

dr hab. inż. Stanisław KACHEL, prof. WAT
Instytut Techniki Lotniczej
Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa
Wojskowa Akademia Techniczna

Warszawa, dn. 10.03.2022 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny GOJNY p.t.: „Multi-scale FE Modelling
of Composite Structures – Development, Analysis and Validation Based
on Experimental Results”

1. Podstawa opracowania

Decyzja Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 20 grudnia 2021 r.

2. Zakres pracy

Podjęty przez Doktorantkę problem modelowania i badania eksperymentalnego konstrukcji kompozytowych, jest zagadnieniem złożonym z punktu widzenia naukowo badawczego i niezwykle ważnym ze względów użytkowych. Wyniki badań przedstawione w rozprawie, mogą być wykorzystane przez konstruktorów jak i inżynierów nadzorujących eksploatację statków powietrznych w zakresie bezpieczeństwa wykonywania lotów oraz eksploatację szeroko pojętych struktur kompozytowych.

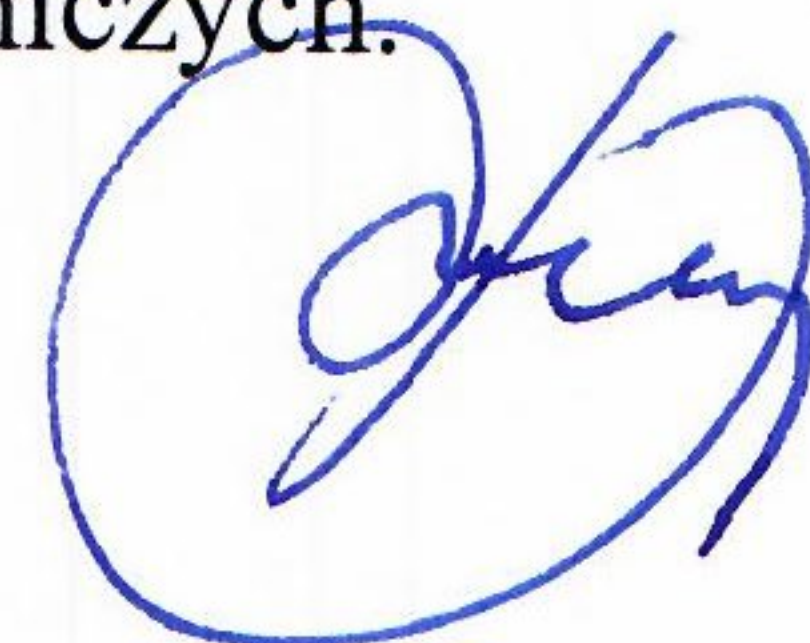
Badania obejmują modelowanie oraz gruntowną analizę struktur metodą elementów skończonych (MES) materiałów kompozytowych w podziale na małoskalowe i wielkoskalowe modelowanie. Praca zawiera zgromadzoną wiedzę o materiałach kompozytowych stosowanych w przemyśle lotniczym. Ciekawym fragmentem rozprawy jest przedstawiony algorytm procesu modelowania materiałów kompozytowych i ich wpływ na parametry wytrzymałościowe konstrukcji.

Praca liczy 247 stron, składa się z: streszczenia, opisu stanu wiedzy w dziedzinie badań, części teoretycznej przeglądowej (niezbędnej), części praktycznej stanowiącej główny trzon pracy, spisu literatury oraz załącznika, który stanowi integralną część rozprawy.



Rozdział zatytułowany „*State of the art in the area of the research*” zawiera niezbędne informacje na temat materiałów kompozytowych na osnowie włókien szklanych. Autorka rozprawy odniosła się do własności tych materiałów oraz obszaru zastosowania w technice lotniczej. Istotnym elementem tego rozdziału jest fakt szybkiego testowania materiałów kompozytowych, a mianowicie struktur składowych metodami numerycznymi. Autorka podkreśla, że materiały kompozytowe, a mianowicie ich własności zależą od ukierunkowania składowego materiału, a matematyczny opis modelu elementu kompozytowego jest znacznie uszczegółowiony niż materiał izotropowy, co utrudnia proces badawczy i jest kłopotliwy w identyfikacji. Podkreślono, że na etapie projektowania materiałów kompozytowych wykorzystując MES można modyfikować ich własności co prowadzi do oszczędności czasu i kosztów projektowanych zespołów, i tu wyłaniają się problemy dotyczące materiałów kompozytowych związane z brakiem w literaturze informacji określających wpływ różnych typów modelowania materiałów kompozytowych w odniesieniu do symulacji numerycznej; - walidację modeli małych i wielkoskalowych; - wnioski o własności kompozytów modelowanych metodą MES w procesie analizy modeli skalowanych. Wiedza na ten temat jest ograniczona i tu Autorka podejmuje się uzupełnić tę lukę poprzez badanie wpływu zróżnicowanego modelowania MES materiałów kompozytowych na własności fizyczne. Bazując na przeprowadzonych rozważaniach Autorka postawiła tezę: „*w ramach wieloskalowego modelowania materiałów kompozytowych wnioski z symulacji modelowania numerycznego materiałów kompozytowych w małej skali mogą być wykorzystane do modelowania wielkoskalowych struktur kompozytowych*”. Do udowodnienia tezy posłużono się elementami kompozytowymi składanymi, przekładkowymi, które są częstym materiałem do tworzenia struktur lotniczych. Praca podzielona została na dwie sekcje tematyczne: - teoretyczną (przeгляд literatury); - eksperymentalną (praktyczną). Wspomniane obszary tematyczne uzupełniają się i jasno podkreślają potrzebę prowadzonych badań nad materiałami kompozytowymi.

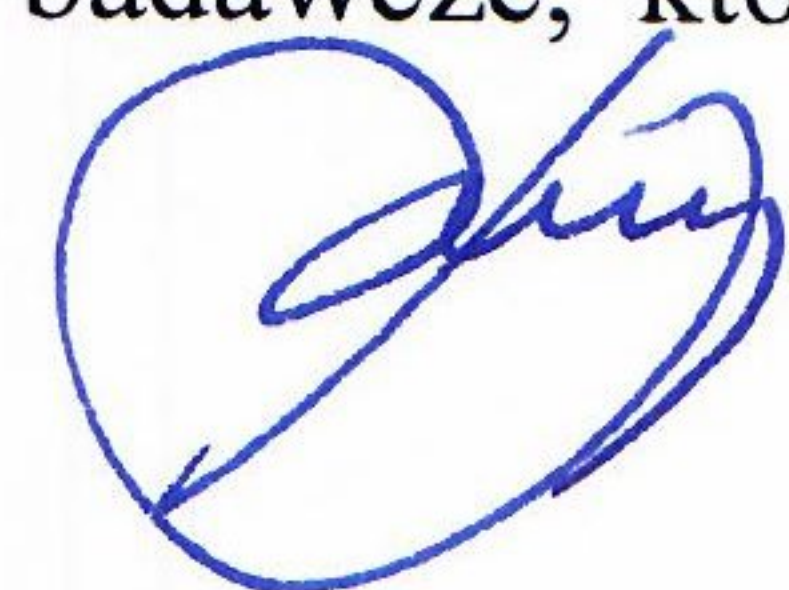
Pierwsza część rozprawy „*Literature review*” zwraca uwagę na istotę problemu, który należy rozwiązać podczas projektowania materiałów kompozytowych, a uzupełnianie wiedzy na temat eliminacji lub neutralizacji groźnego zjawiska występowania krytycznych parametrów materiałów kompozytowych wymaga ciągłego procesu badawczego i jest istotna z uwagi na bezpieczeństwo konstrukcji lotniczych.



W rozdziale tym Doktorantka powołuje się na dostępną literaturę opisującą klasyczne metody analizy szacowania własności materiałów kompozytowych. Istotnym elementem rozprawy jest przeprowadzona analiza zalet i wad materiałów kompozytowych oraz sklasyfikowano bazowe i wzmocnione materiały kompozytowe. Ważnym elementem tego rozdziału są przedstawione parametry krytyczne projektowania materiałów, które mają decydujący wpływ na własności nowoczesnych materiałów kompozytowych. Należy zwrócić uwagę, że rozdział zawiera cenne informacje o materiałach kompozytowych takich jak: szklanych, węglowych, aramidowych oraz podkreślono wagę materiałów przekładkowych.

Rozdział zawiera dobrze uwarunkowane opisy numerycznego modelowania materiałów kompozytowych oraz typy elementów skończonych materiałów kompozytowych. Zwrócono uwagę na istotę problemu, który należy rozwiązać podczas projektowania materiałów w systemach komputerowych bazując na pakietach MSC Software. Należy stwierdzić, że wiedza na temat własności elementów skończonych oraz stawianych warunków brzegowych jest istotna w procesie analizy struktur lotniczych rozpatrując ten proces w kategorii wzrostu bezpieczeństwa. Cennym elementem tej części recenzowanej rozprawy jest rzeczowe przedstawienie problemu naukowego i sposobu rozwiązania wielkoskalowego modelowania materiałów kompozytowych poprzez stosowanie wiarygodnych testów, co niewątpliwie stanowi wartość dodaną w obszarze uporządkowania rozmytych informacji literaturowych w podjętym temacie badawczym.

Druga część recenzowanej rozprawy pt. „*Experimental Section*” podzielona jest na dwa obszary tematyczne: małoskalowe modelowanie numeryczne oraz wielkoskalowe modelowanie numeryczne. Proces walidacji modeli numerycznych oparto o eksperyment, co świadczy o dużej odpowiedzialności Autorki pracy przy wyciąganiu wniosków o adekwatności utworzonych modeli MES. Cennym elementem części eksperymentalnej jest opracowana metodyka badawcza materiałów kompozytowych. Badania eksperymentalne małoskalowych modeli przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron. Poprawność zastosowanej metodyki prowadzonych badań materiałowych została udokumentowana odpowiednimi ilustracjami (rys. 9.1 – 9.5). Testy zginania przeprowadzono na specjalnie zbudowanych autorskich stanowiskach (rys. 9.7 – 9.8). Stwierdzam, że przeprowadzone badania zachowania się materiałów kompozytowych stanowią dobre źródło danych wejściowych do numerycznych analiz MES. Wartościowym elementem rozprawy są opracowane algorytmy badawcze, które



usystematyzowały tok postępowania w obszarze mała i wielkoskalowych badań materiałów kompozytowych. Rozdział zawiera mocno uwarunkowany cel pracy dążący do porównania i określenia własności materiałów kompozytowych na bazie uzyskanych charakterystyk rozciągania i zginania wyznaczonych metodą numeryczną i porównania ich z eksperymentem. Opracowano strukturalne modele jedno i wielowarstwowe oraz przekładkowe. Badania zostały przeprowadzone na prostym dobrze uwarunkowanym modelu obliczeniowym. Wyniki badań przedstawiono na odpowiednich mapach naprężeń i przemieszczeń a zbiorcze wyniki w postaci tabelarycznej zestawiono w tabelach 9.10, 9.11, 9.13.

Cennym elementem rozprawy jest udokumentowany tok postępowania przy wytwarzaniu materiałów do eksperymentalnych badań (rys.9.72 – rys.9.105) standardowych próbek laminatów wielowarstwowych o zróżnicowanej orientacji włókien, które posłużyły do określenia ich własności celem zastosowania w budowie modeli numerycznych oraz eksperymentalnych konstrukcji lotniczych. Autorka podkreśla trafny wniosek z przeprowadzonych badań, że technologia wytwarzania materiałów kompozytowych wpływa na jakość uzyskanych własności fizycznych, stąd dodatkowy wniosek, że dobrym podejściem jest sprawdzenie zachowania się materiału kompozytowego drogą numeryczną na bazie uzyskanych danych z eksperymentu, a otrzymane wyniki numeryczne będą wówczas odzwierciedlać pracę badanego rzeczywistego materiału kompozytowego.

Zebrane doświadczenia przez Autorkę rozprawy na temat materiałów kompozytowych w małej skali posłużyły do badania zachowania się konstrukcji rzeczywistej – konstrukcji kompozytowej skrzydła szybowca. Cennym elementem przedstawionego zakresu badawczego jest fakt opracowania uszczegółowionego modelu numerycznego MES analizowanego skrzydła, który posłużył do identyfikacji miejsc, które mogą być narażone na znaczną koncentrację naprężeń struktury poddanej obciążeniom na stanowisku badawczym/eksperymentalnym. Badania numeryczne przeprowadzono w zakresie sprężystym i niewątpliwie jest uzasadnione dla konstrukcji lotniczych. Uzyskane wyniki z modelu numerycznego i porównane z wynikami eksperymentalnymi udowodniły tezę, że uzyskane wyniki badania materiałów kompozytowych obiektów w małej skali mogą być z powodzeniem transformowane jako dane wejściowe do analiz zachowania się obiektów wielkoskalowych.

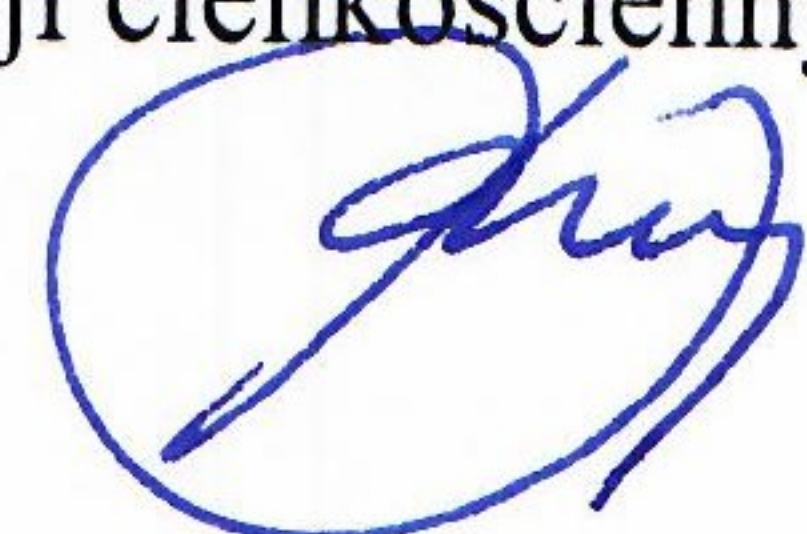


Całość pracy została podsumowana trafnymi wnioskami badawczymi i pośrednio został nakreślony kierunek dalszych słusznych badań.

3. Ocena pracy

Zasadnicza wartość recenzowanej rozprawy polega na umiejętnym zastosowaniu przez Doktorantkę formalizmu metody elementu skończonego, modelowania matematycznego oraz przeprowadzeniu badań eksperymentalnych zachowania się materiałów kompozytowych stosowanych w budowie struktur lotniczych. Badania numeryczne Autorka prowadziła z wykorzystaniem pakietu MSC, natomiast do prowadzenia badań doświadczalnych wykorzystywała aktualną technologię oraz przygotowane autorskie stanowiska badawcze. Praca ma charakter aplikacyjny o bardzo dużym znaczeniu praktycznym. Jej walorem jest to, iż składa się z części obliczeniowej i doświadczalnej, które wzajemnie się uzupełniają. Doktorantka poszukiwała rozwiązań zagadnień praktycznych o dużym znaczeniu poznawczym mającym zastosowanie w rozwiązywaniu zagadnień statyki struktury kompozytowej. Prezentowane w pracy wyniki mają wystarczające odniesienie do literatury, w której zawarte są prowadzone analizy metodami analitycznymi i numerycznymi. Interesujące byłoby porównanie uzyskanych wyników z tymi z literatury na tle własnych symulacji i przeprowadzonych eksperymentów (może kolejny załącznik?). Takiego jednoznacznego zestawienia w pracy nie zauważyłem, a szkoda bo dorobek i umiejętności Doktorantki w tym zakresie są znaczne. Stwierdzam, że pośrednio można utworzyć takie zestawienia na bazie pracy i zamieszczonej w spisie literatury, jednak sprawia to pewna trudność.

Przedstawiona rozprawa zawiera efektywne rozwiązania ważnego zagadnienia naukowego. Jej istotną cechą jest fakt, że może być wykorzystana w wielu obszarach techniki np. w badaniach statyki konstrukcji cienkościennych. Warto wspomnieć, że przeprowadzone symulacje komputerowe nasuwają wniosek, że opracowany model będzie można wykorzystać do procesu optymalizacji masowo-sztywnościowej badanej konstrukcji lotniczej. Stwierdzam, że Autorka rozwiązała zagadnienie naukowe stosując nowoczesne metody obliczeniowe oraz aparat matematyczny odpowiadający współczesnym pracom doktorskim. Zastosowanie nowoczesnych technik symulacyjnych do badania zachowania się materiałów kompozytowych w budowie struktur cienkościennych podkreśla duże umiejętności Doktorantki w zakresie badań numerycznych i eksperymentalnych. Wyniki pracy są wartościowe z punktu widzenia zastosowań badawczych, inżynierskich w statyce lotniczych konstrukcji cienkościennych.



Drobna uwaga krytyczna dotyczy przeglądu literatury, w której nie zauważyłem odwołania do literatury takich znanych prekursorów MES jak: Zienkiewicz O.C., Szmelter J., Dacko M.. Jestem przekonany, że jest to pewnego rodzaju niedopatrzenie Doktorantki ale myślę, że Autorka rozprawy przytoczy w formie wyjaśnienia Ich szandarowe pozycje literatury dotyczące problemów MES.

4. Wnioski

Rozprawa napisana jest bardzo starannie i czytelnie oraz wskazuje na duży zasób wiedzy Doktorantki w zakresie: Teorii materiałów kompozytowych, Modelowania numerycznego (symulacji komputerowych) i Eksperymentu konstrukcji cienkościennych.

Biorąc pod uwagę wartości poznawcze i użytkowe uzyskanych rezultatów, dojrzałość merytoryczną mgr inż. Katarzyny GOJNY w zakresie modelowania i badania struktur kompozytowych, recenzowaną rozprawę oceniam bardzo wysoko. Zasługuje ona na wyróżnienie. Uzasadnienie wyróżnienia pracy zawarte jest powyżej w treści recenzji.

Praca spełnia wymagania stawiane przez ustawę z dnia 20. lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” i może stanowić podstawę dopuszczenia do egzaminu w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i publicznej obrony.

Orawiśław Kuchel