



dr hab. inż. Hubert Dębski, prof. nadzw.  
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki  
Politechnika Lubelska  
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36  
tel: +48 (0-81) 538 42 01, sek. +48 (0-81) 538 42 00  
e-mail: h.debski@pollub.pl

---

Lublin, 06 września 2017r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Lisa

pt. *"Stany zaawansowanych deformacji kompozytowych lotniczych struktur cienkościennych w kontekście zastosowań wybranych wariantów usztywnień"*

**promotor rozprawy: dr hab. inż. Tomasz Kopecki, prof. PRz**  
**promotor pomocniczy: dr inż. Przemysław Mazurek**

*Ocenę opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa*

### 1. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY, METODYKA BADAŃ I ZAKRES PRACY

Przedstawiona do mojej oceny rozprawa doktorska pt. *"Stany zaawansowanych deformacji kompozytowych lotniczych struktur cienkościennych w kontekście zastosowań wybranych wariantów usztywnień"* dotyczy zagadnień związanych z identyfikacją stanów deformacji zakrytycznej lotniczych kompozytowych struktur cienkościennych, wzmacnianych różnymi wariantami usztywnień. Badania na w/w strukturach prowadzono z wykorzystaniem metod eksperymentalnych oraz numerycznych, z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES). Badania eksperymentalne wykonywano na specjalnie do tego celu zaprojektowanych stanowiskach badawczych oraz fizycznych modelach odwzorowujących elementy nośne struktur lotniczych. Zastosowana metodyka badawcza umożliwiła wyznaczenie tzw. reprezentatywnych ścieżek równowagi konstrukcji oraz obserwację zaawansowanych deformacji ustrojów cienkościennych, znajdujących się w zakresie głęboko zakrytycznym. Do rejestracji stanów odkształcenia pokrycia konstrukcji cienkościennych wykorzystano metodę skanowania optycznego - skaner optyczny ATOS.

Obliczenia numeryczne cienkościennych struktur wykonanych z materiałów kompozytowych przeprowadzono z wykorzystaniem nieliniowej analizy MES, w której do rozwiązania zagadnienia geometrycznie nieliniowego zastosowano przyrostowo-iteracyjną metodę Newtona-Raphsona, wykorzystując jako narzędzie numeryczne komercyjny program MSC-MARC. Opracowane modele numeryczne walidowano wynikami badań eksperymentalnych, porównując jednocześnie stany deformacji konstrukcji w zakresie zakrytym (weryfikacja jakościowa), jak i reprezentatywne ścieżki równowagi konstrukcji (weryfikacja ilościowa). Zastosowana metodyka badań umożliwiła opracowanie adekwatnych modeli dyskretnych kompozytowych konstrukcji cienkościennych, umożliwiających wyznaczenie wiarygodnych rozkładów naprężenia w elementach badanych struktur. Takie podejście pozwoliło na realizację postawionego celu pracy – określenia wpływu wybranych rodzajów usztywnień pokrycia na cechy eksploatacyjne struktury nośnej. Wprawdzie w pracy nie postawiono tezy rozprawy, jednakże w rozdziale opisującym wyniki badań własnych omówiony został wpływ zastosowanych rodzajów usztywnienia pokrycia na stan deformacji oraz wyęźnienia konstrukcji, co potwierdza realizację zdefiniowanego przez Autora celu badań.

Obserwowany w ostatnim czasie coraz większy udział kompozytów w nowo powstających konstrukcjach powoduje, że rozwój badań materiałów kompozytowych, zwłaszcza w odniesieniu do oceny stopnia wyęźnienia oraz możliwości uszkodzenia materiału ma bardzo duże znaczenie. Dotyczy to przede wszystkim cienkościennych elementów wykonanych z materiałów kompozytowych, posiadających duży zapas nośności w stosunku do elementów wykonanych z tradycyjnych materiałów inżynierskich (np. metali). Wykorzystanie kompozytów we współczesnych konstrukcjach stale rośnie, o czym świadczą m.in. najnowsze konstrukcje lotnicze (Boeing 787 Dreamliner, Airbus A 350), czy motoryzacyjne (bolidy Formuły 1), co potwierdza korzystne właściwości mechaniczne i eksploatacyjne tych materiałów. Prowadzone badania dotyczące stopnia wyęźnienia oraz nośności cienkościennych struktur kompozytowych wymagają stosowania złożonych, często interdyscyplinarnych metod badawczych. Pomimo zaawansowanych urządzeń pomiarowych oraz narzędzi numerycznych, którymi dysponują współcześni badacze, nie udało się wypracować jednoznacznej metodyki, umożliwiającej w sposób wyczerpujący dokonywanie opisów stanów wyęźnienia, a w szczególności zniszczenia materiałów kompozytowych stosowanych we współczesnych konstrukcjach. Dlatego też, temat i cel rozprawy postawiony przez Autora uważam za uzasadniony i interesujący z punktu widzenia naukowego oraz aplikacyjnego, zwłaszcza w kontekście wykorzystania kompozytów we współczesnych konstrukcjach lotniczych.

Praca zawiera łącznie 162 strony i została podzielona na 7 rozdziałów. Po wprowadzeniu obejmującym opis cienkościennych konstrukcji lotniczych, cel oraz zakres pracy, w podrozdziale 1.3 zaprezentowano przegląd literatury przedmiotu. W rozdziale 2 przedstawiono charakterystykę materiałów kompozytowych, tzw. laminatów, dotyczący rodzajów, budowy oraz podstawowych metod wytwarzania tych materiałów. Rozdział 3 zawiera opis podstawowych właściwości mechanicznych materiałów anizotropowych oraz ortotropowych (do których zaliczamy laminaty), jak również podstawowe kryteria oceny wytrzymałości tych materiałów. W rozdziale 4 zaprezentowano podstawy teoretyczne zagadnień nieliniowych dotyczących stanów deformacji konstrukcji, jak również przedstawiono opis tych zagadnień w ujęciu numerycznym. Rozdział 5 zawiera opis narzędzi i metod badawczych, w tym dotyczący procesu przygotowania modeli fizycznych analizowanych kompozytowych struktur cienkościennych, metodykę pomiaru odkształceń ustrojów w stanach zaawansowanych deformacji zakrytycznych oraz szczegółową charakterystykę przyjętego sposobu dyskretyzacji konstrukcji w opracowanych modelach numerycznych. Rozdział 6 prezentuje wyniki badań eksperymentalnych oraz nieliniowych analiz numerycznych. Autor dokonuje jakościowej oraz ilościowej weryfikacji otrzymanych wyników badań, opisując zaobserwowane w obszarze konstrukcji pola odkształceń oraz wyznaczone rozkłady naprężeń w kontekście zastosowanego wariantu usztywnienia pokrycia. W rozdziale 7 przedstawione zostały wnioski i uwagi końcowe z przeprowadzonych badań, wskazano również oryginalne – zdaniem Autora, elementy pracy oraz wskazano kierunki dalszych badań w tym zakresie. Praca zakończona jest spisem literatury, zawierającym 152 pozycje bibliograficzne oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim.

Badania przeprowadzone w pracy można podzielić na trzy podstawowe części: (1) część teoretyczną, zawierającą opis zagadnień dotyczących mechaniki materiałów kompozytowych oraz zagadnień nieliniowych w ujęciu metody elementów skończonych, (2) część eksperymentalną, zawierającą szczegółowy opis prowadzonych badań stanowiskowych oraz (3) część symulacyjną, w której rozwiązano zagadnienie nieliniowej stateczności kompozytowych struktur cienkościennych, znajdujących się w stanach deformacji zakrytycznej. W pierwszej części (Rozdziały 3 i 4) Autor przedstawia podstawy teoretyczne mechaniki laminatów, opisując związki konstytutywne materiałów anizotropowych i ortotropowych w konfiguracji osiowej (związanej z pojedynczą warstwą laminatu) oraz konfiguracji nieosiowej (dotyczącej całego laminatu), metodykę określania naprężeń i odkształceń na podstawie klasycznej teorii laminacji, jak również prezentuje znane z literatury kryteria inicjacji zniszczenia pierwszej warstwy laminatu (kryterium maksymalnych naprężeń,

kryterium maksymalnych odkształceń, kryterium Azzi-Tsai-Hill'a oraz tensorowe kryterium Tsai-Wu). W dalszej kolejności Autor prezentuje opis i klasyfikację zagadnień nieliniowych występujących w mechanice konstrukcji, charakterystykę ścieżek równowagi (w tym punkty bifurkacji), równania stanu równowagi statycznej w ujęciu metody elementów skończonych, opis numerycznych metod rozwiązywania zagadnień nieliniowych, jak również ocenę wpływu imperfekcji na stateczność konstrukcji.

W części eksperymentalnej (Rozdział 5 i 6) Doktorant zaprezentował autorską metodykę badawczą, umożliwiającą realizację zasadniczych celów pracy. Na szczególne uznanie zasługuje budowa skomplikowanych cienkościennych struktur wykonanych z materiałów kompozytowych oraz stanowisk badawczych, umożliwiających prowadzenie badań na wytworzonych modelach fizycznych, odwzorowujących wybrane fragmenty konstrukcji lotniczych. Wykorzystanie w badaniach nowoczesnych narzędzi pomiarowych – skaner optyczny ATOS, umożliwiło rejestrację stanów zaawansowanych deformacji zakrytycznych, pozwalając na zobrazowanie i pomiar pól przemieszczeń odkształconej konstrukcji. Pomiar przemieszczeń w wytypowanych punktach referencyjnych konstrukcji stanowiły podstawę opracowania reprezentatywnych ścieżek równowagi w pełnym zakresie realizowanego obciążenia. Przeprowadzone badania potwierdzają umiejętności i kompetencje Doktoranta w zakresie przygotowania i prowadzenia skomplikowanych badań eksperymentalnych, dotyczących złożonych ustrojów nośnych.

Realizowana równolegle część numeryczna badań (Rozdział 5 i 6) obejmowała opracowanie adekwatnych modeli dyskretnych badanych struktur cienkościennych, umożliwiających rozwiązanie zagadnienia nieliniowej stateczności cienkościennych konstrukcji kompozytowych, znajdujących się w stanach zaawansowanych deformacji zakrytycznych. W tej części pracy Autor wykazał się umiejętnością modelowania numerycznego, opracowując modele dyskretne badanych ustrojów cienkościennych, które po zweryfikowaniu z wynikami badan doświadczalnych wykazały zadawalającą, zarówno pod względem jakościowym (porównanie stanów deformacji zakrytycznej), jak i ilościowym (zbieżność reprezentatywnych ścieżek równowagi) zgodność wyników symulacyjnych i eksperymentalnych. Oznacza to, że otrzymane w analizie numerycznej rozkłady naprężeń w poszczególnych elementach konstrukcji można uznać za wiarygodne, zgodnie ze wspomnianą w pracy zasadą jednoznaczności rozwiązania. **Zarówno badania eksperymentalne, jak i przeprowadzone nieliniowe analizy numeryczne stanowią oryginalny wkład Autora oraz jego osiągnięcie w badaniach dotyczących opisu zagadnień stanów zaawansowanych deformacji cienkościennych kompozytowych struktur nośnych.**

Wyniki prowadzonych badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych umożliwiły dokonanie oceny wpływu wybranych wariantów usztywnień pokrycia na pracę konstrukcji w stanach zaawansowanych deformacji zakrytycznych. Przeprowadzona analiza wykazała istotne różnice dotyczące zarówno deformacji, jak i rozkładów naprężeń w pokryciu w zależności od charakteru jego wzmocnienia. Zaprezentowano ciekawe rozwiązanie konstrukcyjne, polegające na usztywnieniu pokrycia technologią quasi-integralną (usztywnienie typu *isogrid*), zapewniającą równomierną dystrybucję naprężeń oraz odkształceń przy stosunkowo niewielkim wzroście masy konstrukcji.

Przeprowadzone badania potwierdziły osiągnięcie zamierzonego celu badawczego pracy. Przyjęte modele obliczeniowe oraz metodyka prowadzenia obliczeń numerycznych jest poprawna. Wykonane badania, pozwalają na stwierdzenie, że Autor posiada umiejętność prowadzenia badań naukowych oraz dokonania ich właściwej oceny.

## **2. OCENA ROZPRAWY PYTANIA I UWAGI KRYTYCZNE**

Przedstawiona dysertacja stanowi autorskie opracowanie Doktoranta w zakresie oceny pracy cienkościennych struktur wykonanych z materiałów kompozytowych, znajdujących się w stanach zaawansowanych deformacji zakrytycznych. Praca napisana jest poprawnie od strony merytorycznej i jest wartościowa. O wartości i oryginalności pracy stanowią przede wszystkim rozdziały 5 i 6, w których przedstawiono autorską metodykę badań eksperymentalno-numerycznych, dotyczącą rozwiązania skomplikowanych zagadnień nieliniowych konstrukcji kompozytowych po utracie stateczności. Autor wykonał bardzo obszerne badania eksperymentalne, których wyniki dostarczyły wielu istotnych informacji, pozwalających skutecznie walidować opracowywane modele numeryczne. Edycja pracy jest staranna, rysunki i wykresy wysokiej jakości, opisane poprawnie. Układ pracy nie budzi zastrzeżeń. Mgr inż. Tomasz Lis posiada ogólną wiedzę teoretyczną dotyczącą nieliniowej teorii stateczności konstrukcji cienkościennych, mechaniki i zniszczenia laminatów oraz potrafi wykorzystać możliwości, jakie stwarzają współczesne metody eksperymentalno-numeryczne w analizie wymienionych zagadnień. Uzyskane wyniki są wartościowe zarówno ze względów poznawczych, jak i użytkowych. Dotyczy to przede wszystkim procesu projektowania oraz optymalizacji nowoczesnych cienkościennych konstrukcji lotniczych wykonywanych z materiałów kompozytowych.

Lektura powyższej rozprawy doktorskiej prowadzi jednakże do pewnych uwag i spostrzeżeń przedstawionych poniżej.

1. w podrozdziale 2.1.2 *Kompozyty zbrojone włóknami* (str.20) pojawia się stwierdzenie: „Dzięki najkorzystniejszym parametrom mechanicznym i prostej technologii wytwarzania.....  
„ Technologia wytwarzania kompozytowych elementów nośnych, zwłaszcza w konstrukcjach lotniczych stanowi dosyć złożoną technologię wytwarzania – najczęściej stosowana jest tzw. technika autoklawowa, która z pewnością nie należy do łatwych i prostych technologii wytwarzania. Jest to proces wymagający stosowania specjalistycznego sprzętu, sterowany automatycznie, a sam etap przygotowywania laminatu prowadzony jest z zachowaniem odpowiednich warunków i procedur, w specjalnym pomieszczeniu określanym jako „*clean room*”.

2. w podrozdziale 2.2 *Rodzaje i właściwości włókien* (str.22) wskazano zastosowanie włókien aramidowych głównie w przemyśle sportowym. Moim zdaniem pominięto jedno z głównych zastosowań włókien aramidowych w przemyśle zbrojeniowym, gdzie kompozyty zbrojone tymi włóknami, ze względu na bardzo dobre właściwości energochłonne stosowane są do budowy kamizelek kuloodpornych, czy hełmów wojskowych.

3. w podrozdziale 2.4 *Budowa kompozytu* (str.24) błędnie podano angielskie tłumaczenie skrótów GFRP (*Glass Fibers Reinforced Polimeric matrix*) oraz CFRP (*Carbon Fibers Reinforced Polimeric matrix*). W literaturze przedmiotu terminy te określane są jako: GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer* (lub *Plastic*) oraz CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (lub *Plastic*).

4. w podrozdziale 2.5 *Wytwarzanie kompozytów zbrojonych włóknami* (str.27) wymienione są metody wytwarzania kompozytów. Ostatnia z metod nazwana została jako *preimpregnaty*. Zastosowane określenie nie oznacza nazwy metody wytwarzania kompozytów, tylko dotyczy nazwy półfabrykatu, z którego są one wytwarzane (*pre-pregi*). W przypadku wytwarzania kompozytów z preimpregnatów, jako podstawowe metody wytwarzania można wymienić metodę autoklawową, czy metodę Quickstep. Ponadto w przedstawionym w pracy opisie metod wytwarzania zabrakło bardzo popularnych oraz obecnie szeroko stosowanych metod wytwarzania, jak m.in. RTM (*Resin Transfer Moulding*) i VaRTM (*Vacuum assisted RTM*).

5. w równaniu (3.22) w wyrazie macierzy podatności  $S_{21}$  błędnie podano oznaczenie liczby Poisson'a – jest  $\nu_{21}$ , powinno być  $\nu_{12}$ .

6. w opisie równań (3.31 i 3.32) stwierdzono, że liczba elementów macierzy sztywności i podatności w płaskim stanie naprężenia redukuje się do czterech. Uściślając powyższe stwierdzenie, prawidłowo powinno być podane, że liczba **niezależnych** elementów macierzy sztywności i podatności redukuje się do czterech, gdyż liczba elementów tych macierzy, jak wynika z równania (3.31) wynosi pięć.

7. w opisie zależności (3.29) błędnie podano, że macierz podatności warstwy ortotropowej w konfiguracji osiowej posiada cztery niezerowe elementy (str.37) – powinno być: cztery zerowe elementy.

8. (str.46 i 47) Autor używa sformułowania „*naprężenia niebezpieczne*” w odniesieniu do wartości naprężenia określającego wytrzymałość kompozytu na poszczególnych kierunkach – w mojej ocenie bardziej adekwatnym określeniem w tym przypadku jest pojęcie „*naprężenia graniczne*”.

9. (str.47) określenie „*kryteria wytrzymałościowe dla kompozytów*” w odniesieniu do wymienionych w pracy kryteriów jest błędne, gdyż żadne z wymienionych kryteriów (maksymalnych naprężeń, maksymalnych odkształceń, Azzi-Tsai-Hill’a czy Tsai-Wu) nie jest kryterium wytrzymałościowym, tylko kryterium zniszczenia. Jednym z najczęściej wykorzystywanym w literaturze kryterium wytrzymałościowym w przypadku materiałów kompozytowych jest kryterium Hill’a, stanowiące rozszerzenie hipotezy Hubera-Misesa-Hencky’ego (H-M-H) na materiały ortotropowe.

10. w podrozdziale 3.5.5 *Wytrzymałość kompozytów warstwowych* zastosowano tłumaczenie skrótu FPF (ang. *First Ply Failure*) jako naprężenie niszczące pierwszą warstwę kompozytu. W literaturze przedmiotu określenie FPF dotyczy raczej **kryterium zniszczenia** pierwszej warstwy kompozytu, a nie wartości naprężenia.

11. na str.89 i 91 błędnie podano oznaczenie przemieszczenia w kierunku osi  $z$ : jest  $v$  zamiast  $w$ .

12. opis modeli numerycznych analizowanych konstrukcji jest niekompletny – brakuje m.in. danych dotyczących grubości poszczególnych warstw laminatu oraz zastosowanej techniki modelowania kompozytu.

13. Uwagi edycyjne:

- ogólna uwaga dotycząca interpunkcji: w pracy występuje brak znacznej ilości przecinków, w szczególności przed wyrazami: *który, które, jak, itp.*
- str.11: brak kropki w sformułowanym celu pracy.
- str.37: w równaniu (3.40) przed wyrazem macierzy podatności  $S_{66}$  pomyłkowo wstawiono przecinek,
- str.65: błąd edycyjny pracy – przejście do kolejnego wiersza po jednym wyrazie w wierszu poprzedzającym.

### 3. WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana praca zawiera wartościowe wyniki badań i stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe Autora. Zauważone i wymienione w poprzednim punkcie pewne niedociągnięcia w niczym nie umniejszają jej wartości. Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie wniosków i uwag końcowych o charakterze zarówno poznawczym, jak i rozwojowym. Ocenianą pracę postrzegam za bardzo wartościową pod względem naukowym oraz użytkowym.

Biorąc pod uwagę całość pracy tj. jej wartość poznawczą oraz wkład własny Autora stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Tomasza Lisa pt. "*Stany zaawansowanych deformacji kompozytowych lotniczych struktur cienkościennych w kontekście zastosowań wybranych wariantów usztywnień*" spełnia wymagania stawiane w ustawie z dnia 14 marca 2003r., wraz z późniejszymi zmianami, o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003r. Nr 65, poz. 595) w odniesieniu do prac doktorskich. Wnioskuje zatem o dopuszczenie dysertacji do publicznej obrony.

*Hubert Dobos*