

## RECENZJA

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

Promotor: prof. dr hab. inż. Edward Chlebus

*Podstawa opracowania: pismo z dnia 07.06 2022 r.  
Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna,  
dr. hab. inż. Jacka Reintera, prof. uczelni*

### 1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 176 stron numerowanych plus 1 załącznik formatu A3, a w tym: 1 str. streszczeń w j. polskim i w j. angielskim, 1 str. wykazu akronimów, 3 str. spisu treści, 10 str. bibliografii (130 pozycji), 9 str. spisu ilustracji (120 rysunków).

Praca składa się z 11 rozdziałów - rozdział 11 jest wykazem bibliografii.

**Praca została starannie opracowana pod względem redakcyjnym**, natomiast w kilku miejscach byłaby wskazana korekta interpunkcji, zaś w wykazie akronimów jest: SLS - „...*Sinetring*”, a powinno być „*Sintering*”.

**We wprowadzeniu - rozdział 1** (s.6-s.9) Autor rozprawy omówił w skrócie zalety rozwijanych obecnie technologii przyrostowych w porównaniu do technologii tradycyjnych. Odnoszą się one głównie do technologii wytwarzania wyrobów z metalicznych materiałów trudno obrabialnych, np. stopów na bazie tytanu czy niklu. W technikach przyrostowego wytwarzania znacznie też częściej wykorzystuje się metody optymalizacji topologicznej. Wpływa to na redukcję masy wytwarzanych elementów, a równocześnie stwarza możliwość kształtowania wyrobów o złożonej geometrii.

Aktualny trend rozwoju wytwarzania przyrostowego (AM - *Additive Manufacturing*) jest ukierunkowany na miniaturyzację wyrobów. Szybki jej rozwój sprzyja obniżeniu kosztów urządzeń i upowszechnianiu technologii, jako podstawowego wyposażenia parków maszyn - w tym np. urządzeń klasy „biurkowej” dla technologii polimerowych (SLS - *Selective Laser Sintering*).

Na podstawie przeprowadzonej analizy Doktorant stwierdził, że: „...zestawiając laserowe i elektronowe technologie stapienie w złożu proszkowym (PBF), to aktualnie na świecie jest 63 producentów urządzeń w technologii laserowego stapienia (L-PBF), a tylko 9 producentów urządzeń w technologii elektronowego stapienia (E-PBF). Technologia E-PBF jest bardziej wymagająca ze względu na gorszą stabilność procesu w porównaniu do L-PBF”.

Biorąc pod uwagę potencjalne zastosowania, m. in. w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, medycznym, a także wymagania stawiane wyrobom ze stopów tytanu, **podjęcie zaproponowanego tematu rozprawy doktorskiej uznaję za w pełni uzasadnione.**

**W rozdziale 2 - przyrostowe technologie wytwarzania** (s.10-s.25) Doktorant przedstawił rozwój technologii przyrostowych podkreślając kompleksowość wytwarzania, która pozwala dodawać materiał warstwa po warstwie w procesie ukształtowania gotowego produktu bezpośrednio z modelu CAD 3D. Podział technologii addytywnego wytwarzania z wyróżnioną grupą technologii proszkowych został przedstawiony na rys. 5.

W przypadku stosowania materiałów proszkowych do urządzeń działających w technologii selektywnego przetapiania / spiekania materiałów proszkowych metalicznych, polimerowych, czy ceramicznych z wykorzystaniem skoncentrowanej wiązki lasera bądź wiązki elektronów, na podstawie literatury Doktorant wyróżnił dwie podgrupy:

- ✓ fuzję w złożu proszkowym (*Powder-bed Fusion*), obejmująca procesy:
  - selektywne topienie Laserowe (*Selective Laser Melting*, SLM\L-PBF);
  - topienie wiązką elektronów (*Electron Beam Melting*, EBM\E-PBF);
  - selektywne spiekanie laserowe 3Dsystem (*Selective Laser Sintering 3DSystems*);
  - bezpośrednie spiekanie laserowe metali (*Direct Metal Laser Sintering* - EOS, DMLS);
- ✓ bezpośrednie oddziaływanie energii (*Direct energy deposition*)
  - kształtowanie laserowe (*Laser Engineered Net Shaping* – Trumpf (DMD)/ Optomec (LENS));
  - wytwarzanie addytywne z wykorzystaniem wiązki elektronów (*Wire Electron Beam Additive Manufacturing* – Sciaky, EBAM)

Każda z wymienionych technologii i stosowane urządzenia zostały dość szczegółowo scharakteryzowane z podaniem ich zalet i wad (przykład - tab.1).

**Uwaga 1:** w tab1 (s.25) Doktorant używa sformułowania „...większa prędkość wytwarzana...”, powinno tu raczej być „większa szybkość wytwarzania”, ponieważ pojęcie „prędkości” jest przypisane do wielkości wektorowej.

**Rozdział 3 - Tytan i jego stopy** (s.26-s.36) zawiera zwięzłą, ale i wyczerpującą charakterystykę właściwości tej grupy materiałów, obejmującej 3 główne podgrupy, tj.:

- stopy jednofazowe  $\alpha$  oraz stopy pseudo  $\alpha$  (stopy o strukturze złożonej z fazy  $\alpha$  oraz zawierające poniżej 5% pierwiastków stabilizujących fazę  $\beta$ );
- stopy dwufazowe  $\alpha+\beta$  - do tej grupy należy stop Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe;
- stopy jednofazowe  $\beta$  oraz pseudo stopy  $\beta$  (po normalizowaniu mają strukturę złożoną z metastabilnej fazy  $\beta_M$  - ich właściwości fizyczne odpowiadają stopom  $\alpha+\beta$  o przewodze fazy  $\beta$ ).

**Uwaga 2:** w tekście (s.35), w tab.5 powinno być „szybkość chłodzenia” zamiast „prędkość chłodzenia”, podobnie w tekście na s.51

**W rozdziale 4 - Technologia E-PBF i jej adaptacja techniczna do realizacji celów badań** (s.37-s.50) została przedstawiona koncepcja budowy stanowiska badawczego, będącego modyfikacją stanowiska przemysłowego, stosowanego do technologii elektronowego stapiania w złożu proszkowym (E-PBF). Mgr inż. K. Kobiela do zaproponowanego rozwiązania konstrukcyjnego stanowiska badawczego przyjął ograniczenia w odniesieniu do dwóch założeń technologicznych, decydujących o dużej czaso- kosztocłonności procesu, a mianowicie:

- skrócenie długich czasów przygotowawczo-zakończeniowych wynikających z konieczności uzyskania odpowiedniej próżni, grzania a następnie wychłodzenia platformy roboczej do temperatury zbliżonej do temperatury otoczenia;
- opracowania takiej konstrukcji urządzenia, która umożliwi ograniczenie wymaganej ilości proszków do przeprowadzenia badań.

- Kolejne kroki koncepcji rozwiązania trzech wariantów kompaktowego stanowiska badawczego zostały szczegółowo przedstawione w rozprawie, a syntetyczne ich ujęcie zostało zawarte w tab.6. Wybór wariantu rozwiązania został dokonany z zastosowaniem wielokryterialnej oceny ważności poszczególnych cech konstrukcji, tj.: *oszczędności proszku; wysiłku wytwórczego; przezbrajania/modułowości; szacowanego kosztu*. Dla każdej z tych cech zostały przyjęte współczynniki wagi i punktacja (tab.7). W wyniku tej oceny został wytypowany wariant 3 do realizacji. Porównanie najważniejszych cech opracowanego rozwiązania zmodyfikowanego stanowiska badawczego w odniesieniu do oryginalnego pierwowzoru zostało zestawione w tab.9.

**Przedstawioną metodykę analizy poszczególnych etapów rozwiązania konstrukcji stanowiska badawczego i procedurę wyboru wariantu przyjętego do realizacji uznaję za**

wzorcową, nie tylko z uwagi na realizowaną rozprawę doktorską, ale także pod względem dydaktycznym.

**Rozdział 5 - Charakterystyka i parametryzacja procesu wytwarzania - Cel i zakres pracy** (s.51-s.57) zawiera we wprowadzeniu podstawową charakterystykę właściwości stopu tytanu Ti-55511 w porównaniu do stopu Ti5553 zaprezentowanego przez firmę Boeing, stosowanego po wyżarzaniu w zakresie fazy  $\beta$ , powolnym chłodzeniu i starzeniu (BASCA -  $\beta$  annealing, slow cooling and aging). Analizując stan tego materiału po obróbce cieplnej Doktorant stwierdził, że jest możliwe uzyskanie dobrych właściwości badanego materiału Ti-55511 po zastosowaniu technologii E-PBF.

Dlatego też jako **cel badań** przyjął „... 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”.

Temu celowi został podporządkowany **plan badań technologicznych podzielony na etapy** i przedstawiony szczegółowo na rys.37. Określił też zagrożenia, które mogą wpłynąć na przebieg procesu wytwarzania i końcowy efekt wykonanych badań. Są to:

- ograniczenia fizyczne możliwości wytwórczych technologii E-PBF,
- charakterystyka procesu wytwarzania (wstępne grzanie platformy roboczej, „smoke” test, spiekanie proszku na platformie roboczej);
- maksymalne/minimalne temperatury pracy dla danego stopu;
- stopień odparowania poszczególnych składników stopowych w próżni;
- przewodność elektryczna materiału.

**W rozdziale 6 - Charakterystyka własności proszku** (s.58-s.74) Doktorant już na wstępie jednoznacznie podkreśla, że „...rodzaj oraz stan użytego proszku w technologiach przyrostowych „powder bed fusion” są kluczowymi czynnikami, mającymi duży wpływ na przebieg oraz końcowy efekt wykonanego obiektu. Dlatego też każdy nowy materiał zanim zostanie przetworzony powinien zostać sklasyfikowany pod względem samego bezpieczeństwa jak i przydatności do użytku w danej technologii”.

W celu określenia przydatności proszku Ti-55511 do technologii spiekania E-PBF Doktorant wykonał szereg badań i analiz charakterystyki proszku (rys.38), które dotyczyły wyznaczenia:

- minimalnej energii zapłonu (*Minimum Ignition Energy*);
- morfologii proszku;
- właściwości technologicznych – frakcji, sypkości, gęstości nasypowej;
- dynamicznej sypkości proszku;
- mikrostruktury proszku

Wynik tych badań zostały w pełni omówione i udokumentowane na zamieszczonych rysunkach (rys.39-rys.52) oraz w tabelach (tab.10-tab.15).

**Uwaga 3:** Doktorant zamiennie używa określeń *własności* lub *właściwości*. Uważam, że w tym przypadku odpowiednim wyrażeniem jest „właściwość”. Uniwersalny słownik języka polskiego, PWN, 2003 określa: „właściwość - to, co jest charakterystyczne dla danej osoby lub rzeczy; własność - to, co ktoś posiada, czego jest właścicielem, co do kogoś należy; rzecz własna, mienie, majątek”.

**W rozdziale 7 - Parametry procesu wytwarzania w technologii E-PBF** (s.75-s.114) została przedstawiona opracowana uniwersalna procedura metody doboru parametrów wytwarzania z wykorzystaniem technologii stapiania w złożu proszkowym (PBF - *Powder Bed Fusion*). Szczegóły dotyczące doboru parametrów wytwarzania zostały omówione na przykładzie przetwarzania elementów cienkościennych i objętościowych ze stopu Ti-55511 za pomocą technologii E-PBF.

Pierwszą procedurą testową podczas pracy z nowym materiałem w technologii E-PBF jest **test przebicia („Smoke test”)**, który jest ściśle powiązany z etapem wstępnego grzania. Celem tego testu jest znalezienia okna procesowego, które pozwoli na stabilne skanowanie warstwy wierzchniej proszku do stanu jego spieczenia, gwarantującej stabilność podczas procesu przetapiania skoncentrowaną wiązką elektronów tak, aby nie wywołać efektu zdmuchnięcia warstwy proszku.

Następnie wykonanie **testu „Smoke/sinter”** wymaga wytypowania pięciu parametrów procesu, tj.: natężenia wiązki; prędkości skanowania; średnicy plamki (*Focus offset*); kolejności skanowania linii (*line order*); odległości pomiędzy skanowanymi liniami, długości boku skanowanego obszaru. Przedstawiony na rys.56 schemat procedury testowej *smoke/sinter test* uwidacznia złożoność doboru parametrów ze względu na szereg współzależności pomiędzy parametrami sterującymi tym procesem. Analizy wykonanych testów potwierdzają, że dobór warunków procesu wymaga rozwiązania szeregu problemów dotyczących również jakości technologicznej spiekanych wyrobów.

Ważnym testem jakości wykonywanych spieków są **testy wytrzymałościowe**. Doktorant wykonał specjalne próbki ze zgrzanego proszku - łącznie 3 serie po 6 sztuk próbek z materiału stopu Ti-55511 oraz stopu referencyjnego Ti6Al4V. Przygotowane próbki zostały poddane próbie ściskania na maszynie wytrzymałościowej (rys. 58A i rys. 58B).

Badania te wykazały, iż maksymalne naprężenia ściskające są ponad dwukrotnie wyższe dla badanego materiału Ti-55511 w porównaniu z materiałem Ti6Al4V (1,23 MPa dla Ti6Al4V oraz 2,77 MPa dla Ti-55511). Przyczyną tej różnicy jest - wg Doktoranta, „... różnica właściwości fizycznych obu stopów w przewodności cieplnej oraz rozszerzalności liniowej, co wpływa na zjawiska termomechaniczne”.

Ważnymi wnioskami z tych przeprowadzonych badań są też m. in. stwierdzenia, że:

- „... okno procesowe dla spiekania proszku ma duży zakres energii powierzchniowej możliwej do wykorzystania podczas procesu spiekania”;
- „... regeneracja proszku poprzez wykorzystanie urządzenia PRS (*Powder Recovery System – system odzysku proszku*) pozwoli na odzyskanie materiału do dalszego wykorzystania”;
- „... większa siła spieczenia wpływa negatywnie na po procesową obróbkę mechaniczną wytwarzanych elementów poprzez redukcję głębokości penetracji strumienia proszku podczas oczyszczania modeli ze spieczonego proszku w procesie obróbki strumieniowo-ściernej.

**Uwaga 4:** czy należy mówić o większej sile spieczenia, czy raczej o większej gęstości spieku w wyniku zwiększonego nacisku dostarczanej dawki energii ?

Następna grupa badań dotyczyła **procesu przetapiania**. Celem było wyznaczenie energii wymaganej do przetopienia uprzednio spieczonego proszku podczas wstępnego grzania (*smoke/sinter test*). Wyznaczona energia pozwala na określenie parametrów technologicznych przetapiania konturów zewnętrznych wytwarzanych elementów. Ten czynnik znacząco wpływa na osiąganą jakość technologiczną wyrobu wytwarzanego za pomocą technologii E-PBF. Doktorant określił wpływ energii liniowej oraz skupienia wiązki elektronów na wielkość oraz sposób przetapiania cząstek proszku podczas pojedynczych przejść wiązki elektronów. W badaniach zastosował kompletny, trójpoziomowy plan statystyczny z modelem w postaci wielomianu drugiego stopnia. Parametry planu eksperymentu zostały podane w tab.18.

Do przeprowadzenia eksperymentu zostały wykonane cienkościenne, sześciennie bryły (bez wypełnienia wnętrza) o długości ścianki 10 mm. Ułożenie próbek na platformie roboczej było losowe (rys.64). Zestawy parametrów zmiennych w teście elementów cienkościennych podano w tab.19.

**Uwaga 5:** w podpisie tab.19 powinno być „...czynniki wejściowe” zamiast „wyjściowe”.

Kolejne badania i analizy dotyczyły **testów technologicznych rozdzielczości obiektów cienkościennych**. Do weryfikacji uzyskanych grubości ścianek Kandydat zastosował mikroskop cyfrowy Keyence VHX-600. Wykonał łącznie do 12 pomiarów (3 pomiary dla każdej ze ścian budowanego sześciennego elementu). Uzyskane wyniki pomiarów zostały syntetycznie przedstawione na rys.65-rys.67 oraz w tab.20.

Analiza wyników wskazuje między innymi, że natężenie prądu wiązki elektronów i prędkości skanowania wyraźnie wpływają na jakość technologiczną badanych próbek. Wyeliminowanie zjawiska niestabilności termiczno-kapilarnej pozwala na zredukowanie porowatości w obrębie skanowanych konturów budowanej części oraz w miejscu łączenia konturu z wypełnieniem.

Na jakość wytwarzanych wyrobów, oprócz konturu zewnętrznego, wpływa także wypełnienie (*hatch*) budowanych elementów. Ten aspekt został poddany badaniom w ramach **testów elementów objętościowych**. Parametry stosowane w procesie, a więc ilość dostarczonej energii, wpływają na gęstość obiektów oraz dokładność geometryczną wytwarzanego wyrobu.

Próby przetwarzania stopu tytanu Ti-55511 zostały przeprowadzone na bazie dwupoziomowego selekcyjnego planu statystycznego, w którym każdy z czynników wejściowych przybierał wartości na pięciu poziomach zmienności (tab.21). Po zastosowaniu losowej eliminacji dublujących się wyników, otrzymano 18 indywidualnych zestawów parametrów, które zostały wykorzystane do wyznaczenia okna procesowego.

Celem testów technologicznych elementów objętościowych było określenie **modelu automatycznej kalkulacji mocy**. Analizowany w tym przypadku model termiczny procesu E-PBF uwzględnia szereg zjawisk, które mają znaczący wpływ na przebieg procesu wytwarzania Doktorant wymienia je na str.95. Stwierdza, że „...*głównym założeniem modelu cieplnego w trakcie wytwarzania przestrzennych obiektów w technologii E-PBF jest utrzymanie stałej temperatury na wierzchniej warstwie tak, aby potencjalnie uzyskać izotropowe właściwości mechaniczne*”.

Dla etapu skanowania konturu oraz wypełniania, podczas aktywnej automatycznej kalkulacji mocy przy bilansie energetycznym, w przypadku prędkości skanowania wykorzystywany jest parametr „*speed function*” (rys.70 - schemat korekcji prędkości wiązki).

Przebieg eksperymentu **wytwarzania elementów objętościowych** został poddany szczegółowej analizie (schemat - rys.71). Na platformie roboczej wytworzono 18 prostopadłościennych próbek, ułożonych losowo, z różnymi zestawami parametrów w dwóch powtórzeniach. Proces budowy, łącznie z czasem uzyskania atmosfery ochronnej, nagrzewaniem płyty oraz stygnięciem, wyniósł 6 godzin.

W wyniku przeprowadzonej inspekcji mikroskopowej Doktorant stwierdził, że „... *próbki charakteryzują się zarówno różną jakością powierzchni górnej jak i kształtem. Sama obserwacja pozwala stwierdzić, które próbki mogą cechować się wysoką porowatością*”. Wyniki zostały udokumentowane na rys.72-rys.77 i w tab.22 wraz z dyskusją procesów termodynamicznych, mających wpływ na przebieg i efekty procesu przetapiania i formowania kolejnych warstw. Efektem tej analizy jest określenie zakresów zalecanych parametrów procesu spiekania.

W podsumowaniu tych badań mgr inż. K. Kobiela podkreślił, że: „*Ze względu na brak homogeniczności w ułożeniu poszczególnych cząstek proszku w skanowanej warstwie zamiana energii kinetycznej na cieplną w skali mikro jest zjawiskiem zmiennym dla każdej z przetwarzanych warstw. Cząstki proszku jako słaby przewodnik, szczególnie dla obiektów o małej objętości, wykazują wyraźną akumulację ciepła w centralnej części obszaru skanowania wiązką. Zjawisko to wyraźnie widoczne jest dla prób o największej testowanej gęstości energii objętościowej (40, 50 J/mm<sup>3</sup>), z najwyższymi wartościami natężenia wiązki 14,5 – 19 mA. W obu przypadkach dla skrajnych wartości natężenia prądu wiązki zaobserwowano wyraźną deformację kształtu w kierunku budowy. Okno procesowe energii objętościowej dla stopu Ti-55511 w zakresie*

od 25 do 50 J/mm<sup>3</sup> pozwalało otrzymać próbki o zadawalających parametrach porowatości i odwzorowania kształtu”.

Ważną kwestią jest ocena właściwości mechanicznych i fizycznych uzyskanych warstw. Doktorant wytworzył **elementy objętościowe** z parametrami energii objętościowej równej 26,7 J/cm<sup>3</sup> ( $V_w = 4500 \text{ J/mm}^3$ ,  $I_w = 10 \text{ mA}$ ), a następnie poddał **badaniom podstawowe właściwości mechaniczne i fizyczne modeli badawczych**. Dotyczyły one:

- mikrostruktury wytwarzanych elementów objętościowych;
- mikrotwardości wytwarzanych elementów objętościowych;
- wpływu parametrów procesu na parowanie aluminium (% mas.).

Wyniki tych badań zostały przedstawione na rys.78-rys.85 i podobnie, jak poprzednio, także poddane dyskusji z uwzględnieniem zjawisk, mających istotny wpływ na uzyskane właściwości modeli badawczych. W wyniku tej analizy określone zostały zakresy parametrów procesu wytwarzania modeli o korzystnych właściwościach fizyko-mechanicznych.

**Rozdział 8 - Wyznaczenie własności mechanicznych i porowatości materiału przed i po obróbce cieplnej** (s.115-s.138) zawiera wyniki badań i analiz z zastosowaniem tomografii komputerowej (CT), statycznych prób wytrzymałościową stopu w stanie surowym (bezpośrednio po wytwarzaniu) oraz po procesie prasowania izostatycznego na gorąco (HIP).

Parametry zastosowane w czasie rekonstrukcji próbek zostały ujęte w tab.25. Obszerna dokumentacja uzyskanych wyników została zawarta w tab. 26 - tab. - tab.29 oraz na rys.86 - rys.111. Obejmuje ona wyniki dotyczące: porowatości wytwarzanych serii próbek; rekonstrukcji CT serii próbek; statycznej wytrzymałości materiału po procesie elektronowego stapiania w złożu proszkowym (E-PBF); wartości granicy plastyczności, granicy wytrzymałościowej na rozciąganie oraz zastępczego modułu Young`a, analizy fraktograficznej przetomów po procesie prasowania izostatycznego na gorąco (HIP).

Za ważne poznawczo i istotne dla praktyki przemysłowej uznają porównanie właściwości mechanicznych wytworzonego stopu w zestawieniu z materiałem referencyjnym, którym jest stop Ti-55511, przetwarzany konwencjonalnie metodą odlewania próżniowego (VAR) w piecu łukowym po walcowaniu na gorąco.

**W rozdziale 9 - Demonstratory technologiczne i produktowe** (s.139-s.149) zostały przedstawione demonstratory technologii E-PBF z wykorzystaniem badanego stopu Ti-55511 na przykładzie rzeczywistych aplikacji, jako ich alternatywa, także po zastosowaniu optymalizacji topologicznej (przykłady - rys.112 - rys.120).

Na wybranych przykładach Doktorant podkreśla zalety opracowanej technologii, tj.:

- obniżenie kosztu wytwarzania, gdy możliwe do uzyskania charakterystyki mechaniczne oraz eksploatacyjne są zbliżone;
- swobodę w kształtowaniu geometrii gotowego wyrobu bez dodatkowych kosztów specjalistycznego oprzyrządowania;
- redukcję masy przy zachowaniu wymagań eksploatacyjnych, głównie dzięki możliwości zastosowania optymalizacji topologicznej;
- elastyczność technologii przyrostowych pozwalającą na redukcję liczby elementów składowych i eliminację konieczności stosowania dodatkowych operacji technologicznych - w tym często skomplikowanego montażu.

Podsumowując w skrótoowo opracowanej recenzji całość przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników przez mgr. inż. Karola Kobielię stwierdzam, że zostały one wykonane i opracowane na bardzo dobrym poziomie. Wyniki te poszerzają wiedzę w dyscyplinie inżynieria mechaniczna w obszarze inżynierii produkcji, w zakresie metodologii, metod identyfikacji i oceny jakości technologicznej wyrobów wykonywanych za pomocą przyrostowej technologii spiekania wiązką elektronów stopu Ti-55511 (Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe).

## **2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej**

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną oraz metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam jednoznacznie pozytywnie**. Mgr inż. Karol Kobiela przedstawił w rozprawie spójną merytorycznie analizę stanu wiedzy z zakresu rozwoju przyrostowych technik i technologii wytwarzania. Potwierdził, że dysponuje na wysokim poziomie usystematyzowanym zasobem wiedzy oraz umiejętności do realizacji prac badawczych i dalszego rozwoju naukowego.

## **3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej**

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do aktualnie dynamicznie rozwijanego obszaru badawczego, związanego z rozwojem techniki i technologii przyrostowego wytwarzania wyrobów. Rozprawa doktorska została opracowana bardzo starannie pod względem redakcyjnym, a nieliczne uwagi edycyjne nie obniżają jej wartości merytorycznej.

**Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna zawiera oryginalne wyniki poznawcze i znaczące walory użyteczne. W mojej ocenie rozprawa doktorska mgra inż. Karola Kobieli zasługuje na wyróżnienie.**

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Karola Kobieli nt.: „Opracowanie technologii addytywnej obróbki wiązką elektronów stopu Ti-55511 (Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe)” spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki ((ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.)) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

*Kraków, dnia 8 lipca 2022 r.*

  
Józef Gawlik