

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Sibilski  
krzysztof.sibilski@pw.edu.pl  
Politechnika Warszawska  
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa  
ul. Nowowiejska 24,  
00-665 Warszawa

Warszawa, 01-09-2023

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej opracowanej przez Pana mgr inż. Radosława Kołodziejczyka**

**nt.:**

### **KSZTAŁTOWANIE AEROELASTYCZNE STRUKTUR KOMPOZYTO- WYCH SKRZYDEŁ W KONTEKŚCIE KRYTYCZNYCH PRĘDKOŚCI LOTU**

*wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej  
Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukaszewicza*

#### **OCENA STRONY METODYCZNEJ**

##### **1. Układ rozprawy**

Rozprawa doktorska obejmuje 158 stron wydruku w formacie A4, w tym 11 stron załączników, zawiera 166 rysunków i 34 tabele. Bibliografię stanowi 109 pozycji o znaczeniu poznawczym i technicznym, obejmujących materiał badawczy rozprawy.

Przedmiotem pracy doktorskiej mgr inż. Radosława Kołodziejczyka jest problematyka celowego kształtowania krytycznych prędkości lotu w kompozytowych strukturach nośnych statków powietrznych. Prędkości te uwarunkowane są występowaniem niepożądanych zjawisk aeroelastycznych, będących efektem wzajemnego oddziaływania sił bezwładności, sił sprężystości oraz sił aerodynamicznych działających na konstrukcje statku powietrznego. W ramach prowadzonych badań Doktorant rozpatrzył wpływ geometrycznych i materiałowych właściwości zbrojonych kompozytów na prędkości krytyczne: dywergencji skrzydła, rewersu lotek oraz flutteru, Doktorant zbadał wpływ rodzaju materiału, liczby i ukierunkowania warstw kompozytu oraz, stopień zbrojenia na właściwości mechaniczne kompozytu, skupiając się na

cechach sztywnościowych struktur kompozytowych konstrukcji lotniczych. Doktorant starał się wykazać, że cechy sztywnościowe kompozytowych struktur powierzchni nośnych statków powietrznych mogą w znaczącym stopniu modyfikować, tym samym w sposób istotny zmieniać krytyczne prędkości: dywergencji, rewersu lotek oraz flutteru skrzydła.

Tematyka rozprawy dotyczy ważnego zagadnienia z obszaru bezpieczeństwa kompozytowych konstrukcji lotniczych. Doktorant opracował metodykę pozwalającą na identyfikację wielkości determinujących krytyczne prędkości lotu statycznych i dynamicznych zjawisk aeroelastycznych. Przeprowadził teoretyczne rozważania oraz numeryczne symulacje wpływu geometrycznych i materiałowych cech kompozytów włóknistych na ich właściwości mechaniczne. Obliczone w oparciu o modele matematyczne własności struktur kompozytowych zostały zweryfikowane doświadczalnie. Doktorant przeprowadził szereg symulacji komputerowych z wykorzystaniem autorskiego programu komputerowego. Pozwoliły one na określenie wpływu cech sztywnościowych kompozytów na prędkości krytyczne flutteru, dywergencji skrzydła i rewersu lotek. Kandydat potwierdził, że zbrojone kompozyty zwiększają prędkości krytyczne zjawisk aeroelastycznych, wykazując jednocześnie istotny wpływ sztywności oraz anizotropowości kompozytowych struktur nośnych na prędkości krytyczne tych zjawisk. Kandydat wykazał, że będące wynikiem anizotropowości struktur kompozytowych efekty sprzężeń giętno-skrętnych, pozwalają na zwiększenie prędkości krytycznych zjawisk aeroelastycznych, tym samym podnosząc poziom bezpieczeństwa konstrukcji statku powietrznego. Należy podkreślić, że przeprowadzone przez Doktoranta prace mają duży potencjał aplikacyjny.

Reasumując uważam, że opracowanie mgr inż. Radosława Kołodziejczyka jest oryginalne i wnosi wartościowe elementy w nurt badań w dziedzinie kształtowania aeroelastycznego struktur kompozytowych skrzydeł samolotów.

Przyjmując, że rozdziały od 4 do 6 (łącznie 77 stron) stanowią zasadniczą część rozprawy doktorskiej, stwierdzam, że proporcje pomiędzy jej częściami merytorycznymi są prawidłowe. Treść pracy nawiązuje w sposób właściwy do jej tytułu, a nazwy rozdziałów przedstawiają spójną całość, dając syntetyczny pogląd na rozważaną treść.

## **2. Metoda opracowania**

Ze względów metodycznych całość rozprawy można podzielić na:

**Część metodologiczną**, obejmującą rozdziały 1, 2 i 3 (57 stron), w której Autor przedstawił genezę podjętych badań, ocenił stan wiedzy dotyczący zakresu merytorycznego rozprawy, określił przedmiot, zakres, cele, tezę i zarys metodyki przeprowadzonych badań. Ponadto

przedstawił metodykę obliczeń aeroelastycznych skrzydeł samolotów oraz opisał przyjęte do dalszych analiz modele włóknistych struktur kompozytowych.

Celem pracy doktorskiej mgr inż. Radosława Kołodziejczyka było zbadanie wpływu cech geometrycznych i materiałowych kompozytowych struktur nośnych płatowca, na powstające w trakcie lotu niebezpieczne zjawiska aeroelastyczne.

Na podstawie studium dostępnej literatury w zakresie zjawisk aeroelastycznych, mechaniki kompozytów, oraz zagadnień kształtowania aeroelastycznego skrzydeł samolotów Doktorant zadał dwa zasadnicze pytania badawcze oraz sformułował tezę swojej pracy.

Pytania badawcze są następujące:

W jakim stopniu cechy geometryczne i materiałowe kompozytów włóknistych wpływają na kształtowanie się sztywności kierunkowej struktury skrzydła? Które z tych wielkości wykazują się największym wpływem na zmiany sztywności?

Czy uzyskiwane zmiany sztywności kompozytowych struktur skrzydeł są na tyle istotne aby w znaczącym stopniu wpływać na kształtowanie prędkości krytycznych lotu?

W świetle wcześniej dokonanego przeglądu aktualnego stanu wiedzy, Doktorant sformułował następującą tezę rozprawy doktorskiej:

*„Krytyczne prędkości lotu, będące efektem zjawisk aeroelastycznych mogą być w istotny sposób kształtowane (zmieniane) poprzez zapewnienie kierunkowej sztywności konstrukcji, co można zrealizować właściwym doбором geometrycznych i materiałowych cech kompozytowych struktur nośnych płatowca”.*

Przyjęta przez Doktoranta metodyka badań, ze względu na ich multidyscyplinarny charakter, objęła zagadnienia z zakresu aeroelastyczności, mechaniki kompozytów, badań doświadczalnych oraz modelowania numerycznego. Zakres podjętych przez Doktoranta badań objął następujące zagadnienia:

1. identyfikację właściwości/parametrów mechanicznych skrzydeł, wpływających na powstające niekorzystne zjawiska aeroelastyczne (flutter, dywergencja skrętna, rewers lotki),
2. określenie wpływu parametrów geometrycznych i materiałowych struktur kompozytowych na ich właściwości mechaniczne,
3. opracowanie narzędzi obliczeniowych do analiz wpływu omawianych parametrów na sztywność struktury kompozytowej,
4. budowę modelu obliczeniowego MES dla struktury reprezentującej uproszczony model skrzydła samolotu,

5. budowę modelu eksperymentalnego struktury analogicznej do tej wykorzystanej w badaniach MES, opracowanie metodyki badań i przeprowadzenie badań eksperymentalnych,
6. weryfikację modelu MES na podstawie badań eksperymentalnych,
7. opracowanie numerycznego narzędzia do modelowania Aero strukturalnego,
8. analizę wpływu sztywności kompozytowych skrzydeł na prędkości krytyczne lotu.

Na podstawie powyższego stwierdzam, że Doktorant podjął się opracowania schematu działań prowadzących do opracowania metodyki obliczeń aeroelastycznych i strukturalnych kompozytowych skrzydeł statków powietrznych. Uważam, że mgr inż. Radosław Kołodziejczyk taką metodykę opracował.

**Część doświadczalna i teoretyczna – obliczeniową** obejmującą rozdziały od 4 do 7 (78 stron), w której Doktorant opisał opracowane przez siebie modele matematyczne i numeryczne kompozytowych struktur skrzydeł statków powietrznych o zróżnicowanym stopniu złożoności. Następnie, zgodnie z opracowaną przez siebie koncepcją piramidy testowej zbadał wpływ: stopnia zbrojenia kompozytu, wykorzystanych materiałów, grubości warstw kompozytu oraz ułożenia kąтового tych warstw, na własności mechaniczne struktury skrzydła. Badania te pozwoliły na określenie wpływu poszczególnych parametrów kompozytowych na kształtowanie się sztywności kierunkowej konstrukcji płatowca. Symulacje komputerowe zostały zweryfikowane badaniami eksperymentalnymi. Doktorant przedstawił opis metodyki przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz proces wytwarzania modeli badawczych. Następnie przeprowadził zarówno badania statyczne jak też dynamiczne przygotowanych modeli konstrukcji badawczych. Wyniki eksperymentów zostały wykorzystane do weryfikacji opracowanych przez Doktoranta modeli numerycznych kompozytowych skrzydeł samolotów. Kolejnym etapem badań były obliczenia wpływu parametrów kompozytowych konstrukcji skrzydeł na prędkości krytyczne. Doktorant wykorzystał odpowiednio zmodyfikowane skrzydło Golanda. Analizy prowadzone były z wykorzystaniem opracowanego przez Doktoranta programu komputerowego łączącego model strukturalny skrzydła z modelem aerodynamicznym. Uzyskane rezultaty pozwoliły Doktorantowi na określenie wpływu wybranych parametrów geometrycznych i materiałowych kompozytowej struktury skrzydła na prędkości krytyczne lotu.

Całość pracy kończy rozdział zatytułowany wnioski, w którym Doktorant odniósł się do własnych dokonań naukowych, porównał wyniki symulacji numerycznych z rezultatami badań eksperymentalnych, formułując wnioski wraz z krytyczną analizą wyników oraz wskazał kierunki dalszych badań.

Reasumując stwierdzam, że podjęty przez Doktoranta problem badawczy został sformułowany poprawnie, tak pod względem obszaru merytorycznego, jak i głębi prowadzonych rozważań, analiz, obliczeń i badań laboratoryjnych. Z punktu widzenia określonych celów, przyjęta koncepcja badań jest w pełni uzasadniona, a zastosowane narzędzia i metody badawcze są do niej adekwatne. Stwierdzam, że zarówno materiał badawczy, jak i literaturowy został przez Doktoranta rozprawy wykorzystany poprawnie. Na podstawie treści pracy można w sposób jednoznaczny ocenić wkład własny Doktoranta np. w poznanie technik pomiarów laboratoryjnych kompozytowych konstrukcji lotniczych oraz analiz aeroelastycznych kompozytowych skrzydeł statków powietrznych.

### **3. Metoda wykładu**

Praca jest ilustrowana 166 rysunkami, wykonanymi czytelnie i jednoznacznie oraz logicznie wplecionymi w treść wykładu. Ułatwia to zrozumienie prezentowanych przez Autora rozważań. Treści poszczególnych rozdziałów właściwie wynikają po sobie, tworząc spójną całość.

Reasumując stwierdzam, że pod względem metodycznym praca zawiera następujące:

#### ***A. Niedociągnięcia***

Zasadniczo nie dostrzegłem większych niedociągnięć pracy doktorskiej mgr inż. Radosława Kołodziejczyka. Doktorant nie ustrzegł się drobnych pomyłek tzw. „literówek”. Zauważyłem kilka błędów w nazewnictwie, i tak np. drgania samowzbudne powierzchni nośnych, w języku Polskim nazywają się „flatter” a nie „flutter”. Ponadto rozdziały 2 i 3 są moim zdaniem zbyt rozbudowane. Wiele informacji to klasyczne dane podręcznikowe i moim zdaniem fragmenty rozdziałów 2 i 3 powinny znaleźć się w załącznikach.

#### ***B. Zalety***

- Obszerny zakres problemowy pracy dający pogląd na ważność podjętej tematyki, oraz dogłębne studium przedmiotu pracy zawarte w rozdziałach 1, 2 i 3.
- Opracowanie oryginalnej metodyki kształtowania aeroelastycznego struktur kompozytowych skrzydeł statków powietrznych.
- Opracowanie skryptów w programie MATLAB przeznaczonych do obliczeń aeroelastycznych kompozytowych skrzydeł.
- Przeprowadzenie serii badań weryfikujących poprawność działania opracowanych przez Doktoranta programów komputerowych.
- Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń.

- Przedstawienie i analiza wyników symulacji numerycznych.

Należy podkreślić, że przeprowadzone przez mgr inż., Radosława Kołodziejczyka badania, obliczenia i analizy stanowią zarazem genezę pracy, a także uwypuklają nowe elementy opracowanego przez Doktoranta innowacyjnego rozwiązania w postaci metodyki aeroelastycznego kształtowania kompozytowych konstrukcji skrzydeł statków powietrznych.

## **OCENA STRONY MERYTORYCZNEJ**

Zasadniczym przedmiotem pracy było opracowanie metodyki aeroelastycznego kształtowania kompozytowych struktur skrzydeł samolotów. W oparciu o dane literaturowe Doktorant opracował modele matematycznych struktur kompozytowych oraz odpowiednie modele aerodynamiczne tych struktur. Następnie opracował skrypty w środowisku programu MATLAB i przeprowadził obliczenia struktury stanowiącej podstawę do badań laboratoryjnych. Przeprowadził szereg badań statycznych i dynamicznych struktury testowej i porównał wyniki obliczeń z regulacjami testów, dowodząc poprawności działania opracowanych przez siebie skryptów obliczeniowych. W dalszej części pracy Doktorant przeprowadził numeryczne oraz eksperymentalne analizy wpływu geometrycznych i materiałowych właściwości kompozytowych struktur lotniczych na kształtowanie się krytycznych prędkości krytycznych dywergencji i flutteru. Poruszone przez Doktoranta zagadnienia wpisują się w koncepcję kształtowania aeroelastycznego (Aeroelastic Tailoring). Przeprowadzone przez Kandydata badania potwierdziły tezę pracy i pozwoliły na sformułowanie szeregu praktycznych wniosków.

Po zapoznaniu się z treścią pracy chciałbym podjąć polemikę z Autorem nad zaprezentowanymi przez niego wybranymi rozważaniami i opiniami. I tak:

- Uważam, że celowe byłoby przeprowadzenie badań wytrzymałości materiału struktury skrzydła w warunkach krytycznych prędkości dywergencji i flutteru.
- Krytycznie należy odnieść się również do wyników analiz rewersu lotki, w których Doktorant nie uwzględnił zmian kąta natarcia skrzydła spowodowanych prędkością kątową przechylania.
- Przeprowadzone przez z Doktoranta analizy odnosiły się tylko do przypadku skrzydła prostego o stałej cięciwie wzdłuż rozpiętości. W jaki sposób kąt skosu i zbieżność skrzydła wpłynie na prędkości krytyczne flutteru, dywergencji skrzydła lub rewersu lotek.
- Uważam, że celowe byłoby przeprowadzenie prób dla szerszego spektrum konfiguracji kompozytów.

## PODSUMOWANIE

Przedstawiona do recenzji praca jest ciekawa i nowatorska. Autor wykazał się orientacją w badanej problematyce. Potrafił wyodrębnić najistotniejsze problemy badawcze oraz określić sposoby i metody adekwatne do ich rozwiązania.

Uważam, że osiągnięciami Doktoranta są

- identyfikację właściwości/parametrów mechanicznych skrzydeł, wpływających na powstające niekorzystne zjawiska aeroelastyczne (flutter, dywergencja skrętna, rewers lotki),
- określenie wpływu parametrów geometrycznych i materiałowych struktur kompozytowych na ich właściwości mechaniczne,
- opracowanie narzędzi obliczeniowych do analiz wpływu omawianych parametrów na sztywność struktury kompozytowej,
- budowę modelu obliczeniowego MES dla struktury reprezentującej uproszczony model skrzydła samolotu,
- budowę modelu eksperymentalnego struktury analogicznej do tej wykorzystanej w badaniach MES, opracowanie metodyki badań i przeprowadzenie badań eksperymentalnych,
- weryfikację modelu MES na podstawie badań eksperymentalnych,
- opracowanie numerycznego narzędzia do modelowania Aero strukturalnego,
- analizę wpływu sztywności kompozytowych skrzydeł na prędkości krytyczne lotu.

Bez wątplenia praca doktorska została wykonana samodzielnie i wnosi wkład w rozwój badań nad aeroelastycznością kompozytowych skrzydeł statków powietrznych. Wiedza zdobyta na podstawie analiz wyników uzyskanych z przeprowadzonych przez Doktoranta eksperymentów pozwoliła na weryfikację modeli obliczeniowych kompozytowych skrzydeł. Z kolei programy obliczeniowe pozwalają na aeroelastyczną analizę oraz obliczenie prędkości krytycznych flutteru, dywergencji i rewersu lotek nowoprojektowanych statków powietrznych bezzałogowych o kompozytowej konstrukcji.

## WNIOSEK KOŃCOWY

Reasumując uważam, że recenzowana rozprawa została poprawnie skonstruowana pod względem merytorycznym i językowym. Uwzględniając osiągnięte wyniki badań, rozprawę

doktorska oceniam bardzo wysoko. Zawartość rozprawy świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Stwierdzam zatem, że praca doktorska mgr. inż. Radosława Kołodziejczyka pt. „*Kształtowanie aeroelastyczne struktur kompozytowych skrzydeł w kontekście krytycznych prędkości lotnej*” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (Dz.U. nr. 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami). W związku z tym wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

.....*/Sibilski*.....

prof. dr hab. inż. Krzysztof Sibilski