

STRENGTH AND MODAL FEATURES OF THE VE20 WIND-TURBINE COMPOSITE ROTOR BLADE Pevnost a modální vlastnosti kompozitního listu rotoru větrné elektrárny VE20

Vilém Pompe¹

A new wind-turbine composite rotor blade was developed and tested by the Aircraft Propellers Division of Aeronautical Research and Test Institute in Prague. Composite materials bring new design possibilities and, unfortunately, open also new uncertainty in the design process. Material properties are now subjects of the same design effort as the proper function of the whole product. The theoretical way of establishing material properties includes systematical errors as well as the experimental way of the same process, mainly when considering the difference between a perfect test sample (or mathematical model) and the real composite structure. This contribution describes the use of modal test results as an input file of data for correction of predicted material properties. Modal analysis is understood as a necessary preparation for the ultimate load test. Corrections of material characteristics based on the first principal mode of vibration brought a very good agreement of theoretical and experimental results from the ultimate load test.

Keywords: *propeller, wind-energy, wind-turbine, composite materials*

Úvod

Projekt "Pokročilá rotorová jednotka pro větrné elektrárny" byl realizován za finanční pomoci MPO ČR v rámci výzkumného programu "Konsorcia", vyhlášeného v roce 2000. Kompozitní list rotoru byl navržen z dostupných materiálů s maximálním ohledem na technologičnost a konečnou cenu výrobku. Součástí vývojových prací byly i verifikační modální zkoušky a mezní statická zkouška do lomu.

List má sendvičový potah a je vybaven jedním hlavním nosníkem. Použitý materiálový systém je na bázi sklo E/epoxid, v konstrukci sendviče je použito jádro z pěny Herex. Výztuž má pouze plátnovou vazbu, laminace je provedena kontaktním způsobem do negativních forem. Pro dosažení konečných materiálových charakteristik je prováděno temperování hotového listu dle stanoveného programu.

Modální analýza a zkoušky

Modální analýza kompozitních prvků primární konstrukce již nemůže být chápána jen jako součást procesu ladění výsledných frekvenčních charakteristik. Tuhost laminátové skladby je předmětem srovnatelného optimalizačního úsilí, jako funkce samotného dílu. Avšak správné stanovení modulů tuhosti a Poissonových čísel kompozitu je velmi problematické, ať už probíhá cestou teoretickou nebo experimentální. Chyba v predikci jejich hodnot se výrazně

¹ Ing. Vilém Pompe: VZLÚ, a.s.; Beranových 130, 199 05 Praha 9, tel.: +420225115226, e-mail: pompe@vzlu.cz

promítne do výsledků modálních i statických zkoušek. Z praxe divize Letecké vrtule VZLÚ, a.s., plyne zkušenost, která říká, že provedení mezní statické zkoušky prototypu do lomu bez předchozích modálních zkoušek je do jisté míry znehodnocením zkušebního kusu.

List rotoru větrné elektrárny VE20 byl konstruován za předpokladu pesimistického odhadu objemového podílu vlákna kolem 30% v kompozitové struktuře. Na základě porovnávání výsledků modální analýzy z výpočtů metodou konečných prvků s výsledky experimentu, byl konečný objemový podíl vlákna zkorigován na 40%. Jako srovnávací hodnota posloužil první ohybový tvar kmitání listu výrobního čísla X4 ve směru malé tuhosti (sací-tlaková strana profilu).

Z dosavadní zkušenosti plyne, že chyba výpočtu narůstá s růstem podílu smykové deformace na příslušném vlastním tvaru. Největší odchylky od výsledků experimentu tedy nastávají u torzního kmitání a ohybových tvarů ve směru velké tuhosti (sací-odtoková hrana), kde je rovněž přítomna výrazná torzní deformace.



Srovnání výpočtem zjištěných frekvencí s výsledky experimentu

Obr. 1 - Srovnání původního výpočtu, experimentu a následného korigovaného výpočtu.

Na prototypových listech číslo X2 až X5 proběhlo vážení a měření polohy těžiště a následné modální zkoušky.Výsledky jsou shrnuty na obrázku 1. K listu číslo X2 je třeba poznamenat, že nebyl opatřen vrstvou bílé povrchové pryskyřice, tzv. gelcoatu, pro snazší vyhodnocení následné statické zkoušky, pro kterou byl určen. Proto byla při stejné tuhosti jeho hmotnost nižší o hodnotu, která přibližně odpovídá hmotnosti gelcoatu a tomu odpovídají i vyšší vlastní frekvence.



Obr. 2 – Vizualizace prvních pěti vlastních tvarů kmitání z modelu pro výpočet metodou konečných prvků.

V klasické teorii laminovaného kompozitu je předpokládána platnost modifikovaného Hookova zákona ve tvaru pro rovinnou napjatost:

$$\varepsilon_{1} = \frac{\sigma_{1}}{E_{1}} - v_{21} \frac{\sigma_{2}}{E_{2}}$$

$$\varepsilon_{2} = \frac{\sigma_{2}}{E_{2}} - v_{12} \frac{\sigma_{1}}{E_{1}}.$$

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}$$
(1)

To je ovšem vyslovením předpokladu lineárního chování materiálu pod zatížením. Ve skutečnosti je závislost napětí vs. poměrná deformace nelineární a platnost (1) je možno předpokládat jen pro malé výchylky.

Pro účely ověření základních charakteristik materiálů používaných řešitelským pracovištěm v konstrukci leteckých vrtulí byla provedena sada zkoušek, z nichž jsou vybrány dva typické průběhy pro materiálový systém sklo/epoxid s ortogonální vazbou vlákna, viz. obrázky 3 a 4.



Obr. 3 – Tahová zkouška pro zjištění charakteristik ve směru vlákna osnovy.



Sklo HEXCEL Injectex EB315/E/1200 2F (plátno), Araldit LY/HY 5052, objemový podíl vlákna 30% Smyková zkouška v rovině laminy

Obr. 4 – Zkouška pro zjištění charakteristik vrstvy ve smyku.

Obrázky 3 a 4 dokládají, že na větších výchylkách již předpoklad lineárního chování materiálu vnáší do teoretických výsledků chybu, která se zřejmě projeví jak v modální analýze, tak i ve výsledcích pevnostních výpočtů.

V obou obrázcích je možno vysledovat oblast, ve které dochází k výrazné změně směrnice naměřené závislosti. Toto místo se často označuje jako "kolénko" a odděluje od sebe oblast nepoškozené a poškozené matrice. Jde o hodnotu významnou jak z hlediska statického dimenzování, tak i vlivu na životnost kompozitu při cyklickém zatěžování.

Pevnostní analýza a mezní statická zkouška

Vyhodnocování stavu napjatosti kompozitních konstrukcí se opírá o jiné teorie, než jaké jsou obvyklé v případě použití klasických kovových materiálů. Napětí v průřezu laminátové stěny závisí na vlastnostech jednotlivých konstituentů a jejich orientaci vůči směru zatěžování. Je tedy funkcí souřadnic. Stanovení střední hodnoty napětí přes celou tloušťku stěny ztrácí vypovídací schopnost a nemusí vůbec charakterizovat skutečný stav napjatosti.

V principu existují dva základní přístupy k vyhodnocení napjatosti v laminovaných kompozitech. První je fenomenologický, který řeší odezvu materiálu na vstupní podněty bez znalosti konkrétních jevů, které k těmto odezvám vedou. Cenou za jednoduchost je zpravidla ztráta informace o módech poruchy a zálohách bezpečnosti vůči nim. Druhou cestou je mechanistický přístup, který vychází ze znalosti struktury materiálu a jednotlivých módů poruchy. Typickými představiteli fenomenologických teorií jsou kritéria Tsai-Hillovo, Tsai-Wu, Hoffmanovo a podobná. Mezi mechanistickými přístupy je známo například Hart-Smithovo desertiprocentní pravidlo, různé modifikace kritéria maximální poměrné deformace a maximálního napětí.

V praxi divize Leteckých vrtulí je nejčastěji používáno zobecněné Hoffmanovo kritérium, jehož platnost byla rozšířena i na tkaniny s ortogonální vazbou vlákna, viz [1]. Kritérium dává poměrně konzervativní výsledky a je možno ho použít k stanovení mezního zatížení pro dosažení první poruchy laminátu. Současně s ním je využíváno kritérium maximální poměrné deformace, které pro heterogenní struktury, jakými jsou laminátové konstrukce, dává velmi dobré výsledky zejména s ohledem na nalezení zatížení pro konečnou ztrátu únosnosti konstrukce. Takto je určováno rozpětí zatížení, pro které již porucha může nastat a musí nastat. Ke skutečné poruše pak dochází zpravidla ztrátou stability tlačeného potahového panelu na zatížení ležícím uvnitř takto určeného intervalu.

Zobecněné Hoffmannovo kritérium pro rovinnou napjatost:

$$\frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} - \left(\frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} - \frac{1}{Z_t Z_c}\right) \sigma_1 \sigma_2 + \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}\right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}\right) \sigma_2 + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} \le 1$$
(2)

Kritérium maximální poměrné deformace:

Mezní statická zkouška byla provedena v prostorách a za spolupráce divize Pevnost letadel VZLÚ, a.s. Zatěžování probíhalo prostřednictvím řízené deformace, působící silový účinek byl odečítán jako závislá veličina. Výhoda tohoto postupu spočívá v zachování možnosti zachytit prvotní poškození konstrukce bez předčasného dolomení.

V průběhu zkoušky byl zaznamenáván průhyb na náběžné a odtokové hraně listu v několika bodech až do zatížení odpovídajícího 45% předpokládané mezní hodnoty. Pro pokračování zkoušky do lomu byly citlivé snímače odpojeny a záznam byl prováděn pouze pro jeden bod na špičce listu. Srovnání původního výpočtu, experimentu a korigovaného výpočtu je na obrázku 5.



Posuv špičky listu odečítaný na odtokové hraně při zatěžování až do lomu

Obr. 5 – Porovnání výsledků mezní statické zkoušky do lomu s výpočtem pro původní a korigované materiálové charakteristiky na základě výsledků modální analýzy.

Konfigurace přípravku a zkušebního kusu v prostorách divize Pevnost letadel je patrná z obrázku 6. Pro tuto konfiguraci byl vytvořen i výpočtový model pro metodu konečných prvků a s požitím kritérií (2) a (3) bylo hledáno zatížení, na kterém dojde ke kritické poruše laminátové konstrukce.

Obě kritéria pracují s pevnostmi, resp. kritickými deformacemi v jednotlivých materiálových osách. U tohoto typu konstrukcí ale dochází k lomu vlivem ztráty stability v tlačeném potahovém panelu na hodnotách zatížení nižších, než odpovídá materiálové pevnosti. Situace se ještě komplikuje vlivem imperfekcí, jako je například odstupňování počtu vrstev tkaniny (diskontinuita v tuhosti) a lokální zvlnění vlákna (fakticky diskontinuita v tlakové pevnosti základní struktury). Všechny tyto faktory musí být zohledněny při vytipování místa vzniku kritické poruchy. K následujícím obrázkům je pro lepší orientaci třeba poznamenat, že výpočtový model je standardně prováděn pro levotočivou vrtuli, reálný list je pravotočivý.



Obr. 6 – Konfigurace mezní statické zkoušky rotorového listu větrné elektrárny VE20.



Obr. 7 – Model pro kontrolní výpočet mezní statické zkoušky. Model rotoru je standardně prováděn jako levotočivý, reálný list je pravotočivý.



Obr. 8 – Kritická místa vytipovaná pomocí zobecněného Hoffmannova kritéria.



Obr. 9 – Kritická místa vytipovaná pomocí kritéria maximální poměrné deformace.



Obr. 10 – Oblast ztráty stability, skutečné místo vzniku kritické poruchy.



Obr. 11 – Počátek lomu při okraji pásnice nosníku.



Obr. 12 – Detail počáteční poruchy v "hrotu" vlny při okraji pásnice nosníku.



Obr. 13 – Vlna na výpočtovém modelu odpovídá skutečnému místu vzniku poruchy. Pohled od náběžné hrany – model je oproti reálnému listu levotočivý.



Obr. 14 – Konečné dolomení listu.



Obr. 15 – Rotor VE20 smontovaný se strojovnou elektrárny WT20.

Závěr

Dobré shody výsledků kontrolního výpočtu statické zkoušky a experimentu lze dosáhnout i za použití relativně jednoduchých kritérií. Předpokladem je ale kontrola vstupních dat, která by snad při použití klasických konstrukčních materiálů ani nebyla nutná. Kompozitové struktury jsou v tomto ohledu ale mnohem náročnější. Již z porovnání frekvencí listů výrobních čísel X2 až X5 v obrázku 1 plyne, že experimentální výsledky jsou zatíženy velkým rozptylem. Navrhovaný postup korekce materiálových charakteristik na základě znalosti skutečné frekvence prvního vlastního ohybového tvaru kmitání byl ověřen již v minulosti na několika jiných typech vrtulových a rotorových listů. Změna této frekvence o řádově desetiny Hertz může představovat odchylku objemového podílu výztuže v desítkách procent. V tomto případě byla korigována hodnota 3,81 Hz na 4,03 Hz změnou objemového podílu vlákna z 30% na 40%.

Literatura

- [1] POMPE, V.: *Kritérium poruchy kompozitního materiálu s ortogonální vazbou vlákna* [CD-ROM] Setkání uživatelů MSC.Software, Brno: MSC.Software, 2003.
- [2] WU, EM.: Phenomenological Anisotropic Failure Criterion Composite Materials, edited by LJ. Broutman and RH. Krock, Vol. 2, Mechanics of Composite Materials, edited by GP. Sendeckyj, New York, London: Academic Press, 1974, p. 353-431.