

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wojciecha Stopyry nt.: „**Modelowanie, symulacja i weryfikacja procesu przyrostowego wytwarzania stopów aluminium serii 7XXX, pod kątem minimalizacji wad materiałowych**”

Promotor: prof. dr hab. inż. Edward Chlebus

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Tomasz Kurzynowski, prof. uczelni

Podstawa opracowania: pismo W10/RDND07/2023 z dnia 18 lipca 2023 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego

1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 121 stron, a w tym: 2 str. spisu treści, 1 str. wykazu akronimów; 1 str. streszczenia w języku polskim i 1 str. streszczenia w języku angielskim 98str. zasadniczej części pracy, 17 str. wykazu literatury (157 pozycji). Praca składa się z 6 głównych rozdziałów.

We wstępie - rozdział 1 (s.7 - s.25) Autor rozprawy przedstawia krótką charakterystykę technologii przyrostowych, które dzielą się na siedem kategorii w zależności od sposobu dodawania materiału. Wspólną cechą jednej z kategorii jest jednoetapowe wytwarzanie elementów ze stopów metali, tj.: laminowanie blach, bezpośrednie osadzanie materiału wiązką energii oraz spiekanie/osadzanie warstw proszkowych. W zależności od stosowanego źródła energii technologię spiekania/osadzania dzieli się na laserową (**LPBF - Laser Powder Bed Fusion**) oraz elektronową. Obecnie znacząco wzrasta zastosowanie technologii przyrostowych w przemyśle kosmicznym, lotniczym, samochodowym i narzędziowym. W szczególności dotyczy to produkcji jednostkowej i małoseryjnej wyrobów o złożonym kształcie. Najczęściej stosowanymi materiałami w technologii LPBF są proszki na bazie tytanu, niklu, aluminium i stali. Do szeroko stosowanych materiałów należą proszki aluminium z dodatkami (skandiu, cyrkonu, nanocząstek borku tytanu) modyfikującymi ich skład w celu zapobieganiu powstawania pęknięć na gorąco podczas krzepnięcia stopionego proszku. Jest to złożone technologicznie zadanie, wymagające dodatkowych badań.

Podjęcie przez Doktoranta badań nad opracowaniem i możliwością opanowania technologii przyrostowego wytwarzania elementów z wytypowanego stopu aluminium (serii 7xxx) jest w pełni uzasadnione.

Na schemacie (rys.1) Doktorant przedstawił 3 etapy procesu wytwarzania elementów za pomocą technologii spiekania laserowego, tj.:

- etap 1 - przygotowanie modeli cyfrowych wraz z parametrami wytwarzania;
- etap 2 - właściwy proces wytwarzania, obejmujący:
 - ✓ nałożenie cienkiej warstwy proszku za pomocą ruchomego zasobnika wyposażonego w zgarniacz,
 - ✓ skanowanie wiązką laserową metalicznego proszku po odpowiednich ścieżkach,
 - ✓ obniżenie platformy roboczej o zadaną grubość warstwy proszku, a następnie wielokrotnie powtarzanie tego cyklu do całkowitego wykonania elementu;
- etap 3 - dodatkowa, wykończeniowa obróbka poprocesowa.

Doktorant podaje, że o jakości technologicznej wyrobów wytwarzanych metodą LPBF decyduje ponad 130 parametrów, które syntetycznie przedstawił na wykresie Ishikawy (rys.2).

Jest to więc bardzo złożony proces, na który główny wpływ mają ograniczenia wynikające z budowy urządzenia, materiał wsadowy, kształt wytwarzanego obiektu oraz sposób jego przygotowania i zakres parametrów procesu. Kombinacja tych parametrów ma wpływ na płynięcie stopionego metalu, parowanie, kształtowanie oraz krzepnięcie kolejnych ściegów, uwarunkowane stabilnością i kształtem jeziorka ciekłego metalu (rys.3). Naprężenia powstające podczas procesu wskutek skurczu i rozszerzalności cieplnej materiału mogą prowadzić do pęknięcia wzdłuż osłabionych nadtopieniami granic ziaren.

Główne wymagania w odniesieniu do skanowania wiązką lasera to:

- skanowanie wypełnienia w celu uzyskania możliwie jednorodnego materiału bez wad;
- skanowanie konturów umożliwiające poprawienie bocznych powierzchni z uwagi na chropowatość i dokładność wymiarowo-kształtową;
- skanowanie struktur podporowych w celu wytworzenia łatwych do usunięcia, odpowiednio wytrzymałych struktur podporowych.

Już ta krótka charakterystyka technologii LPBF wskazuje na jej złożoność i potwierdza celowość podjęcia badań w zakresie doboru warunków procesu, aby można wykonywać wyroby o wymaganej jakości technologicznej i użytkowej.

Na podstawie danych literaturowych Doktorant przedstawił szczegółowe, istotne informacje wraz z odpowiednimi, starannie dobranymi rysunkami, dotyczące:

- stopów aluminium - właściwości i zastosowania (rys.5 i rys.6);
- charakterystyki procesu przetwarzania stopów aluminium umacnianych wydzieleniowo w technologii LPBF (rys.7 - rys.9);
- metody zapobiegania powstawaniu pęknięć na gorąco w trakcie procesu LPBF. Na ten problem Doktorant zwrócił główną uwagę w dalszej części rozprawy.

Ograniczenie lub zniwelowanie podatności stopów aluminium na pęknięcie można osiągnąć przez:

- sterowanie parametrami procesu tak, aby zapewnić niską wartość stosunku gradientu temperatury do szybkości wzrostu ziaren, przy jednocześnie wysokiej szybkości chłodzenia, zapewniającej rozdrobnienie ziaren i mniejszą intensywność mikrosegregacji;
- modyfikację składu chemicznego stopu;
- podgrzewanie platformy roboczej w celu minimalizacji naprężeń generowanych skurczem objętościowym rosnących ziaren.

W rozdziale 2 - uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy (s.26 - s.29) Doktorant zwraca uwagę na istotny problem związany z zapewnieniem „solidnych procedur kontroli jakości”, na które należy szczególnie zwracać uwagę w odniesieniu do elementów krytycznych, których uszkodzenie prowadzi do katastrofalnych skutków. Wykaz czynników wpływających na jakość wytwarzanych przedmiotów w technologii LPBF został przedstawiony w tab.1. Certyfikacja części wytworzonych za pomocą technologii przyrostowych z nowych materiałów jest pracochłonna i kosztowna. **Decyzję Doktoranta, aby skupić się na doborze parametrów procesu, a w tym również temperatury podgrzewania platformy roboczej urządzenia w przyrostowym wytwarzaniu elementów z wysokowytrzymałych stopów aluminium uznaję za słuszną.**

W świetle danych literaturowych w celu minimalizacji skłonności do pęknięcia jest zalecane wysokotemperaturowe podgrzewanie platformy roboczej oraz stosowanie małych prędkości skanowania, małych grubości warstw oraz lasera do pracy ciągłej (rys.12). Podczas skanowania ciągłego zmniejsza się także zaburzenie przepływu ciekłego metalu oraz ruchy wsteczne cieczy. Ważne jest przy tym, aby następowała redukcja naprężeń termicznych.

Analiza **rozdziału 3 - cel i zakres pracy (s.29 - s.32) nasuwa pewne uwagi** odnośnie do przedstawionego sformułowania. Wykorzystanie metod modelowania eksperymentu to

narzędzia do osiągnięcia określonego celu. Jeśli metoda planowania będzie zawierać specyficzne, nowe elementy związane z planowanym zadaniem, to wówczas będzie uzasadnione zalecenie jej do celu tej pracy.

Wg mnie **celem pracy jest** „opracowanie technologii i symulacji termodynamicznych przyrostowego wytwarzania stopów aluminium serii 7xxx z zastosowaniem wysokotemperaturowego podgrzewania platformy roboczej w celu eliminacji pęknięć na gorąco”.

Odnosnie do treści tezy pracy nie mam uwag. Natomiast uważam, że powinno się raczej stosować sformułowanie **hipoteza**, bowiem **hipoteza naukowa to: założenie, oparte na prawdopodobieństwie, wymagające sprawdzenia, mające na celu wyjaśnienie jakiegoś prawa lub zjawiska**, zaś teza to część twierdzenia, które przy danych założeniach należy dowieść (*por. Uniwersalny słownik języka polskiego, wyd. PWN, Warszawa 2003*)

Zwięźle i jednoznacznie została przedstawiona metodyka badań (rys.13). Słuszną propozycją Doktoranta jest iteracyjny proces przeprowadzania symulacji na zaktualizowanych danych wejściowych, odnoszących do właściwości próbek wytworzonych w technologii LPBF oraz po procesie obróbki cieplnej.

Uwaga: w tekście pracy Autor rozprawy stosuje określenie „własność” (np. własności materiału, itp.). Wg mnie powinno być „właściwość, właściwości”(np. na str.44 jest użyte słowo właściwości), ponieważ **właściwość**, to pewna, specyficzna cecha materiału, przedmiotu, a **własność** to posiadanie czegoś, prawo do rozporządzania rzeczą, korzystania z niej na określonych warunkach.

Rozdział 4 - metoda i zakres badań technologicznych (s.33 - s.78) zawiera obszerne informacje, dotyczące wykonanych przez Doktoranta badań i analiz. Obejmują one cztery główne obszary.

I. Charakterystyka proszkowego materiału wsadowego.

Proszek został podzielony na dwie grupy: w stanie dostawy od producenta oraz odzyskany po procesie po przesianiu odpowiednie sito. Doktorant wykonał badania właściwości proszku, wpływających na jakość wytwarzanych elementów:

- składu chemicznego próbek proszkowych (tab2);
- zawartości cynku, magnezu i miedzi w proszku stopu w różnych stanach po użyciu w procesie LPBF (rys.15);
- zawartości zanieczyszczeń w proszku stopu w różnych stanach po użyciu w procesie LPBF (rys.16);
- morfologii i rozkładu frakcji proszku wykonane metodą analizy obrazów przy użyciu mikroskopu SEM EVO MA25 (rys.17 - rys.19) oraz tab.3, a także rozkłady średnicy równoważnej cząstek proszku świeżego i poprocesowego (rys.20);
- absorpcyjności wiązki lasera, mającej istotny wpływ na przegrzewanie się stapianego materiału i wzrost intensywności parowania pierwiastków niskotopliwych (porównanie absorpcyjności proszku różnych stopów - rys.21);
- dynamicznej sypkości proszku charakteryzowanej kątem zsypania i kohezji proszku (rys.22).

Wyniki tych badań i analiz były podstawą do zakwalifikowania proszku nowego i poprocesowego jako zdolnych do zastosowania w technologii LPBF.

II. Symulacje termodynamiczne procesu LPBF.

Doktorant wykonał symulacje w oprogramowaniu Thermo-Calc wersja 2021b firmy Thermo-Calc Software, z wykorzystaniem baz materiałowych stopów TCAL& i MOBAL5. W ramach tych badań przeprowadził:

- obliczenia równowagowego udziału faz w stopie w funkcji temperatury (rys.26a);

- symulację nierównowagowej krzywej krzepnięcia (rys.26b);
- analizę podatności na pękanie stopu AA7075 z uwzględnieniem składu chemicznego (rys.27) oraz wg normy ASTM B211 (rys.28) oraz porównanie sekwencji przemian fazowych podczas chłodzenia ze stanu ciekłego do temperatury otoczenia (tab.5).

Wyniki tych symulacji posłużyły do określenia temperatury podgrzewania platformy roboczej urządzenia. Wg Autora rozprawy „*utrzymanie materiału w wyznaczonym zakresie temperatur powinno zminimalizować podatność materiału na pękanie poprzez zmniejszenie gradientu temperatur, redukcję naprężeń oraz homogenizację roztworu stałego α* ”.

III. Opracowanie parametrów technologicznych procesu LPBF

Parametry procesu przetwarzania proszku stopu AA075 w technologii LPBF Doktorant opracował na stanowisku SLM 280 (charakterystyka urządzenia została podana w rozprawie). Parametry zmienne oraz ich zakresy zostały wytypowane na podstawie publikacji (wg rys.12, str.28). Kryterium doboru prędkości skanowania była zdolność do wytworzenia walców o średnicy 3,5 mm bez widocznych makroskopowych defektów zakłócających przebieg procesu - w tym jednostronnych wypływek. Do badań związanych z długością wektorów wyznaczono powierzchnię i sumaryczną długość pęknięć. Zadana temperatura podgrzewania platformy wynosiła 543°C.

W rozprawie zostały przedstawione: kryteria klasyfikacji i identyfikacji defektów (rys.29); rozmieszczenie oraz wizualizacja porów kolumnowych (rys.30); projekcja próbki z porami gazowymi oraz wizualizacja pora gazowego; projekcja próbki z porami przypowierzchniowymi oraz wizualizacja pora przypowierzchniowego (rys.32); projekcja próbki z jednostronną wypływką oraz wizualizacja defektu występującego przy jednostronnej wypływce (ry.33); projekcja próbki z z defektem rozbudowanym oraz wizualizacja pora rozbudowanego (rys.34).

Do tych przykładów defektów Doktorant podał komentarze z wyjaśnieniami mechanizmów ich powstawania.

W kolejnym kroku Doktorant podjął obszerne badania dotyczące **wyboru parametrów technologii LPBF**, zapewniających akceptowalną jakość technologiczną wykonywanych elementów. Ujął to w stwierdzeniu: „*Za kryterium oceny uznano możliwość wytworzenia próbek bez defektów zakłócających poprawność dokończenia procesu (np. wyrastające próbki ponad warstwę nakładanego proszku, odrywające się próbki od platformy roboczej)*”

Uwaga: w tytule tego zakresu badań użycie sformułowania „**badania przesiewowe**” moim zadaniem nie jest trafnym określeniem, ponieważ słowo „przesiewowy” w znaczeniu technicznym jest na ogół używane w kontekście przesiewania jakiegoś surowca przez sito w celu oczyszczenia lub przesortowania.

Do realizacji badań Autor rozprawy skorzystał z eksperymentu czynnikowego ułamkowego (tab.6 - tab.8) oraz kompletnego (tab.9). Jakość wytworzonych próbek została syntetycznie ujęta na rys.35, a schemat głównych, kluczowych parametrów strategii skanowania na rys.36.

Ważnym dla oceny jakości wykonanych próbek była ocena szerokości skanowanych pasów z zastosowaniem parametrów przedstawionych w tab.10. Wyniki oceny sumarycznej długości pęknięć oraz szerokości pęknięć zostały ujęte na rys.37, a obrazy przebiegu pęknięć na wybranych przekrojach próbek na rys.38.

Podsumowując wyniki doboru zakresów parametrów procesu Doktorant stwierdził między innymi, że:

- moc lasera powyżej 200 W wpływa negatywnie na jakość próbek poprzez tworzenie się wypływek;
- jakość powierzchni próbek wytwarzanych z mocą lasera 150 W jest zadowalająca;

- przyjęte zakresy odległości pomiędzy liniami skanowania mają niewielki wpływ na jakość wytwarzanych próbek;
- w zakresie (0,1-0,5 mm) szerokości skanowanych pasów ich zmniejszenie wpływa odwrotnie proporcjonalnie na sumaryczną długość pęknięć, zaś ich wzrost wpływa proporcjonalnie na średnią szerokość pęknięć

Kolejny zakres badań dotyczył opracowania wpływu poszczególnych parametrów na podatność na pękanie oraz porowatość wytworzonych próbek. Doktorant określił je jako **„badania charakteryzujące parametrów technologii LPBF”**.

Nasuwa się pytanie: dlaczego są to badania charakteryzujące, kogo lub co charakteryzujące?

Warunki realizacji badania dla niskich prędkości skanowania zostały podane w tab.11, a komplet uzyskanych wyników w tab.12., dla wysokich prędkości skrawania odpowiednio w tab.13 i w tab.14. Wyniki badań porowatości próbek zostały syntetycznie ujęte na wykresach rys.39 i rys.41. Wykresy efektów głównych, tj.: wpływu grubości warstwy, prędkości skanowania, odległości pomiędzy liniami i mocy lasera „prędkość skanowania zostały przedstawione na rysunkach odpowiednio rys.40 i rys.42. Wyniki te także zostały skomentowane przez Doktoranta.

Kolejnym etapem tej części badań była analiza wpływu temperatury podgrzewania platformy roboczej na sumaryczną liczbę defektów oraz podatność na pękanie. Zakresy parametrów w tym eksperymencie przedstawiano w tab.15. Syntetyczne ujęcie udziału defektów w zależności od zastosowanych, zmiennych parametrów technologii LPBF oraz wymiarów próbki parametrów zostały w sposób jednoznaczny przedstawione na rys.43. Natomiast rozłożenie porów w próbkach dla różnych warunków podgrzewania platformy roboczej są pokazane na rys.44, a przekrój wybranej projekcji skanów tomografii komputerowej z widocznymi defektami na rys.45.

Główne wnioski wynikające z przeprowadzonej, wieloczynnikowej analizy przedstawionych wyników sprowadzają się do stwierdzenia, że:

- szerokość skanowanych pasów ma istotny wpływ na powierzchnię i długość pęknięć;
- parametry wytwarzania - głównie moc lasera oraz prędkość skanowania w technologii LPBF mają wpływ na rodzaj i częstotliwość występowania poszczególnych defektów;
- charakterystyczne pory kolumnowe występują jedynie w procesach z podgrzewaną platformą powyżej temperatury 370°C;
- temperatura podgrzewania platformy i wielkość skanowanych przekrojów są kluczowymi parametrami wpływającymi na podatność na pękanie próbek wytwarzanych na gorąco.

W rozdziale 5 - metoda i zakres badań materiałowych (s.79 - s.100) Doktorant przedstawia wyniki badań próbek o średnicy 8 mm, wytworzonych bez pęknięć o porowatości poniżej 1 %. Zestaw parametrów procesu LPBF został ujęty w tab.16.

Analiza składu chemicznego oraz symulacje składu fazowego próbek.

Analiza składu chemicznego próbek została wykonana na przekroju wzdłużnym dla wariantu bez obróbki cieplnej. Doktorant stwierdził, że nastąpił znaczny spadek zawartości Zn, Mg i Cu w stosunku do ich zawartości w materiale proszkowym. Wystąpiła też różnica w składach chemicznych dla próbek o różnych średnicach, wytwarzanych z tymi samymi parametrami (tab.17). Obniżenie zawartości tych pierwiastków świadczy o silnym parowaniu, a równocześnie potwierdza wzrost ich zawartości w proszku poprocesowym. Zaistniałe zmiany i ich skutki, jak np. przesunięcie linii solidus z 550°C do ok. 560°C, spadek udziału głównych faz wzmacniających, zmiana wytrzymałości na rozciąganie i plastyczności, kinetyka krzepnięcia materiału po procesie, itd. zostały szczegółowo omówione przez Doktoranta. Zmiana udziału faz w zależności od składu chemicznego została zestawiona w tab.18.

Identyfikacja mikrostruktury.

Wytworzone próbki w stanie surowym oraz po obróbce cieplnej poddano badaniu po trawieniu odczynnikami Kellera. Pełny obraz zidentyfikowanych faz na podstawie ich rozmieszczenia oraz składu chemicznego został przedstawiony w tab.19. Przykłady skaningowych obrazów SEM mikrostruktury próbek wytworzonych w procesie LPBF zostały pokazane na rys.49 i rys.50. natomiast na rys.51 i rys.52 zostały przedstawione obrazy SEM mikrostruktury stopu AA705 po obróbce cieplnej. Wyniki tych analiz również zostały dość szczegółowo zinterpretowane przez Doktoranta. Potwierdził je także dyfraktogram (rys.53) dla próbki po obróbce cieplnej.

Badania mechaniczne wytworzonych próbek.

Badania wytrzymałości na rozciąganie są ważną oceną jakości wykonanych próbek w technologii LPBF. Przed obróbką mechaniczną próbki zostały poddane badaniom metodą mikrotomografii komputerowej. Zidentyfikowano występowanie wewnętrznych defektów, a istotnym było stwierdzenie, że wraz ze wzrostem wysokości próbki znacząco rośnie porowatość (rys.54) oraz rozmiary porów.

Doktorant wykonał także pomiary twardości próbek w stanie surowym i po obróbce cieplnej. Pomiary były wykonane wzdłuż osi próbki zgodnie z kierunkiem wytwarzania. Nie stwierdzono zależności pomiędzy wysokością próbki a jej twardością. Natomiast w wyniku obróbki cieplnej znacznie zwiększa się ich twardość (rys.55).

Wyniki statycznej próby rozciągania (rys.56 i rys.57) wykazały, że dla próbek w stanie surowym oraz po obróbce cieplnej przebiegi napreżeń są powtarzalne, a rozrzuty wyników wytrzymałości na rozciąganie oraz granicy plastyczności są niewielkie.

Doktorant przedstawił również interpretację tych wyników, między innymi objaśniając je tzw. efektem Portevin-Le Chatelier, związanym z niestabilnym, plastycznym płynięciem materiału w trakcie rozciągania z ustaloną prędkością (zdjęcia przełomów po statycznej próbie rozciągania - rys.58 i rys.59). Na powierzchni próbek obserwowano także pory o znacznych wymiarach i głębokości, co sugeruje, że są to pory kolumnowe.

Demonstrator technologii

Jako przykład demonstratora technologii Doktorant wykonał zoptymalizowany topologicznie wspornik podłogi (rys.60) samolotu M28B Bryza. Po procesie LPBF wspornik został poddany wykończeniowej obróbce strumieniowo-ściernej korundem o rozkładzie frakcji 53-75 μm . Porównanie geometrii, powierzchni bocznej i cienkiej ścianki przedstawiono na rys.61. Obróbka strumieniowo-ścierna wygładziła powierzchnie demonstratora, ale równocześnie odłoniła pewne defekty przypowierzchniowe, jak np. zmienną porowatość, niewielkie pęknięcia krystalizacyjne (rys.62 i rys.63).

Podsumowanie

W obszernym podsumowaniu wyników badań przedstawionych w rozdziale 5 Doktorant analizuje krytycznie wyniki wskazując na zalety i pewne niedoskonałości opracowanej technologii. Syntetyczne porównanie składu chemicznego, udziału faz i właściwości mechanicznych otrzymanego materiału ze stopami aluminium Autor rozprawy zestawiał w tab.20.

Opracował zalecane zmiany technologiczne, pozwalające utrzymać stabilny proces spełniający wymagane kryteria, tj.:

- system grzewczy platformy roboczej powinien być umieszczony przy powierzchni przetapianego materiału zamiast pod platforma roboczą;
- skład chemiczny przetapianego proszku powinien być skompensowany o ilość odparowujących pierwiastków;
- skanowane przekroje poprzeczne modeli powinny być nie większe niż 50 mm²;

- w celu zachowania jednorodnej porowatości wytwarzanych przedmiotów ich wysokość nie powinna przekraczać 40 mm.

Rozdział 6 - podsumowanie i wnioski końcowe (s.100 - 104) zawiera zwięzłe zestawienie wykonanych prac badawczych. Przedstawione wnioski poznawcze i użytkowe w pełni odzwierciedlają zakres wykonanych prac i analiz. **Należy z uznaniem podkreślić, że Doktorant w sposób syntetyczny wskazał na zalety jak i wady opracowanej technologii. Na tej podstawie zasugerował kierunki dalszych prac, dotyczące:**

- *opracowania metody zmniejszenia stopnia odparowania niskotopliwych pierwiastków poprzez domieszkowanie stopu pierwiastkami zmniejszającymi stopień odparowania lub/i zmianę parametrów procesu LPBF;*
- *zawężenia zakresu temperatury podgrzewania platformy wraz z monitorowaniem pomiarów w trakcie procesu LPBF w celu dokładnej analizy temperatur granicznych oraz ich wpływu na skłonność do pęknięcia;*
- *zastosowania alternatywnych źródeł podgrzewania materiału, jak np. śledząca wiązka lasera, pozwalających wyeliminować pęknięcia na gorąco oraz zachować stabilność procesu na całej wysokości budowania obiektu;*
- *opracowania strategii skanowania pozwalającej wytwarzać jednorodne struktury, wolne od defektów, bez wpływu na wielkość skanowanego przekroju.*

Przedstawiając propozycje dalszych badań Doktorant wykazał, że proponowane, kolejne etapy pracy badawczej są efektem dobrze zaplanowanych i podporządkowanych głównemu celowi działań, których myślą przewodnią jest opanowanie technologii LPBF w stopniu umożliwiającym jej przemysłowe zastosowania.

2. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do obszaru badawczego, związanego z rozwojem wyrobów przy zastosowaniu nowoczesnych technologii druku 3D.

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej, sformułowania i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam jednoznacznie pozytywnie.** Mgr inż. Wojciech Stopyra podjął temat badawczy, ukierunkowany na zastosowania przemysłowe druku 3D do wykonywania wyrobów spiekanych ze stopów aluminium. Opracował spójną merytorycznie analizę stanu wiedzy z zakresu technologii laserowego spiekania proszków aluminium.

Wskazane przeze mnie, nieliczne wątpliwości, czy uchybienia nie obniżają merytorycznej zawartości rozprawy doktorskiej.

Opiniowana rozprawa doktorska, należąca do dyscypliny „inżynieria mechaniczna”, posiada oryginalne cechy nowości i walory użytkowe. Uzyskane wyniki znacząco poszerzają wiedzę w zakresie możliwości rozwoju przemysłowych technologii przyrostowych.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Stopyry nt.: „Modelowanie, symulacja i weryfikacja procesu przyrostowego wytwarzania stopów aluminium serii 7XXX, pod kątem minimalizacji wad materiałowych” 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 16 sierpnia 2023 r.



Józef Gawlik