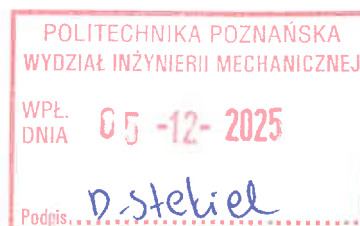


Rzeszów, 23.11.2025

prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Konstrukcji Maszyn
Al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów



Recenzja rozprawy doktorskiej
pt. OCENA WŁAŚCIWOŚCI ORTEZ STAWU SKOKOWEGO WYTWARZANYCH
PRZYROSTOWO Z KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH
autor: mgr inż. Justyna RYBARCZYK
promotor: dr hab. inż. Filip GÓRSKI, prof. PP
promotor pomocniczy: dr inż. Wiesław Kuczko

Podstawa recenzji

Pismo dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP, Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej numer DIM.075.240.2025 z dnia z dnia 23.09.2025 dotyczące powołania na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani mgr inż. Justynie RYBARCZYK w oparciu dysertację pt. Ocena właściwości ortez stawu skokowego wytwarzanych przyrostowo z kompozytów polimerowych.

1. Uzasadnienie podjęcia tematu dysertacji

Integracja dyscyplin naukowych jest podstawą do rozwoju nowych obszarów badawczych. Przykładem tego jest połączenie inżynierii mechanicznej z inżynierią biomedyczną i materiałową, co docelowo pozwala na kreację nowych technologii pozwalających na zwiększenie jakości usług medycznych, przyspieszenie procesu leczenia i rehabilitacji. Stosowanie nowoczesnej aparatury do realizacji skomplikowanych zabiegów czy operacji medycznych jest obecnie normą. Należy jednak pamiętać, że równie istotne jest odpowiednie zabezpieczenie pacjenta w okresie rehabilitacji i powrotu do zdrowia w narzędzia pozwalające mu na jak najlepsze wykonywanie codziennych czynności. W takim przypadku niezbędne jest stosowanie różnego rodzaju zewnętrznych zabezpieczeń części ciała, w postaci usztywnień czy ortez, które nie dopuszczają do uszkodzeń czy urazów jednocześnie wspomagają proces powrotu do zdrowia. Przemysłowe wytwarzanie usztywnień medycznych przeznaczonych do procesów rehabilitacyjnych obarczone jest pewną unifikacją

kształtów i rozmiarów, co nie daje możliwości idealnego dopasowania do pacjenta, szczególnie w okresie wzrostu. Z drugiej strony indywidualizacja tego typu wyrobów medycznych realizowana z zastosowaniem klasycznych metod modelarskich jest czasochłonna i pracochłonna. Proces leczenia często wymaga szybkiej reakcji ze względu na zdrowie pacjenta, z tego powodu niezbędne staje się stosowanie nowoczesnych rozwiązań opartych o technologie przyrostowe pozwalające przyspieszenie wytwarzania wyrobów medycznych w oparciu indywidualne zalecenia i preferencje pacjenta. Tym samym szeroko rozumiana inżynieria mechaniczna staje się częścią procesów medycznych, a procesy i technologie wspomagane komputerowo wykorzystywane są jako istotne narzędzia prowadzenia diagnostyki medycznej, realizacji operacji, procesów leczenia i rehabilitacji. Wyroby medyczne wymagają stosowania do ich wytwarzania odpowiednich procesów i materiałów. Dotyczy to zarówno właściwości mechanicznych jak również możliwości aplikacji w medycynie co wynika z interakcji z żywymi organizmami. Biorąc powyższe pod uwagę można zaobserwować potrzebę analizy i oceny właściwości mechanicznych wyrobów medycznych wytwarzanych przyrostowo, dlatego podjęcie tego tematu przez Doktorantkę jest w pełni uzasadnione. Obszar integracji inżynierii mechanicznej i biomedycznej rozwija się bardzo dynamicznie, wiele zagadnień jest w dalszym ciągu niedostatecznie rozpoznane i wymaga realizacji interdyscyplinarnych badań, które jako element przedstawionej do ceny dysertacji włączają się w ten trend.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji dysertacja liczy 180 stron, w początkowej części zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim oraz spis treści, następnie część merytoryczną, na końcu dysertacji zamieszczono bibliografię oraz spis ilustracji. Pracę rozpoczyna wstęp oraz część teoretyczna w której opisano klasyczne metody stosowane do wytwarzania ortez oraz przyrostowe wytwarzanie oparte o wytłaczanie termoplastycznych materiałów polimerowych (MEX – Material Extrusion) z użyciem wspomaganych komputerowo procesów pozyskiwania i obróbki danych geometrycznych. Analiza źródeł została przeprowadzona na podstawie literatury liczącej 186 pozycji książkowych i artykułów, norm oraz źródeł internetowych. Bibliografia zawiera aktualne pozycje odnoszące się do tematyki dysertacji. W części badawczej przedstawiono wyniki testów i analiz odnoszące się do założonych celów.

Struktura i układ rozprawy są prawidłowe, jej poszczególne części ułożono logicznie w odpowiedniej kolejności, dzięki temu możliwy jest właściwy odbiór przedstawionych treści.

Rozdział pierwszy stanowi syntetyczne wprowadzenie do treści zawartych w dysertacji oraz do zastosowań technologii przyrostowych w inżynierii biomedycznej, w celu personalizacji produktów medycznych.

W drugim rozdziale zawarto analizę stanu zagadnienia w obszarze procesów projektowania i wytwarzania ortez stawu skokowego stosowanych zarówno w leczeniu pourazowym, jak i w rehabilitacji. Autorka odniosła się do zastosowań nowoczesnych technologii, takich jak skanowanie trójwymiarowe i druk 3D, pozwalających na wytwarzanie ortez spersonalizowanych, dopasowanych do potrzeb pacjentów. Opisano również procesy projektowania ortez stawu skokowego w oparciu o pobieranie danych antropometrycznych pozwalające na pełną indywidualizację wyrobów medycznych tego typu, co zaczyna być istotnym trendem w praktyce klinicznej. Przedstawiono również klasyczny, manualny sposób wytwarzania ortez z wykorzystaniem gipsowego odlewu czy elastycznych miar do wykonania modelu referencyjnego. Ważnym elementem tego rozdziału jest również analiza metod badań właściwości wyrobów ortopedycznych w oparciu o wymagania i norm dotyczące wyrobów ortopedycznych w uwzględnieniu testów wytrzymałościowych oraz oceny parametrów geometrycznych. Rozdział ten opisuje miejsce technologii przyrostowych w procesach wytwórczych wyrobów ortopedycznych.

Rozdział trzeci przedstawia cel pracy, problemy badawcze i hipotezy naukowe określone na podstawie analizy stanu zagadnienia w zakresie projektowania i wytwarzania ortez stawu skokowego przy użyciu procesów wspomaganych komputerowo technologii przyrostowych oraz metod konwencjonalnych.

W rozdziale czwartym opisano metodykę, koncepcję i plan badań planowanych do realizacji w ramach pracy doktorskiej, która stanowi rozwinięcie i uzupełnienie prowadzonych wcześniejszych z udziałem Autorki badań w ramach projektu AutoMedPrint programu LIDER (2018–2021). Wyszczególniono pięć etapów badań, które przedstawiono w czytelny sposób na schemacie ideowym, począwszy od analizy literatury i wyboru obiektów badań w tym, pacjentów, dla których wytworzono spersonalizowane ortez stawu skokowego. Kolejny etap odnosi się do badań właściwości materiałów stosowanych do wytwarzania ortez stosując standardowe próbki poddawane testom niszczącym zgodnie z normą ISO-527. Dodatkowo zaplanowano mikroskopową analizę obrazową próbek przy użyciu mikroskopu w celu identyfikacji mechanizmów uszkodzeń oraz oceny wpływu zastosowanych parametrów procesu przyrostowego na porowatość i możliwość powstawania defektów typu mikropęknięcia czy pustki. Trzeci etap dotyczy analizy wyników badań ortez stawu skokowego obejmujących pomiary dokładności wymiarowo - kształtowej oraz chropowatości powierzchni. Zaplanowano badania niszczące wykonanych ortez w próbie zginania w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, w celu oceny ich rzeczywistej wytrzymałości. Dodatkowo przewidziano również mikroskopową analizę wytypowanych miejsc uszkodzeń w celu identyfikacji lokalnych uszkodzeń czy miejsc delaminacji. Czwarty etap badań dotyczy analizy numerycznej i statystycznej opartej o metodę elementów skończonych (MES), w celu lokalizacji krytycznych obciążeń modelu ortez. Dodatkowym elementem jest szacowanie kosztów czasu i wytwarzania. Piąty etap dotyczy przeprowadzenia analizy wyników badań w celu weryfikacji hipotez badawczych oraz sformułowania wniosków końcowych i rekomendacji dla procesów

badawczych oraz wytwórczych. Numeryczne modele 3D wykonano z zastosowaniem oprogramowania 3D-CAD oraz przy użyciu procedur skanowania 3D i inżynierii rekonstrukcyjnej. Wyszczególniono tu również aparaturę stosowaną w procesie badawczym.

Rozdział piąty opisuje wyniki badań wykonanych na znormalizowanych próbkach badawczych przeznaczonych do badań wytrzymałości na rozciąganie oraz zginanie oraz na modelach badawczych ortez. Próbkę i modele badawcze wykonano z zastosowaniem procesu ekstruzji warstwowej z różnych materiałów typu PLA, PETG, ABS, PA12 oraz kompozytów polimerowych opartych o włókna węglowe typu PLA-CF, PETG-CF, ABS-CF, PA12-CF.

Wykonano ocenę wizualną próbek poprzez oględziny powierzchni i kształtu bez powiększenia oraz z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego ISM-PM200SA, w miejscach przełomu po próbie rozciągania w celu identyfikacji uszkodzeń oraz próby analizy mechanizmów ich powstawania.

W rozdziale szóstym przedstawiono obszernie dyskusje i wnioski końcowe, rozpoczynając od wniosków z badań materiałowych, następnie ocenę wytworzonych wyrobów ortopedycznych, ocenę użyteczności materiałów kompozytowych do produkcji ortez stawu skokowego oraz potwierdzenie postawionych hipotez badawczych.

Rozdział siódmy zawiera wnioski z przedstawionych badań i analiz, Autorka stwierdza, że odpowiedni dobór materiałów, geometrii oraz parametrów technologicznych pozwala na wytwarzanie funkcjonalnych i wytrzymałych ortez przy użyciu technologii przyrostowych, które mogą stanowić alternatywę dla metod klasycznych. Istotne jest tu, że przedstawiona metodyka pozwala zwiększyć dostępność indywidualnych rozwiązań ortopedycznych w praktyce klinicznej a szczególnie przyspieszyć proces ich wytwarzania.

Praca napisana jest przejrzysto, zawiera obszerny materiał badawczy, Autorka nie ustrzegła się jednak od pewnych pomyłek o charakterze terminologicznym w odniesieniu do przyrostowego procesu MEX, przypisując nazwę FDM zastrzeżoną dla Firmy Stratasys innym producentom drukarek 3D.

Bibliografia obejmuje szereg norm z obszaru badań materiałów polimerowych, właściwości produktów medycznych czy systemów zarządzania jakością, jednak nie powołuje się na normy dotyczące procesów przyrostowych czy metod badań wyrobów wytwarzanych addytywnie, czego efektem jest pojawianie się wspomnianych wcześniej błędów w terminologii dotyczącej procesów opartych o ekstruzję warstwową MEX.

W części badawczej przedstawiono szereg testów wytrzymałościowych, z których pierwsze zrealizowane na znormalizowanych próbkach stanowią pewien materiał informacyjny oparty o standardowe procedury. Z punktu widzenia poznawczego bardziej istotne było zrealizowanie prób wytrzymałościowych modeli na stanowisku badawczym wyposażonym w specjalny uchwyt do badania ortez.

Przedstawiono również wyniki dokładności geometrycznej ortez wykonane z zastosowaniem skanowania 3D, jest to ciekawy materiał badawczy, jednak pojawia się pytanie na ile istotny, biorąc pod uwagę geometrię wyrobu i cienkościenność, już samo przeniesienie ortyzy czy jej używanie powoduje odkształcenia identyfikowane w milimetrach.

Przeprowadzono badania mikrostruktury powierzchni, Autorka stwierdza, że dokładna ocena mikrostruktury staje się nieodzownym elementem procesu weryfikacji jakości. Pojawia się pytanie co oznacza stwierdzenie „dokładna ocena” biorąc pod uwagę, znaczą powierzchnię ortyzy i jej nieregularny kształt to tzw. dokładna ocena z zastosowaniem mikroskopu będzie czasochłonna. Być może warto określić obszary do analizy w celu skrócenia oceny jakościowej wynikające z kształtu ortyzy czy stosowanej technologii.

Podobne uwagi można odnieść do badania chropowatości powierzchni, Autorka wytypowała w tym przypadku powierzchnie do badań. Należy pamiętać, że w odniesieniu do nieregularnych kształtów ortyzy podczas procesu wydruku 3D mogą pojawiać się za każdym razem zmienne parametry struktury geometrycznej powierzchni zależne m.in. od ułożenia modelu względem układu współrzędnych drukarki 3D lub parametrów technologicznych wydruku, z tego względu określenie uogólnionych zaleceń technologicznych wymagałoby przeprowadzanie znacznej liczby badań przekraczających zakres niniejszej pracy. Dodatkowo pojawia się pytanie czy stosowany do druku 3D materiał może mieć kontakt bezpośrednio ze skórą w określonym czasie rehabilitacji i czy nie należy stosować odpowiednich wstawek z materiałów przyjaznych skórze. Być może warto rozważyć konstrukcje ażurowe zapewniające przepływ powietrza, wtedy analiza SGP ortyzy nie jest szczególnie uzasadniona.

Przedstawiona do oceny rozprawa omawia metody spersonalizowanego projektowania wytwarzania ortez stawu skokowego. Poddano analizie procesy różne wytwórcze, określono wytyczne dla doboru materiałów oraz kryteria oceny funkcjonalności produktów. Ważnym osiągnięciem Autorki było opracowanie metodyki wytwarzania przyrostowego spersonalizowanej produkcji wyrobów medycznych. Metodyka stanowi rozwinięcie stosowanych obecnie rozwiązań do projektowania i wytwarzania ortez, może być również punktem wyjścia do realizacji dalszych badań dotyczących technologii przyrostowych stosowanych w inżynierii medycznej. Opracowane w ramach realizacji pracy doktorskiej rozwiązania mają potencjał w zakresie adaptacji do produkcji wyrobów stosowanych w praktyce medycznej i rehabilitacji.

Zamieszczone uwagi nie umniejszają ogromu pracy włożonej w przeprowadzenie badań i analiz, mają charakter dyskusyjny i być może sprowokują Autorkę do refleksji nad i analizą wyników badań i planowaniem kolejnych eksperymentów.

Praca doktorska opisuje przyrostowe procesy technologiczne bazujące na ekstruzji warstwowej materiałów opartych na osnowie polimerowej. Poddane analizie procesy pozwalają wyciągnąć wnioski o charakterze interdyscyplinarnym w zakresie inżynierii medycznej i nauk medycznych, inżynierii materiałowej oraz inżynierii

medycznej. W pracy przedstawiono bogaty materiał ilustracyjny, zawierający wiele wykresów i schematów wykonanych jako opracowania własne Autorki. Struktura pracy jest prawidłowa, zgodna z wymaganiami stawianymi rozprawom doktorskim.

Cele pracy obejmowały określenie parametrów przetwarzania kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi posiadających podwyższone parametry wytrzymałościowe w porównaniu do tradycyjnych materiałów polimerowych stosowanych w druku 3D. Przeprowadzono analizy czasu i kosztów wytwarzania ortez z zastosowaniem procesu MEX. Dodatkowo poddano weryfikacji właściwości mechaniczne i funkcjonalne wykonanych modeli ortez w procesie symulacji numerycznych i badań eksperymentalnych.

Wyniki badań pozwoliły na przeprowadzenie analiz o znaczeniu naukowym i aplikacyjnym, co stanowi materiał mający potencjał praktycznego zastosowania w obszarze inżynierii mechanicznej.

3. Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji praca odnosi się do istotnych zagadnień badań i analiz wspomaganych komputerowo, metod skanowania, projektowania i wytwarzania przyrostowego. Opisana metodyka badawcza, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Tematyka opracowania została określona w sposób przemyślany i trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Praca przedstawia ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki i pokazuje jej możliwości samodzielnej realizacji prac badawczych, prowadzenia analiz o charakterze naukowym oraz wyciągania wniosków. Układ formalny pracy jest zgodny z wytycznymi dla prac doktorskich, zawiera odpowiednią bibliografię i materiał ilustracyjny. Dysertacja jest osadzona na bazie aktualnej wiedzy, jednocześnie wnosi nowe treści w obszarze badań naukowych a także ich możliwości aplikacji w obszarze produkcji wyrobów medycznych. Praca zawiera część teoretyczną w tym ocenę stanu zagadnienia. Sformułowane cele badawcze zostały osiągnięte a przedstawiona analiza wyników badań stanowi oryginalny wkład Autorki w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna, co świadczy o Jej kompetencjach zakresie samodzielnego prowadzenia prac naukowych o charakterze badawczym.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Ocena właściwości ortez stawu skokowego wytwarzanych przyrostowo z kompozytów polimerowych” autorstwa mgr inż. Justyny RYBARCZYK, promotor dr hab. inż. Filip Górski, prof. PP, promotor pomocniczy dr inż. Wiesław Kuczko spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm. w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna, w mojej ocenie może być dopuszczona do kolejnych etapów procedury przewodu doktorskiego.

