

Dr hab. inż. Tomasz Garbacz, prof. uczelni
Katedra Technologii i Przetwórstwa
Tworzyw Polimerowych
Politechnika Lubelska

Lublin 3.03.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Wiktora Szota pt.

„Ocena właściwości reologicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D z zastosowaniem wieloparametrowych modeli ciał idealnych”

Recenzję opracowano na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, na posiedzeniu w dniu 23 stycznia 2025.

1. Zakres i ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana praca doktorska w postaci monografii formatu A5 została przygotowana pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Jerzego Bochnia, prof. Politechniki Świętokrzyskiej i promotora pomocniczego dr hab. inż. Pawła Zmarzły, prof. Politechniki Świętokrzyskiej. Rozprawa ma właściwą dla prac doktorskich strukturę redakcyjną. Praca obejmuje 309 stron, składa się z 7 rozdziałów, rozdziału podsumowania i wniosków, spisu literatury, spisu rysunków i tabel, streszczenia w języku polskim i angielskim. Spis treści oraz układ pracy jest właściwy i staranny. Rozdziały pracy obejmują analizę stanu wiedzy, tezę wraz z celem i programem badań, charakterystykę prowadzonych badań doświadczalnych, analizę wyników oraz ich interpretację, wnioski końcowe. Wykaz literatury obejmuje 184 pozycje, w tym 25 pozycji książkowych oraz 119 artykułów naukowych.

Rozdziały 1-4 stanowią część literaturową pracy. Rozprawę otwiera rozdział 1 zawierający wstęp przedstawiający rozwój technologii przyrostowych i ich podział. W rozdziale opisano role badań właściwości mechanicznych modeli wytwarzanych przyrostowo oraz znaczenie badań właściwości reologicznych modeli wytwarzanych przyrostowo.

W rozdziale 2 i 3 przedstawiono prognozy rozwoju technologii druku 3D, omówiono stan wiedzy dotyczący właściwości reologicznych materiałów otrzymywanych tego typu metodami oraz opisano zastosowane w badaniach doświadczalnych technologie przyrostowe oraz zasady ich bezpiecznego stosowania.

Rozdział 4 zawiera zagadnienia związane z reologią ciała stałego. W rozdziale tym opisano wybrane modele reologiczne, to jest modele Hook'a, Newtona, Maxwella, Maxwella-Wiecherta i Kelvina-Voigta oraz opisano zjawiska relaksacji naprężeń i pełzania.

W rozdziale 5 przedstawiono cel, tezę i zakres pracy zaś w rozdziale 6 plan badań oraz zakres wykonanych prac badawczych z uwzględnieniem parametrów technologicznych druku 3D metodami FDM, SLS i PJM.

W rozdziale 7 opisano badania oraz przedstawiono wyniki badań właściwości reologicznych, obejmujące moduł sprężystości wzdłużnej oraz współczynniki lepkości dynamicznej dla wszystkich badanych materiałów wytworzonych drukiem 3D.

Ostatni 8 rozdział rozprawy doktorskiej zawiera podsumowanie, wnioski o charakterze ogólnym oraz kierunki dalszych badań własnych. Ponadto rozprawa doktorska zawiera: bibliografię, spis rysunków i tabel, streszczenie w języku polskim i angielskim, a także załączniki dotyczące realizowanych prac wdrożeniowych.

Literatura i jej źródła zostały dobrane prawidłowo i celowo do tematu pracy. Na podkreślenie zasługuje aktualność cytowanej w pracy literatury, co świadczy o dobrym rozeznaniu Autora w tematyce rozprawy. Technika pisania pracy jest opanowana w stopniu bardzo dobrym. Rozprawa została starannie przygotowana pod względem edytorskim.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska posiada strukturę typową dla prac teoretyczno-doświadczalnych złożoną z analizy literatury, tezy, celu i zakresu pracy, metodyki badań, wyników badań oraz wniosków. Przyjęty tytuł rozprawy doktorskiej odzwierciedla w pełni problematykę pracy. Na szczególne podkreślenie zasługuje realizacja przez doktoranta prac doświadczalnych dotyczących wytworzenia, technologiami rozrostowymi, badanych materiałów oraz analizy ich właściwości reologicznych, co zostało przedstawione w 46 tabelach oraz w postaci graficznej na 80 rysunkach.

Podjęta tematyka pracy wpisuje się w jeden z wiodących trendów w rozwoju inżynierii mechanicznej dotyczących przyjaznych środowisku materiałów polimerowych, które mogą być otrzymywane w konwencjonalny sposób i pod względem właściwości

fizycznych i zastosowania będą zastępować obecne na rynku materiały lub wzbogacić ofertę materiałów inżynierskich.

Opracowanie oryginalnej metodyki badawczej określania właściwości reologicznych elementów wytwarzanych za pomocą technologii przyrostowych SLS i FDM z zastosowaniem wieloparametrowych modeli reologicznych (Maxwella-Wiecherta i Kelvina-Voighta) pozwala na wyznaczenie między innymi moduły sprężystości i współczynnika lepkości dynamicznej materiału z dokładnością umożliwiającą ich stosowanie w obliczeniach inżynierskich. Przeprowadzone w ramach doktoratu prace umożliwiły stworzenie wiedzy technicznej dla badań nad zjawiskami relaksacji naprężeń i pełzania elementów wytwarzanych technologiami druku 3D. Uzyskane wyniki badań podjętych podczas realizacji doktoratu przełożą się również na rozwój technik wytwarzania produktów technologiami przyrostowymi w skali krajowej.

Analiza stanu wiedzy z zakresu tematu Rozprawy pozwoliły na sformułowanie Doktorantowi następującej tezy pracy: Zjawiska relaksacji naprężeń i pełzania występujące w materiałach wytwarzanych technologiami przyrostowymi przy założonych parametrach technologicznych, zwłaszcza technologią FDM i SLS, opisać można przy pomocy wieloparametrowych modeli reologicznych, których moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej wyznaczyć można z dokładnością umożliwiającą ich stosowanie w obliczeniach inżynierskich.

Na podstawie przeglądu literatury zagadnienia, Autor wykonał syntetyczną ocenę stanu wiedzy w zakresie tematycznym rozprawy. Umiejętne i logiczne podsumowanie oceny umożliwiło Mu sformułowanie właściwych hipotez i określenie celu rozprawy który został sformułowany jasno i przejrzysto.

Celem rozprawy było określenie właściwości reologicznych elementów wytwarzanych za pomocą technologii przyrostowych SLS i FDM z zastosowaniem modeli ciał idealnych.

Cele szczegółowe pracy obejmują:

- Opracowanie modelu wieloparametrowego do oceny właściwości reologicznych wytwarzanych elementów.
- Ocena możliwości stosowania modeli ciał idealnych do opisanie właściwości reologicznych.
- Określenie niepewności aproksymacji w doborze modelu reologicznego do krzywej relaksacji i pełzania materiału.

- Określenie parametrów technologicznych wpływających na właściwości reologiczne elementów wykonywanych technologiami przyrostowymi FDM i SLS.

Aby zrealizować przyjęty cel Doktorant przyjął i wykonał prace, które w ujęciu ogólnym dotyczą:

- Analizy stanu wiedzy z zakresu tematyki pracy oraz przeglądu dostępnych materiałów do druku 3D w technologiach FDM i SLS .
- Wytworzenie przy zastosowaniu technologii FDM i SLS materiałów do badań doświadczalnych relaksacji naprężeń i pełzania.
- Oceny wpływu parametrów technologicznych wytwarzania na właściwości reologiczne badanych materiałów.
- Analiza możliwości stosowania modeli reologicznych do oceny krzywych relaksacji naprężeń i pełzania modeli wytwarzanych przyrostowo.
- Wyznaczenia modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej dla wybranych materiałów wytwarzanych przyrostowo.
- Analizy i oceny niepewności aproksymacji modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych.
- Opracowanie wyników badań, ich analiza, podsumowanie i wnioski.

Podsumowując, należy stwierdzić, że do najważniejszych osiągnięć Autora w opiniowanej rozprawie należą ustalenia przedstawione poniżej, to jest:

1. **Wykazanie**, że pięcioparametrowy model Maxwella-Wiecherta oraz pięcioparametrowy model Kelvina-Voighta jest wystarczający do opisu krzywych relaksacji naprężeń, co zostało potwierdzone poprzez wyniki badań, ich analizę statystyczną oraz wartości współczynników dopasowania potwierdzających, że modele te są silnie dopasowane do krzywych eksperymentalnych.
2. **Wykazanie i zdefiniowanie**, że parametry opisujące zjawisko pełzania oraz relaksacji naprężeń są związane ze współczynnikami lepkości dynamicznej. Wysokie wartości niepewności całkowitej dla tych parametrów mogą wynikać ze złożonej, warstwowej struktury materiału wytworzonego w technologii rozrostowej.
3. **Ustalenie**, że dla wszystkich badanych materiałów wytwarzanych technologiami: selektywnego spiekania proszków (SLS), ekstruzji materiału (FDM-MEX)

i utwardzania fotoakrylowych żywic polimerowych (PJM) zaobserwowano występowanie anizotropii właściwości reologicznych. Anizotropia ta wynikała z orientacji modelu na platformie roboczej drukarki 3D podczas procesu druku, w tym przypadku 0° , 45° , 90° .

4. **Określenie**, że występują znaczące różnice między relaksacją naprężeń ściskających, a relaksacją naprężeń rozciągających. W przypadku materiałów otrzymywanych technologiami addytywnymi, różnice wynikają w głównej mierze z warstwowej budowy modeli, przy czym siły występujące między warstwami są to głównie siły adhezyjne.
5. **Ustalenie**, że wyznaczone moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej mogą znaleźć praktyczne zastosowanie w projektowaniu oraz optymalizacji elementów mechanicznych wytwarzanych technologiami przyrostowymi. Umożliwiają one dokładniejsze modelowanie zachowań materiałów pod obciążeniem, co pozwala na poprawę trwałości i efektywności projektowanych rozwiązań inżynierskich.

W związku z powyższym zrealizowano główny cel pracy, a mianowicie opracowano i określono właściwości reologiczne elementów wytwarzanych za pomocą technologii przyrostowych SLS i FDM z zastosowaniem modeli ciał idealnych (Maxwella-Wiecherta i Kelvina-Voighta). Została również potwierdzona hipoteza badawcza, że zjawiska relaksacji naprężeń i pełzania występujące w materiałach wytwarzanych technologiami przyrostowymi, można określić przy zastosowaniu wieloparametrowych modeli reologicznych. Zaś wyznaczone moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej umożliwiającą ich stosowanie w praktyce inżynierskiej.

Podsumowując, wykonane przez Doktoranta badania oraz ich analiza dostarczają cennych informacji na temat możliwości stosowania wieloparametrowych modeli reologicznych, przy określaniu wybranych właściwości reologicznych, elementów wytwarzanych za pomocą technologii przyrostowych.

Poznana wiedza ma znaczenie dla dalszego rozwoju inżynierii mechanicznej oraz inżynierii materiałowej i technologii przetwórstwa kompozytów polimerowych, otwierając nowe możliwości w zakresie optymalizacji materiałów dla konkretnych zastosowań, projektowaniu komponentów inżynierskich, szczególnie w aplikacjach wymagających wysokiej wytrzymałości i odporności mechanicznej. Wyniki te mogą przyczynić się do

tworzenia nowych, bardziej efektywnych i zrównoważonych materiałów polimerowych, co ma kluczowe znaczenie zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i przemysłowego.

Recenzowana praca stanowi kompleksowe podejście w poszukiwaniu nowych, przyjaznych środowisku, materiałów polimerowych, a uzyskane wyniki oraz obserwacje mają znaczenie poznawcze, bowiem większość przebadanych materiałów nie była dotąd opisana w literaturze.

Pozyskana wiedza i prowadzone prace wdrożeniowe wskazują na potencjał nowej grupy materiałów i może być to przydatne do dalszego ich rozwoju, stanowić podstawę do opracowania technologii uzyskiwania tych materiałów i produktów w skali przemysłowej.

Oprócz wymienionych osiągnięć własnych, dobrze świadczących o poziomie i erudycji jej Autora, można znaleźć w rozprawie, błędy techniczne, edytorskie, sformułowania niefortunne oraz elementy dyskusyjne, wymagające w niektórych przypadkach wyjaśnień, a mianowicie:

W rozdziale 1 rozprawy, na rysunkach od 1.1 do 1.5, autor przedstawił przykładowe rysunki przedstawione w analizowanej literaturze patentowej, podpisane jako „schemat drukarki 3d”. Uważam, że poprawnie i właściwiej było opisanie tych rysunków jako „zasada drukowania” lub „zasada drukowania i schemat drukarki”.

Autor stosuje zamienne nazewnictwo materiałów polimerowych, np.

Str. 42, cytuję ”W procesie wytłaczania warstwowego materiału przeprowadzono badania reologiczne głównie nad materiałami: PLA, PLA wraz z domieszkami innych materiałów i akrylonitrylo-butadieno-styren [37,44,49–52,54,55].”

Przecież akrylonitrylo-butadieno-styren ma też swój „skrót” materiałowy, to jest „ABS”.

Str. 43, cytuję „PLA – max”, co to za materiał ?

Podobna dowolność w nazewnictwie materiałów występuje na rys. 3.3 (str. 58). Mamy tu wypisane nazwy tworzyw polimerowych w postaci skrótów, np. PS, PLA, PVC oraz nazwy po angielsku; Polyesters, Polyamides. Zaś na rys. 3.6 (str.63) autor podaje nazwy po polsku i nazwy handlowe; Poliamid 12 biały (PA2200).

W rozdziale 6 pracy (str. 111) autor pisze, cytuję, „Materiały wybrane do badań to:

- MED610, RGD720 – technologia PJM,
- ABS-P430, PLA MakerBot, ROSA-Flex 96A – technologia MEX,
- PA2200 – technologia SLS.

Materiały wytypowano ze względu na ich koszt i zastosowanie do wytwarzania modeli użytkowych.”

Brak jest jakiegokolwiek opisu składu materiałowego, właściwości fizyko-chemicznych, mechanicznych tych produktów, są tylko podane ich nazwy handlowe. **Proszę autora o przedstawienie opisu wybranych do badań materiałów.**

W pracy jest stosowana poprawna zasada opisu w przypadku wykresów graficznych, będących interpretacją uzyskanych wyników badań doświadczalnych. Jednak w jednej grupie wykresów, autor nie zastosował opisu wielkości badanych na osiach X i Y. Dotyczy to rysunków w rozdziale 7 rozprawy: 7.7, 7.8, 7.14, 7.15, 7.21, 7.22, 7.30, 7.31, 7.42, 7.43, 7.52, 7.53, 7.61, 7.62 oraz 7.72, 7.73. **Proszę również o wyjaśnienie takiej formy zapisu.**

W rozdziale 7.8, pod tytułem „Zestawienie naprężeń relaksacyjnych, ściskających, i rozciągających (str. 246-255) Doktorant przedstawia wyniki badań tych właściwości tylko dla jednego materiału, to jest PA2200, a gdzie jest to zestawienie dla innych badanych materiałów ? **Proszę również o wyjaśnienie takiej formy opisu i analizy wykonanych badań.**

Autor bardzo często stosuje personifikację opisując przebieg oraz wyniki uzyskanych badań. Takie sformułowania jak na przykład: „rysunek pokazuje” nie powinny być stosowane.

Doktorant stosuje w pracy poprawne słownictwo techniczne, ale zdarzają się nieliczne niefortunne opisy, które nie spełniają wymogów pracy naukowej oraz drobne błędy edycyjne. Na przykład:

Str. 6; autor stosuje pojęcie „basen topienia”.

Str. 63-64; stosowane jest nazwa, cytuję „ kształt cząstek-ziemniak”, „kształt ziemniaka”. Nie jest to słownictwo poprawne ani techniczne.

Str. 64; cytuję” ... poliamid 12, inaczej nazywany nylonem”; przecież „nylon” to jest tylko nazwa handlowa danego materiału.

Str. 68; autor stosuje słownictwo „marketingowe”, pospolite; na przykład „ cyfrowe tworzywo ABS” -?, czy też „materiały gumopodobne” ?

Str. 60; rys. 3.4; to nie jest schemat drukarki 3D, lecz zasada działania drukarki.

Str. 237; tabela 7.39; błędny opis tabeli. Przedstawione wyniki badań dotyczą materiału PLA, a nie PA2200.

Str. 68; rys. 3.10. Autor przedstawia w nim nazwy materiałów np. Tango, Durus, Rodzina Vero, DraftGray, Rigus, RGD 720, bez żadnego opisu jakie grupy materiałów są „ukryte” pod tymi nazwami handlowymi. Same nazwy handlowe nie określają ich składu materiałowego.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Wiktora Szota stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnosi naukową wartość dodaną do zagadnień związanych z dziedziną nauk technicznych i dyscypliną naukową Inżynieria Mechaniczna. Rozprawa doktorska zawiera wszystkie elementy niezbędne do jej pozytywnej oceny. Do nich zaliczam analizę materiałów źródłowych, związanych z przedmiotem badań, jasne sformułowanie własnej problematyki badawczej i wynikających z niej hipotez badawczych i celów pracy oraz konsekwentne wykonywanie zadań badawczych, zgodnie z przyjętymi zasadami metodologii realizacji pracy naukowo-badawczej.

Praca posiada prawidłową strukturę, jest logiczna metodologicznie i spójna merytorycznie. Jest napisana poprawnym i komunikatywnym polskim językiem technicznym. Ocena warsztatu badawczego Doktoranta jest pozytywna i zasługuje na uznanie za umiejętność stosowania dojrzałość w środków badawczych (aparatura, stanowiska badawcze i urządzenia technologiczne) oraz narzędzi symulacyjnych (specjalistyczne oprogramowanie komputerowe), co umożliwia Mu swobodne działanie w zakresie badań doświadczalnych. Przejawia się w tym dojrzałość naukowa Doktoranta i Jego przygotowanie do samodzielnej pracy badawczej. Przedstawione w pracy uwagi krytyczne nie obniżają jej oceny i powinny przyczynić się do doskonalenia warsztatu naukowego Doktoranta.

Autorski wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna stanowi: **opracowanie, przy zastosowaniu wieloparametrowych modeli reologicznych, charakterystyki relaksacji naprężeń i pełzania występującej w materiałach wytwarzanych technologiami przyrostowymi, zwłaszcza technologią FDM i SLS.**

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Wiktora Szota pt. „Ocena właściwości reologicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D z zastosowaniem wieloparametrowych modeli ciał idealnych” **spełnia wymagania ustawy o stopniach i tytule naukowym** (Art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, t.j. Dz.U. z 2024 r. poz. 1571) **i może być dopuszczona do publicznej obrony.**

Tomasz Gabecz