



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
KATEDRA BIOMATERIAŁÓW I KOMPOZYTÓW

Prof. dr hab. inż. **Elżbieta PAMUŁA**

Kraków, 17 maja 2026

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pana mgr. inż. Jakuba Szarego
pt. *Projekt i realizacja ortezy stabilizującej staw kolanowy przy
zastosowaniu druku 3D oraz powłok kompozytowych*
zrealizowanej pod kierunkiem promotora pana
dr. hab. inż. Marcina Barburskiego, prof. uczelni

Recenzja została opracowana na podstawie uchwały Rady dyscypliny
inżynieria materiałowa Politechniki Łódzkiej
z dnia 28 lutego 2026
oraz zlecenia pani prof. dr hab. inż. Katarzyny Grabowskiej
Zastępcy Przewodniczącego Rady dyscypliny inżynieria materiałowa
Politechniki Łódzkiej
z dnia 6 marca 2026

Ortezy to wyroby medyczne klasy I, które przeznaczone są do wspierania, odciążania, ochrony bądź unieruchamiania stawów, w tym stawu kolanowego. Wykorzystywane są one do leczenia urazów, w rehabilitacji pooperacyjnej, jako wsparcie profilaktyczne dla osób uprawiających sport a także pomagają w łagodzeniu zmian zwyrodnieniowych. Z uwagi na złożoną budowę anatomiczną stawu kolanowego, a co za tym idzie złożony stan naprężeń i różnice osobnicze, wskazane jest stosowanie u pacjentów ortez, które są indywidualnie dopasowane i spersonalizowane. Nie będzie przesadne stwierdzenie, że tylko odpowiednio zaprojektowane wielofazowe materiały kompozytowe są w stanie spełnić założoną funkcję



WIMiC

**Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
Katedra Biomateriałów i Kompozytów**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. +48 12 617 44 48, fax. +48 12 617 33 71
e-mail: epamula@agh.edu.pl, www.ceramika.agh.edu.pl
Regon: 000001577, NIP: 675 000 19 23

biomechaniczną ortez najnowszej generacji przy zapewnieniu innych parametrów takich jak np. niska masa wyrobu.

Pan mgr inż. Jakub Szary w swojej rozprawie doktorskiej dogłębnie przeanalizował obecny stan wiedzy i wziął te wszystkie przesłanki pod uwagę zanim podjął się zaprojektowania, wytworzenia oraz weryfikacji funkcjonalnej prototypu indywidualnie dopasowanej ortozy stawu kolanowego, a wykonanej z hybrydowego materiału kompozytowego.

W mojej opinii, wybór tematyki rozprawy doktorskiej jest trafny, aktualny i właściwie uzasadniony. Tytuł rozprawy: *Projekt i realizacja ortozy stabilizującej staw kolanowy przy zastosowaniu druku 3D oraz powłok kompozytowych* został właściwie sformułowany i wskazuje, że praca dobrze wpisuje się w dyscyplinę inżynieria materiałowa. Oprócz podejścia czysto naukowego zawiera też wyraźnie rozbudowane elementy badawczo-rozwojowe i aplikacyjne, co jest w pełni uzasadnione tym, że rozprawa została zrealizowana w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy V”, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, we współpracy z przedsiębiorstwem MDH, będącym producentem wyrobów medycznych.

Praca doktorska mgr. inż. Jakuba Szarego została zredagowana w języku polskim i liczy 133 strony. Na początku znajduje się streszczenie w języku polskim i angielskim oraz wykaz skrótów stosowanych w pracy. W rozdziale 1. *Wstęp*, który zajmuje 5 stron, zawarto cel pracy, hipotezy badawcze oraz skrótowo opisano metodykę, zakres i strukturę pracy. Rozdział 2. *Podstawy teoretyczne i stan wiedzy* zajmuje 33 strony. Następnie Autor przygotował 5 rozdziałów, obejmujących 5 obszarów badawczych tworzących logiczną sekwencję począwszy od zaprojektowania materiału kompozytowego a skończywszy na ocenie funkcjonalności prototypu indywidualnie dopasowanej ortozy stawu kolanowego. W rozdziałach tych opisano materiały, metody pomiarowe oraz wyniki badań własnych. Rozdział 8 zawiera podsumowanie wyników całej rozprawy i najważniejsze wnioski. Część eksperymentalna zajmuje 71 stron. Na końcu jest spis bibliografii zawierającej aż 202 pozycje. Pracę cechuje

właściwa proporcja pomiędzy częścią literaturową i doświadczalną. Choć układ pracy nie jest typowy dla dysertacji doktorskich, co z jednej strony sprawia, że czasami w tekście występują powtórzenia, to z drugiej strony, z uwagi na szeroki zakres badań, jest to układ, który sprzyja przejrzystości prezentacji wyników.

Cel pracy i hipotezy zostały właściwie sformułowane i nie mam do nich zastrzeżeń. Podkreślają one, że konstrukcja ortozy ma być oparta na hybrydowym połączeniu rdzenia wytworzonego technologią druku 3D z zewnętrznymi warstwami kompozytowymi wzmocnionymi strukturami włókienniczymi.

W części literaturowej doktorant opisał budowę i właściwości biomechaniczne stawu kolanowego, po czym przeszedł do opisu ortez dostępnych na rynku, kładąc szczególny nacisk na wymagania użytkowe, metody pomiarów anatomicznych pacjentów, na podstawie których ortozy są następnie wytwarzane, po czym przeszedł do metod wytwarzania indywidualnie dopasowanych ortez, przedstawił technologie przyrostowe i technologie kompozytów, które są niezbędne do wytwarzania ortez personalizowanych. Dużo miejsca poświęcił też włóknom stosowanym w zbrojeniach kompozytów oraz przetwarzaniu ich w struktury włókiennicze. Na końcu opisał na czym polega ocena zgodności wyrobu medycznego klasy I według wymagań Unii Europejskiej zawartych w rozporządzeniu *Medical Devices Regulation* (MDR, 2017/745), co należy również uznać za w pełni uzasadnione.

Bardzo podoba mi się ten rozdział, gdyż w sposób systematyczny doktorant opisał najważniejsze zagadnienia dotyczące wytwarzania personalizowanych ortez. Chciałabym jednak zwrócić uwagę na kilka niefortunnych sformułowań i nieścisłości, które pojawiły się w przeglądzie literaturowym pracy. Doktorant zamiennie używa terminu „dystrybucja sił” w kontekście „dystrybucji naprężeń” czy to wewnątrz struktur stawu kolanowego czy też wewnątrz materiału na ortozy (np. str. 15). Doktorant na str. 16 pisze, że staw kolanowy przenosi „siły” a powinno być „obciążenia”. Używa też terminu „lekkość” w kontekście niskiej gęstości (str. 18). Na str. 26

pisze o kompozytach, że charakteryzują się wysokim stosunkiem wytrzymałości „do masy”, a powinno być raczej „wytrzymałości do gęstości”, tak jak to jest przedstawiane np. na typowych mapach Ashby’ego. Na str. 28 Doktorant pisze, że „ceramika znajduje zastosowanie jako biomateriał w inżynierii tkankowej” – ale należałoby dodać, że chodzi tu o tkankę kostną. Na str. 29 zamiast wyrażenia, że omawiane materiały polimerowe cechują się niską „temperaturą ugięcia cieplnego” należałoby użyć terminu „temperatura ugięcia pod obciążeniem”. W Tabeli 1 (str. 31) wkradł też się błąd w jednostce – moduł sprężystości poliamidów oraz żywic powinien być wyrażony a GPa a nie w MPa. Podobnie w Tabeli 2 (str. 35) wytrzymałość włókien węglowych T300 wynosi 3530 MPa a nie 353 MPa. Są to jednak drobne usterki, które nie umniejszają wysokiej wartości merytorycznej tej części pracy, a podaję je z obowiązku pełnienia funkcji recenzenta, aby Autor w przyszłości ich nie powiełał w kolejnych swoich pracach.

W rozdziale 3. *Badania wstępne kompozytów warstwowych* określono przydatność tkanin, plecionek, dzianin w formie rękawów i haftów technicznych do pełnienia funkcji wzmacniającej w kompozytach przeznaczonych na elementy ortez, które uprzednio zostały wykonane metodą druku 3D. Oceniono budowę i właściwości badanych materiałów, w tym właściwości mechaniczne w próbie rozciągania i zginania oraz zdolność dopasowania struktur włókienniczych do geometrii rdzenia polimerowego, który wykonano z poliamidu PA12. Badania wykazały wzrost wytrzymałości i modułu Younga dla materiałów kompozytowych w porównaniu z niezmodyfikowanym rdzeniem polimerowym. Wzmocnienie za pomocą plecionek i dzianiny okazało się najkorzystniejsze z uwagi na lepsze dopasowanie zastosowanych struktur włókienniczych do elementów ortez.

W rozdziale 4. *Badania wpływu przygotowania powierzchni elementów drukowanych 3D na adhezję połączeń klejonych w próbie ścinania* zastosowano mechaniczne i chemiczne metody obróbki powierzchni, a także modyfikację składu żywicy epoksydowej w celu

poprawy wytrzymałości i właściwości użytkowych uzyskanych materiałów. Wykazano, że najkorzystniejsze właściwości uzyskuje się dla powierzchni chropowatych, np. modyfikowanych za pomocą piaskowania oraz gdy używa się żywic zawierających proszek poliamidowy.

W rozdziale 5. *Kompozyt warstwowy* zaprojektowano materiał składający się z drukowanego rdzenia poliamidowego, na który naniesiono włókna szklane ułożone jednokierunkowo a wytworzone metodą haftu technicznego, a następnie nałożono warstwę plecionki węglowej w postaci rękawa, co ostatecznie zaimpregnowano żywicą epoksydową wykorzystując proces infuzji próżniowej. Zastosowano różną architekturę włókien szklanych i węglowych odpowiednio w hafcie technicznym i w plecionce. Scharakteryzowano mikrostrukturę uzyskanych kompozytów metodą mikrotomografii komputerowej i poszukiwano korelacji pomiędzy budową kompozytów a właściwościami mechanicznymi, mając zawsze na względzie potencjalne zastosowanie; takie podejście, jak wiadomo, doskonale wpisuje się w dyscyplinę inżynieria materiałowa. Badania wykazały, że zastosowanie zewnętrznej warstwy wzmacniającej w postaci struktury włókienniczej impregnowanej żywicą epoksydową na drukowanych 3D elementach polimerowych prowadzi do istotnej poprawy ich właściwości wytrzymałościowych, przy jednoczesnym zachowaniu niskiej gęstości opracowanego materiału.

W rozdziale 6. *Modelowanie właściwości sprężystych* oszacowano moduł sprężystości cienkościennych struktur kompozytowych wytwarzanych metodą infuzji, więc takich jak w opracowanych kompozytach, opierając się na regule mieszanin oraz na metodzie elementów skończonych (MES). Pierwsze z podejść okazało się przydatne do kompozytów zbrojonych plecionką, jednak uzyskiwane wyniki obliczeniowe okazały się niższe niż wyniki rzeczywiste. Metody numeryczne dostarczyły zaś danych bardziej zbliżonych do danych eksperymentalnych. Uzyskany model MES może wspomagać proces projektowania personalizowanych ortez.

W rozdziale 7 *Prototyp indywidualnie dopasowanej ortozy stawu kolanowego* przedstawiono schemat blokowy produkcji personalizowanej ramy ortozy stawu kolanowego opierający się na wynikach zawartych w poprzednich rozdziałach rozprawy a składający się z takich etapów jak: skanowanie 3D kończyny, projektowanie ortozy z wykorzystaniem odpowiedniego oprogramowania, wytwarzanie ortozy, obróbka wykończeniowa i montaż. W rozdziale tym opisano również metodę modyfikacji budowy rdzenia w celu poprawy procesu infuzji poprzez rozmieszczenie na jego powierzchni systemu rowków oraz pozostałe elementy prototypu. Bardzo doceniam również przedstawione wyniki badań, które miały na celu weryfikację właściwości mechanicznych prototypu i porównanie ich z ortezami komercyjnymi.

W tym miejscu nasuwają mi się pytania do dyskusji w czasie publicznej obrony:

1. *Czy doktorant wykonywał badania mechaniczne w warunkach pelzania i obciążeń dynamicznych? Czy przeprowadzenie takich badań byłoby wskazane? A jeśli tak, to jakie warunki obciążeń należałoby zastosować i przez jaki czas należałoby prowadzić takie badania?*
2. *Czy w przypadku ortez stawu kolanowego należy przeprowadzić badania biologiczne i ocenę kliniczną? A może wskazane byłoby przeprowadzenie badań klinicznych?*
3. *W jakim kierunku należałoby prowadzić dalsze badania aby nowszej generacji personalizowane ortozy cechowały się jeszcze lepszym stosunkiem parametrów mechanicznych do ich masy (wytrzymałość – gęstość, moduł Younga – gęstość)?*

Na końcu dysertacji doktorant podsumował uzyskane rezultaty badań i wyciągnął wnioski, które znalazły oparcie w przedstawionych wynikach. Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że cel rozprawy doktorskiej został zrealizowany a postawione hipotezy zweryfikowane pozytywnie. Doktorant zgromadził bardzo bogaty materiał

eksperymentalny o dużym potencjale aplikacyjnym, co znalazło odzwierciedlenie w opracowaniu prototypu ortezy. Uwagi, jakie przedstawiam w recenzji, nie umniejszają mojej wysokiej oceny merytorycznej recenzowanej pracy. Pytania są zaproszeniem do dyskusji naukowej w trakcie publicznej obrony.

Podsumowując, chciałabym podkreślić, że dysertacja doktorska mgr. inż. Jakuba Szarego pt. *Projekt i realizacja ortezy stabilizującej staw kolanowy przy zastosowaniu druku 3D oraz powłok kompozytowych* spełnia kryteria stawiane kandydatom do stopnia doktora w dyscyplinie inżynieria materiałowa a zarazem kryteria zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn.zm.).

Wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie pana mgr. inż. Jakuba Szarego do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

E. Peniute