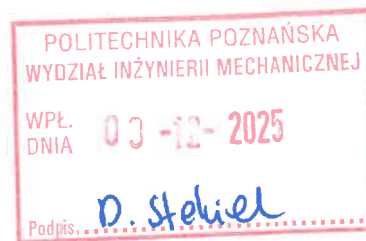


dr hab. inż. Bożena Kaczmarek prof. PŚk.
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego
Katedra Zarządzania Jakością i Własnością Intelktualną



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny Rybarczyk

p.t. Ocena właściwości ortez stawu skokowego wytwarzanych przyrostowo z kompozytów polimerowych

Promotorem pracy jest dr hab. inż. Filip Górski, prof. PP

Promotorem pomocniczym jest dr inż. Wiesław Kuczko

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną opracowania recenzji jest pismo Pana dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP, Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej (nr DIM.075.240.2025 z dnia 23 września 2025 r.) informujące o powołaniu mnie przez Radę Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej Uchwałą nr 2/III/09/2025 z dnia 22 września 2025 r., na recenzenta pracy doktorskiej Pani mgr inż. Justyny Rybarczyk w dyscyplinie inżynierii mechanicznej.

2. Tematyka i charakterystyka zawartości rozprawy

Wytwarzanie przyrostowe w ostatnich latach zyskało dużą popularność w działalności naukowo-badawczej środowiska akademickiego. Podstawą tego zainteresowania jest możliwość projektowania i szybkiego wytwarzania skomplikowanych i zróżnicowanych trójwymiarowych struktur oraz elementów. Technologia ta i medycyna spersonalizowana to współczesne innowacyjne podejście do rozwiązywania problemów inżynierii medycznej, obejmujące m.in. modele anatomiczne, protezy, implanty, szablony operacyjne, ortotykę oraz biodruk 3D. Każda z tych kategorii wymaga indywidualnego podejścia oraz odpowiednich technologii.

Ortezy stawu skokowego (AFO) jako medyczne wyroby ortopedyczne są stosowane w celu stabilizacji, odciążenia, korekcji lub ochrony stawu skokowego, a poprzez odpowiednią konstrukcję wspierają funkcję stawu, ograniczają jego niepożądane ruchy lub wspomagają proces regeneracji tkanek. Znajdują zastosowanie w leczeniu pourazowym i w rehabilitacji oraz w profilaktyce urazów u osób aktywnych fizycznie, mają istotne znaczenie w poprawie jakości życia pacjentów z ograniczeniami ruchowymi. Istnieje zatem potrzeba stałego poszukiwania skutecznych metod zapewniających poprawę efektywności stosowanych technologii w ich produkcji, idealnie dopasowanych do potrzeb pacjentów oraz ich zdolności do szybkiego reagowania w sytuacjach kryzysowych, gdzie druk 3D pozwala na szybkie, precyzyjne i ekonomiczne wytwarzanie produktów. Jednocześnie wielowymiarowość zagadnień medycyny spersonalizowanej wskazuje na złożoność rozważanej problematyki, stanowiącej przedmiot rozprawy, w której Doktorantka dokonała kompleksowej analizy i oceny właściwości ortez stawu skokowego wytwarzanych metodami przyrostowymi z termoplastycznych tworzyw kompozytowych.

Biorąc pod uwagę znaczenie rozwoju spersonalizowanej opieki medycznej oraz technologii wspierających leczenie i rehabilitację pacjentów podjęty temat rozprawy doktorskiej uznaje za aktualny i ważny, mimo, że problematyka związana z technologią wytwarzania przyrostowego,

badaniami właściwości mechanicznych i jej wykorzystywaniem w inżynierii medycznej jest w obszarze zainteresowania wielu zespołów badawczych.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska to opracowanie naukowe liczące 180 stron, w tym: spis treści, siedem rozdziałów merytorycznych, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisy ilustracji i tabel oraz spis literatury wykorzystanej podczas realizacji pracy. Układ rozprawy doktorskiej oraz sposób omówienia obszarów badawczych w poszczególnych rozdziałach jest odpowiedni. Przy czym wskazane jest w tego typu opracowaniach podać na początku wykaz skrótów, akronimów, objaśnień, itp.

W rozdziale 1 Wprowadzenie (s. 10-12), Doktorantka wskazała na istotność poruszanych w pracy zagadnień, genezę podjęcia tematu rozprawy oraz jej przedmiot. Zwróciła uwagę na dynamiczny rozwój rynku druku 3D i obszary zastosowań technik wytwarzania przyrostowego, a także potrzebę wykorzystywania osiągnięć inżynierii mechanicznej i medycyny w zakresie opracowywania nowych metod projektowania, produkcji oraz wdrażania produktów wspierających proces leczenia pacjentów. Zidentyfikowała luki badawcze w obszarze: standardów projektowania, produkcji i oceny indywidualnych wyrobów ortopedycznych, w tym: ortez stawu skokowego; badań nad spersonalizowanymi ortezami stawu skokowego, które nadal mają charakter niszowy; spójnych standardów oceny ortez medycznych, a w szczególności ortez projektowanych i wytwarzanych w sposób przyrostowy. Identyfikacja problemów w tym obszarze pozwoliła na skoncentrowanie rozważań i procesu badawczego na szczegółowym zbadaniu istniejących metod produkcji oraz możliwości ich adaptacji do projektowania ortez stawu skokowego, wyborze odpowiednich materiałów, opracowania kryteriów oceny funkcjonalności produktu, opracowaniu stabilnych i powtarzalnych metod wytwarzania przyrostowego, które mogą być stosowane w personalizowanej produkcji wyrobów medycznych.

W rozdziale 2 Analiza literatury (s. 13-47), Doktorantka na podstawie analizy literatury przedmiotu przedstawiła szczegółową analizę czterech obszarów:

1. Metod projektowania i wytwarzania ortez stawu skokowego, które są rozwijane w kierunku zwiększania ich efektywności i precyzji wykonania oraz personalizacji, użyteczności, komfortu i skuteczności terapeutycznej.
2. Projektowania zindywidualizowanych ortez stawu skokowego. Istotnym elementem jest pozyskanie i przetwarzanie danych antropometrycznych, stanowiących podstawę anatomicznego dopasowania ortez do budowy ciała pacjenta. Projektowanie ortez, ich wytwarzanie z wykorzystaniem nowoczesnych technologii cyfrowych skraca czas produkcji, zwiększa precyzję dopasowania, ułatwia prototypowanie oraz modyfikacje.
3. Metod badań właściwości wyrobów ortopedycznych. Autorka dokonała charakterystyki standardów w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa, skuteczności oraz zgodności wyrobów ortopedycznych z przepisami prawa (w tym normami) obowiązującymi na rynku Unii Europejskiej oraz charakterystyki metod badań wytrzymałościowych, badań dokładności wymiarowo-kształtowej oraz metod oceny jakości i funkcjonalności wyrobów ortopedycznych.
4. Technik przyrostowych w ortopedii. Doktorantka zwróciła uwagę na korzyści i ograniczenia wynikające z zastosowania wytwarzania przyrostowego metodą ekstruzji (FDM), ale jednocześnie na konieczność odpowiedniego doboru materiału, parametrów technologicznych, orientacji modelu na platformie roboczej, parametrów wpływających na właściwości funkcjonalne elementu, kontroli warunków termicznych w trakcie procesu.

Przeprowadzona analiza literatury naukowej i prac badawczych pozwoliła Doktorantce na ocenę stanu wiedzy dotyczącej projektowania i produkowania ortez stawu skokowego wytwarzanych przyrostowo oraz zidentyfikowanie luk badawczych, wskazując na potrzebę kontynuacji i pogłębienia badań w tym obszarze.

Stwierdzam, że opracowana przez mgr inż. Justynę Rybarczyk analiza literatury została przedstawiona w sposób uporządkowany, merytoryczny i konsekwentny w odniesieniu do tematu rozprawy. Potwierdza to bardzo dobre przygotowanie Doktorantki do realizacji badań i pracy naukowej.

W rozdziale 3 *Cel pracy, problemy i hipotezy badawcze* (s. 48-52), Autorka przedstawiła problemy i pytania badawcze, sformułowała cel rozprawy doktorskiej, jakim jest „kompleksowa ocena właściwości mechanicznych, użytkowych i ekonomicznych ortez stawu skokowego wytwarzanych przyrostową metodą FDM z wykorzystaniem kompozytowych materiałów termoplastycznych” oraz cztery cele szczegółowe:

1. opracowanie odpowiednich parametrów technologicznych, które pozwolą na uzyskanie ortez z kompozytów z włóknami węglowymi osiągających wyższe parametry wytrzymałościowe i sztywność w porównaniu do tradycyjnych materiałów,
2. przeprowadzenie analizy porównawczej kosztów i czasu produkcji ortez drukowanych przyrostowo oraz wytwarzanych metodami tradycyjnymi, w celu określenia efektywności wdrożenia technologii druku 3D w praktyce klinicznej,
3. zweryfikowanie, czy właściwości mechaniczne i funkcjonalne drukowanych ortez spełniają obowiązujące normy oraz standardy,
4. zweryfikowanie, czy możliwe jest uzyskanie kosztów jednostkowych przyrostowej produkcji ortez stawu skokowego z kompozytów polimerowych poniżej 800 zł oraz skrócenie czasu produkcji do mniej niż 24 godzin, co zwiększyłoby dostępność tej technologii w porównaniu do konwencjonalnych rozwiązań (cel ekonomiczny).

Zostały również postawione dwie hipotezy badawcze:

Hipoteza 1: *„Ortezy stawu skokowego wytwarzane metodą przyrostową z wykorzystaniem kompozytów termoplastycznych osiągają wyższe parametry wytrzymałościowe i sztywność w porównaniu do tradycyjnych materiałów, co umożliwi im osiągnięcie wystarczającej do celów praktycznych wytrzymałości mechanicznej. Optymalizacja grubości komponentów ortozy pozwala na zwiększenie odporności na obciążenia bez nadmiernego wzrostu masy.”*

Hipoteza 2: *„Chropowatość powierzchni ortez stawu skokowego wytwarzanych technologią FDM z tworzyw kompozytowych, bez zastosowania dodatkowej obróbki wykończeniowej będzie wyższa niż w przypadku materiałów polimerowych bez włókien węglowych. Oczekuje się, że w celu spełnienia standardów medycznych w zakresie komfortu pacjenta i zmniejszenia podrażnień skóry, konieczne będzie zastosowanie dodatkowych procesów obróbki wykańczającej.”*

Wyznaczone przez Doktorantkę cele mają walory poznawcze oraz istotne znaczenie praktyczne, ponieważ są związane z aktualnymi wyzwaniami stawianymi personalizowanym wyrobom medycznym. Przy czym, sformułowanie w celu szczegółowym „przeprowadzenie analizy...” nie jest poprawne. Analiza jest narzędziem, a nie celem.

Poprawnie zostały sformułowane hipotezy badawcze odnoszące się do procesu wytwarzania, którego wynikiem są ortezы stawu skokowego wraz z doбором zakresów materiałowych i technologicznych oraz zestandaryzowanego schematu postępowania podczas procesu produkcyjnego.

W rozdziale 4 *Metodyka badań* (s. 53-103), Doktorantka przedstawiła koncepcję nowej metodyki badań ortez AFO i plan badań, obejmujący materiały i metody wytwarzania, badania materiałowe, wytrzymałościowe, metodykę oceny procesu wytwarzania przyrostowego oraz badania dokładności wymiarowo-kształtowej. Proces badawczy jest istotnym rozwinięciem zrealizowanego projektu AutoMedPrint, poprzez analizę wytrzymałościową ortez kończyny

dolnej (AFO) oraz weryfikację potencjalnych możliwości zastosowania innych materiałów, w tym kompozytów wytwarzanych przyrostowo metodą ekstruzji (FDM).

Schemat planu badawczego i szczegółowy opis jego etapów obejmuje: analizę wstępną (analizę literatury i norm, wybór pacjentów dla których projektowano spersonalizowane ortezy stawu skokowego, pomiar geometrii kończyn dolnych pacjentów i projektowanie ortezy, selekcję materiałów i parametrów technologicznych), badania materiałowe (testy niszczące na próbkach, mikroskopową analizę obrazową próbek), badania gotowych ortezy (testy nieniszczące, testy niszczące, mikroskopową analizę obrazową ortezy), analizy numeryczne i statystyczne (MES, analiza ekonomiczna i statystyczna wyników), analizę wyników i testów (weryfikacja hipotez badawczych, wnioski końcowe) oraz rekomendacje dotyczące dalszego rozwoju technologii przyrostowej wytwarzania indywidualnych ortezy stawu skokowego z wykorzystaniem tworzyw kompozytowych.

Doktorantka w sposób usystematyzowany przedstawiła strukturę planu badawczego i zakres niezbędnych działań. Zwróciła uwagę, że ocena stosowalności konkretnych grup materiałów w wytwarzaniu przyrostowym zindywidualizowanych ortezy oparta jest o analizę wyników badań próbek oraz kompletnych ortezy, ponieważ specyfika procesu wytwarzania przyrostowego metodą ekstruzji (FDM), szczególnie brak monolityczności wyrobów i słabe łączenia między warstwami, skutkujące anizotropią właściwości mechanicznych powoduje, że właściwości makroskopowe całych wyrobów (zwłaszcza o anatomicznych, nietypowych kształtach) i ich zachowanie pod obciążeniem mogą znacząco różnić się od właściwości wyznaczonych na podstawie wyłącznie analizy znormalizowanych próbek.

W rozdziale 5 Wyniki (s. 104-144), Autorka zgodnie z przyjętą metodologią i planem badań przedstawiła szczegółowe wyniki poszczególnych etapów procesu badawczego.

W zakresie wyników badań materiałowych (m.in. opublikowanych w 2024 roku w artykule naukowym we współautorstwie), przedstawiła kompleksową ocenę przydatności ośmiu testowanych materiałów i ich kompozytów do zastosowania w produkcji ortezy stawu skokowego metodą FDM. Ocenie poddano cztery materiały bazowe (PLA, PET-G, ABS, PA12) oraz ich odpowiedniki wzbogacone o włókna węglowe (PLA-CF, PETG-CF, ABS-CF, PA12-CF). Podstawą oceny były wyniki uzyskane w trakcie badań mechanicznych (rozciąganie, zginanie), analiz obrazowych (mikroskopia cyfrowa) oraz oceny stabilności procesu wytwarzania.

W zakresie procesu wytwarzania Doktorantka dokonała oceny technologicznej i stabilności procesu wytworzonych ortezy oraz oceny wskaźników techniczno-ekonomicznych. W procesie badawczym wystąpiły problemy ze stabilnością wytłaczania materiału ABS-CF przy wytwarzaniu kompletnych ortezy (próbki do badań materiałowych wytworzono bez nadmiernych komplikacji), stąd w przypadku zindywidualizowanych wyrobów ortopedycznych wytwarzanych metodą ekstruzji oceny dotyczące technologii oraz właściwości uzyskanych wyrobów dokonano podczas produkcji kompletnych wyrobów. W zakresie oceny wskaźników ekonomicznych uwzględniono koszty realizacji procesu wytwarzania ortezy dla siedmiu różnych materiałów (PLA, PET-G, ABS, PA12, PLA-CF, PETG-CF, PA12-CF) oraz czas potrzebny na ich wykonanie. Oceny dotyczą kosztów komercyjnych (ceny rynkowej materiałów) i niekomercyjnych (uwzględniających warunki produkcji poza przemysłem, np. w laboratoriach).

W zakresie porównania właściwości mechanicznych ortezy stawu skokowego Doktorantka przedstawiła wyniki badań ortezy AFO wykonanych z różnych materiałów (dla każdego materiału wykonano trzy próbki pełnowymiarowych ortezy), uwzględniając krzywe obciążenie–przemieszczenie, uzyskane w próbach niszczących na maszynie wytrzymałościowej (badania statyczne). W trakcie testów rejestrowano wartości siły (N) oraz odpowiadające jej przemieszczenia (mm). Wyniki badań pokazują wyraźną przewagę materiałów

niemodyfikowanych nad ich kompozytowymi odpowiednikami, co jest szczególnie istotne w przypadku ortez narażonych na intensywne obciążenia. Zastosowanie włókien węglowych ma potencjał do zwiększenia sztywności i kontroli odkształceń.

W zakresie wykorzystania metody elementów skończonych (badania wykonane w PrePoMax, bazującym na solverze CalculiX) dla pełnowymiarowych ortez AFO w przewidywaniu zachowania mechanicznego struktur drukowanych techniką FDM Doktorantka zwraca uwagę, że warunkiem skuteczności tej metody jest wiarygodność i dokładność wprowadzanych danych materiałowych (szczególnie w przypadku PETG). Wyniki uzyskane dla PLA i PLA-CF potwierdzają zasadność stosowania analizy MES już na etapie projektowania ortez. Z kolei wyniki dla materiałów kompozytowych PETG-CF i PA12-CF wskazują na konieczność dodatkowych analiz wrażliwości i precyzyjnego modelowania efektów interakcji materiałowych. *„Wyniki potwierdzają, że dane katalogowe producentów są często niewystarczające i mogą prowadzić do poważnych błędów w ocenie wytrzymałości konstrukcji ortopedycznych.”*

W zakresie badań mikroskopowych Autorka przedstawiła wyniki jakościowej oceny mechanizmów propagacji pęknięć, adhezji międzywarstwowej, jednorodności strukturalnej oraz wpływu włókien wzmacniających. Wyniki badań chropowatości powierzchni wskazują, iż obecność włókien węglowych w strukturze materiału zwiększa chropowatość powierzchni. Jest to konsekwencją nieregularnego rozmieszczenia włókien oraz ich tendencji do występowania na powierzchni zewnętrznej warstw, co skutkuje powstawaniem mikrowypukłości i nierówności. W ramach badań dokładności kształtowo-wymiarowej ortez AFO wydrukowanych z materiału PLA, PET-G, PA12 oraz ich kompozytów z włóknami węglowymi, wykorzystano metodę porównania modelu rzeczywistego, uzyskanego w wyniku skanowania 3D, z cyfrowym modelem referencyjnym zaprojektowanym w programie CATIA v5. Wyniki badań potwierdzają relatywnie wysoką zgodność wymiarową ortez na znacznej części powierzchni, przy zastosowanych parametrach procesu druku FDM, w relacji do wymagań stawianych tego typu zindywidualizowanym ortezom (normy dotyczące wyrobów medycznych i ortotycznych).

W pracy zostały podane szczegółowe wyniki badań własnych wraz z dyskusją i komentarzami. Zamieszczone są odpowiednie rysunki (wykresy, zdjęcia), tabele zawierające te wyniki i potwierdzające przeprowadzone badania. Klarowność i kompletność tych danych oraz analiz nie budzą zastrzeżeń.

W rozdziale 6 Dyskusja i wnioski (s. 145-158), Doktorantka przeprowadziła dyskusję na temat:

1. Wyników i oceny badań materiałowych ośmiu materiałów przeznaczonych do wytwarzania ortez stawu skokowego: niemodyfikowanych polimerów termoplastycznych powszechnie stosowanych w procesach wytwarzania przyrostowego (PLA, PETG, ABS, PA12) oraz ich odpowiedników wzbogaconych włóknem węglowym (PLA-CF, PETG-CF, ABS-CF, PA12-CF), co pozwoliło na określenie wpływu modyfikacji strukturalnych na właściwości użytkowe i przetwórcze tych tworzyw.
2. Kompleksowej oceny jakości ortez stawu skokowego wytwarzanych metodą przyrostową FDM z zastosowaniem różnych materiałów polimerowych oraz ich kompozytów z włóknem węglowym. Ocenie poddano aspekty mechaniczne, geometryczne oraz technologiczne, z uwzględnieniem siły niszczącej, odchyłeń geometrycznych, chropowatości powierzchni, masy wyrobu oraz kosztu jednostkowego.
3. Oceny użyteczności materiałów kompozytowych do produkcji ortez AFO. W ramach przeprowadzonych badań porównawczych i analiz funkcjonalnych szczególną uwagę zwrócono na identyfikację i ocenę ograniczeń praktycznych, wpływających na możliwość zastosowania danego materiału w środowisku klinicznym.
4. Potwierdzenia postawionych hipotez badawczych. Potwierdzeniem jest analiza uzyskanych wyników, przeprowadzonych obserwacji procesów wytwarzania, uzyskanych ortez AFO oraz

analiza statystyczna (test t-Studenta) wyników badań wytrzymałości mechanicznej i chropowatości powierzchni materiałów stosowanych do wytwarzania ortez metodą FDM. Analizowane były próbki wykonane z materiałów polimerowych (PLA, PETG, PA12, ABS), ich kompozytów z włóknem węglowym oraz wyniki kompletnych ortez.

Hipoteza 1 została częściowo zweryfikowana negatywnie. *Hipoteza 2* została potwierdzona. W odniesieniu do wyników poszczególnych etapów badań Doktorantka podała odpowiednie komentarze wyjaśniające istotę uzyskanych wyników i sugestie ewentualnych, podejmowanych działań, rekomendacje. Uzyskane wyniki badań własnych świadczą o prawidłowym doborze parametrów technologicznych i jakości procesu druku, umożliwiając praktyczne zastosowanie analizowanej ortozy w warunkach klinicznych.

W rozdziale 7 Podsumowanie (s. 159-161), Doktorantka odnosi się do realizacji wyznaczonego celu rozprawy, wniosków ze zrealizowanego procesu badawczego, dwóch hipotez badawczych i celu ekonomicznego oraz planów dalszych badań.

Doktorantka wskazuje, że *„dzięki odpowiedniemu doborowi materiałów, geometrii oraz parametrów technologicznych, możliwe jest wytwarzanie funkcjonalnych, odpowiednio wytrzymałych i ekonomicznych ortez AFO przy użyciu technologii przyrostowych, co stanowi realną alternatywę dla metod tradycyjnych i zwiększa dostępność indywidualnych rozwiązań ortopedycznych w praktyce klinicznej. Przy ocenie właściwości materiałów do wytwarzania przyrostowo należy wykonać badania na pełnych ortezach”*.

Należy podkreślić, że przedstawione wnioski są odzwierciedleniem wykonanych badań i analiz. Można w nich wyróżnić wnioski poznawcze i wnioski użytkarne, chociaż takiego podziału Doktorantka nie przedstawiła.

W bibliografii (s. 162-176) Autorka przedstawiła 186 pozycji, w tym prace naukowe, akty prawne, normy oraz inne źródła w wersji drukowanej i elektronicznej w języku angielskim i polskim. Literatura jest aktualna, związana z tematyką pracy. W spisie publikacji Autorka wykazała również osiem własnych pozycji, opublikowanych w latach 2022-2025, gdzie występuje jako współautorka publikacji.

3. Ocena ogólna rozprawy i uwagi krytyczne

Merytorycznie przedstawioną pracę oceniam bardzo pozytywnie. Rozprawa doktorska jest ciekawa, starannie napisana, wpisuje się w aktualną tematykę badawczą, łączy nowoczesne technologie z praktycznym ich wykorzystaniem w spersonalizowanej inżynierii medycznej oraz jest zgodna z kierunkami badawczymi realizowanymi w świecie i w Polsce. Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy Doktorantka określiła cele pracy, pytania i hipotezy badawcze. Cel pracy i badań nie zawiera jednak jasno sformułowanego celu naukowego i użytkarnego.

Doktorantka przeprowadziła ocenę właściwości wybranych materiałów polimerowych i kompozytowych wykorzystywanych do druku 3D ortez stawu skokowego (AFO) metodą FDM. Zatem praca porusza cztery główne zagadnienia: projektowanie ortozy stawu skokowego z wykorzystaniem technologii cyfrowych, badania materiałów stosowanych do wykonywania ortozy AFO, badania wytworzonych ortez, analizę ekonomiczną.

Praca zawiera znaczący wkład naukowy, wypełnia w pewnym zakresie luki badawcze dotyczące technologii przyrostowej, szczególnie stosowanych materiałów. Jednak jej lektura generuje pewne pytania, uwagi i kreuje wizję dalszego rozwoju.

1. Projektowanie ortozy stawu skokowego z wykorzystaniem druku 3D w technologii FDM.
 - Str.25: „Proces projektowania ortez z użyciem systemów CAD rozpoczyna się zazwyczaj od uzyskania danych antropometrycznych pacjenta. Dane te wczytywane są do oprogramowania CAD, gdzie stanowią punkt wyjścia dla dalszych prac projektowych. Na ich podstawie

konstruktor może zaprojektować ortezę idealnie dopasowaną do anatomii pacjenta, co ma szczególne znaczenie w przypadku kończyn dolnych." W pracy nie zdefiniowano, co to znaczy „idealnie dopasowana” – czy chodzi o możliwie precyzyjne odtworzenie kształtu kończyny, czy też dobór kształtu ortozy zapewniający należyłą rehabilitację i komfort użytkowania?

- Tradycyjna sztywna orteza stawu skokowego zwykle ma twarde elementy zewnętrzne – skorupę z tworzywa, która stabilizuje staw. Jednocześnie wewnątrz najczęściej znajduje się miękka, elastyczna wkładka lub wyściółka. Taka wkładka widoczna jest na rysunku 4.6. *Orteza wykonana dla chłopca ze złamanym śródstopiem*, natomiast na rysunku 4.5. *Przymiarka ortozy wykonanej z PET-G dla 26-latki* funkcje te pełni skarpetka oraz legginsy. Wydaje się więc, że drukowana sztywna skorupa ortozy nie powinna odzwierciedlać w pełni kształtu kończyny, a zapewniać pewną przestrzeń na te dodatkowe niezbędne elementy. Powinna też uwzględniać możliwe opuchlizny stopy, co jest częste w przypadku starszych osób.
- W pracy nie odniesiono się, jak w procesie projektowania w programie CAD powinien być modyfikowany skan kończyny, aby uwzględnić tego rodzaju wymagania przy zachowaniu możliwości rehabilitacji. Nie uwzględniono tego także w projektowanej i drukowanej ortezie poddawanej później badaniom.

2. Badania wytworzonych ortez AFO

Badania obejmowały wiele aspektów, jedno z nich dotyczyło wytrzymałości. W badaniach wytrzymałościowych podstawą jest określenie sił zewnętrznych.

- W pracy nie przedstawiono analizy sił działających na ortezę w trakcie jej użytkowania. Szkoda, że nie określono sił występujących w różnych sytuacjach, np.: chodzenie po płaskim terenie, chodzenie pod górę, w dół, wchodzenie po schodach i schodzenie, dodatkowego obciążenia.
- Str. 92 *„Do testów przyjęto obciążenie odpowiadające około 120% masy ciała pacjenta, co daje wartość 160 N”*. Siła ciężkości działa pionowo w dół, a w badaniach przyłożono siłę o tej wartości w innym kierunku – nie wyjaśniono z czego wynika przyjęty zwrot obciążającej siły (rys. 4.24, 4.25).
- Str. 93 *„Po zakończeniu każdej próby dokonano wizualnej inspekcji uszkodzeń. Na tej podstawie przeprowadzono klasyfikację typów zniszczeń, do których należały m.in. pęknięcia w strefach przegubowych, złamania zgięciowe, lokalne zgnioty struktury oraz trwałe deformacje geometryczne. W trakcie testu rejestrowano maksymalną siłę niszczącą (F_{max})”*. Szkoda, że nie pokazano efektów tych badań: pęknięć, zgniotów i deformacji. Nie wiadomo, gdzie orteza pękała oraz nie wiadomo przy jakiej wartości siły – 120N czy innej. Pełne wyniki badań, łącznie ze zdjęciami zamieszczono jedynie dla wyników badań próbek.
- W pracy przeprowadzono analizy wytrzymałościowe z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Były pewne rozbieżności w wynikach - porównanie wyników badań niszczących i obliczeń MES. Str. 126 *„Początkowo planowano porównać wyniki MES uzyskane dla właściwości materiałowych wyznaczonych na podstawie testów anizotropowych z wynikami wyznaczonymi na podstawie wartości katalogowych producentów. Jednakże zestawienie tych danych wykazało ich znaczną rozbieżność. Przykładowo, dla materiału PLA siła zniszczenia ortozy oszacowana z MES przy użyciu danych katalogowych była kilkunastokrotnie mniejsza niż realnie zarejestrowana siła niszcząca. Z tego względu zrezygnowano z dalszej analizy danych producentów, a wszystkie zestawienia przygotowano wyłącznie w oparciu o dane z samodzielnie przeprowadzonych badań laboratoryjnych.”* Wykorzystując dane z samodzielnie przeprowadzonych badań laboratoryjnych, także obserwowano istotne różnice między badaniami eksperymentalnymi a analizą MES. Nie dokonano jednak analizy przyczyn, może to było nieprawidłowe obciążenie ortozy siłami zewnętrznymi? Nie wiadomo także, czy obciążenia w badaniach były zgodne ze standardami, o których wspomniano na str. 34, co schematycznie pokazano na rys. 2.15. Nie zamieszczono także opisu wyników analizy MES przedstawionych na rys. 5.20.

- Str. 33 „W przypadku materiałów kompozytowych szczególne znaczenie mają badania dynamiczne, np. dynamiczna analiza mechaniczna (DMA), które pozwalają ocenić właściwości mechaniczne w zmiennych warunkach obciążenia i temperatury. Z kolei testy zmęczeniowe naśladują długotrwałe użytkowanie ortez i pozwalają określić moment, w którym materiał zaczyna ulegać degradacji lub utracie właściwości mechanicznych.” W pracy nie ma informacji o przeprowadzeniu takich badań, brak także uzasadnienia dlaczego zostały one pominięte. Trudno więc kompleksowo oceniać jakość ortozy wykonanej wskazaną techniką druku 3D, można jedynie mówić o wytrzymałości w warunkach statycznych obciążeń.

3. Analiza ekonomiczna

- Przedstawiona ocena wskaźników techniczno-ekonomicznych (str. 89, 122) obejmuje jedynie koszty wydruku skorupy. Nie uwzględnia innych kosztów i czasów, np.: koszt i czas skanowania, obróbki skanowanych plików (bardzo czasochłonne) i przekształcenie ich do formatu STL. Kolejnymi elementami jest wykonanie zapięcia, ewentualnej wkładki elastycznej, przymiarka ortozy i ewentualne korekty. Stąd „koszt realizacji i całkowity czas potrzebny do uzyskania gotowego wyrobu” nie przedstawia pełnej informacji o kosztach wytworzenia ortozy.
- Brak szczegółowego wyjaśnienia „Dodatkowo, do każdej wyceny wliczono czas niezbędny na przygotowanie projektu modelu oraz jego komponentów – przyjęto stawkę 80 zł/h.” (str. 90, 91), który uwzględniony jest w kosztach energii.

4. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej i procedury rozwiązania postawionych zadań badawczych, metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam jednoznacznie pozytywnie. Mgr inż. Justyna Rybarczyk przedstawiła obszerną, spójną merytorycznie analizę stanu wiedzy z zakresu ważnej współcześnie problematyki badań ukierunkowanych na kompleksową ocenę właściwości wyrobów medycznych wytwarzanych technologią przyrostową z kompozytów polimerowych i wykorzystywania ich w medycynie spersonalizowanej. Doktorantka w procesie badawczym wykorzystwała metodę analizy i krytyki literatury przedmiotu, metodykę badań eksperymentalnych, metody statystyczne oraz metodę obserwacji. W poszczególnych rozdziałach pracy przyjęła uzasadniony logicznie cykl działań. Należy podkreślić trafność i duże znaczenie przeprowadzonych badań materiałowych oraz wytworzonych ortez AFO. Zagadnienia badawcze zostały przeanalizowane wieloaspektowo i szeroko w uporządkowanym metodycznie układzie. Doktorantka potwierdziła tym samym, że dysponuje na wysokim poziomie usystematyzowanym zasobem wiedzy oraz umiejętności do realizacji prac badawczych i dalszego rozwoju naukowego.

5. Ocena formalnej strony pracy

Praca napisana jest bardzo starannie, zrozumiałym i poprawnym językiem. Liczne ilustracje graficzne przedstawianych zagadnień i wyników prowadzonych badań charakteryzują się czytelnością i starannością wykonania, są umiejętnie dobrane i opracowane.

W pracy występują drobne błędy, które nie wpływają na jej ocenę, przykładowo:

- błędy literowe i stylistyczne, np. str. 17, 25, 28, 34;
- brak odniesienia do źródeł pod rysunkami i tabelami, np. str. 14, 21, 24, 54, 55;
- występuje różnica wartości uproszczonego przelicznika w określaniu kosztu produkcji w wariantach komercyjnym, str. 90 i 91;
- powtórzenie treści, str. 151.

Pracę oceniam bardzo pozytywnie i proszę Doktorantkę o ustosunkowanie się do następujących zagadnień:

1. Jak powinien być modyfikowany skan kończyny, aby orteza zapewniała odpowiednią stabilizację przy zachowaniu należytego komfortu użytkowania – brak styku skóry z tworzywem sztucznym, brak odgniecień i odparzeń, dopływ powietrza itp.?
2. Jaki jest model obciążenia ortezy w różnych warunkach użytkowania, np. chodzenie po powierzchni płaskiej, powierzchni pochyłej, po schodach?
3. Jaki wpływ mają obciążenia dynamiczne – zmęczenie materiału i jakie działania należy podjąć aby je uwzględnić w ocenie jakości ortezy?
4. Jaki jest wpływ wykorzystywanych materiałów i procesu wytwarzania na środowisko naturalne?
5. Jaka jest przyszłość technologii 3D w ortotyce?

6. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Treść rozprawy doktorskiej jednoznacznie dowodzi znajomości przedmiotu badań przez mgr inż. Justynę Rybarczyk. Dojrzałość naukowa i pragmatyczne myślenie znajdują swoje odzwierciedlenie w recenzowanej pracy. Doktorantka posiada umiejętność prowadzenia badań w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Studia literaturowe i badania empiryczne były podstawą weryfikacji celu i hipotez badawczych, sformułowanych w pracy.

Biorąc pod uwagę kompleksowość ujęcia problematyki oceny właściwości wyrobów wytwarzanych przyrostowo z kompozytów polimerowych, przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Justyny Rybarczyk zasługuje na wyróżnienie.

Opiniowana rozprawa doktorska mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, zawiera elementy składające się na oryginalne rozwiązanie podjętego problemu naukowego, a także istotne walory użyteczne. Merytorycznie i metodologicznie oceniając wykazuje dobry poziom naukowy. Do walorów pracy zaliczam:

- określony problem badawczy, którego wybór uzasadniono analizą literatury i oceną praktyki klinicznej występującej w tym zakresie,
- poprawność stosowanych metod badawczych,
- wyniki rozważań teoretycznych i analitycznych, które świadczą o dobrym przygotowaniu Doktorantki do prowadzenia prac badawczych i działalności naukowej,
- ocena właściwości mechanicznych wyrobów do zastosowań w inżynierii medycznej i wykorzystanie technologii wytwarzania przyrostowego do personalizacji produktów,
- możliwość praktycznego wykorzystania ortez stawu skokowego i innych produktów medycznych wytwarzanych przyrostowo z kompozytów polimerowych.

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do aktualnego, ważnego i rozwojowego obszaru badawczego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Justyny Rybarczyk p.t. *Ocena właściwości ortez stawu skokowego wytwarzanych przyrostowo z kompozytów polimerowych*, spełnia wymogi określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Justyny Rybarczyk do publicznej obrony.

Bożena Kaczmarska

Bożena Kaczmarska

Kielce, 20 listopada 2025 roku

