

Prof. dr hab. inż. Anna Rudawska
Katedra Informatyzacji i Robotyzacji Produkcji
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska

Lublin, dnia 26.02.2025 r.

Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Dariusza Mrozika
pt.: „Badanie właściwości mechanicznych wybranych materiałów
wytworzonych w technologii FDM oraz próby ich modelowania”**

**Dziedzina: nauki inżynieryjno – techniczne
Dyscyplina naukowa: inżynieria mechaniczna**

Podstawą sporządzenia niniejszej recenzji jest pismo Pana Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich z dnia 08.01.2025 r., nr 1/RNCS.520.20.2024 oraz Zawiadomienie nr 1/RNCS.520.20.2024 o wyznaczeniu na Recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora z dnia 08.01.2025 r.

1. Cel rozprawy i zakres badań

Określenie celu badawczego rozprawy oraz zakresu badań przewidzianych do realizacji w ramach rozprawy, zostało poprzedzone analizą literatury dotyczącej prezentowanej w rozprawie tematyki, na podstawie której przedstawiono uzasadnienie podjęcia się opracowania zagadnień przedstawionych w pracy.

W recenzowanej rozprawie przyjęto następujący cel badawczy w brzmieniu: „Celem badawczym było wyznaczenie charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych z uwzględnieniem efektu prędkości odkształcenia próbek wykonanych w technologii FDM z wybranych materiałów polimerowych oraz weryfikacja możliwości i zakresu zastosowania literaturowych modeli konstytutywnych do ich opisu”.

Cel badawczy implikował konieczność opracowania określonego zakresu badań, który obejmował badania wytrzymałościowe, w których określono wybrane właściwości mechaniczne próbek wykonanych z materiałów polimerowych (PLA oraz PA12), wytworzonych w technologii FDM oraz badania modelowe w środowisku MATLAB z uwzględnieniem wybranych modeli konstytutywnych oraz danych eksperymentalnych.

Realizacja przyjętego celu rozprawy wymagała zarówno głębokiej analizy teoretycznej omawianej problematyki, jak też przeprowadzenia przez Doktoranta obszernych badań eksperymentalnych oraz modelowych, których opis i wyniki są przedstawione w niniejszej rozprawie.

2. Zakres rozprawy

Rozprawa jest klasyczną naukową pracą łączącą badania eksperymentalne i modelowe, a jej tytuł jest adekwatny do zawartych w niej treści. Układ rozprawy jest przejrzysty i właściwy. Składa się ona z sześciu rozdziałów zawierających: wstęp, analizę stanu wiedzy dotyczącej omawianej problematyki rozprawy, cel badawczy i zakres rozprawy, charakterystykę materiałów i metod badawczych, wyniki i dyskusję wyników oraz podsumowanie.

W rozdziale pierwszym („Wstęp”) przedstawiono informacje wprowadzające do problematyki pracy.

Drugi rozdział („Analiza stanu wiedzy”) zawiera przegląd aktualnego stanu literatury związanej z tematyką rozprawy i składa się z pięciu podrozdziałów w brzmieniu: własności mechaniczne materiałów polimerowych, własności mechaniczne obiektów wytwarzanych przyrostowo z materiałów polimerowych, modelowanie konstytutywne zachowania obiektów wytworzonych z materiałów polimerowych. W rozdziale tym przedstawiono informacje na temat metod wytwarzania tworzyw polimerowych, klasyfikację tworzyw polimerowych uwzględniając, różne kryteria podziału, a także charakterystykę właściwości mechanicznych tworzyw polimerowych, w tym także właściwości materiałów polimerowych (elementów z nich wykonanych) wytworzonych z użyciem różnych metod przyrostowych. Drugi rozdział zawiera również opis modeli konstytutywnych oraz działania towarzyszące modelowaniu z wykorzystaniem omawianych modeli, a także charakterystykę wybranych modeli konstytutywnych wybranych do opisu analizowanych materiałów, tj.: modelu Launay i in. (LM), modelu Bergstroma-Boyce (BB) oraz modelu Three Network Model (TNM).

Trzeci rozdział rozprawy ("Cel badawczy i zakres badań") przedstawia uzasadnienie tematyki pracy, cel badawczy, zakres badań oraz spodziewane efekty, wśród których Doktorant wymienił pogłębienie wiedzy dotyczącej zachowania się obiektów wytworzonych z materiałów polimerowych w technologii druku FDM pod wpływem obciążeń mechanicznych oraz wskazanie, że istniejące modele konstytutywne dedykowane do modelowania tworzyw polimerowych, można w określonym zakresie stosować do opisu zachowania elementów wytwarzanych przyrostowo w technologii FDM.

W czwartym rozdziale zamieszczono charakterystykę materiałów i metod badawczych. Przedstawiono kształt i wymiary próbek (w kształcie wiosełek) wytworzonych metodą FDM (zgodnie z przedstawionymi wytycznymi i warunkami) z dwóch materiałów polimerowych PLA oraz PA12 (w postaci filamentów), z uwzględnieniem określonych warunków oraz zmian w stosunku do zaleceń norm ASTM D638-10 oraz ISO 527-2. W tym rozdziale zamieszczono również wyniki badań prób wytrzymałościowych, a także informacje na temat przygotowania danych do modelowania (podrozdział 4.1) oraz wiadomości na temat opracowanych narzędzi w środowisku MATLAB do każdego zastosowanego modelu.

Rozdział piąty zawiera prezentację wyników przeprowadzonych badań doświadczalnych (podrozdział 5.1) oraz modelowania (podrozdział 5.2) z wykorzystaniem trzech modeli opisanych w podrozdziale 2.3, a także dyskusję uzyskanych rezultatów modelowania (podrozdział 5.2.4).

Ostatni szósty rozdział stanowi podsumowanie rozprawy doktorskiej, w którym na podstawie otrzymanych wyników sformułowano wnioski oraz zamieszczono informacje na temat dalszych kierunków badań.

Rozprawa składa się z 188 stron i zawiera 118 rysunków oraz 64 tabel. Należy zaznaczyć, że w rozprawie zastosowano interlinię w postaci 1 wiersza, co wpłynęło na zmniejszenie ilości stron i tak obszernej rozprawy. W rozprawie znajduje się również streszczenie w języku polskim (str. 186) i angielskim (str. 188). Cytowana literatura obejmuje 102 pozycji w postaci książek, artykułów, norm i innych źródeł, przygotowanych zgodnie z kolejnością cytowania i obejmuje pozycje literaturowe polskie oraz pozycje zagraniczne w języku angielskim, opublikowane w większości zarówno w ostatnich latach. W zestawieniu literatury ujęto m.in. 3 normy (poz. 1, 10, 11) oraz 3 źródła internetowe (poz. 69, 94, 102), a także bliżej nieokreślone rodzaje publikacji (poz. 71, 73, 75. W wykazie literatury znajduje się jedna współautorska publikacja Doktoranta (poz. 59).

Analiza zakresu rozprawy i lektura poszczególnych rozdziałów pozwoliła zauważyć, że w pracy pojawiły się pewne nieścisłości i uproszczenia, które przedstawiono w punkcie 3 recenzji.

3. Ocena ogólna rozprawy

Ocena stanu wiedzy opisana w rozdziale drugim uzasadnia, że podjęcie się opracowania zakresu i rozwiązania problematyki rozprawy jest celowe, jak również uzasadnione. Analiza ta pozwoliła na wskazanie niewystarczającej i niedostatecznej wiedzy dotyczącej zagadnień związanych z wytrzymałością mechaniczną elementów wytworzonych z materiałów polimerowych w technologii FDM z uwzględnieniem zmienności obciążenia i prędkości odkształcenia (co zostało wskazane w podrozdziale 3.1).

Rozdział 2

W rozdziale drugim zamieszczono nazwy tworzyw polimerowych, a w dwóch przypadkach przedstawiono także skróty tych tworzyw. Myśl, że warto byłoby ujednolicić te zapisy i podać oznaczenia (symbole) dla wszystkich wymienionych tworzyw. Myślę, że ze względu na dość znaczną ilość stosowanych w pracy symboli/skrótów, warto byłoby przygotować w pracy wykazu stosowanych symboli i oznaczeń, a skrót metody przyrostowej pojawia się już w tytule rozprawy („FDM”). Dzięki temu zwiększona zostałaby czytelność pracy.

Rozdział 3

W rozdziale 3 w zakresie badań powinien zostać przedstawiony bardziej szczegółowy zakres badań, w tym rodzaje wykorzystanych modeli konstytutywnych (które zostały opisane w punkcie 2.3), a także konkretne uzasadnienie wybranych modeli. Moim zdaniem uzasadnienie wyboru modeli jest dosyć ogólne, a jak można zauważyć chociażby na podstawie klasyfikacji modeli konstytutywnych opisujących zachowanie materiałów polimerowych na rys. 12, wybrane modele stanowią grupę modeli dedykowanych do materiałów wykazujących cechy ciał lepko-sprężyste. Dodatkowo przedstawienie charakterystyki/właściwości wykorzystanych w badaniach materiałów polimerowych (poliamidu oraz polilaktydu) pozwoliłoby na uzasadnienie wyboru wykorzystanych w części modelowej - modeli konstytutywnych.

Rozdział 4

Przedstawiona powyżej uwaga dotyczy także rozdziału 4, w którym w pierwszych zdaniach stosowane są tylko symbole tworzyw, a nie są podane nazwy tych tworzyw. Dodatkowo

uważam, że Doktorant powinien przedstawić charakterystykę zastosowanych tworzyw polimerowych, także ze wskazaniem oznaczenia „12” w przypadku tworzywa PA (poliamidu). Jest to o tyle istotne, że analizowane są zachowania tych tworzyw podczas prób wytrzymałościowych. Oprócz tego warto byłoby podać argumentację dotyczącą wyboru zastosowanych tworzyw polimerowych.

Uważam, że gwoili czytelności, ten rozdział powinien zostać podzielony na podrozdziały (oprócz obecnie zawartych 4.1. Przygotowanie danych i 4.2. Modelowanie konstytutywne) zawierające charakterystykę wykorzystanych materiałów (czego nie zamieszczono w tym rozdziale) i opis próbek z nich wykonanych, a także opis metod badawczych (co sugeruje tytuł tego rozdziału). Natomiast w tej części znajdują się także wyniki przeprowadzonych badań wytrzymałościowych na rozciąganie oraz prób pełzania wraz z podsumowaniem „badań cyklicznych”, co powinno zostać umieszczone w części dotyczącej wyników badań, jako na przykład badania wstępne/pomocnicze itp.

Odnośnie informacji związanej z wykonaniem próbek, Doktorant przedstawił, że „przed przeprowadzeniem testu każda próbka została zmierzona w części pomiarowej za pomocą mikromierza. Dla każdej próbki wykonano sześć pomiarów - trzy dla każdej strony. Średnia wartość została użyta do obliczenia pola powierzchni przekroju poprzecznego”. Jednak nie zamieszczono żadnych informacji na temat tolerancji wykonania próbek, stąd też w pracy nie znajduje się informacja na temat dokładności wykonania próbek, wydrukowanych z zastosowaniem zarówno z materiału PLA, jak i PA12 w postaci filamentów o średnicy 1,75 mm.

W tym rozdziale wspomniano w zasadzie o warunkach przeprowadzenia testu rozciągania (str. 34 i str. 35), przy czym nie przedstawiono normy, zgodnie z którą test rozciągania został wykonany. Nie opisano rodzaju zastosowanego uchwytu/szczęk, a także nie przedstawiono informacji na temat początkowego ustawienia ekstensometru, czy też ewentualnie prędkość przesuwu trawersy oraz odległości szczęk/uchwytów.

Na rys. 20 przedstawiono schemat sterowana próbą monotonicznego rozciągania (co jest zrozumiałe), uwzględniając przy tym oznaczenia ϵ_1 oraz ϵ_2 , natomiast w dalszym opisie badań/metody badań, czy też w tabelach, te oznaczenia nie występują. W pracy zamieszczono zakres prędkości odkształcenia, także nie posługując się wymienionymi wyżej oznaczeniami, co jest nieco niezrozumiałe.

W tej części nie przedstawiono liczby wykonanych próbek (choć przedstawiono liczbę wykonanych prób: Tabele 6-9) ani np. tabeli dotyczącej oznaczeń próbek do badań lub zasady oznaczania próbek (np. 031 i 050.3). W tabelach występują zarówno określenia „Numery próbek...”, jak i „Oznaczenia wykorzystanych próbek...” i dlatego jest to nieco niespójne, zwłaszcza, że nie jest wyjaśniona zasada numeracji próbek. Nie odniesiono liczby próbek stosowanych w próbie wytrzymałościowej na rozciąganie do liczby próbek zalecanych w normie (której nie przedstawiono).

W tabeli 6 występuje prędkość odkształcenia wynosząca $1,6 \cdot 10^{-10}$, podczas gdy inne wartości są wielokrotnością liczby 10, więc warto byłoby przedstawić wyjaśnienia dotyczące przyjęcia w/w wartości do badań. Ponadto nie uzasadniono przyjętego zakresu prędkości odkształcenia podczas próby rozciągania, dodatkowo odmiennego dla badanych materiałów polimerowych (PLA oraz PA12).

Próby cykliczne powinny zostać opisane w bardziej szczegółowy sposób oraz powinny zostać wyjaśnione informacje zaprezentowane w tabeli 10 i tabeli 11. Informacja dotycząca literalnie wskazanych prób monotonicznych i cyklicznych pojawia się w podrozdziale 5.2, a szczegółowy opis tych prób powinien zostać umieszczony w części metodologicznej. Dodatkowo informacja na temat konkretnego wskazania trzech rodzajów prób: „monotonicznego rozciągania, pełzania i cyklicznych” została przedstawiona w pkt 5.2.4 na str. 169, a taka informacja powinna zostać zamieszczona nie tylko w części metodologicznej, ale także i w zakresie pracy.

Szczegółowy opis założeń/warunków dotyczących próby pełzania nie został w pracy zamieszczony. W tekście na str. 37 i na rys. 21 zamieszczono informację na temat czasu pełzania t_c , natomiast nie przedstawiono tej wartości, co jest o tyle zasadne, że na rys. 21 zilustrowano schemat sterowania próbą pełzania. Nie przedstawiono pełnych informacji dotyczących przeprowadzonych prób pełzania, w tym m.in. w odniesieniu do ilości próbek, naprężenia pełzania itd. (Tabela 8 i Tabela 9). Opis tabel 8 i 9 sugeruje, że próby zostały wykonane i że umieszczono w niej wyniki naprężenia pełzania. W tej części należałoby przedstawić metodykę badań, założenia itp., a nie wyniki badań. Ze względu na analizowanie zjawiska pełzania, warto podać granicę plastyczności badanych materiałów. Dla próby pełzania najczęściej ustala się wartość naprężenia – w zależności od wartości granicy plastyczności w temperaturze planowanej próby, a także czas próby. Nie wspomniano także, czy próbę pełzania prowadzono za pomocą określonej pełzarki.

Doktorant na str. 33 przedstawił informację, sugerującą, że w pracy zostaną przeprowadzone badania „w których próbka była ściskana”, natomiast w dalszej części metodologicznej nie występuje opis tego rodzaju badań wytrzymałościowych, a także w części dotyczącej wyników nie zauważono wyników takich badań.

Podsumowując informacje zamieszczono w rozdziale czwartym, można zauważyć, że Doktorant zastosował pewne skróty myślowe, które przyczyniają się do pewnego nieuporządkowania danych związanych z metodologią prowadzenia prac eksperymentalnych. Pewnym mankamentem rozdziału czwartego jest brak niektórych podstawowych informacji na temat właściwości zastosowanych materiałów, opisu wykonania prób monotonicznych i cyklicznych, argumentów na temat wyboru określonych wartości przyjętych do badań itp. Opis metodyki badań jest w niektórych fragmentach mało szczegółowy i miejscami nieco niekompletny.

Rozdział 5

W rozdziale piątym przedstawiono bardzo dużą liczbę wyników zarówno badań doświadczalnych, jak i dotyczących modelowania. Nieco niezrozumiałe jest zdanie: „Nie wszystkie z wyników badań eksperymentalnych zostały wykorzystane do wyznaczania parametrów modeli i modelowania. Pomiedzy materiałem PLA i PA12 wiele testów powtarza się z takimi samymi warunkami obciążenia, ale zbiór testów dla poszczególnych materiałów różni się”, czy też zdanie: „Większość przeprowadzonych prób rozciągania była powtarzana z dokładnie takimi samymi warunkami obciążenia z wykorzystaniem innych próbek w celu sprawdzenia powtarzalności wyników badań eksperymentalnych”.

Doktorant wspomniał (str. 47), że w pracy zrezygnowano z głębszej analizy statystycznej, uznając, że taka szczegółowość nie jest konieczna ze względu na przyjęty kontekst celu badania- weryfikacji możliwości modelowania konstytutywnego. A także nadmieniono, że „powtarzalność wyników jest na tyle zadowalająca, że możliwe było pominięcie dodatkowych obliczeń statystycznych bez wpływu na wiarygodność wniosków”. W odniesieniu do tych informacji pragnę poruszyć następujące kwestie.

- 1) Doktorant nie określił pojęcia „głębszej analizy statystycznej”, czy też „dodatkowe obliczenia statystyczne”.
- 2) W pracy nie jest przedstawiona powtarzalność wyników, więc na jakiej podstawie stwierdzono, że „powtarzalność wyników jest na tyle zadowalająca”.

- 3) W tej części rozprawy nie przedstawiono nawet podstawowej analizy statystycznej uzyskanych rezultatów eksperymentalnych, czy też nie opisano wyników takiej analizy, więc trudno ocenić „zadowalającą powtarzalność wyników”, zwłaszcza w kontekście rezygnacji z głębszej analizy statystycznej.
- 4) W podrozdziale 5.1 (Wyniki eksperymentów) zamieszczono na niektórych wykresach i tabelach tylko wybrane wyniki badań wytrzymałościowych na rozciąganie, nie przedstawiając uzasadnienia dla wyboru określonych warunków pomiarów.
- a) Przykładowo na rys. 28 umieszczono „wyniki próby monotonicznego rozciągania PLA – po cztery wyniki testów dla prędkości odkształcania 10^{-2} s^{-1} i pięć wyników dla 10^{-5} s^{-1} ”, ale nie wyjaśniono dlaczego wyniki dla takich prędkości zostały uwzględnione (np. nie są to skrajne przyjęte wartości prędkości odkształcania – Tabela 6), czy też dlaczego była różna ilość testów dla poszczególnych prędkości odkształcania.
- b) Dodatkowo w Tabeli 12, jeżeli zgodnie z zapisem na str. 35 „test dla każdej prędkości został powtórzony co najmniej trzykrotnie”, to nie przedstawiono informacji, czy podane wartości wielkości, uzyskanych podczas prób wytrzymałościowych, są to wartości średnie, a także nie zamieszczono żadnego odchylenia standardowego, informującego o szerokości rozproszenia wyników (wartości) od wartości średniej arytmetycznej.
- c) Oprócz tego na rys. 29 przedstawiono „wyniki próby monotonicznego rozciągania PLA z różnymi prędkościami odkształcania”, ale są to tylko pojedyncze próby, dla których nie przedstawiono argumentacji ich wyboru, o czym zresztą Doktorant wspomina na str. 49: „W prezentowanych wynikach ujęto po jednym wyniku z każdej przedstawionej prędkości odkształcania”.
- d) Poza tym w tabeli 6 przedstawionych jest 8 wartości prędkości odkształcania, natomiast w wynikach badań eksperymentalnych nie ujęto wszystkich przyjętych wartości tych prędkości oraz nie wyjaśniono takiego podejścia przedstawienia wybranych wyników.
- e) Na rys. 30 przedstawiono dwukrotnie wyniki dla naprężenia o wartości 10 MPa, stąd też pytanie czy nie wystąpiła tu pomyłka? Dodatkowo wydaje się, że legenda dotycząca wartości naprężeń powinna być uporządkowana, jeżeli są to wartości liczbowe. Natomiast, jeśli został przyjęty inny „klucz” przedstawienia wartości,

wówczas należałoby przedstawić ten opis w tekście itp. Podobne uwagi dotyczą pozostałych graficznych ilustracji wyników i ich opisu.

- f) W przypadku rys. 44 na rysunku zaprezentowano wyniki dla sześciu wartości prędkości odkształcania od 10^{-1} s^{-1} do 10^{-6} s^{-1} , podczas gdy w tabeli 7 znajduje się pięć wartości 10^{-1} s^{-1} do 10^{-5} s^{-1} , więc warto byłoby wyjaśnić takie podejście. Uwaga dotyczy także wymienionego rodzaju nieścisłości w przypadku przedstawiania innych tego typu wyników w tym podrozdziale.
- g) W przypadku wyników prób pełzania (np. rys. 45, rys. 46 i inne) wspomniano, że zamieszczono wyniki prób pełzania z różnymi poziomami naprężenia, podczas gdy na rysunkach występują wyniki niekiedy wyniki dla jednakowych wartości naprężenia.

5) Podrozdział 5.2

- a) W podrozdziale 5.2 (Modelowanie konstytutywne) moim zdaniem nie przedstawiono szczegółowych wyjaśnień dotyczących wyznaczonych wartości parametrów materiałowych dla obu tworzyw polimerowych z uwzględnieniem wykorzystanych modeli LA (tabela 14, tabela 22), BB (tabela 33, tabela 39) oraz TNM (tabela 49, tabela 55).
- b) Nie wyjaśniono wyboru prób badań wytrzymałościowych (oznaczonych symbolem cyfrowym), zresztą nieco odmiennych dla różnych modeli. Podstawy przeprowadzonych obliczeń/przyjętych prób tej części wyników nie są w pełni kompletne.
- c) W przypadku porównania wyników eksperymentalnych z wynikami poszczególnych modeli dla badanych materiałów nie zamieszczono w tabelach (np. tabela 15 i inne), a także w opisach wyników zaprezentowanych na odpowiednich rysunkach, informacji na temat przedstawianej wartości naprężeń maksymalnych z eksperymentu (średnia?, odchylenie standardowe?).
- d) W przypadku informacji zamieszczonych w tabelach dotyczących porównania wyników doświadczalnych odkształcenia maksymalnego prób pełzania wynikami poszczególnych modeli, nie wyjaśniono dlaczego zastosowano tylko niektóre wartości naprężenia uzyskane w badaniach doświadczalnych, a dodatkowo pojawiły się nowe wartości. Przykładem takiego podejścia jest m.in. tabela 16, w której zamieszczono tylko niektóre wyniki dla „zadanej wartości naprężenia”

- w porównaniu z tabelą 8, czy też wyniki umieszczone w tabeli 17 i 18, w których przedstawione są cykle (oznaczone 1,2,3,4,5), których nie opisano w części metodologicznej oraz nie podano dla nich wyników w części eksperymentalnej.
- e) W odniesieniu do wyników porównawczych dla materiału PA12 (pkt. 5.2.1.2) przedstawiono 8 i 9 cykli oraz odpowiednie wyniki, ale nie wyjaśniono istoty tych cykli – różnych ilości, przedstawionych dla nich wartości itp.
 - f) Doktorant powinien doprecyzować, co oznacza wyrażenie „zróżnicowane parametry próbek wykonanych w technologii 3D..” Dodatkowo na str. 168 pierwsze zdanie zawiera powtórzenia, co może prowadzić do pewnego niezrozumienia.

Podsumowując rozdział piąty dotyczący badań eksperymentalnych, można zauważyć, że zawiera pewne uproszczenia i skróty myślowe, które powodują, że niekiedy sposób graficzny przedstawianie wyników jest nieco niezrozumiały. Jednakże na uwagę zasługuje fakt, że Doktorant wykonał dużą liczbę badań eksperymentalnych oraz modelowych, a także przedstawił opracowania graficzne i tabelaryczne rezultatów tych badań, co wymagało zarówno specjalistycznej wiedzy teoretycznej, jak i praktycznej, a także przeznaczenia znacznego czasu na opracowanie tych wyników. Wartościowym elementem tego rozdziału jest dyskusja wyników modelowania, a także odwołanie się do wyników innych prac, choć nie porównano uzyskanych wyników w tej dysertacji z wynikami zaprezentowanymi na rys. 108 – rys. 118.

W ostatnim rozdziale szóstym „Podsumowaniu” przedstawiono istotę realizowanej pracy, a także wnioski wynikające z wykonanych badań, podkreślając zalety i ograniczenia przyjętych modeli konstytutywnych w zakresie przewidywania zachowania mechanicznego badanych materiałów polimerowych (PLA oraz PA12), co jest wartościowe w aspekcie lepszego zrozumienia oraz prognozowania zachowania mechanicznego materiałów wytwarzanych metodą FDM, a w efekcie może przyczynić się do zastosowania materiałów polimerowych wytwarzanych tą metodą w praktyce inżynierskiej.

Pragnę nadmienić, że dopiero w podsumowaniu Doktorant przedstawił w sposób znacznie bardziej przejrzysty i zrozumiały istotę pracy, czego nieco zabrakło zarówno w zakresie pracy, jak i w metodologii badań. Wskazano, że „Podczas licznych prób wyznaczania parametrów materiałowych stosowano rozmaite algorytmy optymalizacyjne, dobierano różne zestawy danych eksperymentalnych, ale żadne z rozwiązań nie wykazało istotnej przewagi nad

pozostałymi i proces ten w znacznej mierze obejmował metodę prób i błędów. Weryfikacji poddano również zestawy parametrów uzyskanych z wykorzystaniem komercyjnego narzędzia MCalibration [102]. Nie uzyskano jednak wyników jakościowo lepszych niż przy zastosowaniu parametrów materiałowych wyznaczonych samodzielnie”. Przedstawiony opis działań nie został uwypuklony w rozprawie, zwłaszcza w odniesieniu do informacji na temat doboru zestawu danych eksperymentalnych, czy stosowaniu kryteriów optymalizacyjnych. Odniesienie do tych niejasności także wskazano w części oceny rozdziału czwartego i piątego.

Dodatkowo wartościowym elementem jest również wskazanie zagadnień, które warto poddać dalszej analizie w celu poprawy jakości i dokładności modelowania zachowania mechanicznego materiałów wytwarzanych metoda FDM.

4. Uwagi dotyczące edycji rozprawy

Rozprawa napisana jest w sposób przejrzysty, a na podkreślenie zasługuje duża staranność edycyjna, choć pojawiają się drobne błędy edycyjne oraz interpunkcyjne, które przedstawiono poniżej.

1. Próbką przedstawiona na rys. 18 a) powinna zawierać oś symetrii.
2. Na rys. 24 i rys. 25 powinien zostać uzupełniony o opis rys. a i b wraz ze stosownym opisem w podpisie rysunku.
3. Na rys. 25 nie zamieszczono na osi x jednostki czasu.
4. W odniesieniu do rys. 34-41 oraz rys. 53-48, rys. 66, 71-77, 79-83, 86-92, 94-98, 101-107 warto było uwzględnić fakt, iż na rysunkach znajdują się trzy schematy i warto byłoby je opisać jako punkty a, b i c i umieścić w podpisie rysunku, stosowne opisy.
5. W przypadku rys. 24, 25, 108-118 opisy na tych rysunkach powinny być umieszczone w języku polskim.
6. Tabela 39 – przedstawione parametry materiałowe dotyczą materiału PA12.
7. W części dotyczącej prezentacji wyników Doktorant dla dwóch modeli stosuje skróty, tj. BB (Bergstrom-Boyce) oraz TNM (Three Network Model), natomiast dla pierwszego modelu stosuje jego pełną nazwę: Launay i in., choć w części teoretycznej skrót nazwy tego modelu jest przedstawiony, tj. LM.
8. Literatura - sposób zapisu cechuje się dużą starannością, choć pojawiają się drobne błędy:

- a) Pozycja [69] i [102] jest to ta sama pozycja literaturowa.
- b) Występuje brak ujednolicenia pisowni (zastosowanie dużych liter do opisu tytułu artykułu lub czasopisma, czy też brak skrótów imion, zgodnie z przyjętym stylem) – poz. 65, 66, 69, 70, 71, 74, 75, 86
- c) W przypadku nazw czasopism: podawane są zarówno pełne nazwy, jak i skróty czasopism (np. poz. 22, 24, 25, 35, 74, 80, 98), przy czym zapis skrótów czasopism jest różny, (np. 65, 66, 102).
- d) Występują trudne do zidentyfikowania pozycje lub niepełny opis publikacji: poz. 2, 7, 8, 53, 63, 67, 69, 70, 71, 73, 94, 102.
- e) W przypadku źródeł internetowych powinny być podane precyzyjne daty dostępu (nie tylko rok) do informacji na nich zamieszczonych, a wykorzystanych w pracy.

Przedstawione powyżej uwagi edycyjne i formalne nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy.

5. Wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter oryginalnej pracy naukowej, konsolidującej w sposób zrównoważony elementy poznawcze i inżynierskie. Została ona przedstawiona zgodnie z metodologią prowadzenia i prezentowania prac naukowych oraz została wykonana na dobrym poziomie merytorycznym, ze względu zarówno na sposób jej wykonania, jak i zakres przeprowadzonych badań doświadczalnych i badań modelowych, choć pojawiają się pewne zastrzeżenia dotyczące obu części rozprawy.

Doktorant w konsekwentny sposób zrealizował założony cel rozprawy, którym było wyznaczenie charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych z uwzględnieniem efektu prędkości odkształcenia próbek wykonanych w technologii FDM z wybranych materiałów polimerowych oraz weryfikacja możliwości i zakresu zastosowania literaturowych modeli konstytutywnych do ich opisu.

Wnioski sformułowane w rozprawie mają istotne znaczenie dla lepszego poznania zagadnień związanych z wyborem modeli konstytutywnych w celu przewidywania zachowania mechanicznego badanych materiałów polimerowych (PLA oraz PA12), w aspekcie lepszego zrozumienia oraz prognozowania zachowania mechanicznego materiałów wytwarzanych metodą FDM. Na podstawie wykonanych badań eksperymentalnych i modelowych możliwe było przedstawienie zalet i ograniczeń

analizowanych modeli konstytutywnych w przewidywaniu zachowania mechanicznego materiałów polimerowych wraz z wskazaniem zgodności modeli w odniesieniu do analizowanych materiałów (PLA oraz PA12). Przedstawiona do oceny praca doktorska, oprócz aspektów naukowych, ma również duże znaczenie poznawcze, gdyż może przyczynić się do zwiększenia obszaru zastosowania materiałów polimerowych wytwarzanych metodą przyrostową FDM w praktyce inżynierskiej.

Uzyskane wyniki badań stanowią weryfikację założonego celu rozprawy i pozwalają na wniesienie istotnej wiedzy w wybrany obszar inżynierii mechanicznej. Na uznanie zasługuje obszerny zakres badań eksperymentalnych oraz modelowych, z wykorzystaniem określonych algorytmów optymalizacyjnych i oprogramowania, które wymagały dużej wiedzy specjalistycznej teoretycznej i praktycznej, uzupełniony o staranną edycję rezultatów rozprawy, choć Doktorant nie ustrzegł się pewnych skrótów myślowych, czy też zastosował pewne zbyt duże uproszczenia, które powodują, że w niektórych przypadkach sposób graficzny przedstawiania wyników jest nieco niezrozumiały oraz niekiedy niezbyt wyczerpująco przedstawione są wyjaśnienia lub dane związane z metodologią prowadzenia prac eksperymentalnych.

Konkludując, na podstawie szczegółowej analizy przedłożonej rozprawy doktorskiej mgr inż. Dariusza Mrozika pt.: „Badanie właściwości mechanicznych wybranych materiałów wytworzonych w technologii FDM oraz próby ich modelowania”, pracę oceniam pozytywnie i stwierdzam, że rozprawa ta spełnia warunki określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r, poz. 1668.) w odniesieniu do rozpraw doktorskich. Upoważnia mnie to do przedstawienia wniosku o dopuszczenie Pana mgr inż. Dariusza Mrozika do dalszego procedowania.

Anne Ludawske