

Warszawa, 12.08.2022

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Pakieła  
Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Materiałowej  
ul. Wołoska 141  
02-507 Warszawa

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgr. inż. Karola Kobieli: „Opracowanie technologii addytywnej obróbki wiązką elektronów stopu Ti-55511 (Ti-5Al-5V-1Cr-1Fe)”**

#### **Tematyka pracy**

Tematyka recenzowanej pracy dotyczy problemów związanych z nowymi technikami wytwarzania, do jakich należą techniki przyrostowe. Ten obszar wiedzy obejmuje zagadnienia będące przedmiotem zainteresowania kilku obszarów nauki, takich jak inżynieria materiałowa, czy też technologia, rozumiana jako metoda przygotowania i prowadzenia procesu wytwarzania lub przetwarzania różnych wyrobów materialnych. W obszarze technologii można ulokować również część zagadnień dotyczących inżynierii mechanicznej, w której jest ulokowana recenzowana praca.

Rozwój nowych metod wytwarzania, w tym metod przyrostowych, jest napędzany z jednej strony rosnącym zapotrzebowaniem na precyzyjne części maszyn i urządzeń o złożonym kształcie, a z drugiej strony rosnącymi możliwościami technicznymi w zakresie urządzeń technologicznych dedykowanych do technik przyrostowych. Skutkuje to postępowaniem technologicznym w obszarze wytwarzania części maszyn i urządzeń, w tym wytwarzania z użyciem najnowszych technik do jakich należy zaliczyć techniki przyrostowe. Prace badawcze prowadzone w tym obszarze są ukierunkowane na rozwiązywanie różnych problemów, wśród których do najistotniejszych należą: dobór odpowiednich materiałów, wytworzenie właściwej struktury i nadanie jej pożądaných właściwości mechanicznych, minimalizacja liczby defektów materiałowych, w tym porów i pęknięć, precyzyjne wytworzenie elementów o złożonych kształtach przy zastosowaniu jak najmniejszej liczby operacji technologicznych. W badania te są zaangażowane liczne zespoły na całym świecie a podejmowanie nowych prac w tym obszarze jest w pełni uzasadnione, gdyż liczba nierozpoznanych zagadnień jest bardzo duża, zwłaszcza jeśli chodzi o rozwiązywanie różnego rodzaju problemów praktycznych.

Tematyka recenzowanej rozprawy wpisuje się w aktualny nurt badań związanych z przyrostowymi technikami wytwarzania. Autor podjął się zadania opracowania metodyki

wytwarzania elementów ze stopu tytanu Ti-5Al-5V-1Cr-1Fe, oznaczanego skrótowo jako Ti-55511, z użyciem techniki przetapiania wiązką elektronów proszku metalu w złożu (E-PBF), oraz scharakteryzowania struktury i właściwości wytworzonego materiału a także wykonania demonstratorów technologii. Podjęta tematyka badawcza jest bardzo aktualna, a uzyskane wyniki mogą mieć duże znaczenie poznawcze, jak też praktyczne w zakresie doskonalenia technologii przyrostowych z użyciem techniki przetapiania wiązką elektronów.

### **Ogólna charakterystyka i ocena merytoryczna pracy**

Recenzowana praca została podzielona na 10 rozdziałów, z których pierwsze trzy oraz częściowo rozdział czwarty obejmują wprowadzenie i przegląd piśmiennictwa związanego z tematyką rozprawy. W następnych rozdziałach przedstawiono cel, zakres i plan pracy, wyniki badań własnych oraz wnioski i proponowane kierunki dalszych badań.

W rozdziale pierwszym, będącym wprowadzeniem do pracy, Autor przedstawia uzasadnienie podjęcia tematyki pracy. Przedstawia skrótowo wady i zalety technologii przetapiania wiązką elektronów proszków w złożu, w porównaniu do konkurencyjnej metody wytwarzania addytywnego, jaką jest selektywne przetapianie laserowe. Do istotnych cech przetapiania z użyciem wiązki elektronów należy konieczność prowadzenia procesu w próżni. Jest to z jednej strony wada, gdyż proces jest przez to trudniejszy i kosztowniejszy niż przetapianie w atmosferze gazowej, ale z drugiej strony pozwala na wytwarzanie materiałów wrażliwych na zanieczyszczenia pochodzące z atmosfery, do jakich należą m.in. stopy tytanu. Zaletą omawianej metody jest też powstawanie mniejszych naprężeń cieplnych po procesie w porównaniu do przetapiania laserowego. Stopy tytanu, ze względu na dużą wrażliwość na zanieczyszczenie tlenem, jak również dużą podatność na powstawanie naprężeń cieplnych wynikających z ich małej przewodności cieplnej, należą do materiałów szczególnie predystynowanych do przetapiania z w próżni z zastosowaniem wiązki elektronów.

W rozdziale drugim, zatytułowanym „Przyrostowe technologie wytwarzania”, opisano ogólnie technologie przyrostowe i przedstawiono ich systematykę. Wśród nich ulokowano technologię przetapiania proszków w złożu z użyciem wiązki elektronów. Technikę tę opisano bardziej szczegółowo i opisano ograniczenia techniczne, jakie występują przy korzystaniu z tej technologii oraz specyficzne procesy fizyczne, które należy uwzględnić planując wytwarzanie wyrobów tą metodą.

Rozdział trzeci zatytułowano „Tytan i jego stopy”. Opisano w nim ogólnie stopy Ti, w tym stop Ti-55511, będący przedmiotem badań recenzowanej pracy i podano ich klasyfikację. W rozdziale tym zawarto również krótką informację na temat przetwarzania stopu Ti-55511

technologiami przyrostowymi. Autor twierdzi, że stop ten nie był dotychczas przedmiotem intensywnych badań w zakresie technologii przyrostowych. Można się zgodzić z Autorem, że liczba prac dotyczących przetapiania tego stopu wiązką elektronów jest niewielka, można więc było w pracy przytoczyć wszystkie, czego Autor nie dokonał. Natomiast publikacji dotyczących tego stopu lub stopów o zbliżonym składzie, przetapianych laserowo jest znacznie więcej. Na ich podstawie można zidentyfikować praktyczne problemy występujące przy przetapianiu tego stopu w złożu proszku, w tym problematykę nierównowagowych przemian fazowych oraz mechanizmy powstawania wad materiałowych i niejednorodności mikrostruktury występujące przy nagrzewaniu wiązką lasera i chłodzeniu materiału. Ponadto dla przeglądu stanu zagadnienia przydatne byłoby również szersze uwzględnienie bardziej tradycyjnych technologii przetwarzania tego stopu, takich jak spawanie, przeróbka plastyczna czy obróbka cieplna, co pozwoliłoby na lepsze rozeznanie problematyki powstawania wad materiałowych omawianego materiału w wyniku zabiegów technologicznych. Bardzo skrótowa analiza tego zagadnienia powoduje, że omawiany rozdział należy do słabych stron pracy.

Rozdział 4. zatytułowano „Technologia E-PBF i jej adaptacja techniczna do realizacji celów badań”. W rozdziale tym omówiono modyfikację przemysłowego stanowiska do przetapiania proszków w złożu z użyciem wiązki elektronów, będącego w posiadaniu Politechniki Wrocławskiej. Modyfikacja miała na celu dostosowanie stanowiska, które oryginalnie jest zaprojektowane do wytwarzania stosunkowo dużych elementów, wymaga więc wprowadzania do urządzenia stosunkowo dużej ilości proszku (15 litrów). Nie jest to korzystne przy badaniach naukowych, gdzie należy przebadać wiele wariantów próbek o stosunkowo małych rozmiarach. Dlatego stanowisko zostało zmodyfikowane w taki sposób, że można było pracować przy użyciu tylko 5. litrów proszku. W rozdziale opisano szczegółowo zmiany konstrukcyjne, dokonane w celu zmniejszenia komory roboczej i dostosowania do tej zmiany reszty układu. Przeanalizowano różne warianty modyfikacji i wybrano najbardziej przydatny do celów badawczych, jak również umożliwiający szybkie przeobrażenie urządzenia z wersji przemysłowej na laboratoryjną i odwrotnie. Rozdział ten umieszczono przed rozdziałem „Cel i zakres pracy”. Nie jest zatem jasne, czy dokonana modyfikacja stanowiska była dokonaniem doktoranta, czy została przeprowadzona przez inne osoby. Jednak na podstawie podsumowania pracy, zawartego w rozdziale 10 można przypuszczać, że głównym autorem modyfikacji był doktorant. Należy zatem uznać dokonaną modyfikację za istotne osiągnięcie konstrukcyjne doktoranta, które wpisuje się w dyscyplinę inżynieria mechaniczna.

Rozdział 5. Zatytułowano „Charakterystyka i parametryzacja procesu wytwarzania. Cel i zakres pracy”. Omówiono w nim cel pracy oraz program badawczy. Zgodnie z deklaracją Autora,

cel pracy był następujący, cyt.: „Celem pracy było usystematyzowanie metody przetwarzania stopów metali z wykorzystaniem technologii E-PBF na przykładzie wybranego stopu Ti-55511, zmierzając do uzyskania parametrów technologicznych umożliwiających wytwarzanie elementów o określonych właściwościach materiałowo-mechanicznych”. Sformułowanie celu pracy, co jest jednym z najważniejszych etapów pracy badawczej, nie jest zbyt precyzyjne i zrozumienie go wymaga od czytelnika pewnego wysiłku. Na podstawie lektury dalszej części pracy można wywnioskować, że celem pracy było wyznaczenie parametrów technologicznych dla wytwarzania metodą E-PBF elementów o małej liczbie defektów oraz zadawalających właściwościach mechanicznych, zbliżonych do właściwości elementów wytwarzanych metodami tradycyjnymi. Dla realizacji tego celu zaplanowano program badawczy, mający doprowadzić do jego realizacji. Program ten podzielono na 4 etapy. Pierwszym etapem były badania materiałowe proszku. Podzielono je na „Wyznaczanie charakterystyk materiałowych” oraz „Wyznaczanie charakterystyk geometrycznych”. Autor nie wyjaśnia, czym był uzasadniony taki podział. Dla recenzenta nie jest on zrozumiały, tym bardziej, że do charakterystyk geometrycznych doktorant zaliczył sypkość proszku i gęstość nasypową, co trudno uznać za parametry geometryczne. Co ciekawe, Autor sam w następnym rozdziale zalicza te cechy do właściwości technologicznych, więc wykazuje się tu niekonsekwencją w stosowanej nomenklaturze. W drugim etapie zaplanowano dobór parametrów procesu wytwarzania próbek kontrolnych do badań, a następnie przeprowadzono badania materiałowe tych próbek. Trzeci etap obejmował dobór parametrów wytwarzania próbek wytrzymałościowych oraz badania ich właściwości mechanicznych i mikrostruktury. W ostatnim, czwartym etapie zaplanowano wytworzenie demonstratorów technologii i dokonanie optymalizacji technologii ich wytwarzania. Przedstawiony program badawczy jest logiczny i służy realizacji celu, za jaki należy uznać opracowanie podstaw technologii wytwarzania elementów ze stopu Ti-55511 metodą E-PBF.

W rozdziałach 6-9 opisano szczegóły realizacji kolejnych etapów programu badawczego. W ramach charakterystyki właściwości proszku zbadano energię zapłonu proszku, jego morfologię oraz mikrostrukturę ziaren proszku a także właściwości technologiczne, takie jak rozkład rozmiaru ziaren proszku, sypkość i gęstość nasypową. W kolejnym etapie pracy dokonano doboru parametrów przetwarzania materiału. Analizowano m.in. wpływ na mikrostrukturę i właściwości materiału takich parametrów jak natężenie wiązki, prędkość skanowania, średnica plamki, kolejność skanowania linii czy odległość między liniami. Przeprowadzono testy elementów cienkościennych oraz objętościowych. W wyniku przeprowadzonych badań określono które parametry mają najsilniejszy wpływ na jakość wytwarzanych wyrobów a które są mniej istotne. Zaplanowano oddzielną realizację przetwarzania konturów wyrobu oraz wypełnienia wyrobu. Do

wyznaczenia parametrów przetapiania konturów użyto testu przetapiania elementów cienkościennych a do przetapiania wypełnienia przeprowadzono badania elementów objętościowych. Tak zaplanowana metodyka pozwoliła z jednej strony na kontrolowanie jakości powierzchni wyrobów a z drugiej strony na kontrolowanie jakości, w tym zwłaszcza porowatości wnętrza wyrobów. Wytworzone elementy grubościenne zostały przebadane pod kątem uzyskanej porowatości, mikrostruktury, mikrotwardości, składu chemicznego, w tym ubytku aluminium zachodzącego w wyniku parowania tego pierwiastka podczas przetapiania proszku, parametrów wyznaczanych w próbie rozciągania czyli modułu sprężystości wzdłużnej, granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia do zerwania. Przeprowadzono też badania fraktograficzne przełomów próbek po rozciąganiu. W planie badań, w etapie III, dotyczącym badań próbek wytrzymałościowych, oprócz prób rozciągania i badań twardości przewidziano również przeprowadzenie prób ściskania (Rys. 37), jednak wyników tych badań nie przedstawiono w pracy. Nie wiadomo czy badania ściskania nie zostały przeprowadzone czy Autor uznał ich wyniki za mało istotne.

Na podstawie przeprowadzonych badań otrzymanych próbek wyznaczono parametry procesu wytwarzania przy których uzyskiwano próbki o zadawalającej porowatości i odwzorowaniu zakładanego kształtu. Słabością tej części pracy jest zdawkowe opisanie metodyki badawczej. Nie podano np. jaką metodą określono zawartość fazy  $\alpha$ , w jaki sposób ujawniano mikrostrukturę materiału czy jaką metodą mierzono odkształcenie wyznaczone w próbie rozciągania. Nie podano też czy w badaniach składu chemicznego metodą EDS użyto wzorców, czy przeprowadzono badanie metodą „bezwzorcową”. Jeśli nie używano wzorców, co jest częstą praktyką przy badaniach EDS, to wynik badania ilościowego należy traktować jako przybliżony. W publikacjach naukowych jest przyjęte takie opisanie metodyki badawczej aby można było powtórzyć eksperyment w tych samych warunkach. W przypadku recenzowanej pracy opis procedury badawczej jest zbyt zdawkowy i dla części badań niewystarczający, aby na jego podstawie można było powtórzyć eksperyment. O ile utajnianie lub niepełne ujawnianie parametrów technologicznych może być zrozumiałe, bo szczegóły technologii mogą mieć znaczną wartość komercyjną, to pomijanie szczegółów procedury badawczej nie może być uzasadnione tymi względami, gdyż są to procedury znane.

Uzupełnieniem programu badań próbek grubościennych było poddanie części próbek do rozciągania dogęszczaniu metodą prasowania izostatycznego na gorąco (HIP). Porównano wyniki badań próbek bez dogęszczania i próbek poddanych dogęszczaniu. Stwierdzono, że proces dogęszczania może zredukować porowatość próbek do wartości bliskiej 0. Jednocześnie stwierdzono znaczny spadek wartości granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie oraz

modułu Younga po procesie HIP. Spadek granicy plastyczności i wytrzymałości jest zrozumiały, bo proces HIP był prowadzony na gorąco co doprowadziło prawdopodobnie zmian mikrostruktury materiału. Natomiast niezrozumiały jest spadek wartości modułu Younga, gdyż spadek porowatości powinien doprowadzić do wzrostu wartości modułu. Autor nie komentuje w pracy zmiany wartości modułu, chociaż różnica w stosunku do materiału referencyjnego jest bardzo duża (ok. 30%). W wyjaśnieniu zaobserwowanych zmian granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciągania i moduły Younga pomocne byłyby badania mikrostruktury i składu fazowego materiału po HIP, jednak w pracy nie przedstawiono wyników takich badań, ani nawet nie rozważano teoretycznie ich przyczyn. Jest to istotną słabością tej części pracy.

Mimo pewnych niedociągnięć, zauważonych w tej części pracy, całość programu badawczego, mającego doprowadzić do opracowania podstaw technologii przetwarzania stopu metodą E-PBF, oceniam wysoko. Na podstawie dobrze zaplanowanego i zrealizowanego programu badawczego określono zakres parametrów przetwarzania prowadzących do uzyskiwania wyrobów o zadowalającej jakości. Uzyskane wyniki mogą mieć duże znaczenie praktyczne przy wytwarzaniu części maszyn i urządzeń tą metodą. Potwierdzeniem tego wniosku są wyniki uzyskane w następnej części pracy, która dotyczyła wykonania demonstratorów technologii.

Wykonanie demonstratorów technologii, czyli przykładowych produktów wykonanych z badanego stopu metodą E-PBF było ostatnim etapem programu badań. Ponieważ technologia E-PBF na obecnym etapie rozwoju może być konkurencyjna jedynie dla wytwarzania wyrobów jednostkowych lub małoseryjnych, do zademonstrowania możliwości technologii E-PBF wybrano części samolotu produkcji PZL Mielec, niebędące częściami krytycznymi, aby nie była konieczna ich certyfikacja. Wybrane części podzielono na 3 grupy. Pierwszą grupę stanowiły części, dla których zmieniono jedynie metodę wytwarzania, z obróbki ubytkowej na E-PBF. Drugą grupę stanowiły elementy, które są obecnie wykonywane z kilku części poprzez ich spajanie. Zastosowanie technologii E-PBF pozwoliło na wyeliminowanie procesów łączenia i wykonanie produktu w jednej operacji, przez co skróceniu uległ cykl produkcyjny tych elementów. Trzecią grupę stanowiły elementy w których dokonano optymalizacji ich kształtu, co nie jest możliwe w przypadku metod klasycznych. Zaprezentowane przykłady dowodzą, że jest możliwe wykonanie złożonych elementów metodą E-PBF. Niestety nie przedstawiono żadnych wyników badań materiałowych tych elementów, nie wiadomo więc czy ich struktura, w tym porowatość i właściwości, zwłaszcza wytrzymałościowe, są akceptowalne. Mimo tego braku, wykonanie demonstratorów technologii, które prawidłowo odzwierciedlają kształt wytwarzanych elementów jest istotnym osiągnięciem doktoranta.

W rozdziale 10. zawarto obszerne podsumowanie pracy, wnioski oraz zaproponowano kierunki dalszych badań. Do najważniejszych wniosków można zaliczyć to, że opracowano zestaw parametrów procesu przy których możliwe jest wytwarzanie wyrobów z badanego materiału o niskiej porowatości i dobrej jakości powierzchni. W pracy przedstawiono również liczne wnioski szczegółowe mające znaczenie praktyczne lub poznawcze. Wnioski są dobrze poparte przedstawionymi w pracy wynikami badań.

### **Ocena formalna pracy i uwagi szczegółowe**

Praca liczy 176 stron. Jest podzielona na 10 rozdziałów, zawiera spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis literatury obejmujący 130 pozycji, spis ilustracji oraz wykaz stosowanych akronimów. Praca jest napisana na ogół poprawnym i zrozumiałym językiem, choć zdarzają się w niej błędy gramatyczne, stylistyczne i interpunkcyjne. Układ pracy jest jasny i przejrzysty. Wyniki badań są bogato zilustrowane rysunkami i tabelami (zamieszczono 120 rysunków i 32 tabele), które są jasno i zrozumiale opisane oraz konsekwentnie ponumerowane, choć podział na rysunki i tabele stosowany przez Autora jest dość umowny, gdyż część rysunków została zamieszczona w tabelach i oznaczona jako tabele (Tab. 8, 10, 20, 22, 30, 32) a na części rysunków znajdują się również tabele (rys. 7, 59, 112).

Mimo dość starannej redakcji pracy doktorant nie ustrzegł się pewnych niedociągnięć i nieścisłości. Niektóre sformułowania są użyte niewłaściwie lub niezręcznie. Np. używane są pojęcia granica wytrzymałościowa i granica wytrzymałości zamiast wytrzymałość na rozciąganie (str. 124, 132, 134) czy przewężenie szyjki, zamiast przewężenie albo szyjka. Niefortunne jest określenie właściwości materiałowo-mechaniczne, gdyż właściwości mechaniczne również należą do właściwości materiałowych. Autor nie wyjaśnia co ma na myśli pisząc o zastępczym module Younga a pojęcia „moduł Younga” i „zastępczy moduł Younga” są używane w pracy zamiennie. Nieprawidłowe jest użycie określenia „założenia technologiczne” zamiast „ograniczenia technologiczne” (str. 37). Niezręczne jest określenie „wielkość frakcji proszku ....”, z podaniem zakresu rozmiaru ziaren tej frakcji, zamiast „frakcja proszku ....”. Nie wiadomo też co Autor ma na myśli pisząc o czasie uzyskania atmosfery ochronnej, w rozdziale o wytwarzaniu elementów objętościowych, skoro proces był prowadzony w próżni. W podsumowaniu, w Tabeli 32. zamienione są wartości  $R_{p0,2}$  i  $R_m$ . Oczywistą pomyłką pisarską jest stwierdzenie zawarte w podsumowaniu, że głównym celem pracy było opracowanie technologii wytwarzania proszków stopów w technologii E-PBF, gdyż technologia E-PBF nie służy do wytwarzania proszków a w ramach pracy nie wytwarzano proszków lecz korzystano z proszku wykonanego na zamówienie metodą plazmowej atomizacji.

Praca zawiera bibliografię, którą nazwano rozdziałem, co nie jest powszechnie przyjętą praktyką. Bibliografia obejmuje 130 pozycji. Zwraca uwagę mała liczba artykułów źródłowych dotyczących wytwarzania stopu Ti-55511 technikami przyrostowymi. Autor w rozprawie stwierdza, że takich prac jest bardzo mało. Pobieżne przejrzanie bazy Scopus pozwoliło recenzentowi stwierdzić, że prac dotyczących tego stopu lub stopów o bardzo podobnym składzie można znaleźć co najmniej 20. Brak odniesień do tych prac może świadczyć o niezbyt wnikliwym przeanalizowaniu przez doktoranta stanu zagadnienia w tym zakresie. Jest to o tyle niezrozumiałe, że dość licznie są przytaczane w rozprawie prace dotyczące wytwarzania metodami przyrostowymi innych stopów. Oczywiście część zagadnień dotyczących technologii przyrostowych jest wspólna dla wszystkich stopów, więc analiza wyników badań różnych stopów jest przydatna, jednak ze względu na specyfikę badanego stopu Ti-55511, szersze przytoczenie piśmiennictwa w tym zakresie znacznie wzbogaciłoby pracę. Mimo tego niedostatku, dobór piśmiennictwa dla pozostałych części pracy jest odpowiedni i wystarczający na potrzeby recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Pozostałe, szczegółowe uwagi dotyczące nieprecyzyjnych sformułowań i nieścisłości oraz błędów językowych jakie zauważyłem w pracy, zaznaczyłem w tekście pracy.

Przedstawione uwagi krytyczne mają znaczenie drugorzędne dla obrazu całości pracy i nie obniżają istotnie mojej wysokiej oceny rozprawy.

### **Wniosek końcowy**

Pan mgr inż. Karol Kobiela w przedłożonej rozprawie doktorskiej zrealizował obszerny i ciekawy program badawczy. Uzyskane wyniki są oryginalne i zawierają elementy nowości a tematyka pracy mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Biorąc pod uwagę wartość naukową rozprawy, zakres przeprowadzonych prac oraz to, że doktorant wykazał się umiejętnością oryginalnego rozwiązania problemu naukowego, a także ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie inżynieria mechaniczna stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Kobieli spełnia wymagania określone w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W związku z tym oceniam ją pozytywnie i wnioskuję o dopuszczenie do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej.

*Ugarden Polwek*