

Dr hab. inż. Grażyna Mrówka – Nowotnik prof. PRz
Katedra Nauki o Materiałach
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
Al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 18.09.2023r

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej **mgr inż. Wojciecha Stopyry**

pt.: **„Modelowanie, symulacja i weryfikacja procesu przyrostowego wytwarzania stopów aluminium serii 7xxx, pod kątem minimalizacji wad materiałowych”**

Podstawą opracowania recenzji jest pismo (nr W10/RDND07/48/2023)
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna
prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 18.07.2023r

1. Ocena celowości i aktualności tematyki badawczej

W ciągu ostatnich lat, dzięki intensywnemu rozwojowi badań, przyspieszonej innowacji, cyfryzacji, automatyzacji oraz rosnącym wymaganiom materiałowym i środowiskowym wprowadzanych jest szereg nowatorskich technologii, które zdefiniowały nowe ramy dla produkcji i inżynierii. Do najbardziej innowacyjnych technik, niewątpliwie należy zaliczyć technologie wytwarzania przyrostowego (ang. *Additive Manufacturing*), wśród których bardzo istotną rolę odgrywa technologia spiekania/stapiania warstw proszkowych przy użyciu lasera jako źródła energii (ang. *Laser Powder Bed Fusion - LPBF*). Technologia ta posiada olbrzymie znaczenie w kluczowych dla rozwoju, najbardziej zaawansowanych i innowacyjnych obszarach nowoczesnej gospodarki, umożliwiając tworzenie wysokowytrzymałych, o skomplikowanej geometrii komponentów, które są trudne, niemożliwe, lub nieopłacalne do wykonania tradycyjnymi metodami. Zastosowanie techniki LPBF ma realne korzyści w takich sektorach jak: przemysł kosmiczny, lotniczy, motoryzacyjny, medyczny czy narzędziowy. Wzrost zastosowania technologii LPBF w różnych dziedzinach przemysłu, od lotnictwa po medycynę, odzwierciedla jej potencjał i wszechstronność. Nie można też pominąć aspektu ekologicznego technologii LPBF. Oferuje ona znaczne korzyści środowiskowe poprzez minimalizację odpadów oraz efektywniejsze wykorzystanie surowców, co jest niezwykle cenne w obliczu rosnących wymagań zrównoważonego przemysłu. Zainteresowanie wytwarzaniem przyrostowym i technologiami z nim związanymi rośnie w szybkim tempie. Metoda LPBF, jako fundamentalna w tej dziedzinie, pozostaje bardzo aktualna, zwłaszcza w kontekście rosnącego zapotrzebowania na złożone i indywidualizowane produkty.

Jednakże, jak każda innowacyjna technologia, metoda LPBF napotyka na liczne wyzwania, które wymagają dalszych badań i optymalizacji. Na jakość finalnych elementów wytwarzanych w procesie LPBF wpływa bardzo wiele parametrów stałych i zmiennych, które należy odpowiednio dobrać już na etapie projektowania i następnie kontrolować w trakcie procesu wytwarzania i następującej po nim obróbce po procesowej. Nieodpowiednio dobrane parametry prowadzenia procesu przyrostowego skutkują wystąpieniem wielu defektów w wytwarzanych elementach. Problemy dotyczą także doboru odpowiedniego materiału dlatego naukowcy stale pracują nad rozszerzeniem gamy materiałów dostępnych dla technologii LPBF, co otwiera nowe możliwości dla przemysłu. Pomimo licznych badań w zakresie technologii LPBF prowadzonych zarówno w krajowych, jak i zagranicznych ośrodkach, metoda ta wciąż wymaga dalszych prac. Dlatego tematykę przedstawioną przez Doktoranta w recenzowanej pracy doktorskiej należy uznać za bardzo aktualną i nowatorską.

2. Charakterystyka rozprawy

Opiniowana praca doktorska pt.: „Modelowanie, symulacja i weryfikacja procesu przyrostowego wytwarzania stopów aluminium serii 7xxx, pod kątem minimalizacji wad materiałowych” podzielona została na część literaturową (rozdział str. 7-25) oraz obszerną część doświadczalną (26-104), po której zamieszczono spis literatury. Praca obejmuje 121 stron i składa się z siedmiu rozdziałów. Bibliografia zawiera 157 pozycji literaturowych, spośród których większość przywoływanych prac powstała w okresie ostatnich kilku lat, co potwierdza aktualność podjętego przez Doktoranta tematu.

Na początku dysertacji, po spisie treści oraz wykazie akronimów, Doktorant zamieścił streszczenie pracy w języku polskim i angielskim. W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Wstęp” wprowadził w zagadnienia związane z technologiami przyrostowymi (ang. *Additive Manufacturing*) stosowanymi w technice, skupiając się przede wszystkim na stosowanej w swojej pracy metodzie spiekania/stapiania warstw proszkowych przy użyciu lasera jako źródła energii (LPBF). Wskazał obszary zastosowania tej technologii w kluczowych dziedzinach przemysłu, jak np.: przemysł kosmiczny, lotniczy, samochodowy czy narzędziowy, w których coraz częściej pojawia się potrzeba wytworzenia małoseryjnych partii elementów konstrukcyjnych o złożonych kształtach, niejednokrotnie niemożliwych lub nieopłacalnych do wytworzenia tradycyjnymi metodami. Przedstawił także grupy materiałów o względnie dobrej przetwarzalności, najczęściej wykorzystywane w technologii LPBF (proszki stopów na bazie tytanu, niklu, stali oraz aluminium) wskazując jednocześnie na trudności technologiczne pojawiające się przy wprowadzaniu nowych, trudno przetwarzalnych w tej technologii materiałów, jak np. wysokowytrzymałe stopy aluminium do przeróbki plastycznej – w tym grupy 7xxx, umacniane wydzieleniowo.

Następnie (podrozdział 1.1) szczegółowo scharakteryzował laserowe technologie przyrostowe LPBF, opisując poszczególne etapy wytwarzania elementów w tej technologii - poczynając od przygotowania modeli cyfrowych, poprzez właściwy proces wytwarzania i na obróbce poprocesowej kończąc. W tej części pracy sporo uwagi poświęcił na scharakteryzowanie parametrów wytwórczych (stałych i zmiennych), które są krytyczne i decydują o kosztach, czasie i przede wszystkim jakości finalnych wyrobów wytwarzanych w technologii LPBF. Przeprowadził także analizę literatury pod kątem wpływu źle dobranych paramentów na powstawanie wad i niezgodności w wyrobach finalnych oraz możliwości zminimalizowania ich występowania lub zniwelowania poprzez dobór odpowiednich parametrów prowadzenia procesu. Następnie scharakteryzował (1.3. *Charakterystyka procesu przetwarzania stopów*

aluminium umacnianych wydzieleniowo w technologii LPBF) stopy aluminium grupy 7xxx stanowiące materiał badań w niniejszej pracy, wskazując na trudności pojawiające się podczas ich wytwarzania w technologii LPBF. Do głównych problemów zaliczył powstawanie pęknięć na gorąco – krystalizacyjnych oraz likwacyjnych, które mogą być efektem nieodpowiednio prowadzonego procesu krystalizacji, powstających naprężeń, zmian składu chemicznego wskutek odparowania pierwiastków o niskiej temperaturze wrzenia, porowatość. W celu zaplanowania swoich badań i uzyskania jak najlepszych wyrobów pozbawionych wad w postaci pęknięć na gorąco, porowatości, przetopień i innych, przeanalizował dostępną literaturę (podrozdział 1.4) pod kątem znalezienia metod, które pozwalają zmniejszyć lub zapobiegają powstawaniu wad i niezgodności w wyrobach wytworzonych metodą LPBF z umacnianych wydzieleniowo stopów aluminium grupy 7xxx. Studium literaturowe zostało przeprowadzone bardzo kompleksowo, z krytycznym podejściem do omawianych problemów. Doktorant w tej części pracy wykazał duże zainteresowanie przemysłu, zwłaszcza lotniczego, kosmicznego i motoryzacyjnego, stopami grupy 7xxx umacnianymi wydzieleniowo w kontekście technologii LPBF. Podsumowując tę część pracy, aby zrozumieć wyzwania i ograniczenia związane z wytwarzaniem tych stopów przy użyciu technologii LPBF w rozdziale 2 (2. *Uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy*) wyselekcjonował główne czynniki wpływające na jakość i właściwości elementów wytwarzanych w przyrostowych technologiach typu LPBF. Uzasadnił podjęcie wyboru tematyki rozprawy doktorskiej, równocześnie wskazując obszary wymagające przebadania i uzupełnienia. Na podstawie własnego doświadczenia oraz szczegółowej analizy literatury sformułował cel pracy:

Opracowanie technologii przyrostowego wytwarzania stopów aluminium serii 7xxx, z wykorzystaniem metod modelowania eksperymentu, symulacji termodynamicznych i zastosowania wysokotemperaturowego podgrzewania platformy roboczej w celu eliminacji pęknięć na gorąco.

Celem naukowym opiniowanej pracy doktorskiej był opis zjawisk mających wpływ na właściwości mechaniczne i użytkowe oraz jakość elementów wytworzonych w technologii LPBF ze stopów aluminium serii 7xxx umacnianych wydzieleniowo. Uzyskane wyniki badań podstawowych, tj. analiz i symulacji procesów, jak również prac rozwojowych z obszaru prób w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków produkcyjnych, stanowiły podstawę opracowania nowej, zoptymalizowanej technologii wytwarzania wysokiej jakości wyrobów ze stopów aluminium serii 7xxx, charakteryzujących się trwałością niemożliwą do uzyskania przy zastosowaniu dotychczas stosowanych metod, w odniesieniu do aplikacji w sektorze lotniczym, kosmicznym i motoryzacyjnym.

W części pracy, w której Doktorant przedstawił wyniki realizowanych badań, opisano uzyskane efekty prowadzonych prób zmierzających do osiągnięcia zakładanego celu badawczego, obejmujące:

- analizy składu chemicznego materiału wsadowego w postaci proszków ze stopów aluminium serii 7xxx, co miało fundamentalne znaczenie w ocenie wpływu poszczególnych pierwiastków stopowych na podatność materiału proszkowego na wytwarzanie elementów w procesie LPBF.
- wyniki symulacji termodynamicznych procesu wytwarzania elementów metalicznych z zastosowaniem metody przyrostowej, w kontekście możliwości prognozowania właściwości cieplnych materiału proszkowego, determinujących podatność proszku metalicznego do topienia i krystalizacji w procesie LPBF, predykcji gradientu temperatury wpływającego na powstawanie pęknięć w mikrostrukturze krzepnącego elementu.

- wyniki modelowania parametrów procesu wytwarzania gotowych elementów w procesie przyrostowym, z zastosowaniem metody DoE (*Design of Experiment*) do planowania i analizy eksperymentalnej części pracy.
- próby podgrzewania platformy roboczej w technologii LPBF w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury, w kontekście jakości wytworzonych elementów przy uwzględnieniu różnej wartości temperatury platformy.
- weryfikację jakości elementów (identyfikacji wad i przyczyn ich powstawania) wytworzonych w procesie LPBF z uwzględnieniem badań mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych. Co ważne w przypadku recenzowanej pracy, wyniki prowadzonych prac stanowiły podstawę opracowania rekomendacji dla przemysłu uwzględniających dobór optymalnych warunków prowadzenia procesu wytwarzania produktów ze stopów aluminium serii 7xxx przy zastosowaniu metody przyrostowej LPBF. Bardzo cenne są również wyniki badań zamieszczone w podrozdziale 4.1 („Charakterystyka proszkowego materiału wsadowego”), które dostarczają ważnych informacji na temat właściwości i jakości proszku używanego w technologii LPBF, stanowiącego materiał wsadowy w realizowanych w ramach pracy doktorskiej, badaniach. Prawidłowe zrozumienie właściwości materiału proszkowego jest kluczowe dla optymalizacji procesu AM i uzyskania wysokiej jakości gotowych produktów. Wynika to przede wszystkim ze składu chemicznego, zdolności pochłaniania energii, morfologii proszku, rozkładu frakcji, sypkości i absorpcyjności promieniowania świetlnego. Badania wykazały, że kilka kluczowych czynników wpływa na absorpcyjność wiązki lasera, tj. gęstość upakowania proszku, poziom utlenienia powierzchni cząstek proszku, kąt padania wiązki oraz rozmiar cząstek proszku. Doktorant zrealizował w tym zakresie szereg badań potwierdzających konieczność stosowania optymalnych parametrów wiązki lasera w technologii LPBF dla różnych materiałów proszkowych, co wymusza potrzebę ciągłego monitorowania i regulacji procesu, aby zapewnić optymalną jakość i jednorodność przetapianego materiału.

Autor w swojej pracy przedstawia również wyniki obliczeń termodynamicznych, dla stopu aluminium AA7075 o składzie chemicznym charakterystycznym dla badanego proszku, przeprowadzonych z użyciem oprogramowania Thermo-Calc (4.2. *Symulacje termodynamiczne procesu L-PBF*). Wyniki te obejmują analizę i obliczenia udziału faz w stopie w funkcji temperatury przy równowagowej oraz nierównowagowej krystalizacji stopu z temperatury stanu ciekłego do temperatury pokojowej oraz podatności na pękanie w układach dwuskładnikowych (Al-X). Ważne, w tym przypadku, są wyniki obliczeń dla nierównowagowego krzepnięcia umożliwiające opisanie zmian zachodzących w mikrostrukturze stopu w czasie krystalizacji w warunkach zbliżonych do istniejących podczas prowadzonego procesu LPBF. Dodatkowo na podstawie prowadzonych obliczeń dokonano charakterystyki składników fazowych, które mogą powstać w czasie realizowanych prób z użyciem metody LPBF. Analiza podatności na pękanie to ważny element prowadzonych symulacji w warunkach nierównowagowej krystalizacji stopu aluminium. Wyniki analiz z użyciem oprogramowania Thermo-Calc posłużyły do wyznaczenia temperatury platformy roboczej determinującej m.in. podatność do tworzenia pęknięć w krystalizującym elemencie ze stopu aluminium.

Stwierdzono, że pewne elementy w opisie metodologii i prezentacji danych dotyczących obliczeń z użyciem programu Thermo-Calc wymagają dodatkowej uwagi. Doktorant realizował obliczenia, które zapewne dotyczą warunków początkowych i parametrów dla materiału litego. W tym przypadku należy przypomnieć, że porównanie materiału litego z materiałem

proszkowym, w kontekście analizy przy użyciu Thermo-Calc, wymaga uwzględnienia różnic, które mogą wpłynąć na wyniki analiz, w tym:

- stanu początkowego, tj. materiały proszkowe są często niezwiązane i charakteryzują się odmienną budową krystaliczną w porównaniu do materiałów litych. To może wpłynąć na wyjściową mikrostrukturę i skład fazowy przed eksperymentem lub prowadzonymi obliczeniami.
- szybkość przemian wynikających z faktu, że materiały proszkowe mają większą powierzchnię czynną niż materiały lite, co może prowadzić do szybszych reakcji podczas krystalizacji, przemian fazowych w czasie np. obróbki cieplnej.
- jednorodność - materiał lity zazwyczaj wykazuje zróżnicowany skład fazowy w różnych obszarach, podczas gdy materiał proszkowy może być jednorodny (w zależności od sposobu wytwarzania).

Wyniki obliczeń w tym przypadku mogą być nieprzydatne do realizacji działań z obszaru wytwarzania metodami przyrostowymi elementów ze stopu aluminium, z uwagi na brak korelacji wyników analiz z właściwościami fizycznymi i mikrostrukturalnymi elementów wytworzonych w procesie LPBF. Dodatkowo, w literaturze nie brakuje danych materiałowych dotyczących stopu AA7075, stosowanego w próbach, warto więc byłoby w tym przypadku np. odnieść wyniki obliczeń własnych do danych literaturowych.

Jak wynika z analizy dalszej części pracy, wyboru parametrów technologicznych dla procesu LPBF z użyciem proszku stopu AA7075 Doktorant dokonał właśnie na podstawie wyników publikowanych w literaturze fachowej. Dotyczyło to kluczowych warunków, a więc prędkości skanowania oraz długości wektorów, które wpływają na proces tworzenia elementów litych. Na podstawie zrealizowanych prób, Doktorant dokonał również identyfikacji wad, które następnie sklasyfikował w odniesieniu do opisanych w literaturze. Wady w postaci porów podzielono na pięć klas, w zależności od kształtu oraz objętości względnej w analizowanym obszarze.

W dalszej części pracy doktorskiej („4.3. *Opracowanie parametrów technologicznych procesu LPBF*”) Autor przedstawił wyniki prób realizowanych przy zastosowaniu skrajnych prędkości skanowania, jak również ocenił wpływ szerokości ścieżki skanowania na jakość elementów wytwarzanych w procesie LPBF. Wyniki tych analiz stanowiły podstawę realizacji procesów umożliwiających ocenę wpływu parametrów zmiennych (wybranych w ramach wcześniej prowadzonych badań) na zjawiska towarzyszące procesowi LPBF, determinujące jakość wyrobów. Na podstawie przeprowadzonych badań Autor ustalił wpływ szerokości ścieżki topienia na jakość powierzchni oraz wymiary wad w postaci pęknięć. Stwierdził również, że moc lasera czy prędkość skanowania to krytyczne parametry procesowe wpływające na rodzaj i częstotliwość występowania wad. Doktorant podkreśla również znaczenie ilości dostarczonej energii w procesie LPBF. Ewentualne jej niedobory mogą prowadzić do pojawienia się wad o dużych rozmiarach, które w pracy określa jako "pory rozbudowane". Badania potwierdziły, że zarówno temperatura podgrzewania platformy, jak i wymiar ścieżki skanowania to kluczowe czynniki wpływające na podatność materiału na pękanie w wysokiej temperaturze.

Wytypowane na podstawie analizy tych wyników parametry procesu miały na celu wytworzenie elementów z małym udziałem porowatości, pozbawionych pęknięć. Doktorant dokonując analizy składu chemicznego próbek wytworzonych przy zastosowaniu metody LPBF, stwierdził znaczący spadek zawartości Zn, Mg oraz Cu w stosunku do zawartości tych

pierwiastków w materiale proszkowym, co istotnie wpływa na właściwości mechaniczne i możliwości zastosowania w praktyce zarówno proszku, jak i elementów wytwarzanych z użyciem stopu Al. Doktorant stwierdził, że zarazem różnice w składzie chemicznym, jak również tendencja do pęknięcia zależą od wymiarów elementów wytwarzanych w procesie LPBF z zastosowaniem takich samych parametrów. Co ważne, wszystkie elementy wykazywały skład chemiczny elementów wytworzonych ze stopu AA7075 niezgodny z normą, co jest krytyczne dla planowanego praktycznego zastosowania badanego materiału proszkowego w aplikacjach przemysłowych. Uwaga dla Doktoranta dotyczy konieczności oceny zjawisk mających wpływ na zmianę składu chemicznego elementów o różnych średnicach oraz potencjalne metody minimalizacji odparowania pierwiastków niskotopliwych.

Wytworzone w ten sposób elementy poddano badaniom metalograficznym i analizie składu fazowego. Doktorant opiera swoje wnioski, dotyczące składu fazowego i przyczyn powstawania wad, na wynikach analiz SEM-EDS oraz wynikach badań dyfraktometrycznych XRD. Brakuje w tym przypadku np. badań TEM, które jednoznacznie potwierdziłyby skład fazowy mikrostruktury wytwarzanych elementów przy zastosowaniu różnych warunków LPBF, zwłaszcza w odniesieniu do faz umacniających. Dodatkowo wynik przedstawiony na dyfraktogramie (rys. 53) jest nieczytelny w odniesieniu do zidentyfikowanych składników fazowych. Doktorant umieszcza graficzne znaczki w górnej części dyfraktogramu, nie oznaczając np. strzałkami maksimum dyfrakcyjnych wskazujących obecność danej fazy w badanym stopie. Ponadto mapy EDS przedstawiające rozkład pierwiastków stopowych w analizowanym obszarze nie są najlepszej jakości i nie wnoszą istotnych informacji do analizy składników fazowych mikrostruktury.

Następnie Doktorant przedstawia wyniki badań zrealizowanych z użyciem tomografii rentgenowskiej, na podstawie których dokonał oceny wpływu parametrów procesu LPBF na jakość wytworzonych wyrobów i skorelował ocenę porowatości z geometrią wyrobów. Przeprowadził również badania właściwości mechanicznych w statycznej próbie rozciągania oraz pomiarach twardości. Zaobserwował znaczące różnice w wytrzymałości na rozciąganie w zależności od średnicy próbek. Wyniki tych badań połączone z obserwacjami przełomów próbek po rozciąganiu oraz przy uwzględnieniu wyników przeprowadzonych symulacji, wykonanych badań wstępnych i oceny mikrostruktury stanowiły podstawę optymalizacji procesów wytwarzania elementów z użyciem procesu LPBF.

Stąd, w ramach pracy doktorskiej przeprowadzono próby mające na celu demonstrację technologii opracowanej na podstawie wybranych parametrów. Kluczowym osiągnięciem Doktoranta była produkcja demonstratora technologii w postaci zoptymalizowanego geometrycznie wspornika podłogi samolotu M28B Bryza. Wytworzony w procesie LPBF wspornik został poddany obróbce strumieniowo-ścierniej w celu usunięcia nieciągłości (nadtopienia, pęknięcia otwarte pory) oraz cząstek proszku, który nie uległ stopieniu. Na podstawie badań geometrii demonstratora z uwzględnieniem pomiaru grubości ścianki stwierdzono ubytek materiału po przeprowadzonej obróbce mechanicznej mającej na celu obniżenie chropowatości powierzchni, z 1837,7 μm do 1610,8 μm (grubość ścianki gotowego wyrobu, zgodnie z rysunkiem, powinien wynosić 1500 μm). Badania obszarów wewnętrznych demonstratora wykazały obecność porowatości gazowej, nieprzetopionego materiału proszkowego oraz pęknięć wewnętrznych.

Na podstawie przedstawionego opisu osiągnięć Doktoranta można dokonać pewnej analizy krytycznej i wyciągnąć następujące wnioski:

- 1) Doktorant osiągnął sukces w postaci opracowania parametrów technologicznych wytwarzania elementów z zastosowaniem procesu LPBF. Dokonał jej demonstracji w postaci wspornika podłogi samolotu. Choć wyniki opisanych badań, a przede wszystkim badania demonstratora, wskazują na postęp w zastosowaniu technologii LPBF w warunkach przemysłowych, gdzie dąży się do walidacji procesu w warunkach wytwarzania skomplikowanych geometrycznie komponentów, to wciąż wymagane jest prowadzenie dalszych prac optymalizacyjnych w zakresie materiału proszkowego, parametrów spiekania i obróbki wykańczającej.
- 2) Nasuwa się uwaga krytyczna dla konieczności stosowania obróbki wykańczającej, która nie ogranicza się jedynie do obróbki strumieniowo-ściernej, w tym przypadku do piaskowania, ale z uwagi na znaczące różnice w wymiarach gotowych wyrobów wymagana byłaby obróbka mechaniczna, zapewniająca uzyskanie zakładanych tolerancji wymiarowych, co ogranicza korzyści wynikające z zastosowania metody przyrostowej w produkcji wyrobów metalicznych. Co istotne, to z uwagi na liczne wady, w tym brak możliwości całkowitego przetopienia materiału proszkowego w obszarach wewnętrznych wyrobu, dyskwalifikuje to proces LPBF pod względem możliwości zastosowania nie tylko w przemyśle lotniczym, ale i w każdej gałęzi produkcyjnej, w kontekście komponentów, które muszą spełniać surowe normy bezpieczeństwa. Należy zwrócić uwagę na doskonalenie procesu, w celu zminimalizowania występowania wad materiałowych.

Pomimo potencjalnych obszarów poprawy w zakresie wytwarzania wyrobów z zastosowaniem procesu spiekania laserowego na łożu, wyniki przedstawione w pracy doktorskiej stanowią wartościowy wgląd w możliwości i ograniczenia technologii LPBF może w tym przypadku stanowić krok milowy w jej dalszym doskonaleniu.

Podsumowując, praca doktorska Pana mgr inż. Wojciecha Stopyry prezentuje znaczące osiągnięcie w zakresie wytwarzania komponentów lotniczych za pomocą technologii LPBF. Jednakże wciąż istnieją wyzwania, które wymagają uwagi, zwłaszcza w odniesieniu do jakości gotowych wyrobów determinujące bezpieczne ich użytkowanie, zwłaszcza w przypadku zastosowań lotniczych. W dłuższej perspektywie, dokładna analiza i doskonalenie procesu mogą prowadzić do bardziej niezawodnych i efektywnych kosztowo metod produkcji w przemyśle lotniczym i innych sektorach. Osiągnięciem technologicznym Doktoranta jest niewątpliwie demonstrator nowatorskiej technologii wytwarzania elementów lotniczych, uwzględniający analizę jakości oraz identyfikację potencjalnych defektów, wynikających z procesu produkcyjnego, co może mieć kluczowe znaczenie dla przyszłych zastosowań technologii LPBF w przemyśle lotniczym oraz innych sektorach wymagających wysokiej precyzji i niezawodności komponentów.

3. Formalna strona pracy i uwagi o charakterze edytorskim

W pierwszym zetknięciu z pracą, patrząc na spis treści, można by odnieść wrażenie, że układ recenzowanej pracy jest klasyczny z podziałem na część literaturową i badawczą opisującą materiały i metodykę badań, wyniki i ich dyskusję oraz wnioski. Jednakże po głębszej lekturze dysertacji nasuwa się wniosek, że układ pracy odbiega od typowego. Dotyczy to przede wszystkim podrozdziału „3.1. *Metodyka badań*” oraz rozdziału „4. *Metoda i zakres badań technologicznych*”. W podrozdziale 3.1 Autor opisuje poszczególne etapy planu badawczego, nie

ma tam jednak dokładnych danych dotyczących warunków i parametrów według, których badania będą prowadzone. Doktorant w tym rozdziale wymienia tylko nazwy i rodzaj urządzeń, na których przeprowadza eksperymenty bez opisu warunków i norm według których badania te są wykonywane. Oczywiście te wszystkie informacje znajdują się w poszczególnych podrozdziałach w rozdziale 4, w którym Autor zamieszcza wyniki swoich badań. Uważam, że wprowadza to niepotrzebny chaos i utrudnia zorientowanie się w przekazie zamieszczonych przez Autora treści. Ponadto w tej części pracy, w której przedstawia wyniki badań własnych, bardzo często przy ich opisie zamieszcza dane, przy których powołuje się na literaturę. Dlatego trudno jest się zorientować, czy te wyniki i analiza dotyczą rezultatów otrzymanych przez Doktoranta, czy autora/ów z pozycji literaturowych, na które się powołuje. Obszerne fragmenty treści, które znajdują się w rozdziale 4 powinny znaleźć się w rozdziale 1 lub 3, np.: podrozdział 4.2. „Symulacje termodynamiczne procesu L-PBF” tekst zawarty na str. 44-48 nie ma nic wspólnego z wynikami badań, a stanowi studium literatury. Podobnie jest w innych podrozdziałach i ich podsumowaniach.

Można mieć również pewne uwagi do strony edytorskiej pracy:

1. Doktorant praktycznie w całej pracy zamiast „przedstawiono na rysunku”, używa sformułowania „przedstawiono na Rysunek ..” przykład : „...ogólny podział przedstawiono na Rysunek 2.”; str. 15 „Na Rysunek 5 przedstawiono podstawowy podział stopów aluminium ...”; str. 19 „Na Rysunek 7 pokazano lokalizację tych dwóch rodzajów...”
2. Podobnie, powołując się na informacje zawarte w tabelach pisze np.: „zestawiono w Tabela”.
3. Doktorant stosuje skróty myślowe, które utrudniają czytelnikowi zrozumienie przekazywanych w pracy treści. Oczywiście jest, że Autor wie co ma na myśli, czytelnik niekoniecznie!!! Wiele zdań jest sformułowanych nieskładnie, niegramatycznie. Ponadto w pracy pojawiają się bardzo długie, kilkuwersowe zdania, bez znaków interpunkcyjnych – głównie przecinków, co nie sprzyja lekturze dysertacji i utrudnia poprawny odbiór tekstu. Poniżej kilka wybranych przykładów:
 - „Aby uzyskać pozytywne wyniki badań w celu udowodnienia tezy można osiągnąć przez:”
 - „Najczęściej pojawiające się defekty zaobserwowane w trakcie badań przesiewowych oraz charakteryzujących przedstawiono na Rysunek 30-34.”
 - „Wysokotemperaturowe podgrzewanie platformy roboczej wraz z odpowiednio dobranymi parametrami technologii pozwolą na redukcję naprężeń termicznych, wzrost szybkości dyfuzji pierwiastków stopowych a tym samym zmniejszenie nasilenia ich mikrosegregacji co spowoduje podwyższenie temperatury solidus oraz zmniejszenie udziału nierównowagowych faz na granicach ziaren jeszcze przed ich nadtopieniem, obniżając skłonność materiału do pęknięcia (Rysunek 11).”
 - „Rysunek 11. Ideowy schemat procesu LPBF pozwalający wytwarzać bez pęknięć obiekty ze stopu aluminium AA7075”
4. str. 24 „Efektywnym w aspekcie braku pęknięć okazało się zastosowanie podgrzewania platformy do 500°C i zestawu parametrów procesu: moc lasera 400W, prędkość szybkość 1400 mm/s, grubość warstwy 100 μm, odległość pomiędzy liniami 140 μm”
 - prędkość, szybkość czego??? Czy chodzi o prędkość skanowania lasera???
 - który termin jest właściwy: prędkość czy szybkość??? Wyrazy „prędkość” i „szybkość” w języku potocznym są praktycznie synonimami, lecz w terminologii fizycznej i technicznej uległy w ciągu wielu lat zróżnicowaniu. „Prędkość” oznacza wielkość wektorową (lub skalarną) związaną z ruchem, a „szybkość” jest terminem oznaczającym zwykle tempo przebiegu pewnego procesu (np. szybkość parowania, szybkość reakcji chemicznej).
5. Doktorant stara się posługiwać specjalistyczną terminologią, jednak nie unika również żargonu, np.: „granica wytrzymałości”, zamiast wytrzymałość na rozciąganie R_m ; „wytworzony

obiekt”, „proszek świeży”, „Badania mechaniczne”, „metastabilni prekursorzy”, „nieforemny”, zamiast nieregularny, zamiennie używa terminu własności - właściwości i inne.

Pragnę podkreślić, że powyższe uwagi i błędy natury edytorskiej nie umniejszają wartości naukowej pracy, zwłaszcza, że cel został przez Doktoranta osiągnięty, a teza udowodniona. Chcę tylko zwrócić uwagę Doktoranta na wykazanie większej staranności przy redagowaniu kolejnych opracowań naukowych

4. Uwagi o charakterze merytorycznym oraz pytania do Autora

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Wojciecha Stopyry stanowi niewątpliwie oryginalne, o bardzo dużym potencjale aplikacyjnym, opracowanie, które uzupełnia istniejący stan wiedzy w zakresie podejmowanej tematyki. Zaprezentowane przez Doktoranta wyniki badań oraz wnioski zostały sformułowane na podstawie licznych eksperymentów, jednak przy lekturze pracy pojawia się kilka kwestii, które nie są oczywiste i wymagają szerszego przedyskutowania. Uprzejmie proszę Autora o wyjaśnienie moich wątpliwości i odpowiedź na poniższe uwagi.

1. Str. 17 Al₁₅Si₂M₄ jaka to jest za faza???
2. Co oznacza termin funkcjonalizator???? Czy jest poprawny i zgodny z przyjętą w tej dziedzinie nauki terminologią
3. Na rysunku 12 przedstawiono „Wpływ parametrów technologii LPBF na podatność na pękanie w zależności od składu chemicznego”. Na osi liczbowej przedstawiono jak masowa zawartość pierwiastka (nie wiadomo jakiego) wpływa na zmianę krzywej występowania pęknięć w przypadku wąskiego i szerokiego zakresu składu chemicznego. Moje pytanie brzmi: czy dla każdego pierwiastka stopowego będzie taka sama zależność???
4. W podpisie rysunku 18 oraz w tekście gdzie jest do niego opis, nie ma żadnych informacji dla którego proszku wykonane są obserwacje i analiza SEM/EDS. Podejrzewam, że wyniki dotyczą proszku po procesach, ale nie dopatrzyłam się tych informacji.
5. W tabeli 4 prędkość podawania proszku 85% - co to oznacza????
6. Jaki był kształt i wymiary próbek stosowanych w próbie statycznej rozciągania???
7. Na str. 48 Autor napisał „Bazując na pomiarach składu chemicznego proszku aluminium AA7075 przeprowadzono: obliczenia równowagowego udziału faz w stopie w funkcji temperatury (Rysunek 26a), symulację nierównowagowej krzywej krzepnięcia (Rysunek 26b)... ..Wnioski wynikające z porównania sekwencji przemian fazowych zachodzących w stopie podczas chłodzenia z temperatury stanu ciekłego do otoczenia zestawiono w Tabela 5.” Na rysunku 26 przedstawia Pan symulację przebiegu procesu krystalizacji stopu (o składzie chemicznym charakterystycznym dla proszku) ze stanu ciekłego do temperatury 450°C z uwzględnieniem udziału objętościowego składników fazowych mikrostruktury w zależności od temperatury oraz wyznaczeniem sekwencji i temperatury przemian fazowych zachodzących podczas krystalizacji w stopie o takim składzie. Skąd zatem pochodzą dane zawarte w tabeli 5 („Tabela 5. Wykaz faz międzymetalicznych możliwych do wystąpienia w stopie aluminium AA7075 po obróbce T6”) dotyczące faz międzymetalicznych możliwych do wystąpienia w stanie T6???
8. „Rysunek 45. Przekrój projekcji skanów CT z uwidocznionymi defektami. Zestaw parametrów nr 2, 6, 10 Tabela 15” Dlaczego w próbce, dla której platforma robocza była podgrzewana do temperatury 370°C występuje największa porowatość???
9. „Tabela 19. Tabela identyfikacji faz na podstawie ich rozmieszczenia, budowy oraz składu chemicznego” co oznacza określenie tabela identyfikacji???

żadnej zidentyfikowanej fazie, są zawarte natomiast informacje o kształcie i umiejscowieniu fazy oraz skład chemiczny analizowanych wydzieleni wyznaczony metodą punktową SEM,EDS.

10. Pisze Pan, że „rozrzuty wyników twardości zależne są od miejsca wykonania pomiaru ... w zależności od tego czy odcisk wykonano w obszarze dużego ziarna ... czy na granicy małych ziaren” – moje pytanie brzmi czy to, że występują duże różnice w twardości na przekroju tej samej próbki wpływa tylko wielkość ziarn?? oraz czy pomiar twardości metodą mikroodcisków jest dobrą metodą pomiaru twardości dla stopach aluminium???
11. „Na zdjęciach mikrostruktury zauważyć można przestrzenie bogato udekorowane drobnymi wydzieleniami o kształcie sferycznym, płytkowym lub dyskowym, które mogą odpowiadać fazie T, η lub S (Rysunek 49 b – żółta strzałka) oraz przestrzenie zubożone w wydzielenia (Rysunek 49 b – szara strzałka)” – na jakiej podstawie dokonał Pan identyfikacji wydzieleni T, η lub S?? Sformułowanie „przestrzenie bogato udekorowane drobnymi wydzieleniami..” nie jest zbyt fortunne

5. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska wnosi istotne i oryginalne elementy naukowe w zakresie inżynierii mechanicznej dotyczące procesu przyrostowego wytwarzania umacnianych wydzieleniowo stopów aluminium grupy 7xxx. Praca jest oryginalnym rozwiązaniem zaprezentowanego w niej zagadnienia naukowego. Autor podjął w rozprawie problem naukowo-badawczy, który jest bardzo aktualny i ma istotne znaczenie z punktu widzenia poznawczego i aplikacyjnego. Wykazał się niezbędną wiedzą z zakresu przedmiotu pracy oraz umiejętnością do samodzielnego, twórczego prowadzenia badań oraz ich analizy.

Podsumowując recenzję stwierdzam, że przedłożona do oceny praca doktorska zatytułowana „Modelowanie, symulacja i weryfikacja procesu przyrostowego wytwarzania stopów aluminium serii 7xxx, pod kątem minimalizacji wad materiałowych” spełnia formalne i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim określone ustawą Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574, z późniejszymi zmianami). Wnioskuje zatem do Wysokiej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej o przyjęcie pracy, przeprowadzenie dalszych etapów postępowania doktorskiego oraz dopuszczenie Pana mgr inż. Wojciecha Stopyry do publicznej obrony.