

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława Kołodziejczyka
p.t.: „Kształtowanie aeroelastyczne struktur kompozytowych skrzydeł w kontekście
krytycznych prędkości lotu”**

1. Podstawa opracowania

Decyzja Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej z dnia 27 września 2023 r.

2. Zakres pracy

Podjęty przez Doktoranta naukowy problem kształtowania aeroelastycznych struktur kompozytowych głównego zespołu nośnego statków powietrznych w kontekście krytycznych prędkości lotu 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 pracujących w zespołach badawczych nad zagadnieniami inżynierii mechanicznej związanych z technologiami lotniczymi oraz eksploatacją szeroko pojętych struktur cienkościennych.

Przeprowadzone przez Doktoranta badania obejmuje analizę aeroelastyczności struktur kompozytowych oraz analizę funkcjonalną kluczowych parametrów wytrzymałościowych mających decydujący wpływ na jakość konstrukcji. Opracowany algorytm badania struktur kompozytowych oraz wyselekcjonowane i przyjęte modele obliczeniowe zjawisk aeroelastycznych zostały precyzyjnie wykorzystane do zaproponowania modelowania materiału dla potrzeb budowy struktur lotniczych. Na szczególną uwagę zasługują przeprowadzone symulacje numeryczne, które doskonale wpisują się w podkreślenie innowacyjnego myślenia oraz postępowania w obszarze technologii lotniczych.

Praca zawiera zgromadzoną wiedzę o metodach analizy konstrukcji lotniczych z uwzględnieniem niebezpiecznych zjawisk aeroelastycznych. Wartościowym fragmentem rozprawy jest przedstawiony algorytm procesu modelowania i badania obiektu w zakresie



aerosprężystości struktury oraz przedstawienie powiązania pomiędzy siłami aerodynamicznymi, bezwładności i sprężystości, które mają wpływ na walory jakościowe konstrukcji w przewidywanych warunkach eksploatacji.

Praca liczy 158 stron, składa się z: wykazu ważniejszych oznaczeń, wykazu skrótów, wprowadzenia, pięciu głównych rozdziałów wniosków, wykazu literatury oraz załączników stanowiących integralną część przedstawionej do recenzji rozprawy. Praca jest poprawnie zestawiona ponieważ zawiera część teoretyczną przeglądową (niezbędną) do podkreślenia ważności wpływu aeroelastyczności na proces projektowania i optymalizacji konstrukcji lotniczych. Wprowadzenie zawiera niezbędne informacje na temat materiałów kompozytowych ich historii, zastosowania, kształtowania wytrzymałościowego oraz pokazuje trendy rozwojowe modelowania aeroelastycznego materiałów w odniesieniu do przeprowadzonej analizy literatury. Autor rozprawy podkreśla problem krytycznych prędkości lotu będących efektem zjawisk aerosprężystości, które mogą wpływać decydująco na sposób kształtowania konstrukcji lotniczych, a które to własności można poprawić poprzez sterowanie rozkładem sztywności materiałów kompozytowych. Autor przedstawił występujące trudności w określeniu warunków brzegowych niezbędnych do projektowania materiałów kompozytowych zapewniających wymaganą aeroelastyczność dynamiczną, a która to trudność wynika z konieczności przeprowadzania zaawansowanych eksperymentów. W rozprawie przedstawiono sposób rozwiązania istotnego problemu poprzez symulacje numeryczne na bazie opracowanego przez Autora programu komputerowego wykorzystującego dyskretny model sztywnościowy skrzydła oraz modele aerodynamiczne oparte na metodzie pasowej oraz panelowej Vortex Lattice Method (VLM). Tak przygotowane rozpoznanie stanowiło dobre podłoże do określenia celu i zakresu pracy oraz wyłonienia tezy rozprawy, która brzmi: *„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”*.

Rozdział drugi „Aeroelastyczność” zawiera niezbędny ogólny opis zjawisk aeroelastycznych, które niewątpliwie wpływają na proces kształtowania się modeli numerycznych do precyzyjnego rozwiązania zadań badawczych dążących do opracowania optymalnego układu aero-strukturalnego. Rozdział zawiera bogaty opis wielkości wpływających na jakość modelowanego aerodynamicznego zespołu nośnego statku

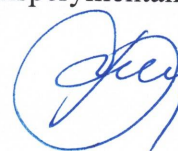


powietrznego. Na szczególną uwagę w rozdziale drugim zasługuje przeprowadzona analiza aerodynamiki stacjonarnej, niestacjonarnej oraz występujących zjawisk przy rozpatrywaniu wpływu aeroelastyczności statycznej i dynamicznej. Autor uzasadnia potrzebę budowania i pracę nad rozwojem modeli obliczeniowych, które uwzględniają wspomniane zjawiska.

Rozdział trzeci „*Kompozyty*” Autor zwraca uwagę na istotę problemu, który należy rozwiązać podczas projektowania układów aeroelastycznych poprzez odpowiedni dobór materiałów lub projektowania struktur kompozytowych ukierunkowanych na poprawne własności mechaniczne spełniające kryteria wytrzymałościowe. Cennym elementem tego rozdziału jest gruntowe przedstawienie wpływu współczynników mechanicznych na własności kompozytów, które Autor rozprawy właściwie zastosował do opracowania procedur w systemie MATLAB. Należy zwrócić uwagę, że rozdział zawiera cenne informacje o kryteriach uwzględnianych w procesie projektowania. Wartościowym elementem tej części recenzowanej rozprawy jest rzeczowe przedstawienie problemu naukowego i sposobu podejścia do modelowania układu konstrukcyjno-wytrzymałościowego skrzydła samolotu poprzez włączenie wiarygodnych obliczeń i prognoz laboratoryjnych, co niewątpliwie stanowi wartość dodaną w obszarze uporządkowania brakujących informacji literaturowych w podjętym temacie badawczym.

Rozdział czwarty recenzowanej rozprawy pt. „*Analiza kompozytowych struktur nośnych*” zawiera udokumentowane badania teoretyczne poparte obliczeniami numerycznymi różnych konstrukcji siłowych struktur cienkościennych wykonanych z kompozytów. Na szczególną uwagę zasługują badania wpływu stopnia złożoności zbrojenia na własności mechaniczne materiałów wykorzystywanych do budowy aeroelastycznych zespołów statku powietrznego. Istotnym elementem staje się rzetelność wykonanych analiz porównawczych wyników uzyskanych w oparciu o modele belkowe dające bardzo dobre zbieżności oraz pozwalające programować sztywność giętną, skrętną oraz sztywność sprzężenia struktur kompozytowych, co jest niewątpliwie wartością dodaną w obszarze inżynierii mechanicznej.

Rozdział piąty „*Badania*” stanowi istotną część recenzowanej rozprawy, która jest weryfikacyjną częścią przeprowadzonych analiz w udokumentowanych w poprzednich rozdziałach rozprawy. Rozdział podzielony jest na dwa obszary tematyczne: pierwszy obszar konstrukcyjno-obliczeniowy, drugi obszar badania eksperymentalne. Proces



walidacji modeli numerycznych oparto o eksperyment, co świadczy o dużej odpowiedzialności Autora pracy przy wyciąganiu wniosków o adekwatności utworzonych modeli MES. Cennym elementem części eksperymentalnej jest opracowana metodyka badawcza zespołu nośnego reprezentującego keson skrzydła. Poprawność zastosowanej metodyki prowadzonych testów laboratoryjnych w zakresie statyki i dynamiki zostały przeprowadzone na wzbudniku drgań (młotek modalny) a wyniki eksperymentu zostały wykorzystane do kalibracji modelu numerycznego. Porównawcze wyniki zostały zestawione na ilustracjach i wykresach (rys.5-32 – 5-45). Wartościowym elementem rozprawy są opracowane algorytmy badawcze, które usystematyzowały tok postępowania w obszarze badania funkcjonalności zespołów nośnych zbudowanych z kompozytów spełniających surowe wymagania eliminowania niekorzystnych zjawisk aerosprężystych. Rozdział zawiera dokument zrealizowania głównego celu pracy poprzez określenia własności badanego zespołu na bazie uzyskanych charakterystyk statycznych i dynamicznych i porównania ich z eksperymentem. Badania zostały przeprowadzone na dobrze uwarunkowanych modelach obliczeniowych, a wyniki ich badań przedstawiono na odpowiednich wykresach i mapach dokumentujących aeroelastyczność dynamiczną badanego układu, co stanowi kolejną wartość dodaną w obszarze inżynierii mechanicznej.

Rozdział szósty „*Analiza kształtowania aeroelastycznego krytycznych prędkości lotu*”
Badania numeryczne aero-strukturalnego modelu w zakresie wyznaczania prędkości krytycznych przeprowadzono w oparciu o autorskie programy wykorzystane w systemie MATLAB. Cennym elementem tego rozdziału są przedstawione algorytmy wyznaczania: prędkości dywergencji skrętnej, prędkości rewersu lotki, prędkości flatteru. Proces weryfikacji modelu został przeprowadzony na wzorcach skrzydła HALE oraz Goland. Uzyskane wyniki z modelu numerycznego i porównane z wynikami wzorcowymi dały dobrą zbieżność, co podkreśla jakość opracowanego Autorskiego modelu dowodząc przyjętą tezę rozprawy, że krytyczne prędkości lotu, mogą być w istotny sposób kształtowane poprzez zapewnienie kierunkowej sztywności konstrukcji, co można osiągnąć poprzez właściwy dobór geometrycznych i materiałowych cech kompozytowych struktur nośnych płatowca.

Całość pracy została podsumowana trafnymi wnioskami badawczymi i wyznaczonym kierunkiem dalszych słusznych badań.



3. Ocena pracy

Zasadnicza wartość recenzowanej rozprawy polega na umiejętnym zastosowaniu przez Doktoranta formalizmu metody elementu skończonego, modelowania i analiz matematycznych oraz prowadzeniu badań eksperymentalnych zachowania się konstrukcji cienkościennej poprzez kształtowanie aeroelastyczne, celem oddalania krytycznych prędkości lotu. Badania numeryczne Autor rozprawy prowadził w oparciu o opracowany model geometryczny w systemie CATIA, a który został implementowany do pakietu ANSYS. Uzyskane wyniki z analiz numerycznych zostały zweryfikowane poprzez eksperyment utworzonego obiektu badawczego na bazie opracowanego modelu CAD. Na uwagę zasługuje pomysłowość Autora w procesie opracowania technologii z wykorzystaniem wymiennego pokrycia klesonu badawczego. 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. Doktorant poszukiwał rozwiązań zagadnień praktycznych o dużym znaczeniu poznawczym mającym zastosowanie w analizie zagadnień kształtowania aeroelastycznego struktur kompozytowych z uwzględnieniem parametru krytycznej prędkości lotu. Prezentowane w pracy wyniki mają wystarczające odniesienie do literatury, w której zawarte są prowadzone obliczenia metodami analitycznymi i numerycznymi. Interesujące jest porównanie uzyskanych wyników z tymi z literatury (skrzydło HALE oraz skrzydło Golland) na tle własnych symulacji i przeprowadzonych eksperymentów co stanowi wartość dodaną w rozpatrywanym obszarze inżynierii mechanicznej.

Drobnym mankamentem przedstawionej do recenzji pracy jest brak wykonanych analiz wyężenia konstrukcji w procesie badania krytycznych prędkości lotu, jednak należy podkreślić, że Autor w podsumowaniu wskazuje na brak tych analiz, co stawia Go w hierarchii naukowców nacechowanych wysoką etyką oraz odpowiedzialnością Autora za prowadzone badania, a które zostaną rozwinięte i uzupełnione w przyszłości.

Rozprawa zawiera rozwiązanie ważnego zagadnienia naukowego, którego istotną cechą jest fakt, że może być wykorzystana w wielu obszarach techniki np. w badaniach statyki konstrukcji, dynamiki i kształtowania aeroelastyczności konstrukcji lotniczych. Warto wspomnieć, że przeprowadzone symulacje komputerowe nasuwają wniosek, że opracowany modułowy model badawczy będzie można wykorzystać do złożonego procesu masowo-sztywnościowej optymalizacji struktur lotniczych. Stwierdzam, że Autor rozwiązał zagadnienie naukowe stosując nowoczesne metody obliczeniowe oraz



zastosował aparat matematyczny odpowiadający współczesnym pracom doktorskim. Zastosowane nowoczesne technik symulacyjne do badania zachowania się modułowego kesonu skrzydła podkreśla duże umiejętności Doktoranta w zakresie badań numerycznych i eksperymentalnych. Wyniki pracy są wartościowe z punktu widzenia zastosowań poznawczych w statyce i dynamice statków powietrznych.

Uwag krytycznych w pracy nie stwierdziłem.

4. Wnioski

Rozprawa napisana jest starannie i czytelnie oraz wskazuje na duży zasób wiedzy Doktoranta w zakresie: Modelowania algorytmów, Modelowania strukturalnego, Modelowania numerycznego (symulacji komputerowych) i Eksperymentu konstrukcji cienkościennych w zastosowaniu do technik lotniczej.

Biorąc pod uwagę wartości poznawcze i użytkowe uzyskanych rezultatów, dojrzałość merytoryczną mgr. inż. Radosława KOŁODZIEJCZYKA w zakresie modelowania i badania struktur z obszaru techniki lotniczej w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna, recenzowaną rozprawę oceniam bardzo wysoko. Rozprawa zasługuje ona na wyróżnienie. Uzasadnienie wyróżnienia rozprawy doktorskiej 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 naukowej: Inżynieria mechaniczna oraz do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

