

dr hab. inż. Rafał Chatys, prof. uczelni
Katedra Mechatroniki i Uzbrojenia
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
Al. 100-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314, Kielce

Kielce, dn.06.04.2022

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Gojny pt.:

„Multi-scale FE Modelling of Composite Structures-Development, Analysis and Validation Based on Experimental Results”

wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Adama Dacko, prof. uczelni
z Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Gojny stanowi pismo Prof. dra hab. inż. Roberta Sitnika Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 20 grudnia 2021r.

1. Uwagi ogólne o rozprawie

Rozprawa doktorska pod wymienionym wyżej tytułem, została napisana na 247 stronach w języku angielskim wraz ze spisem 55 pozycji literaturowych (włączając normy) oraz załącznik. Praca podzielona została na dwie części. W części teoretyczno-przeładowej (pierwsze 6 rozdziałów) omówiono stan wiedzy metod szacowania mechanicznych właściwości komponentów i kompozytu o osnowie polimerowej, określając wytyczne modelowania. Siódmy i ósmy rozdział (z części eksperymentalnej) zawiera odpowiednio metodykę badan (jej wpływ na wyniki liczbowe uzyskane z symulacji Analizy Elementów Skończonych) i proces porównywania wyników symulacji numerycznych z danymi eksperymentalnymi (rys.8.1) wzbogacony analizami obliczeniowymi w zależności od złożoności struktury kompozytowej (rozdz.9 i rozdz.10).

Wybór tematu rozprawy jest trafnie dobrany zarówno z teoretyczno-poznawczego jak i przede wszystkim użytkowego punktu widzenia.

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Katarzyny Gojny podejmuje dość złożony i aktualny temat jakim jest modelowanie struktur kompozytowych w ramach

wielkoskalowego modelowania elementami skończonymi i wielkoskalowej analizy kompozytu. Należy wyeksponować dobre przygotowanie warsztatowe i merytoryczne Doktorantki rozprawy. Dowodem tego może być informacja mówiąca o przygotowaniu próbek do badań metodą układania ręcznego (hand lay-up). Samo stwierdzenie Autorki rozprawy (cytuję: "że w wyniku procesu wytwarzania materiałów kompozytowych mogą pojawić się pewne niejasności w zachowaniu mechanicznym struktur kompozytowych"), świadczy o dojrzałości naukowej i rozumieniu aspektów technologicznych tj. wpływie:

1. temperaturowego piku egzotermicznego (tzw. "życia systemu żywicznego"),
2. czasie sieciowania (np. żelowania, utwardzania),
3. udziału objętościowego systemu żywicznego komponentów o osnowie polimerowej (żywicy + utwardzacz) przy szacowaniu rozrzutu danych eksperymentalnych, a tym samym mechanizmie uszkodzeń kompozytu.

Zagadnienia poruszane w pracy są ciągle aktualne, a rozwiązania ich stanowią mogą nieocenioną pomoc w projektowaniu nowych materiałów konstrukcyjnych. Nie sposób nie dostrzec zawartych w pracy jej aspektów poznawczych. Chodzi tu głównie o zagadnienia związane z modelowaniem elementami skończonymi wielkoskalowych obiektów wykorzystując eksperymentalne dane z małoskalowych konstrukcji.

Taka analiza może prowadzić do oceny bezpieczeństwa, która jest tak ważną kwestią szczególnie w przemyśle lotniczym.

2. Charakterystyka rozprawy

W części pierwszej rozprawy nt.: "Stan wiedzy w dziedzinie badań" ("State of the art in the area of the research") Doktorantka przedstawia cel, oraz tezę i strukturę pracy. Autorka pracy zakłada, że opracowane modele numeryczne posłużą symulacji, analizie i walidacji progresywnego (krytycznego) zniszczenia struktur kompozytowych, z uwzględnieniem zastosowania różnych typów (procedur) modelowania metodą elementów skończonych (MES) potwierdzonych wynikami eksperymentalnymi. Przyjęty przez Autorkę schemat organizacji pracy nakreślił przejrzystość rozprawy, ale i spowodował pojawienie się pytań dotyczących metod modelowania, narzędzi niezbędnych do projektowania oraz symulacji.

Rozdział drugi zawiera przegląd literaturowy ciągle rozwijających się zastosowań kompozytów jako materiałów konstrukcyjnych w różnych dziedzinach techniki. Ze względu na ich dość znaczące zastosowanie w przemyśle lotniczym w niniejszej pracy badawczej Autorka pracy skupiła się na rozważaniu kompozytów konstrukcyjnych tj.

laminatów i konstrukcji przekładkowych (rys.2.12). Omówiono wiele wybranych pozycji zarówno anglojęzycznych, jak i polskojęzycznych.

Klasyfikacja różnorodnych komponentów o osnowie polimerowej (tj. wzmocnienia-zbrojenia, osnowy), właściwości mechanicznych (wytrzymałościowych) oraz zalet i wad tych materiałów, uwypukla większe trudności w eksploatacji (np. w ich naprawie) w porównaniu ze strukturami metalowymi. Głównym problemem (co również sugeruje Doktorantka) jest zapotrzebowanie na szacowanie i prognozowanie właściwości materiałów kompozytowych i ich optymalnego projektowania, które można uzyskać w wyniku modelowania numerycznego poprzez procedury elementów skończonych (jak związek między elementem a otaczającymi go węzłami, czy określenie warunków brzegowych - w poszukiwaniu płaszczyzn symetrii), co przedstawiono w rozdziale trzecim.

Analiza naprężeń i odkształceń w materiałach jednorodnych czy izotropowych, powoduje że modele matematyczne kompozytów mogą być prowadzone zarówno w skali mikro, jak i makro. Dlatego dla materiałów kompozytowych opracowane różne narzędzia, procesory czy zaawansowane moduły z zakresu modelowania elementów skończonych (jak element belki, element powłok, element bryłowy, sztywny element RBE2 i RBE3) zależne od właściwego doboru układów współrzędnych, zwłaszcza dla struktury złożonej, w których różne lokalne układy współrzędne mogą być używane dla różnych warstw kompozytu. Należy podkreślić, że Doktorantka w tym celu przeanalizowała dość dokładnie oprogramowanie bazujące na pakietach MSC Software i testy eksperymentalne (badania wzmocnienia, badania osnowy, badania mas formierskich i preimpregnatów, testy naciętego odcinka z panelu testowego, badania elementów konstrukcyjnych), które opisano odpowiednio w rozdziale czwartym i piątym.

Pomimo że współczesne analizy obliczeniowe konstrukcji kompozytowych wykonywane są przy użyciu metod numerycznych, to nie wszystkie dane materiałowe są dostępne (nie są ujawniane przez producentów). Dlatego są potrzebne własne testy eksperymentalne dla weryfikacji wartości stałych materiałowych (dla różnych struktur kompozytowych zaczynając od włókna czy elementarnej wiązki włókien do laminatu). Należy pamiętać, że stałe materiałowe kompozytu warstwowego (laminatu) charakteryzują się wieloma parametrami (takimi jak grubość warstwy, kąt orientacji włókien, kolejność układania,...itd.), które wpływają na złożone modelowanie właściwości wytrzymałościowych w porównaniu z materiałami jednorodnymi (rys.4.16).

Dlatego proces połączonych różnych analiz elementów skończonych (MES) jest znany jako „analiza wieloskalowa”. W pracy podkreślono, że na etapie projektowania

kompozytów włóknistych (warstwowych) znając powyższe właściwości można zweryfikowano wieloskalowe modelowanie MES struktur kompozytowych i jednocześnie różne typy modelowania MES materiałów kompozytowych uwzględniając różne zachowania mechaniczne pod obciążeniem (a także mechanizmy uszkodzeń występujących w omawianych skalach).

Wnioski płynące z analizy literatury pozwoliły na ogólne poznanie zjawiska wieloskalowego modelowania MES struktur kompozytowych, co stało się podstawą do przygotowania założeń do programu badań eksperymentalnych oraz doboru metod numerycznych przy realizacji postawionego zadania.

W pracy wskazano również, jak ważna jest metodyka eksperymentalna, podkreślając jej ciągłą ewolucję, co zawiera druga część rozprawy ("Experimental Section"). W tej części rozprawy zawarto metodykę (rozdział siódmy), która została wykorzystana do obliczeń i weryfikacji (rozdział ósmy) modeli mało- i wielkoskalowych wytworzonego skrzydła kompozytowego szybowca PW-6U. Rozdział 9 i 10 przedstawia odpowiednio małoskalowe i wieloskalowe modelowanie numeryczne. Dużą wartością rozprawy są opracowane algorytmy badawcze dla tak złożonych i trudnych materiałów "nowej generacji" jakimi są kompozyty szczególnie o osnowie polimerowej. Zaangażowanie Doktorantki zostało udokumentowane w rozprawie zbudowaniem stanowiska autorskiego dla przeprowadzenia testów na zginanie (rys.9.7- rys.9.8). Badania statyczne, które wkluczały w siebie oprócz zginania próbę rozciągania (rys.9.1-rys.9.2), pozwoliły Autorce rozprawy przeanalizować zachowanie się realnej konstrukcji w małej skali w wyniku opracowania modelu numerycznego MES. Powyższe obliczenia i analizy modelowania konstrukcji kompozytowej (skrzydła szybowca PW-6U) w małej skali (mam na myśli badania numeryczne w zakresie sprężystym), udowodniły przyjętą tezę rozprawy, że wyniki symulacji z modelowania numerycznego otrzymane dla materiałów kompozytowych w małej skali, mogą być wykorzystane (jako badania początkowe) do modelowania numerycznego zachowania się obiektów kompozytowych wielkoskalowych.

3. Oryginalność rozprawy

Oryginalnymi i istotnymi osiągnięciami naukowymi Autorki rozprawy doktorskiej, przedstawionymi w recenzowanej rozprawie są:

- Wyniki z rozległego przeglądu literatury, wzbogacone wiedzą związaną z modelowaniem MES struktur kompozytowych ze względu na odmienne

zachowanie mechaniczne i mechanizmy deformacji kompozytów w różnych skalach i przy różnym obciążeniu.

- Wyniki tej analizy dają cenne kompendium wiedzy dotyczącej metod modelowania numerycznego w zależności od złożoności struktury kompozytowej (tj. przygotowanie założeń do programu badań eksperymentalnych oraz doboru metod numerycznej analizy).
- Modelowanie MES struktur kompozytowych zostało dogłębnie scharakteryzowane z uwzględnieniem analiz top-down i analiz wieloskalowe top-down i bottom-up (co skutkuje redukcją czasu i redukcją kosztów związane z późniejszymi zmianami w procesie produkcji obiektu).

Wyniki rozważań teoretycznych przedstawionych przez Doktorantkę w recenzowanej rozprawie oraz opracowany przez Nią model stanowi cenne narzędzie badań identyfikacji mechanizmów zniszczenia w małych - i wieloskalowych kompozytach warstwowych o osnowie polimerowej.

Pomimo niewątpliwych zalet rozprawy, Doktorantka nie ustrzegła się w niej także niedomówień. Zaliczam do nich:

- Brak w rozprawie parametrów technologicznych dotyczących formowania kompozytu metody ręczną (udziału procentowego lub wagowego komponentów - wzmocnienia i osnowy, temperatury dotwardzania w zależności przeznaczonego czasu na ten proces, temperatury pomieszczenia w którym odbywało się formowanie kompozytu warstwowego, określenie temperaturowego piku egzotermicznego dla systemu żywicznego).
- Niepotrzebnie spis literatury i podziękowanie ujęte zostało jako rozdziały rozprawy.

4. Ocena końcowa rozprawy

Powyższe uwagi krytyczne nie zmieniają ogólnej bardzo wysokiej oceny przedstawionej do recenzji rozprawy. Uważam, że zaproponowana przez Doktorantkę metodyka (procedury) i badania numeryczne z wykorzystaniem pakietu MSC do porównania różnych metod modelowania MES struktur kompozytowych wzajemnie się uzupełniają. W przedstawionych obliczeniach wyczuwa się doświadczenie i umiejętność szacowania danych eksperymentalnych w zakresie wieloskalowego modelowania elementami skończonymi skracając przy tym czas i koszty (w wyniku wykorzystania

modelowania numerycznego w obiektach kompozytowych małoskalowych jako badań początkowych).

W podsumowaniu stwierdzam co następuje.

Rozprawę doktorską mgr inż. Katarzyny Gojny oceniam **bardzo wysoko**, gdyż przedstawia oryginalne własne osiągnięcia naukowe. Doktorantka wykazała się nie tylko obszerną wiedzą z mechaniki, modelowania, technologii formowania struktur kompozytowych, identyfikacji i stosowania różnych typów modelowania metodą elementów skończonych (MES) oraz metod eksperymentalnych, ale również dużym wyczuciem i dojrzałością naukową w formowaniu zagadnień i realizacji rozważań. Stanowi to podstawę do stwierdzenia, że mgr inż. Katarzyna Gojny ma bardzo dobre przygotowanie merytoryczne i doświadczenie do samodzielnej pracy naukowej. Uważam, że niniejsza rozprawa **spełnia wszystkie wymagania** stawiane pracom doktorskim przez aktualnie obowiązującą ustawę o Stopniach i Tytule Naukowych (z dnia 20 lipca 2018r. "Prawo o szkolnictwie wyższym") i wnoszę do Komisji Rady Naukowej Dyscypliny o dopuszczenie mgr inż. Katarzyny Gojny do publicznej obrony recenzowanej pracy.

Wniosek o wyróżnienie pracy

Jednocześnie stawiam **wniosek o wyróżnienie recenzowanej rozprawy**, gdyż uważam osiągnięcia zaprezentowane w rozprawie doktorskiej za ciekawe i oryginalne wypracowane dużym nakładem badań eksperymentalnych i niezwykle dokładnym i skrupulatnym warsztatem symulacyjno-obliczeniowym popartym dobrym przygotowaniem warsztatowym i merytorycznym Doktorantki.

