



Recenzja **rozprawy doktorskiej mgr inż. Dariusza MROZIKA**

*pt. **Badania właściwości mechanicznych wybranych materiałów wytworzonych w technologii FDM oraz próby ich modelowania***

Promotor: dr hab. inż. Łukasz PEJKOWSKI, prof. PBŚ

Recenzja została opracowana na podstawie pisma przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny *Inżynieria Mechaniczna* Politechniki Bydgoskiej dr hab. inż. Łukasza Muslewskiego, z dnia 08.01.2025r.

1. Ocena merytoryczna pracy

1.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska przedstawiona do oceny stanowi tekst jednolity wydany w postaci książki liczącej 188 stron w formacie A4. Rozprawę podzielono na 6 głównych rozdziałów numerowanych (poza bibliografią i streszczeniami w dwóch językach, umieszczonymi na końcu pracy). Analiza literatury stanowi ok. 30 stron. Znaczącą większość pozostałej objętości pracy zajmuje przedstawienie wyników prac eksperymentalnych zrealizowanych przez doktoranta w części praktycznej pracy. Układ jest stosunkowo typowy i akceptowalny dla rozpraw doktorskich przedstawianych do obrony w naukach inżynieryjno-technicznych skupionych na analizach i eksperymentach. Szczegółowe uwagi krytyczne dotyczące układu rozprawy zostały przedstawione w dalszej części recenzji.

Mam natomiast uwagi co do tytułu rozprawy. Jest on sformułowany w sposób wyglądający na roboczy i nie oddaje w pełni treści rozprawy – owe „próby modelowania”, tj. ich opis, stanowią około 100 stron rozprawy. Użycie określenia „próby” uważam za niewłaściwe w rozprawie o charakterze naukowym. W nauce tak naprawdę wszystkie aktywności eksperymentalne należałoby określać jako „próby”, bo badacz nigdy nie wie jakie będą ich końcowe efekty. Z tej perspektywy uważam, że tytuł rozprawy powinien brzmieć inaczej – ale ze względu na konkluzję recenzji nie wnoszę o jego zmianę.

1.2. Trafność i oryginalność podjętej tematyki badawczej

Rozprawa mgr inż. Dariusza Mrozika koncentruje się na analizie właściwości mechanicznych materiałów polimerowych wytwarzanych przyrostową techniką ekstruzji, tj. Fused Deposition Modeling (FDM) oraz na próbach ich modelowania konstytutywnego. Tematyka ta jest istotna z punktu widzenia rozwoju technologii przyrostowych, które w ostatnich latach bardzo mocno zyskały na znaczeniu w różnych gałęziach przemysłu, takich jak motoryzacja, lotnictwo czy medycyna.

Zrozumienie zachowania mechanicznego materiałów stosowanych w FDM jest kluczowe dla przewidywania ich zachowania w warunkach eksploatacyjnych oraz dla optymalizacji procesów druku 3D. Tematyka rozprawy w pełni mieści się w ramach dyscypliny inżynieria mechaniczna, zahaczając w naturalny sposób także o zagadnienia inżynierii materiałowej. Nie nazwałbym jednak tej pracy interdyscyplinarną – autor analizuje wyłącznie istniejące i znane materiały oraz metody ich charakteryzacji, nie wprowadzając nowości w dyscyplinie innej niż inżynieria mechaniczna.

Analiza literatury wskazuje, że wiele badań skupia się na wpływie parametrów procesu FDM, takich jak geometria i gęstość wypełnienia, na właściwości mechaniczne wydrukowanych elementów. Jednakże, w literaturze istnieje stosunkowo niewiele prac poświęconych wpływowi prędkości odkształcenia na właściwości mechaniczne materiałów FDM. Jest to moim zdaniem stosunkowo istotna luka poznawcza, ponieważ w warunkach eksploatacyjnych materiały te mogą być poddawane różnym prędkościom obciążeń, co wpływa na ich zachowanie mechaniczne. Ponadto, modelowanie konstytutywne materiałów polimerowych wytwarzanych metodą FDM jest zagadnieniem stosunkowo nowym i nie w pełni zbadanym. Chociaż istnieją prace dotyczące modelowania numerycznego właściwości mechanicznych struktur osiąganych w technice FDM, to jednak potrzeba dalszych badań w celu opracowania dokładniejszych modeli.

W tym kontekście recenzowana rozprawa wypełnia istotną lukę badawczą, dostarczając nowych informacji na temat wpływu prędkości odkształcenia na właściwości mechaniczne materiałów polimerowych wytwarzanych metodą FDM oraz rozwijając modele konstytutywne dla tych materiałów, przede wszystkim na drodze weryfikacji stosowalności istniejących modeli. Oryginalność pracy polega na połączeniu badań eksperymentalnych z modelowaniem numerycznym, co pozwala na lepsze zrozumienie zachowania tych materiałów i może przyczynić się do optymalizacji procesów druku 3D oraz projektowania elementów o nieco lepszych właściwościach mechanicznych. Jednocześnie, o ile tematyka jest oryginalna i podjęta trafnie, należy zaobserwować że jest ona też stosunkowo niszowa – w mojej opinii rozwiązanie problemu naukowego który postawił przed sobą autor pracy nie doprowadzi do znaczącego przełomu, jeśli chodzi o praktykę przemysłową czy wyznaczenie zupełnie nowych kierunków badań w dyscyplinie.

1.3. Uzyskane rezultaty i ich znaczenie dla nauki i praktyki

Rozprawa doktorska powinna stanowić samodzielne rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego. Z tej perspektywy, oceniając rozprawę mgr Mrozika, należy stwierdzić że spełnia ona ten wymóg. Zdefiniowany przez autora problem i postawiony cel zostały osiągnięte, na drodze skrupulatnych badań analitycznych i eksperymentalnych, a uzyskane wyniki przyczyniły się do ogólnego zwiększenia poziomu wiedzy naukowej w podjętej tematyce.

W rozprawie autor dostarczył istotnych danych eksperymentalnych na temat wpływu prędkości odkształcenia na właściwości mechaniczne polimerów wytwarzanych metodą FDM, co pozwala na poszerzenie wiedzy dotyczącej zachowania tych materiałów w warunkach eksploatacyjnych. Wyniki badań stanowią cenny, acz niskowy wkład w naukę, szczególnie w kontekście rozwijającego się obszaru technologii przyrostowych. Niewątpliwie mocną stroną rozprawy jest zastosowanie systematycznego podejścia eksperymentalnego, obejmującego różne prędkości odkształcenia oraz szczegółowe analizy wyników eksperymentów. Pozwoliło to na zebranie kompleksowych danych, które mogą służyć jako punkt odniesienia dla przyszłych badań oraz do weryfikacji i rozwoju modeli konstytutywnych materiałów polimerowych przetwarzanych technologiami druku 3D.

Zastosowane przez doktoranta modele konstytutywne stanowią stosunkowo nowe, ciekawe spojrzenie na precyzyjne przewidywanie właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych metodą FDM. Autor nie tylko wykorzystuje istniejące modele, ale także wprowadza adaptacje i modyfikacje dostosowane specyficznie do materiałów wytwarzanych metodą FDM. Zaproponowane przez doktoranta modele uwzględniają specyficzne cechy materiałów przyrostowych, takie jak anizotropia i zależność kierunkowa właściwości mechanicznych, co jest szczególnie ważne z punktu widzenia ich aplikacyjności. Dzięki temu praca w pewien sposób poszerza bazę narzędzi dostępną dla inżynierów i badaczy zajmujących się technologiami addytywnymi. Docenić należy także opublikowanie częściowych wyników w czasopismach posiadających współczynnik wpływu.

Należy jednak zwrócić uwagę także na kilka problemów w tym kluczowym aspekcie rozprawy. Autorowi należy przyznać, że przeprowadzone przez niego analizy i eksperymenty, sięgają bardzo głęboko – nie sposób odmówić staranności i bardzo szczegółowego podejścia w wybranej przez niego metodyce. Z pewnością poświęcił na przeprowadzenie analiz bardzo dużo pracy i wykazał się zaawansowanym warsztatem. Niestety, czytając wnioski nasuwa się obserwacja że nie przyniosło to wszystko znaczącego przełomu praktycznego. Owszem, wiedza została poszerzona, poczyniony został kolejny krok w zrozumieniu zachowania materiałów przetwarzanych metodą ekstruzji (FDM). Natomiast obserwacje autora – w podsumowaniu – o tym, że modelowanie zachowania obiektów wytwarzanych metodą FDM „stanowi wyzwanie” jest czymś co wiadomo od blisko dwóch dekad.

Praca, w mojej opinii, byłaby bardziej wartościowa gdyby autor spróbował odnieść się do wielu różnych obecnych w literaturze podejść do rozwiązania tych wyzwań, których z pewnością jest świadomy. Wspomniane zostało uwzględnienie modelowania konstytutywnego w metodzie elementów skończonych, ale autor nie podjął takiej próby i nie wskazuje szczegółowo jak można byłoby to zrobić. Autor nie uwzględnił także – nawet w analizie literatury czy we wnioskach – możliwości, jakie dają dzisiejsze systemy sztucznej inteligencji. Z pewnością włączenie sieci neuronowych czy uczenia głębokiego, choćby w analizie wyników, mogłoby zwiększyć wartość rozprawy. Zabrakło mi również próby odniesienia uzyskanych wyników do jakiegokolwiek realnej geometrii – przydałoby się wykonanie przykładowej części czy wyrobu i sprawdzenie, jak uzyskane wyniki mogłyby być uwzględnione w jego

konstrukcji czy wytwarzaniu (eksperyment walidacyjny). Z tego powodu nie uważam pracy za przełomowej, jednocześnie doceniając wkład pracy autora i uzyskane przez niego wyniki.

1.4. Poprawność formalno-językowa, stylistyczna i interpunkcyjna

Pod względem poprawności formalno-językowej, stylistycznej i interpunkcyjnej, praca stoi na poziomie akceptowalnym, biorąc pod uwagę ogólny poziom rozpraw w naukach inżyniersko-technicznych. Doktorant popełnił nieco drobnych błędów i nieścisłości o charakterze formalnym, edytorskim czy językowym. Błędy te najczęściej nie mają żadnego związku z merytoryką rozprawy – ale nieco utrudniają jej odbiór, stanowiąc także pewien kontrast – eksperymenty zaplanowane są i zrealizowane bardzo starannie, natomiast staranność opisu nie jest już tak duża. Nie występują jednak błędy rażące, a tych drobniejszych nie ma aż tak wiele – natomiast tekst rozprawy mógłby być jeszcze co najmniej jeden raz zweryfikowany językowo.

Poniżej wypisano tylko kilka przykładów błędów (jest ich więcej), ze wskazaniem stron w rozprawie, na których zauważono dany błąd.

1. „Własności mechaniczne” (w tytule rozdziału 2.1 i 2.2) to nieprawidłowe określenie. W tytule rozprawy jest tak jak powinno być – „właściwości mechaniczne”.
2. Zbyt duże „bogactwo” określeń charakteryzujących wytwarzanie przyrostowe – autor używa (bardzo blisko siebie) określeń takich jak: „technologia wytwarzania przyrostowego”; „metody przyrostowe”; „metody addytywne”; „procesy wytwarzania przyrostowego”; „kształtowanie przyrostowe” itp. Warto by ujednolicić, bo niewprawy czytelnik może zastanawiać się czy chodzi na pewno cały czas o to samo.
3. Błąd w deklinacji – „Metody przyrostowe umożliwiają: (...) Minimalizacja odpadów (...) Ekonomia małych serii (...)” itd. – str. 5. Cała ta lista punktowa jest niepoprawnie sformułowana, językowo, ale także jeśli chodzi o kwestie edytorskie (wielkie litery na początku). Jest w pracy więcej takich błędów.
4. Niewłaściwe używanie słów „wysoki” i „niski” – np. str. 63 „wysoka powtarzalność”, powinno być „duża powtarzalność”.
5. Mało czytelne przebiegi na wykresach – np. rys. 28, str. 48 – przebieg dla $10^{-2}s^{-1}$ oraz $10^{-5}s^{-1}$ mają w zasadzie (w druku) identyczny kolor i symbol, więc trzeba się domyślać który jest który (w tym wypadku na szczęście nie jest to trudne). Na wielu wykresach przebiegi nakładają się, więc można by próbować je rozdzielać lub w inny sposób zwiększyć czytelność.
6. Nieczytelne teksty na niektórych rysunkach, np. rys. 22. Wiele rysunków podobnej klasy znacznie różni się czytelnością: rys. 71 (czytelny) i rys. 72 (słabiej czytelny) i kolejne, co sugeruje pewien brak staranności.
7. Wiele przerw i pustych miejsc w tekście, wynikających z dużych rysunków czy tabel.
8. Dużo błędów interpunkcyjnych (przecinki).

2. Ocena metodologiczna pracy

2.1. Dobór literatury, umiejętność wykorzystania źródeł

Analiza dostępnej literatury została w mojej opinii przeprowadzona poprawnie, na poziomie akceptowalnym dla rozpraw doktorskich w dziedzinie i dyscyplinie. Zacytowana literatura jest aktualna i pasująca do zagadnienia. Mam jednak tutaj pewne uwagi krytyczne. Zdecydowanie widać w rozprawie mocne zorientowanie się na postawiony cel i zaplanowane prace praktyczne – część teoretyczna stanowi w zasadzie tylko podbudowę do bardzo rozbudowanej części praktycznej, z zacytowaniem głównie prac przydatnych w interpretacji przeprowadzonych eksperymentów i analiz. Można odnieść wrażenie, że autor przeanalizował i zacytował wybrane pozycje wyłącznie dlatego, żeby potwierdzić słuszność obranego przez siebie kierunku badań. Tymczasem powinno być odwrotnie – to analiza literatury powinna prowadzić do obrania specyficznego kierunku badań, a być może i do modyfikacji pierwotnych koncepcji (przyjętych na etapie planu badawczego), tak żeby dostosować prowadzone badania do aktualnego stanu wiedzy na świecie.

Druga uwaga krytyczna to brak typowego krytycznego podsumowania dostępnej literatury oraz szczegółowego sformułowania przesłanek umożliwiających pełne uzasadnienie podjętych w rozprawie badań. Tego typu krótkie uzasadnienie można odnaleźć w rozdziale 3.1, jest ono jednak bardzo uproszczone i nie jest wystarczająco przekonujące, przynajmniej w mojej opinii.

Podsumowując, autor udowodnił że potrafi korzystać ze źródeł naukowych – przeprowadzoną analizę uznaję jednak za nieco zbyt krótką, nie uwzględnia ona wszystkich kierunków i rodzajów badań, jakie można odnaleźć w literaturze światowej (czy nawet krajowej) od wielu lat w kontekście właściwości mechanicznych wyrobów wytwarzanych przyrostowo metodą FDM. Brak też w pełni przekonującego uzasadnienia do podjęcia badań opisanych w rozprawie. Zalecam w dalszych pracach naukowych większą staranność w tej materii.

2.2. Poprawność formułowania problemów i hipotez

W pracy nie sformułowano bezpośrednio problemów i pytań badawczych. Wynikają one pośrednio z treści analizy literatury oraz sformułowanego celu pracy. Co do celu pracy – jest on sformułowany w bardzo uproszczony sposób – poprawnie, lecz jako pojedynczy cel badawczy, bez podziału na cel główny i cele szczegółowe.

W kontekście mocno analitycznego charakteru rozprawy, jak również podjęcia przez autora próby zbadania stosowalności wybranych modeli konstytutywnych w modelowaniu właściwości mechanicznych materiałów wytwarzanych metodą FDM, jak najbardziej sensowne byłoby postawienie w pracy hipotezy – jednej albo dwóch. Zazwyczaj w pracach w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych nie ma takiej konieczności – tutaj jednak uważam, że praca mocno by zyskała gdyby autor – obok celu – postawił konkretne hipotezy i dążył do ich udowodnienia lub obalenia. Za raczej nieuzasadnione uważam niezrealizowanie przez autora weryfikacji statystycznej uzyskanych przez

niego wyników (co sam przyznaje). Przedstawione wyniki i przebiegi są bardzo obszerne, ale wniosek o tym, że „przynajmniej w pewnym zakresie modelowanie konstytutywne obiektów wykonanych w technologii druku 3D jest możliwe z wykorzystaniem już istniejących modeli” uważam za sformułowany bardzo nieprecyzyjnie i bez wystarczającego dowodu o charakterze statystycznym.

Pomimo pewnych braków uważam jednak, że rozprawa doktorska spełnia wymogi w tym zakresie, po przeczytaniu i przeanalizowaniu rozprawy można w miarę jednoznacznie uświadomić sobie, jakie problemy zostały w niej podjęte. Uważam jednak, że postawienie hipotezy i późniejsze jej udowodnienie na drodze analiz statystycznych podniosłoby wartość rozprawy.

2.3. Trafność doboru metod i narzędzi badawczych, umiejętność ich stosowania

Doktorant udowodnił w rozprawie, że potrafi rozwiązać problem naukowy który sam sobie postawił, poprzez realizację analiz i eksperymentów z użyciem odpowiednio dobranych narzędzi i technik. Mając konkretny pomysł na poprowadzenie rozprawy, zrealizował go – wielkim nakładem pracy, który należy docenić – w sposób rzetelny, metodyczny i skrupulatny. Przedstawiono wszystkie wyniki przeprowadzonych testów, w sposób dokładny i nie pomijając żadnych wartości (tabele i wykresy). Można byłoby tutaj dyskutować z celowością przedstawiania wszystkich wyników w treści rozprawy, zamiast przeniesienia części z nich np. do załącznika, jak postępuje się często w przypadku prac gdzie występuje bardzo duża objętość uzyskanych wyników – ale w tym konkretnym przypadku uważam formę przyjętą przez doktoranta za właściwą.

Mam natomiast uwagi co do zakresu przeprowadzonych badań. Uważam, że warto było go rozszerzyć (nawet kosztem „głębokości” i szczegółowości niektórych pozostałych eksperymentów czy analiz), co znacząco ubogaciłoby pracę i podniosło jej wartość naukową oraz praktyczną. W szczególności, dokonałbym następujących „rozszerzeń”:

- 1) zwiększenie zakresu analizowanych materiałów o materiały znacząco różniące się właściwościami od w miarę „typowych” PLA czy PA12 – np. PEEK, TPU czy materiały kompozytowe, celem sprawdzenia czy udowodnienia przydatności przyjętych modeli konstytutywnych w szerszym zakresie;
- 2) uwzględnienie wyników eksperymentów i modelowania z użyciem MES – próba potwierdzenia przydatności modeli konstytutywnych w bardziej „praktycznym” ujęciu przewidywania wytrzymałości wyrobów wykonywanych metodą FDM;
- 3) weryfikacja uzyskanych wyników na rzeczywistej geometrii – przydałyby się 2-3 przykłady części czy wyrobów i próba ich wytwarzania oraz zbadania właściwości mechanicznych i użytkowych – z uwzględnieniem i bez uwzględnienia optymalizacji (konstrukcyjnej i procesowej) wynikającej z wyników przeprowadzonych badań;

- 4) próba przeanalizowania wyników z użyciem modeli sztucznej inteligencji i wyciągnięcia z nich bardziej uogólnionych wniosków.

Przedstawione propozycje można potraktować jako kierunki dalszych badań – aczkolwiek uważam, że ich uwzględnienie w rozprawie było jak najbardziej realne i zwiększyłoby jej wartość.

2.4. Prawdliwość układu pracy i struktury podziału treści

Układ pracy spełnia podstawowe kryteria tworzenia rozpraw naukowych. Jak wspomniano na początku recenzji, rozprawę podzielono na 6 głównych rozdziałów (poza bibliografią). Są nimi:

1. Wstęp
2. Analiza stanu wiedzy
3. Cel badawczy i zakres badań
4. Materiały i metody badań
5. Wyniki i dyskusja
6. Podsumowanie

Co do zasady, układ jest dość prosty i autor trzyma się typowego schematu prac naukowych, oddzielając analizę stanu wiedzy od metodyki, a metodykę od wyników badań, co pozwala utrzymać przejrzystość rozprawy na dobrym poziomie. Jedyne problem, jaki zaobserwowałem, to łączenie przez autora wyników z ich dyskusją, od razu w momencie ich przedstawienia. Być może jest to właściwa decyzja z perspektywy objętości tych wyników i w trakcie ciągłego czytania rozprawy nie stanowi to kłopotu (rozprawę czyta się dobrze) – natomiast dla czytelnika, który próbuje przede wszystkim zapoznać się z dyskusją i interpretacją wyników, wyłuskanie wszystkich jej elementów stanowi pewien problem. W mojej opinii należałoby rozdzielić dyskusję od wyników, tak aby łatwo można było odnaleźć podsumowanie interpretacji autora w oddzielnym podrozdziale (lub kilku podrozdziałach).

Pewien problem stanowi także głębokość poziomów podrozdziałów – autor wprowadził podział aż do czwartego poziomu podrozdziałów (np. 5.2.1.1), co jest nieprawidłowe. Należałoby przemyśleć strukturę tak, aby unikać takiego podziału. Dodatkowo, spis treści uwzględnia wyłącznie podział do drugiego poziomu podrozdziałów, co utrudnia odnalezienie poszczególnych sekcji w wynikach badań, które są bardzo rozbudowane (100 stron i tylko 2 podrozdziały w spisie treści).

Zabrakło mi też w pracy dwóch zagadnień: analizy czasowo-ekonomicznej (ile zajmuje zbudowanie modelu konstytutywnego danego materiału? czy jest to opłacalne?) oraz podsumowania proceduralno-metodycznego budowy modelu danego materiału z użyciem przyjętych przez autora metod (innymi słowy, przydałby się rozdział, w którym podsumowany byłby proces budowy modelu materiałowego dla technologii FDM od A do Z, z wymienieniem wszystkich niezbędnych badań eksperymentalnych i założeń modelowania).

Podsumowując – praca ma akceptowalny układ, ale można byłoby go usprawnić przez rozdział dyskusji od wyników i reorganizację podrozdziałów 3. i 4. stopnia oraz uwzględnienie ich w spisie treści, jak również dodanie pewnych dodatkowych podrozdziałów

2.5. Uwagi i pytania

Najważniejsze zastrzeżenia, uwagi i pytania przedstawiono poniżej. Nie wymagam poprawy samego tekstu rozprawy – prosiłbym jednak doktoranta o odniesienie się do uwag w trybie pisemnym, aby można było część z nich przedyskutować na obronie.

1. Ile czasu zajmuje pełen proces zbudowania i weryfikacji modelu konstytutywnego dla danego materiału przetwarzanego metodą FDM? Czy procedura ta jest powtarzalna i stosowalna dla pełnego zakresu materiałów polimerowych stosowanych w FDM?
2. Jakie różnice, w ocenie autora, wystąpiłyby w próbie modelowania materiałów wysokowytrzymałych takich jak PEEK lub kompozytowych, takich jak PLA+CF?
3. W jaki sposób można uwzględnić wyniki uzyskane przez autora w konstruowaniu oraz planowaniu wytwarzania konkretnych części czy wyrobów techniką FDM? Jeśli to możliwe, proszę o podanie przykładu, jak taka optymalizacja mogłaby przebiegać, dla konkretnej geometrii (innej niż próbka) wybranej przez autora.
4. W jaki sposób uwzględnić model konstytutywny w obliczeniach MES? Jeśli to możliwe, proszę o podanie konkretnego przykładu, dla wybranego przez autora oprogramowania MES.

3. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska, w mojej opinii spełnia wymogi – autor udowodnił że posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie, w której aplikuje on o stopień doktora, jak również potrafi samodzielnie prowadzić pracę naukową. Stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, przedstawione w formie pracy pisemnej, opatrzonej streszczeniem w dwóch językach.

Zatem w świetle sformułowanych ocen stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Dariusza Mrozika pt. „Badania właściwości mechanicznych wybranych materiałów wytworzonych w technologii FDM” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018r. (Dz. U. 2024.0.1571) i jest zgodna z dziedziną nauk inżynieryjno-technicznych oraz dyscypliną inżynieria mechaniczna. W związku z tym **wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

