



(Větrný mlýn Vrátno, dnes po je po pečlivé rekonstrukci provedené Alešem Křemenem & Woodcomp Propellers s.r.o. opět plně funkční)

Kompozitní lopatky axiálních ventilátorů a větrných turbín

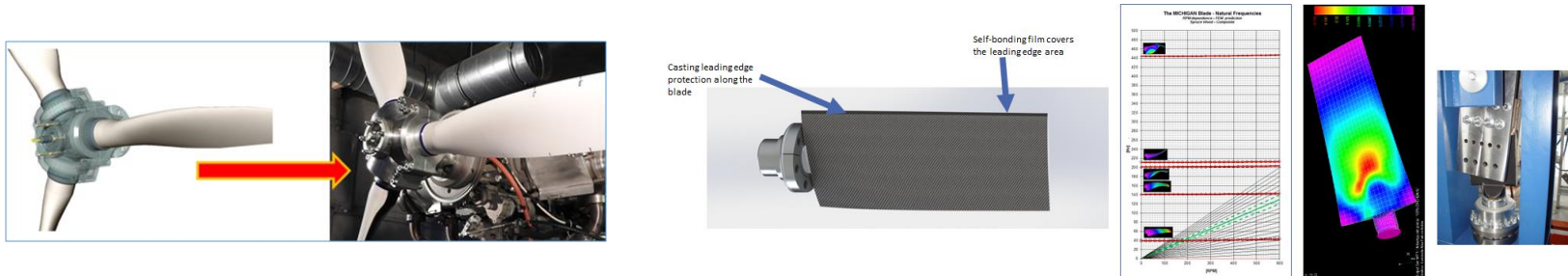
WOODCOMP PROPELLERS S.R.O.

Ing. Vilém Pompe, Ph.D.

Woodcomp Propellers s.r.o.

- Vývoj, výroba a údržba leteckých vrtulí
- Vývoj a výroba lopatek větrných turbín
- Vývoj a výroba lopatek axiálních ventilátorů

Díky vzájemné konstrukční, materiálové a technologické podobnosti lze mezi těmito produkty přenášet a využívat dlouhodobé zkušenosti.



Výhody použití kompozitních materiálů:

- Hmotnostní charakteristiky kompozitních konstrukcí se blíží hmotnostním charakteristikám pevnostních dřevěných konstrukcí.
- Výsledná pevnost a tuhost je ale blízká vysokopevnostním slitinám hliníku.
- Opakovatelnost výroby (kvalita, tolerance) srovnatelná s klasickými konstrukčními materiály.

Nevýhody používání kompozitních materiálů:

- Vysoké nároky na řízení kvality.
- Speciální nároky na pracovníky výroby (čistota, vedení záznamů, technologická kázeň) – neexistují učňovské obory se speciálním zaměřením na kompozity.
- Opravy kompozitních výrobků v provozu musí provádět personál s příslušnou kvalifikací, která není v běžném strojírenství obvyklá.
- *Důsledek: Je nezbytné vychovávat si svůj vlastní personál výroby a údržby x běžná fluktuace pracovní síly.*

Shrnutí:

- Vstup do světa kompozitních materiálů obvykle znamená pro strojírenskou firmu zcela změnit přístupy k organizaci práce, vybudovat nové prostory, které nejsou kontaminovány rezidui z předchozí kovovýroby a často je třeba najmout zcela odlišný personál výroby.

Aplikace v energetice: větrné motory



Větrné turbíny s vodorovnou osou rotace – konstrukce lopatek a krytů strojovny.

Aplikace v energetice: větrné motory

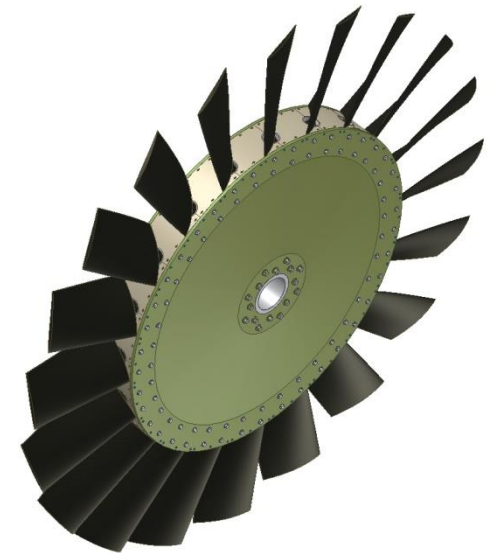


Větrné turbíny se svislou osou rotace – konstrukce lopatek.

Aplikace v energetice: energetické úspory



Axiální ventilátory – konstrukce lopatek a rotorové hlavy.

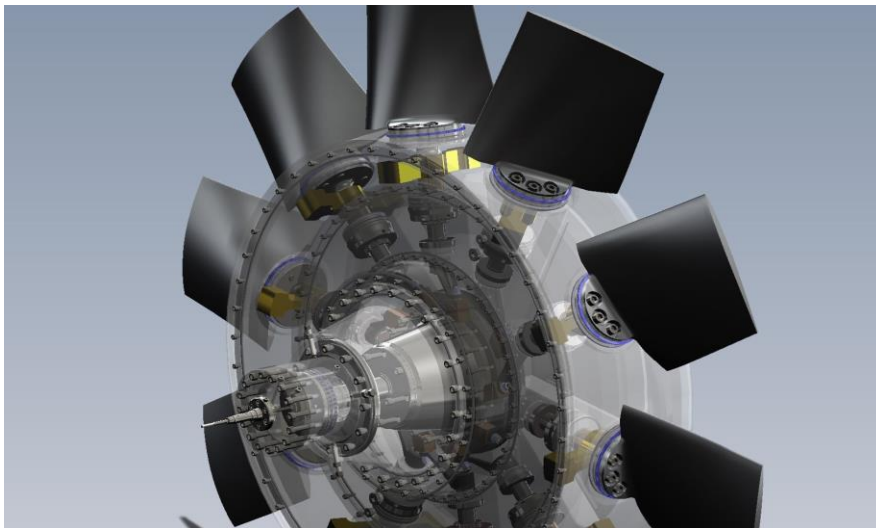


Proč je to výhodné?

- Nízká hmotnost lopatek vede na nižší výslednou hmotnost rotorové hlavy a k úsporám na celém rotoru.
- Významným přínosem jsou menší nároky na výkony manipulační techniky, menší zatížení personálu při montážních pracích.
- Velké energetické úspory na rozběh a brzdění rotoru.
- Menší nároky na dimenzování pohonů, systémů regulace a dodávek energie.

Proč je to výhodné?

- U rotorů s měnitelným úhlem nastavení lopatek (větrné turbíny, axiální ventilátory) významně klesají nároky na dimenzování systému změny úhlu a jeho energetické příkony.



Proč je to výhodné?

- Pomocí kompozitních materiálů lze snáze realizovat konstrukce speciálně tvarovaných lopatek např. pro snížení hlukových emisí rotoru (šavlovitý půdorys, složitě tvarované aerodynamické profily, atd.).



Kam se to nehodí?

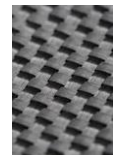
- V zde uvedených aplikacích obvykle uvažujeme dlouhým vláknem vyztužené plasty s polymerní matricí.
- Nehodí se do prostředí, kde snadno degraduje použitá matrice (chemické složení provozního média, nepříznivé průběhy teplot s vlhkostí, příměsi mastných nečistot nebo biologických látek v přepravovaném médiu, atd.).
- Nehodí se do prostředí s výraznými abrazivními účinky.
- Nehodí se do prostředí, kde není obslužný personál způsobilý k práci s kompozitními výrobky (manipulace, skladování, ošetřování, běžná provozní údržba a opravy, atd.).

Konstruování: PEVNOST versus TUHOST

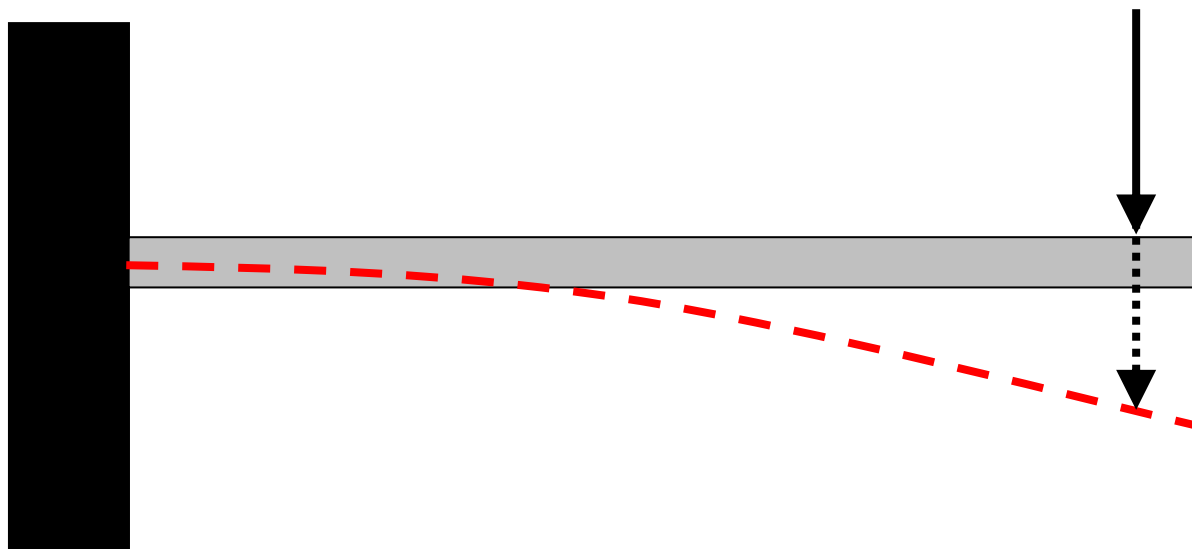
- O dimenzování lopatek rotorů zpravidla rozhodují požadavky na tuhost – naladění vlastních frekvencí.
- Dobře frekvenčně naladěný rotor obvykle nemá problém se statickou pevností; špatně naladěný rotor má naopak problémy s pevností úplně vždy.
- Hmotnost a polární moment setrvačnosti rotoru často omezují jeho použití – dopady na dimenzování pohonů a dodávky energií.

Porovnání konstrukčních materiálů

Materiál	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Hustota [kg/m3]
Ocel	cca 210	800 až 1100	7850
Hliníkové slitiny	cca 73	cca 400	2780
Uhlíkové vlákno, běžná kvalita	cca 200 až 230	3100	2600
Epoxidová matrice	cca 3,5 (zanedbatelné vůči vláknu)	70 (zanedbatelné vůči vláknu)	1150
Jednosměrový kompozit, 50% objemu vlákno	cca 100	cca 1500	1875
Kompozit s ortogonální vazbou výztuže, 50% objemu vlákno	cca 48	cca 530	1875



Porovnání konstrukčních materiálů



- Maximální napětí závisí na ohybovém modulu – geometrická závislost.
- Průhyb závisí na momentu setrvačnosti a modulu pružnosti – geometrická a materiálová závislost.

Porovnání konstrukčních materiálů

- Stejný průřez nosníku, stejné rozměry.
- Pak duralový nosník bude mít shodné maximální ohybové napětí jako ocelový, ale bude vážit jen 35.4% ocelového nosníku. Bude mít ale třikrát větší průhyb.
- Kompozitní nosník s jednosměrným podélným vláknem a plným průřezem bude mít stejnou hodnotu maximálního ohybového napětí jako ocelový a duralový nosník, ale bude vážit jen 24% hmotnosti ocelového nosníku a 67.4% duralového. Průhyb bude 200% průhybu ocelového nosníku, ale jen cca 70% průhybu duralového nosníku.

Porovnání konstrukčních materiálů

- V reálné konstrukci lopatky kombinujeme různé výztuže dle materiálu a vazby vlákna.
- Lopatka bývá nejčastěji sendvičové konstrukce s pěnovým jádrem. Plný průřez z uhlíkového kompozitu je u větších konstrukcí lopatek nepraktický, až nevhodný.

Příklad lopatky, realizovaná konstrukce



Materiál lopatky, výsledná hmotnost:

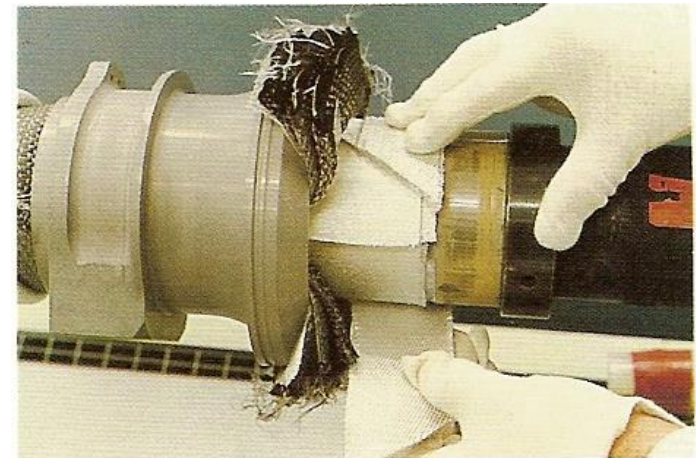
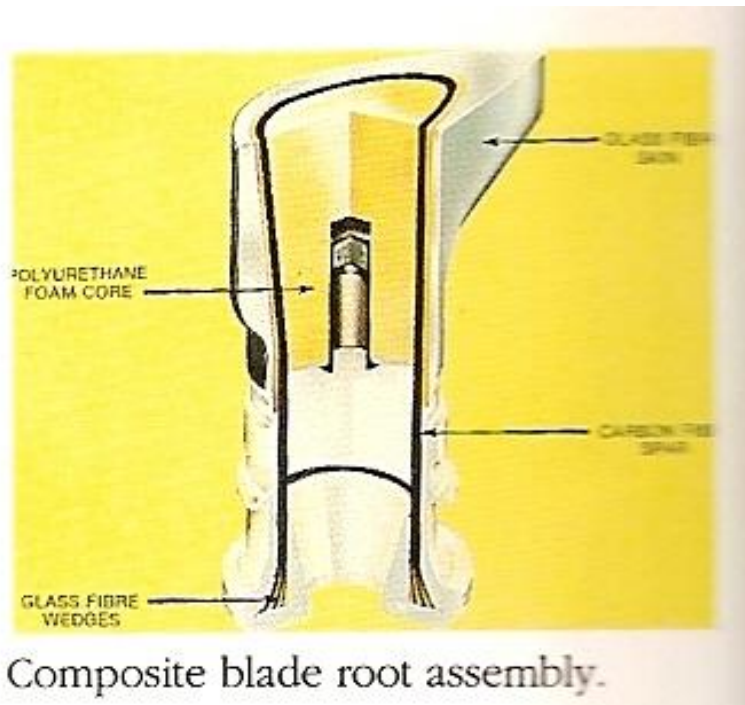
- Ocel: 94.0 kg
- Dural: 32.7 kg
- Kompozit: 11.4 kg
- Jasanové dřevo: 9.7 kg

Použití kompozitu přináší zcela zásadní úsporu hmotnosti, téměř na úroveň dřevěné konstrukce.

Material version	Mass m [kg]	Polar moment of inertia J_p [kg.m ²]	First natural frequency f [Hz]
Steel	94.057	309.827	26.0
Aluminium Alloy	32.750	107.904	26.3
Carbon/Epoxy Composite	11.402	30.618	31.8
Ash Wood	9.657	31.740	22.5

- Změna z oceli na dural nevede ke změně vlastních frekvencí lopatky.
- Dřevěný materiál trpí nízkou tuhostí.
- Kompozitní materiál umožňuje ladit tuhost materiálu i moment setrvačnosti (tenkostěnná konstrukce s pěnovým jádrem).

Spojení kompozitní části lopatky s kovovými

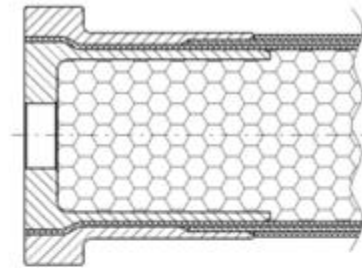
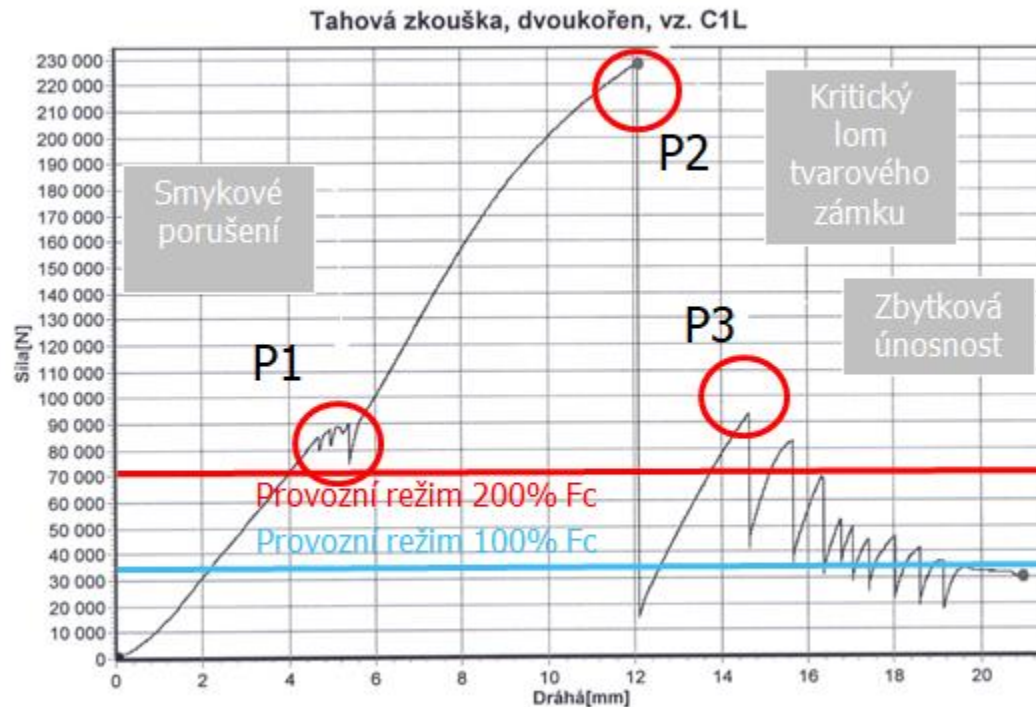


Princip už znali vlastně pravěcí lidé. Izotropní a anizotropní materiál se do sebe zaklíní a zajistí vláknem...

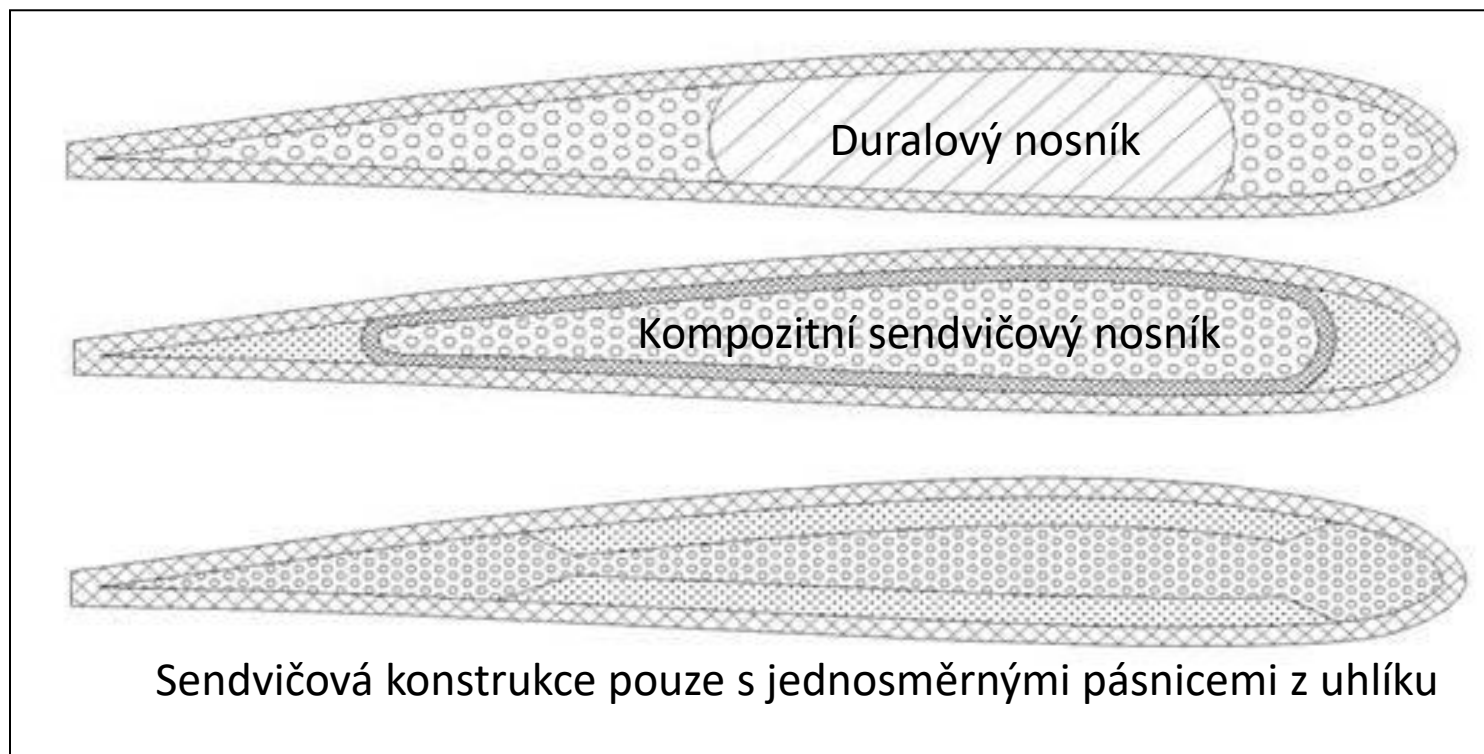
Správně provedená konstrukce spoje

- Soudržnost spoje není dána jen adhezí mezi pojivem a kovem.
- Kompozitní a kovový díl jsou vzájemně tvarovány tak, aby tvořily tvarový zámek.
- Tvarový zámek je pojistka, že při ztrátě adheze (delaminaci) nedojde k rozpadu konstrukce.
- Výztuž je orientována do všech směrů, ve kterých se přenáší zatížení – od toho tam je.
- K rozpadu konstrukce může dojít jen za cenu lomu vlákna.

Příklad „správné“ poruchy paty lopatky



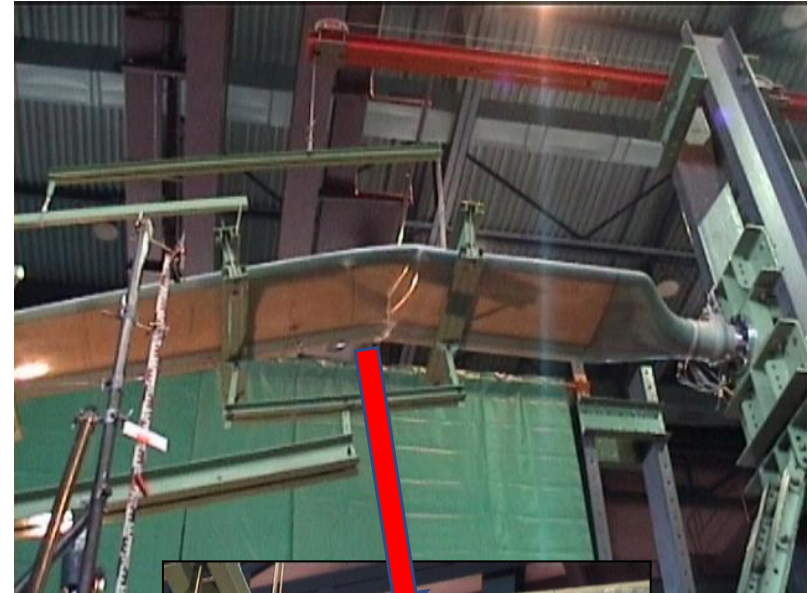
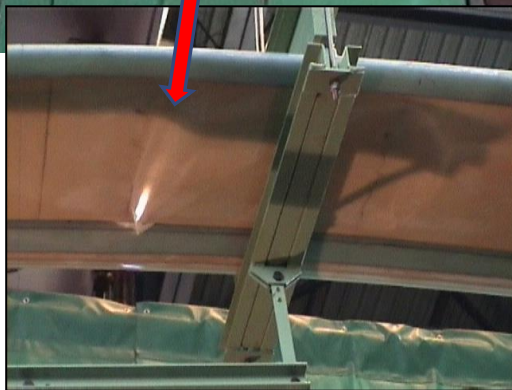
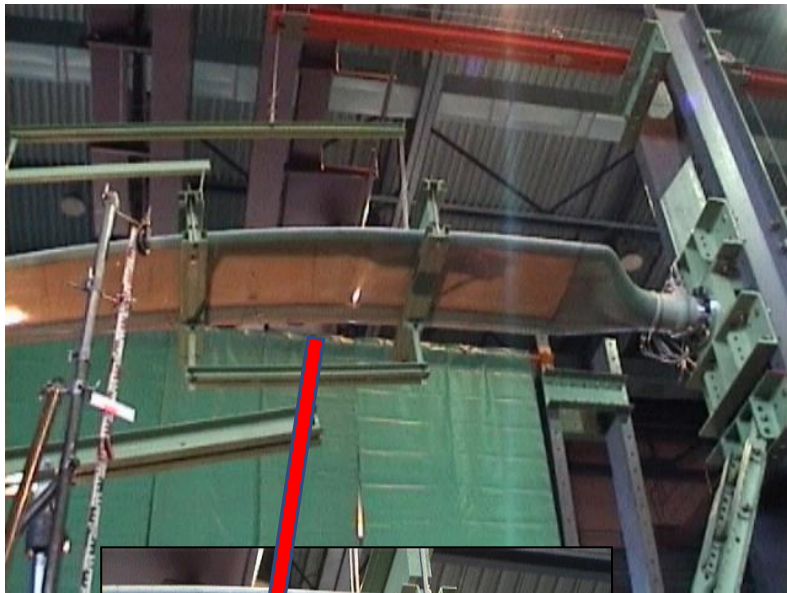
Typická konstrukční řešení kompozitních listů/lopatek



Ladění výpočtových modelů

- Modální analýza versus měření vlastních frekvencí s identifikací vlastních tvarů kmitání – dosažení dobré shody výpočtů a měření vede rovněž k zlepšení shody mezi pevnostními výpočty a změřenou pevností a módem kritického porušení. Modální analýzu a měření pro sladění výpočtových modelů tedy provádět před pevnostními zkouškami.
- Modální analýzu je třeba doplnit i o měření hmotnosti prototypu a polohy těžiště – bezprostřední vliv na shodu výpočtu a zkoušek!
- Leckdy se vyplatí pevnostní zkoušku provádět s řízeným zatěžováním místo řízenou silou. V takovém případě totiž lze snáze zachytit a zdokumentovat počátek lomu. Při řízené síle a závislé deformaci zpravidla dojde k dynamickému jevu s tříštivý lomem. Tím se následná analýza výsledků může ztížit.

VZLÚ – příklad statické zkoušky lopatky větrné turbíny s řízenou deformací.



Děkuji za pozornost

