

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała KAROLUKA na temat „Kształtowanie własności zmęczeniowych dwufazowych stopów tytanu wytwarzanych technologią przyrostową Powder Bed Fusion Electron Beam”. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Edward Chlebus, zaś promotorem pomocniczym jest dr inż. Robert Dziedzic.

Recenzję opracowano na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej – pismo W10/RDND07/135/52026 z dnia 14 lipca 2026 r.

1. Charakterystyka rozprawy

Celem rozprawy jest opracowanie i optymalizacja technologii przyrostowego wytwarzania dwufazowych stopów tytanu z zastosowaniem Powder Bed Fusion-Electron Beam/Metal (PBF-EB/M) ze szczególnym uwzględnieniem optymalizacji parametrów obróbki poprocesowej, której zadaniem jest uzyskanie znaczącej poprawy własności zmęczeniowych uprzednio wspomnianych stopów.

Aby osiągnąć tak sformułowany cel, autor rozprawy zaproponował następujący zakres badań: dokonanie analizy stanu zagadnienia na podstawie studium literatury ze szczególnym uwzględnieniem technologii PBF-EB/M i jej zastosowań w przetwarzaniu stopów tytanu; określenie właściwości proszków Ti-64 oraz Ti-55511 z punktu widzenia technologii PBF-EB/M; opracowanie parametrów procesu wytwarzania dla obu uprzednio wspomnianych proszków, umożliwiających uzyskanie minimalnej porowatości oraz dobre odwzorowanie geometryczne powierzchni; określenie, dla próbek wytworzonych przyrostowo z obu badanych materiałów, własności materiałowych (porowatość, mikrostruktura, skład fazowy) i mechanicznych (wytrzymałość R_m i R_{02} , odkształcalność ε , moduł Younga E , wytrzymałość zmęczeniowa) w stanie wytworzenia oraz po obróbkach poprocesowych; dobór i zastosowanie obróbek poprocesowych (obróbka cieplna i obróbka HIP), których zadaniem jest poprawa własności zmęczeniowych; podsumowanie wyników badań i sformułowanie wniosków końcowych.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Karoluka ma charakter eksperymentalny, co wprost wynika z zastosowanych przez autora doświadczalnych metod badawczych. Metody te były realizowane z zastosowaniem nowoczesnej aparatury pomiarowej i zaawansowanych procedur badawczych. Podejście takie jest właściwe, szczególnie ze względu na przyszłe praktyczne wykorzystanie jej wyników.

2. Merytoryczna ocena rozprawy

Przytoczony w pkt. 1 niniejszej recenzji problem badawczy i wytyczone cele badań są sformułowane właściwie. Obejmują one całościowo wszystkie istotne parametry opisujące własności materiałowe i mechaniczne stopów tytanu stosowanych do przyrostowego wytwarzania elementów konstrukcyjnych z zastosowaniem technologii PBF-EB/M w stanie as-built oraz po zastosowaniu obróbek poprocesowych.

Dobór metod badawczych przy wyznaczaniu wspomnianych uprzednio parametrów opisujących własności materiałowe i mechaniczne jest właściwy. I tak: badania w zakresie określenia cech proszków zastosowanych do wytworzenia elementów, obejmujące analizę składu chemicznego, morfologię cząstek, rozkład frakcji, gęstość nasypową oraz minimalną energię objętościową zapłonu dokonano zgodnie z obowiązującymi normami ASTM oraz IEC.

Analizę składu chemicznego oraz badanie morfologii proszków dokonano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM), wyposażonego w detektor promieniowania rentgenowskiego EDX.

Analizę objętościowego rozkładu wielkości frakcji cząstek (Q3) przeprowadzono przy użyciu dyfraktometru laserowego.

Gęstość nasypową luźnego proszku badano zgodnie z normą PN-EN ISO 39234, zaś gęstość nasypową z usadem zgodnie z normą PN-EN 3953. Do oceny sypkości proszków użyto dwóch wskaźników: współczynnik Hausnera oraz indeks Carra.

Warunki prowadzenia procesu PBF-EB/M (natężenie wiązki, prędkość skanowania, energia objętościowa) ustalano w odniesieniu do powstających defektów technologicznych. Zbyt niska energia była przyczyną powstawania porowatości i nieciągłości typu *lack of fusion*. Zbyt wysoka energia była przyczyną deformacji próbek. W efekcie uzyskano obszary zmienności parametrów procesowych, umożliwiającą wytworzenie próbek o małej porowatości i poprawnej geometrii.

Dla uzyskania pożądanej objętościowej gęstości energii sterowano zmiennymi parametrami procesu - natężeniem wiązki elektronów i prędkością skanowania. Jako podstawowe kryterium doboru parametrów procesu przyjęto minimalną porowatość, zaś jako kryterium pomocnicze - poprawność odwzorowania geometrycznego górnej powierzchni wytworzonych próbek.

Porowatość oceniano na wszystkich próbkach przy użyciu mikroskopu konfokalnego.

Ustalenie warunków prowadzenia procesu wytwarzania struktur przestrzennych ze stopów tytanu Ti-64 i Ti-55511 przy użyciu technologii PBF-EB/M umożliwiło opracowanie planu eksperymentalnych badań zasadniczych próbek w stanie as-built oraz próbek po obróbkach poprocesowych.

Plan eksperymentu obejmował badania: porowatości, mikrostruktury, składu fazowego, twardości a także statyczną próbę rozciągania i badania zmęczenia.

We wstępnej fazie badań zasadniczych realizowano badania wpływu kierunku wytwarzania na porowatość wytworzonych próbek. Stwierdzono, że różnice między uzyskanymi wynikami dla trzech różnych kierunków wytworzenia (poziomy, nachylony pod kątem 45 °, pionowy) są nieznaczne, wobec czego do badań zakwalifikowano próbki wytworzone pionowo. Badano także wpływ umieszczenia próbek na platformie procesowej na uzyskiwaną porowatość. Stwierdzono, że ułożenie próbek na platformie procesowej nie ma istotnego wpływu na udział porowatości w próbkach. Pomiaru porowatości dokonywano przy użyciu tomografu technicznego Carl Zeiss Metronom 1500, wyposażonego w lampę rentgenowską ze skupioną wiązką promieniowania o ogniskowej 7 mikrometrów i detektorem Perkin Elmer XRD 1640 o rozdzielczości 1024 x 1024.

Do wstępnej fazy badań zasadniczych włączono także dobór parametrów obróbki poprocesowej (obróbka cieplna i obróbka HIP).

Realizacja przyjętego planu badań zasadniczych dostarczyła, ważne z naukowego i aplikacyjnego punktu widzenia, oryginalne wyniki, które mogą być efektywnie wykorzystane w praktyce przyrostowego wytwarzania elementów ze stopów tytanu z zastosowaniem technologii PBF-EB/M. Wyniki te umożliwiły dokonanie oceny własności materiałowych i mechanicznych obu rozpatrywanych stopów tytanu z punktu widzenia ich praktycznych zastosowań szczególnie w lotnictwie.

Wykazano, że pod względem mikrostrukturalnym oba stopy w stanie *as-build* miały strukturę dwufazową $\alpha + \beta$ o charakterze lamelarnym w obrębie ziaren pierwotnej fazy β . Ponadto wykazano, że obróbki poprocesowe (HIP) powodują mierzalne zmiany udziałów fazowych oraz, że obróbki poprocesowe powodowały obniżenie twardości HV1 w porównaniu z twardością w stanie wytworzenia. co może być spowodowane relaksacją naprężeń i przebudową mikrostruktury.

Ważnym wnioskiem wynikającym ze statycznych badań rozciągania oraz z badań zmęczeniowych, jest rozbieżność ocen własności obu materiałów w stanie *as build* w warunkach obciążenia statycznego i cyklicznie zmiennego. W warunkach obciążenia statycznego uzyskano dla obu materiałów wysokie wartości wytrzymałości na rozciąganie, pomimo obecności defektów, zaś w warunkach obciążenia cyklicznie zmiennego obserwowano niższy poziom wytrzymałości zmęczeniowej i większy rozrzut wyników. Defekty, które nie powodują jednoznacznego wpływu na obniżenie wytrzymałości na rozciąganie mogą być przyczyną inicjacji pęknięć w warunkach obciążenia zmiennego w czasie.

Badania porównawcze warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych różnych wariantów obróbki poprocesowej (cieplnej i HIP) wykazały, że obróbka cieplna w temperaturze 920°C nie powoduje poprawy wytrzymałości zmęczeniowej, natomiast zastosowanie obróbki HIP powoduje istotne zwiększenie tej wytrzymałości.

Badane warianty obróbki poprocesowej wskazały na obniżenie wartości R_m i R_{02} , oraz wzrost odkształceń ε do zerwania, przy ograniczeniu rozrzutu wyników. Zatem dobór wariantu obróbki poprocesowej powinien być wynikiem kompromisu między poziomem wytrzymałości na rozciąganie a pożądanym poziomem własności zmęczeniowych.

Ważnym postulatem wytykającym z wniosków podsumowujących wyniki dokonanych i przedstawionych w rozprawie badań jest stosowanie w procesie przyrostowego wytwarzania elementów ze stopów tytanu obróbki poprocesowej HIP, jako integralnej (obligatoryjnej) części technologii PBF-EB/M.

Postulat obligatoryjnego stosowania obróbki podprocesowej HIP ma swoje uzasadnienie w uzyskanych wynikach badań, dokonanych na próbkach wytworzonych z materiałów Ti-64 i Ti-55511. I tak dla próbek z materiału Ti-64 z obróbką HIP w temperaturze 920°C i ciśnieniu 150 MPa, uzyskano wytrzymałość zmęczeniową na poziomie 550 MPa, przy podstawie $N_G = 10^7$ cykli, tj. wartość na poziomie materiału kutego.

Badania będące przedmiotem rozprawy przeprowadzono z dużą starannością przy użyciu nowoczesnej aparatury, gwarantującej dużą dokładność i wysoką powtarzalność wyników pomiarów. Wyniki pomiarów poddano analizie statystycznej, oceniono przedziały ufności.

Uzyskane wyniki z pewnością zyskałyby na wiarygodności, gdyby zastosowano większą liczbę powtórzeń i większą gęstość wartości zmiennych niezależnych.

Prezentacja i interpretacja wyników nie budzą zastrzeżeń przedstawienie jest przejrzyste zarówno w postaci graficznej jak i sformułowania wniosków wnioski kierunkowe są zgodne z doniesieniami literaturowymi w tym obszarze tematycznym.

Wyniki oryginalnych badań przedstawionych w rozprawie, stanowią istotny wkład jej autora w rozwój wiedzy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna a w szczególności w obszarze przyrostowego wytwarzania elementów ze stopów tytanu z zastosowaniem technologii PBF-EB/M, przeznaczonych do pracy w warunkach cyklicznie zmiennych z jakimi spotykamy się między innymi w lotnictwie.

3. Końcowa konkluzja recenzji

Na podstawie przedstawionych ocen w pkt. 1 i 2 niniejszej recenzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Karoluka pt, „Kształtowanie własności zmęczeniowych dwufazowych stopów tytanu wytwarzanych technologią przyrostową Powder Bed Fusion Electron Beam” spełnia wymagania art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Rozprawa ta stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o znaczących walorach poznawczych i aplikacyjnych. Tym samym autor rozprawy udowodnił, że jest dobrze przygotowany do samodzielnego prowadzenia badań naukowych. **Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do dalszego postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora mgr. inż. Michałowi Karolukowi.**

