



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I ŚRODOWISKA



Prof. dr hab. inż. Izabela Lubowiecka

Gdańsk, 10.02.2026 r.

Katedra Mechaniki Budowli
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Sławomira Grycuka
pt. „Aspekty metodyczne projektowania sztywnych gorsetów korekcyjnych
do leczenia skoliozy idiopatycznej”**

1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Sławomira Grycuka pt. „Aspekty metodyczne projektowania sztywnych gorsetów korekcyjnych do leczenia skoliozy idiopatycznej”, wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Piotra Mrozka, prof. PB, opracowano na podstawie uchwały Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej z dnia 29 października 2025 roku oraz na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej prof. dr hab. inż. Romualda Mosdorf w piśmie z dnia 28 listopada 2025.

2. Ogólna charakterystyka i struktura pracy

Przedstawiona do oceny praca obejmuje dziewięć rozdziałów, bibliografię oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Jest opatrzona wstępem, zawiera spis tabel oraz spis rysunków i liczy łącznie 163 strony.

Praca dotyczy istotnego problemu kształtowania powłok gorsetów korekcyjnych wykorzystywanych w leczeniu skoliozy idiopatycznej. W dysertacji Autor stosuje metodykę bazującą na analizie trajektorii naprężeń głównych wyznaczonych na podstawie obliczonych numerycznie pól wektorów naprężeń głównych odpowiadających określonym obciążeniom. Dysertacja zawiera modelowanie numeryczne wzbogacone o walidację wyników obliczeń poprzez prototypowanie i prace eksperymentalne. Autor proponuje własną metodykę kształtowania topologii struktury gorsetu, czyli wyłaniania obszarów istotnych z punktu widzenia jego pracy terapeutycznej oraz obszarów mniej istotnych, które w konsekwencji mogą zostać usunięte na rzecz podniesienia walorów użytkowych gorsetu (zmniejszenia masy, większego komfortu cieplno-wilgotnościowego pacjenta i adherencji). Zaprezentowane badania odnoszą się do istniejących ortez.

Pracę rozpoczyna zestawienie skrótów i akronimów. Rozdział pierwszy zawiera przegląd literatury dotyczącej tematyki pracy doktorskiej, gdzie Autor analizuje stan wiedzy na temat konstrukcji ortez tułowia stosowanych w leczeniu skoliozy idiopatycznej u ludzi oraz metod analizy stanu naprężeń konstrukcji bazujących na koncepcji linii przepływu sił. Tutaj Autor wskazuje lukę w badaniach naukowych nad wspomnianymi zagadnieniami, czyli obszar jeszcze nieprzeanalizowany, który stanowić będzie podstawę do sformułowania tezy i celu pracy.

W rozdziale drugim Autor przedstawia cel i zakres pracy oraz dwie hipotezy badawcze, na podstawie których formułuje tezę pracy. Tutaj także zawiera założenia będące podstawą opracowanej metody.

Rozdział trzeci przedstawia, stanowiącą bazę do modyfikacji, konstrukcję istniejącego sztywnego gorsetu typu Boston. Autor opisuje jego geometrię, funkcję oraz sposób oddziaływania na ciało pacjenta.

W rozdziale czwartym i piątym przedstawia się odpowiednio opracowany model geometryczny gorsetu wykonany z zastosowaniem techniki skanowania laserowego istniejącej ortozy oraz model numeryczny oparty na Metodzie Elementów Skończonych wraz z walidacją eksperymentalną. W rozdziale piątym Autor omawia także własne propozycje geometrii gorsetów modelowanych z uwzględnieniem trajektorii maksymalnych naprężeń głównych oraz zaprezentowano metodykę kształtowania zmodyfikowanej konstrukcji gorsetu. Podaje także wyniki analiz numerycznych mechaniki modelu ortozy oraz stanowisko opracowane do badań eksperymentalnych i przeprowadzone testy.

Rozdział szósty to zbiór badań numerycznych w zakresie naprężeń i przemieszczeń różnych wariantów modelu ortozy częściowej i ażurowej zaproponowanych przez Autora po modyfikacji. Tutaj także Doktorant przywołuje sformułowane wcześniej hipotezy badawcze i argumentuje ich potwierdzenie.

W rozdziale siódmym Autor skupia się na przedstawieniu procesu wytwarzania prototypów powłok zmodyfikowanych wariantów gorsetu z zastosowaniem druku 3D, które pozwoliły na walidację doświadczalną, przedstawioną w rozdziale ósmym, modeli numerycznych.

Przeprowadzone w pracy rozważania teoretyczne, modelowanie i badania numeryczne wraz z eksperymentem pozwoliły na sformułowanie, w rozdziale dziewiątym wniosków końcowych i podsumowanie całości oraz wskazanie kierunków dalszych badań.

W pracy zawarto także spis cytowanej literatury w postaci 214 pozycji polskich i zagranicznych.

Na końcu pracy zamieszczono spis rysunków i tabel oraz streszczenie i słowa kluczowe w języku polskim i angielskim.

3. Ocena rozprawy

Głównym celem dysertacji jest opracowanie metodyki kształtowania ortezy w postaci gorsetu służącego do terapii skoliozy idiopatycznej u ludzi. Autor skupia się na problemie wprowadzania modyfikacji struktury powłoki wybranego istniejącego gorsetu (głównie jego geometrii) tak, aby podwyższyć jego parametry funkcjonalne pod względem masy, komfortu cieplno-wilgotnościowego pacjenta oraz adherencji przy zachowaniu jego funkcji korekcyjnych.

W rozwiązaniu problemu badawczego Doktorant bazuje na analizie trajektorii naprężeń głównych, wyznaczonych na podstawie obliczonych numerycznie pól wektorów naprężeń w ortezie przy założonym układzie sił. Jednocześnie zakłada się, że proponowana metoda pozwoli na wyłonienie obszarów o mniejszym znaczeniu konstrukcyjnym i terapeutycznym, co z kolei pozwoli wprowadzić korzystną dla ortezy zmianę topologii powłoki.

Analiza stanu wiedzy, którą Autor pracy zawiera na jej początku pozwala stwierdzić nowatorskość podjętych prac badawczych. Szczególnie, że literatura wskazuje na brak optymalnego kształtowania powłok gorsetów terapeutycznych pod względem sztywności w rejonach, gdzie nie jest ona wymagana na takim poziomie, a co jednocześnie skutkuje projektowaniem przesztynwionych konstrukcji nie zawsze komfortowych dla pacjenta.

Przedstawione w dysertacji badania mają kompleksowy charakter, co jest jej niewątpliwą zaletą. Praca zawiera rozważania teoretyczne, modelowanie geometrii analizowanej ortezy oraz modelowanie numeryczne bazujące na metodzie elementów skończonych. Ważnym aspektem rozprawy jest przeprowadzenie badań doświadczalnych stanowiących walidację proponowanych modeli. Takie rozwiązanie pozwala pełniej ocenić uzasadnienie postulowanych hipotez i uzyskane rezultaty a zarazem jest to rozwiązanie ambitne, wymagające połączenia wiedzy z zakresu modelowania oraz mechaniki eksperymentalnej.

W doświadczeniach Doktorant wykorzystuje model fizyczny gorsetu wykonany z materiału innego niż gorset oryginalny, jednakże przeprowadza badania materiału na próbkach wydrukowanych w orientacji i sposobie odpowiadającym technologii druku gorsetu, szczególnie, że w przypadku druku 3D może to mieć istotny wpływ na parametry materiałowe

wydruku. Na uwagę zasługuje także przeprowadzenie analizy statystycznej wyników. Ponadto, w badaniach Autor wykazuje umiejętność wykorzystania różnorodnego istniejącego oprogramowania do modelowania i obliczeń, prototypowania oraz prowadzenia badań doświadczalnych a także wzbogaca pracę o własne kodów.

W mojej opinii, podjęcie tematyki poruszanej w pracy jest celowe i ma duże znaczenie poznawcze i praktyczne. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość kształtowania ortez o poprawionych cechach funkcjonalnych, np. znaczną redukcję masy, a zarazem zindywidualizowanych, co wpisuje się w aktualne priorytety badań naukowych z zakresu inżynierii biomedycznej.

Praca jest merytorycznie poprawna a układ rozdziałów oraz ich treść służy czytelności i logice przeprowadzonych wywodów. Autor jasno przedstawia metodykę badań, kolejne etapy pracy oraz ich realizację. Literatura cytowana w pracy jest aktualna i dobrze nawiązuje do problematyki poruszanej w dysertacji.

4. Uwagi krytyczne

4.1. Uwagi ogólne

- 1) W pracy stwierdza się, że obszary pełniące rolę stabilizującą i pomocniczą wyłonione podczas analizy można przeprojektować tak, aby zoptymalizować konstrukcję ortezy, np. poprzez usunięcie części materiału.

Czy zastosowane w badaniach warunki brzegowe i obciążeniowe odwzorowują pracę gorsetu w warunkach rzeczywistych i na ile opracowane w dysertacji zaproponowane konstrukcje mogą zachować właściwe funkcje korekcyjne? Na ile obciążenia rzeczywiste w warunkach użytkowania ortezy mogą wpływać na pracę tych obszarów oraz ich rolę?

- 2) W rozdz. 5 (str 85) napisano, że „Przednia część ściany zmodyfikowanego częściowego gorsetu została pogrubiona o 0,95 mm, aby skompensować minimalny wkład nośny usuniętych segmentów powłoki.” Na jakiej podstawie przyjęto tę wartość?

- 3) Czy w modelu ortezy uwzględniono peloty korekcyjne czy tylko zewnętrzną powłokę gorsetu? Jeśli uwzględniono peloty, to jak uzyskano ich geometrię?
- 4) Czy w modelu numerycznym, zwłaszcza powłokowym, przyłożenie sił skupionych nie spowodowało problemów obliczeniowych? W jaki sposób siły te były przykładane? Jak określono miejsca przyłożenia sił?
- 5) Czy współczynnik Poissona pianki przyjęty w obliczeniach na poziomie 0.45, jak dla ciała nieściśliwego, nie powodował problemów ze zbieżnością obliczeń?
- 6) Dyskusja przeprowadzonej analizy numerycznej jest nieco powierzchowna. Autor dyskutuje poprawność wyników obliczeń i zbieżność odnosząc się do procentowej różnicy wartości naprężeń wg. hipotezy Hubera-Mises-Hencky'ego, w kolejnych iteracjach zagęszczania siatki elementów skończonych. Brakuje jednak informacji jakie wartości wzięto do obliczenia tej różnicy ani w jakim punkcie modelu. Przedstawienie badania zbieżności, np. w postaci wykresu ułatwiłoby ocenę poprawności modelowania.
- 7) Czy biorąc pod uwagę poprawność rezultatów analizy numerycznej, można skalować uzyskane w modelu liniowym wyniki przemieszczeń do większych zakresów odpowiadających większym obciążeniom modelu nie mając pewności liniowego zachowania materiału? Jeśli tak, to w jakim zakresie przemieszczeń/odkształceń? Szczególnie, że polimery, będące zwykle wykorzystywane do produkcji ortezy, mogą wykazywać silnie nieliniowe zachowanie.
- 8) Autor w pracy wskazuje, że wartości parametrów użytych w modelu MES dobrano tak, aby zapewniały dobre dopasowanie wyników symulacji do wyników eksperymentu. Takie sformułowanie jest dość nieprecyzyjne, nie podaje się o jakie parametry i wartości konkretnie chodzi.
- 9) W dyskusji wyników podaje się, że względna różnica przemieszczeń centralnej części przedniej ściany gorsetu wynosi ok. 0.6%. Nie podaje się jednak jakiego konkretnie miejsca/punktu dotyczy ten wynik. Podobnie nieprecyzyjnie brzmi stwierdzenie o zgodności wyniku pomiaru z wynikiem obliczeń „na całej powierzchni czołowej” ortezy. Jak tę zgodność oceniono?

- 10) W podsumowaniu stwierdza się, że uzyskano wysoki poziom zgodności wyników obliczeniowych z doświadczalnymi. W części dotyczącej analizy wyników nieco nieprecyzyjnie się przedstawia sposób oceny tego poziomu, co mogłoby być zrealizowane np. przez podanie współczynników korelacji czy determinacji.
- 11) W rozdziale 5 pojawia się stwierdzenie „Opracowano stanowisko do badań...”. Nie jest jednak jasne, czy stanowisko badawcze zostało zaprojektowane/przygotowane przez Doktoranta i czy jest częścią jego pracy badawczej. To bardzo istotny element opisanych badań, zatem można by było to doprecyzować.
- 12) Czy proponowana metodologia ma jakieś ograniczenia?
- 13) Czy zaproponowany gorset ażurowy będzie pozytywnie wpływał na adherencję pacjenta i czy nie będzie przez swoją formę np. bardziej widoczny pod ubraniem?
- 14) Jak jest przewaga proponowanej metodologii nad optymalizacją topologiczną?

4.2. Uwagi szczegółowe

W tekście stwierdzono drobne błędy edycyjne oraz wymienione poniżej usterki:

- W opisie struktury pracy Autor podaje załączniki, których jednak rozprawa nie zawiera.
- W opisie geometrii modelu nie podaje się układu współrzędnych na rysunku.
- Wprowadzenie nazw sił, jako F_1 i F_2 , które zdaje się przy opisie eksperymentu są oznaczone jako A i E rodzi pytanie czy to te same siły czy jednak inne.
- W jakim celu podaje się „fragment makra” napisanego przez Autora, zamiast zawrzeć w pracy cały kod, np. w załączniku?
- Zastanawia fakt stosowania w analizie różnego oprogramowania komercyjnego do opisu trajektorii naprężeń głównych, podczas gdy znane pole przemieszczeń pozwala uzyskać pole odkształceń a przy znanej funkcji sztywności także naprężeń i ich kierunków stosując własny kod bazujący na rozwiązaniu problemu własnego

a i korzystając z pracy Hooke'a (szczególnie w zakresie liniowym). Tym bardziej, że Autor częściowo własne kody stosuje.

- W tekście pracy często pojawiają się określenia walidacja i weryfikacja. Można odnieść wrażenie, że są czasem używane zamiennie, podczas gdy ich znaczenie jest inne.
- W opisie kształtowania nowych form gorsetów Autor pisze o siatce i wskazuje jej formę na rysunkach (np. 5.21) ale nie wiadomo o jaką siatkę chodzi. Czy o siatkę elementów skończonych modelu czy geometrię?
- Przedstawione na rysunkach wartości czasem nie mają jednostek (np. rys. 6.4).
- (strona 99) Zdanie „W pierwszym etapie rozciągania, do uzyskania przyrostu odkształcenia na czujniku ekstensometru na bazie 75 mm, szybkość rozciągania wynosiła 1 mm/min, natomiast następnie 50mm/min, aż do zerwania próbki.” jest trochę niezrozumiałe.

Wszystkie opisane powyżej uwagi nie umniejszają wartości merytorycznej przedstawionej rozprawy ani nie zmieniają pozytywnej opinii Recenzenta.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska w sposób jasny i klarowny prezentuje podjęty temat badawczy oraz jego rozwiązanie. Biorąc pod uwagę kompleksowość podejścia obejmującego wstęp teoretyczny i rozważania numeryczne poparte eksperymentem, można stwierdzić, że Autor wykazuje się umiejętnościami prowadzenia badań oraz analizy ich wyników. Ponadto, świadczy także o wiedzy Doktoranta w zakresie inżynierii biomedycznej, mechaniki, modelowania, prototypowania i prowadzenia badań doświadczalnych.

Podsumowując stwierdzam, że problem naukowy będący przedmiotem rozprawy doktorskiej pt. *„Aspekty metodyczne projektowania sztywnych gorsetów korekcyjnych do leczenia skoliozy idiopatycznej”* został rozwiązany w sposób oryginalny, a cele pracy zostały osiągnięte.

W mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.). W związku z powyższym, przedkładam Radzie Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej wniosek o dopuszczenie mgr inż. Sławomira Grycuka do publicznej obrony.

IZABELA LUBOWICKA