

Prof. Ing. Jaromír Příhoda, CSc.
Ústav termomechaniky AV ČR

Posudek disertační práce
Aerodynamické charakteristiky flexibilních křídel

autor Ing. Robert Kulhánek
Fakulta strojní ČVUT v Praze
Studijní obor Dopravní stroje a zařízení

Disertační práce, obsahující celkem 85 stran, je rozdělena do 6 kapitol. Dále obsahuje 7 příloh, seznam obrázků, tabulek a zkratk, seznam použité literatury a vlastních publikací. Práce se zabývá aerodynamikou padákových kluzáků, zejména na modelování degradace aerodynamického výkonu způsobeného flexibilitou křídla pomocí experimentálních a numerických metod.

V úvodu je popsán vývoj padákových kluzáků, popis jejich konstrukce a vlastností. V další kapitole padákového kluzáku je provedena rešerše problematiky, zahrnující experimentální výzkum, numerické simulace a současnou vývojovou praxi. Cíle práce, vyplývající z provedené rešerše, jsou uvedené ve třetí kapitole. Cílem je určit vliv flexibility na výkony padákového kluzáku v letových podmínkách, experimentálně zjistit vliv pilota padáku na jeho výkon a navrhnout zjednodušený model pro stanovení vlivu deformace na degradaci aerodynamických charakteristik s využitím numerické simulace.

Ve čtvrté kapitole je popsán použitý postup řešení a použité metody a v páté kapitole výsledky, které zahrnují vyšetřování v aerodynamickém tunelu, letová měření a numerické simulace. Pro realizaci experimentu bylo třeba vyvinout speciální měřicí přístroj pro měření a záznam letových dat. Z letových měření byla stanovena polára padákového kluzáku a závislost flexibility na rychlosti. Výsledky ukazují, že se zvětšující se deformací dochází k posunu stagnačního bodu směrem k náběžné hraně a ke zvětšení dynamického tlaku působícího na povrch padákového kluzáku. Měření v aerodynamickém tunelu bylo zaměřeno na stanovení odporu pilota v postroji. Vzhledem k zápornému vzepětí křídla byla pro analýzu použita tzv. teorie nosné čáry. Měření byla provedena pro různá Reynoldsova čísla a úhly náběhu.

Numerické simulace byly zaměřeny na vytvoření zjednodušeného modelu pro stanovení vlivu flexibility na aerodynamiku křídla kluzáku. Model používá zjednodušený profil tvořený jednou komorou. Model představuje problém aeroelasticity popisující reakci struktury křídla na obtékání profilu a na jeho zatížení. Aerodynamické výpočty byly provedeny programem OpenFOAM pro turbulentní nestlačitelné proudění pomocí SST modelu turbulence. Odezva struktury na tlakové zatížení komory padákového kluzáku byla řešena pomocí metody konečných prvků softwarem ABAQUS. Pro výpočet byla struktura padáku modelována pomocí membránových elementů bez ohybové tuhosti. Výpočet pomocí obou modelů probíhal iteračně. Z výsledků simulací byly odvozeny vztahy pro součinitel odporu a vztlaku, které umožňují modelovat poláru s velmi dobrou shodou s experimentem.

V závěru jsou shrnuty dosažené výsledky. V přílohách jsou uvedeny detaily numerických a experimentálních metod.

Připomínky a dotazy

K práci nemám zásadní připomínky, týkající se přístupu k řešení zadaného problému. Práce je pečlivě vypracována a obsahuje málo jazykových chyb. Dále uvádím některé připomínky a dotazy k disertační práci:

- 1) V práci je použita řada zkratk, ale v seznamu označení jsou uvedeny jen tři, z toho dvě všeobecně známé (CFD a FEM) a Re pro Reynoldsovo číslo, které mezi zkratky nepatří, neboť se jedná o proměnnou (bezrozměrný parametr). Nejsou vysvětleny zkratky NLLT (obr. 13) a FSI (obr. 28).
- 2) Označení metod numerického řešení zkratkami CFD a FEM není přesné, neboť metoda konečných prvků se používá ve výpočetní dynamice tekutin.
- 3) Data pro analýzu letových měření byla vypočtena programem Xfoil. Jaký profil byl použit pro tento výpočet?
- 4) Při obtékání profilů je od náběžné hrany laminární mezní vrstva. Mohl být výpočet obtékání proveden pomocí modelu turbulence s modelem přechodu, např. γ - $Re\theta$ SST model?
- 5) Jaký je vliv turbulence na odpor profilu? Proč nebyl vyšetřován vliv turbulence proudu?

Závěry a hodnocení

Disertační práce se zabývá komplexním řešením aerodynamiky padákových kluzáků, zejména vlivem flexibility profilu na aerodynamický výkon. Při řešení byly použity experimenty, které zahrnovaly jednak letová měření a měření v aerodynamickém tunelu a jednak numerické simulace. Na základě provedených experimentů a výpočtů byl navržen návrhový model, který umožňuje stanovit v závislosti na konstrukčních parametrech výkon padákového kluzáku.

Navržený přístup je velmi sofistikovaný a řešení výrazně rozšiřuje dosavadní poznatky (znalosti) o aerodynamice padákových kluzáků. Práce splňuje všechny cíle disertace. Výsledky disertace byly publikovány v jednom časopise s IF a ve sbornících několika konferencí.

Disertant prokázal dobré znalosti z oblasti experimentálních metod i numerických simulací. Disertace přináší původní výsledky z oblasti aerodynamiky padákových kluzáků, které byly odpovídajícím způsobem publikovány. Disertace splňuje všechny podmínky podle §47 zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. ve znění pozdějších předpisů a proto ji doporučuji k obhajobě.

V Praze dne 12. dubna 2020