdziałów w których zawarto: analizę obszaru badawczego, w szczególności omówienie problematyki precyzyjnego odlewania superstopów niklu, technologii wytwarzania przyrostowego z uwzględnieniem technologii umożliwiających wytwarzanie z materiałów ceramicznych, przedstawiono tezę pracy i jej uzasadnienie. W kolejnych rozdziałach przedstawiono cel i zakres pracy oraz plan badań oraz charakterystykę materiałów użytych w badaniach. Metodyka badawcza została opisana w rozdziale ósmym, a wyniki badań stanowią zawartość najdłuższego 120 stronicowego rozdziału dziewiątego. Całość pracy zamyka rozdział podsumowujący wyniki i definiujący wnioski z przeprowadzonych badań, zabrakło tylko przesłanek do dalszych badań. Zawarta bibliografia składa się z ponad 150 pozycji krajowych i zagranicznych, w tym jednego artykułu i trzech materiałów

konferencyjnych we współautorstwie Doktoranta. W pracy zamieszczono również wykaz ważniejszych oznaczeń, spis rysunków i tabel, oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Uważam, że przedstawiona do opiniowania praca stanowi kompletne, obszerne opracowanie w zakresie określonym tematem, napisana poprawnym językiem, dobrą edycją, choć czasami zbyt małymi rysunkami utrudniającymi ich analizę.

2. Ocena merytoryczna pracy

We wprowadzeniu do pracy Doktorant dokonał identyfikacji proponowanego zakresu badań w kontekście wypełnienia luki poznawczej w obszarze poprawy efektywności filtracji zanieczyszczeń w procesie odlewania precyzyjnego superstopów niklu metodą traconego wosku z wykorzystaniem ceramicznych filtrów wytwarzanych przyrostowo w technologii Binder Jetting o zmodyfikowanej strukturze przestrzennej. Potwierdził, iż proponowany zakres pracy jest ważny i nosi znamiona oryginalności.

Rozdział drugi to bardzo obszerne wprowadzenie do tematyki badawczej. Doktorant dokonał opisu materiałów stosowanych na filtry ceramiczne, dokonał również pełnej charakterystyki wpływu poszczególnych dodatków stopowych w superstopach niklu na właściwości odlanego wyrobu. Kolejne zagadnienie opisane przez Doktoranta to proces precyzyjnego odlewania superstopów niklu w formach ceramicznych z obszerną klasyfikacją wad odlewniczych i zaznaczeniem, iż zanieczyszczenia w postaci wtrąceń są jednym z głównych problemów związanych z jakością wyrobów, a najważniejszym sposobem ich minimalizacji jest stosowanie filtracji za pomocą filtrów ceramicznych, co również zostało opisane w pracy w sposób wyczerpujący z uwzględnieniem wad obecnie stosowanych rozwiązań zwłaszcza w zakresie struktury filtrów. Ostatnie zagadnienie poruszone w tym rozdziale to bardzo obszerny opis technologii przyrostowych możliwych do zastosowania w wytwarzaniu elementów ceramicznych, jednakże należy mieć pewne zastrzeżenie do zbyt ogólnego opisu poszczególnych technik, bez odniesienia się do ich wad i zalet zwłaszcza dla procesów z użyciem materiałów ceramicznych.

Dokonana analiza obszaru badawczego potwierdza ważność problematyki badawczej niniejszej pracy, oraz uzasadnia dobór materiałów i metod, co zostało przez Doktoranta poprawnie sformułowane w rozdziale trzecim i pozwoliło postawić tezę, cytując: *„Zastosowanie technologii Binder Jetting oraz odpowiednio dobranych ceramicznych materiałów proszkowych umożliwi wytworzenie funkcjonalnych filtrów ceramicznych o precyzyjnie zdefiniowanej geometrii i odporności termicznej. Wytworzone filtry efektywnie oczyszczą będą stopy odlewnicze, zapewniając wysoką jakość metalurgiczną odlewów i minimalizując ryzyko powstawania wad.”* Tezę uważam za poprawnie sformułowaną, gdyż jasno określa cel badań, wskazuje na oryginalny wkład w naukę oraz odnosi się do rzeczywistego problemu technologicznego. Jednakże mogła by być lepiej doprecyzowana w zakresie stopnia efektywności np. poprzez określenie przewidywanego procentowego obniżenia liczby wyrobów z wadami. Dla tak sformułowanej tezy, cel i zakres pracy przedstawiony w rozdziale piątym uważam za poprawny, jednakże

dla celu użytkowego brakuje mi nieco precyzyjniejszego zdefiniowania poszukiwanych parametrów charakteryzujących zarówno geometrię jak i mikrostrukturę filtrów, w szczególności w jakim zakresie opracowane filtry w stosunku do obecnie stosowanych mają wyeliminować, np.: zwiększenie trwałości, wydłużenie czasu efektywnego działania, zmniejszenie kosztów wytwarzania?

W rozdziale szóstym przedstawiono opracowany plan badań, który został podzielony na trzy etapy: w pierwszym etapie zaplanowano przeprowadzenie badań w celu doboru materiału z uwzględnieniem specyfiki procesu, etap drugi to poszukiwania zależności pomiędzy parametrami procesu a jego efektami, a etap ostatni to badania efektywności wytworzonych filtrów ceramicznych o zadanym kształcie. Oceniam, że tak przygotowany plan badań jest zgodny z celem pracy i umożliwi zweryfikowanie postawionej tezy. Jednocześnie wysoko oceniam przejrzystość przygotowanego planu badań z wyraźnym wyodrębnieniem na każdym etapie czynników wejściowych, wyjściowych, stałych i zmiennych. Potwierdza to bardzo dobre przygotowanie Doktoranta do realizacji prac badawczych.

Dwa kolejne rozdziały (siódmy i ósmy) to opis materiałów i metod użytych do realizacji celów badawczych. Przedstawiona została charakterystyka sześciu proszków Al_2O_3 oraz jednego bindera. Zaproponowany zakres metod badawczych uważam za poprawny, gdyż umożliwia on ocenę zarówno jakościową, jak i ilościową materiałów i wytworzonych próbek, jak również potencjalnej efektywności filtrów (np. badania kąta zwilżania), jednakże w tym rozdziale nie opisano wszystkich metod wykorzystanych w badaniach, np. metody pomiar wytrzymałości filtrów. W przyszłości warto również korzystać dla oceny dokładności wymiarowo-kształtowej struktur przestrzennych, oraz oceny stopnia defektów materiałowych (porowatości) z rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej (micro-CT), których zabrakło w tej pracy.

Najobszerniejszą część pracy doktorskiej stanowi rozdział dziewiąty, w którym zawarto wyniki badań i obszerną ich analizę. W pierwszym etapie badań dokonano oceny morfologii cząstek w oparciu o zdjęcia SEM, wyznaczono rozkład wielkości cząstek dla każdego gatunku proszku, wyznaczono powierzchnię właściwą oraz objętość dla każdego proszku. Zarówno pomiary jak i opracowanie wyników wykonano poprawnie, jednakże już na tym etapie można było podjąć decyzję o eliminacji pewnych proszków z dalszych badań. Do badań wykorzystano proszki o bardzo małych średnicach ($D_{50} < 10 \mu m$), przy zalecanych co najmniej $20 \mu m$, a tym samym o dużej powierzchni właściwej co w efekcie powoduje tendencję do tworzenia aglomeratów i zmniejszenie ich sypkości. Cechy te w znaczący sposób wpływają na jakość procesu usypywania i zagęszczania kolejnych warstw w procesie budowania warstw w Binder Jetting, zbyt mała objętość proszku podawana w wyniku zapychania się sita, pomimo wyrównywania i zagęszczania warstw rolką, uniemożliwia przygotowanie jednolitej warstwy do kolejnego etapu procesu, jaki jest naniesienie bindera z głowicy drukującej. Drugą istotną wadą takich proszków jest zwiększona absorpcja, co powoduje zwiększone wchłanianie bindera i konieczność zwiększania jego ilości podawania w procesie, co negatywnie wpływa na realny poziom saturacji, wyznaczany jako procentowe wypełnienie wolnej przestrzeni dla proszku o zadanym stopniu upakowania. Należy podkreślić, iż Doktorant wykazał

te wady w swoich kolejnych badaniach, co jest ogromnym walorem poznawczym pracy, jednakże możliwa była eliminacja części proszków i przez to ograniczenie kosztów i czasu badań.

Badania procesu iskrowego plazmowego spiekania (SPS Spark Plasma Sintering) pozwoliły wyznaczyć charakterystyki procesu w zależności od morfologii proszków. Wyniki badań przedstawione na rys. 42 są kolejnym ważnym aspektem poznawczym niniejszej pracy, gdyż wykazały wpływ wielkości cząstek na przebieg i efekty procesu spieku. Wyznaczona gęstość i moduł Younga również potwierdza znaczący spadek gęstości pozornej i modułu Younga dla spieków z proszkiem w mniejszej powierzchni właściwej.

Kolejny etap polegający na weryfikacji możliwości druku z użyciem poszczególnych proszków a jego efekty opisano wcześniej w recenzji. Doktorant podjął również próbę przesiewania poszczególnych proszków w celu uzyskania innych frakcji niż pierwotnie, jednakże rodzi się pytanie, dlaczego wykorzystano sita o wielkości oczek od 1000 do 250 μm , gdyż dla tak małych ziaren, w wyniku przesiewania i tak otrzymano aglomeraty ziaren. Dlaczego nie wykorzystano sit o wielkości oczek pomiędzy 100 a 25 μm , dających możliwość odseparowania pożądanych frakcji proszku. Po tym etapie, Doktorant słusznie dalsze badania prowadził dla proszku o największej wielkości ziaren i sferycznym kształcie, parametry nastawne procesu zamieszone zostały w tab. 19, brakuje jednak informacji jak wartość przyjęto dla zmiennej globalnej procesu Powder Packing Rate [%], na podstawie której obliczana jest objętość podawanego bindera dla każdej warstwy dla zadanej wartości saturacji. W tab. 19 są również podane 3 wartości grubości warstw jednakże, brak jest porównania wyników do poszczególnych grubości warstw, jak również dla wyników zaprezentowanych na rys 49 – 51, Doktorant nie podał informacji jak była nastawna grubość warstwy. Nie podał również informacji o parametrach procesu utwardzania spoiwa (ang. curing), niezbędnego do wydobyciem próbek z łoża proszku.

Kolejny etap badań miał na celu zbadanie wpływu stopnia nasycenia spoiwem na gęstość względną wytworzonych próbek. Doktorant potwierdził założenie, że wraz ze wzrostem saturacji wzrasta gęstość próbek, bo wzrasta ilość zaaplikowanego bindera. Niestety ponownie nie ma ważnej informacji o wysokości pojedynczej warstwy. Saturacja jest to procentowa objętość bindera w stosunku do obliczeniowej objętości przestrzeni między ziarnami dla jednostki objętości. Grubość warstwy ma kluczowe znaczenie dla oceny jakości procesu binder jetting. Ponownie jest brak informacji o parametrach procesu utwardzania spoiwa (ang. curing) przed wydobyciem próbek z łoża proszku. W mojej ocenie, warto było zaplanować eksperyment uwzględniając jednocześnie zmienność grubości warstwy i saturację, dało by to pełniejszy obraz wpływu obu parametrów, a jednocześnie zmniejszyło by liczbę wykonanych eksperymentów.

W kolejnym etapie badań, wytworzone próbki poddano procesowi spiekania w dwóch wariantach temperatury i czasu, tj.: 1700° C i 60 minut, oraz 1740° C i 10 minut. Nie podano niestety profilu temperaturowego procesu nagrzewania i chłodzenia, stąd brak informacji czy przyjęte czasy obejmowały cały proces, czy tylko część procesu dla maksymalnej temperatury. Dla poprawy jakości analizy, Doktorant powinien wyników pomiarów gęstości po spieku przedstawić na zbiorczym wykresie, ułatwiło by to

porównanie procesów, zwłaszcza że nie ma bezpośredniej korelacji pomiędzy wzrostem saturacji i spadkiem gęstości, czego należało by się spodziewać.

Próbki po spieku poddano procesowi oceny jakości powierzchni, w celu określenia korelacji z wartością saturacji oraz parametrami procesu spiekania. Niestety jako parametry, za pomocą których chciano rozróżnić poszczególne powierzchnie wybrano R_a i R_z , których wartości uzyskano za pomocą pomiarów topografii metoda stykową. Powierzchnie tego typu (zaprezentowane na rys. 109 i 110) powinny być oceniane parametrami S_a i S_z , zwłaszcza że Doktorant miał do dyspozycji aparaturę pomiarową, którą użył w dalszej części pracy, pozwalającą wyznaczyć wartość tych parametrów. Metody stykowe dla tego typu powierzchni, nie dają wiarygodnych informacji, co potwierdza analiza wyników zawartych w tabeli 25 (z drobnym błędem edycyjnym w ostatniej kolumnie powinno być R_z zamiast R_a), na podstawie których trudno wysnuć zalecenia technologiczne. Brakuje również jednoznacznej informacji, na ilu próbkach dokonano pomiaru chropowatości.

W kolejnym etapie pracy badawczej, Doktorant przystąpiła do zaprojektowania nowych struktur filtrujących. W tym celu jako wzorca porównawczego użył komercyjnych filtrów UDICELL Gate o parametrach 10 i 20 ppi, z przepustowością określoną przez producenta (tab. 26). Doktorant dokonał własnego porównania przepustowości w oparciu o czas przelewu 1000 ml wody, zarówno dla filtrów komercyjnych jak i własnych rozwiązań, a wyniki przedstawił w tab. 27. Na tej podstawie do dalszych badań wybrał rozwiązanie o geometrii 3 i 4. Niestety brakuje w pracy pełniejszej charakterystyki zaprojektowanych geometrii, przedstawienia przekrojów oraz wyznaczenia ppi dla każdego filtra.

Kolejny etap badań przeprowadzono na wybranych geometriach filtrów w celu optymalizacji parametru Z (niestety Doktorant nie sprecyzował jaką fizyczną wielkość określił jako Z), z uwzględnieniem zmiennej wysokości warstwy nasypu proszku. Od razu nasuwa się pytanie, dlaczego te badania nie wykonano na wcześniejszym etapie. Z rys. 93 trudno także wnioskować o jakości powierzchni bocznej. Nasuwa się również pytanie, dlaczego tym razem wykonano 6 sztuk, a poprzednio 8? Kolejna wątpliwość, to dlaczego w badaniach spieku filtrów zastosowano dwie metody, konwekcyjną i mikrofalową, a w poprzednim etapie badań metodę spieniania iskrowego plazmowego spiekania? Jaką wiedzę z SPS wykorzystano do przygotowania wytycznych do obu procesów? Wszystkie procesy mają inny profil temperaturowy spiekania, co uniemożliwia porównanie wyników badań. Konieczne wydaje się dodatkowe uzasadnienie tak przyjętej metodyki badań, zwłaszcza że w metodyce badań (p. 8.5) założono prowadzenie procesu w metodzie SPS.

W badaniach wpływu grubości warstwy druku wykonano po 6 sztuk próbek dla każdej grubości warstwy, brakuje jednak jednoznacznego określenia, która geometria została wykorzystana do wytworzenia próbek (3 czy 4), co utrudnia późniejszą analizę porowatości struktur (tab. 30). Pomijając tę uwagę, sam przebieg badań procesu spiekania w obu metodach spiekania należy uznać za poprawny. Dla każdej z metod zaproponowano profil temperaturowy, a próbki po spieku poddano analizie porowatości, wykazując niższą porowatość próbek po spiekaniu mikrofalowym, a tym samym wyższą gęstość pozorną. Wysznuło również ważny wniosek użyteczny, iż gęstość maleje wraz ze wzrostem grubości warstwy

drukowanej. Warto jednak podjąć dyskusję, dlaczego gęstość dla próbek z proszku SA-B-10 po spieku SPS wynosiła tylko $3,33 \text{ g/cm}^3$, a dla rdzenia próbek spieczonych pozostałymi metodami wynosiła pomiędzy $3,90 - 3,93 \text{ g/cm}^3$ (dla rdzenia).

Doktorant przeprowadził również analizę wymiarową struktur po spieku, wyznaczył procentowy skurcz w trzech osiach, w zależności od metody spieku. Warto jednak podjąć dyskusję nad otrzymanymi wynikami. W technologii Binder Jetting największy skurcz obserwuje się dla osi Z (kierunek budowania warstw) i jednocześnie rośnie on wraz ze wzrostem grubości warstw nakładanych proszków, a uzyskane przez Doktoranta wyniki, wskazują na odwrotną zależność. Na rysunku 102 nie podano także, czy są to wyniki dla jednej z szerokości, czy też uśrednione dla wszystkich trzech.

Pomiary chropowatości powierzchni również wymagają wyjaśnienia. W metodyce badawczej (p. 8.7) podano iż mierzone będą powierzchnie górne i boczne przy pomocy mikroskopu Keyence VHX-7000, natomiast w wynikach badań (p. 9.3.8) przedstawiono wynik jednego pomiaru dla każdej próbki, bez informacji, na której powierzchni dokonano tego pomiaru i czy wyniki zestawione w tab. 32 rzeczywiście dotyczą parametru R_a a nie jak należałoby się spodziewać S_a ?

Na rysunku 109 i 110 przedstawiono zdjęcia SEM powierzchni tylko jednej próbki (błędnie opisując, że jest to przekrój), niestety w pracy zabrakło analizy morfologii powierzchni pozostałych próbek dla różnych grubości warstw wytworzenia i metody spieku. Szkoda że doktorant nie porównał choćby dla jednej pary próbek wykazać wpływu metody spieku na morfologię powierzchni.

W dalszej części przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie, uzyskując kolejny ważny wniosek poznawczy, iż spiekanie mikrofalowe przyczynia się do obniżenia właściwości wytrzymałościowych wytworzonych próbek.

Kolejne badania przeprowadzone przez Doktoranta miały kluczowe znaczenie dla osiągnięcia celów pracy. Doktorat dokonał pomiarów kątów zwilżania powierzchni ceramicznych dla filtrów komercyjnych, powierzchni referencyjnej w postaci płytki ceramicznej i zestawiał je z wynikami pomiarów dla opracowanych przez siebie filtrów. Dokonał pełnej analizy zmian kąta zwilżania w czasie. Badania wykazały, iż opracowane filtry w znacznym stopniu mogą poprawić przepływ ciekłego superstopu niklu przez jego strukturę, dzięki mniejszemu kątowi zwilżania w porównaniu z filtrami komercyjnymi. Daje to możliwość dalszej optymalizacji struktury filtrów.

Ostatnim etapem podsumowującym cały bardzo obszerny zakres badań, były testy odlewnicze filtrów, przeprowadzone dla geometrii 3 i 4 dla trzech temperatur odlewania, jednak nie podano uzasadnienia doboru poszczególnych wartości temperatur oraz różnicy w liczbie powtórzeń dla każdej z przyjętych temperatur. Odlane próbki poddano wnikliwej ocenie pod względem struktury i morfologii. Dokonano również analizy EDS na zgładach odlewów, pod kątem analizy efektywności filtracji i minimalizacji defektów i wtrąceń zanieczyszczeń. W przyszłych badaniach warto by przeanalizować strukturę i stopień zanieczyszczeń skrzepniętego metalu pozostałego w strukturze filtrów po odlaniu, w celu

określenia rzeczywistej efektywności filtracji. Drugi obszar poszukiwań może dotyczyć optymalizacji struktury filtrów również ze względu na optymalizację czasu filtracji.

Sformułowane na koniec pracy wnioski są zgodne z uzyskanymi wynikami badań, oraz jednoznacznie potwierdzają postawioną тез pracy.

Podsumowując całość uważam, że Doktorant wywiązał się z postawionego zadania, zakres pracy był **bardzo szeroki**, Doktorant wykazał się poprawnym pod względem metodologicznym podejściem do rozwiązywania nakreślonych problemów badawczych, a sformułowane przez recenzenta uwagi mają charakter dyskusji i nie umniejszają ogromnych walorów poznawczych i użytecznych tej rozprawy.

3. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska posiada cechy oryginalności i istotne walory użyteczne. Mgr inż. Maciej Kwiatkowski wykazał, iż posiada dużą wiedzę z zakresu inżynierii materiałowej, technologii wytwarzania przyrostowego, oraz optymalizacji procesów precyzyjnego odlewania superstopów niklu. Osiągnął wysoki poziom umiejętności analizy i syntezy złożonych problemów naukowych oraz systematyzowania wiedzy na potrzeby prowadzonych badań. Jednocześnie zakres i komplementarność zrealizowanych badań skłaniają mnie do postawienia wniosku o **wyróżnienie pracy**.

Na podstawie powyższych stwierdzeń, wyrażam opinię że rozprawa doktorska mgra inż. Macieja Kwiatkowskiego spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i wnoszę o dopuszczenie jej autora do publicznej obrony w dyscyplinie inżynieria materiałowa.