

dr hab. Andrzej S. Swinarew, prof. UŚ, AWF
Instytut Inżynierii Biomedycznej
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych
Uniwersytet Śląski

Recenzja rozpraw doktorskiej

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Sławomira Grycuka zatytułowana „Aspekty metodyczne projektowania powłok sztywnych gorsetów korekcyjnych do leczenia skoliozy idiopatycznej”. Praca została przygotowana na Politechnice Białostockiej, na Wydziale Mechanicznym, w dyscyplinie naukowej inżynieria biomedyczna, należącej do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż., prof. PB Piotr Mrozek. Rozprawa została złożona w Białymstoku w roku 2025.

Recenzja została sporządzona na podstawie przepisów **ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce**, w szczególności art. 186–187, określających wymagania dotyczące nadawania stopnia doktora, w tym konieczność wykazania przez doktoranta: posiadania ogólnej wiedzy w dyscyplinie, umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy badawczej oraz przedstawienia oryginalnych ustaleń naukowych. Podstawę formalną stanowią również zapisy **regulaminu szkoły doktorskiej Politechniki Białostockiej**, które precyzują zasady przygotowania rozprawy doktorskiej, jej oceny oraz kryteria dopuszczenia do obrony, obejmujące m.in. wymóg przedstawienia samodzielnego osiągnięcia naukowego oraz zgodności tematyki pracy z dyscypliną inżynieria biomedyczna.

Przedstawiona rozprawa doktorska dotyczy metod projektowania sztywnych gorsetów ortopedycznych stosowanych w leczeniu skoliozy idiopatycznej. Autor podejmuje problem naukowy o wysokiej aktualności i znaczeniu praktycznym. Praca koncentruje się na opracowaniu i zweryfikowaniu metodyki kształtowania powłok gorsetów z wykorzystaniem koncepcji linii przepływu sił, z uwzględnieniem zarówno aspektów mechanicznych, jak i użytkowych, takich jak masa, komfort termiczny i adhezja terapeutyczna.

Rozprawa doktorska mgr inż. Sławomira Grycuka dotyczy problematyki projektowania powłok sztywnych gorsetów korekcyjnych stosowanych w leczeniu skoliozy idiopatycznej. Tematyka pracy sytuuje się w obszarze inżynierii biomedycznej, łącząc elementy biomechaniki, metod numerycznych, inżynierii materiałowej oraz technologii wytwarzania wyrobów medycznych. Autor koncentruje się na mechanicznych aspektach pracy gorsetów ortopedycznych oraz na możliwościach ich udoskonalenia poprzez racjonalne kształtowanie powłoki nośnej, co ma kluczowe znaczenie dla skuteczności korekcji kręgosłupa. Podjęty problem badawczy jest aktualny i istotny zarówno z punktu widzenia praktyki klinicznej, jak i nowoczesnej inżynierii biomedycznej. Skolioza idiopatyczna stanowi jedno z najczęściej występujących schorzeń deformacyjnych kręgosłupa u dzieci i młodzieży, a stosowane w jej leczeniu gorsety sztywne pozostają podstawowym narzędziem terapii nieoperacyjnej. Jednocześnie współczesna literatura wskazuje na niewystarczający poziom wiedzy dotyczącej mechanicznych właściwości powłok gorsetów oraz ich wpływu na rozkład sił korekcyjnych. W

praktyce klinicznej dominują konstrukcje o jednorodnej, nadmiernie sztywnej powłoce, często nieoptymalizowanej pod kątem masy, komfortu użytkowania czy wentylacji. Autor trafnie identyfikuje tę lukę i podejmuje próbę wypełnienia jej poprzez zastosowanie koncepcji linii przepływu sił oraz metod numerycznych MES do analizy i projektowania powłok gorsetów.

Celem pracy jest opracowanie, uzasadnienie i zweryfikowanie metodyki projektowania powłok sztywnych gorsetów korekcyjnych, która umożliwi ich racjonalne kształtowanie z punktu widzenia rozkładu sił wewnętrznych oraz funkcji korekcyjnej. Autor dąży do stworzenia podejścia pozwalającego na świadome różnicowanie sztywności i geometrii powłoki gorsetu tak, aby zapewnić skuteczną korektę kręgosłupa, przy jednoczesnym zmniejszeniu masy, poprawie komfortu termicznego i zwiększeniu akceptacji terapii przez pacjenta. Opracowana metodyka zmierza do wyznaczenia takich obszarów powłoki, które wymagają wzmocnienia lub mogą być odciążone, co w konsekwencji ma prowadzić do konstrukcji lżejszych, bardziej funkcjonalnych i biomechanicznie uzasadnionych gorsetów. Rozprawa doktorska została przygotowana w sposób uporządkowany i logiczny, a jej struktura odpowiada standardom przewidzianym dla prac naukowych w dyscyplinie inżynieria biomedyczna. Układ treści jest konsekwentny: po wstępie i szerokim przeglądzie literatury autor przedstawia cel i zakres pracy, charakterystykę obiektu badawczego, zastosowane metody inżynierii odwrotnej i modelowania numerycznego, następnie opisuje proces projektowania oraz wytwarzania zmodyfikowanych wariantów gorsetów, a w dalszej części prezentuje rozbudowane badania eksperymentalne i wyniki walidacji, by zakończyć całość syntetycznym podsumowaniem i wnioskami. Taki porządek wyraźnie odzwierciedla sekwencję działań badawczych i umożliwia czytelnikowi płynne prześledzenie procesu dochodzenia do wyników. Treść rozprawy prezentowana jest w sposób jasny i spójny. Poszczególne rozdziały są ze sobą logicznie powiązane, a sposób argumentacji oparty jest na konsekwentnym zestawieniu danych literaturowych, analiz numerycznych i eksperymentów. Autor w sposób świadomy dobiera treści: zarówno przegląd literatury, jak i część metodologiczna są obszernie, ale dobrze uzasadnione charakterem pracy, która wymaga interdyscyplinarnego podejścia obejmującego mechanikę, modelowanie MES, projektowanie CAD/CAM oraz nowoczesne technologie wytwarzania. Obszerne partie teoretyczne nie dominują nad częścią własną – przeciwnie, stanowią czytelne tło dla wprowadzanych rozwiązań i uzasadniają ich potrzebę. Kompozycja rozprawy sprzyja zrozumieniu postępów badawczych, a płynność narracji naukowej utrzymywana jest przez całą pracę. Praca liczy 164 strony zasadniczej treści, zawiera obszerny spis rysunków, spis tabel, streszczenie i abstrakt, a także liczne rysunki i schematy poglądowe, które znacząco poprawiają czytelność opisu i wspierają interpretację wyników. Duża liczba ilustracji – obejmujących m.in. modele gorsetów, schematy obciążeń, wyniki analiz MES oraz dokumentację procesu projektowania – jest uzasadniona charakterem pracy i stanowi jej istotny walor dydaktyczny. Układ graficzny jest przejrzysty, a rysunki odpowiednio opisane. Liczba tabel jest umiarkowana i adekwatna do zakresu prezentowanych danych pomiarowych oraz porównań. Praca nie zawiera nadmiarowych załączników, a wszystkie prezentowane materiały są istotne dla toku wywodu. Praca mgr inż. Sławomira Grycuka reprezentuje wysoki poziom merytoryczny, a jej treść jest spójna, poprawna metodologicznie i osadzona w aktualnym stanie wiedzy z zakresu biomechaniki i inżynierii biomedycznej.



Przegląd literatury stanowi obszerny i wszechstronny fundament teoretyczny rozprawy. Autor wnikliwie analizuje zarówno klasyczne, jak i najnowsze publikacje dotyczące gorsetów ortopedycznych, biomechaniki ich działania, klasyfikacji skolioz oraz technik projektowania i wytwarzania ortez. W pracy uwzględniono szerokie spektrum podejść – od metod tradycyjnych stosowanych w pracowniach ortopedycznych, przez techniki CAD/CAM, aż po numeryczne analizy MES i nowatorskie koncepcje takie jak gorsety drukowane 3D czy rozwiązania z elementami adaptacyjnymi. Przegląd literatury jest aktualny, adekwatny do tematyki pracy i dokładnie uzasadnia potrzebę podjęcia badań nad racjonalnym kształtowaniem powłoki gorsetu z użyciem metod analizy przepływu sił. Jest to jeden z najmocniejszych elementów rozprawy — autor wykazuje bardzo dobrą orientację w literaturze międzynarodowej i trafnie identyfikuje luki badawcze. **Zastosowane metody badawcze** są dobrane świadomie, poprawne i adekwatne do zakładanych celów. Autor wykorzystuje zaawansowane metody inżynierii odwrotnej, skanowania 3D oraz modelowania CAD do odwzorowania geometrii gorsetu typu Boston. Następnie opracowuje nieliniowe modele MES powłoki, które poddaje walidacji eksperymentalnej za pomocą techniki ESPI, co znacząco podnosi wiarygodność uzyskanych wyników. Na szczególne podkreślenie zasługuje zastosowanie koncepcji linii przepływu sił do identyfikacji obszarów przenoszenia obciążeń w strukturze gorsetu – podejście to jest rzadko stosowane w analizach biomedycznych i należy uznać je za innowacyjne. Autor nie poprzestaje na analizie teoretycznej, lecz wykorzystuje uzyskane trajektorie naprężeń do projektowania ażurowych i częściowych wariantów ortez, co świadczy o właściwym zrozumieniu i praktycznym zastosowaniu metodyki. **Wyniki badań** są obszerne, kompletne i dobrze udokumentowane. Praca przedstawia zarówno wyniki symulacji numerycznych, jak i pomiary eksperymentalne wariantów powłok gorsetów, obejmujące m.in. odkształcenia, rozkłady naprężeń, charakterystyki sztywności i wpływ perforacji na zachowanie powłoki. Dane prezentowane są w formie przejrzystych rysunków, map naprężeń i zestawień tabelarycznych, co znacząco ułatwia ich interpretację. Wyniki cechuje wewnętrzna spójność — analizy numeryczne i eksperymenty potwierdzają się wzajemnie, a uzyskane różnice są racjonalnie omówione. Zróżnicowane warianty konstrukcyjne, takie jak ortozy częściowe i ażurowe, zostały przebadane z należytą starannością, co umożliwia ocenę ich potencjału funkcjonalnego. **Dyskusja wyników** jest rzetelna i merytoryczna. Autor trafnie interpretuje uzyskane dane, odnosząc je zarówno do założeń teoretycznych, jak i do praktycznych aspektów użytkowania gorsetów. W dyskusji pojawia się refleksja nad kompromisem między sztywnością konstrukcyjną a komfortem pacjenta, nad rolą perforacji dla parametrów ciepło-wilgotnościowych oraz nad wpływem zmniejszenia masy gorsetu na jego funkcję korekcyjną. Interpretacje są logiczne, osadzone w aktualnej wiedzy naukowej i pozbawione nadmiernych spekulacji. Dyskusja wskazuje na umiejętność krytycznego myślenia i łączenia wyników własnych z doniesieniami literaturowymi. **Wkład autora i oryginalność pracy** są bezsporne. Oryginalność przejawia się przede wszystkim w zastosowaniu koncepcji linii przepływu sił do projektowania powłok gorsetów — metodyka ta nie była dotąd stosowana w analizach ortez tułowi, co autor wykazuje również w przeglądzie literatury. Opracowanie procedury łączącej modelowanie MES, analizę trajektorii naprężeń, projektowanie ażurowych struktur oraz ich eksperymentalną walidację stanowi znaczący wkład w rozwój metod projektowania wyrobów ortopedycznych. Praca ma charakter zarówno teoretyczny, jak i



praktyczny, a jej efekty mogą zostać wykorzystane w dalszych badaniach nad personalizacją gorsetów korekcyjnych oraz w usprawnieniu ich konstrukcji w praktyce klinicznej.

Uwagi krytyczne i sugestie

Pomimo wysokiej jakości rozprawy, warto wskazać kilka kwestii, które – w opinii recenzenta – mogłyby zostać dopracowane, uzupełnione lub przedstawione w bardziej pogłębiony sposób.

1. Niejednorodność szczegółowości między rozdziałami.

Ogólna, wprowadzająca część przeglądu literatury jest bardzo obszerna, momentami wręcz dominujący nad kolejnymi częściami, podczas gdy niektóre fragmenty dotyczące analizy wyników mogłyby zostać rozwinięte. Szczególnie rozdział podsumowujący wyniki MES i eksperymentów mógłby zawierać bardziej syntetyczne porównanie wariantów ortez w formie zestawienia tabelarycznego lub zbiorczego ujęcia wniosków konstrukcyjnych.

2. Ograniczona analiza statystyczna.

Mimo, że natura badań jest głównie inżynierska, w ocenie recenzenta przydałoby się choćby podstawowe omówienie zmienności uzyskanych pomiarów oraz niepewności pomiarowej, zwłaszcza w części dotyczącej badań ESPI. Zaprezentowanie przedziałów błędu lub powtórzeń pomiarowych mogłoby dodatkowo wzmocnić walidację modeli MES.

3. Niewielkie doprecyzowanie doboru materiałów.

W części dotyczącej druku 3D wariantów gorsetów brakuje szerszego uzasadnienia wyboru konkretnych polimerów i ich parametrów. Wskazanie alternatywnych materiałów lub krótkie porównanie ich właściwości mogłoby poszerzyć perspektywę inżynierską pracy.

4. Zależność wyników od warunków brzegowych przyjętych w MES.

Modele gorsetów oparto na realistycznych założeniach, jednak autor mógłby bardziej wyraźnie podkreślić ograniczenia wynikające z uproszczonych warunków brzegowych (np. pominięcie wpływu tkanek miękkich). Ujęcie kilku słów o znanych w literaturze konkretnych modelach tułowia mogłoby stanowić dodatkową wartość metodyczną.

5. Niewielkie rozbudowanie wniosków ogólnych.

Wnioski końcowe są poprawne, ale mogłyby zawierać bardziej jednoznaczne wytyczne projektowe wynikające z metodyki linii przepływu sił – np. rekomendowane zakresy perforacji czy opisy możliwych kompromisów konstrukcyjnych.

6. Użytkowe aspekty gorsetu przedstawiono syntetycznie.

Choć autor omawia komfort cieplno-wilgotnościowy i masę, można byłoby dodać odniesienie do ergonomii i interakcji powłoki z miękkimi tkaninami ciała, co ma rosnące znaczenie w projektowaniu wyrobów ortopedycznych.



Należy jednak podkreślić, że wskazane uwagi mają charakter uzupełniający. Nie umniejszają wartości pracy ani nie wpływają negatywnie na jej merytoryczną jakość, lecz stanowią sugestie mogące wzbogacić dalsze badania autora.

Podsumowując Autor wykazał się:

- zaawansowaną wiedzą w obszarze inżynierii biomedycznej, obejmującą biomechanikę, materiały polimerowe, modelowanie komputerowe, technologie wytwarzania oraz nowoczesne metody walidacji eksperymentalnej;
- umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, co potwierdza kompleksowy charakter pracy: od inżynierii odwrotnej, przez MES, po eksperymenty ESPI i wytwarzanie prototypów;
- zdolnością formułowania i rozwiązywania złożonych problemów badawczych, w tym opracowania autorskiej metodyki projektowania konstrukcji powłokowych;
- wkładem oryginalnym, widocznym w wykorzystaniu koncepcji linii przepływu sił do projektowania gorsetów — podejścia dotąd niewykorzystywanego w tej dziedzinie.

W świetle powyższego rozprawa spełnia wszystkie kryteria pracy doktorskiej, a autor wykazuje kompetencje odpowiadające poziomowi doktora nauk inżynieryjno-technicznych.

Zasygnalizowane uwagi krytyczne mają charakter porządkujący i rozwojowy, a ich celem jest dalsze inspirowanie autora do rozwinięcia badań. Nie podważają one wartości naukowej, oryginalności ani jakości rozprawy, która prezentuje wysoki poziom merytoryczny i spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w pełnym zakresie. Rozprawa przedstawia oryginalne rozwiązania naukowe, zawiera samodzielne wyniki o znaczeniu dla rozwoju inżynierii biomedycznej, a zastosowana metodyka projektowania powłok gorsetów korekcyjnych z wykorzystaniem koncepcji linii przepływu sił ma charakter innowacyjny i wartościowy zarówno z perspektywy teoretycznej, jak i aplikacyjnej.

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy doktorskiej mgr inż. Sławomira Grycuka, przeanalizowaniu jej wartości merytorycznej, poprawności metodologicznej, jakości wyników oraz oryginalności ujęcia problemu badawczego, stwierdzam, że praca w pełni spełnia wymagania określone w ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” oraz w regulaminie szkoły doktorskiej dotyczące nadania stopnia doktora w dyscyplinie inżynieria biomedyczna.

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Sławomira Grycuka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.