

Radom, dnia 2.08.2025 r.

Dr hab. inż. Remigiusz Michalczewski
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Technologii Eksploatacji
ul. K. Pułaskiego 6/10; 26-600 Radom

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Szczygła

Tytuł rozprawy:

„Ocena właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D do zastosowań biomedycznych”

Recenzja rozprawy doktorskiej została przygotowana na podstawie zlecenia Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna dr. hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk, nr MAA-511/71/2025 z dnia 20.05.2025 r (umowa XII/DEC-M/14RD/25). Promotorem niniejszej rozprawy jest dr hab. inż. Jerzy Bochnia, prof. PŚk. Promotorem pomocniczym jest dr hab. inż. Tomasz Kozior, prof. PŚk.

1. Charakterystyka ogólna

Przedstawiona do oceny rozprawa liczy 235 stron i składa się z 9 rozdziałów, podzielonych na zwarte tematycznie podrozdziały. Zacytowano 118 pozycji bibliograficznych, 10 norm, 5 patentów, jedno rozporządzenie i 20 stron internetowych.

2. Ocena podjętego tematu

Praca podejmuje aktualny i naukowo uzasadniony problem badawczy, koncentrując się na wpływie orientacji i parametrów technologicznych na właściwości mechaniczne materiałów i modeli drukowanych w technologii 3D do zastosowań biomedycznych. Temat ten wpisuje się w obecne trendy badań nad właściwościami mechanicznymi elementów wytwarzanych metodami przyrostowymi.

3. Tytuł pracy

Tytuł rozprawy doktorskiej: „Ocena właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D do zastosowań biomedycznych” prawidłowo oddaje jej zawartość.

4. Cel i zakres pracy

Na podstawie przeglądu literatury oraz wyników prac wstępnych Autor sformułował cele badań, cel dodatkowy oraz cel użyteczny. Celem badań pracy było oszacowanie właściwości mechanicznych elementów dla danej technologii druku 3D z uwzględnieniem orientacji ustawień na platformie roboczej oraz ocena wpływu parametrów technologicznych wydruku na wybrane wskaźniki właściwości mechanicznych. Celem dodatkowym badań była ocena wpływu geometrii badanych elementów i struktury geometrycznej powierzchni na niepewność pomiarów wartości parametrów charakteryzujących właściwości mechaniczne. Cel użyteczny pracy to zastosowanie wyników badań w obliczeniach inżynierskich i symulacjach komputerowych.

Cele pracy zostały sformułowane zrozumiale. Doktorant postawił sobie za cel analizę wytrzymałościową biomateriałów wykonanych w technologii druku 3D. Cele te mają nie tylko walory poznawcze, ale także duże znaczenie praktyczne, ponieważ są ściśle związane z aktualnymi wyzwaniami stawianymi materiałom wytwarzanym w druku 3D do zastosowań biomedycznych. Mimo to, przy redakcji celów Doktorant nie ustrzegł się pewnych nieścisłości. Użyte sformułowania, takie jak: „oszacowanie właściwości mechanicznych”, „ocena wpływu parametrów technologicznych” czy „wybrane wskaźniki właściwości mechanicznych”, są nieprecyzyjne. Podane cele odnoszą się raczej do zakresu pracy niż do konkretnych wyzwań badawczych, co sprawia, że brakuje im typowej dla celów badawczych specyfiki i mierzalności.

Dla osiągnięcia celów pracy Autor zaproponował obszerny program badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych. Program badań został podzielony na: wykonanie fizycznych modeli oraz badania zasadnicze i uzupełniające. Do wykonania modeli wirtualnych 3D wykorzystano modelowanie CAD oraz inżynierię odwrotną. Wytypowane materiały do badań to: MED610, PLACTIVE, ABS Medical oraz PA 2200. Zastosowane technologie przyrostowe PJM (PolyJet Matrix), FDM (Fused Deposition Modeling) oraz SLS (Selective Laser Sintering). Zakres pracy obejmował badania metrologiczne, wytrzymałościowe, tribologiczne, symulacje MES. Przedstawiony w pracy program badań zaplanowano prawidłowo, gdyż jego pełna realizacja gwarantuje, że podjęty w rozprawie temat oceny właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D do zastosowań biomedycznych zostanie rozwiązany kompleksowo.

5. Układ pracy, redakcja, interpretacja wyników

Praca ma przejrzysty, klasyczny układ i składa się z dziewięciu rozdziałów. Obejmują one: wprowadzenie, analizę literatury, cel i zakres pracy, program badań, zastosowane technologie i materiały, wyniki badań (doświadczalnych, uzupełniających, symulacji komputerowych) oraz podsumowanie i wnioski końcowe. Całość uzupełniają wykaz ważniejszych skrótowców i oznaczeń, spis literatury, streszczenie oraz spisy tabel i rysunków.

Rozdział pierwszy, zatytułowany „Wprowadzenie”, dostarcza podstawowej wiedzy na temat technologii wytwarzania przyrostowego. Autor przedstawia historię tej stosunkowo nowej technologii, jej znaczenie na rynku i w gospodarce oraz ewolucję obecnie stosowanych metod. Zgodnie z normą PN/EN ISO/ASTM 52900, procesy wytwarzania przyrostowego dzielą się na siedem głównych kategorii: fotopolimeryzacja objętościowa (VPP), wytłaczanie warstwowe materiału (MEX), selektywne spajanie sproszkowanego materiału (PBF), ukierunkowane stapianie dostarczonego materiału (DED), warstwowy nadruk płynnego materiału (MJT), spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem (BJT) oraz laminacja warstwowa przekrojów (SHL). Dla każdej technologii podano jej istotę, opis oraz schemat. Dla każdej z wymienionych technologii rozdział zawiera opis jej istoty, zasady działania oraz schemat. Ponadto, opisano w nim formaty zapisu danych, które przechowują informacje o geometrii powierzchni 3D. Charakter rozdziału jest podręcznikowy, a zawarte w nim informacje są aktualne i oparte na obowiązujących normach.

W rozdziale zatytułowanym „Analiza literatury” przedstawiono aktualny stan wiedzy w zakresie materiałów biokompatybilnych, technologii przyrostowych, wymagań dotyczących elementów medycznych, metod sterylizacji oraz wytrzymałości komponentów wytwarzanych metodami przyrostowymi.

W pierwszym podrozdziale autor szczegółowo omawia normatywne wymagania dotyczące oceny biokompatybilności, opierając się na normie PN-EN ISO 10993. Zwraca uwagę na konieczność identyfikacji zagrożeń biologicznych związanych ze składnikami materiałów i produktami ich degradacji. Bardzo szczegółowo opisano proces oceny specyficznych parametrów biologicznych, które są kluczowe w badaniach wyrobów medycznych.

W następnym podrozdziale Autor prezentuje dostępne doniesienia literaturowe na temat materiałów i technologii przyrostowych stosowanych w aplikacjach medycznych. Druk 3D stosowany jest w wielu działach medycyny, m.in.: w stomatologii, inżynierii tkankowej, medycynie regeneracyjnej, ortopedii, chirurgii, okulistyce i farmaceutyce.

Następnie przedstawia zawartość obowiązujących w Unii Europejskiej rozporządzeń dotyczących jakości i bezpieczeństwa wyrobów medycznych. Opisuje proces rejestracji i wprowadzania wyrobów medycznych do obrotu. W tym miejscu Doktorant stwierdza, że w związku z dynamicznym rozwojem technologii przyrostowych oraz materiałów stosowanych w aplikacjach medycznych konieczne są prace badawcze nie tylko nad poznaniem ich nowych potencjalnych zastosowań, ale również ograniczeń, w szczególności związanych z wytrzymałością. Kolejnym poruszonym problemem jest sterylizacja wyrobów medycznych. Wysoka temperatura sterylizacji może doprowadzić do deformacji elementów wytwarzanych przyrostowo.

W podrozdziale „Wytrzymałość elementów wytwarzanych przyrostowo” Autor porusza problem braku precyzyjnych wymagań technologicznych. Podkreśla, że powszechnie znanym faktem jest anizotropowość właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych przyrostowo. Charakterystyki jakościowe i wytrzymałościowe tych części zależą zarówno od kierunku wydruku, jak i od zastosowanych parametrów technologicznych. Autor zwraca również uwagę na trudności w wiarygodnym symulowaniu elementów drukowanych w technologii 3D za pomocą metody MES (metody elementów skończonych). Uproszczone modele często nie uwzględniają kluczowych zmiennych, takich jak warstwowa struktura materiału, co prowadzi do błędnych wyników.

W podsumowaniu Autor stwierdza, że w celu zapewnienia funkcjonalności i bezpieczeństwa wyrobów medycznych, już na etapie projektowania należy uwzględniać kierunek wytwarzania oraz wynikającą z niego anizotropię właściwości mechanicznych. Wniosek ten jest podstawą dla sformułowania celów pracy.

W rozdziale trzecim, zatytułowanym „Cele i zakres pracy”, przedstawiono cel główny badań oraz cele dodatkowe i użytkowe. W rozdziale tym Doktorant nie omówił zakresu pracy, ani nie wskazał kryteriów osiągnięcia postawionych celów.

Rozdział czwarty „Program badań” zawiera szczegółowe omówienie zakresu prac badawczych. W pierwszej kolejności zaplanowano wykonanie modeli fizycznych. Próbkę do badań została zaprojektowana przy użyciu programu SOLIDWORKS. Elementy do zastosowań biomedycznych (haki robota medycznego, protezę palca oraz protezę ortopedyczną nadgarstka) zaprojektowano z wykorzystaniem inżynierii odwrotnej. Opracowano modele 3D zapisano w formacie STL. Do badań wybrano trzy technologie przyrostowe PJM, FDM oraz SLS, cztery maszyny drukujące: Connex 350 (technologia PJM), MakerBot Sketch (technologia FDM), Zortrax M200 (technologia FDM) oraz Formiga P100 (technologia SLS). Badane materiały

biokompatybilne to: MED610, PLACTIVE, ABS Medical oraz PA 2200. Dla wytypowanych technologii i materiałów dokonano doboru parametrów technologicznych. Stosując wytypowane materiały i technologie wykonano próbki do badań wytrzymałościowych oraz elementy do zastosowań biomedycznych (haki robota medycznego, protezę palca oraz protezę ortopedyczną nadgarstka). Badania metrologiczne wymiarów i struktury powierzchni wykonano z użyciem mikrometru cyfrowego, mikroskopu pomiarowego MarVision MM320, skanera optycznego (Atos II Triple Scan) oraz mikroskopu konfokalnego (Leica DCM 8). Badania wytrzymałościowe rozciągania, zginania i ściskania wykonano na próbkach o znormalizowanych kształtach i wymiarach, z użyciem maszyn wytrzymałościowych (Inspekt Mini i Galdabini Quasar).

Wykonano ponadto testy reologiczne (relaksacja, pełzanie), pomiary twardości (Hildebrand Shore D), kąta zwilżania powierzchni (Tensjometr Attension Theta) oraz badania tribologiczne w układzie kula tarcza (tribometr TRB). Symulacje MES przeprowadzono w programach SOLIDWORKS oraz Ansys.

Doktorant wykazał się bogatą wiedzą i umiejętnościami w zakresie przyrostowych technik wytwarzania, a także biegłością w doborze metod badawczych. Przedstawiony w pracy program badań wyróżnia się: kompleksowym podejściem do problemu badawczego, zastosowaniem nowoczesnych technologii druku 3D, bogactwem wykorzystanych metod badawczych oraz użyciem narzędzi do symulacji komputerowych.

W rozdziale piątym, przedstawiono zastosowane technologie i materiały. W technologii PJM (PolyJet Matrix) należącej do kategorii warstwowego nadruku płynnego materiału (MJT), z wykorzystaniem drukarki Connex 350 wykonano elementy z przezroczystej żywicy (nazwa handlowa MED610). Do wykonania elementów z materiałów handlowych PLACTIVE oraz ABS Medical zastosowano technologię FDM (Fused Deposition Modeling), należącą do kategorii wytłaczania warstwowego materiału (MEX). Zastosowane drukarki to MarkerBot Sketch oraz Zortax M200. PLACTIVE to nanokompozyt PLA (polilaktyd) z dodatkiem cząstek nano miedzi. ABS Medical to ABS do zastosowań medycznych. Trzecia zastosowana technologia to SLS (Selective Laser Sintering). Próbkę z komercyjnego materiału PA 2200 (poliamid 12) zostały wykonane w tej technologii przy użyciu drukarki Formiga P100.

Rozdział szósty „Wyniki badań doświadczalnych” został podzielony na dwa podrozdziały: „Wybrane właściwości mechaniczne” oraz „Elementy do zastosowań biomedycznych”.

W pierwszym podrozdziale zostały zaprezentowane wyniki badań właściwości mechanicznych dla trzech wybranych technologii druku 3D (PJM, FDM i SLS). Próbkę,

wykonane z materiału MED610 przy użyciu technologii PolyJet Matrix (PJM), zostały wydrukowane w trzech orientacjach: 0°, 45° i 90°. Następnie poddano je badaniom wytrzymałościowym, obejmującym testy rozciągania, zginania i ściskania. Próbki wykonane dla orientacji 0°, czyli w prostopadle do kierunku rozciągania wykazały największą wytrzymałość oraz osiągnęły najwyższe odkształcenie w porównaniu do próbek wydrukowanych pod kątem 45° i 90°. Posiadały one znacznie większy zakres odkształcenia plastycznego, w porównaniu do próbek wykonanych w orientacji 90°, które pękały w zakresie odkształcenia sprężystego. Badania rozciągania i zginania potwierdziły anizotropowość właściwości mechanicznych próbek, która wynika z kierunku ich wydruku. W dalszej kolejności zbadano wpływ parametrów technologicznych PJM – takich jak orientacja, wysokość warstwy i tryb drukowania – na dokładność wymiarową, chropowatość oraz wytrzymałość na rozciąganie i pełzanie. Również te badania potwierdziły anizotropowość właściwości materiału, która zależy od parametrów wydruku.

W technologii FDM (Fused Deposition Modeling) wykonano próbki z materiałów PLACTIVE i ABS Medical. Próbki wykonano w trzech kierunkach: X, Y i Z. Najwyraźniejsze zjawisko anizotropii odnotowano w próbach rozciągania i zginania. W próbie ściskania uzyskane wyniki miały zbliżoną charakterystykę niezależnie od kierunku wydruku. Badania technologii FDM zostały rozszerzone o optymalizację z wykorzystaniem metody Taguchi. W wyniku przeprowadzonej analizy dokonano wyboru najkorzystniejszych parametrów technologii, tj. wysokość warstwy, gęstość wypełnienia, temperaturę dyszy, orientację, wzór wypełnienia i prędkość drukowania.

W kolejnym podrozdziale zaprezentowane zostały wyniki badań z użyciem technologii SLS dla materiału PA 2200. Próbki wykonano w trzech kierunkach wydruku oznaczonych X, Y i Z. Podobnie jak w przypadku wcześniejszych technologii zaobserwowano występowanie anizotropowości właściwości mechanicznych.

W podrozdziale zatytułowanym „Elementy do zastosowań biomedycznych” Doktorant zaprezentował wyniki badań gotowych wyrobów medycznych. Uchwyty hakowe robota medycznego wykonane zostały w technologii PolyJet Matrix (PJM) stosując parametry wybrane w badaniach wcześniejszych. Wyprodukowane uchwyty poddano analizie wymiarowej oraz próbom rozciągania. Protezę palca wykonano z materiału MED610 w technologii PJM. Protezę ortopedyczną nadgarstka wykonano stosując wszystkie trzy technologie (PJM, FDM oraz SLS) oraz odpowiednio materiały MED610, PLACTIVE i PA 2200. Ortezy poddano pomiarom

wymiarów geometrycznych, próbom ściskania oraz próbom relaksacji naprężeń przy stałym obciążeniu.

Rozdział „Wyniki badań doświadczalnych” zawiera bardzo dużo wyników badań. Na uwagę zasługuje wnikliwość Autora, który każde spostrzeżenie dokumentował wynikami badań. Świadczy to o dojrzałości badacza, który nie tylko relacjonuje wyniki prac, lecz także poddaje je analizie i poszukuje zależności. Rozdział wieńczy „Podsumowanie”. W podsumowaniu Autor wskazuje, że został osiągnięty cel badań, tj. zostały oszacowane właściwości mechanicznych elementów dla danej technologii druku 3D z uwzględnieniem orientacji ustawień na platformie roboczej oraz ocena wpływu parametrów technologicznych wydruku na wybrane wskaźniki właściwości mechanicznych. Stwierdza, że został osiągnięty cel dodatkowy, którym była ocena wpływu geometrii badanych elementów i struktury geometrycznej powierzchni na niepewność pomiarów wartości parametrów charakteryzujących właściwości mechaniczne.

Brak jednolitego planu badawczego utrudnia analizę i wyciąganie ogólnych wniosków z uzyskanych wyników. Na przykład, dla technologii PJM rozszerzono badania o metodykę eksperymentu planowanego oraz wykonano testy reologiczne. Natomiast w przypadku technologii FDM eksperyment poszerzono o optymalizację parametrów technologicznych z wykorzystaniem metody Taguchi.

W rozdziale zatytułowanym „Badania uzupełniające” Doktorant przedstawił wyniki badań tribologicznych oraz analizę finansową firm z branży medycznej. Nie jest jasne, dlaczego badania tribologiczne zostały wyodrębnione z rozdziału „Wyniki badań doświadczalnych”, skoro stanowią one istotną część badań materiałowych. Badania te przeprowadzono w układzie kula-tarcza i na ich podstawie wyciągnięto ogólny wniosek, że kierunek wydruku wpływa na charakterystyki tribologiczne materiału. W rozdziale tym zawarto również wyniki pomiarów zwilżalności próbek. Podrozdział „Analiza finansowa firm branży medycznej druku 3D” nie ma bezpośredniego związku pracą.

W kolejnym rozdziale „Symulacje komputerowe” zostały zawarte wyniki symulacji numerycznych przeprowadzone przy użyciu programu ANSYS i SOLIDWORKS na przykładzie materiału PLA. Symulacje wykazały, że w przypadku materiałów o skomplikowanej geometrii występują rozbieżności w porównaniu do rzeczywistego eksperymentu. Ponadto w symulacjach nie uwzględniono anizotropii właściwości mechanicznych.

Na podstawie uzyskanych wyników prac badawczych Doktorant sformułował wnioski zaprezentowane w rozdziale dziewiątym. Przedstawione wnioski mają charakter bardzo szczegółowy. Stanowią omówienie i podsumowanie najważniejszych wyników badań.

6. Uwagi merytoryczne i pytania

Lektura rozprawy skłania do refleksji nad poniżej sformułowanymi kwestiami:

1. Celem pracy było oszacowanie właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych w technologii druku 3D, z uwzględnieniem orientacji na platformie roboczej oraz wpływu parametrów technologicznych na wybrane wskaźniki właściwości mechanicznych. Proszę o uzasadnienie wyboru technologii i materiałów.
2. Uzyskane wyniki badań wykazały, że w przypadku obciążeń rozciągających i zginających występuje wyraźna anizotropia właściwości mechanicznych. Proszę określić, dla których materiałów i technologii anizotropia ta jest największa, a dla których najmniejsza.
3. Jakie wnioski z wyników badań posłużyły do zaprojektowania i wytworzenia elementów do zastosowań biomedycznych?
4. Dlaczego badania tribologiczne nie zostały uwzględnione w rozdziale szóstym, zatytułowanym „Wyniki badań doświadczalnych”?
5. Proszę omówić ograniczenia symulacji komputerowych w kontekście badanych materiałów i wykorzystanych technologii druku 3D.

Powyższe uwagi wyrażone w komentarzach i pytaniach, nie umniejszają merytorycznej wartości rozprawy. Proszę je potraktować jako zalecenie do uwzględnienia w przyszłych pracach i publikacjach.

7. Ocena dysertacji i wniosek końcowy

Praca została napisana starannie, zrozumiale, poprawną polszczyzną i z zastosowaniem właściwej terminologii technicznej. W rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł literaturowych, świadczący o dużej wiedzy Autora. Prawidłowo sformułowano problem badawczy i określono jego cel. Zaplanowano i zrealizowano badania, stosując nowoczesne narzędzia naukowe, według przyjętej metodyki badań. Autor logicznie zinterpretował uzyskane wyniki badań i na ich podstawie sformułował wnioski. Stopień rozwiązania zagadnienia oceniam jako bardzo dobry. Doktorant osiągnął postawione w rozprawie cele pracy.

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa mgr. inż. Pawła Szczygła wpisuje się w dyscyplinę inżynieria mechaniczna. Praca stanowi niewątpliwy wkład w istniejący stan wiedzy, a zawarty w niej materiał badawczy jest oryginalnym dorobkiem autora i ma walory poznawcze oraz praktyczne. Treść rozprawy świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Autora do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Uwzględniając uwagi i komentarze zawarte w recenzji, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Szczygła pt. „Ocena właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D do zastosowań biomedycznych” spełnia wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.). W związku z tym proponuję Radzie Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej dopuszczenie Autora do publicznej obrony, a po jej pomyślnym przebiegu – nadanie mu stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.