

dr hab. inż. Tomasz Dziubek, prof. uczelni
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
Al. Powstańców Warszawy 8
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 26.03.2025

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Wiktora SZOTA
pt. „OCENA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH ELEMENTÓW
WYTWARZANYCH TECHNOLOGIĄ DRUKU 3D Z ZASTOSOWANIEM
WIELOPARAMETROWYCH MODELI CIAŁ IDEALNYCH”**

Podstawa opracowania: pismo dr hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej z siedzibą w Kielcach z dnia 31 stycznia 2025 r. nr MAA-511/40/2025 dotyczące opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Wiktora SZOTA oraz stosowna umowa o dzieło.

Wymienione dokumenty odebrałem 03.02.2025 r.

1. Wstęp

W ostatnich latach zarówno w przemyśle wytwórczym jak i w zakresie prototypowania addytywne metody wytwarzania wykazują znaczną ekspansję w zakresie nowoczesnych technologii produkcyjnych. Metody druku 3D znajdują coraz więcej zastosowań w wielu obszarach nauki, ale również procesach wytwarzania elementów maszyn produkowanych z wszelkiego rodzaju materiałów niemetalowych jak i proszków metali. Tworzywa termoplastyczne, jak i fotoutwardzalne są szeroko rozwijane przez ich wytwórców oraz producentów drukarek. Tym samym konieczne jest posiadanie informacji dotyczących właściwości poszczególnych materiałów, szczególnie w zakresie wytrzymałości oraz trwałości w odniesieniu do badań wykonywanych na próbkach normatywnych ale również w odniesieniu do modeli funkcjonalnych, co nie zawsze jest wprost proporcjonalne. Dodatkowo dane podawane przez producentów materiałów dedykowanych dla technologii przyrostowych są ograniczone lub odnoszą się do próbek wytwarzanych z zastosowaniem wtrysku, co w znacznym stopniu odbiega od właściwości modeli wytwarzanych z zastosowaniem poszczególnych metod druku 3D. Opis procesów projektowania, wytwarzania oraz obróbki post-procesowej, wykazują spory deficyt informacji dotyczących właściwości

wytrzymałościowych i trwałościowych elementów otrzymywanych w wyniku zastosowania szerokiej gamy materiałów oraz metod addytywnych, co związane jest z zagadnieniem reologii ciała stałego. Zjawiska relaksacji naprężeń oraz pełzania w przypadku technik addytywnych stanowią istotny czynnik determinujący wybór technologii oraz materiału. Tym samym uzasadnionym jest prowadzenie badań z tego zakresu, gdyż zjawiska te mają nieco inny mechanizm niż w przypadku klasycznego ciała stałego. Występujące w wytwarzanych elementach naprężenia wynikające z zastosowanej technologii, czy materiału mają znaczenie w odniesieniu do trwałości oraz wytrzymałości wytwarzanych części maszyn i urządzeń. Szczególnie dotyczy to elementów konstrukcyjnych o skomplikowanych geometrycznie kształtach. Wynika to z faktu, że technologie przyrostowe umożliwiają relatywnie szybkie wytworzenie prototypu czy gotowego wyrobu użytkowego bez konieczności stosowania i projektowania skomplikowanych narzędzi oraz procesów obróbki ubytkowej ale ich specyfika generuje problemy z wytrzymałością oraz trwałością. Występujące naprężenia wynikające z zastosowanej technologii lub parametrów samego procesu mogą znacznie zmniejszyć trwałość, nawet bez wpływu obciążenia zewnętrznego. Tym samym jawi się konieczność określenia właściwości mechanicznych, trwałościowych oraz wytrzymałościowych samych materiałów jak i wyrobów gotowych, gdzie nieodzownym jest ocena właściwości reologicznych.

Z tego powodu powyższe informacje dowodzą, że tematyka pracy jest aktualna i podjęcie jej przez Doktoranta jest uzasadnione. Uważam, że wyniki badań zawartych w rozprawie mają potencjał aplikacyjny możliwy do zastosowania w praktyce przemysłowej oraz prototypowaniu.

2. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Wiktora Szota pt. *„Ocena właściwości reologicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D z zastosowaniem wieloparametrowych modeli ciał idealnych”* opisuje kompleksowo w sposób teoretyczny i doświadczalny zagadnienia przedstawione w tytule i sformułowane jako cel i zakres pracy.

Rozprawa składa się z 309 stron, zawartych w 8 ponumerowanych rozdziałach oraz literatury, spisu rysunków, tabel, a także streszczenia pracy w języku polskim i angielskim, które nie są objęte numeracją, podobnie jak zawarty w pracy wykaz ważniejszych oznaczeń i akronimów. Bibliografia bazuje na źródłach krajowych oraz zagranicznych i została podzielona na poszczególne grupy, które obejmują 25 pozycji książkowych, 119 artykułów, 8 norm, 5 patentów oraz 16 źródeł internetowych, które właściwie zostały przywołane w tekście rozprawy. Uzupełniają 11 pozycji zdefiniowanych jako „inne”. Proporcje pomiędzy artykułami naukowymi i pozycjami książkowymi są właściwe i odpowiadają aktualnemu stanowi zagadnienia. Łącznie w rozprawie zamieszczono 122 rysunki oraz 51 tabel.

Pracę rozpoczyna *Przedmowa*, która została podzielona na 3 podrozdziały i poprzedzona jest wykazem najważniejszych skrótów, oznaczeń i akronimów. *Wprowadzenie* będące pierwszym z podrozdziałów jest syntetycznym wprowadzeniem do podjętego w pracy tematu, gdzie Autor mógłby pokusić się o szersze przedstawienie genezy problemu w zamian za przedstawiony *Rys historyczny* stanowiący podrozdział 1.2, który w moim odczuciu został zaprezentowany w sposób nieco chaotyczny. W moim mienianiu lepszym rozwiązaniem byłoby szersze przedstawienie metod, których dotyczy niniejsza praca, co mogłoby stanowić bardziej jednoznaczną genezę podejmowanego problemu. Tym samym możliwe byłoby zmniejszenie dużej jej objętości bez straty zawartości merytorycznej, a nawet jej podwyższeniu.

Podrozdział 1.3 dotyczy badań właściwości mechanicznych w odniesieniu do modeli wytwarzanych przyrostowo, jednak jego zawartość w głównej mierze odnosi się do metod MEX, a tematyka pracy ma znacznie szerszy zakres. W rozdziale pierwszym uwagę zwracają nieczytelne rysunki 1.1-1.5. Brak uszczegółowienia ich podpisów. Występują również nieścisłości wynikające częściowo z błędów stylistycznych, np.: (str. 32) „...Aktualnie grupą technologii przyrostowych....są:...”, (str. 35) „... Druk 3D jest coraz częściej wykorzystywany ze względu na niskie koszty wytwarzania...”. Pozostałe zaznaczyłem w tekście pracy.

Rozdział 2 to studium literaturowe, które nosi znamiona analizy stanu zagadnienia i właśnie ono powinno stanowić w moim odczuciu główny nurt niniejszej rozprawy. Autor zaprezentował prognozy rozwoju technologii przyrostowych, jednak mógłby szerzej przedstawić aktualny stan wiedzy z zakresu podejmowanej tematyki. Opisany stan wiedzy dotyczący reologii jest skompensowany i ogranicza wytyczenie jednoznacznej ścieżki postępowania. Warto byłoby szerzej przedstawić tytułowe zagadnienia oraz problemy z nimi związane.

Kolejny etap pracy dotyczy technologii, które zostały wzięte pod uwagę w toku realizacji części praktycznej niniejszej pracy. Na wstępie tego rozdziału pojawia się tzw. tekst wiszący. Zawarte podrozdziały sugerują technologie jakie zostaną wzięte pod uwagę w części badawczej, co nie do końca jednoznacznie przekłada się na sformułowany cel niniejszej pracy pod kątem analizowanych metod wytwórczych. W ogólnej ocenie rozdział ten jest merytorycznie poprawny.

Rozdział czwarty przedstawia zagadnienia związane z reologią ciała stałego i podobnie jak poprzedni zawiera na początku tzw. tekst wiszący. Został podzielony na pięć podrozdziałów i we właściwy sposób przedstawia zjawiska i modele reologiczne. Na stronach 71 i 76 Autor zawarł sformułowanie: „... w warunkach dynamicznego przyłożenia naprężeń...”. W mojej ocenie naprężenia są efektem zastosowanej technologii wytwarzania lub przyłożonego obciążenia. Szkoda również, że Autor nie pokusił się o syntetyczne podsumowanie analizy stanu zagadnienia, co umożliwiłoby czytelne uzasadnienie podjętego celu pracy oraz jego sformułowanie.

Opracowana i przedstawiona na podstawie literatury analiza stanu zagadnienia, pozwoliła na sformułowanie w rozdziale piątym właściwego celu, hipotezy

oraz zakresu pracy dotyczących weryfikacji właściwości reologicznych elementów wytwarzanych z zastosowaniem wybranych technologii addytywnych. Nasuwa się jednak pytanie, dlaczego Autor podaje w celu pracy jedynie metody SLS oraz FDM, a później informuje, że badania poszerzono o technologię PJM.

Rozdział szósty ukazuje zaplanowany program badań (tekst wiszący), a w kolejnych podrozdziałach przedstawia kształt próbek badawczych, zastosowane w procesie ich wytwarzania urządzenia oraz użyte materiały, jak również stanowisko do pomiarów właściwości mechanicznych tychże modeli. Sprecyzowano również zastosowany algorytm aproksymacji modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych oraz ocenę jego dopasowania. Strona 114 zawiera błąd stylistyczny *"...W tabeli 6.1 podano parametry technologiczne druku 3D zmienne, które..."*, warto byłoby uściślić co Autor miał dokładnie na myśli.

W rozdziale siódmym zawarto i opisano otrzymane wyniki badań dotyczące relaksacji naprężeń oraz pełzania materiałów przeprowadzone dla próbek badawczych wykonanych z zastosowaniem wytypowanych przez Autora materiałów i powiązanych z nimi technologii wytwarzania przyrostowego. Autor przeprowadził właściwe analizy badanych próbek dotyczące naprężeń własnych, jak i określenia w próbie statycznego rozciągania właściwości wytrzymałościowych. Poszczególne etapy procesu badawczego przedstawione zostały jako wyniki aproksymacji modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych. Zostały szeroko zobrazowane w formie graficznej oraz tabelarycznej.

W rozdziale 8. Autor przedstawił wnioski końcowe z przeprowadzonych badań. Zostały one podzielone na 9 ogólnych konkluzji, które dotyczą między innymi przyjętych modeli do opisu relaksacji naprężeń, zjawisk relaksacji naprężeń oraz pełzania w odniesieniu do modułów sprężystości, czy też zależności pomiędzy współczynnikami lepkości w odniesieniu do zjawiska reologicznego. Zawarte w pracy wnioski sugerują ponownie, podobnie jak cel pracy, dwie metody wytwarzania FDM oraz SLS. Nie ma w nich zawartych informacji na temat metody PJM. Niniejszy rozdział kończą syntetycznie nakreślone kierunki dalszych badań.

3. Ocena rozprawy

Dokonujący się na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat rozwój przyrostowych technik wytwarzania stał się potężną niszą dla zastosowań przemysłowych oraz działów zajmujących się prototypowaniem. Udział druku 3D w zastosowaniach bezpośrednio produkcyjnych ciągle wzrasta, co czyni zasadnym prowadzenie badań z zakresu implementacji różnego rodzaju materiałów do wytwarzania elementów użytkowych. Tym samym konieczne jest określenie właściwości mechanicznych stosowanych materiałów, co sugeruje, że podjęta w pracy tematyka związana z określeniem właściwości reologicznych jest słusznym i potrzebnym zagadnieniem. Badanie i ocena relaksacji naprężeń dla wyrobów uzyskiwanych bezpośrednio w wyniku procesu przyrostowego, są istotne z punktu widzenia rozwoju technologii addytywnych. Niezbędna w tym zakresie staje się

weryfikacja właściwości użytkowych, a przede wszystkim wytrzymałościowych oraz trwałościowych elementów części maszyn i urządzeń wytwarzanych metodami druku 3D. Tym samym podjęta przez Doktoranta, zdefiniowana w tytule niniejszej pracy, problematyka jest nader aktualna i zasługuje na uwagę.

Przedstawiona analiza rozprawy zawiera wystarczające, w mniemaniu recenzenta przesłanki do sformułowania oceny. Treść rozprawy jest zgodna z tematem zaakceptowanym przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Podjęty temat jest ważny zarówno z poznawczych, jak i praktycznych względów. Sformułowane w niniejszej recenzji uwagi nie umniejszają wartości materiału dowodowego pracy, w większości albowiem odnoszą się do sposobu prezentacji uzyskanych wyników lub są kanwą do dyskusji z Autorem. Nie mogą więc stanowić podstawy do kwestionowania wartości recenzowanej pracy.

Dotyczy to wybranych następujących problemów:

- 1) Biorąc pod uwagę przedstawione w rozdziale 6. rodzaje geometrii próbek badawczych nasuwa się pytanie czy wszystkie wykonane badania dla poszczególnych metod wytwarzania oraz zastosowanych materiałów wykonane zostały dla obu geometrii.
- 2) Dlaczego dla poszczególnych metod wytwarzania oraz materiałów liczby próbek są różne? W mojej ocenie zastosowanie takiej samej liczby próbek badawczych pozwoliłoby na zwiększenie wiarygodności wykonanych badań i opracowanych na ich podstawie wniosków.
- 3) Jaki był powód pominięcia metody wytwarzania PJM w zdefiniowanym celu pracy?
- 4) Kilukrotnie Autor używa stwierdzenia „*obciążenie naprężeniem*”. Czy według Doktoranta jest to prawidłowe określenie? W mojej ocenie naprężenia wynikają z zastosowanej technologii wytwarzania lub od przyłożonych obciążeń.
- 5) Przedstawione przez Autora wnioski dobrze byłoby podzielić na wnioski poznawcze i utylitarne oraz wskazać jednoznacznie kierunki dalszych badań.

W trakcie lektury pracy natrafiono na szczątkowo występujące błędy interpunkcyjne oraz formatowania, które zaznaczono bezpośrednio w pracy. Występują kilukrotnie tzw. „teksty wiszące” (str. 49, 70, 111, 128). Natrafiono również na sporadyczne niedociągnięcia natury edytorskiej lub językowej, oraz ortograficzne, do których można zaliczyć:

- Doktorant wielokrotnie stosuje stwierdzenia ogólne: „*mniejsze, większe itp.*” w odniesieniu do otrzymywanych wyników analiz bez poparcia ich konkretnymi wielkościami, co w pracach tego rodzaju nie jest wskazane,
- (str. 32) „*...Aktualnie grupą technologii przyrostowych....są:...*”,
- (str. 35) „*... Druk 3D jest coraz częściej wykorzystywany ze względu na niskie koszty wytwarzania...*”,
- (str. 129) „*...Wykres podobny kompletny testu dla materiału wytworzone technologią fotoutwardzania akrylowych żywic polimerowych przedstawiono. W publikacji [B21] przedstawiono podobne wykresy...*”,

- (str. 255) „...Z danych zawartych w tabeli 7.46 można zauważyć, że dla próbek poddanych naprężeniom ściskającym uzyskano 4 krotnie większe wartości procentowego spadku naprężenia niż w przypadku naprężeń ściskających...”,
- Biorąc pod uwagę mnogość otrzymanych i stabelaryzowanych wyników badań uważam, że wskazane byłoby graficzne kolorystyczne oznaczenie komórek max i min, co zwiększyłoby czytelność i ułatwiło wyciągnięcie wniosków,
- (str. 238) „...Próbki do badania poddano **naprężenią** ...”.

Przedstawione uwagi w dużej mierze można uznać, że mają charakter dyskusyjny i nie wpływają znacząco na wartość merytoryczną rozprawy. Dysertacja oparta jest na badaniach i analizie ich wyników, przeprowadzonych w oparciu o założony program z zastosowaniem nowoczesnej aparatury badawczej. Doktorant w procesie badawczym potwierdził założony cel pracy.

Recenzowana praca bazuje na badaniach popartych analizą stanu zagadnienia, która mimo, że w niektórych aspektach sprawia wrażenie chaotycznej, to jest wystarczającym prologiem do części praktyczno-badawczej. Zaprezentowane w pierwszej części rozprawy syntetycznie zebrane informacje z zakresu technik przyrostowych, stosowanych materiałów, jak i wykonane studium literaturowe wraz z zagadnieniami reologii ciała stałego ogólnie stanowią poprawnie opracowany teoretyczny zakres pracy. Stanowi to oryginalny wkład w część dotyczącą analizy stanu zagadnienia.

Druga część rozprawy zawiera poprawnie przygotowany proces badawczy oraz skrupulatną analizę otrzymanych wyników z zakresu zdefiniowanego w tytule pracy. Z punktu widzenia programu badań, można tutaj wyróżnić zagadnienia dotyczące:

- 1) Poprawnego wytypowania technologii wytwarzania oraz powiązanych z nimi materiałów.
- 2) Właściwy wybór parametrów poszczególnych procesów wytwórczych wraz z uwzględnieniem specyfiki procesów pod kątem struktury wypełnienia, czy położenia wytwarzanych próbek względem platformy roboczej.
- 3) Dobór modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych.
- 4) Prawidłowo wykonana ocena wpływu parametrów technologicznych na właściwości reologiczne.
- 5) Poprawnie przedstawiona ocena zastosowań modeli reologicznych do weryfikacji krzywych relaksacji naprężeń oraz pełzania modeli badawczych.
- 6) Właściwie wykonana ocena niepewności aproksymacji modelu reologicznego w odniesieniu do krzywych eksperymentalnych.
- 7) Wyznaczenie modułów sprężystości oraz współczynników lepkości dynamicznej dla wybranych materiałów stosowanych w addytywnych procesach wytwarzania.

Opracowana przez Autora metodyka badań została właściwie dostosowana do zamierzonego i poprawnie zrealizowanego celu badawczego. Recenzowana praca charakteryzuje się czasami nieco chaotycznym ale ogólnie logicznym i spójnym

układem. Poziom edycyjny jest również na zadowalającym poziomie z ilustracjami i wykresami w sposób czytelny przedstawiającymi wyniki zrealizowanych badań. Metodyka badań oraz zastosowane modele badawcze stanowią w znacznej części oryginalny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”. Stylistyka i język jakim została napisana wskazuje na dobre przygotowanie Autora do prowadzenia prac badawczych oraz Jego szeroką wiedzę w podjętej w niniejszej pracy tematyce. Praca posiada znaczący potencjał aplikacyjny, a merytorycznie zasługuje na pozytywną ocenę. Stwierdzam tym samym, że pozytywnie oceniam poziom merytoryczny rozprawy ze względu na dużą liczbę przeprowadzonych badań oraz wykonanych na ich podstawie analiz, jak i znaczenie tematu.

4. Wniosek końcowy

Na podstawie przedstawionej oceny dysertacji rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Wiktora SZOTA stwierdzam, że:

- wybór tematyki pracy został dokonany w sposób trafny i odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki objętej jej zakresem,
- przedstawione przez Doktoranta wyniki badań oraz wynikające z nich konstruktywne wnioski wnoszą nowe treści w wielu miejscach,
- zakres pracy spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, a podjęte w pracy zagadnienia zostały zrealizowane na zadowalającym poziomie,
- struktura i formalny układ pracy mimo występowania błędów są prawidłowe,
- wykonane przez Doktoranta analizy oraz przeprowadzone badania z zakresu przyrostowych metod wytwarzania i szeregu badań m.in. relaksacji naprężeń, opracowanie wyników, jak i wniosków nie budzą zastrzeżeń,
- zasadnicze cele pracy zostały w pełni osiągnięte w zakresie przyjętym przez Autora,
- założenia przyjęte w pracy, wyniki badań oraz przeprowadzone na ich podstawie analizy mogą być przedmiotem dalszych prac naukowych,
- szata graficzna pracy, podobnie jak jej treść zostały opracowane na zadowalającym poziomie.

Przytoczone fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Stwierdzam zatem, że praca mgr inż. Wiktora SZOTA pt.: „Ocena właściwości reologicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D z zastosowaniem wieloparametrowych modeli ciał idealnych” (promotor: dr hab. inż. Jerzy BOCHNIA, prof. PŚk, promotor pomocniczy dr hab. inż. Paweł ZMARZŁY, prof. PŚk) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571), jednocześnie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej "Inżynieria Mechaniczna" Politechniki Świętokrzyskiej o dopuszczenie Autora do jej publicznej obrony.

