

prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Konstrukcji Maszyn
Al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów
gbudzik@prz.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Karoliny Karolewskiej
pt. Analiza właściwości zmęczeniowych elementów ze stopu Ti6Al4V
wytworzonych technologią addytywną**

Podstawa recenzji

Pismo prof. dr hab. inż. Dariusza Barańskiego, Przewodniczącego Rady naukowej dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Bydgoskiej z dnia 22 grudnia 2022 roku oraz umowa dotycząca wykonania recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Karoliny Karolewskiej pt. Analiza właściwości zmęczeniowych elementów ze stopu Ti6Al4V wytworzonych technologią addytywną.

1. Wprowadzenie

Tematyka przedstawionej do recenzji dysertacji dotyczy badań właściwości elementów wykonanych ze stopu Ti6Al4V z zastosowaniem technologii przyrostowej opartej o spajanie proszku metalu w złożu skoncentrowaną wiązką energii emitowanej z lasera, który to proces został ujęty w nomenklaturze znormalizowanej jako Powder Bed Fusion – PBF, a jego odmianą jest technologia Direct Metal Laser Sintering – DMLS, opatentowana przez firmę EOS. Technologie addytywne określane również od kilku lat jako druk 3D znajdują coraz szersze zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu m.in. kosmicznego, lotniczego, samochodowego, energetycznego, przetwórczego czy maszynowego, szczególnie w obszarze przyrostowego przetwarzania sproszkowanych stopów metali. Wraz z rozwojem technologii istnieje zapotrzebowanie na prowadzenie badań w tym zakresie a także na normowanie poszczególnych etapów procesów przyrostowych począwszy od opracowania modeli numerycznych przez obróbkę danych programowych aż do samego procesu wytwórczego i kontroli jakości wyrobów. Można również zauważyć dużą dynamikę prac normalizacyjnych podejmowanych przez Komitet Techniczny Obróbki Ubytkowej i Przyrostowej oraz Charakterystyki Warstwy Wierzchniej Polskiego Komitetu Normalizacyjnego i zespoły tematyczne Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej ISO co skutkuje pojawianiem się nowych norm dotyczących technologii przyrostowych nie tylko w zakresie samych procesów, ale również dedykowanych do konkretnych obszarów zastosowań np. lotnictwa, medycyny czy kształcenia personelu w zakresie technologii addytywnych.

Biorąc powyższe pod uwagę należy uznać, że przedstawione w dysertacji zagadnienia są aktualne a podjęcie opisanej tematyki badawczej jest w pełni uzasadnione z punktu widzenia rozwoju nauki i aplikacji przemysłowych.

2. Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedmiotowa praca składa się z siedmiu rozdziałów i liczy 192, strony zawiera również wykaz skrótów i oznaczeń, streszczenie w języku polskim i angielskim i bibliografię liczącą 142 pozycje literaturowe. Kolejność rozdziałów i podrozdziałów tworzy logiczny i spójny układ, kolejno przedstawiane treści rozwijają i uzupełniają myśli zawarte w częściach poprzedzających. Dysertacja jest wydana w formie książkowej, zawartość pracy jest odpowiednio i starannie zilustrowana, co pomaga we właściwym zrozumieniu zawartości merytorycznej.

Rozdział pierwszy pracy to Wstęp, w którym Doktorantka przedstawia krótki rys historyczny rozwoju technologii przyrostowych oraz charakterystykę procesów wykorzystujących w druku 3D sproszkowane stopy metali. Omówione zostały również skrótowo wybrane obszary zastosowań technologii addytywnych.

Drugi rozdział dotyczy właściwości stopów tytanu rozpoczynając od ich klasyfikacji poprzez metody wytwarzania sproszkowanego tytanu i obszary zastosowań stopu Ti6Al4V z uwzględnieniem jego właściwości mechanicznych.

Rozdział trzeci przedstawia analizę literaturową właściwości próbek i modeli wykonanych ze stopu Ti6Al4V wytwarzanych z zastosowaniem procesu przyrostowego z uwzględnieniem kierunku budowania warstw, parametrów procesu, naprężeń własnych, struktury geometrycznej powierzchni, mikrostruktury materiału oraz obróbki cieplnej. Rozdział kończy się obszernym zestawieniem tabelarycznym właściwości mechanicznych stopu Ti6Al4V w odniesieniu do wybranych etapów procesu technologicznego przedstawionych w różnych opracowania literaturowych. Rozdział ten stanowi właściwie analizę stanu zagadnienia, będącą podstawą do sformułowania tezy, celu i zakresu dysertacji.

W rozdziale czwartym Autorka sformułowała tezę badawczą dotyczącą możliwości wykonania elementów konstrukcyjnych ze stopu tytanu Ti6Al4V metodą addytywną, które będą charakteryzowały się porównywalnymi lub wyższymi parametrami wytrzymałościowymi w odniesieniu do elementów wytworzonych tzw. metodą tradycyjną, szczególnie w warunkach statycznych i zmiennych obciążeń mechanicznych. Określone zostały również cele pracy i jej zakres.

Rozdział piąty zawiera wyniki badań doświadczalnych poczynszyszy od przedstawionego schematycznie programu badań własnych, następnie opisane są próbki do badań wykonane z prętów ciągnionych i wytworzone przyrostowo w procesie DMLS. Geometrię próbek przyjęto zgodnie z normą jako modele o przekroju okrągłym z częścią do analizy obciążeniowej i częściami chwytowymi. Opisano wyniki pomiarów cech geometrycznych przeznaczonych do badań w tym wartości średnic w wybranych przekrojach oraz chropowatości powierzchni. W kolejnej części rozdziału zawarte są wyniki badań wytrzymałościowych w warunkach obciążeń statycznych oraz w warunkach obciążeń

zmiennych stałoamplitudowych. Następnie wykonano badania twardości próbek, badania makrostruktury i mikrostruktury materiału.

W rozdziale szóstym opisano bardzo szeroko analizę wyników badań poczynając od analizy wyników wytrzymałości na rozciąganie a następnie analizy badań zmęczeniowych. W dalszej części rozdziału poddano analizie badania twardości oraz mikrostruktury i makrostruktury.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie i wnioski odniesione do osiągnięcia naukowego rozprawy oraz spostrzeżenia wynikające z przeprowadzonych badań i szczegółowych analizy tych wyników.

Bibliografia obejmuje wydawnictwa zwarte, książki, artykuły naukowe, opisy patentowe, strony internetowe i normy. W sumie występuje 141 pozycji, z których większość stanowi aktualne opracowania odnoszące się do tematyki dysertacji.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa zawiera bardzo bogaty materiał badawczy przedstawiający znacznie więcej informacji niż można by wnioskować na podstawie samego tytułu. Biorąc to pod uwagę być może lepiej oddawałby treść pracy tytuł, który przedstawia analizę właściwości próbek wytworzonych ze stopu Ti6Al4V w procesie DMLS. Dodatkowo analizując treść pracy w odniesieniu do tytułu można stwierdzić, że Autorka przedstawiła znacznie więcej analiz wyników badań niż tylko właściwości zmęczeniowe próbek, a z drugiej strony uogólniła kwestię elementów wytworzonych technologią przyrostową poddając badaniom próbki wykonane wyłącznie technologią DMLS. Proces DMLS jest tylko jednym z wielu procesów addytywnych, które są stosowane do przetwarzania proszków metali.

Przedstawiona w pierwszym rozdziale charakterystyka metod addytywnych jest dość powierzchowna i może sprawiać wrażenia chaotycznej, ponieważ charakterystykę tą rozpoczyna opis zalet druku 3D, następnie opisane są wybrane metody przetwarzania proszków w tym proszków metali i przykład stosowania technologii przyrostowych do wytwarzania części stosowanych w bolidach startujących w Formule 1. Rozdział kończy dość ryzykowne i nie poparte literaturowo stwierdzenie, że jednym z najczęściej stosowanych materiałów do druku 3D jest stop tytanu Ti6Al4V, pomijając jednocześnie cały szereg innych stopów metali stosowanych w przemyśle narzędziowym, energetycznym czy przetwórczym. Autorka we wstępie i analizie stanu zagadnienia nie uwzględniła żadnej pozycji norm określających procesy przyrostowe i metody badań elementów wytwarzanych przyrostowo i tu należy dodać, że obecnie dostępnych jest kilkadziesiąt norm obejmujących problematykę technologii przyrostowych a nad kolejnymi normami trwają prace realizowane przez zespoły tematyczne Polskiego Komitetu Normalizacyjnego oraz Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej ISO do których m.in. należą: ISO/ASTM DIS 52907 Additive manufacturing - Technical specifications on metal powders, ISO/ASTM FDIS 52941 Additive manufacturing - System performance and reliability - Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application, ISO/ASTM FDIS 52910 Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations. Przedstawione tu informacje, być może przydadzą się doktorantce, jeżeli będzie chciała kontynuować badania nad elementami wytwarzanymi metodami druku 3D.

Znaczą część analizy stanu zagadnienia poświęcono m.in. przeglądowi właściwości stopów metali stosowanych w procesach addytywnych, orientacji modeli przestrzeni roboczej drukarek 3D, wybranych parametrów spajania proszku przez oddziaływanie skoncentrowaną wiązką energii czy wpływy warstwowej budowy modelu na strukturę geometryczną powierzchni. Przegląd literatury obejmuje aktualne źródła, w tym normy dotyczące badań wytrzymałościowych, jednak jak już wcześniej wspomniałem nie uwzględnia norm tematycznych z obszaru technologii addytywnych.

Autorka na podstawie tej analizy sformułowała tezę, która zakłada, że wykonanie elementów konstrukcyjnych ze stopu tytanu Ti6Al4V metodą addytywną przy usytuowaniu próbek w kierunku zgodnym z osią nakładania warstw pozwala na uzyskanie takich samych lub wyższych właściwości mechanicznych w odniesieniu do elementów wytworzonych tzw. metodą tradycyjną. Określenie metody tradycyjnej jako toczenie, szlifowanie itp. jest mało precyzyjne nie wiadomo, czy uwzględnia np. procesy odlewnicze. Dodatkowo na wytrzymałość wyrobów wytwarzanych przyrostowo metodą PBF (Powder Bed Fusion) ma również wpływ jakość złoża proszkowego, nawet jeżeli założymy zgodność parametrów proszku z wymaganiami producenta drukarki 3D, to jakość proszków dostarczanych przez różnych dostawców może się różnić i często się różni, nie wspominając dodatkowo o degradacji złoża czy stosowaniu proszków jako zmieszanych nowych proszków z proszkami poprocesowymi. Pojawia się tu pytanie, jak w przypadku wielu prac doktorskich o charakterze badawczym czy sformułowanie tezy jest potrzebne i czy założona teza jest właściwa w kontekście przeprowadzonych badań.

Program badań własnych zakłada realizację testów, które mają na celu określenie wytrzymałości mechanicznej próbek badawczych ze szczególnym uwzględnieniem wytrzymałości zmęczeniowej. Doktorantka wybrała do badań jedną z przyrostowych metod PBF opartą na technologii DMLS, której schemat przedstawiła na rysunku 5.2, na którym jest błąd polegający na przedstawieniu przemieszczania lasera podczas procesu. W procesie DMLS laser jest nieruchomy, natomiast jego wiązka jest prowadzona przez odpowiedni układ mechaniczno-optyczny co zostało poprawnie przedstawione na rysunku 1.5 w odniesieniu do bliźniaczego procesu PBF dla technologii SLS. Próbka badawcza została zaprojektowana na podstawie normy dotyczącej badania metali na zmęczenie. W procesie badawczym wykonano pomiary geometryczne próbek, co jest istotne z punktu widzenia analizy wytrzymałościowej, jednak analiza np. wymiaru T1 z punktu widzenia konstrukcyjnego dość jest trudna i dyskusyjna ze względu na lokalizację przejścia promieni R-I oraz R-II w część walcową średnicy 6mm. Można to zauważyć w tabeli 5.1, szczególnie w odniesieniu do próbek wykonanych z pręta. W przypadku próbek wykonanych metodą DMLS, pominięto zupełnie proces przygotowania danych geometrycznych począwszy od wykonania modelu 3D-CAD przez obróbkę danych do formatów stosowanych w technologiach przyrostowych aż do samego przygotowania danych do procesu DMLS. Należy jednak wspomnieć, że dokładność modelu fizycznego wytworzonego technologią druku 3D jest zależna od procesu przygotowania danych numerycznych. Przeprowadzono badania chropowatości próbek badawczych w części pomiarowej, analizując parametry Ra, Rz oraz Rp dla próbek wykonanych metodą DMLS bez dodatkowej obróbki i próbek wykonanych poprzez toczenie pręta ciągniętego. Na końcu tego rozdziału pada stwierdzenie, że chropowatość powierzchni wpływa na trwałość zmęczeniową. Pojawia się pytanie, czy uzasadnione może być badanie próbek o porównywalnych parametrach SGP wynikających z zastosowaniu takiej samej obróbki wykończeniowej części czynnej (o średnicy $\varnothing 6\text{mm}$) np. toczenia czy szlifowania. Odpowiedź na to pytanie może stanowić pewien element dalszych badań Doktorantki.

Kolejna część pracy dotyczy badań wytrzymałościowych z wykorzystaniem stanowiska badawczego opartego na maszynie wytrzymałościowej Instron 8502 wyposażonej w ekstensometr 2620-601, których podstawą były odpowiednie normy. Dodatkowo do analizy odkształceń zastosowano kamerę BALSER acA4024-8gm oraz oprogramowanie Pylon pozwalające na porównanie serii zdjęć wykonanych podczas próby rozciągania z obrazem referencyjnym. Urządzenia te posłużyły również do realizacji badań wytrzymałościowych w warunkach zmiennych stałoamplitudowych. Na tej podstawie sporządzono szereg wykresów przedstawiających pętle odkształceniowo-naprężeniowe dla badanych próbek.

W części badawczej przedstawiono również wyniki pomiaru twardości próbek badawczych wytworzonych metodą DMLS oraz wytoczonych z pręta w postaci stabelaryzowanej nie załączono tu analizy wyników ani ich komentarza. Kolejny rozdział dotyczy badań makrostruktury i mikrostruktury próbek, rozpoczynając od opisu zastosowanej aparatury a następnie przedstawiając wyniki oraz ich krótki opis.

Kolejny rozdział zawiera obszerną analizę zrealizowanych kolejno badań. Można się zastanowić, czy z punktu widzenia czytelności pracy analiza wyników nie powinna być realizowana bezpośrednio po opisie badań, a rozdział ten mógłby wtedy opisywać globalną analizę i wynikające z niej trendy. Jest to oczywiście kwestia dyskusyjna nie wpływająca na wartość merytoryczną pracy. Omówienie wyników i ich analiza świadczą o wysokiej kompetencji Autorki w obszarze realizacji badań wytrzymałościowych oraz interpretacji wyników tych badań również w odniesieniu do danych literaturowych. Przeprowadzone badania potwierdzają w dużej mierze informacje zawarte w innych opracowaniach i również odnoszą się do charakterystyk wytrzymałościowych specyficznych a w niektórych obszarach typowych dla wyrobów wytwarzanych w procesach przyrostowych.

W podsumowaniu doktorantka odnosi się do osiągnięcia naukowego pracy, polegającego na wykazaniu różnic właściwości mechanicznych próbek wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V metodą DMLS w porównaniu właściwości próbek wytoczonych z pręta ciągnionego co jest wynikiem procesu badawczego. W mojej ocenie bardziej istotne jest z punktu widzenia naukowego przeprowadzenie analizy wyników badań w oparciu o założoną metodykę oraz próba znalezienia powiązań pomiędzy poszczególnymi etapami badań w kontekście określenia zależności właściwości mechanicznych oraz procesu technologicznego DMLS. Przedstawiona metodyka badawcza może posłużyć do realizacji kolejnych etapów badań pozwalających na ocenę właściwości wytrzymałościowych w odniesieniu np. do innych kierunków budowy modeli, kształtu i struktury konstrukcji podpierających model, zmiany parametrów samego procesu DMLS, jakości złoza oraz wielu innych czynników mających wpływ na wytrzymałość wyrobów wytwarzanych addytywnie. Autorka stwierdza również, że wyniki badań pozwoliły na częściowe przyjęcie założonej na początku tezy. Zgadzam się z tym twierdzeniem, przypominając jednocześnie, że samo formułowanie tezy dla realizacji prac o charakterze typowo badawczym jest dyskusyjne.

Do szczególnych wartości pracy - oprócz zrealizowanych badań i analiz – można zaliczyć:

- przedstawienie procesu badawczego dla próbek wytworzonych metodą DMLS, co może stanowić podstawę metodyki badawczej dla obiektów wytwarzanych w procesach PBF,
- opracowanie procedury analizy wyników badań ze szczególnym uwzględnieniem właściwości wytrzymałościowych i wytrzymałości zmęczeniowej,

- przeprowadzenie rozbudowanej analizy wyników badań, która ma charakter nie tylko osiągnięcia naukowego, ale może stanowić również istotny materiał o wartości aplikacyjnej.

W przedstawionej do oceny pracy można też dostrzec pewne drobne niedociągnięcia i braki, szczególnie w tematyce technologii przyrostowych, co może być spowodowane przez szczególne skupienie Autorki na głównym celu pracy dotyczącym realizacji badań wytrzymałościowych. Należy tu jednak stwierdzić, że Doktorantka dysponuje bardzo dobrym warształem w obszarze badań wytrzymałościowych i szeroką wiedzą w zakresie analizy i interpretacji wyników badań. Można tu dodać, że w procesie badawczym często nie ma potrzeby zgłębiania szczegółów technologii zastosowanej do wytworzenia próbek badawczych, jednak świadomość technologii może pozwolić na bardziej wnikliwą i konstruktywną analizę wyników badań.

Praca została wydana drukiem w formie książkowej, napisana jest poprawnym językiem polskim, z dobrą stylistyką, zawiera bogaty materiał ilustracyjny, zestawienia tabelaryczne a w tekście widnieją odpowiednie odniesienia do rysunków, tabel i wzorów, a także odpowiednie powołania na źródła literatury.

4. Podsumowanie

Przedstawiona do oceny dysertacja dotyczy bardzo ważnego tematu, jakim jest analiza właściwości zmęczeniowych elementów ze stopu Ti6Al4V wytworzonych technologią addytywną. Tematyka ta biorąc pod uwagę trendy panujące w nauce i przemyśle z pewnością jest przyszłościowa, ze względu na stały wzrost aplikacji technologii addytywnych. Temat pracy został zatem wybrany w sposób przemyślany i trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn obecnie wchodzącej w zakres dyscypliny inżynieria mechaniczna. Formalny układ pracy jest prawidłowy. Dysertacja odnosi się do aktualnej wiedzy, a w wielu obszarach wnosi treści nowe. Praca składa się z części teoretycznej będącej jednocześnie analizą stanu zagadnienia oraz części badawczej i analizy wyników badań będącej podstawą realizacji założonego i osiągniętego celu naukowego. Postawiona w początkowej części pracy teza została przez Autorkę właściwie udowodniona. Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktorantki w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne pozwalające na prowadzenie prac badawczych o charakterze naukowym i użytecznym.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Karoliny Karolewskiej pt. Analiza właściwości zmęczeniowych elementów ze stopu Ti6Al4V wytworzonych technologią addytywną, spełnia wymagania ustawy Ustawa z dnia 3 marca 2022 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2022 poz. 574) w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Grzegorz Budzisz