

Dr hab. inż. Jolanta Pauk
Profesor Politechniki Białostockiej
Katedra Automatyki i Robotyki
Wiejska 45C, 15-351 Białystok
e-mail: j.pauk@pb.edu.pl, tel. 510 034 086

Białystok, 22.05.2019

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty John
„Modelowanie, symulacje numeryczne i badania doświadczalne struktury
elementów egzoszkieletu”

Recenzję opracowano na podstawie pisma Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego, dr. hab. inż. Anny Timofiejczuk, prof. Pol. Śl. z dnia 17.04.2019 r. Praca doktorska została przygotowana pod kierunkiem dr. hab. inż. Wojciecha Skarki, prof. Pol. Śl.

1. Temat i zakres rozprawy

Recenzowana praca ma objętość 138 stron i składa się z dziewięciu rozdziałów, które poprzedza spis treści i streszczenie, a całość wieńczy spis literatury. Doktorantka przestudiowała i zacytowała odpowiednią liczbę źródeł bibliograficznych - 119 pozycji, w tym publikacje których jest współautorką w liczbie 24 (publikacje i referaty konferencyjne). Jest to dowód na odpowiednią wiedzę teoretyczną i dobrą orientację w zakresie zagadnień będących przedmiotem rozprawy doktorskiej.

Praca dotyczy realizacji bardzo ciekawego zagadnienia - opracowania struktury lekkiej, na bazie znanych i dostępnych materiałów, możliwej do wytworzenia technikami szybkiego prototypowania, przeznaczonej do wytwarzania elementów pełniących funkcję nośną. Wybór tematu pracy uważam za interesujący i niezwykle aktualny ze względu na jej przedmiot. Nie ulega bowiem wątpliwości, że metody szybkiego prototypowania znajdują zainteresowanie w medycynie, protetyce, a także inżynierii biomedycznej. Ceni się je głównie za możliwość dostosowania wyrobu do indywidualnych potrzeb pacjenta. Przedmiot rozprawy niewątpliwie stanowi zagadnienie naukowe i dotyczy ważnego zagadnienia teoretycznego o istotnych walorach praktycznych.

Biuro Dziekana
wpłynęło dnia 27 05 2019
nr 1093/D/KOC zat. 2 egzempl.
2018/2019

W rozdziale pierwszym (5 stron) Doktorantka wskazuje argumenty przemawiające za wyborem tematu pracy oraz formułuje cel i zakres prowadzonych rozważań.

W rozdziale drugim „*Egzoszkielety i szybkie prototypowanie*” (7 stron) Doktorantka koncentruje się na przeglądzie egzoszkieleatów dedykowanych do różnych zastosowań, ze szczególnym uwzględnieniem egzoszkieleatów rehabilitacyjnych. Warto podkreślić, że spersonalizowana medycyna staje się coraz wyraźniejszym trendem, a wykorzystanie technologii przyrostowych do prac nad spersonalizowanymi egzoszkieleatami i specjalistycznymi ortezami jest aktualnym i ważnym zagadnieniem w branży ortopedycznej.

Rozdział 3 „*Struktura naśladowująca tkankę kostną*” (7 stron) dotyczy zagadnień związanych z budową i własnościami tkanki kostnej. Wyniki badań, uzyskane w trakcie realizacji pracy inżynierskiej i magisterskiej, przeprowadzone na 8 próbkach pochodzących z kości udowej zmarłego dawcy są prezentowane w tym rozdziale, ponieważ stanowią przedmiot dalszych badań i analiz realizowanych w ramach niniejszej pracy doktorskiej.

Doktorantka wykazuje się dobrą znajomością struktury metali spienionych i prezentuje w rozdziale 4 „*Spienione metale*” (34 strony) sposoby ich wytwarzania, rodzaje struktur i własności, a także budowę modeli geometrycznych struktur spienionego metalu. Opracowuje również modele struktury przekładkowej typu *sandwich* oraz profilu z wypełnieniem, a następnie przeprowadza testy numeryczne prób wytrzymałościowych z wykorzystaniem MES tj. próbę trójpunktowego zginania i ścinania, a dla profilu z wypełnieniem dodatkowo próbę skręcania.

Z uwagi na problemy związane z wytworzeniem próbek struktury typu metale spienione o akceptowalnej dokładności, Doktorantka poddaje badaniom i analizie klasyczną strukturę typu plaster miodu w rozdziale 5 „*Klasyczna struktura typu plaster miodu*” (22 strony). Proponuje kilka numerycznych modeli jednorodnej struktury (komórka sześciokątna) zmieniając grubość ścianki i wymiary komórek, a następnie decyduje się na strukturę heterogeniczną. Badaniom numerycznym poddaje również struktury przekładkowe z rdzeniem typu plaster miodu i udowadnia, iż zmieniając parametry geometryczne rdzenia takie jak: wysokość, wymiary komórek i grubość ścianki, a także grubość okładzin można wpływać na wytrzymałość i sztywność modelowanej struktury.

Warto podkreślić, że Doktorantka zdaje sobie sprawę z niedoskonałości uzyskanych wyników i braku możliwości wytworzenia próbek struktury techniką przyrostową z odpowiednią dokładnością. W tym celu w rozdziale 6 pracy „*Zmodyfikowana struktura typu plaster miodu*” (20 stron) modyfikuje struktury typu plaster miodu i proponuje strukturę typu odwrotny plaster miodu. Po wprowadzeniu modyfikacji tworzy próbki nowej struktury

z różną gęstością i wielkością otworów, którą następnie poddaje badaniom doświadczalnym tzn. próbie trójpunktowego zginania, podczas których wyznacza maksymalne przemieszczenie liniowe oraz maksymalne naprężenie redukowane i normalne. Analiza dowodzi, iż dla rozważanej struktury w określeniu wytrzymałości i sztywności znaczenie ma grubość ścianki pomiędzy komórkami oraz wielkość i rozkład komórek charakteryzowanych objętością i masą. Niewątpliwie należy podkreślić, iż dzięki zastosowaniu struktury typu odwrotny plaster miodu, Doktorantka rozwiązuje kilka problemów, spośród których należy wymienić: generowanie gładkiego brzegu na każdej ściance wytwarzanego elementu, modelowanie brzegu w przypadku niecałkowitej liczby komórek w szeregu, zadawanie warunków brzegowych na nieregularnym brzegu, płynne przejście pomiędzy otworami o różnych wymiarach w warstwie górnej i dolnej, eliminację niekorzystnej koncentracji naprężeń na granicy warstw, modelowanie elementów zakrzywionych z pustkami o osi prostopadłej do krzywoliniowego brzegu.

Rozdział 7 „*Analiza wyników*” (12 stron) zawiera wyniki testów numerycznych i skorygowanych badań doświadczalnych, które pozwoliły wyznaczyć graniczną minimalną wartość objętości lub masy względnej i grubość ścianki.

Wyniki dowodzą, iż próby wytworzenia i przebadania próbek zmodyfikowanej struktury typu plaster miodu umożliwiają zastosowania jej do projektowania i testowania wybranych elementów egzoszkieletów rehabilitacyjnych dla dzieci. Ten aspekt jest omawiany w rozdziale 8 pracy „*Potencjalne zastosowania*” (19 stron). Doktorantka podejmuje się opracowania, wytworzenia i przetestowania prostego elementu egzoszkieletu kończyny górnej dziecka. Uzyskane wyniki potwierdzają, iż struktura odwrotnego plastra miodu w wersji jednowarstwowej i dwuwarstwowej pozwala, na podstawie analizy stanu naprężenia i przemieszczeń, dobrać odpowiednie kształty oraz parametry geometryczne struktury pod względem wytrzymałości i sztywności przy jednoczesnej minimalizacji kosztów.

Całość rozprawy wieńczy podsumowanie i dyskusja zawarte w rozdziale 9 „*Podsumowanie i dyskusja*”, w którym Doktorantka przedstawia konkluzje swoich rozważań oraz formułuje ciekawe wnioski wynikające z przeprowadzonych badań. Szkoda, że podobnego zakończenia lub krótkiego podsumowania brakuje na końcu każdego rozdziału, co podniosłoby atrakcyjność i odbiór pracy oraz pozwoliło na wyakcentowanie najważniejszych spostrzeżeń wynikających z poczynionych rozważań w każdym z rozdziałów.

Układ pracy jest poprawny pod względem logicznym, pozwala uporządkować materiał badawczy. Wszystkie rozdziały rozprawy wskazują na zdolność Doktorantki do wykonywania pracy naukowej na odpowiednim poziomie. Temat rozprawy jest aktualny

i istotny w kontekście najnowszych badań w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn oraz Inżynieria Biomedyczna.

2. Ocena ogólna

Technologie przyrostowe wytwarzania stały się kluczowym narzędziem w wielu działach przemysłu i zrewolucjonizowały działalność inżynierską, pozbawiając praktycznie większości ograniczeń technologicznych dotyczących kształtu i złożoności wyrobu.

W ostatnim dziesięcioleciu nastąpił dynamiczny rozwój rewolucyjnych technologii, a postęp w dziedzinie biomechaniki i robotyki zaowocował rozwojem egzoszkieleatów o różnym przeznaczeniu. Doktorantka podejmuje zagadnienie, które jest interesujące poznawczo, a jednocześnie ważne z aplikacyjnego punktu widzenia. Idealnie dopasowana geometria wyrobu medycznego do anatomii człowieka, wykonana ze struktury lekkiej i spełniająca określoną funkcję, jest jednym z ważniejszych aspektów we współczesnej medycynie i robotyce, a technologia szybkiego prototypowania pokazuje w tym obszarze ogromny potencjał.

Analiza wytrzymałościowa, metodą elementów skończonych, wspomagana komputerowo pozwoliła Doktorantce na szybkie i względnie dokładne uzyskanie wyników, których obliczenie drogą analityczną byłoby trudne, a wręcz niemożliwe biorąc pod uwagę bardziej złożone elementy konstrukcyjne egzoszkieleatów.

Dużą zaletą rozprawy jest jej całościowy charakter: zawiera ona część doświadczalną, teoretyczną i numeryczną. W części doświadczalnej Doktorantka przeprowadza badania na próbkach wykonanych techniką szybkiego prototypowania FDM na maszynie wytrzymałościowej MTS Insight 10. W części teoretycznej korzysta ze znanych z literatury modeli geometrycznych struktur spienionego metalu (model RVE), stanowiących podstawę wyznaczenia zastępczych stałych materiałowych i macierzy dla struktur regularnych i nieregularnych. Znaczącym i dobrze udokumentowanym osiągnięciem Doktorantki jest przeprowadzenie obszernych analiz numerycznych w odniesieniu do próbek o różnej strukturze.

Podsumowując, do oryginalnych elementów rozprawy zaliczam:

1. Opracowanie struktury materiału, na bazie znanych i dostępnych materiałów.
2. Opracowanie modeli struktury przekładkowej typu *sandwich* i profilu z wypełnieniem oraz przeprowadzenie analiz numerycznych.
3. Opracowanie modelu parametrycznego typu plaster miodu oraz przeprowadzenie badań numerycznych.
4. Zaproponowanie struktury odwrotny plaster miodu do zastosowań w elementach podporowych egzoszkieletu kończyny dolnej człowieka, możliwej do wytworzenia technikami szybkiego prototypowania oraz przeprowadzenie symulacji numerycznych.
5. Projekt i testowanie elementu egzoszkieletu rehabilitacyjnego dla dzieci.

Rozprawa rzetelnie dokumentuje szeroko zakrojone i przeprowadzone przez Doktorantkę badania, które mają w głównej części charakter analiz numerycznych. Doktorantka wykazała się umiejętnością interpretacji wyników symulacji numerycznych w połączeniu z wiedzą inżynierską o badanych strukturach i możliwościach ich zastosowań.

3. Uwagi krytyczne

1. Przegląd egzoszkieletów w rozdziale 2 i 8 ograniczono jedynie do kilku istniejących rozwiązań. Mam nadzieję, że kwestia braku pogłębionej analizy stanu wiedzy w zakresie istniejących rozwiązań egzoszkieletów kończyn górnych znajdzie uzasadnienie w trakcie obrony pracy.
2. Otrzymanie odpowiedniego modelu 3D bezpośrednio z obrazów rezonansu magnetycznego czy tomografu komputerowego jest jednym z kluczowych etapów w procesie wytwarzania elementów metodą FDM na potrzeby medycyny. Dlaczego ten aspekt nie został uwzględniony w procesie konstruowania wybranego elementu egzoszkieletu?
3. Analiza wytrzymałościowa, nawet tak dokładna jak ta wykonana przez komputer metodą elementów skończonych, jest bardzo pomocna w pracy badawczej, lecz jednocześnie stawia pod znakiem zapytania dokładność uzyskanych parametrów materiałowych konstrukcji. Proszę o ustosunkowanie się do tej kwestii w trakcie obrony pracy.

4. W pracy ograniczono się do zaprojektowania i testowania bardzo prostego elementu egzoszkieletu rehabilitacyjnego dla dzieci. Zaproponowanie elementu o bardziej złożonym kształcie mogłoby dostarczyć bardziej interesujących wyników.

4. Strona formalno-redakcyjna

Praca jest starannie zredagowana i dobrze napisana, ale nie jest wolna od błędów:

- nieprawidłowa numeracja rysunków: str. 13 (rys. 2 powinien być oznaczony nr 2.3); str. 34 (rys. 4.7-4.15 powinny być oznaczone nr 4.11-4.19). Naturalną konsekwencją jest nieprawidłowa numeracja rysunków w dalszej części rozdziału 4;
- numery porządkowe rysunków i odwołania do nich różnią się: str. 15 (rys. 2.5 i 2.6 zamiast rys.2 i 3); str. 38 (rys. 4.16-4.17 zamiast rys. 4.20-4.21); str.39 (rys. 4.18 zamiast rys.4.22); str.40 (rys. 4.19 zamiast rys. 4.23; rys. 4.20-4.21 zamiast rys. 4.24-4.25); str. 41 (rys. 4.22 zamiast rys. 4.26; 4.23-4.24 zamiast rys. 4.27-4.28); str. 42 (rys. 4.25 zamiast rys. 4.29; rys. 4.26 zamiast rys. 4.30) i tak do końca rozdziału 4;
- nieprawidłowe odwołanie do tabel: str. 34 (tab. 4.5-4.17 zamiast tab. 3.3-3.15);
- słabej jakości rysunki w rozdziale 4 np. 4.28, 4.31, 4.37, 4.47, 4.48, 4.52, 4.53.

5. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Małgorzaty John nt. *Modelowanie, symulacje numeryczne i badania doświadczalne struktury elementów egzoszkieletu* stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w zakresie modelowania, a także świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Tym samym odpowiada warunkom stawianym rozprawom doktorskim przewidzianym Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami). Wnioskuje zatem do Rady Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej o dopuszczenie mgr inż. Małgorzaty John do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.