

Prof. K. Kurzydłowski

Wydział Mechaniczny

Politechnika Białostocka

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała KAROLUKA

***pt. „Kształtowanie własności zmęczeniowych dwufazowych stopów tytanu
wytwarzanych technologią przyrostową Powder Bed Fusion Electron Beam”***

dysciplina: inżynieria mechaniczna

Podstawa formalna i ogólna charakterystyka rozprawy

Niniejszą recenzję opracowałem na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Profesora Zbigniewa Gronostajskiego z 14 lipca 2026 roku (sygnatura W10/RDND07/134/52026). Do przygotowania recenzji wykorzystałem tekst rozprawy doktorskiej udostępniony w formie dokumentu PDF oraz w wersji wydrukowanej, liczącej 134 strony.

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Karoluka, została przygotowana w ramach ubiegania się o stopień doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Rozprawa powstała pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Edwarda Chlebusa, z udziałem promotora pomocniczego dr. inż. Roberta Dziedzica i dotyczy stopów tytanu, a dokładniej stopów Ti-6Al-4V (Ti-64) oraz Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe (Ti-55511). Uwagę skupiono na ich odporności zmęczeniowej w przypadku detali wytwarzanych technologią PBF-EB/M. W tym kontekście w pracy podjęto wątek doboru parametrów procesu i obróbki poprocesowej, w szczególności prasowania izostatycznego na gorąco (HIP). Należy podkreślić, że Promotor rozprawy Prof. Edward Chlebus jest jednym z pionierów przemysłowej implementacji techniki druku 3D, prowadząc od ponad ćwierćwiecza badania nad szybkim prototypowaniem i inżynierią odwrotną na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Zatem należy podkreślić, że recenzowana praca została przygotowana w zespole naukowców o dużym dorobku w jej przedmiocie.

W ocenie rozprawy przyjąłem kryteria określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Zgodnie z tym przepisem rozprawa doktorska powinna prezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a jej przedmiotem powinno być oryginalne rozwiązanie problemu naukowego albo oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych. W dalszej części recenzji odnoszę ocenę pracy bezpośrednio do tych przesłanek.

Znaczenie tematyki, cel i zakres pracy

Tematyka rozprawy jest aktualna i istotna zarówno poznawczo, jak i aplikacyjnie. Jednym z podstawowych ograniczeń szerszego stosowania przyrostowo wytwarzanych detali z tytanu i jego stopów jest względnie niska odporność zmęczeniowa, co jest skutkiem występowania w nich charakterystycznej struktury typowej dla procesu drukowania, którego immanentną cechą jest lokalne przetapianie proszku wiązką elektronów oraz następujące po nim szybkie odprowadzanie ciepła do wcześniej wytworzonego materiału. W rezultacie struktura drukowanych detali różni się od ich odpowiedników otrzymywanych metodami, w których cały detal poddawany jest jednorodnemu grzaniu/chłodzeniu lub przeróbce plastycznej. Z natury procesu detale drukowane są strukturalnie mniej jednorodne niż uzyskiwane drogą przeróbki plastycznej.

W przypadku stosowania substratów proszkowych, w drukowanych detalach dodatkowo mogą się pojawić defekty zależne od parametrów procesu, takie jak nieciągłości typu braku przetopu (lack-of-fusion, LOF), pory i inne lokalne nieciągłości. Charakterystyczną cechą elementów drukowanych z proszków jest także topografia powierzchni, na której często występują częściowo przetopione cząstki proszku. Na drodze doboru właściwych warunków procesu drukowania można zredukować liczbę, gęstość i wielkość wspomnianych defektów do poziomu, który nie ma wpływu na trwałość drukowanych detali w warunkach obciążeń statycznych. Z drugiej strony wszystkie wymienione defekty mają potencjalnie duży wpływ na wytrzymałość pod obciążeniem cyklicznym. Z tego względu przyjęty cel pracy, określony jako opracowanie i optymalizacja technologii wytwarzania dwufazowych stopów tytanu metodą PBF-EB/M oraz zdefiniowanie parametrów obróbki po-procesowej prowadzących do istotnej poprawy ich właściwości zmęczeniowych należy uznać za ważny naukowo i technicznie.

Realizując przyjęty cel pracy, Doktorant przeprowadził badania obejmujące pełną ścieżkę technologiczną: charakterystykę proszków Ti-64 i Ti-55511, dobór parametrów PBF-EB/M, ocenę porowatości, mikrostruktury i składu fazowego, pomiary twardości, statyczne próby rozciągania, badania zmęczeniowe i analizę fraktograficzną, zarówno w stanie as-built, jak i po wybranych wariantach obróbki cieplnej oraz HIP.

Za mocną stroną rozprawy uważam konsekwentne połączenie parametrów procesu z charakterem defektów, mikrostrukturą, mechanizmem inicjacji pęknięcia i wynikowymi właściwościami zmęczeniowymi. Taki sposób prowadzenia analizy wykracza poza prostą optymalizację technologiczną i stwarza podstawę do sformułowania wniosków o charakterze naukowym istotnych dla dyscypliny Inżynieria Mechaniczna. Należy dodatkowo zaznaczyć, że wyniki przedstawione w rozprawie doktorskiej posiadają także istotne znaczenie dla dyscypliny Inżynieria Materiałowa.

Ocena stanu wiedzy i metodyki badań

Istotnym elementem recenzowanej pracy jest przegląd literatury obejmujący podstawy technologii przyrostowych, specyfikę PBF-EB/M, charakterystykę badanych stopów tytanu, zagadnienia zmęczenia metali oraz wpływ defektów i obróbki HIP na trwałość zmęczeniową. Zakres źródeł przywołanych w rozprawie oceniam jako właściwy dla tematyki oraz rodzaju opracowania. W tym wymiarze rozprawa potwierdza znajomość przez Doktoranta zagadnień współczesnych technologii wytwarzania, mechaniki materiałów, zmęczenia, a także inżynierii materiałowej.

Pewnym mankamentem jest mniej wyraźne niż oczekiwałam w rozprawie doktorskiej sformułowanie luki badawczej i hipotezy naukowej. Cel technologiczny jest podany jednoznacznie, natomiast to, jaka nowa ogólna zależność ma zostać wykazana w pracy nie jest przedstawione explicite na początku pracy i raczej rekonstruowane z wyników. Nie obniża to wartości rozprawy, ale utrudnia jednoznaczne oddzielenie elementu naukowego od optymalizacji procesu technologicznego.

Zakres zastosowanych metod badawczych oceniam wysoko. Szczególnie wartościowe jest wykorzystanie tomografii komputerowej do nieniszczącej oceny porowatości, połączone z SEM, XRD, pomiarami twardości, próbą rozciągania i badaniami zmęczeniowymi. Autor trafnie wskazuje przy tym ograniczenia rozdzielczości CT i możliwość niewykrywania drobnych, lecz

potencjalnie krytycznych nieciągłości. Ważnym elementem przeprowadzonych badań jest analiza fraktograficzna, pozwalająca połączyć zmianę poziomu trwałości z mechanizmem inicjacji pęknięcia.

Szczegółowa ocena badań zmęczeniowych

Badania zmęczeniowe przeprowadzono przy $R = 0,1$ i częstotliwości 50 Hz. Dla każdej serii zastosowano pięć poziomów naprężenia maksymalnego, po pięć próbek na każdym poziomie, co daje 25 próbek dla jednej serii. Jest to zakres eksperymentalny wystarczający do wiarygodnego porównywania przebiegu krzywych S–N pomiędzy stanami materiału. Dodatkową zaletą jest jednakowe przygotowanie powierzchni próbek do R_a około $0,1 \mu\text{m}$, dzięki czemu wpływ jakości powierzchni został w znacznym stopniu odseparowany od wpływu defektów występujących w badanych próbkach.

Z punktu widzenia interpretacji wyników zastrzeżenie budzi sposób definiowania w rozprawie „wytrzymałości zmęczeniowej”. Autor przyjmuje jako tę wielkość poziom naprężenia σ_{max} , przy którym żadna z pięciu badanych próbek nie uległa zniszczeniu do liczby cykli $N_G = 10^7$ cykli. Kryterium takie jest jednoznaczne i może być użyte jako praktyczny parametr porównawczy badanych wariantów technologicznych, nie jest jednak równoważne statystycznemu wyznaczeniu wytrzymałości zmęczeniowej dla określonego prawdopodobieństwa zniszczenia/przetrwania, w rozumieniu norm dotyczących statystycznej analizy badań zmęczeniowych, w szczególności ISO 12107.

W konsekwencji wartości 250, 300, 450 i 550 MPa interpretuję jako eksperymentalnie wyznaczone poziomy naprężenia spełniające przyjęte przez Autora kryterium 5/5 próbek przy $N_G = 10^7$ cykli, a nie jako statystycznie wyznaczoną wytrzymałość zmęczeniową materiału. Zastrzeżenie to nie podważa wartości porównawczej przeprowadzonych badań ani zasadniczego wniosku o korzystnym wpływie obróbki HIP, ogranicza natomiast możliwość ilościowego uogólnienia uzyskanych wartości.

Drugim ograniczeniem jest sposób wyznaczenia regresji S–N wyłącznie na podstawie próbek zniszczonych. Jest to często stosowane podejście, ale statystycznie nie wykorzystuje wszystkich informacji zawartych w zebranych danych eksperymentalnych. Przy dużym rozrzucie, szczególnie widocznym dla Ti-55511 w stanie as-built, gdzie przy $\sigma_{\text{max}} = 450 \text{ MPa}$ jedna próbka uległa zniszczeniu po około 10^5 cykli, a inna osiągnęła 10^7 cykli bez zniszczenia, bardziej zaawansowana

analiza danych pozwoliłaby wiarygodniej opisać prawdopodobieństwo uszkodzenia zmęczeniowego.

Z tego względu deklarowane w streszczeniu zwiększenie odporności zmęczeniowej o 120% dla Ti-64 i 50% dla Ti-55511 jest arytmetycznie poprawne względem przyjętego kryterium: odpowiednio 250→550 MPa i 300→450 MPa. Nie należy jednak rozumieć tych wartości jako wzrostu statystycznie wyznaczonej granicy zmęczeniowej o dokładnie taki procent. Odpowiedniejsze byłoby stwierdzenie, że najwyższy zweryfikowany poziom naprężenia spełniający kryterium 5/5 próbek przy 10^7 cykli wzrósł o 120% i 50%. To zastrzeżenie nie podważa w istotny sposób zasadniczego wniosku o bardzo dużej skuteczności obróbki HIP, lecz precyzuje jego zakres.

Najważniejsze wyniki i ich interpretacja

Do najważniejszych wyników pracy zaliczam wykazanie, że dobór parametrów PBF-EB/M nie może być zdeterminowany dążeniem do minimalizacji porowatości. Wiadomym jest, że zbyt mała energia objętościowa prowadzi do wzrostu porowatości, natomiast zbyt duża, mimo niskiego udziału porów, sprzyja powstawaniu innych wad. Zasadne jest zatem, jak to przeprowadzono w pracy, wytypowanie „optymalnego” okna parametrów procesu.

Za ważny wynik naukowy rozprawy uważam także ilościowe wykazanie rozbieżności pomiędzy oceną materiału na podstawie właściwości statycznych i zmęczeniowych. W stanie as-built oba stopy wykazywały korzystne właściwości w próbie rozciągania, podczas gdy poziom naprężenia spełniający kryterium $N_G=10^7$ cykli był znacznie niższy i charakteryzował się dużym rozrzutem.

Przyczyny wspomnianej rozbieżności ujawniła przeprowadzona przez Doktoranta analiza przełomów. Analiza wskazała, że za inicjację pęknięć odpowiadały przede wszystkim płaskie, często przypowierzchniowe wady typu braku fuzji, których udział objętościowy w porowatości detali sam w sobie jest niski. Zatem porowatość jako taka nie jest parametrem determinującym wytrzymałość zmęczeniową.

Kluczowe wyniki eksperymentalne w rozprawie w wątku technologicznym dotyczą wpływu po procesowej obróbce HIP. Doktorant wykazał, że w przypadku stopu Ti-64 klasyczna obróbka cieplna 920°C/2 h nie zwiększyła poziomu odporności zmęczeniowej zdefiniowanej jako

naprężenie dla liczby cykli $N_G = 10^7$ i wynoszącej 250 MPa. Jednocześnie przeprowadzenie operacji HIP w temperaturze 920°C pod ciśnieniem 100 MPa w czasie 2 h, podniosło ten poziom naprężenia do 450 MPa. Z kolei zastosowanie HIP o tej samej temperaturze, ale pod ciśnieniem 150 MPa, doprowadziło do wzrostu naprężenia do 550 MPa. Dla stopu Ti-55511 wariant HIP 820°C/150 MPa/2 h prowadził do wzrostu z 300 do 450 MPa i wyraźnego zmniejszenia rozrzutu wartości liczby cykli do zniszczenia.

Uzyskane zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej Doktorant powiązał ze zmianami w strukturze drukowanych próbek. Badania fraktograficzne wykazały, że po najskuteczniejszych wariantach HIP nieaktywne były defekty braku fuzji w warstwie przypowierzchniowej. Miejsce inicjacji pęknięć stały się defekty mikrostruktury w objętości próbek.

Istotnym rozwinięciem zaobserwowanych zależności jest ilościowe określenie warunków uzyskania kompromisu pomiędzy właściwościami statycznymi i zmęczeniowymi detali wytwarzanych metodą PBF-EB/M. Zastosowana w pracy obróbka HIP obniżała wartości R_m i $R_{0,2}$, jednocześnie zwiększając odkształcenie do zerwania, poprawiając powtarzalność wyników oraz, przede wszystkim, zwiększając odporność na obciążenia zmęczeniowe. W praktycznym podejściu do kwestii doboru parametrów procesu drukowania oznacza to, że poszukiwanie „optymalnych” nastawów nie może być prowadzone według jednego kryterium, lecz powinno uwzględniać wymagania projektowe dotyczące zarówno obciążeń monotonicznych, jak i cyklicznych.

Oryginalne osiągnięcie naukowe

W mojej ocenie recenzowana praca ma znamiona oryginalności w wielu wymiarach. Po pierwsze, Doktorant określił zakres parametrów PBF-EB/M i HIP użyteczny w przypadku druku detali ze stopów tytanu. Jest to wartościowy wkład technologiczny recenzowanej rozprawy. Rozprawa zaowocowała także osiągnięciem naukowym, którym jest eksperymentalne sformułowanie, dla dwóch stopów tytanu, pełnego ciągu przyczynowo skutkowego obejmującego: (a) parametry wytwarzania → (b) charakter lokalnych defektów → (c) miejsca i warunki inicjacji pęknięcia zmęczeniowego → (d) skuteczność obróbki po procesowej → (e) zmianę mechanizmu inicjacji pęknięć → (f) poziom i rozrzut trwałości zmęczeniowej.

Za szczególnie wartościowe uważam wykazanie, że mały całkowity udział porowatości i korzystne właściwości statyczne nie są wystarczającymi kryteriami oceny przydatności detali wykonanych metodą PBF-EB/M do pracy cyklicznej. O trwałości użytkowej takich detali decyduje w dużym stopniu charakter lokalnych nieciągłości, w szczególności rozmiar/kształt i położenie defektów w postaci lokalnego braku fuzji. Po skutecznej obróbce HIP inicjacja pęknięcia przestaje być kontrolowana przez makroskopowe wady technologiczne typu LOF, a zaczyna być związana z lokalnymi cechami mikrostruktury.

Wniosek ten ma znaczenie szersze niż dobór parametrów dla pojedynczego procesu i stanowi, w mojej ocenie, oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w rozumieniu art. 187 ust. 2 ustawy.

Dodatkowym walorem jest przeprowadzenie spójnej analizy porównawczej dla Ti-64 oraz znacznie słabiej rozpoznanego w kontekście PBF-EB/M i zmęczenia stopu Ti-55511.

Uwagi krytyczne i pytania do Doktoranta

Uwagi przedstawione poniżej mają przede wszystkim charakter dyskusyjny i nie podważają pozytywnej oceny rozprawy.

1. Proszę o sformułowanie w jednym lub dwóch zdaniach oryginalnego problemu naukowego rozprawy, w kontraście do zadania polegającego na optymalizacji technologicznej procesu PBF-EB/M oraz HIP.
2. Czy na podstawie uzyskanych wyników można zaproponować parametr lepiej korelujący z wytrzymałością zmęczeniową niż porowatość?
3. Po najskuteczniejszej operacji HIP inicjacja pęknięcia przesuwa się z defektów typu LOF na poziom mikrostruktury. Czy oznacza to, że dalsza poprawa odporności zmęczeniowej wymaga przede wszystkim sterowania mikrostrukturą?
4. W Ti-55511 po procesie HIP udział fazy α określony metodą XRD wzrósł z około 44,3% do 82,7%. Jaki jest względny udział tych zmian mikrostrukturalnych względem wpływu eliminacji defektów w obserwowanej poprawie trwałości zmęczeniowej?

Ocena strony redakcyjnej

Recenzowana rozprawa ma logiczną strukturę, a materiał badawczy jest przedstawiony w sposób czytelny. W tekście występują jednak drobne błędy językowe, terminologiczne i edytorskie, które powinny zostać skorygowane przy przygotowaniu publikacji. Należą do nich m.in. pojawiający się zapis „Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fr” zamiast „...-1Fe”, pojedyncze błędy jednostek i oznaczeń parametrów oraz niezręczności językowe. Nie mają one wpływu na merytoryczną ocenę pracy.

Pewne wątpliwości budzi we mnie także używanie zwrotu, pojawiającego się już w tytule: „*własności zmęczeniowych dwufazowych stopów tytanu wytwarzanych technologią przyrostową*”. Osobiście jestem raczej za stosowaniem terminu „właściwości” niż „własności”. Staram się także rozróżniać właściwości detali z danych stopów otrzymywanych tą lub inną metodą, od właściwości stopów, w przypadku których abstrahujemy od kształtu i wymiaru detali, a uwagę koncentrujemy na mikrostrukturze. Uznaję jednak, że są to kwestie możliwe do rozstrzygnięcia w różny sposób. Także w taki, z jakim mamy do czynienia w pracy.

Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Karoluka stanowi obszerne, spójne i wartościowe opracowanie dotyczące kształtowania właściwości zmęczeniowych detali ze stopów Ti-64 i Ti-55511 wytwarzanych metodą PBF-EB/M. Autor wykazał się znajomością aktualnego stanu wiedzy, umiejętnością zaplanowania i przeprowadzenia wieloetapowego programu badawczego oraz zdolnością do krytycznej interpretacji wyników uzyskanych zaawansowanymi metodami inżynierii mechanicznej i materiałowej.

Za najważniejsze osiągnięcie naukowe uznaję wykazanie, że o zachowaniu przyrostowo wytworzonych detali ze stopów tytanu pod obciążeniem cyklicznym nie decyduje sam globalny poziom porowatości, lecz w istotnym stopniu charakter, geometria i lokalizacja nieciągłości, w szczególności defektów typu lack-of-fusion. Doktorant wykazał także możliwość zmiany dominującego mechanizmu inicjacji pęknięcia przez odpowiednio dobrany proces HIP. Uzyskane wyniki mają jednocześnie istotną wartość poznawczą i technologiczną.

Stwierdzam, że rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce: prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną

Kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, wykazuje jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Wnoszę zatem o dopuszczenie mgr. inż. Michała KAROLUKA do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Bokiny 7 września 2026 roku



Signed by / Podpisano
przez:

Krzysztof Jan
Kurzydłowski
Politechnika Białostocka

Date / Data: 2026-09-08
08:47