

TRANSFER

Výzkum a vývoj pro letecký průmysl

č. 5 / 2007



Toto číslo Transferu je věnováno výzkumnému záměru MSM0001066904 „Výzkum chování kompozitních materiálů v primární konstrukci zařízení s rotujícími nosnými plochami“. Řešitelem je útvár Letecké vrtule VZLÚ, a.s.

ISSN 1801 - 9315

TRANSFER

Výzkum a vývoj pro letecký průmysl

Elektronický sborník VZLÚ, a.s.

Číslo 5, listopad 2007, 2. ročník

Adresa redakce:

Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.

Beranových 130, 199 05 Praha 9, Letňany

Tel.: 225 115 223, fax: 286 920 518

Šéfredaktor:

Ing Ladislav Vymětal (e-mail: vymetal@vzlu.cz)

Technický redaktor, výroba:

Stanislav Dudek (dudek@vzlu.cz)

Vydavatel: Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.

© 2007 VZLÚ, a.s.

Vychází nepravidelně na webových stránkách www.vzlu.cz u příležitosti seminářů pořádaných VZLÚ. Veškerá práva vyhrazena.

Na úvod

Toto číslo Transferu přináší příspěvky k tématům, která jsou řešena v rámci výzkumného záměru MSM0001066904 „*Výzkum chování kompozitních materiálů v primární konstrukci zařízení s rotujícími nosnými plochami*“. Snahou řešitelů je pracovat na řetězci vzájemně navazujících dílčích témat tak, aby byla zajištěna maximální využitelnost výsledků v praxi konstrukce leteckých vrtulí a podobných rotorů.

V oboru kompozitních materiálů platí, že nelze dobře konstruovat bez důkladné znalosti používané technologie výroby. To je samozřejmě známá pravda i pro klasické konstrukční materiály, ale v případě kompozitů je vzájemná souvislost ještě hlubší. První dva příspěvky jsou zaměřeny na technologii výroby laminovaných kompozitů infuzními procesy. Výběr infuzních výrobních procesů pro listy vrtulí a lopatky rotorů není náhodný. Jsou to ovšem také procesy náročné po teoretické stránce a proto jsou předmětem různých simulačních metod, včetně metody konečných prvků.

Snad na každé konstrukci, ať už pro jakýkoli účel, lze najít hlavní slabé místo, které rozhoduje o její životaschopnosti. U rotorů je obvykle takovým místem uložení lopatky v rotorové hlavě. Kompozitní materiály mají řadu vynikajících vlastností, ale jejich spojování s okolní konstrukcí z jiných materiálů, je trvalým problémem. Třetí příspěvek se zabývá úvahou nad provedením kořenové části listu nebo lopatky. Ve čtvrtém příspěvku je pak naznačena metodika výpočtu celé konstrukce v metodě konečných prvků.

Praxe už dávno prokázala, že ten, kdo své výrobky nezkouší, ztrácí postupně schopnost je konstruovat. Zkušebna leteckých vrtulí zabezpečuje ve spolupráci s dalšími laboratořemi VZLÚ řadu činností důležitých pro vývoj a certifikaci vrtulí, případně dalších rotorů. Využívá řadu postupů už dříve ověřených na kovových a zejména dřevěných konstrukcích, které mají svou povahou ke kompozitním materiálům velmi blízko. Pátý příspěvek přehledně seznamuje s hlavními zkouškami využívanými při vývoji kompozitních rotorů.

Další čtyři příspěvky se zabývají náhledem přímo do struktury kompozitního materiálu. Kompozity mají hlavní výhodu v programovatelnosti svých vlastností. Můžeme si teoreticky navrhnout, doslova namíchat směs požadovaných vlastností a použít ji v zamýšlené konstrukci. Objektivní realita je ale daleko složitější. Předvídat vlastnosti připravovaného kompozitu můžeme jen za předpokladu dokonalé znalosti vlastností jeho konstituentů a na základě poznání synergieckých efektů, které v mnoha případech dosud neumíme kvantifikovat. Velmi zajímavé materiálové možnosti přináší jeden z nejmladších oborů, tzv. nanotechnologie.

V podobě vláknem vyztužených plastů se opět uzavírá jeden velký, historický kruh. Ač se to může zdát na první pohled nepravděpodobné, práce s kompozity by měla být dnešnímu konstruktérovi daleko přirozenější, než si většinou připouští. Prvními materiály, které dávný člověk zpracovával, byly dřevo, kosti, kůže, rohovina

a vlákna rostlin. Oceány byly poprvé překonány na dřevěných lodích a první letadla byla rovněž převážně ze dřeva a tkanin. Všechny tyto materiály bychom moderním jazykem označili za přirozené kompozity. Dřevo se stalo inspirací pro vláknové kompozity a je dodnes ceněným materiálem v letectví. Poslední, desátý příspěvek, se proto navrácí k počátku 20. století a dřevěným konstrukcím vrtulí prostřednictvím repliky letounu Avia B.H.5 pana Marcela Sezemského.



Obsah sborníku

- 5 Aplikace technologie RTM při vývoji kompozitního vrtulového listu**
F. Martaus
- 13 Modelování infuzních technologických procesů metodou konečných prvků**
F. Martaus
- 23 Problematika konstrukčního řešení kořenové části kompozitního vrtulového listu**
V. Pompe
- 34 Návrh a optimalizace skladby kompozitové lopatky**
M. Hraška, V. Pompe
- 48 Zkoušení kompozitních vrtulí a rotorů**
V. Andryšek, V. Pompe
- 63 Měření základních charakteristik epoxidové matrice**
V. Pompe, M. Hraška
- 73 Nanotechnologie a nanomateriály**
J. Podzimek
- 81 Nanokompozity**
J. Podzimek
- 94 Nanokompozity s uhlíkovými nanotubami**
J. Podzimek, V. Pompe
- 98 Vrtule pro repliku letounu Avia B.H.5**
J. Rosa

Aplikace technologie RTM při vývoji kompozitního vrtulového listu

Ing. František Martaus

Příspěvek se zabývá aplikací progresivní technologie RTM při vývoji a výrobě malých kompozitních vrtulových listů vyvinutých útvarem Letecké vrtule - VZLÚ, a.s. Konstrukce vrtulových listů a obecně i lopatek podobných strojů, získá nové možnosti provedení, jinými technologiemi zpracování kompozitu nedostupné.

Úvod

Kompozity jsou již relativně dlouhou dobu standardním materiálem pro výrobu vrtulových listů všech kategorií. Výhodný poměr měrná hmotnost vs. mechanické parametry, dobré únavové vlastnosti, příznivé výrobní náklady jsou důvody proč tento materiál v kategorii lopatkových strojů vytlačuje konvenční kovové slitiny a dřevo.

Z pohledu technologie výroby vrtulových listů pro malá sportovní letadla stále převažuje běžná ruční kontaktní laminace. Výsledkem jsou sice na pohled efektní, často uhlíkové výlisky, ovšem se všemi nectnostmi této výrobní technologie. Vysoký obsah dutin, nízký objemový podíl vláken, vysoký rozptyl klíčových parametrů listu (hmotnost, poloha těžiště, modální parametry, apod.) nepatří mezi atributy primární letadlové konstrukce. Ruční laminace navíc neumožňuje umístit důležitý konstrukční prvek (pokud v listu vůbec je), a to přeplátování náběžné a odtokové hrany vně listu.

Jako alternativa se nabízejí další výrobní metody, známé z výroby lopatek letounů vyšších kategorií. Jde o technologii lisování prepregu ve vytápěných kovových formách a o technologii RTM.

Na útvaru Letecké vrtule ve VZLÚ se už několik let zabýváme aplikací výrobní metody RTM pro výrobu malých vrtulových listů, ale i jiných kompozitních konstrukcí.

Princip technologie RTM

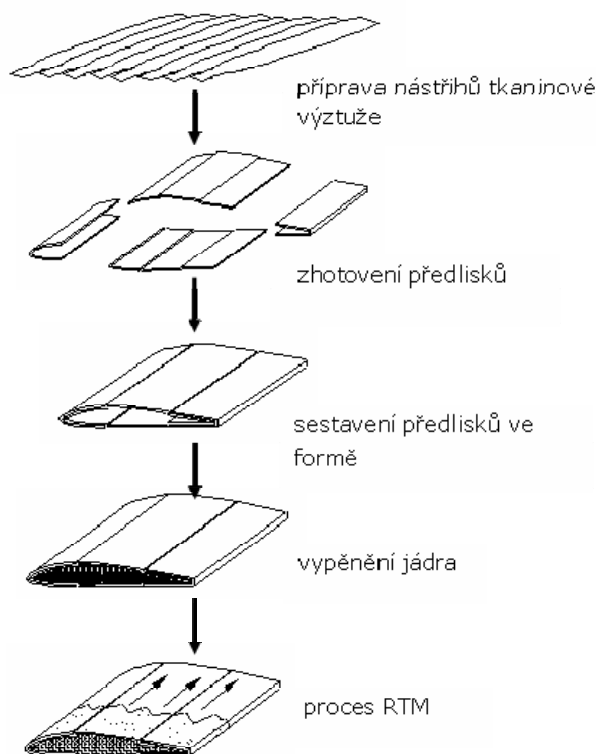
Princip výrobní metody RTM (Resin Transfer Moulding) spočívá v prosycení suché výztuže polotovaru (tzv. předlisku, předformy) kompozitního výlisku uloženého ve formě nízkoviskózním polymerním pojivem většinou na bázi epoxidu, polyesteru, BMI, kyanoesteru, apod.

Charakteristikou metody RTM je, že prosycení tzv. infuzním procesem je dosaženo zavedením tlakového spádu v hodnotách řádově ve stovkách kPa mezi vstupními a výstupními porty formy.

Po úplném prosycení dílu následuje vytvrzení pojiva vytvrzovacím režimem stanoveným pro použité pojivo. Proces uzavírá otevření formy, odformování a začištění dílu.

Výrobní metoda RTM je obecně vhodná pro díly spíše menší, tvarově komplikované, s vysokými požadavky na geometrickou přesnost a jakost povrchu. Umožňuje sestavit polotovar výlisku z několika samostatně zhotovených komponentů (předlisků) a následně celek proinjektovat pojivem v jediné operaci RTM. Této přednosti lze využít právě u vrtulového listu a umístit důležitý prvek konstrukce - přeplátování náběžné a odtokové hrany - výhodně zvenku. V porovnání s kvalitativně alternativní metodou lisování prepregu je RTM výhodnější i z hlediska materiálových a výrobních nákladů, a to téměř řádově.

Na druhé straně určitou nevýhodou metody RTM je citlivost na zvládnutí tzv. strategie plnění, což může zvýšit riziko výskytu vad (plynové dutiny, neprosyceniny). Zde se nabízí prostor pro simulace procesu RTM metodou konečných prvků. Útvar Letecké vrtule k tomuto účelu standardně využívá aplikace RTM-WORX 2.8 (Polyworx) a PAM-RTM (ESI Group).



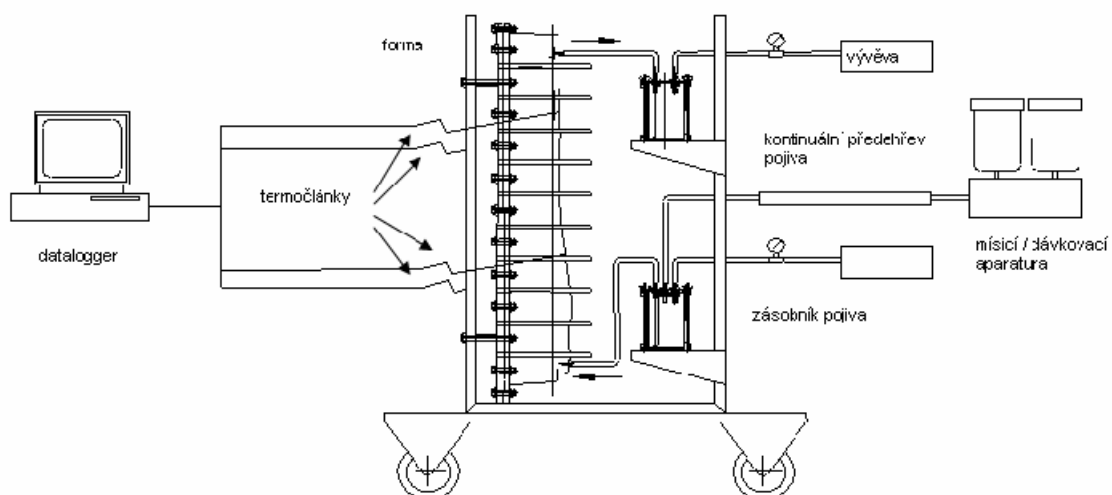
Obr. 1 Schéma výroby vrtulového listu metdou RTM



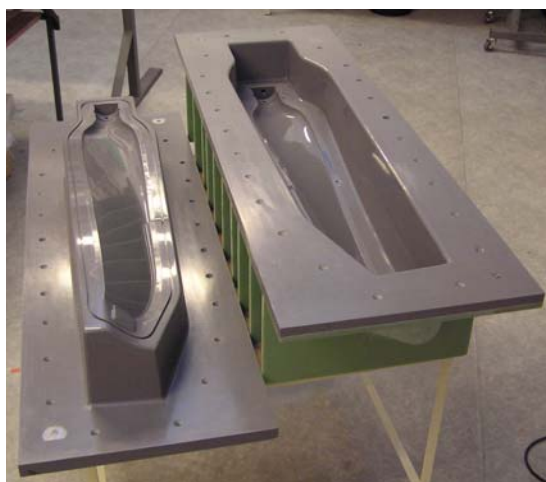
Obr. 2 Předlisky konstrukčních komponentů listu zhotovené vakuově / tepelným zhutněním tkanin výztuže



Obr. 3 Jádra listů z tvrdé PUR pěny



Obr. 4 Sestava při procesu RTM



Obr. 5 Kompozitní forma pro výrobu listu



Obr. 6 Dávkovací aparatura pojiva



Obr. 7 Ověřovací série listů



Obr. 8 Řez listem - viditelné je překrytí vrstev náběžné a odtokové hrany

Zkušební těleso ke zjištění statické únosnosti

K prokázání dostatečné statické únosnosti kořenové části listu bylo navrženo speciální zkušební těleso, tzv. „dvoukořen“, jehož koncepce je patrná z níže uvedeného Obr. 9.

Zkušební těleso „dvoukořen“ bylo koncipováno tak, aby konstrukčně, technologicky i materiálově v co nejvyšší míře odpovídalo kořenové části reálného listu.



Obr. 9 Zkušební tělesa typu „Dvoukořen“



Obr. 10 Sestava „dvoukořenů“ pro zkoušku uložení přetočením na 200 % maximálních provozních odstředivých sil po dobu 1 hodiny



Obr. 11 Zkouška statické pevnosti realizovaná na zkušební útvary Pevnost letadel

Na Obr. 10 a 11 je vidět způsob použití zkušebních těles k různým průkazům vlastností konstrukce podle požadavků konkrétních stavebních předpisů.

Vedle této role ale plní dvoukořeny ještě důležitou úlohu při odladění technologie výroby, lépe řečeno kladení kovových dílů a vrstev výztuže do formy. Výroba těles, jejich forem a přípravků obvykle předchází hlavní výrobu listů, které jsou několikanásobně náročnější z hlediska nákladovosti. Případné problémy mohou být odstraněny se značnými úsporami finančních prostředků a času.

Závěr

Dle zkušeností získaných při probíhajícím výzkumu a vývoji je zřejmé, že technologie RTM je vhodná pro výrobu tvarově přesných kompozitních výrobků, v tomto případě vrtulových listů i pro nižší výkonové kategorie motorů a letadel. Předpokladem je správně vedená úvodní technologicko - ekonomická rozvaha, vhodně navržená konstrukce dílu a přípravkového vybavení, optimální volba materiálů i parametrů technologického procesu a v neposlední řadě i dodržování zásad aplikovaného systému řízení jakosti. Stejně jako u ostatních metod výroby kompozitů je velmi důležitá spolupráce konstruktéra a technologa již od raných stadií projektu.

Ve vývoji samotné technologie RTM bylo dosaženo úrovně umožňující získat kvalitní výlisky vyrovnaných parametrů. Statistickou analýzou bylo prokázáno, že v porovnání s konvenčními technologiemi umožňuje metoda RTM získat vyrovnanější výsledky z hlediska výsledné geometrické přesnosti a hmotnosti výrobku.

V rámci probíhajících úkolů byl vypracován systém třístupňové technologické dokumentace a návrh materiálových specifikací klíčových konstrukčních materiálů pro výrobu vrtulových listů.

Byly získány cenné zkušenosti pro další vývoj přípravkové základny, které jsou shrnuty v samostatné pracovní instrukci pro návrh a výrobu přípravků pro kompozitní výrobu.

Ukázalo se též, že aplikací materiálů určených speciálně pro technologii RTM nevzrostou výrazně výrobní náklady.

V neposlední řadě bylo prakticky prokázáno, že metoda RTM vyniká v porovnání s klasickými technologiemi nižšími náklady na zajištění ekologičnosti výroby, na ochranu pracovníků a na likvidaci nebezpečných odpadů.

Příspěvek byl zpracován za využití finančních prostředků Výzkumného záměru MSM0001066904 „*Výzkum chování kompozitních materiálů v primární konstrukci zařízení s rotujícími nosnými plochami*“.

Modelování infuzních technologických procesů metodou konečných prvků

Ing. František Martaus

Příspěvek podává stručnou souhrnnou informaci o teoretickém základu a simulaci kompozitních výrobních procesů RTM (Resin Transfer Moulding) a VIP (Vacuum Infusion Process) metodou konečných prvků.

Použitá symbolika

A	průřez	[cm ²]
C	konstanta	1
K	permeabilita výztuže	[cm ²]
L	délka	[cm]
Q	Objemový průtok	[cm ³ /sec]
t	doba plnění	[sec]
u	lokální hustota toku	[g/sec cm ²]
Δp	tlakový spád	[Pa]
η	viskozita	[Pa sec]
Φ	porosita výztuže	1

Úvod

Cílem příspěvku je poskytnout stručný teoretický náhled na moderní kompozitní technologie výroby, založené na infuzi nízkoviskozního pojiva do prostředí suché vláknové výztuže, reprezentované metodami RTM (Resin Transfer Moulding) a VIP (Vacuum Infusion Process).

Modelování infuzního procesu má ve fázi technologické přípravy výroby značný význam. Zvláště v případě tvarově komplikovanějších výrobků umožňuje optimalizovat vtokový a výtokový systém formy a tím eliminovat zdoluhavý a nákladný způsob pokus – omyl. Pozornost je zaměřena na modelování infuzního technologického procesu pomocí metody konečných prvků (MKP). Na konkrétních příkladech provedených v aplikacích RTM-Worx[®] (Polyworx) a PAM-RTM[®] (ESI Group) je demonstrována shoda simulace s reálným procesem.

Teoretický základ procesů RTM a VIP

Darcyho zákon v planárním prostředí

Tok pojivového systému porézním prostředím vláknové výztuže při infuzním procesu lze dobře popsat empirickým Darcyho zákonem (není bez zajímavosti, že tento zákon byl původně aplikován v geologii při studiu pohybu ropy v porézních horninách).

Tento vztah je dle rešerše provedené v odborné literatuře a na webových stránkách, v současnosti nejčastěji používaným teoretickým podkladem pro simulaci infuzních procesů tohoto typu. Zákon definuje lineární vztah mezi tzv. lokální hustotou toku pojiva [$\text{cm}^3/\text{sec cm}^2$] a tlakovým gradientem aplikovaným v přípravku.

Darcyho zákon:

$$\frac{Q}{A} = u = -\frac{K}{\eta} \frac{\Delta p}{L} \quad (1)$$

Ze vztahu (1) vyplývá, že na lokální hustotu toku pojiva [$\text{cm}^3/\text{sec cm}^2$] mají vliv permeabilita (prostupnost) vláknové výztuže K , tlakový spád Δp , viskozita pojivového systému η a penetrovaná délka L .

Zobecnění Darcyho zákona do 3D prostoru

Pro simulaci infuzního procesu v silnostěnných kompozitech je možno Darcyho zákon zobecnit do 3D prostoru. Potom nabývá tvaru:

$$u_i = -\frac{K_{ij} \delta p}{\eta \delta x_j} \quad (2)$$

Rovnici spojitosti, zde reprezentující též zákon zachování hmotnosti, lze uvést jako:

$$\frac{\delta u_i}{\delta x_i} = 0 \quad (3)$$

Substitucí Darcyho zákona do rovnice spojitosti (3) pak získáme základní výchozí vztah, kde jedinou proměnnou zůstává tlakový spád v médiu uvnitř přípravku. Uvedená rovnice (4) je využita jako výchozí pro simulaci procesu pomocí MKP.

$$\frac{\delta}{\delta x_i} \left(K_{ij} \frac{\delta p}{\delta x_j} \right) = 0 \quad (4)$$

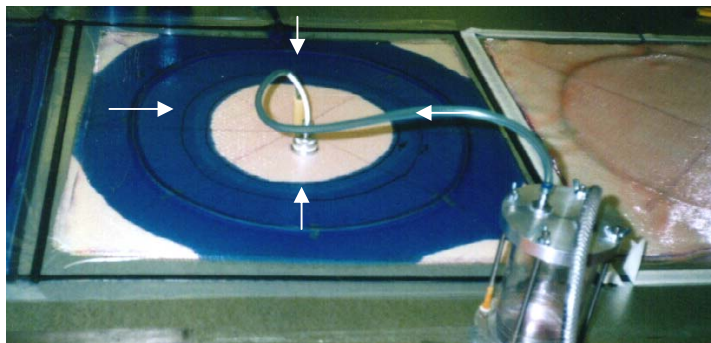
Vliv strategie penetrace

Důležitým parametrem, ovlivňujícím průběh infuzního procesu, je kromě permeability K i zvolená strategie penetrace. Zdroj [1] uvádí vztah, charakterizující závislost doby penetrace zkušebního vzorku na parametrech technologického procesu:

$$t = C \frac{\eta L^2}{\Phi K \Delta P} \quad (5)$$

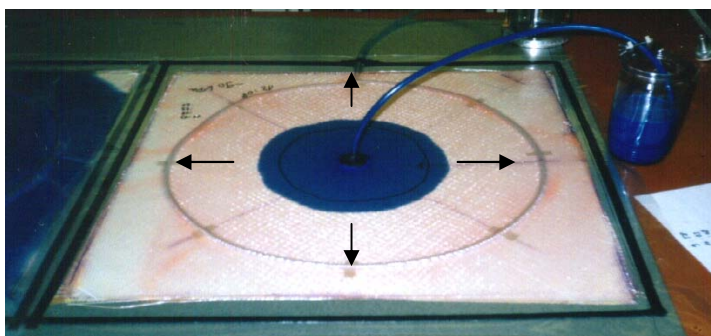
Ve vztahu (5) figuruje konstanta C , jejíž hodnota charakterizuje zvolenou strategii penetrace. Jsou uvažovány 3 základní modelové strategie:

- Pro obvodové plnění čtvercového vzorku (tj. z obvodu směrem do středu) nabývá dle [1] konstanta hodnoty $C = 1/16$.



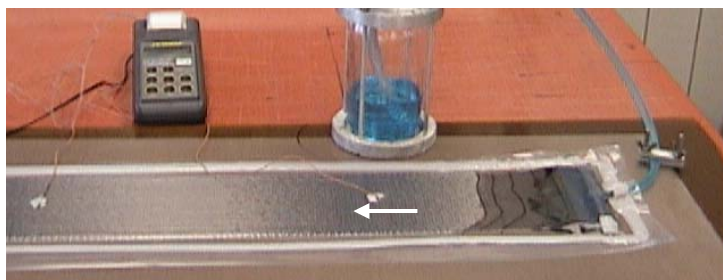
Obr. 1 Obvodové plnění

- Pro centrální plnění, kdy je vzorek plněn od středu směrem k obvodu, nabývá dle [1] konstanta hodnoty $C = 0,0625 [\epsilon^2 + 2\ln(1/\epsilon) - 1]$, kde: $\epsilon = \text{Ø plnicího vstupu} / \text{Ø zkušebního vzorku}$.



Obr.2 Centrální plnění

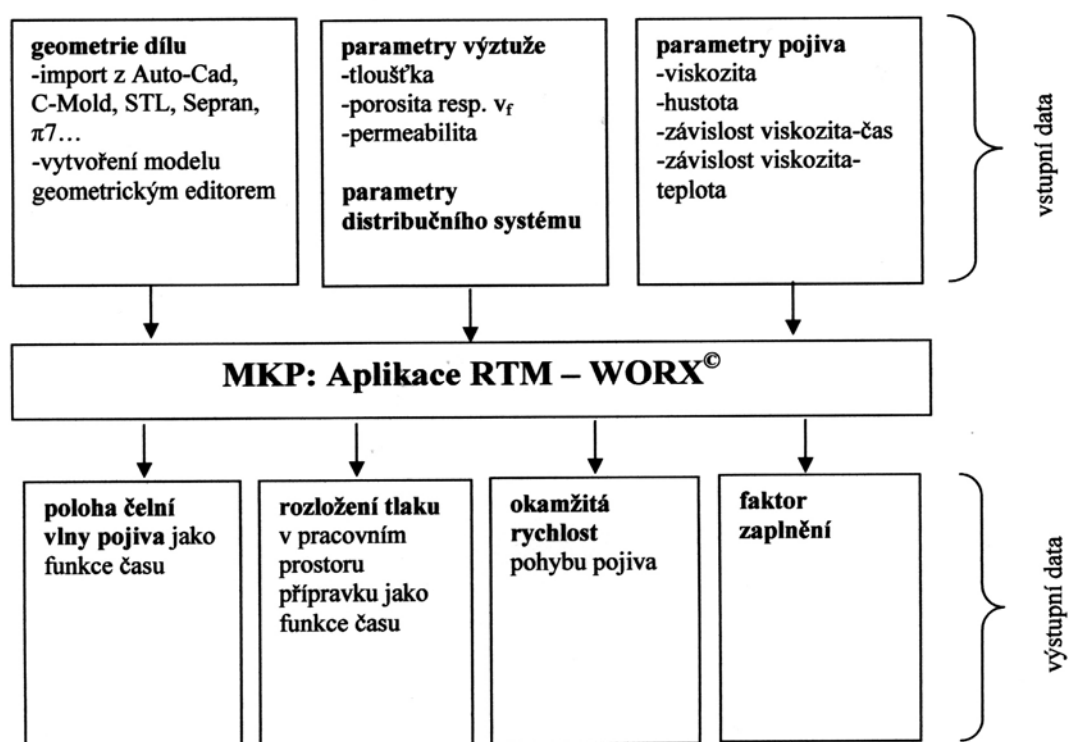
- Pro hranové plnění čtvercového vzorku (tj. z jedné hrany směrem ke druhé) nabývá dle [1] konstanta hodnoty $C = 1/16$.



Obr. 3 Lineární plnění

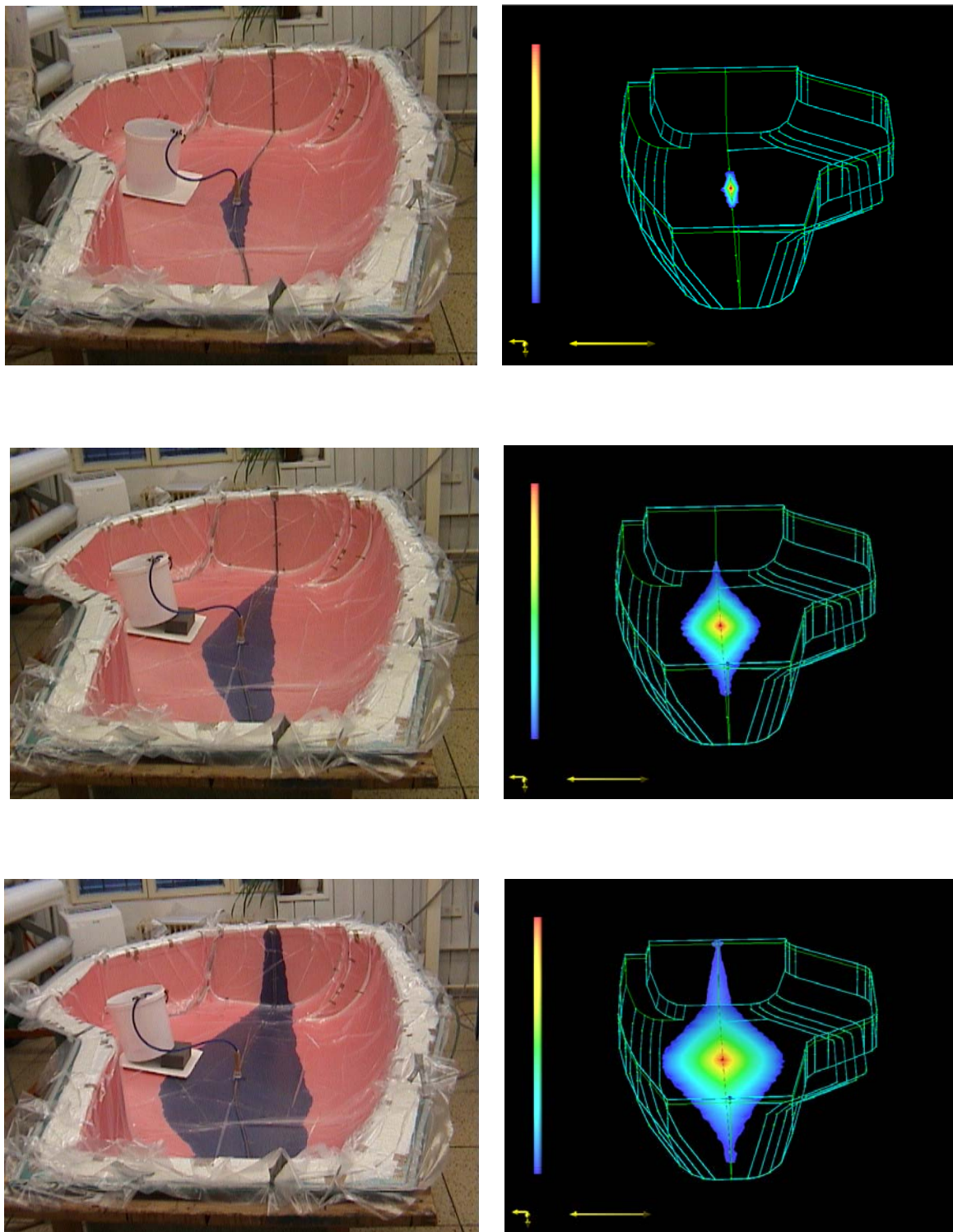
Počítačové aplikace

Aplikace RTM – WORX[©]

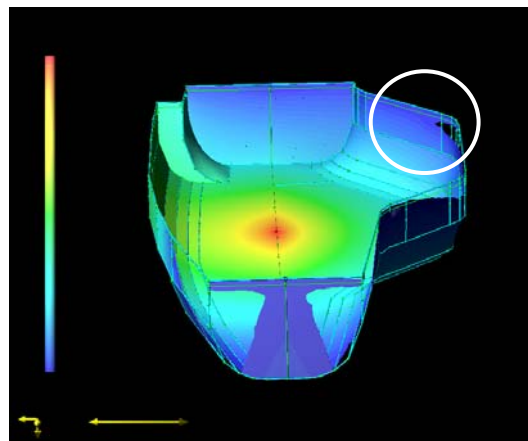
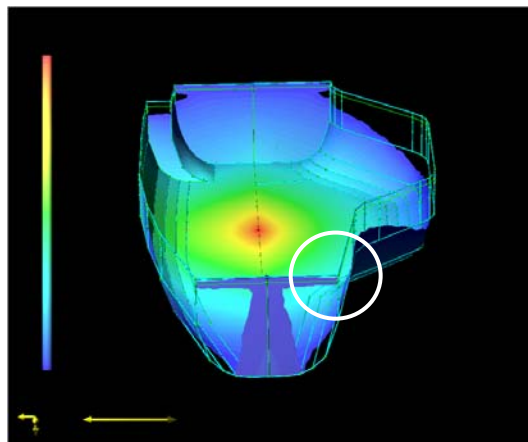
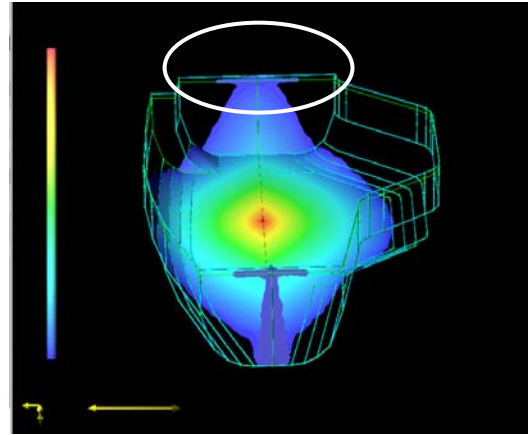


Obr. 4 Funkční schema aplikace RTM – WORX[©]

Demonstrace shody MKP simulace s reálným průběhem procesu je uvedena na Obr. 5. Po zpřesnění vstupních dat je možno dosáhnout i lepší shody v detailech, viz Obr. 6.

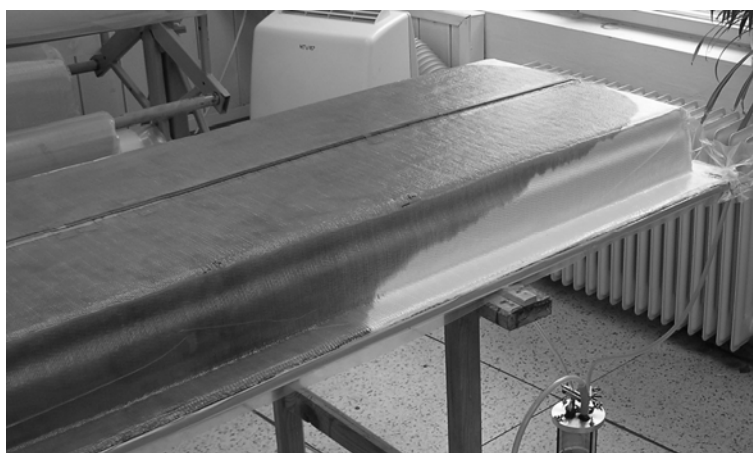
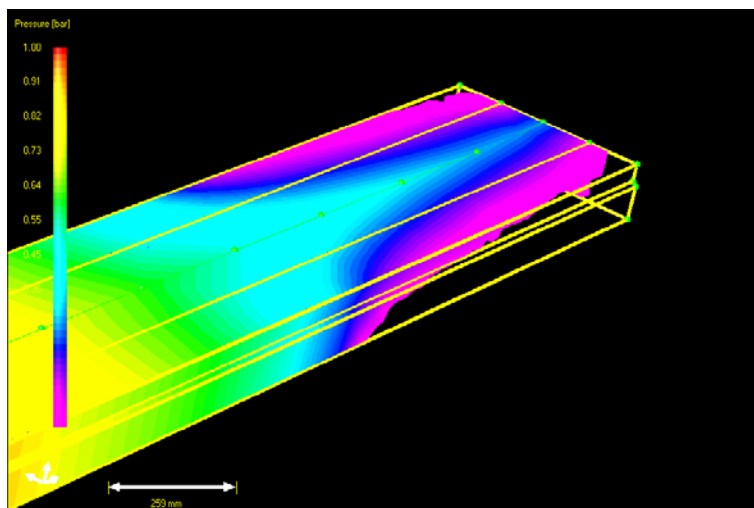


Obr.5 Příklad z aplikace RTM-Worx[©], výroba gondoly větrné elektrárny



Obr. 6 Při přesném zadání vstupních dat je simulace věrná i v detailech

Příklady z Obr. 5 a 6 demonstrují simulace na tenkostěnných skořepinách. Simulace je ale možno provádět i pro silnostěnné konstrukce a sendviče. Příklad z výroby silnostěnné formy viz Obr. 7.



Obr. 7 Výroba silnostěnné kompozitní formy procesem VIP

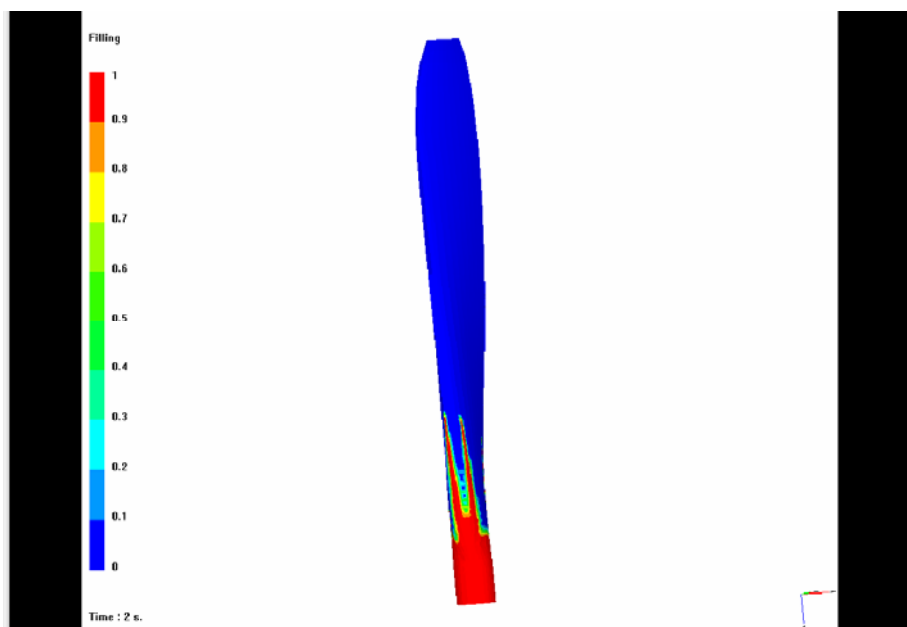
Predikce vzniku vady vrtulového listu v aplikaci PAM – RTM[®]

Technologie VIP má pro odladění výrobního procesu výhodu v tom, že je možno do jisté míry vizuálně kontrolovat probíhající infuzi. Obr. 5 až 7 poměrně dobře znázorňují, v jaké míře je do celého děje vidět a pracovník odpovědný za přípravu výroby může provádět část korekcí i na základě zkušenosti bez simulace v MKP.

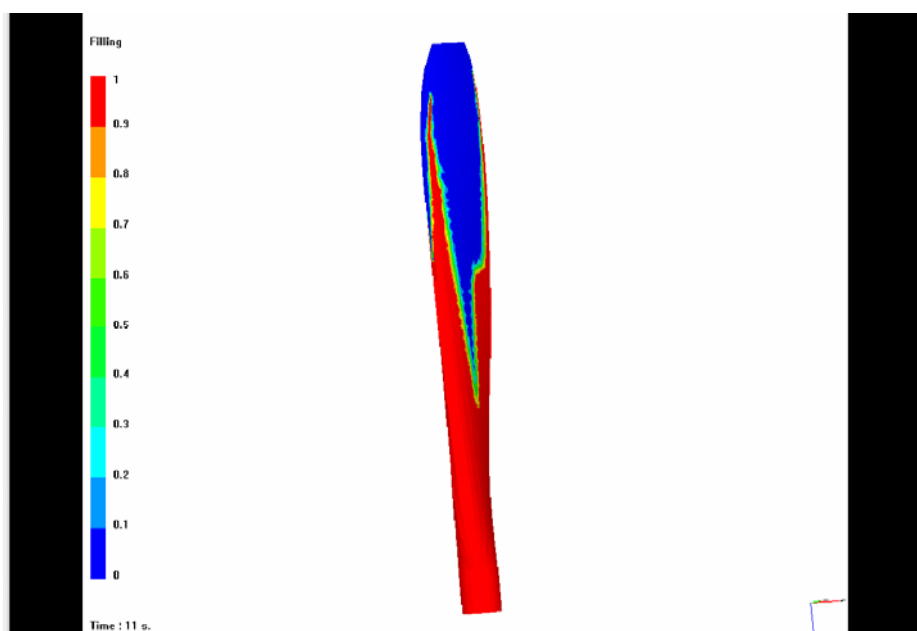
Klasická technologie RTM ale probíhá ve zcela uzavřené formě a vizuální kontrola procesu není možná. Pokud vzniknou problémy, dozvíme se o nich až na základě kontroly vytvrzeného kusu po otevření formy. Odhalit příčiny vad za takovýchto podmínek je značně obtížné a nevyhneme se ani postupům cestou pokusů a omylů.

U náročnějších dílů je cena formy pro RTM srovnatelná s cenou licence na instalaci potřebného software, takže návratnost investice do programového vybavení může být velmi rychlá. Pokud totiž nelze formu připravit pro variantní rozmístění vstupů a výstupů, mohlo by se stát, že první vyrobené výlisky prokážou pouze její nepoužitelnost a bude se muset vyrobit forma jiná. Simulace MKP je tedy velmi důležitým prvkem procesu technické přípravy výroby.

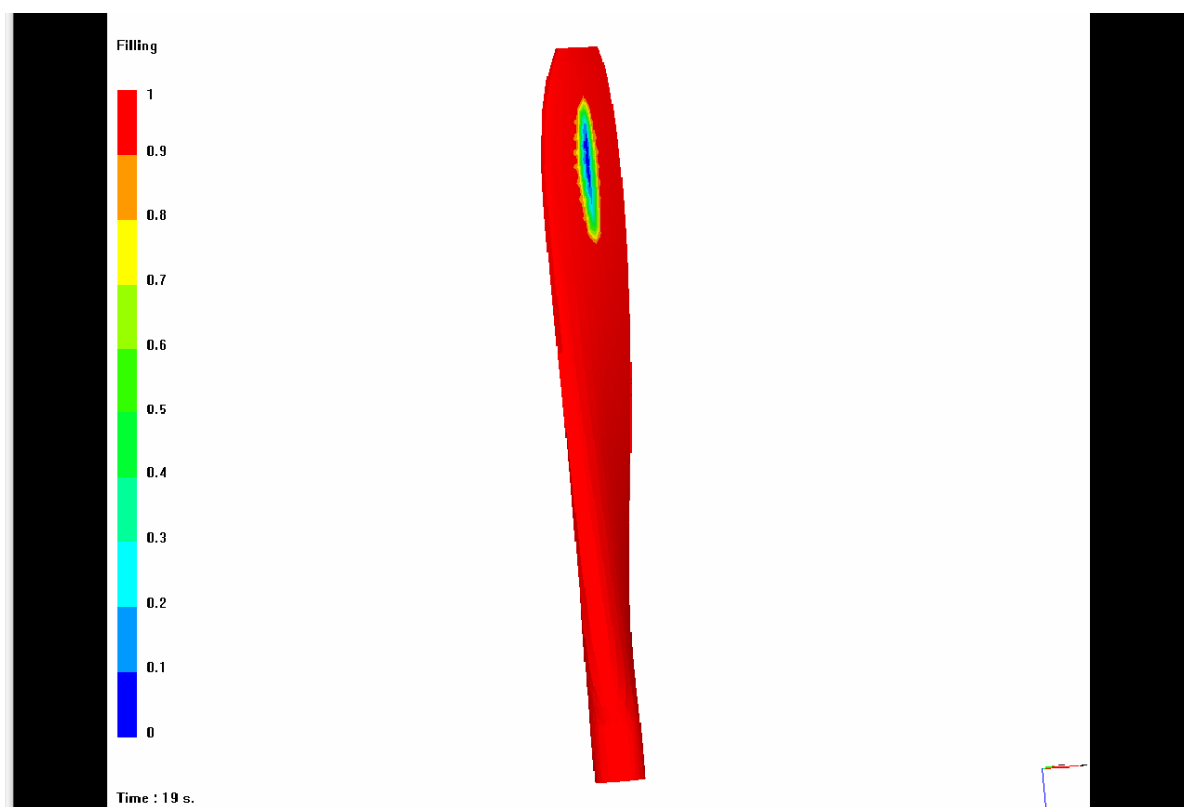
Příklad vady odhalené simulačním postupem při výrobě vrtulového listu viz Obr. 8 až 11. Aplikace PAM – RTM® může využít modelů připravených pro pevnostní a frekvenční analýzu konstrukce v prostředí jiných MKP systémů, čehož je s výhodou využíváno.



Obr. 8 Zahájení infuze směrem od kořene ke špičce



Obr. 9 Ze simulace jasně plyne rozdílná rychlost plnění formy v různých částech konstrukce kompozitního listu



Obr. 10 Konec infuzního procesu, u špičky listu zůstává neprosycená oblast



Obr. 11 Vada predikovaná v MKP se objevuje i na reálném kusu

Závěr

Cílem příspěvku bylo podat základní teoretický náhled na moderní kompozitní technologie výroby, založené na infuzních procesech do prostředí vláknové výztuže.

Je prokázáno, že tyto procesy lze s určitým zjednodušením matematicky modelovat a následně úspěšně simulovat pomocí metody konečných prvků. K dosažení shody se skutečností je však třeba co nejpřesněji zadat klíčové parametry procesu, zvláště pak hodnotu permeability skladby, což je veličina, kterou je možno nejpřesněji stanovit experimentálně.

Věrná simulace je významným faktorem snižujícím náklady ve fázi technické přípravy výroby infuzních procesů RTM a VIP.

Příspěvek byl zpracován za využití finančních prostředků Výzkumného záměru MSM0001066904 „Výzkum chování kompozitních materiálů v primární konstrukci zařízení s rotujícími nosnými plochami“.

Literatura

- [1] Koorevaar, A.: *Simulation of Liquid Injection Molding: Delivering on the Promise*; Polyworx: <http://www.polyworx.com>, 2003.

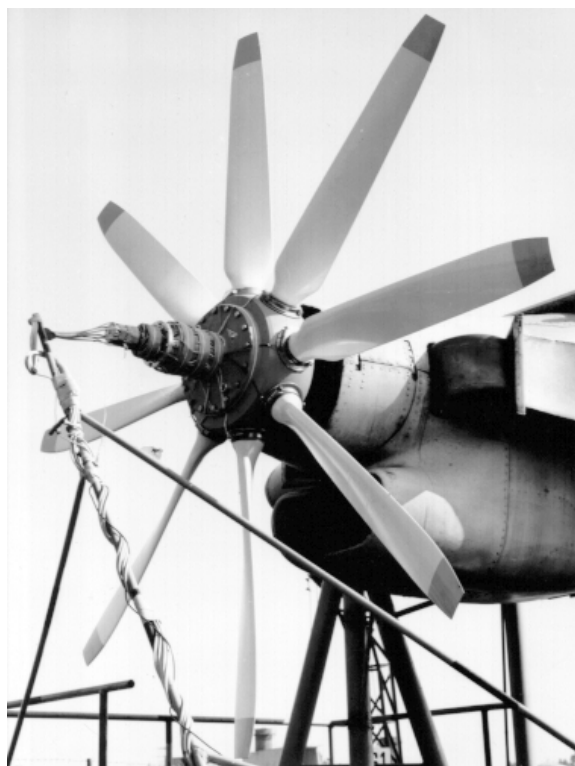
Problematika konstrukčního řešení kořenové části kompozitního vrtulového listu

Ing. Vilém Pompe, Ph.D.

Tento příspěvek se zabývá úvahou nad vhodným spojením kompozitní konstrukce vrtulového listu s ostatními kovovými částmi v jeho kořenové oblasti. Jde o kritické místo konstrukce, které má přímý vliv na spolehlivost celého výrobku, ovlivňuje jeho hmotnostní a v neposlední řadě i ekonomické parametry.

Úvod

Existuje řada důvodů, pro které je stále častěji řešena konstrukce moderních leteckých vrtulí, ale i jiných podobných rotorů, s využitím kompozitních materiálů. Zejména nové požadavky na redukci hluku vrtulí musí být kompenzovány zvyšováním počtu listů v sestavě. Důsledkem je nárůst hmotnosti a momentů setrvačnosti, které jsou v konfliktu s omezeními pohonné jednotky letadla.



Obr. 1: Kompozitní vrtule VZLÚ V531

Řešení problému spočívá v hledání nových materiálových kombinací, které budou pevnostně a tuhostně na úrovni konstrukcí z moderních hliníkových slitin, ale hmotnostně na daleko přijatelnějších parametrech. Vláknové kompozity v kombinaci

s hliníkovými slitinami a jen nejn nutnějšími díly z oceli, umožňují dosáhnout dokonce lepších hmotnostních charakteristik, než původní celokovové konstrukce s nižším počtem listů.

Na Obr. 1 je prototyp vrtule VZLÚ V531 s osmi kompozitními listy, která byla vyvíjena pro novou verzi letounu L-410 na přelomu osmdesátých a devadesátých let minulého století. Oproti původní pětিলisté celokovové vrtuli nabízela úsporu hmotnosti kolem 11 kg při vyšším přenášeném výkonu. Ještě významnější byly úspory v hlukových vlastnostech.

Kompozitní materiály přináší krom vynikajících vlastností i řadu velmi specifických problémů, k nimž bezesporu patří i slabina spočívající v problematice jejich zakotvení do kovové konstrukce. Spojе kompozitu s kovem představují místo s výraznou diskontinuitou mechanických i chemických vlastností a jsou obvykle místem, kde můžeme s jistotou očekávat potíže.

Situaci můžeme srovnat s analogickým spojem dřevěné a kovové konstrukce. Zatímco kov je rozměrově relativně stálý, dřevo neustále mění obsah vlhkosti podle klimatických podmínek. Utažený šroubový spoj se po několika klimatických cyklech rozvolní a ztratí předpětí, aniž by předtím musel být podroben nějakému provoznímu zatížení.



Obr. 2: Kompozitní rotor VZLÚ V934R pohonu aerodynamického tunelu

Podobně lepený spoj kompozitu s kovem, který krátce po vyrobení vykazuje dobré vlastnosti, může vlivem rozdílné teplotní roztažnosti a korozními účinky postupně zdegradovat až k samovolnému rozpadu.

Vrtule a rotory obecně, jsou akumulátory mechanické energie. Jakákoliv vada uložení listu v rotorové hlavě, která může vést k nekontrolovanému růstu, předsatvuje fatální ohrožení celé konstrukce. Spoj kompozitu s kovem tedy musí obsahovat bezpečnostní prvky, které zajistí dostatečnou únosnost konstrukce i při poruše alespoň do nejbližší provozní prohlídky.

Vlastní konstrukční řešení tohoto uzlu patří k rodinému stříbru každé významné vrtulářské firmy a je obvykle předmětem pečlivě ošetřené ochrany práv k průmyslovému vlastnictví. Také Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s., si v průběhu let připravil svá originální řešení, která používá ve svých vlastních výrobcích i v konstrukcích vyvíjených pro zákazníky.

Primární spoj a pojistka

Slovo "primární" se v souvislosti s leteckými konstrukcemi používá zpravidla tam, kde případná porucha může mít bezprostřední vliv na ohrožení života člověka a bezpečnost a spolehlivost konstrukce. Zde je ovšem uvažován jiný význam.

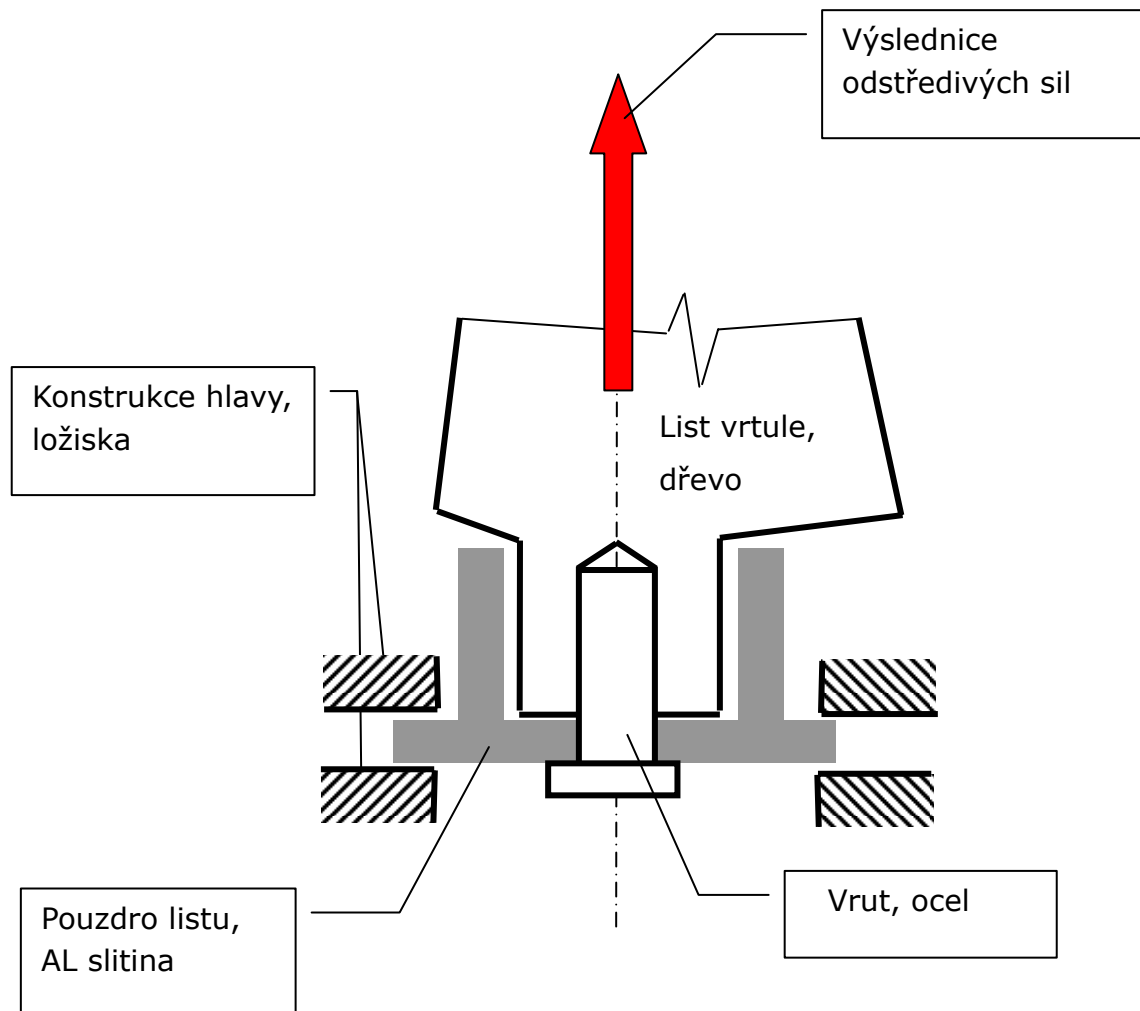
Primárním spojením dvou dílů budeme rozumět tu část spoje, která přenáší za normálních provozních podmínek prakticky veškeré zatížení. Ovšem tento spoj musí být jištěn pojistkou, která vstoupí do funkce až v případě porušení primárního spoje.

V čem je vlastně problém? Pokud by pojistka byla za normálních provozních podmínek průběžně zatěžována, mohlo by také dojít k postupné degradaci jejích vlastností. V kritickém okamžiku by pak mohla zkolabovat.

Jak již bylo výše uvedeno, rotor je akumulátorem energie, která by se při destrukci uvolnila s fatálními důsledky pro okolní konstrukci letadla (nebo jiného zařízení obklopujícího předmětný rotor). Samozřejmě, že ne vždy je možno takto funkci primárního spoje a pojistky oddělit a pak je nezbytné pamatovat na průběžné provozní prohlídky, zkoušky zbytkových vlastností, výměny dílů a podobně.

U kompozitních vrtulových listů je ale jeden háček. Zpravidla je celá kritická část konstrukce slepena nebo slaminována v jeden nerozebíratelný a často obtížně kontrolovatelný celek. Je tedy obtížné najít způsob vhodného průkazu v provozu, který by doložil, v jakém stavu je primární spoj a v jakém jeho pojištění - pokud tedy není volena cesta destruktivní zkoušky. Ale i v takovém případě může výsledek přinést více otázek, než odpovědí.

Úvahu můžeme pro jednoduchost demonstrovat na přírodním kompozitu, za který jsou považovány dřevěné materiály. Navíc speciálně v oboru leteckých vrtulí je použití dřeva a jeho kombinací s kompozity dodnes velmi časté a někdy nenahraditelné.



Obr. 3: Příklad spojení dřevěného listu s pouzdem z hliníkových slitin

Schematický Obr. 3 uvádí možné spojení dřevěného listu s pouzdem z hliníkových slitin pomocí jediného ocelového vrutu. Nedá příliš mnoho práce ověřit, že při vhodném dimenzování dřevěné části lze navrhnout jediný vrut tak, aby spolehlivě přenesl veškeré provozní zatížení, s patřičným bezpečnostním násobkem.

Pokud by ovšem došlo z jakéhokoliv důvodu k poškození vrutu, nebo dřeva v závitě, neexistuje nic, co by zabránilo ztrátě listu a roztržení vrtule. Spoj je tedy třeba zálohovat. Naznačíme, jak to lze udělat špatně.

První, co nás může napadnout je slepení pouzdra a dřevěného listu dohromady. Chyba úvahy je v tom, že vznikne spojení, u kterého není jasné, zda jde o spoj s vrutem, pojištěný lepením, nebo o spoj slepený, pojištěný vrutem.

Dřevo bude měnit svůj objem a vlhkost dle klimatických podmínek a bude v provozu docházet k rozrušování slepu dřevo/hliníková slitina. Degradaci lepeného spoje urychlí i vibrace, pronikání vody a nečistot přímo mezi plochy. Přitom lepený spoj bude z počátku přenášet větší část provozních zatížení, než vrut. Je totiž blíže k volnému konci a svou polohou předchází vrut.

Pokud tedy lepení bylo míněno jako pojištění centrálního vrutu, je fatální chyba v tom, že pojistka zdegraduje dříve, než samotný pojištěný spoj.

Pojistka tedy nefunguje a tato konstrukční chyba se bohužel neprojeví při běžných statických zkouškách.

Není cílem tohoto příspěvku probírat do detailu problematiku správného spojení dřeva s kovem v konstrukci leteckých vrtulí. Přeskočíme tedy i řadu dalších chybných úvah, jako jsou různé mechanické pojistky typu pojistné prošroubování kořenové části listu napříč směru vláken, svěrné tlakové spoje (které *de facto* jen rozdrtí hmotu dřeva) apod.

Praxe plynoucí už od dob počátku dějin moderního letectví prokázala, že spoj materiálů naznačený na Obr. 3 je možno bezpečně realizovat jen jako mnohonásobně zálohovaný stejnými vruty, z nichž zpravidla každý přenese samostatně celé provozní zatížení.

Tedy místo jednoho vrutu jich bývá obvykle v kořenové části listu 5 až 7, dle velikosti vrtule. Vruty jsou utaženy na předepsaný montážní moment a ten musí být v periodických prohlídkách kontrolován a obnovován.

Změny teplot a vlhkosti vedou i zde k postupnému a nepravidelnému povolování vrutů, což má za následek přetěžování těch vrutů v okolí, které se ještě neuvolnily. Příliš dlouhé intervaly prohlídek mohou vést k důsledkům v podobě únavových lomů pod hlavou vrutů a k nehodám. Příliš krátké intervaly prohlídek naopak působí ekonomické ztráty u provozovatele.

To byl v minulosti opakovaný důvod k dalším fatálním chybám u výrobců vrtulí, kteří se pokusili vyřešit (a dodnes to čas od času někdo zopakuje) problém uvolnění vrutů jejich zalepením. Tedy opět pojistka s kontraproduktivní funkcí.

Uvolnění vrutu se na venek projeví poklesem nebo úplnou ztrátou instalačních utahovacích momentů. Proto musely být příslušné vrtule vždy po určité době zcela rozmontovány a vruty zpět dotaženy momentovým klíčem. Pracovník tedy skutečně měřil moment odpovídající zbytkovému předpětí šroubového spoje.

V okamžiku, kdy jsou ale vruty zalepeny do dřeva, měří pracovník momentovým klíčem síly, které souvisí s kvalitou lepení ale nemají nic společného s rozvolněním spoje. Příčinou rozvolnění jsou totiž ojemové změny v dřevu, které nejsou závislé na tom zda je vrut zalepený, či nikoliv. I u zalepeného vrutu tedy dochází k poklesu předpětí spoje, ale momentovým klíčem se tato skutečnost již neodhalí.

Je poměrně snadné označit špatná řešení v okamžiku, kdy se již prokázala jako nevyhovující. Mnohem obtížněji se navrhuje řešení nová a spolehlivost návrhu bývá

často závislá na zkušenostech pracoviště z minulých projektů a z provozního nasazení aktuálně existujících výrobků.

Největší světoví výrobci vrtulí zůstávají u svých zavedených konstrukcí právě proto, že mají k dispozici potřebná data z dlouhodobého provozu. Marketingová hesla typu *"toto řešení je pro naši firmu charakteristické"* se tedy nepřizpůsobují pohledům módnosti (a ty jsou obecně velký problém dnešního světa) a přesouvají se do jiného světla. Výrobce vlastně oznamuje svým odběratelům, že nabízené řešení se opírá o jeho vlastní databázi zkušeností, která je nenahraditelná a nedá se z principu pořídit s patentovými právy nebo dokonce jen napodobováním už zavedené konkurence.

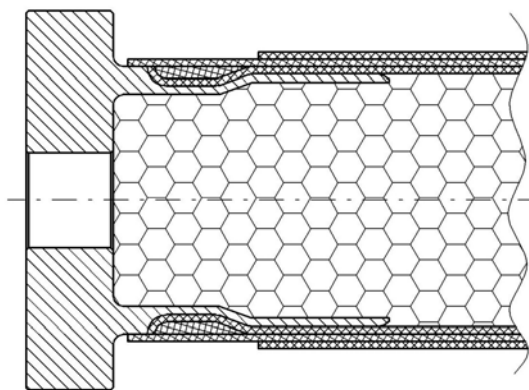
Tvarové zámky

V předchozí kapitole byla vlastně rozvedena úvaha o tom, že spoj kompozitní a kovové části listu vrtule musí být navržen jednoznačně a musí být také jednoznačně řečeno, čím je pojištěný a jak primární a pojšťující část funguje.

U laminovaných kompozitů se přímo nabízí možnost vlamínovat nebo alespoň dodatečně vlepit kovové díly do konstrukce díla.

Primárním spojem by tedy mohl být adhesní spoj. Úmyslně se vyhýbáme užšímu termínu "lepený", protože při vlamínování kovových dílů nepoužíváme lepidlo a také příprava dílů pro spojení se může lišit od postupů vhodných pro lepení.

Vláknové kompozity se skládají minimálně ze dvou fází, z matrice a výztuže. Platí, že rozhodující zatížení musí přenášet výztuž, která je k tomu určena. Abychom zatížení do výztuže dostali, je nejlepší ji obtočit, nebo zahnout, kolem vhodného tvaru. Vznikne tak tvarový zámek, který lze porušit jen lomem ve výztuži, tady na hodnotách napětí odpovídajících pevnosti nosné části kompozitu.



Obr. 4: Kovová vložka vlamínovaná do listu, pojištěná prosazením a bandáží

Na Obr. 4 je konstrukčně nejjednodušší provedení spoje s tvarovým zámkem. Vrstvy laminátu jsou svedeny po kovové vložce do prosazení a napříč převázány bandáží z jednosměrného vlákna.

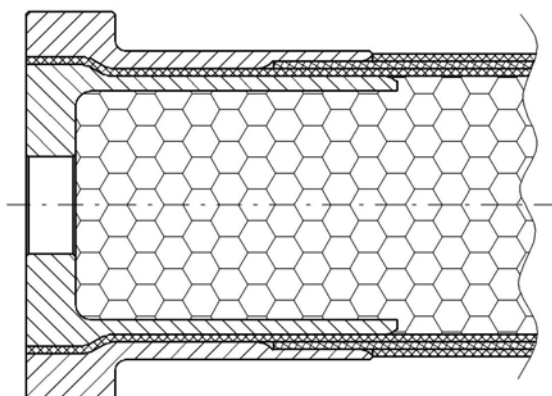
Spoj je navržen tak, že se teoreticky veškeré provozní zatížení přenáší mezi kompozitem a kovem adhezí ve válcové ploše nad zámkem. Do zámku se přenese jen takové zatížení, které odpovídá společné deformaci obou spojených dílů. Až teprve po separaci laminátu od kovové vložky, postupující od hrany vložky směrem k zámku, narůstá zatížení vlákna v prosazení a v samotné bandáži.

Aby mohlo dojít ke konečné destrukci, spočívající v úplném oddělení laminátu a kovu, musí prasknout bandáž a vrstvy laminátu v prosazení. Proces může být urychlen zdeformováním kovové vložky.

Jde o jeden z nejstarších a nejznámějších principů spojení anizotropního a izotropního materiálu. Nakonec i starověký člověk spojoval dřevěnou násadu s kameným nástrojem vhodným tvarem a převázáním provazcem.

Zajímavé je zapřemýšlet nad samotným principem porušení konstrukce z Obr. 4. V konstrukci zámku nejde vlastně o nic jiného, než o zmenšení původního průměru kompozitní válcové plochy. Aby mohlo dojít ke stržení kompozitu z kovového trnu, musí vzniknout dostatečně velká tahová napětí v tangenciálním směru kompozitního válce v prosazení, aby se jeho průměr zvětšil (lomem) na původní hodnotu.

Jiné geometrické uspořádání reprezentuje tvarový zámek na Obr. 5. Dva kovové protikusy ukotvují kompozitní část listu pomocí kuželové plochy. Příčná bandáž není použita.



Obr. 5: Dvoudílná sestava kovových dílů s kuželovým tvarovým zámkem

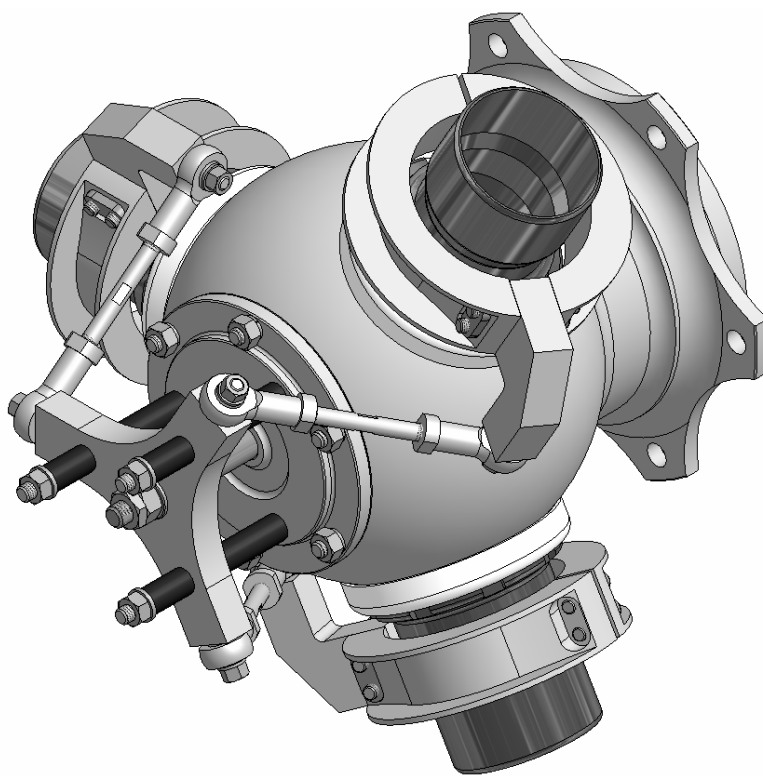
Nápaditost podobných řešení spočívá v lepším využití primárního adhesního spoje, který má nyní k dispozici dvojnásobnou plochu, a v lepším průběhu tangenciálních napětí. Aby mohlo dojít k vytržení kompozitu z kovových dílů, musí vzniknout v tvarovém zámku tlaková tangenciální napětí. Kuželová plocha musí být rozdrčena a musí změnit svůj tvar.

Zpravidla většinu objemu kompozitu v kořenové části listu tvoří jednosměrné uhlíkové vrstvy. Je to proto, že zachycují významné odstředivé a ohybové síly mnohem lépe, než vrstvy s křížovou vazbou vláken. Tlaková pevnost jednosměrných uhlíkových vrstev směrem kolmo na vlákna (tento směr odpovídá tangenciálním složkám napětí v zámku) je přibližně 3 až 5 krát větší, než tahová pevnost kolmo k vláknům. Z tohoto důvodu spoj dle Obr. 5 přenese při stejných materiálech a základních průřezech větší kritické zatížení, než spoj na Obr. 4.

Zkoušení

Otázce návrhu bezpečného spoje kov/kompozit, vhodného pro listy (lopatky) rotorů, je ve VZLÚ věnována velká pozornost. Tvarový zámek je klíčový bodem konstrukce a přímo souvisí s takovými parametry, jako jsou rozebíratelnost, hmotnost a rozměry, výrobní náklady, možnost spolehlivého provádění prohlídek apod.

Platí obecná poučka, podle které aplikace kompozitních materiálů přinese nejlepší ovoce jen v případě, kdy je celá konstrukce díla podřízena právě jim.



Obr. 6: Návrh hlavy vrtule s kompozitními listy pro malý sportovní letoun

Na Obr. 6 je příklad návrhu vrtulové hlavy pro malý sportovní letoun. Komplikovanější a hmotnější řešení kořenové části listu umožňuje paradoxně minimalizovat hmotnost celé vrtule. Hlava, která tvoří významný hmotnostní příspěvek, totiž vychází menší, s menším počtem dílů. Zmíněná poučka se potvrzuje v plné míře a z dalších dosud prováděných studií a projektů plyne, že prostou materiálovou

náhradou "kompozitní" za "kovový nebo dřevěný" nelze docílit požadovaných úspor v konstrukci.

Jak bylo už dříve uvedeno, spoj kov/kompozit se může porušit kombinací tahových namáhání po směru vláken a kolmo k nim, viz Obr. 4, kombinací tahu a tlaku, viz Obr. 5 a je možno navrhnout i zámky porušované kombinací tahového a smykového napětí. Každý z těchto principů se hodí pro jiné konstrukce vrtulí. Tam, kde je vyžadována regulace úhlu nastavení listu, musí být zaručena opakovatelná rozebíratelnost kořenové části listu. Příčinou jsou ložiska, která musí být kontrolovatelná a samozřejmě také podle potřeby vyměnitelná. Důsledkem je vyšší hmotnost uzlu.

Vrtule seřiditelné za klidu na zemi naopak žádná ložiska nepotřebují a jejich listy mohou mít daleko jednodušší konstrukci.

V rámci probíhajícího Výzkumného záměru financovaného MŠMT, jehož tématem je aplikace kompozitních materiálů v konstrukci rotorů, je mimo jiné připravována řada experimentů, které mají napomoci zvládnutí metodiky správného konstruování kořenové části listů. Jsou připravována speciální zkušební tělesa (tzv. "dvoukořeny"), která plní dvojí funkci. V první řadě velmi dobře slouží k návrhu technologie výroby principiálně různých tvarových zámků. Pouze ty konstrukce, které jsou spolehlivě a opakovatelně vyrobitelné, mají smysl pro praxi.

Následně jsou na těchto tělesech prováděny statické zkoušky únosnosti. Při nich je sledován průběh deformací a sil až do kritické poruchy a jsou vyhodnocovány módy poškození - jejich pořadí a dopady.



Obr. 7: Forma pro výrobu zkušebního tělesa kořenové části listu

Na Obr. 7 je příklad formy pro výrobu jednoho typu zkušebního tělesa. Má-li být následná statická zkouška skutečně průkazná, musí být použita i stejná technologie výroby tělesa, jako pro skutečný list vrtule. V tomto případě je plánována infuzní technologie RTM (Resin Transfer Moulding). Na Obr. 8 je vidět předformovaná suchá výztuž pro vložení do formy, včetně kovových dílů tvarových zámků.



Obr. 8: Předlisky zkušebního tělesa před vložením do formy a infuzí matrice



Obr. 9: Hotový výlisek po vyjmutí z formy



Obr. 10: Zkušební tělesa různých konstrukcí připravená ke statické zkoušce

Zkušební tělesa z Obr. 10 jsou navržena tak, aby umožnila vzájemné porovnání jak konstrukčních charakteristik (počty dílů, materiálové vlivy, hmotnostní charakteristiky, rozebíratelnost) tak i pevnostních vlastností (únosnost a způsob porušení) rozdílných řešení. Vzniklá data poslouží jako vstup do výpočtů a k návrhu optimalizačních metod pro konstrukci tohoto nesmírně důležitého uzlu.

Závěr

Optimální dimenzování kořenové části kompozitního listu je závislé na znalosti skutečné funkce spoje kov/kompozit. Naznačené praktické příklady se pokouší ilustrovat proč tomu tak je.

Záměna nebo nerozpoznání funkcí primárního spoje a pojistky, mohou mít za následek poruchy, které se opakují i při pokusech o změnu v dimenzích prostě proto, že se změny nedotknou podstaty problému.

Metodika zkoušení kořenových částí listů pomocí tzv. "dvoukořenů" je převzata z praxe na dřevěných vrtulích VZLÚ. Analogie dřeva a vláknových kompozitů přímo vybízí k podobnému přístupu.

Příspěvek byl zpracován za využití finančních prostředků Výzkumného záměru MSM0001066904 „Výzkum chování kompozitních materiálů v primární konstrukci zařízení s rotujícími nosnými plochami“.

Návrh a optimalizace skladby kompozitové lopatky

Ing. Matěj Hraška, Ing. Vilém Pompe, Ph.D.

V předloženém článku je popsán typický postup návrhu modálních a pevnostních charakteristik kompozitové lopatky určené pro ventilátory aerodynamických tunelů. Příspěvek obsahuje popis návrhu skladby, lineárního a nelineárního výpočtu modálních vlastností, dále je uveden pevnostní výpočet kompozitové skladby dle vhodně zvoleného pevnostního kritéria

Úvod

Během návrhu modálních i pevnostních vlastností jakékoliv kompozitní konstrukce je nutné vzít v potaz několik důležitých faktorů, které mohou ve výsledku pozitivně či negativně ovlivnit konečný návrh konstrukce.

V případě návrhu popisované lopatky bylo nutné navrhnout takový typ kompozitní skladby, který bude splňovat následující podmínky:

- Zajistit odolnost skladby proti impaktivému porušení během provozu
- Zabezpečit, aby navrhnutá lopatka byla vhodně modálně naladěna z pohledu možného buzení vyplývajícího z konstrukčního návrhu ventilátoru
- Potvrdit, že u takto navrhnuté skladby nenastane žádný mód poruchy během nejkritičtějšího provozního režimu

Výše popsané podmínky byly zapracovány do prvotního návrhu. Po stanovení základních charakteristik byl tento návrh následně optimalizován a testován pomocí metody konečných prvků.

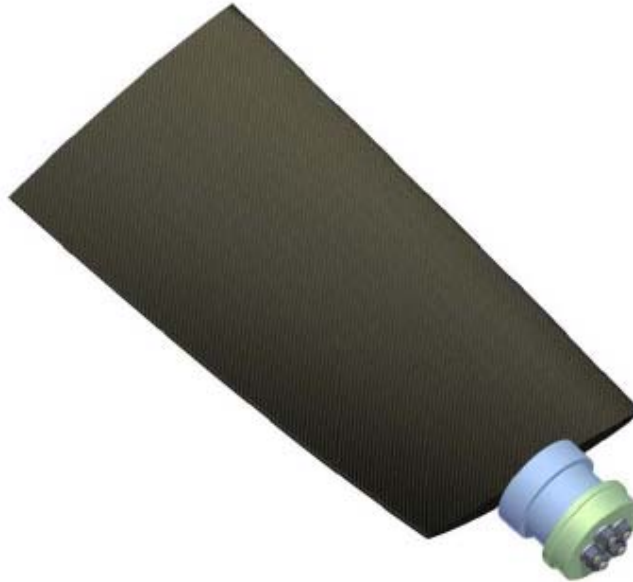
Popis konstrukce

Na Obr. 1 je vidět návrh lopatky ventilátoru vytvořený v Autodesk Inventor Suite 2008. Příklad sestavy rotoru s 8 lopatkami je uveden na Obr. 2.

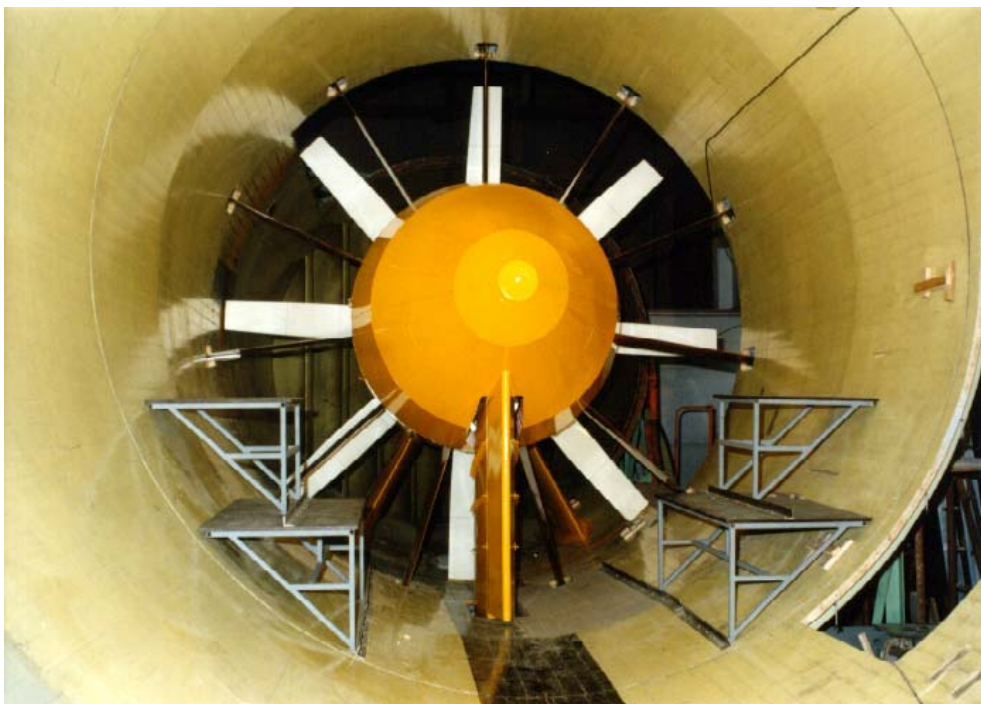
Při počátečním návrhu skladby lopatky bylo rozhodnuto použít hybridní výztuž z uhlíkového, aramidového a skleněného vlákna. Každý z použitých materiálů měl do konstrukce lopatky přinést specifické vlastnosti:

- Uhlíkové vrstvy výztuže jsou rozděleny na potahové (křížová vazba vláken) pro přenos aerodynamického obtížení do konstrukce a zachycení torzního namáhání, a na nosníkové pásnice (jednosměrná podélná orientace vláken) pro přenos ohybových momentů a odstředivé síly.

- Aramidová výztuž zlepšuje vlastnosti konstrukce při impaktu cizích těles, tj. brání křehkému porušování v místě impaktu.
- Skleněné vrstvy jsou použity pro izolační účely, zejména brání přímému kontaktu mezi vrstvami uhlíkové výztuže a kovovými díly paty lopatky.



Obr. 1 Kompletní sestava lopatky

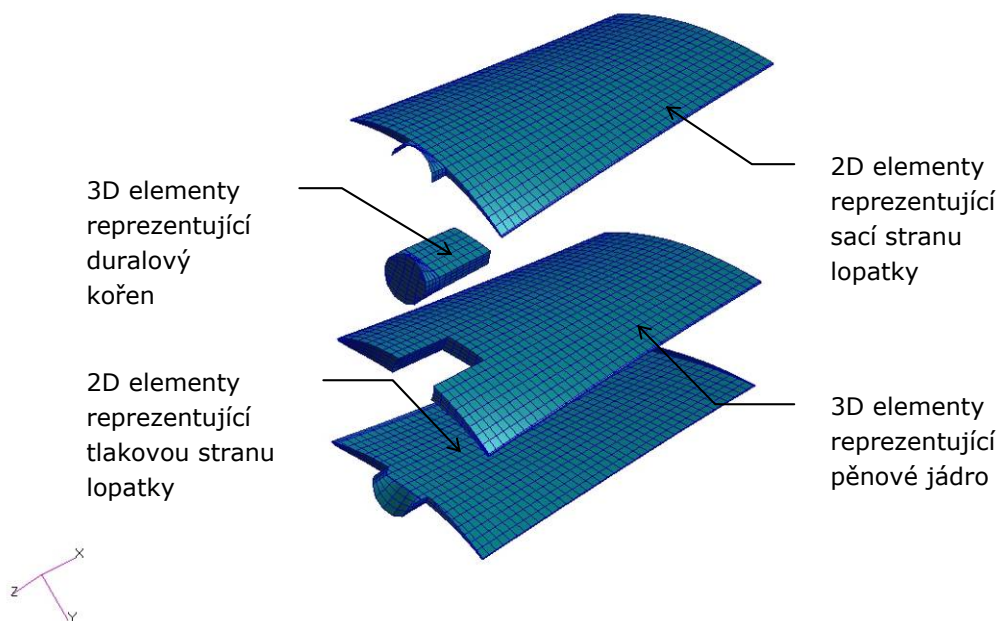


Obr. 2 Příklad sestavy rotoru s lopatkami navhnutými ve VZLÚ

Vnitřní prostor lopatky, kromě kořenové části, je vyplněn pěnou, která zároveň tvoří vnitřní povrch distribučního kanálu pojiva při infuzní technologii výroby kompozitu.

Popis MKP modelu

MKP model lopatky byl vytvořen v programu MSC.FEA 2005 r2. Pro vytvoření 2D částí modelu jsou použity tři a čtyř uzlové skořepinové elementy. Pro modelování 3D objektů jsou použity 6 a 8 uzlové elementy typu Wedge, Hexahedron. Celkový počet elementů je u tohoto modelu 6246 a počet uzlů je 5043. Na Obr. 3 jsou popsány jednotlivé části MKP modelu a typy elementů použitých pro jejich vymodelování.



Obr. 3 Elementy MKP modelu řešené lopatky

Popis skladby

Hlavním cílem návrhu skladby lopatky bylo její vhodné modální naladění a to z pohledu možných budících složek, které vyplývají z konstrukce samotného ventilátoru. V sestavě rotoru je použito osmnáct lopatek. Na statorové části ventilátoru se nachází pět rozváděcích lopatek.

Před samotným návrhem skladby byla stanovena omezující podmínka, podle které první vlastní frekvence lopatky nesmí být vybudena pátou harmonickou (viz. pět statorových lopatek) složkou buzení v celém rozsahu pracovních otáček. Maximální hodnota provozních otáček ventilátoru je 880 ot/min a hodnota páté budící harmonické složky při těchto otáčkách byla brána jako referenční během nelineárních modálních výpočtů. Její číselnou hodnotu lze jednoduše stanovit podle následujícího postupu.

Jedna rotorová lopatka při 880 ot/min proběhne 14,67 ot/s. Při každé této jedné otáčce projde kolem pěti statorových lopatek a každou z nich je buzena.

Vynásobením hodnoty otáček za sekundu a počtem buzení (statorových lopatek) za jednu otáčku dostaneme výslednou budící harmonickou složku.

V našem případě se jedná, jak již bylo vysvětleno dříve, o pátou harmonickou složku a její konkrétní hodnota je 73,33 Hz.

Pro splnění výše popsané podmínky byl otestován velký počet možných variant skladeb a materiálů. Zejména byly sledovány následující parametry:

- Optimalizace délky a počtu vrstev tvořících pásnici lopatky
- Optimalizace délky a počtu potahových vrstev
- Stanovení vhodného umístění aramidových vláken pro zvýšení impaktové odolnosti

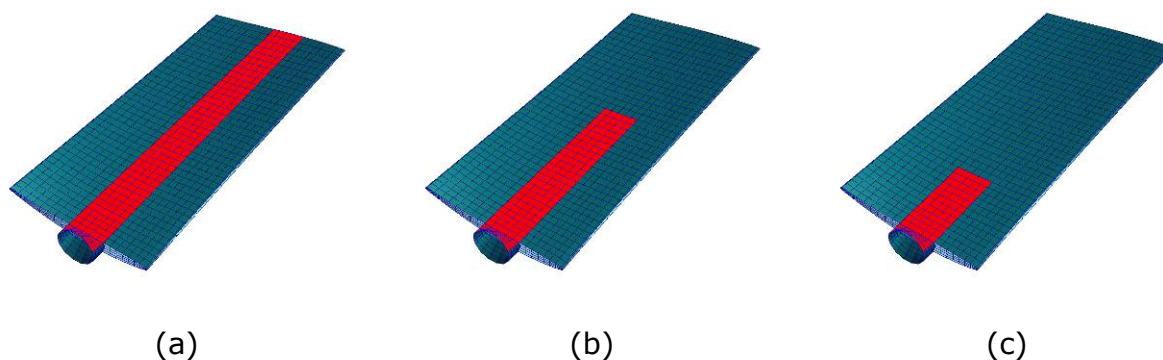
Optimalizace vycházela z obecného předpokladu, že změnu modálních vlastností konkrétní konstrukce, při požadavku zachování její geometrie, lze dosáhnout modifikací hmotnosti a tuhosti této konstrukce. Pokud se podíváme na nejobecnější tvar vzorce pro výpočet vlastních frekvencí:

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

tak je zřejmé, že mezi vlastními frekvencemi a tuhostí konstrukce je přímo úměra a pro hmotnost platí úměra nepřímá.

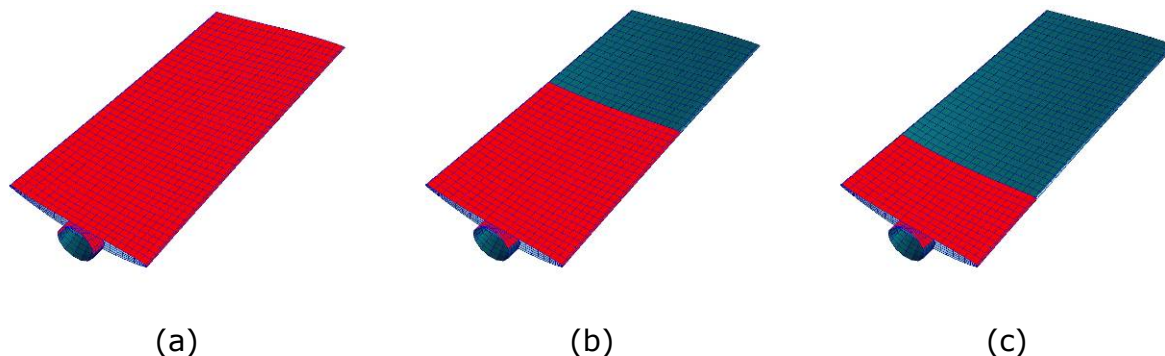
Z Obr. 1 jasně vyplývá postup pro optimalizaci tuhosti řešené lopatky. Tuhost v přechodové oblasti mezi kořenovou částí a samotnou lopatkou má rozhodující vliv na modální vlastnosti, a proto je vhodné do této oblasti směřovat co největší část tuhosti celé lopatky. Na druhou stranu je naprosto zřejmé, že předimenzování spíčky lopatky je nejen mrháním zde aplikovaných materiálů, ale také povede k výrazně negativnímu ovlivnění modálních vlastností.

Po zvážení všech výhod a nevýhod jednotlivých konstrukčních řešení, a to z pohledu pevnosti, tuhosti, výrobní náročnosti a vůbec možné realizovatelnosti návrhu, bylo rozhodnuto použít odstupňovanou hybridní skladbu. Tato konstrukční varianta umožňuje využít teoretických pravidel popsaných výše. Na následujících obrázcích je schématicky znázorněno rozložení vrstev laminátu, které odpovídají finálnímu návrhu.



Obr. 4 Vrstvy jednosměrného uhlíku tvořící pásnici lopatky a jejich umístění

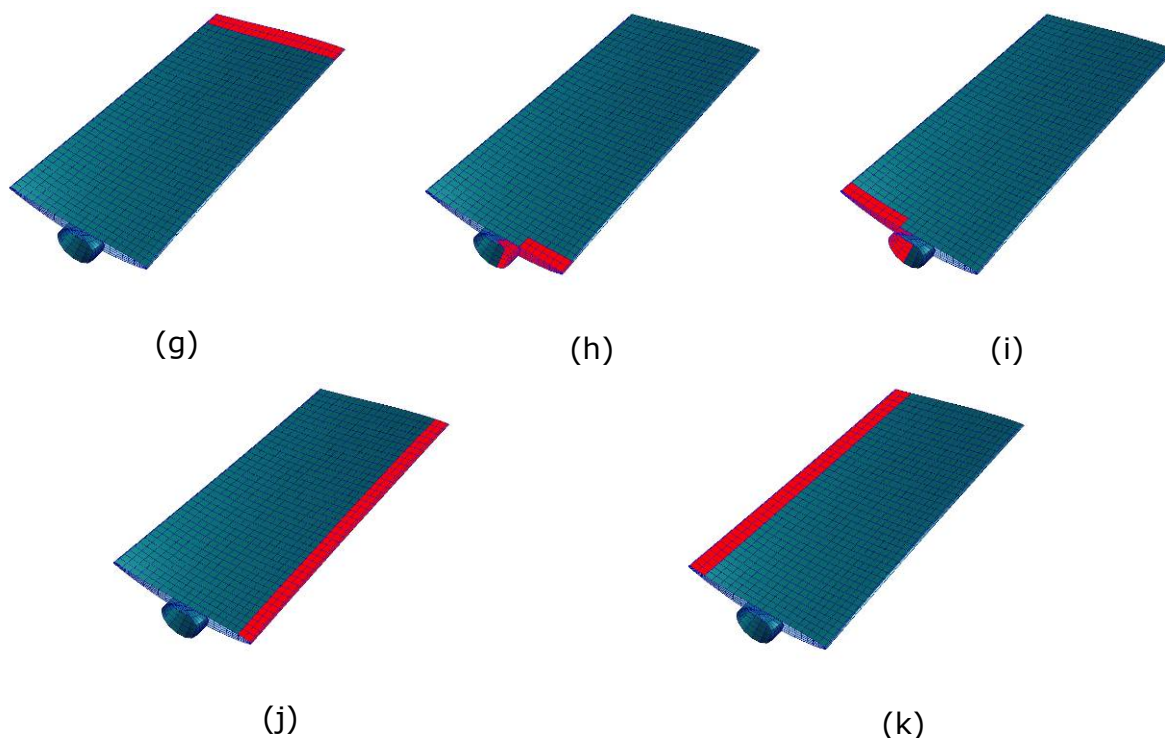
Na Obr. 4 (a) – (c) je vidět umístění vrstev pásnice a jejich odstupňování. Vrstvy jsou tvořeny kompozitem na bázi: uhlíkové vlákno/epoxid. Orientace vrstvy je 0° k podélné ose lopatky. Umístění vrstev pásnice je na sací i tlakové straně identické.



Obr. 5 Potahové vrstvy lopatky a jejich umístění

Na Obr. 5 (a) – (c) je vidět umístění a odstupňování vrstev potahového kompozitu na bázi: uhlíkové vlákno s ortogonální vazbou/epoxid. Vrstvy jsou odstupňovány ve stejných vzdálenostech jako pásnice. Orientace vrstev je $\pm 45^\circ$ k podélné ose lopatky.

Umístění vrstvy na bázi: aramidové vlákno (Kevlar) s ortogonální vazbou/epoxid odpovídá dílčímu obrázku (a). Orientace vrstvy je 0° k podélné ose.



Obr. 6 Umístění přelepových vrstev

Na Obr. 6 (a) – (e) jsou uvedeny přelepy na špičce (a), kořenové části u náběžné hrany (b), kořenové části u odtokové hrany (c), náběžné hraně (d) a na odtokové hraně lopatky (e). Každý přelep se skládá ze dvou vrstev laminátu na bázi: uhlíkové

vlákno s ortogonální vazbou/epoxid a z jedné vrstvy kompozitu na bázi: aramidové vlákno (Kevlar) s ortogonální vazbou/epoxid. Orientace vrstev se shodují s předcházejícími případy.

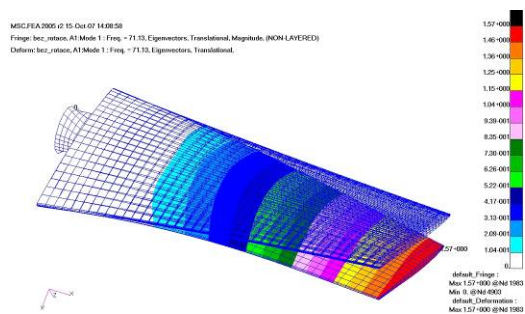
Modální analýza

Pro každý návrh skladby byla provedena MKP analýza, jejímž výstupem byl Campbellovův diagram popisující celé teoretické průběhy vlastních a budících frekvencí v závislosti na otáčkách. Za tímto účelem bylo třeba provést modální analýzu za klidu i se zahrnutím rotace. Pro výpočet modálních vlastností za klidu byla použita lineární analýza a k získání vlastních frekvencí a tvarů byla aplikována Lanczos metoda. Vliv rotace na modální vlastnosti lopatky byl vyřešen nelineární analýzou při 800 ot/min. Pro extrakci vlastních frekvencí a tvarů byla opět využita Lanczos metoda.

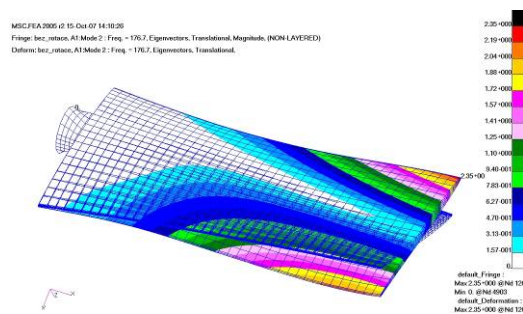
Celé teoretické průběhy vlastních frekvencí v závislosti na otáčkách, byly aproximovány parabolickým průběhem druhého stupně. V následujícím textu je uvedeno prvních deset vlastních frekvencí a prvních pět vlastních tvarů finálního návrhu lopatky pro obě varianty výpočtu.

Nulové otáčky				Při 800 ot/min			
1.	71,13 Hz	6.	509,66	1.	75,85 Hz	6.	515,85
2.	176,71	7.	574,98	2.	178,31	7.	577,83
3.	236,42	8.	619,88	3.	240,37	8.	622,87
4.	304,67	9.	684,97	4.	307,85	9.	689,51
5.	403,51	10.	747,81	5.	406,17	10.	751,32

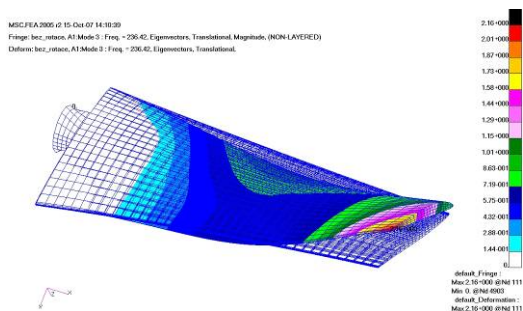
Tab 1. Výsledky modální analýzy finálního návrhu lopatky při 0 a 800 ot/min



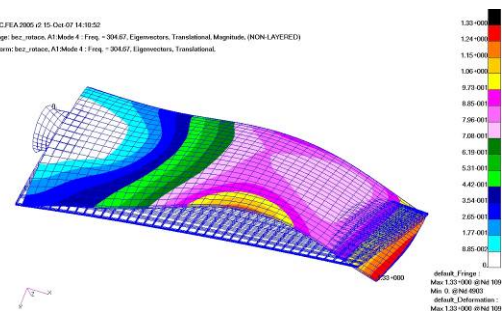
1. tvar – vlastní frekvence 71,13 Hz,
první ohybový tvar v rovině malé
tuhosti



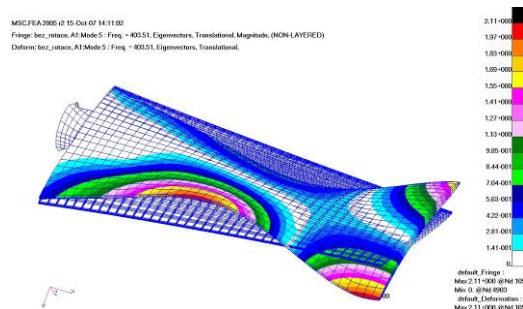
2. tvar – vlastní frekvence 176,71 Hz,
první torzní tvar



3. tvar – vlastní frekvence 236,42 Hz,
druhý ohybový tvar v rovině malé
tuhosti

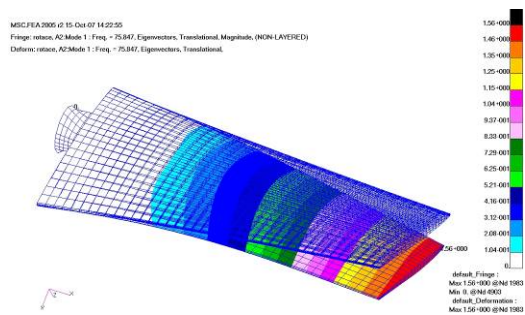


4. tvar – vlastní frekvence 304,67 Hz,
první ohybový tvar v rovině velké
tuhosti a druhý ohybový tvar v rovině
malé tuhosti

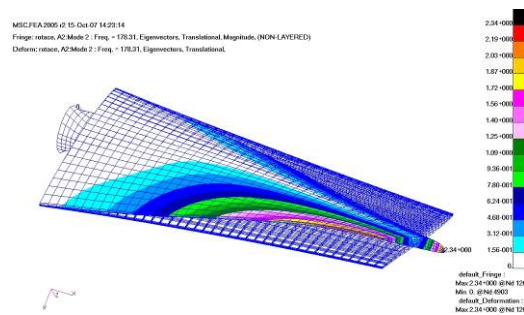


5. tvar – vlastní frekvence 403,51 Hz, druhý torzní tvar

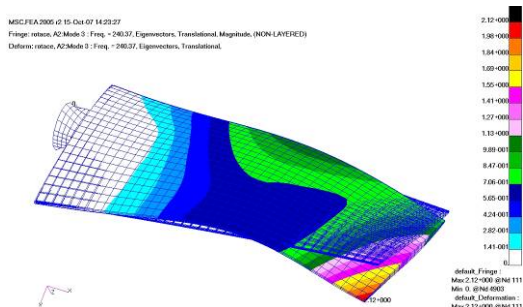
Obr. 7 Prvních pět vlastních tvarů lopatky při nulových otáčkách



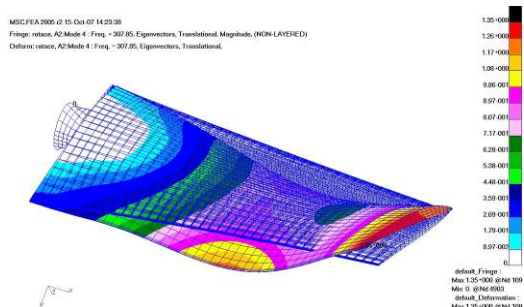
1. tvar – vlastní frekvence 75,85 Hz,
první ohybový tvar v rovině malé
tuhosti



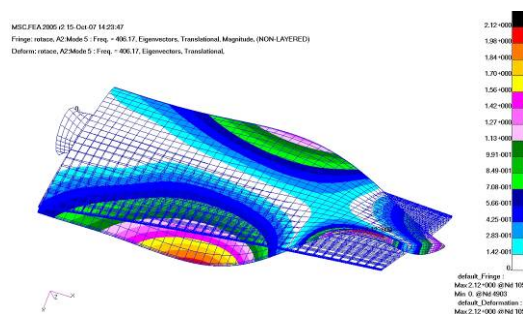
2. tvar – vlastní frekvence 178,31 Hz,
první torzní tvar



3. tvar – vlastní frekvence 240,37 Hz,
druhý ohybový tvar v rovině malé
tuhosti



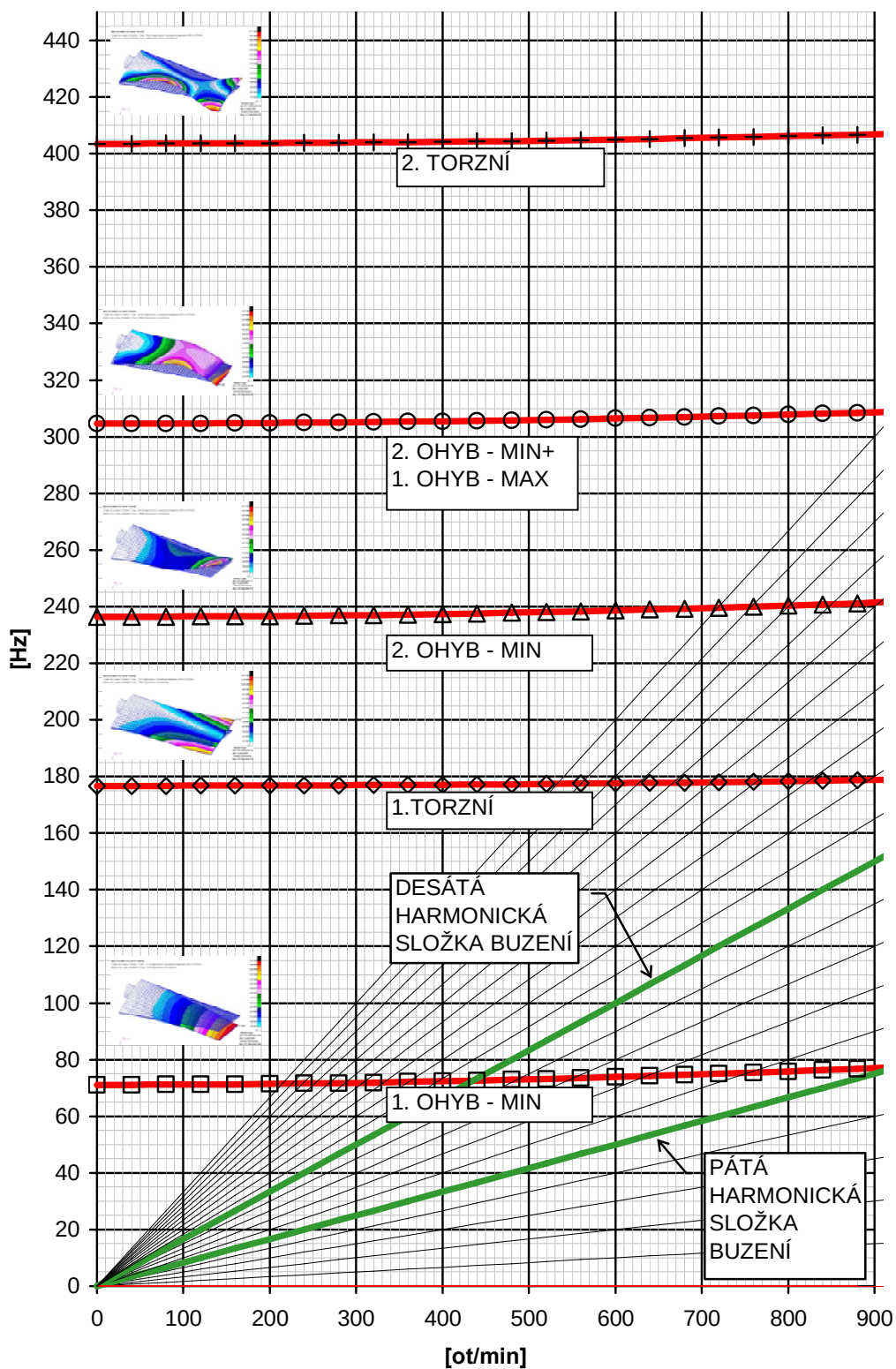
4. tvar – vlastní frekvence 307,85 Hz,
první ohybový tvar v rovině velké
tuhosti a druhý ohybový tvar v rovině
malé tuhosti



5. tvar – vlastní frekvence 406,17 Hz, druhý torzní tvar

Obr. 8 Prvních pět vlastních tvarů lopatky při 800 ot/min

Frekvence vlastních tvarů kmitání lopatky



Obr. 9 Campbellův diagram s teoretickými průběhy vlastních frekvencí v závislosti na otáčkách a s vynesnými složkami harmonického buzení

Pevnostní analýza

Finální návrh skladby musel být následně ověřen, zda je schopen snést zatížení od aerodynamických a odstředivých sil během provozních režimů. Lopatka byla kontrolována pro zatížení odpovídající 800 a 880 ot/min. Aerodynamické obtížení lopatky má následující hodnoty:

	800 ot/min	880 ot/min
Tlaková složka [N]	2027,39	2453,14
Odporová složka [N]	1966,53	2379,51

Tab. 2 Hodnoty aerodynamického zatížení lopatky při 800, resp. 880 ot/min

Pro vyhodnocení napjatosti v laminátu bylo použito kritérium maximálního napětí. Otázka používaných pevnostních kritérií (nebo také pevnostních podmínek, o kterých hovoříme častěji u kovových materiálů) pro kompozity výrazně přesahuje rámec tohoto příspěvku.

V oboru klasických kovových konstrukčních materiálů nejčastěji pracujeme s pevnostními podmínkami HMM (energetická teorie) nebo s teorií maximálního smykového napětí. Obě tyto teorie ve svém důsledku předpokládají jediný mód poruchy ve struktuře materiálu a vychází z předpokladu, že obecné napětí je možno vždy jednoznačně přepočítat na referenční hodnotu porovnatelnou s výsledkem standardní materiálové zkoušky.

Tento předpoklad pro vláknové kompozity neplatí, protože se porušují celou řadou vzájemně nepřevoditelných módů. Například nelze principiálně přepočítat podmínky přetržení vlákna výztuže na poškození matrice při namáhání kolmo na vlákna.

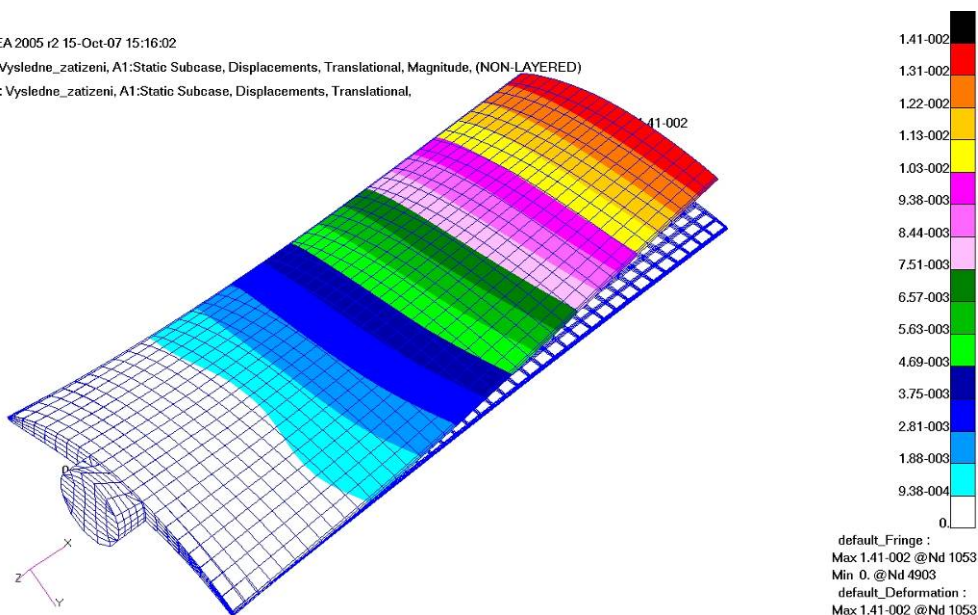
V praxi jsou tedy používána kritéria pevnosti laminátu, která jsou různě podrobná co do prošetření módů poškození a jsou praxí osvědčená pro typický výrobek. Ve VZLÚ je takovýmto kritériem, mimo jiné, i kritérium maximálního napětí, eventuálně kritérium maximální poměrné deformace.

Výsledky pro zatížení odpovídající 800 ot/min

MSC.FEA 2005 r2 15-Oct-07 15:16:02

Fringe: Vysledne_zatizeni, A1:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: Vysledne_zatizeni, A1:Static Subcase, Displacements, Translational,

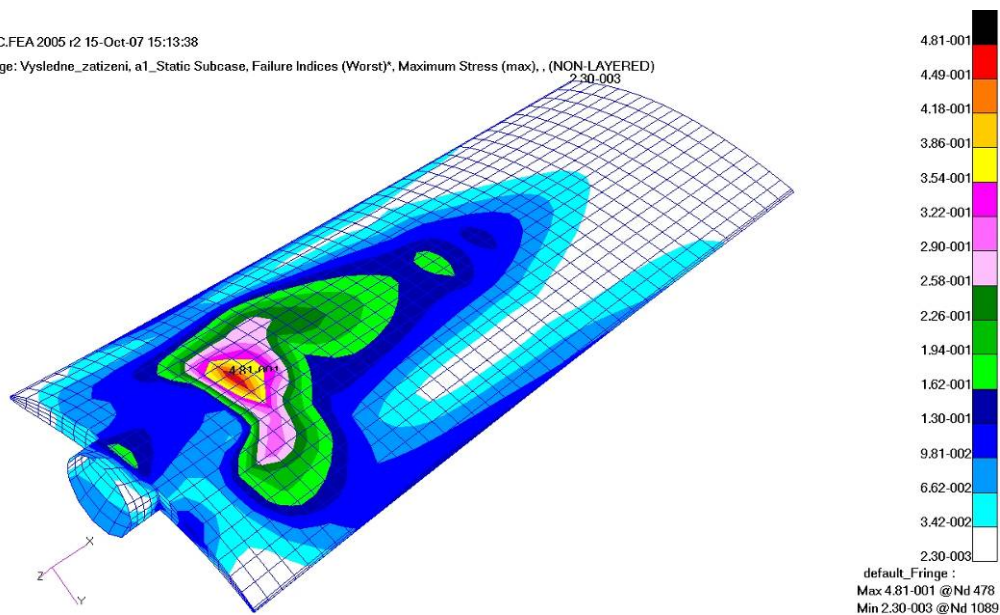


Obr. 10 Celkové posuvy při otáčkách 800 min^{-1}

MSC.FEA 2005 r2 15-Oct-07 15:13:38

Fringe: Vysledne_zatizeni, a1_Static Subcase, Failure Indices (Worst)*, Maximum Stress (max), . (NON-LAYERED)

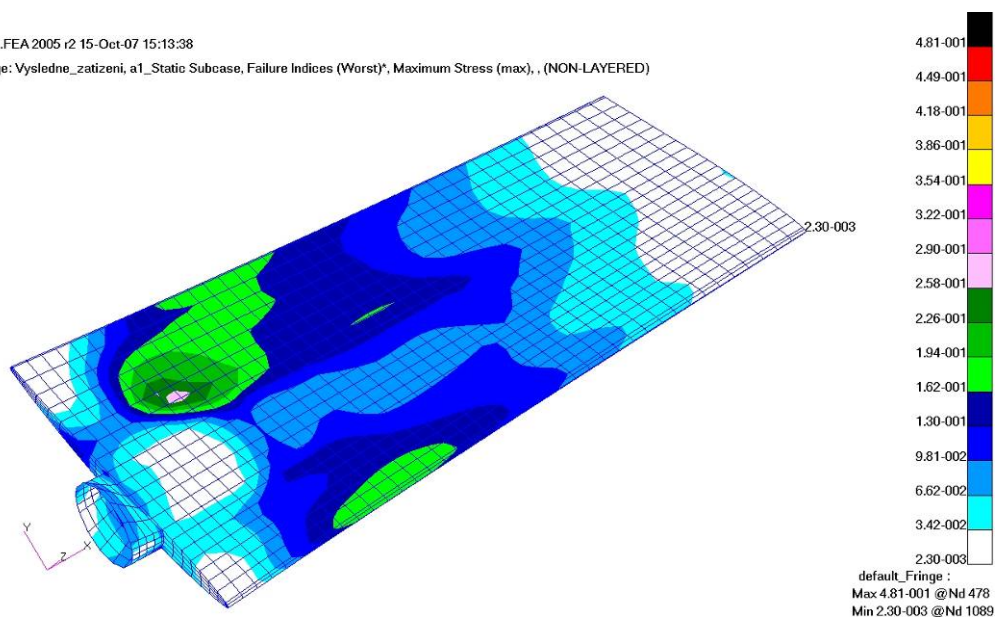
2.30-003



Obr. 11 Rozložení Failure Indexu na sací straně lopatky podle kritéria maximálního napětí při otáčkách 800 min^{-1}

MSC.FEA 2005 r2 15-Oct-07 15:13:38

Fringe: Vysledne_zatizeni, a1_Static Subcase, Failure Indices (Worst)*, Maximum Stress (max), (NON-LAYERED)



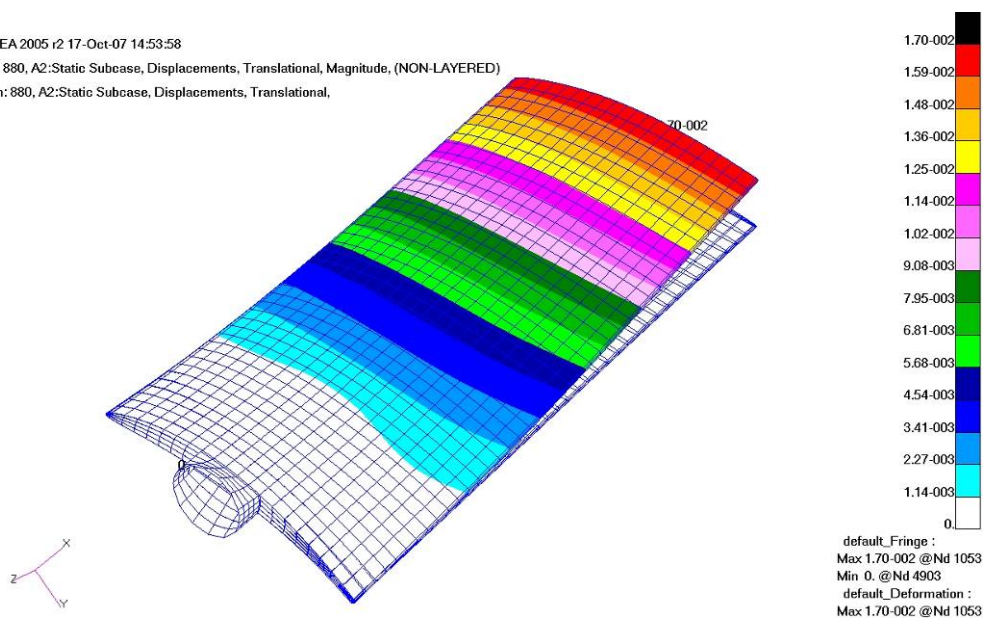
Obr. 11 Rozložení Failure Indexu na tlakové straně lopatky podle kritéria maximálního napětí při otáčkách 800 min^{-1}

Výsledky pro zatížení odpovídající 880 ot/min

MSC.FEA 2005 r2 17-Oct-07 14:53:58

Fringe: 880, A2:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

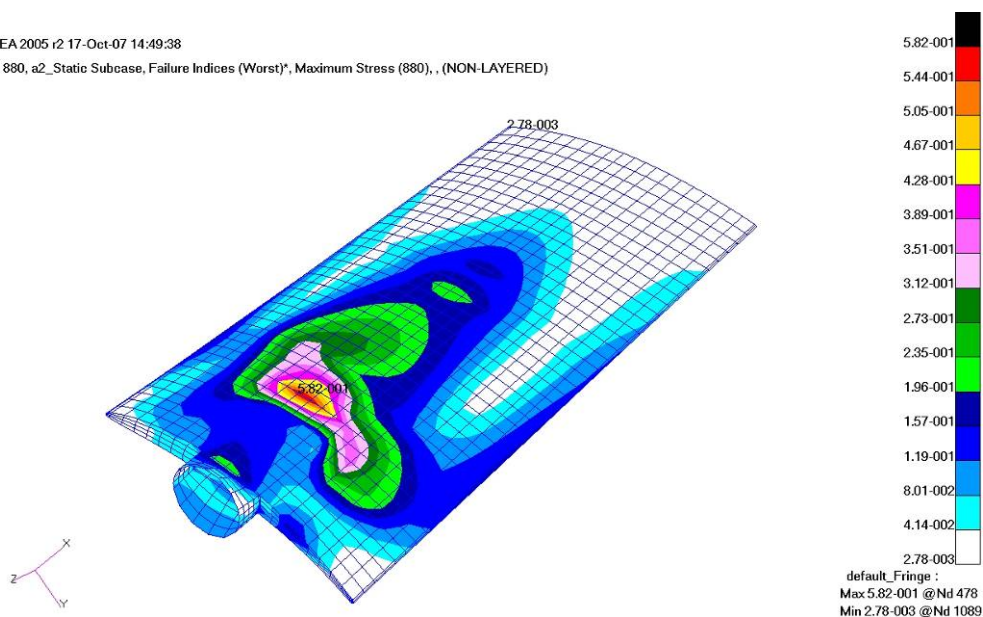
Deform: 880, A2:Static Subcase, Displacements, Translational,



Obr. 12 Celkové posuvy při otáčkách 880 min^{-1}

MSC.FEA 2005 r2 17-Oct-07 14:49:38

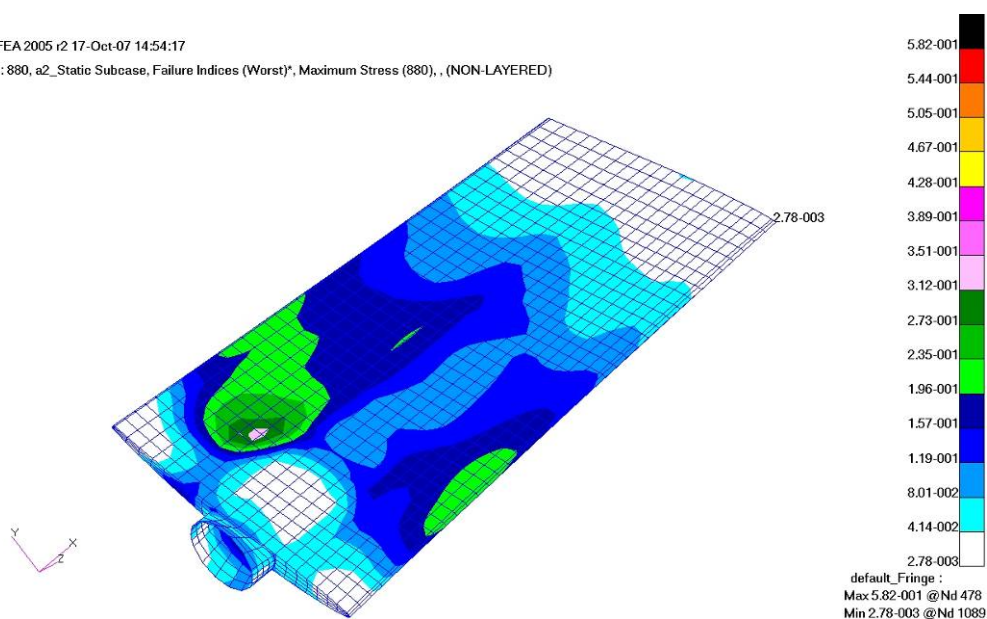
Fringe: 880, a2_Static Subcase, Failure Indices (Worst)*, Maximum Stress (880), , (NON-LAYERED)



Obr.13 Rozložení Failure Indexu na sací straně lopatky podle kritéria maximálního napětí při otáčkách 880 min^{-1}

MSC.FEA 2005 r2 17-Oct-07 14:54:17

Fringe: 880, a2_Static Subcase, Failure Indices (Worst)*, Maximum Stress (880), , (NON-LAYERED)



Obr. 14 Rozložení Failure Indexu na tlakové straně lopatky podle kritéria maximálního napětí při otáčkách 880 min^{-1}

Závěr

V příspěvku je naznačena metodika výpočtu kompozitní lopatky tak, jak je zavedena a dále rozvíjena na útvaru Letecké vrtule VZLÚ.

Z praxe plyne, že pro návrh kompozitní konstrukce tohoto typického výrobku je determinující požadavek na dosažení tuhosti, tj. naladění frekvencí vlastních tvarů kmitání. Pevnost je zpravidla již postačující a lze tudíž provést její kontrolu až na závěr.

Podmínkou samozřejmě je existence předtím ověřené konstrukce paty lopatky (primární spoj, tvarový zámek), o které je známo, že s rezervou přenesla všechna provozní zatížení.

Požadavky na dodržení tuhosti a přijatelný výsledek pevnostní kontroly mají vyšší váhu, než dodržení aerodynamicky ideálního tvaru. To prakticky znamená, že aerodynamická optimalizace lopatkového stroje musí být vždy podřízena (omezena) okrajovým podmínkám plynoucím z pevnostních a tuhostních výpočtů.

Ve skutečnosti je podobných omezení pro aerodynamický návrh ještě více. Zpravidla sem typicky patří hlukové emise, maximální přípustné hmotnostní charakteristiky, konstrukční souvislosti, atd.

Příspěvek byl zpracován za využití finančních prostředků Výzkumného záměru MSM0001066904 „*Výzkum chování kompozitních materiálů v primární konstrukci zařízení s rotujícími nosnými plochami*“.

Zkoušení kompozitních vrtulí a rotorů

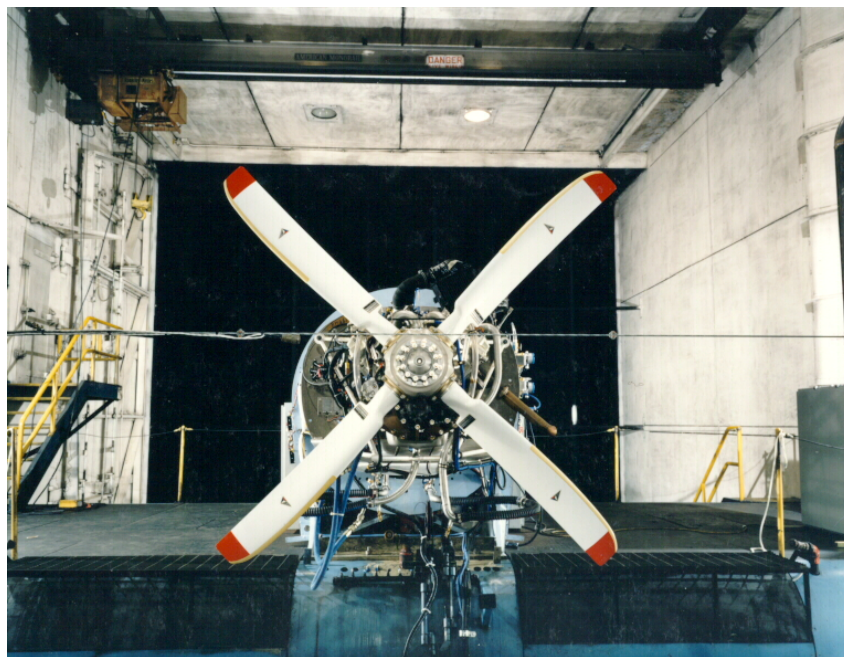
Ing. Vladimír Andrášek, Ing. Vilém Pompe, Ph.D.

Příspěvek shrnuje přístup Zkušebny leteckých vrtulí útvaru Letecké vrtule VZLÚ, a.s., ke zkoušení kompozitních konstrukcí typu list nebo obecně lopatka rotoru. Zkušebna těží ze své dlouholeté praxe získané jak na kovových konstrukcích, tak i konstrukcích dřevěných, které jsou svou povahou vláknem vyztuženým plastům blízké.

Úvod

Kompozitní materiály jsou již relativně dlouhou dobu standardem pro výrobu vrtulových listů všech kategorií. Důvodem proč tento materiál v kategorii lopatkových strojů vytlačuje konvenční kovové slitiny a dřevo, je výhodný poměr "měrná hmotnost versus mechanické parametry", dobré únavové vlastnosti, příznivé výrobní náklady.

Spolehlivé vyšetření stavu napjatosti konstrukce je výchozím krokem k řadě dalších úloh, které jsou na dobré znalosti průběhů napětí závislé. Kompozitní materiály jsou zpravidla silně heterogenním anizotropním prostředím, pro které nejsou vždy bezesbýtku přenositelné zkušenosti z oboru klasických kovových konstrukčních materiálů.



Obr. 1 Prototyp dřevokompozitní vrtule VZLÚ V22 při tenzometrických zkouškách na zkušebně firmy Hamilton Standard v USA

Velkým teoretickým problémem kompozitů je pojem „napětí v materiálu“. Jeho početní stanovení v kompozitu je možné na základě zjednodušení, typu homogenizace vlastností v průřezu nebo v jedné vrstvě, či s využitím zprůměrovaných hodnot napětí ve výztuži a matici. Vyhodnocení zjištěného stavu napjatosti z hlediska mezních stavů je rovněž značně náročné, neboť jde o jednu z úloh, která je závislá právě na správném určení stavu napjatosti a až následně jej hodnotí.

Druhým, neméně problematickým krokem, je prověření těchto stavů napjatosti cestou experimentu. Napětí má charakter energie akumulované v objemu a přímými postupy zřejmě měřitelné není, jde v podstatě o smluvní hodnotu. V přírodě jsme schopni pozorovat a také měřit odezvu konstrukce na zatížení silami v podobě posuvů. Tyto projevy jsou pak obvykle rovnou přepočítávány na předpokládané stavy napjatosti s využitím známých materiálových charakteristik.

I v případě kovového izotropního materiálu může jít o proces zatížený řadou systematických a náhodných chyb. V kompozitu, ve kterém je napětí i při jednoosém zatěžování funkcí souřadnic, ztrácí často podobný přístup k vyhodnocování napětově-deformačních stavů na výhodnosti a je někdy lépe trvale pracovat s posuvy a poměrnými deformacemi, které mohou být dle potřeby přepočítány do napětí jedné vrstvy nebo fáze.

Prakticky to tedy znamená, že z experimentu provedeného na kompozitní konstrukci může být pořízen záznam průběhu zatěžujících účinků a odpovídajících deformačních projevů. Ty jsou přepočítávány do jednotlivých vrstev laminátu a porovnávány s výpočty. Je-li třeba pracovat s napětími, jsou dopočtena.

Kompozitní materiály jsou charakteristické variabilitou svých vlastností a jsou vlastně takto programovatelné. Při zkoušení konstrukcí je proto třeba vždy zahájit experiment ověřením materiálu ve vztahu k předpokládaným hodnotám.

Modální zkouška doplněná zjištěním hmotnosti konstrukce, polohy těžiště a objemového podílu výztuže v kompozitu, se zdá být vhodnou formou takové verifikace materiálových vlastností. Je možno předpokládat, že dobrá shoda vypočtených a změřených modálních vlastností povede i k dobré shodě předpovídaných a reálných vlastností konstrukce při statickém zatěžování.

V rámci experimentu tedy logicky předchází provedení modální analýzy statickou zkouškou. Až po sesouhlasení teoretických a experimentálních výsledků bývá přistoupeno ke statické zkoušce, například ohybové, a z tohoto úhlu pohledu je pak hodnocena i konečná shoda statických měření s hodnotami z MKP výpočtu.



Obr. 2 Pozemní zkoušky prototypu kompozitní vrtule VZLÚ V36o.

Experimentální modální analýza kompozitních dílů

Letecká vrtule je při svém provozu rozkmitávána působením proměnných sil a momentů nejrůznějšího původu (aerodynamicky při neustálených režimech letu, vibracemi od motoru). Vzhledem k poměrně vysokým frekvencím a relativně malým amplitudám výkmitů se důsledky těchto vynucených vibrací projevují coby pozvolná degradace konstrukčního materiálu s možným postupným vznikem trhlin, neboť počet kmitů, které vrtule akumuluje během svého života, je obrovský. Hrozba se týká součástí vyrobených z kovových materiálů (zejména hliníkových slitin – vrtulové náboje, uložení listů), ovšem také kompozitní materiály podléhají únavovým procesům, třebaže obecně je odolnost kompozitů s uhlíkovou výztuží vůči cyklickému zatěžování hodnocena jako vynikající.

Letecká vrtule je hřídelový lopatkový stroj a tedy obdobně jako na turbínách zde může při nevhodném tuhostním návrhu konstrukce celého rotujícího systému docházet k rezonančním jevům (tzv. kritické otáčky). To pak amplitudy výkmitů a jim odpovídající napětí v materiálu prudce vzrůstají a k odčerpání životnosti dochází po velmi krátké době. Prověrka dynamických vlastností vrtule v soustavě pohonné jednotky je tudíž nezbytnou součástí návrhu a vývoje vlastní vrtule.

Dynamickou charakteristiku letecké vrtule nejvíce ovlivňují její listy, což jsou ve své podstatě štíhlé nosníky charakteristické relativně malou tuhostí. Navíc přímo na ně působí rozmanité zdroje periodického buzení, které mají svůj původ v aerodyna-

mických a setrvačných silách a jejichž typické „vrtulové“ frekvence (nejčastěji přímo úměrné – harmonické – otáčkám vrtule) se snadno mohou v rozsahu provozních otáček přiblížit vlastním frekvencím vrtulového listu.

Obvykle postačuje znát prvních pět vlastních frekvencí, ostatní jsou již dostatečně vysoké a nevyvolávají nebezpečí rezonance. Tvary, též módy (odtud pojem modální analýza), vlastního kmitání vrtulového listu odpovídají jednotlivým tvarům ohybového a torzního kmitání obecného nosníku, který je charakterizován po délce proměnným průřezem, relativním natočením hlavních os setrvačnosti sousedních řezů a také převážně v prostoru zakřivenou spojnici těžišť řezů, odlehlou od osy natáčení listu.

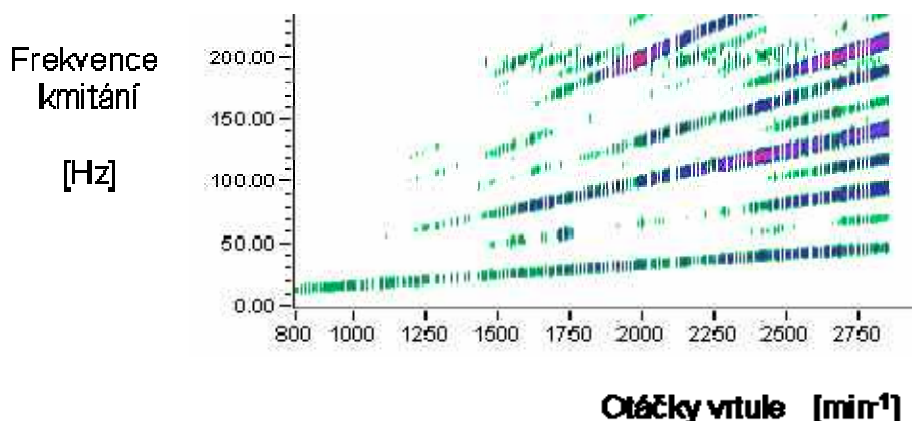
Vzhledem k tvaru řezu v podobě typického leteckého profilu, který je charakteristický výrazně rozdílnými hodnotami hlavních momentů setrvačnosti, je možné popisovat jednotlivé typy ohybového kmitání odděleně jako kmitání (s převládající složkou) v rovině maximální nebo minimální tuhosti, ač vlivem nakroucení listu je ohybové kmitání vždy do určité míry vázané. Vlastní frekvence vrtulových listů se určují výpočtově nebo v případě již vyrobeného listu měřením.

Jednotlivé listy jsou ovšem ve vrtulové hlavě uloženy s určitou poddajností, a to zejména torzní, neboť v mechanismu natáčení jsou přítomny nezbytné vůle. Vrtule je pak připevněna k reduktoru a k pružně uloženému motoru. Frekvenční charakteristika celé vrtule je tudíž ovlivněna dynamickou vazbou mezi jednotlivými celky, která závisí na typu (tvaru) kmitání, hmotnostních a tuhostních charakteristikách připojených konstrukčních celků včetně způsobu zavěšení motoru. Výsledný pohyb při kmitání listů je pak řízen budícím pohybem vrtulové hlavy (resp. hřídele) a nebo naopak, kdy rozkmitaná vrtule namáhá motorový hřídel. Skutečné vlastní frekvence listů (a celého systému) mohou být jak mírně vyšší, tak nižší, než jsou frekvence izolovaných listů a dokonce může být odlišný i jejich počet.

Podrobnější analýza a predikce možných rezonančních pásem celé vrtulové jednotky se tak stále musí opírat o rozsáhlé experimentálně určené vstupní charakteristiky. Nejvěrnější obraz skutečných dynamických poměrů pak vyplývá z výsledků rozsáhlého (a samozřejmě nákladného) proměření celé vrtule při provozu na letounu při nejrozumnějších režimech.

Základní (teoretická) predikce možných kritických otáček vrtule z hlediska vzniku rezonancí se uskutečňuje pomocí tzv. rezonančního, též Campbellova diagramu. Základem jsou naměřené, resp. vypočítané hodnoty vlastních frekvencí listů za klidu. Vliv odstředivé síly, která list pomyslně napíná, ztužuje a způsobuje mírný nárůst frekvencí vlastních kmitů za rotace, se zahrnuje pomocí tzv. Southwellových koeficientů. Typické síly působící na vrtulový list (a budí jeho kmitání) jsou obvykle úměrné otáčkám (např. výkmit listu během jedné otáčky vrtule). V diagramu jsou tedy tyto a jejich vyšší harmonické frekvence znázorněny jako přímky vycházející z počátečního bodu. Jejich průsečíky s křivkami vlastních frekvencí pak pro dané otáčky vrtule naznačují možné nebezpečí rezonančního zesílení kmitání (závisí na podstatě buzení a příslušném tvaru módu vlastního kmitání).

Takový případ by samozřejmě v rozsahu běžných provozních (letových) otáček neměl nastat, jinak je nutno provádět nejrůznější konstrukční úpravy spočívající ve zvýšení tuhosti listu a jeho uložení (tzv. přeladění systému). Příklad experimentálně naměřeného Campbellova diagramu je na Obr. 3 – rezonanční zesílení jednotlivých složek kmitání jsou vyjádřena změnou barvy bodů směrem k červené škále.

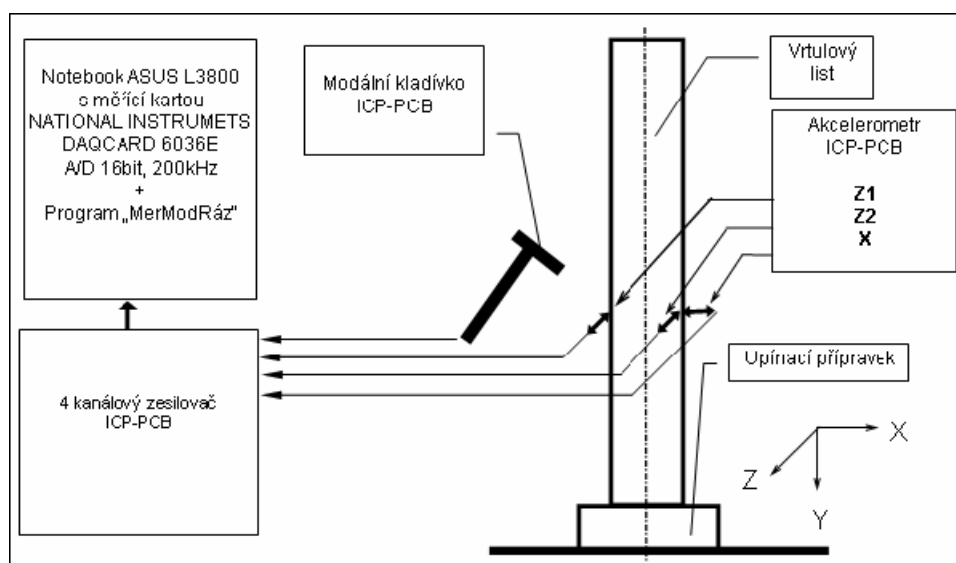


Obr. 3 Příklad experimentální analýzy vibrací ve formě Campbellova diagramu

Rázová modální zkouška

Určování frekvenčních vlastností vrtulových listů experimentálními postupy je na útvaru Letecké vrtule považováno za standardní součást vývoje a také běžnou kontrolní metodu ověření kvality nově vyráběných kompozitních listů.

Základním pilířem je rázová zkouška pevně vetknutého listu, kdy rozkmitání listu vybuze krátkým impulsem (úderem) je snímáno pomocí snímačů zrychlení - akcelerometrů podle Obr.4 a následně vyhodnoceno matematickým postupem známým jako rychlá Fourierova transformace, neboli FFT analýza.



Obr. 4 Principiální schema modální zkoušky rázem

Pro potřeby zkoušky je hardwarové vybavení složeno z 4-kanálového kompletu ICP - PCB spolu s modálním kladívkem vybaveným snímačem rázu. Naměřená data ze zkoušky jsou zpracována vlastním programem „MerModRáz“, vyvinutým v grafickém programovém prostředí LabVIEW. Program implementuje zmíněné hardwarové možnosti (vstup signálů ze 3 akcelerometrů a snímače rázu). Dále umožňuje analýzu z více měření (eliminace náhodných rušivých jevů) a současně připravuje vstupní data pro eventuální další zpracování, například pomocí software MODENT od firmy ICATS.

Modální zkouška s tenzometry

Zjišťování frekvencí vlastních tvarů kmitání statických dílů je už v technické praxi relativně dobře zvládnutou disciplínou. Stejnou úlohu je třeba řešit i pro rotory, u kterých se ale situace komplikuje v důsledku problematického přenosu signálu z rotoru na statorovou část. Zejména pokud se zajímáme o vibrace konkrétní rotorové části, například listů vrtule nebo lopatek ventilátoru či kompresoru, musíme snímač umístit přímo na kmitající díl, nebo podsestavu v rotoru a signál předat buď přes kontaktní kroužky nebo prostřednictvím bezkontaktního přenosu ke zpracování.



Obr. 5 Modální analýza vrtule na malém sportovním letounu s bezkontaktním přenosem signálu z tenzometrů na listech

Počet kanálů pro přenos signálu, ať už kontaktní či bezkontaktní technologií, je vždy omezen a proto je třeba jimi šetřit. I tak se často nevyhneme přepojování a využívání referenčních snímačů, vůči kterým musíme vztahovat data naměřená při různých bězích a konfiguracích zapojení.

Nepřímá měření, například pomocí akcelerometrů umístěných na ložisku nebo skříni pohonu, mohou být zatížena vlivy, o nichž nedokážeme s určitostí říci, jakého jsou původu. Tenzometr nalepený na listu či lopatce sice také negarantuje bezproblémové vyhodnocení signálu, ale zpravidla můžeme s velkou jistotou označit zaznamenaný signál za průmět reálně probíhajících jevů v místě měření.



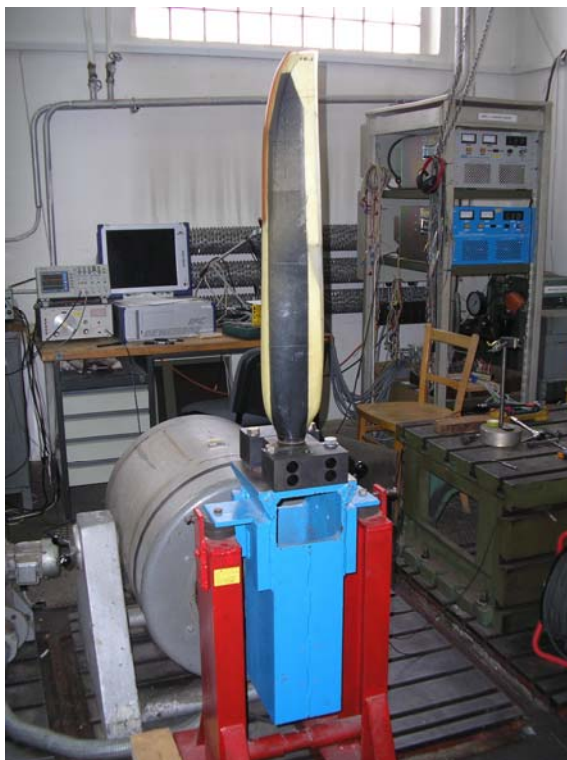
Obr. 6 Detail instalace přenosové aparatury na vrtulové hlavě

Součástí aktuálně řešeného Výzkumného záměru je vytváření nových metodik práce, které povedou ke spolehlivému zvládnutí problematiky zkoušení kompozitních konstrukcí rotorů. Zároveň je jedním z cílů zapojení mladých talentovaných vědeckých pracovníků a studentů z vysokých škol. Proto byla navázána spolupráce s ČVUT - FS, Ústav automobilů, kolejových vozidel a letadlové techniky. Studenti doktorského studia se zúčastnili ve dvou skupinách přípravy i samotné realizace experimentů v průběhu roku 2007.

Pro účely experimentu byly vybrány kompozitní vrtulové listy, ke kterým jsou k dispozici všechny potřebné materiálové a konstrukční podklady, včetně MKP výpočtů.

Běžným postupem řešitelského pracoviště v minulosti, bylo provedení modální zkoušky listu s velkým počtem tenzometrů instalovaných v místech, kde bylo z praxe možno očekávat dostatečný signál pro následnou analýzu. Z výsledků byly určeny nejvhodnější tenzometry pro měření za rotace při jejich minimálním nutném počtu, právě z důvodu omezeného počtu přenosových kanálů a také kvůli minimalizaci nutného narušení aerodynamiky přítomností tenzometrů a jejich svody. Výběr vhodných míst byl samozřejmě také podpořen výpočty, včetně MKP, nicméně to byl postup vždy velmi nákladný a zdlouhavý.

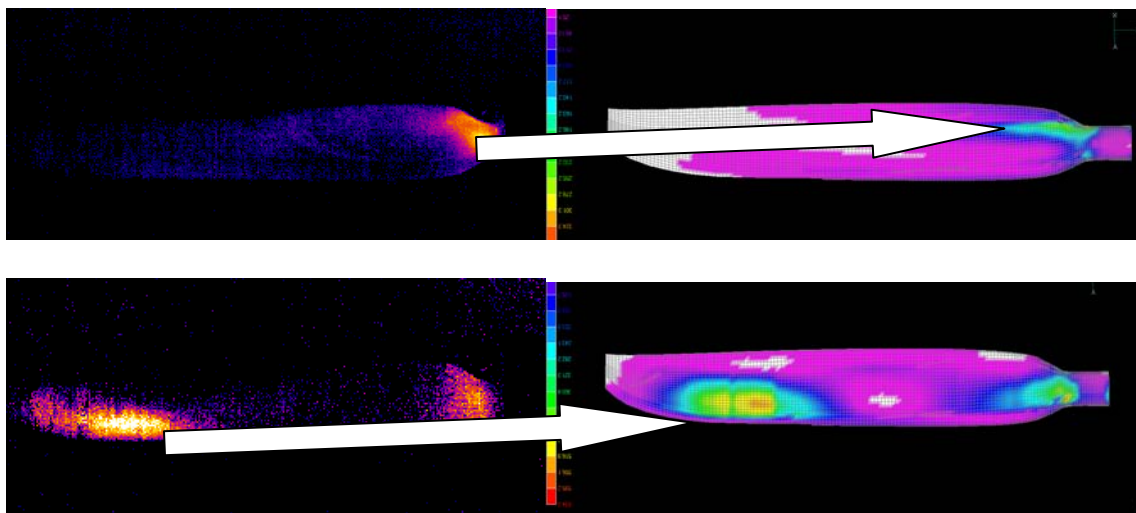
V současnosti byl navržen inovovaný postup, jehož základní myšlenkou je využití již osvědčené metody identifikace vlastních tvarů kmitání kompozitního vrtulového listu s využitím termovizní kamery a MKP. Součástí běžného postprocesingu modálních výpočtů v MKP je i vizualizace distribuce deformační energie po ploše modelu. Je možno extrahovat i příspěvky k této energii od jednotlivých složek namáhání, takže je také teoreticky možno vytipovat místa na vrtulovém listu, ve kterých je signál při všech zajímavých tvarech kmitání (zpravidla prvních 5 až 6 vlastních tvarů) a zároveň jde o příspěvek stále ve stejném směru, např. složka deformace ve směru vláken.



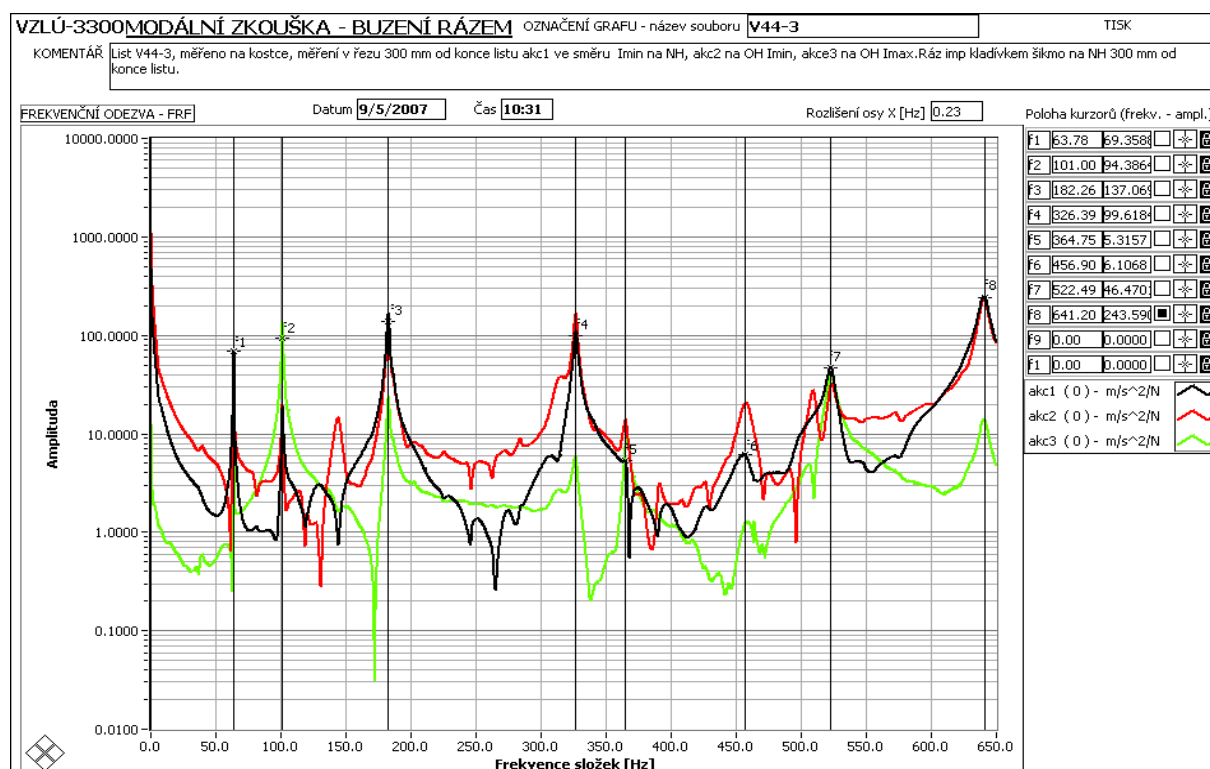
Obr. 7 Kompozitní list upnutý na vibrační stoličce pro modální analýzu

List intenzivně kmitající na rezonanční frekvenci proměňuje absorbovanou energii v teplo, které je rozpoznatelné na termovizních snímcích. Tyto snímky jsou dobře porovnatelné s distribucí deformační energie po ploše výpočtového MKP modelu pro stejný tvar kmitání. Místa s největšími poměrnými deformacemi bývají zároveň „nejteplejšími“ oblastmi na termogramech. Z MKP výpočtu tedy byla vybrána vhodná místa pro nalepení jednoduchých tenzometrů tak, aby bylo s jejich pomocí možno podchytit všechny požadované vlastní tvary kmitání. Tato místa byla následně ověřena na reálném listu s použitím termovizní kamery. Příklady viz Obr. 8.

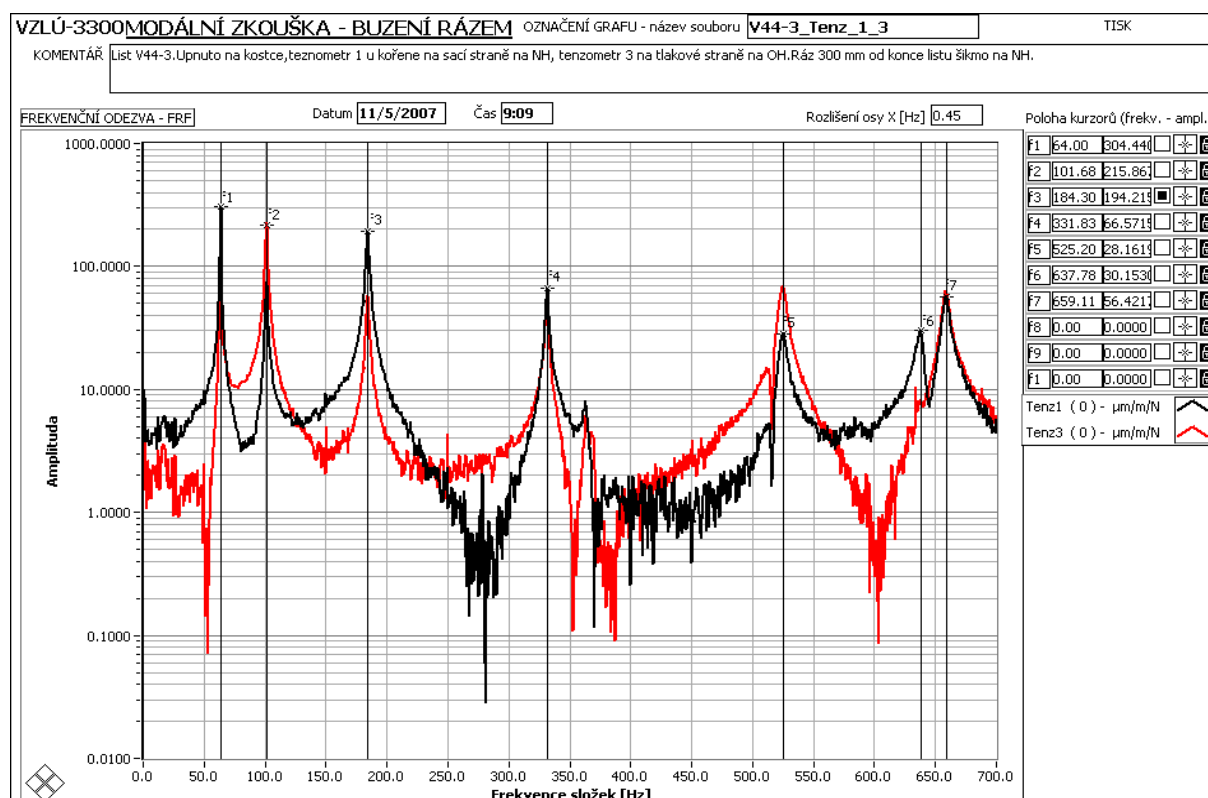
Na Obr. 9 a 10 je porovnání experimentálních výsledků modální analýzy provedené na listu klasickým postupem, pomocí tříosého akcelerometru, oproti vyhodnocení signálu ze dvou optimálně umístěných tenzometrů.



Obr. 8 Příklad porovnání výsledků z termovize versus MKP

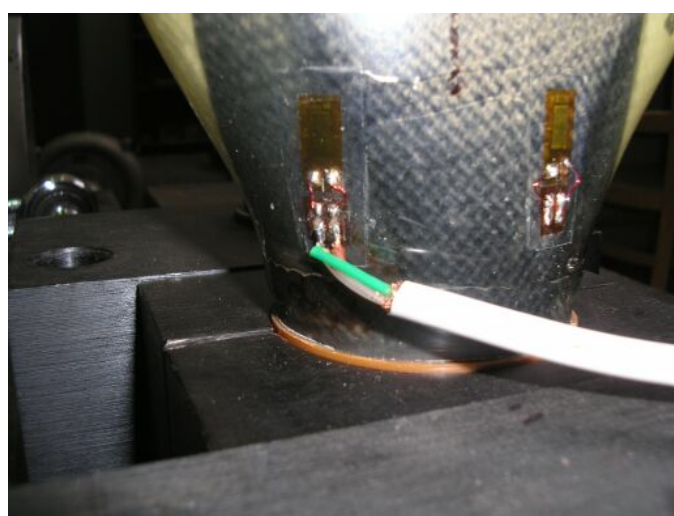


Obr.9 Výsledky z měření klasickými snímači zrychlení



Obr. 10 Výsledky pořízené z analýzy signálu dvou tenzometrů v optimální pozici

Z provedených měření plyne zajímavé srovnání experimentálních výsledků, které mohou být přiřazeny k výsledkům teoretickým (MKP). Cílem experimentu v tomto případě ale nebylo řešit soulad teoretických a experimentálně zjištěných vlastních frekvencí. Záměrem bylo vybrat vhodná místa k nalepení jednoduchých (jednosých) tenzometrů, které příliš neovlivní aerodynamickou kvalitu vrtule a budou postačovat v minimálním počtu.



Obr. 11 Každý z dvojice tenzometrů je schopný zachytit všechny zajímavé vlastní tvary kmitání kompozitního listu

Statické zkoušky kompozitních dílů

Po sesouhlasení teoretických a experimentálních výsledků z modální analýzy listů (lopatek) bývá přistoupeno k statickým zkouškám. Jejich výsledky jsou pak hodnoceny i s ohledem na dříve dosažený soulad v modální analýze.

Statická ohybová zkouška

V běžných provozních podmínkách nejsou listy vrtule nikdy zatěžovány čistým ohybem. Teoreticky by mohlo k tomuto případu zatížení dojít například při tažení letounu z hangáru za vrtuli, což je ale nepřipustné a svědčilo by to o diletantském přístupu obsluhy.

Podobný případ může nastat ale u rotorů větrných turbín, které jsou zaparkovány při nepříznivém počasí. Nápor větru o velké síle může působit velmi nepříznivě na odlomení listů rotoru bez pozitivního vlivu rotace, která snižuje nebo zcela eliminuje pro kompozity nevýhodné tlakové namáhání od ohybu.

Přesto je statická ohybová zkouška standardní součástí vývojových zkoušek kompozitních vrtulí VZLÚ. Je totiž možno ji simulovat v MKP a na základě souladu teoretických a experimentálních výsledků usuzovat i na soulad výpočtů napětově deformačních stavů na provozních režimech s realitou, jinak velmi obtížně měřitelnou za letových podmínek.



Obr. 12 Kompozitní list vrtule v okamžiku zlomu

Při samotné zkoušce ohybové pevnosti jsou listy zatěžovány ohybem přes sací stranu, který odpovídá směru působení výsledné tahové složky při tažení letounu za list vrtule, což je za jiných okolností nežádoucí způsob zatěžování. Hodnota úhlu nastavení listu je zvolena jako největší provozní. Tento způsob zatěžování vede

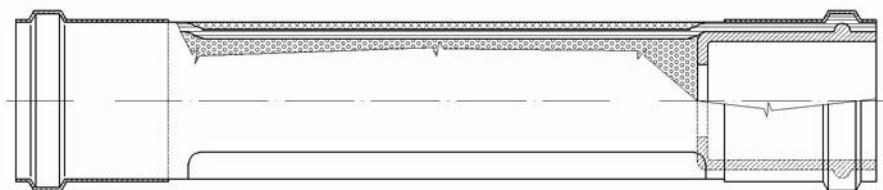
k zahrnutí vlivu vlastností listu v obou hlavních rovinách (sací tlaková strana a náběžná odtoková hrana).

Zkouška je principiálně provedena s řízenou deformací, kde silový účinek je veličinou závislou. Sledovány jsou zejména oblasti první ztráty stability a jejich rozvoj při narůstajícím zatížení.

Zkouška vytržení kořenové části listu

Zkušební tělesa typu "dvoukořen", jsou speciální zkušební tělesa, která slouží k modelování kořenových částí vrtulových (nebo obecně rotorových) listů za účelem prokázání jejich skutečné versus požadované únosnosti. Na kořenovou část listu nejmohutněji působí osová síla, která představuje vliv hmoty listu za rotace (odstředivé síly).

Dvoukořeny jsou vyrobeny v reálné velikosti (full-scale) a s použitím stejných materiálů a výrobních technologií jako odpovídající část skutečného listu. Vzniká tak válcové těleso, na jehož každém konci se nachází příslušný konstrukční uzel, pomocí kterého je list uložen v rotorovém náboji. Příklad provedení dvoukořenů pro pevnostní zkoušky je na Obr. 13.



Obr. 13 Zkušební vzorek dvoukořenu určený pro pevnostní zkoušky

Dvoukořeny mohou být trhány buď ve speciálních přípravcích, nebo přímo z vrtulové hlavy. Druhý případ poněkud lépe vystihuje skutečné poměry v místě uložení, ale ne vždy je proveditelný.

Příklad zkoušky vrtule pro malý sportovní letoun je na Obr. 14. Do dvoudílné duralové hlavy jsou vkládány celokompozitní listy vybavené tvarovým zámkem. Primárně je zatížení přenášeno třením mezi listy (v tomto případě nahrazenými dvoukořeny) a stěnami hlavy. Postupně, s nárůstem zatížení, se stále větší měrou do přenosu zapojuje i tvarový zámek. Zkouška končí jeho destrukcí a vytažením listu.

V tomto případě je třecí spoj navržen tak, že přenáší více jak 100% maximálních provozních odstředivých sil a i po porušení tvarového zámků zůstává tato pasivní hodnota proti vytažení zachována.



Obr. 14 Reálná sestava vrtulové hlavy pro zkoušku vytržení

Další příklady dvoukořenů s rozdílným provedením tvarových zámků jsou na Obr. 15 a 16.



Obr. 15 Dvoukořeny pro různá provedení tvarových zámků

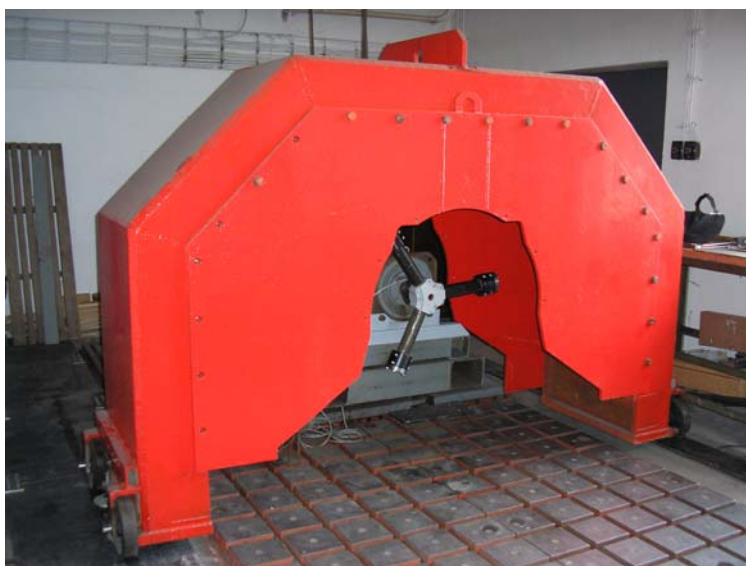


Obr. 16 Dvoukořen se systémem upínacích přípravků

Zkouška kořene přetížením za rotace

Tato zkouška plyne přímo z požadavků většiny stavebních předpisů pro vrtule. Nový typ se musí podrobit zkoušce přetížení náboje a kořenových částí listu zatížením odpovídajícím dvojnásobku hodnoty odstředivé síly maximálních povolených otáček. Zatížení obvykle musí působit po dobu minimálně 1 hodiny. Připouští se statické zatížení nebo zatížení přetočením na 1,41 násobek maximálních povolených otáček vrtule.

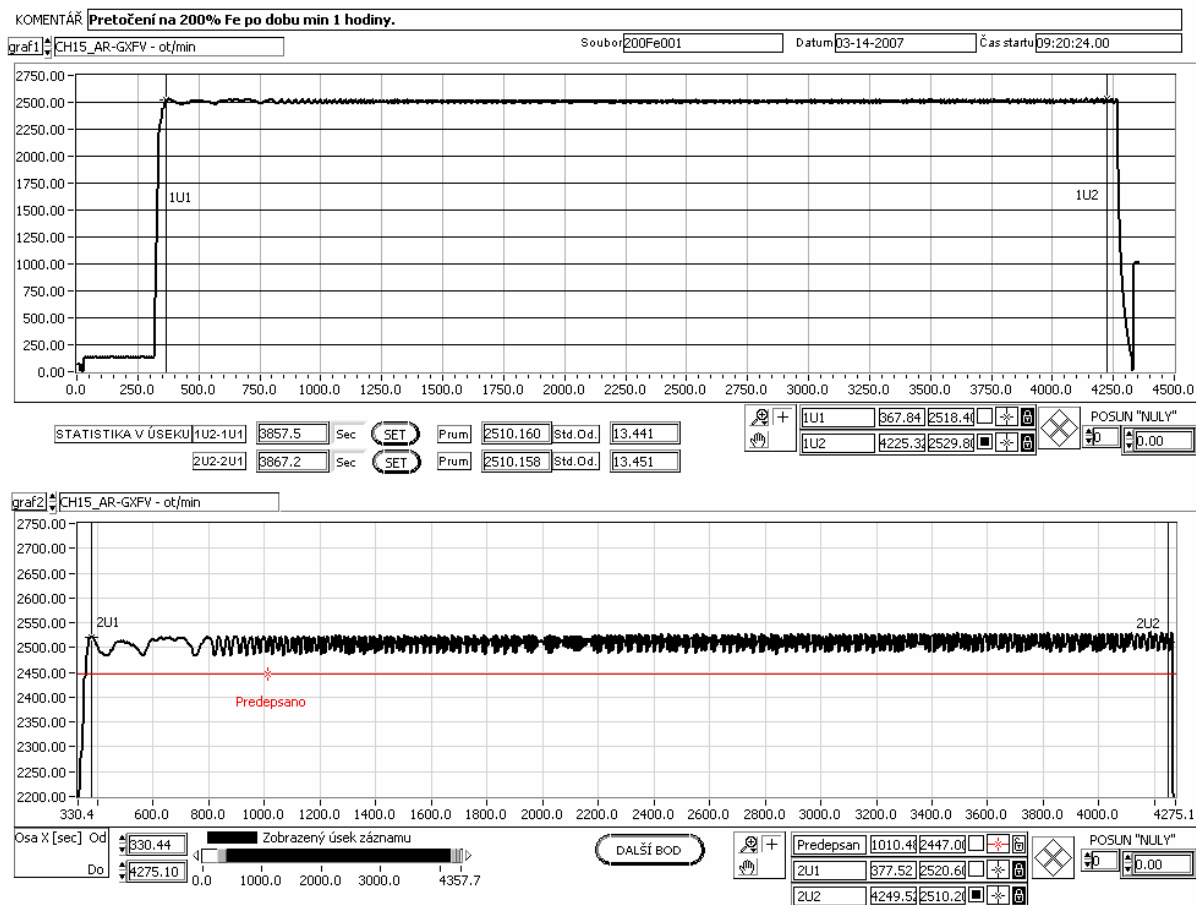
Dle znění předpisu je hlavním záměrem zkoušky prokázat odolnost proti staticky působící čistě odstředivé síle. Během zkoušky nesmí vzniknout žádné trvalé deformace na exponovaných dílech, které jsou předmětem zkoušky.



Obr. 17 Přetáčecí zařízení VZLÚ včetně zkoušené sestavy

V průběhu zkoušky jsou monitorovány zejména otáčky, měřené snímačem otáček a pro kontrolu stavu celého zařízení rovněž vibrace v těsné blízkosti ložiska hřídele motoru pomocí akcelerometru. Tyto měřené údaje jsou zaváděny do ústředny na bázi PC typu Dewetron.

V programovém prostředí LabVIEW je vypracována účelová aplikace, která umožňuje měřené parametry obsluhou snadno sledovat a ukládat časový záznam dat. Kromě aktuálních otáček s kontrolním přepočtem na zatížení kořenové části odstředivou silou, jsou přehledně monitorovány i vibrace včetně frekvenční analýzy.



Obr. 18 Příklad časového záznamu z průběhu otáček během zkoušky

Závěr

Příspěvek popisuje několik základních tematických okruhů zkoušek kompozitních dílů prováděných na Zkušebně leteckých vrtulí VZLÚ. Jedná se o velmi rozsáhlou činnost, jejímž konečným cílem je metodické zvládnutí pevnostních a tuhostních výpočtů a měření na kompozitních rotorech.

Příspěvek byl zpracován za využití finančních prostředků Výzkumného záměru MSM0001066904 „Výzkum chování kompozitních materiálů v primární konstrukci zařízení s rotujícími nosnými plochami“.

Měření základních charakteristik epoxidové matrice

Ing. Vilém Pompe, Ph.D., Ing. Matěj Hraška

V předloženém příspěvku je diskutována důležitost experimentálního ověřování vlastností jednotlivých konstituentů použitých pro výrobu konstrukcí z vláknových kompozitů. V tomto případě jde o zjištění základních mechanických vlastností epoxidové matrice používané při infuzních procesech jako jsou RTM, VARTM a podobné technologie zpracování kompozitů.

Úvod

Znalost spolehlivých materiálových charakteristik je základem pro úspěšný návrh nového výrobku. V případě kompozitních materiálů ale pracujeme se směsí, jejíž vlastnosti jsou účelově navrhovány, zpravidla vždy znovu pro každou novou aplikaci. Pokud bychom se vždy chtěli spolehnout pouze na výsledky materiálových zkoušek a to ještě pokud možno kvalitní z hlediska požadavků statistiky, mohly by související finanční a časové nároky na jejich pořízení překročit mez únosnosti.

V první fázi návrhu proto běžně nahrazujeme měřené materiálové charakteristiky ortotropní vrstvy vlastnostmi spočtenými, či kvalifikovaně odhadnutými. Až teprve v pozdějších etapách, kdy již máme dobrou představu o skladbě kompozitu budoucího výrobku, nebo potřebujeme zásadním způsobem zpřesnit prováděné výpočty, přikročíme k odzkoušení všech použitých materiálových kombinací v závislosti na technologii zpracování a, je-li třeba, i v závislosti na vlivu prostředí.

Očekávané úspory času a finančních prostředků ale dosáhneme pouze v případě, že rozdíl mezi teoreticky a experimentálně stanovenými charakteristikami je přijatelný. V praxi je používána celá řada výpočetních vztahů, především pro stanovení některých modulů a Poissonových čísel, méně už pro výpočet, respektive odhad pevností laminy (monovrstvy).

Pro potřeby řešitelského pracoviště bylo postupně k stanovení modulů a Poissonových čísel odzkoušeno několik výpočetních postupů, včetně metody konečných prvků. Výsledky pro stejné charakteristiky (konstanty) se navzájem lišily až v řádu kolem 100 % v závislosti na objemovém podílu výztuže. Žádný z použitých vztahů nedával dobrou shodu teoretického výsledku s experimentálními hodnotami pro směry zatěžování monovrstvy, ve kterých dominují vlastnosti matrice a rozhraní vlákno/matrice.

Dalším sledovaným tématickým okruhem je problematika kritérií poruchy laminy, včetně modelování struktury kompozitu v metodě konečných prvků. Výpočty je opět

třeba podložit experimentálními daty, včetně odhadu změn vlastností matrice, které je třeba odhadovat pro malé objemy mezi vlákny.

V průběhu prací byly postupně zjišťovány rozdíly ve výsledcích z teorie a zkoušek, které bylo možno vysvětlit pouze zpochybněním údajů uváděných v materiálových listech výrobců konstituentů. Zároveň vznikla otázka vlivu způsobu tepelného zpracování použité epoxidové matrice na změny jejího modulu pružnosti a Poissonova čísla.

Práce na ověření základních materiálových charakteristik matrice byly rozděleny na dva postupné kroky:

- 1) Určení vlivu tvaru zkušební tělesa
- 2) Určení vlivu tepelného zpracování na způsob porušení tělesa a samotné měřené charakteristiky

Geometrie zkušební tělesa

Tvar zkušební tělesa a jeho upnutí mají vždy určitý vliv na výsledky materiálových zkoušek. V okolí upínacích čelistí vznikají napěťové špičky, které ovlivňují polohu lomu na tělese a naměřené maximum pevnosti.

Ideální tvar tělesa ale nemůže být navrhován například bez ohledu na podmínky konkrétního dostupného zkušební zařízení a technologické souvislosti s přípravou polotovarů, ze kterých jsou tělesa řezána.

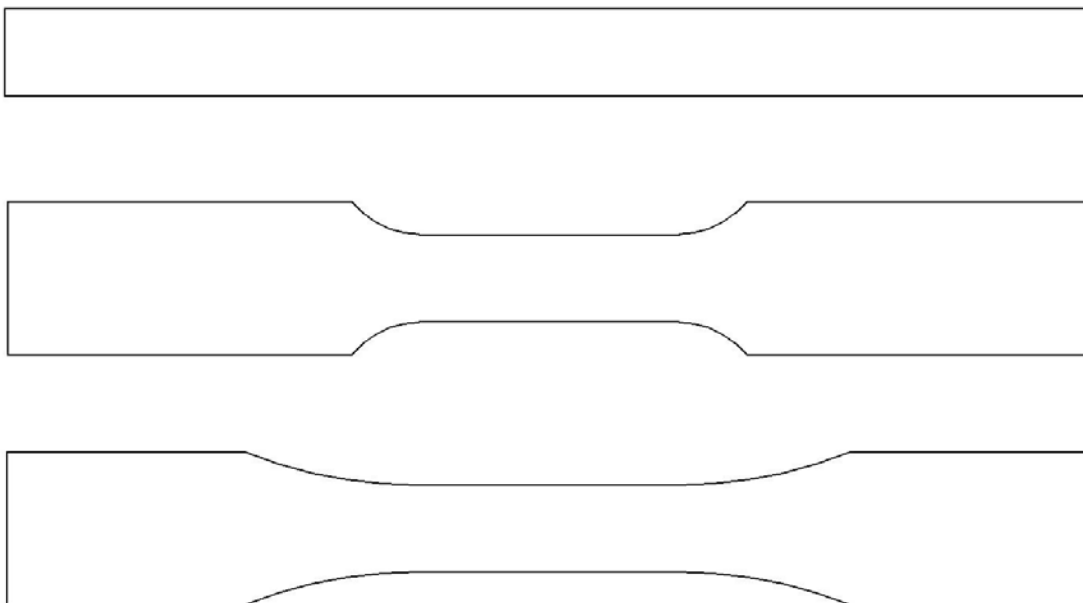
Nabízí se tedy možnost propočítat například v MKP opravné koeficienty pro několik tvarů zkušebních těles, provést zkoušky a z porovnání výsledků ověřit, zda teoreticky stanovené opravné konstanty odpovídají rozdílům výsledků ze zkoušek.

Bohužel v případě epoxidové matrice nemůžeme spoléhat na lineárně elastické chování, které by podobné výpočty usnadnilo. Výpočty provedené vzhledem k nelineárnímu materiálu také nelze zajistit, protože je k nim třeba dodat spolehlivou pracovní charakteristiku, která ještě není k dispozici.

Aby bylo dosaženo alespoň minimálního pokroku ve vytváření názoru na vliv geometrie zkušebních těles, byly zvoleny tři v podstatě extrémní případy:

- 1) Čistě obdélníkové těleso v půdorysném tvaru; je možno předpokládat, že se na tomto případě nejvíce projeví skok v tuhosti mezi pracovní částí tělesa a blokem tvořeným plochou pro upnutí, sevřenou v řádově tužších čelistech trhačího stroje.
- 2) Zkušební tyč s rozšířenou upínací plochou a ostrým radiem v přechodové oblasti do pracovní části tělesa; ostrý radius vede opět ke zvýšené koncentraci napětí, ale umožňuje potenciálně zkrátit potřebnou délku polotovaru a potažmo i velikost tělesa.
- 3) Zkušební tyč s rozšířenou upínací plochou a velkým radiem v přechodové oblasti do pracovní části tělesa; minimální vliv koncentrace napětí, maximální nároky na velikost polotovaru.

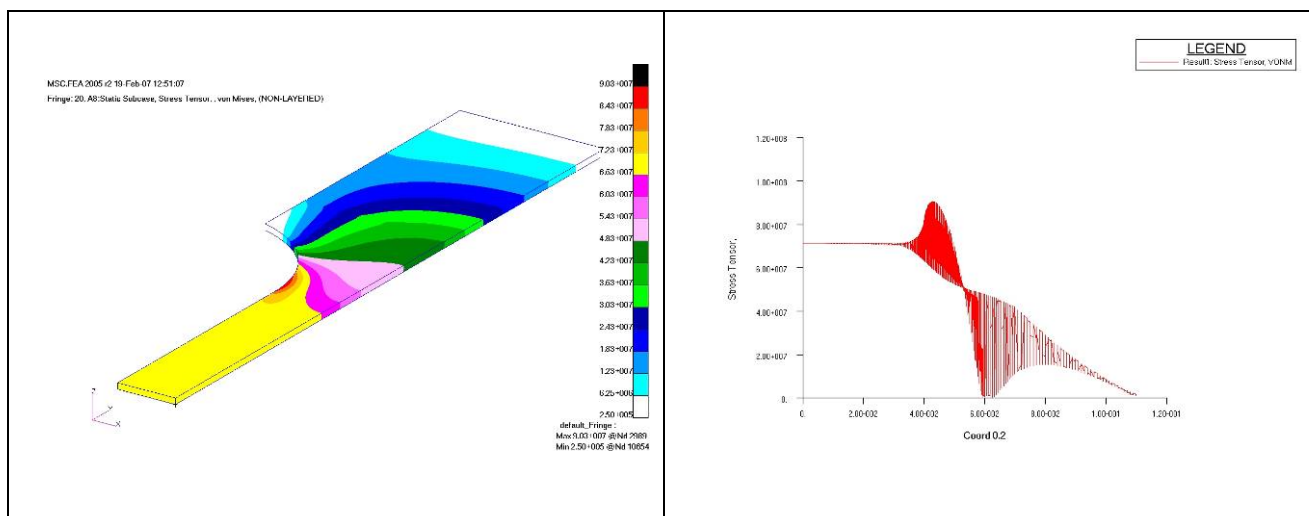
Pro zabezpečení lepší porovnatelnosti experimentálních výsledků byla zvolena shodná celková délka a šířka zkušebních tyčí a v případě dvou těles s radii i shodná délka pracovní části.



Obr. 1 Základní navržené tvary zkušební tyče epoxidové matrice.

MKP výpočet

Výpočtové modely pro metodu konečných prvků byly vytvořeny a analyzovány pomocí programu MSC.FEA 2005 r2. Reprezentují jednu osminu objemu zkušebního tělesa, příklad jednoho modelu a výpočtu je uveden na Obr. 2.



Obr. 2 Příklad výpočtu na zkušebním tělese. V pravé části obrázku je typický průběh napětí v přechodové oblasti

Z provedených analýz byly stanoveny poměry špičkového a nominálního napětí

$$k = \frac{\sigma_{PEAK}}{\sigma_{NOMINAL}}$$

platné za předpokladu lineárně elastického chování matrice. Pro následující experiment byly vybrány vzorky s rádiusem přechodové oblasti odpovídajícím poměru $k = 1,05$ a $k = 1,27$.

Sice není možno očekávat, že matrice zatěžovaná do lomu poskytne výsledky pevnosti v poměru těchto čísel, ale přínosem by bylo již osvětlení problematiky regulérní polohy lomu tyče. Z výpočtů totiž plyne, že v případě ideálně dodržného tvaru a homogenity materiálu, by měly regulérní lomy nastávat vždy v přechodové oblasti u tyčí s rozšířenou upínací plochou a v okolí čelistí u čistě obdélníkového tvaru. Zpravidla ale považujeme za korektní lomy v okolí středu pracovní části.

Příprava zkušebních těles

Tvar použitých zkušebních těles je patrný z Obr. 1. Pro výrobu byly připraveny desky, které po příslušném tepelném zpracování byly nařezány vodním paprskem.

Zkoumaná epoxidová matrice může být tepelně zpracována mnoha způsoby, přičemž teplota a čas dotvrzení mají bezprostřední vliv na dosažený modul pružnosti, pevnost a teplotu skelného přechodu.

Základním způsobem vytvrzení zvolené epoxidové matrice je ponechání díla na teplotě okolí po dobu 48 hodin. Výrobce uvádí, že v takovém případě dosáhne teplota skelného přechodu T_G intervalu 52 až 55°C a dále mírně roste. Po sedmi dnech má tahová pevnost dosáhnout 49 až 71 MPa a modul pružnosti rozpětí 3350 až 3550 MPa.

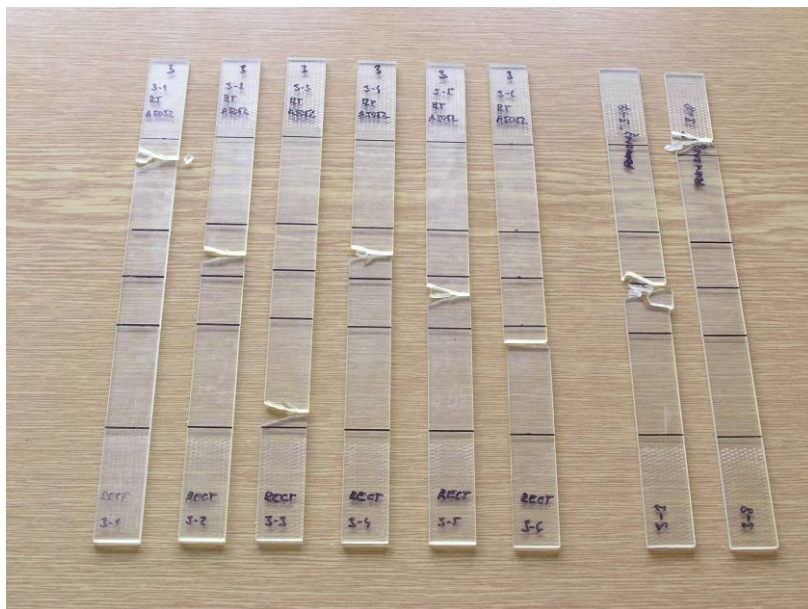
Tepelným zpracováním matrice po dobu 15 hodin na 50°C, kterému ale nejprve předcházelo základní vytvrzení 24 hodin na teplotě okolí, lze údajně dosáhnout teploty T_G v rozpětí 82 až 88°C, pevnosti v tahu 82 až 86 MPa a modulu pružnosti 3450 až 3650 MPa.

Pro zde uvedené způsoby tepelného zpracování a zároveň řadu dalších dle doporučení výrobce matrice, je materiálovým listem uvedena jen jediná hodnota Poissonova čísla rovná 0,35.

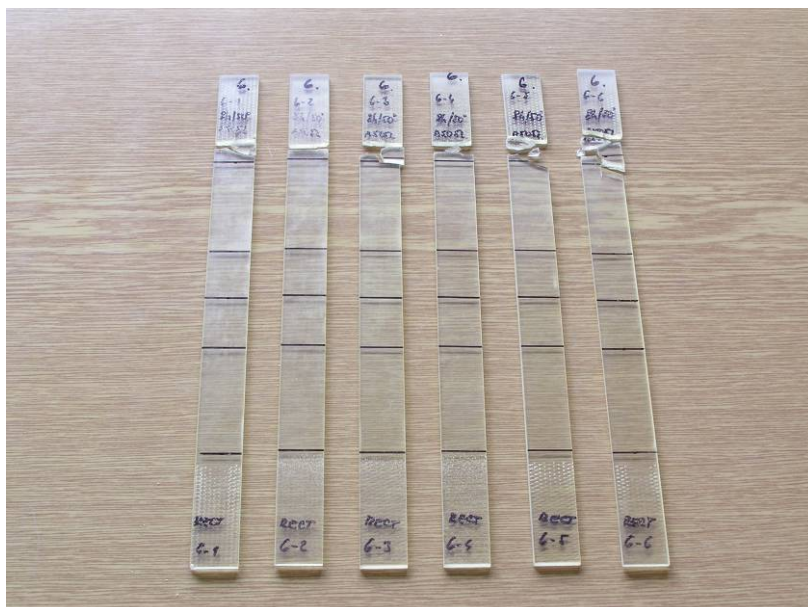
Celkem byly připraveny dvě sady zkušebních těles od každého tvaru po 6 kusech. Z toho vždy jedna sada byla podrobena tepelnému zpracování 18 hodin na 50° C (delší časový úsek souvisí s provozními podmínkami pracoviště) a sada druhá byla ponechána na teplotě okolí, v průměru déle než jeden měsíc.

Výsledky zkoušek

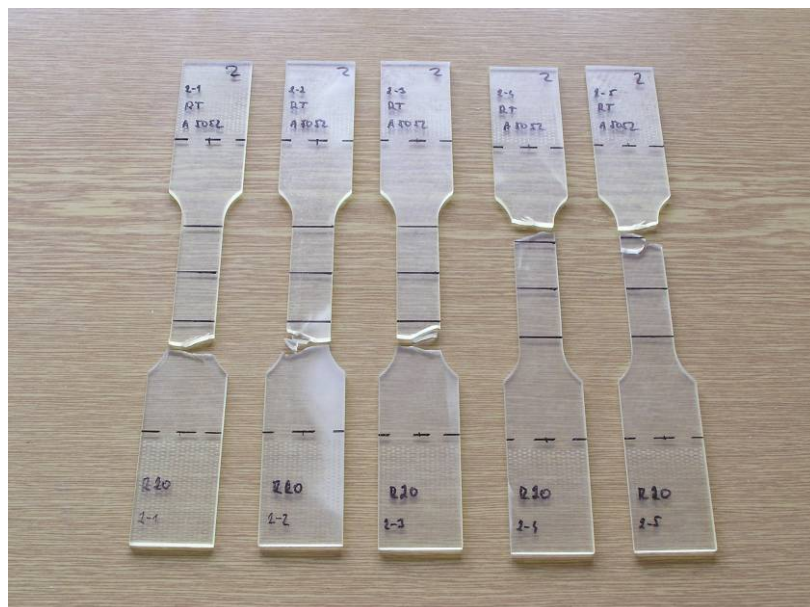
V následující části je uvedena sada obrázků dokumentující způsob porušení těles, vždy v pořadí nedotvrzené a dotvrzené od jednoho základního tvaru. Je možno vypožorovat, že tepelné zpracování má přímý vliv na charakter lomu a jeho umístění.



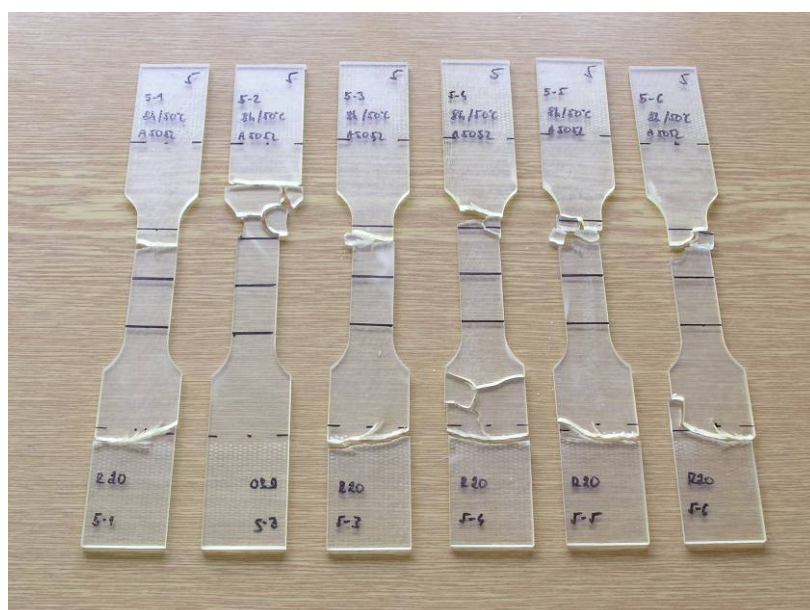
Obr. 3 Obdélníkové tyče vytvrzené jen na teplotě okolí



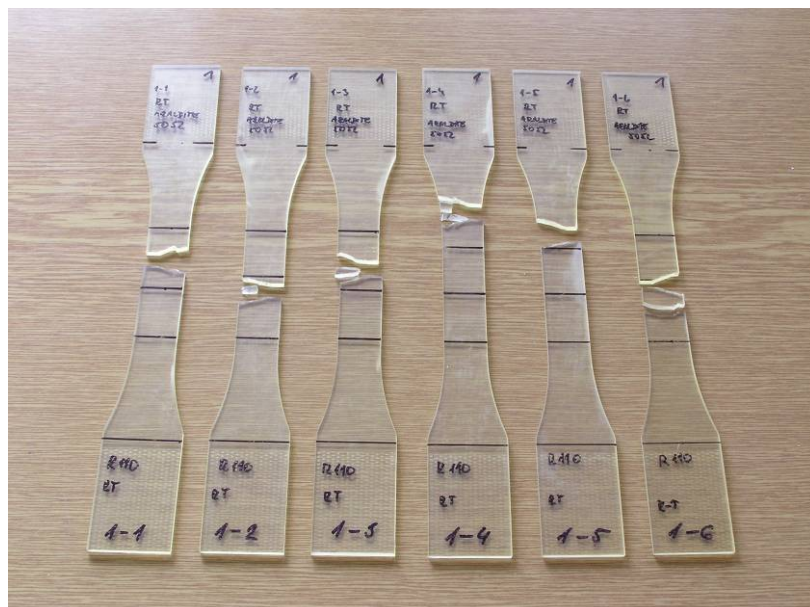
Obr. 4 Obdélníkové tyče tepelně zpracované



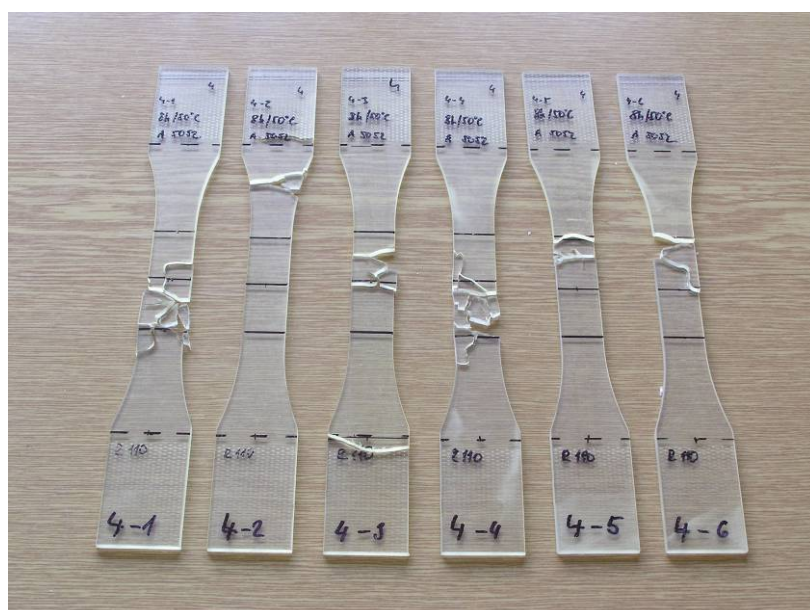
Obr. 5 Tyče s ostrým přechodem, bez tepelného zpracování



Obr. 6 Tyče s ostrým přechodem, tepelně zpracované



Obr. 7 Tyče s pozvolným přechodem, bez tepelného zpracování



Obr. 8 Tyče s pozvolným přechodem, tepelně zpracované

Naměřené hodnoty pevností, modulů a Poissonových čísel vždy odpovídají použité metodice a budou patrně poplatné i praxi konkrétního pracoviště. Pokud je ale v rámci jednoho experimentu použita vždy shodná metodika, je možno vcelku bez problémů porovnávat alespoň trendy. U absolutních čísel pak musíme pamatovat na to, zda srovnáváme svá vlastní data navzájem nebo s daty z dalšího zdroje, tedy zatížená jinými podmínkami pro jejich pořízení.

Následující dvě tabulky shrnují naměřené výsledky pro oba případy vytvrzování, přičemž data k tuhosti byla odečtena pro případ tečny k pracovní charakteristice v 0,02 % a sečny mezi 0,02 až 0,3 % posuvu. Je tedy možno odhadnout vliv nelinearity vlastností při malých zatíženích a vytvořit si vlastní představu o souladu s materiálovými podklady výrobce.

Pevnost zde uvedená je smluvní a odpovídá maximálnímu dosaženému silovému účinku vztaženému k původnímu průřezu tyče. Výsledky z měření T_G nebyly ještě v době zpracování příspěvku dostupné.

Veličina	Pozvolný rádius	Ostrý rádius	Obdélník	Údaje výrobce
Modul E [GPa] tečna 0.02 / sečna 0.02-0.3%	3,441 / 3,337	3,494 / 3,395	3,453 / 3,349	3,350 až 3,550
Rozptyl [%]	1,025 / 0,653	0,247 / 0,319	2,178 / 0,303	---
Poissonovo číslo [1] sečna 0.02-0.3%	0,420	0,400	0,426	0,35
Rozptyl [%]	3,190	1,533	1,207	---
Tahová pevnost [MPa]	56,217	50,436	45,598	49 až 71
Rozptyl [%]	5,425	5,610	24,868	---

Tab. 1 Výsledky tepelně nezpracovaných těles

Veličina	Pozvolný rádius	Ostrý rádius	Obdélník	Údaje výrobce
Modul E [GPa] tečna 0.02 / sečna 0.02-0.3%	3,226 / 3,140	3,260 / 3,177	3,422 / 3,202	3,450 až 3,650
Rozptyl [%]	0,263 / 0,387	0,529 / 0,524	9,518 / 3,375	---
Poissonovo číslo [1] sečna 0.02-0.3%	0,422	0,400	0,435	0,35
Rozptyl [%]	0,908	1,313	2,247	---
Tahová pevnost [MPa]	72,772	72,415	70,318	82 až 86
Rozptyl [%]	1,045	5,956	0,781	---

Tab. 2 Výsledky tepelně zpracovaných těles

Shrnutí

Výsledky i takto zjednodušeného experimentu mají poměrně dobrou vypovídací schopnost. Především je patrné a také se dá očekávat, že tepelným zpracováním jsou vlastnosti matrice homogenizovány. Zejména z Obr. 3 a 4 pro obdélníkový vzorek je vidět, že zatímco u nedotvrzovaných tyčí dochází k lomům rozmístěným v celé jejich délce, dotvrzené tyče praskají systematicky vedle místa upnutí, tedy dle očekávání.

Se zvětšením přechodového rádiusu rozšířených tyčí se lomy přesouvají do střední části a klesá rozptyl výsledků. Rozptyl je obecně u všech veličin velmi příznivě ovlivněn tepelným zpracováním, takže je možno konstatovat, že i když výrobce matrice inzeruje pozvolné dozrávání materiálu v čase i na teplotách okolí, nesmí být dotvrzení za zvýšených teplot podceňováno.

Měření modulu pružnosti by mělo být téměř nezávislé na přítomnosti rozšiřující upínací části tělesa. K měření dochází na bázi v jeho střední části, která je pro všechny případy shodná. Počty zkušebních kusů byly malé, takže lze akceptovat rozdíl mezi výsledky pro jednotlivé tvary jako důsledek této skutečnosti - i průměrná hodnota je jen náhodné číslo.

Přesto ale není možno pominout, že s tepelným zpracováním nedochází k deklarovanému nárůstu tuhosti, ale zcela zjevně k jejímu poklesu. Tento efekt byl vypořováván i v rámci jiných experimentů u zkoušky ohybové pevnosti stejné matrice. Zvýšení ohybového modulu pružnosti na hodnotu odpovídající stavu před tepelným zpracováním bylo dosaženo až vmísením uhlíkových nanočástic a vhodnou přípravou před samotným procesem vytvrzování.

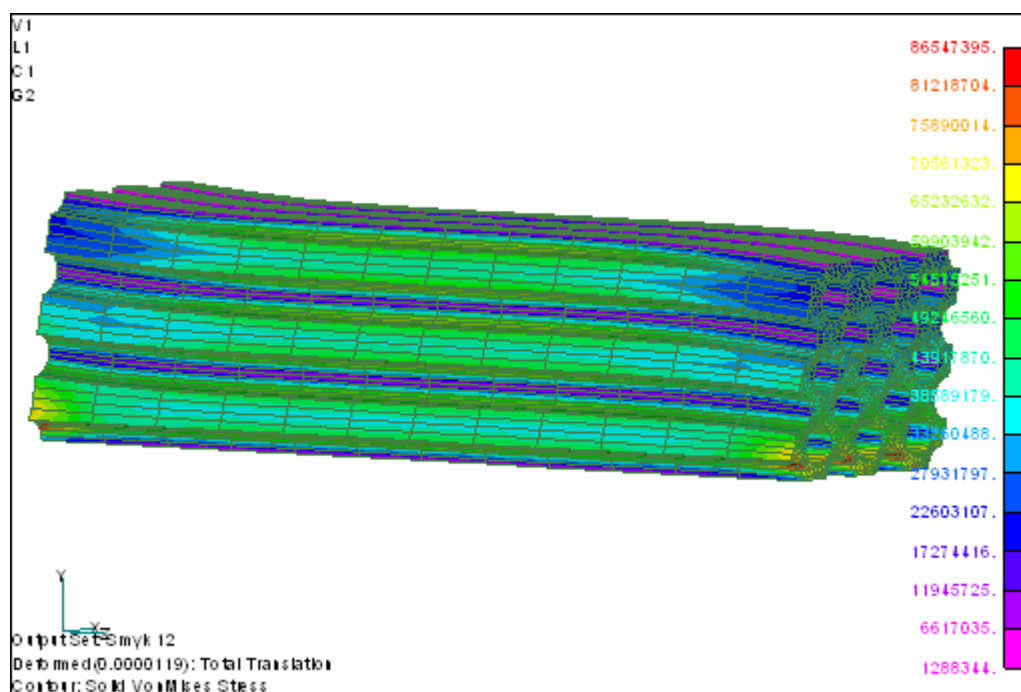
Měření pevnosti jako smluvní hodnoty, je velmi diskutabilní. Rozdíly mezi výrobcem a experimentátorem deklarovanými čísly je třeba chápat jako skutečně jen informativní. Pro účely verifikace používaných pevnostních kritérií laminátu se pravděpodobně nehodí a bude třeba hledat jiné cesty pro získání spolehlivých vstupních hodnot do výpočtů.

Mezi oběma rozšířenými tyčemi by měl být rozdíl zjištěné pevnosti v poměru rozdílných koncentrací napětí v přechodové části. Tato skutečnost nebyla potvrzena a u dotvrzených vzorků je možno vyčíst sobě navzájem velmi blízké hodnoty, včetně obdélníkového tělesa.

Závěrem je tedy zjištění, že prakticky jakékoliv výpočty opírající se o předpoklad lineárně elastických vlastností matrice, jsou zatíženy velkou systematickou chybou. Takovými výpočty ale nejsou jen například MKP analýzy elementu kompozitní struktury, jako na Obr. 9. Patří sem i výpočty modulů a Poissonových čísel kompozitu, ať už ze směšovacího pravidla nebo pomocí složitějších vztahů.

Zejména tam kde dominují vlastnosti matrice, tj. směry materiálových os kolmo k vláknům, je chyba výpočtu významná a zvyšuje se s velikostí deformace.

Největší rozpor ve změřených a výrobcem deklarovaných veličinách, je v Poissonově čísle. Je otázkou, do jaké míry lze vůbec spoléhat na platnost této konstanty při vědomí, že epoxidová matrice vykazuje nelineární vlastnosti.



Obr. 9 MKP výpočet napjatosti v objemu matrice mezi vlákny kompozitu

Pokud bychom předpokládali přibližně lineární chování matrice alespoň pro malé výchylky, způsoboval by rozdíl mezi změřeným a výrobcem udávaným Poissonovým číslem chybu ve vypočtených deformacích (příčné složky) kolem 20 %.

Závěr

Provedené výpočty a zkoušky potvrdily očekávané rozdíly mezi jinak velmi seriózním výrobcem deklarovanými vlastnostmi matrice a hodnotami nezávisle naměřenými. Z praxe již byly zjištěny podobné problémy i při dodávkách vlákna výztuže.

Obdržené výsledky nejsou považovány za konečné, ale jsou podkladem pro přípravu navazujících prací, jejichž hlavním cílem je zpřesnění predikovaných vlastností ortotropní vrstvy kompozitu pro potřeby konstruktéra v prvních fázích vývoje nového výrobku.

Příspěvek byl zpracován za využití finančních prostředků Výzkumného záměru MSM0001066904 „Výzkum chování kompozitních materiálů v primární konstrukci zařízení s rotujícími nosnými plochami“.

Nanotechnologie a nanomateriály

Mgr. Jakub Podzimek

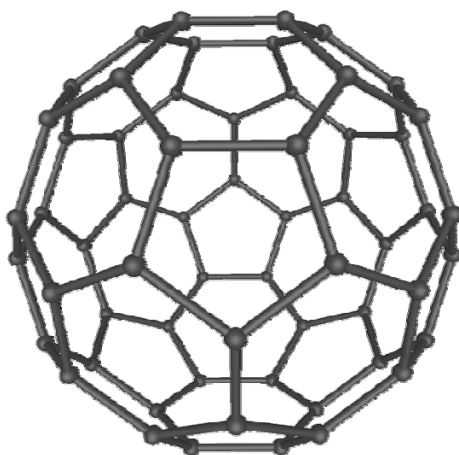
V tomto příspěvku je uveden krátký přehled o dnes velmi populárním termínu "nano", speciálně tzv. nanotechnologiích a nanomateriálech.

Úvod

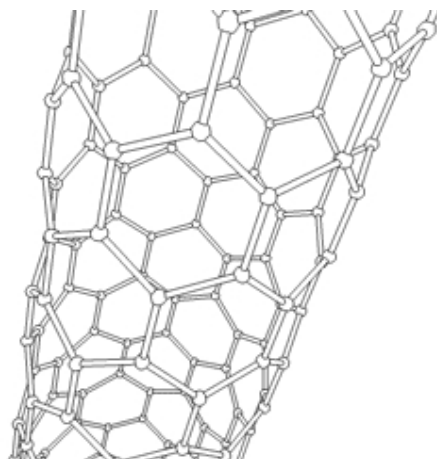
Prvopočátky nanotechnologií, alespoň na úrovni teoretických vizí a přání, sahají až do 50. let minulého století, kdy fyzik Richard Feynman přednesl přednášku, ve které předpověděl možnost vytváření materiálů a mechanismů na úrovni atomů a molekul. Feynman tehdy naznačil, že to bude možné, až bude k dispozici experimentální technika, která umožní manipulovat s "nano"-strukturami a měřit jejich vlastnosti.

Termín nanotechnologie byl definován v roce 1974 Prof. Norio Taniguchim, který prohlásil, že nano-technologie se sestává z manipulací hmotou - materiálem - na atomární a molekulární úrovni [1]. V osmdesátých letech byl termín "nano" propracován do hloubky Dr. K. E. Drexlerem, který se mu věnoval ve svých publikacích [2, 3].

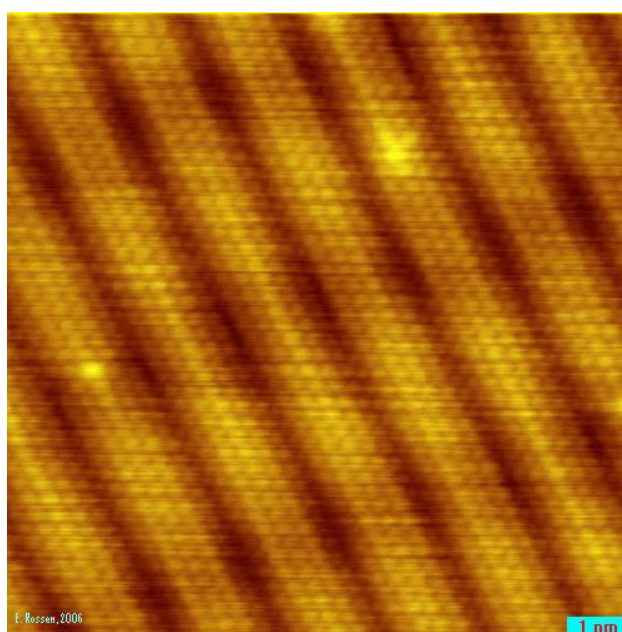
V osmdesátých letech byla také ustanovena například supramolekulární chemie, byly připraveny fullereny (obr. 1) a uhlíkové nanotuby (obr. 2), byly vynalezeny přístroje jako např. rastrovací tunelový mikroskop (STM) (obr. 3), mikroskop využívající atomových sil (AFM) (obr. 4), optický rastrovací sondový mikroskop blízkého pole (NSOM) apod., umožňující zkoumání nanostruktur a hmoty na úrovni atomů a molekul.



Obr. 1 Model fullerenu C₆₀, tzv. "Buckyball" [4]



Obr. 2 Model uhlíkové nanotuby [4]



Obr. 3 Zobrazení povrchu čistého zlata pomocí STM - na obrázku jsou viditelné jednotlivé atomy zlata [5]

Dnes souběžně probíhající expanze kapacity počítačů dovoluje sofistikované simulace materiálových vlastností v nanorozměrech (1-100 nm -> 0,000001-0,0001 mm). V současné době výzkum směřuje k aplikacím, které významně zlepší stávající technologie. Vědci objevují možnosti samoorganizace základních kamenů hmoty (self-assembly) s cílem vytváření struktur chemickou syntézou, podle vzoru biologických procesů samouspořádávání.

I přes dosažené úspěchy, lze současnou úroveň poznatků, postupů a technologií v oblasti nanotechnologií přirovnat k situaci v elektronice, výpočetní technice a telekomunikacích koncem čtyřicátých a na začátku padesátých let minulého století, krátce po vynálezu tranzistoru. Teprve začínáme rozumět podstatě zákonitostí, kterými se řídí fyzikální, chemické, biologické a jiné procesy v nanorozměrech. Vlastnosti hmoty v "nano" měřítku nejsou totiž vždy předvídatelné na základě zkou-

mání ve větších rozměrech. Významné změny chování materiálů jsou způsobeny nejen plynulou modifikací jejich charakteristických vlastností se zmenšujícími se rozměry, ale působením jevů jako jsou např. kvantové jevy, převažující vliv povrchových jevů (velký vliv povrchového napětí), van der Waalsovy interakce. Zároveň v nanorozměrech některé síly a principy, jako například síla gravitační, ustupují do pozadí a naopak jiné, jako statistická termodynamika nebo kvantová mechanika, se dostávají do popředí v míře pro "mikro" a "makro" svět neznámé.

O nanotechnologii se často mluví, stejně jako o robotice a genetickém inženýrství, jako o oboru 21. století. Konstrukčními prvky nanotechnologie jsou molekuly a dokonce i samotné atomy (nanometr je stokrát kratší než vlnová délka světla). Podle názorů vědců a futurologů toto nové odvětví v příštích dvaceti letech výrazně změní život člověka. Dnes už je jisté, že se možnosti mikrotechniky brzy vyčerpají a na její místo s největší pravděpodobností nastoupí tato nová technologie.

Pojem nanotechnologie zahrnuje vědu, výzkum, technologie, které si kladou za úkol zvládnout práci s hmotou na úrovni atomů a molekul, tj. v nanoměřítku. Nanotechnologie je multidisciplinární věda zahrnující pole lidského bádání jako jsou aplikovaná fyzika, materiálové inženýrství, koloidní chemie, supramolekulární chemie, optika, biologie, biochemie apod.

Jakmile bude možné řídit rozměry a tvar nanostruktur, bude rovněž možné zlepšit materiálové vlastnosti a účinnost zařízení za hranice ležící mimo naše představy. Nanostrukturami, které v současné době známe, jsou např. uhlíkové nanotuby, proteiny, DNA, jednoelektronové tranzistory, ale i prášky a vrstvy o rozměrech nanometrů. Racionální vytváření a integrace materiálů a zařízení v nanorozměrech ohlašuje novou vědeckou a technickou revoluci, za podmínky, že objevíme a plně využijeme nám dosud neznámé principy a zákonitosti.

V posledních patnácti, dvaceti letech je vyvíjeno enormní úsilí v oblasti základního výzkumu, zejména v oblasti nanoelektroniky. Některé objevy ve fyzice a chemii v těchto letech v rámci "nanovědy" vedly k udělení Nobelových cen. Nobelovu cenu v oblasti chemie za rok 1996 získali Robert F. Curl (USA), Richard E. Smalley (USA) a Harold W. Kroto (Anglie) za objev fullerénů. V roce 2007 Nobelovu cenu za fyziku získali Albert Fert (Francie) a Peter Grünberg (Německo) za objev velké magnetické rezistence ve vrstvách rozměru nanometrů (1988). Tento objev vedl už za 8 let k praktickému využití jevu při konstrukci harddisků nové generace [4-9].

Nanotechnologie a nanomateriály

Nanotechnologie

Nanovědy a nanotechnologie představují koncepčně nový přístup k pochopení a využití těch vlastností hmoty, jež kriticky závisí na rozměrech řádu nanometrů. Definice pojmu "nanotechnologie" se u různých autorů poněkud liší. Nanotechnologie je studium a použití materiálů, zařízení a systémů o rozměrech řádově

nanometrů. Nanotechnologie je populární termín pro vytváření a využití funkčních struktur s minimálně jedním charakteristickým rozměrem měřeným v nanometrech. Nanotechnologie si lze představit jako všezahrnující popis aktivit na úrovni atomů a molekul, které mají uplatnění v reálném světě. Nanotechnologie je rozvíjející se obor výzkumu a vývoje zaměřený na řízení struktury materiálů v nanorozměrech (0,1 – 100 nm, alespoň v jednom rozměru).

Nanotechnologie je rovněž skupina rozvíjejících se technologií (technologie v pevném stavu, biotechnologie, chemické technologie aj.), které metodami shora dolů (top-bottom - nebo také top-down) a zdola nahoru (bottom-up) konvergují k nanorozměrům. V současné době se nanotechnologie sestává ze čtyř hlavních oblastí: nanoelektroniky, nanomateriálů, molekulární nanotechnologie a mikroskopů pracujících s rozlišitelností v nanometrech.

Nanotechnologie je v podstatě nauka o zpracování materiálů o rozměrech zvících nanometrů.

Nanomateriály

Nanomateriály se vyznačují následujícími společnými znaky:

- Stavebními jednotkami jsou nanočástice s definovanými vlastnostmi: rozměry, tvarem, atomovou strukturou, krystalinitou, mezifázovým rozhraním, homogenním/heterogenním složením a chemickým složením. Rozměry jsou limitovány v oblasti od atomů k pevným částicím menším než 100 nm. Vlivem malých rozměrů v některých případech počet povrchových atomů převyšuje počet atomů ve vnitřním objemu.
- Tyto stavební jednotky jsou uspořádané v makroskopických multi-klastrových materiálech s velmi různorodým topologickým pořádkem. Chemicky identické částice mohou být těsně uspořádány a kompaktovány za vzniku hranic zrn. Částice mohou být oddělené nebo spojené koalescencí nebo podložkou a mohou vytvářet nanodrátky, nanotuby, nanokompozity, keramické nebo jiné tenké filmy nebo vrstvy.
- Stavební jednotky a jejich topologie mohou sloužit pro vytváření rozměrnějších materiálů vhodných pro technické aplikace.

Nanomateriály (nanostrukturní materiály) jsou takové materiály, jejichž nové vlastnosti jsou určeny charakteristickými znaky (částice, klastry, dutiny) o rozměrech mezi 1-100 nm, přinejmenším ve dvou rozměrech.

Příklady použití

Oblast využití nanotechnologií a nanomateriálů je velmi rozsáhlá. Můžeme pro zjednodušení konstatovat, že se týká všeho kolem nás od medicíny přes strojírenství, stavebnictví, textilní průmysl, elektroniku, kosmický průmysl až po vojenský průmysl.

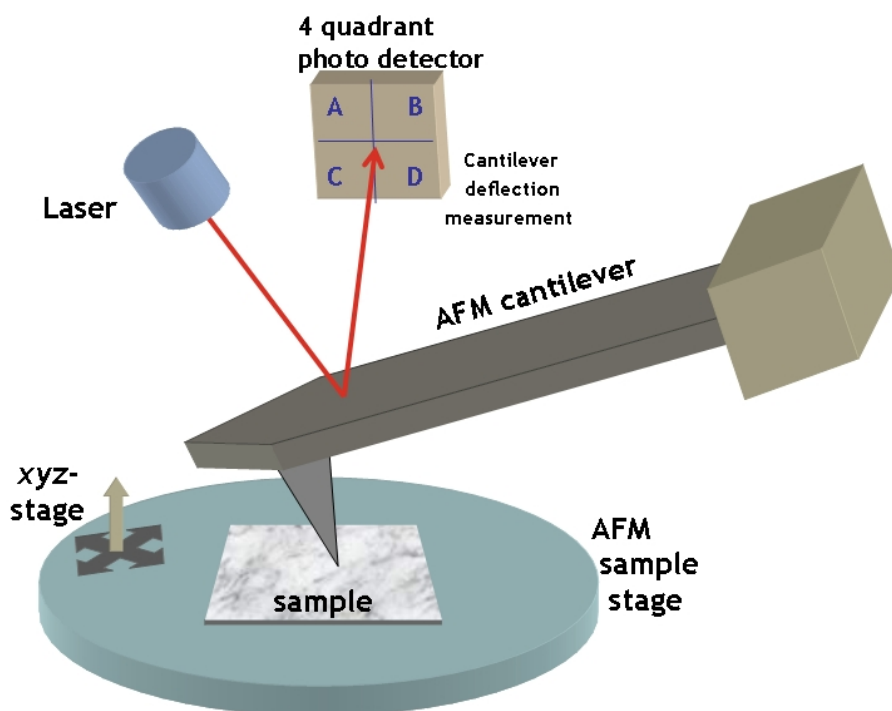
Technologie

Bottom-up metody využívají principů na jakých je např. postavena syntéza DNA v buňce. Podél jednoho řetězce šroubovice se tvoří druhý, komplementární k původnímu. Zjednodušeně jsou to metody, kdy se z atomů a molekul tvoří supra-molekulární útvary, tj. molekulární klastry, micely apod, využívající samoorganizačních schopností daných molekul.

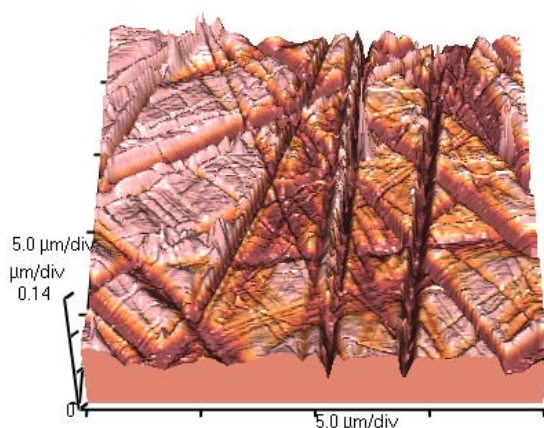
Top-bottom metody pak pracují například s principy známými z výroby mikročipů. Například špička AFM (hrot obsahuje jeden atom) je připravována tzv. iontovým leptáním.

Měřicí přístroje

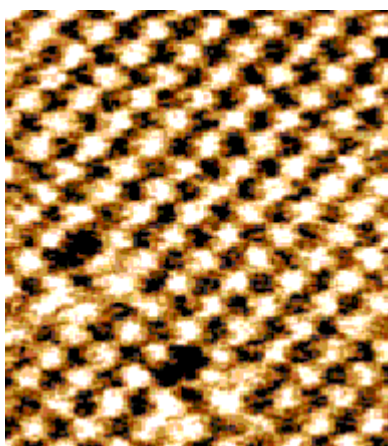
Mikroskop atomových sil (AFM) pracuje tím způsobem, že při dotykové vzdálenosti přejíždí systematicky povrch zkoumaného materiálu. V případě, že sonda narazí na atom, prohlubeninu, výstupek apod, odkloní se příslušným směrem a laser zaznamená výchylku. Z naměřených dat je poté rekonstruován povrch měřeného vzorku. AFM není schopen "vidět" do hloubky materiálu přesahující možnosti výkyvu a rozměrů sondy.



Obr. 4 Standardní uspořádání mikroskopu atomových sil - AFM [11]



Obr. 5 Povrch skla získaný pomocí AFM



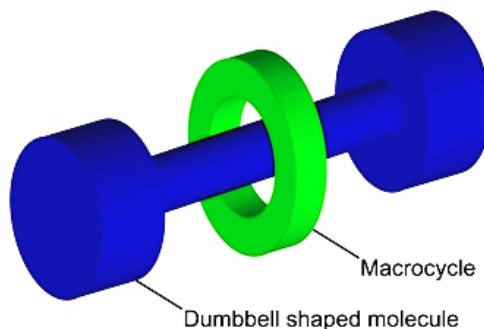
Obr. 6 AFM rekonstrukce struktury povrchu krystalu chloridu sodného [12]

Medicína

Velmi významnou oblastí jsou kontrastní látky pro NMR (nukleární magnetická rezonance), kde se většinou využívají nanočástice oxidů. Další podobnou oblastí je cílená likvidace tumorů, kdy se využívá absorpčních schopností nanočástic cíleně usazených v nádorových tkáních. Po ozáření infračerveným laserovým nebo vysokofrekvenčním elektromagnetickým zářením dochází k destrukci nádorové tkáně. Aplikace při cílené dopravě léčiv, kdy je dané léčivo (velmi často kancerostatikum) dopraveno na potřebné místo své působnosti na polymerním nosiči. V případě kancerostatika je tento lék s nosičem vtažen do nádoru a až poté je kancerostatikum uvolněno. Takto se předejde působení pro tělo často velmi jedovatých látek v celém organismu. Dále jsou to např. klinicky testované přípravky pro diabetiky, automaticky řídicí dávky inzulínu bez vnějšího zásahu, umělé klouby, chlopně, cévy, náhrada tkání, desinfekční roztoky nové generace, ochranné krémy, koloidní roztoky léčivých přípravků, lab-on-chip (diagnostická laboratoř na čipu) – intenzívně se rozvíjející odvětví elektronické diagnostiky, kdy analyzátor, skládající se z milionů nanočidel bude schopen zobrazit okamžitě chemické složení tělních tekutin, umělé krvinky atd.

Mechanika

Výzkumy v oblasti ultrajemné mechaniky probíhají s cílem dosáhnout téměř dokonalého opracování součástí, magnetických hlav a optických prvků. Výroba prášků a krystalů v nanorozměrech může zabezpečit nová mazadla, otěruvzdorné povlaky strojních součástí a katalyzátory chemických reakcí.



Obr. 7 Grafická reprezentace rotaxanu (makrocyclická molekula) jako molekulárního přepínače [5]

Elektronika

Vysokokapacitní záznamová média, logické obvody na molekulární úrovni, zobrazovací zařízení s vysokým rozlišením, fotomateriály, fotočlánky, palivové články, vysokokapacitní baterie apod.

Strojírenství

Automobily - katalyzátory, supertvrdé povrchy s nízkým třením, samočisticí nepoškrabatelné laky, snižování spotřeby paliva. Kompozitní materiály, obráběcí nástroje.

Stavebnictví

Izolační materiály nové generace, samočisticí fasádní nátěry, antiadhezní obklady.

Závěr

Nanotechnologie je oblast výzkumu, která zahrnuje velké množství vědních disciplín jako jsou fyzika, chemie, biologie, elektronika, inženýrství atd. Z toho vyplývá požadavek interdisciplinárního přístupu k řešení problémů. Jakkoliv je "nanověda" teprve v plenkách, ukazuje se její velmi slibný potenciál čekající na využití.

Výzkumem a vývojem se otevírá možnost pochopit nové jevy a poté rozvíjet nové vlastnosti na mikro i makro úrovni. Aplikace nanotechnologií budou ovlivňovat život každého člověka. Vývoj a výzkum nanotechnologií se proto stal prioritou v USA, Japonsku i v Evropské unii.

Příspěvek byl zpracován za využití finančních prostředků Výzkumného záměru MSM0001066904 „Výzkum chování kompozitních materiálů v primární konstrukci zařízení s rotujícími nosnými plochami“.

Literatura:

- [1] Taniguchi N.: *On the Basic Concept of 'Nano-Technology'*; Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, Japan Society of Precision Engineering, 1974.
- [2] Drexler K.E.: *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*, 1986.
- [3] Drexler K.E.: *Nanosystems: Molecular Machinery, and Computation*; 1998.
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Fullerene>
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Nanotechnology>
- [6] <http://www.physics.purdue.edu/nanophys>
- [7] http://nobelprize.org/nobel_prizes/
- [8] <http://www.nanosilver.cz/nanotechnologie/>
- [9] <http://www.inetmag.cz>
- [10] <http://www.feynman.com/>
- [11] *The Opensource Handbook of Nanoscience and Nanotechnology* - <http://en.wikibooks.org/wiki/Nanotechnology>
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscope

Nanokompozity

Mgr. Jakub Podzimek

Tato zpráva se přehledově zabývá kompozitními materiály obsahujícími plnidla na bázi nanočástic, jako jsou uhlíkové nanotuby, nanovlákná, jílové nanočástice a tzv. samoorganizující se kopolymerní částice.

Úvod

Kompozitní materiály jsou koherentní systémy složené z různých, tuhých i tekutých, fází tak, aby svým synergickým působením přinášely nové vlastnosti nedosažitelné žádnou složkou samostatně ani součtem vlastností jednotlivých složek.

V nejobecnějším smyslu je téměř každý dnes používaný materiál kompozitem a nalézt materiál používaný v čisté formě je velmi neobvyklé. Velká rodina pevných materiálů představuje souvislou řadu prostorového uspořádání a typů struktury. Na jedné straně stojí například diamant s vysoce pravidelnou strukturou s meziatomovou vzdáleností uhlíkových atomů 0,155 nm, na druhé straně např. beton skládající se z pojiva s náhodně uspořádaným agregátem pevných částic nebo expandovaný polystyren, skládající se z polystyrenové matrice, která uzavírá polyedrické buňky vzduchu [1].

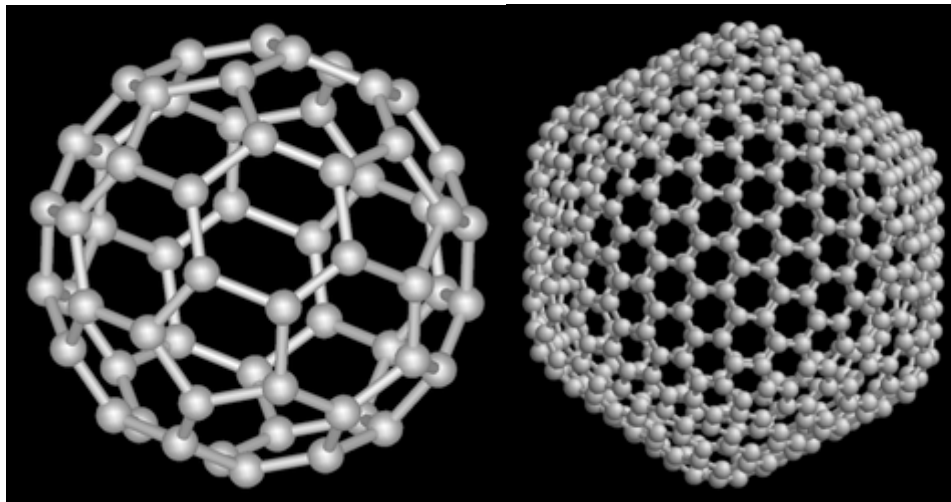
Nanokompozity jsou pak kompozitní materiály při jejichž přípravě se používají a jejichž nové vlastnosti určují částice o alespoň dvou rozměrech mezi 1-100 nm.

Nanokompozity na bázi uhlíkových nanotub

Uhlík patří mezi nejvýznamnější a nejvíce studované prvky na Zemi. Vyskytuje se ve dvou základních krystalických modifikacích: diamant s kubickou a grafit s šesterečnou mřížkou. Dalšími formami uhlíku jsou především jeho převážně amorfní formy (např. aktivní uhlí) a formy částečně krystalické, např. acetylenové saze, což je vlastně mikrokystalický materiál s částicemi většími než 100 nm s vrstevnatou strukturou složenou z jednotlivých grafitových vrstev a uhlíková vlákna s průměry okolo 10 μm , vyráběná katalytickou pyrolýzou oligomerních a polymerních uhlovodíků. Další známou formou uhlíku jsou lineární řetězce s konjugovanými trojnými vazbami, tzv. karbyny, které se však nepodařilo připravit v čistém stavu, protože jsou nestabilní a samovolně přecházejí na stabilnější grafitické struktury.

Fullereny

V roce 1985 byla objevena nová modifikace uhlíku, fullereny, jejichž molekuly mají tvar uzavřených mnohostěnů. Příklady struktur nejznámějších fullerenu jsou uvedeny na obrázku 1.



Obr. 1 Na obrázcích jsou uvedeny fullerén C60 (tzv. Buckyball) a fullerén C540

Jako fullereny jsou označovány uzavřené molekuly s různým množstvím atomů uhlíku uspořádaných do šesti a pětičlenných kruhů. Od nejmenších C20 a C32 přes nejběžnější C60 a C70 až po molekuly C140, C260, C960 nebo C2940. Dále jsou známy i takzvané cibulové fullereny, které jsou tvořeny jednotlivými fullerénovými slupkami vrstvenými na sebe. Většina z nich má ikosaedrální symetrii.

Střední průměr molekuly C60 je $7,10\text{\AA}$, mezijaderná vzdálenost v šestiúhelnících $1,40\text{\AA}$ a v pětiúhelnících $1,44\text{\AA}$. Krystalizuje v kubické soustavě se vzdáleností dvou nejbližších molekul $10,02\text{\AA}$. Tvoří černé krystaly s hustotou $1,72\text{g/cm}^3$. Rozpouští se v různých organických rozpouštědlech, například toluenu.

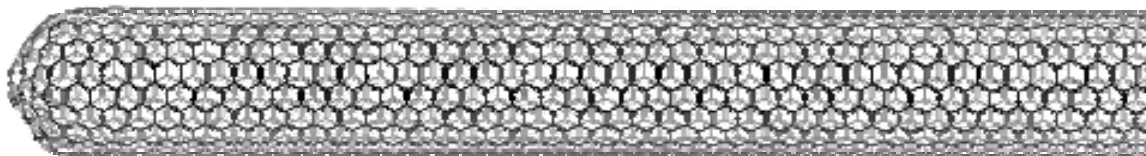
Pro přípravu fullerenu se používají dvě metody:

- Laserová ablace – obvykle se používá Nd/YAG laser s energií do 250 mJ a vlnovou délkou emitujícího záření 532 nm. Tato metoda je však zajímavá spíše z historického hlediska, nevznikají při ní fullereny v množství vhodném pro další zpracování. Byla potvrzena pozitivní role atomů inertního plynu (He, Ar), který při srážkách odebírá uhlíkovým klastrům vibrační energii.
- Příprava ve výboji mezi grafitovými elektrodami, zpravidla v heliu. Používán je oblouk s elektrodami vzdálenými 2 mm a proudy mezi 80 až 120 A. Tato metoda umožňuje přípravu fullerenu ve větších množstvích.

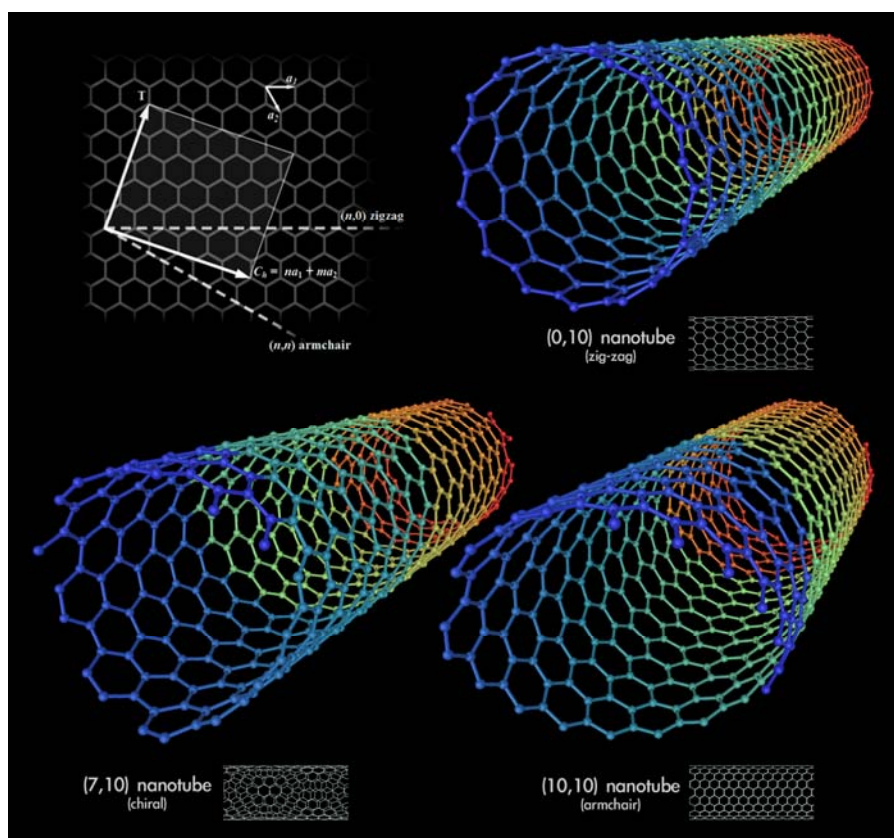
Fullereny se ze sazí získávají sérií extrakcí různými rozpouštědly, nejprve benzenem, čímž se získávají hlavní podíly C60 a C70, poté pyridinem a nakonec tetralinem na získání zbytku rozpuštěných složek. K oddělení jednotlivých fullerenu se používá kapalinová chromatografie. Lze použít i sublimaci ve vakuu, kdy C60 sublimuje již při 350°C .

Uhlíkové nanotuby

Dalším milníkem byl objev uhlíkových nanotub v roce 1991. Uhlíkové nanotuby se obecně rozdělují na dvě skupiny a to na jednostěnné (single-walled carbon nanotubes – SWCN) a víceštěnné (multi-walled carbon nanotubes – MWCN). SWCN si můžeme představit jako jednoatomovou grafitovou vrstvu (grafén), která je stočena do válce a ukončena fullerenovými čepičkami, jak je vidět na obrázcích 2 a 3. Jejich průměr se pohybuje od 0,71 nm (velikost C60) až po 6 nm.

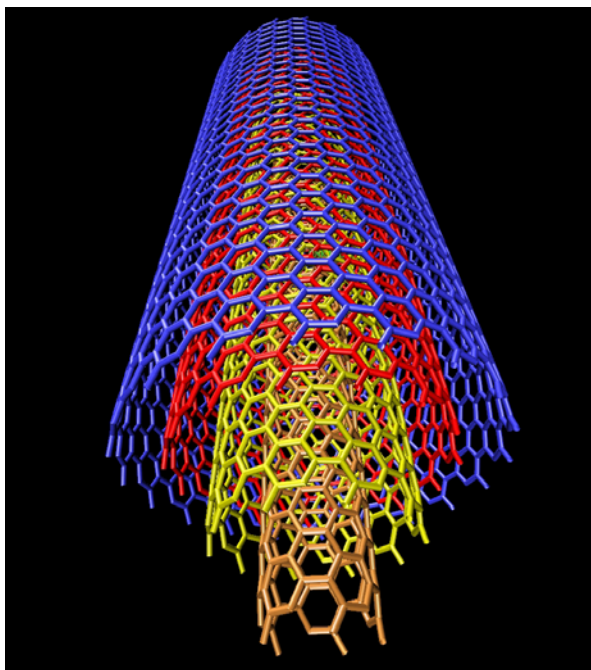


Obr. 2 Jednostěnná uhlíková nanotuba



Obr. 3 Různé strukturní typy SWCN [3]

MWCN jsou tvořeny zpravidla 2 až 30-ti vrstvami soustředně v sobě umístěnými. Mezivrstevná vzdálenost je 0,34 nm a je obdobná jako u grafitu. Průměr se nejčastěji pohybuje od 10 do 50 nm a délka dosahuje až 10 μm . Proti přípravě fullerenu jsou metody používané k přípravě nanotub rozmanitější.



Obr. 4 Schematický příklad vícevrstvé uhlíkové nanotuby [4]

Metody přípravy uhlíkových nanotub:

- Metody přípravy založené na elektrickém výboji – vícevrstvé nanotuby mohou být produkovány v obloukovém výboji v inertním plynu mezi grafitovými elektrodami automaticky udržovanými v určité vzdálenosti od sebe. Typicky se dnes používá pohyblivé grafitové anody o průměru 6-8 mm a fixní katody o průměru 9-20 mm, mezi kterými je udržována konstantní vzdálenost 1 mm. Používá se stejnosměrný proud o velikosti 50-100 A a napětí 20-25 V.
- Laserová ablace grafitového terčíku – tato metoda, která vedla k objevení fullerenu, byla později využita i k přípravě nanotub. Grafitový terčík umístěný v peci vyhřívané na 1200° C je ostřelován pomocí Nd/YAG laseru (250 mJ, paprsek sfokusován na 3-6 mm). Produkty jsou unášeny argonem na vodou chlazený měděný sběrač. Při tomto experimentu byly pozorovány vícevrstvé nanotuby, ale kratší než při přípravách ve výboji.
- Katalytická pyrolýza uhlovodíků – tato metoda vychází z přípravy uhlíkových vláken katalytickou pyrolýzou uhlovodíků. Jeden z prvních úspěšných experimentů byla pyrolýza acetylenu prováděná na železných částicích za teploty 700° C.

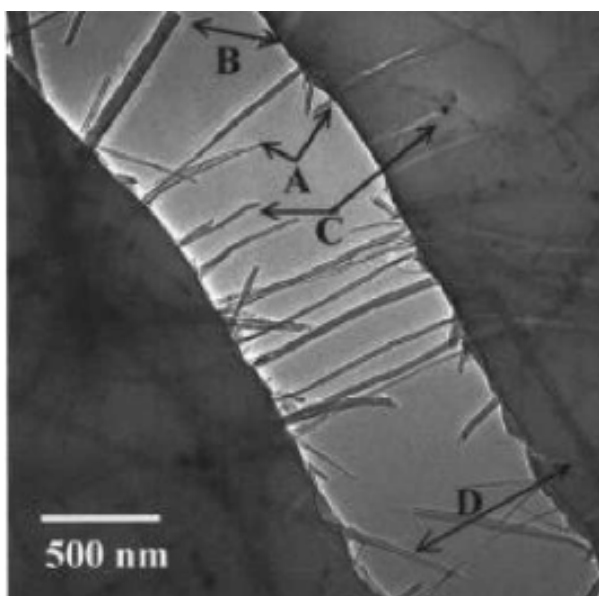
Další metody:

- Vysokoteplotní elektrochemické metody.
- Příprava z fullerenu C₆₀.
- Spalování uhlovodíků – acetylen, benzen.
- Dehalogenace perhalogenuhlíků – nízkoteplotní metoda.
- Elektrolýza vhodných sloučenin v kapalném amoniaku – nízkoteplotní metoda.

Vlastnosti nanotub přiměly ostatní ke zkoumání mechanických vlastností filmů na bázi nanotub a kompozitů s jejich příměsí.

Základním problémem uhlíkatých nanotub, je jejich efektivní rozmíchání, rozprostření v polymerní matrici kompozitu. Vazba uhlík – uhlík v nanotubách není kovalentní, kdežto v hemipolymerech a monomerech, které se používají k polymerizaci na matrici kompozitu, se vyskytují vazby kovalentní. Z tohoto důvodu se uhlíkové nanotuby poměrně špatně váží k matrici a mají tendence se shlukovat na základě interakcí nekovalentních vazeb dohromady a vytvářet v matrici blokové domény. Tento problém se řeší chemickou úpravou nanotub pro daný typ kompozitní matrice, aby byla zajištěna lepší rozpustnost v matrici a adheze k ní.

Například v případě přidání 1% váhového (0,5% obj.) podílu nanotub k polystyrénové matrici, se elasticita zvýšila o 36-42%. Spolu s elasticitou vzrostla také pevnost v tahu a to o 25%. Na obrázku 5 je uveden záznam z TEM roztrnutí kompozitu s výplní z uhlíkatých nanotub [5].



Obr. 5 Mechanismus přetržení kompozitu na bázi uhlíkatých nanotub

Na obrázku je viditelné vytržení nanotub z matrice kompozitu. Z toho je vidět, že by mezifázová soudržnost mohla hrát v případě nanokompozitů hlavní roli. Předpokládá se, že jsou-li nanotuby modifikovány radikálovým iniciátorem AIBN (2,2' – azobisisobutyronitril), otevírají se nové vazby v nanotubách a v případě kompozitu, kde je jako matrice použit polymethylmethakrylát (PMMA), může docházet k vytváření vazeb mezi nanotubami a matricí. To vede k lepší rozpustnosti, mísitelnosti i soudržnosti nanotub v matrici.

Bylo ale teoreticky zjištěno, že vazba mezi nanotubou a polymerem v matrici a tření mezi nanotubou a materiálem matrice, hrají spíše podružnou roli. Jak se z výpočtů ukázalo, důležitější je schopnost makromolekulárního řetězce omotat nanotubu.

Vylepšování a zjišťování adheze, dispergace nanotub a mikromechanické studie jsou v případě nanokompozitů velmi obtížné z důvodu náhodné distribuce nanotub v matrici kompozitu. Proto byly učiněny pokusy vyrovnat nanotuby v matrici mechanicky, natažením kompozitu. Analýzou kompozitu pomocí rentgenové difrakce, bylo zjištěno vyrovnaní nanotub podél směru vytahování. Dále bylo zjištěno, že se nanotuby při vyrovnávání tímto způsobem také deformují.

Uhlíkaté nanotuby se dají použít nejenom do kompozitů s polymerní matricí, ale také jako přísův kompozitů s keramickou nebo kovovou matricí [2,5-7].

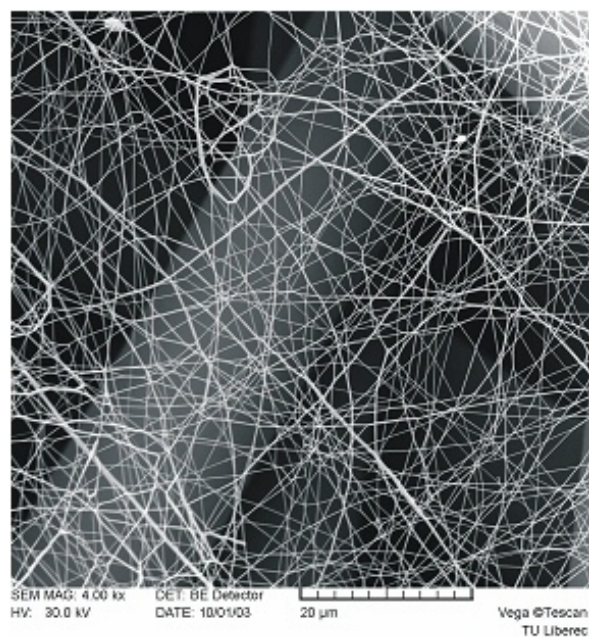
Nanokompozity na bázi nanovláken

Nanovlákná jsou taková vlákna, jejichž průměr se pohybuje v rozsahu nanometrů. Jsou to tzv. submikronová vlákna. Je-li rozsah průměrů polymerních vláken od 10-100 μm až k 0,01-0,1 μm , pak nanovlákná vykazují zajímavé vlastnosti, jako je třeba poměr velikostí povrchu a objemu. Tento poměr může být u nanovláken až 1000x větší než u mikrovláken.

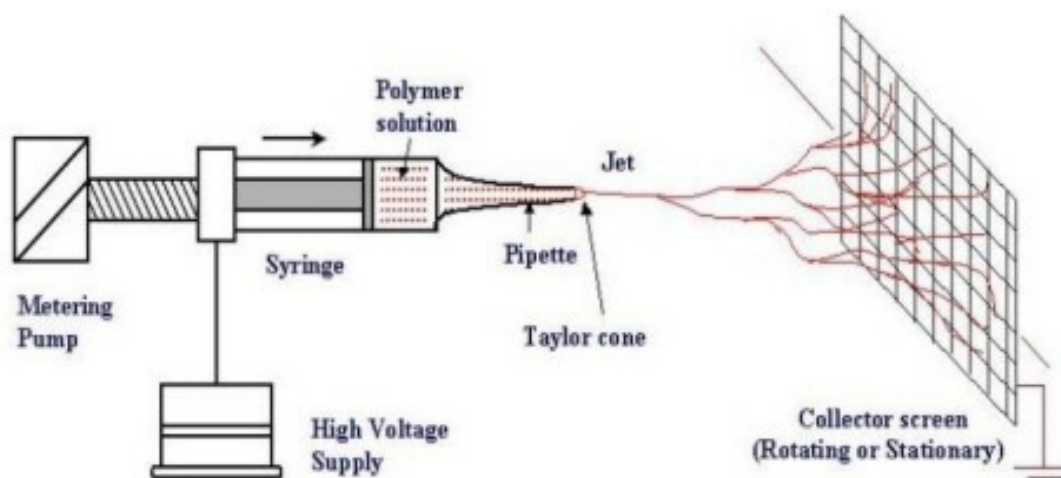
Polymerní nanovlákná

Nanovlákná jsou vlákna, jejichž délka může být různá a záleží na technologii výroby nanovláken. Většinou to ale bývají vlákna kontinuální – nekonečná. Polymerní nanovlákná lze obecně vyrábět několika postupy a to například metodou melt-blown, známou metodou pro výrobu netkaných textilií. Další možností je výroba bikomponentních vláken typu "ostrovy v moři" a následné odstranění (rozpuštění) matrice a v neposlední řadě je to také metoda elektrostatického zvlákňování – electrospinning.

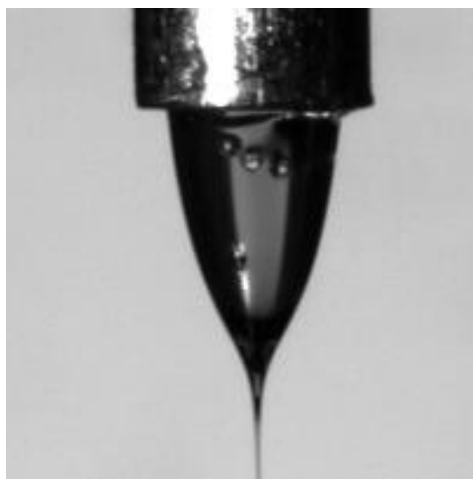
Elektrostatické zvlákňování je metoda využívající elektrostatických sil k vytvoření ultrajemných vláken z roztoku či taveniny polymeru. Zdroj vysokého napětí vytváří elektrostatické pole, to formuje elektricky nabitý proud polymerního roztoku či taveniny, tzv. Taylorův kužel na špičce kapiláry, z kterého jsou produkována submikronová vlákna. Předtím, než tento proud doletí na sběrné stínítko (kolektor), vlákna po odpaření rozpouštědla ztuhnou a vytvoří vláknennou vrstvu na povrchu kolektoru. Jedna elektroda je umístěna do polymerního roztoku či taveniny určené ke zvlákňování a další je připevněna na kolektor. Místo kapiláry jako zdroje polymerní kapaliny se též používá váleček brodící se v kapalině, na němž se takto vytváří tenká vrstva kapaliny a vlivem elektrostatického pole pak dochází k tvorbě velkého množství "trysek" najednou a produkce se tedy značně zvyšuje. Zatím bylo v literatuře popsáno více než 50 různých polymerů, které byly zvlákňovány pomocí technologie elektrospinningu. Ukázky nanovláken a zařízení používaného k elektrospinningu jsou na obrázcích 6 – 8 [8-9].



Obr. 6 Nanovlákna



Obr. 7 Kapilára s elektrodou

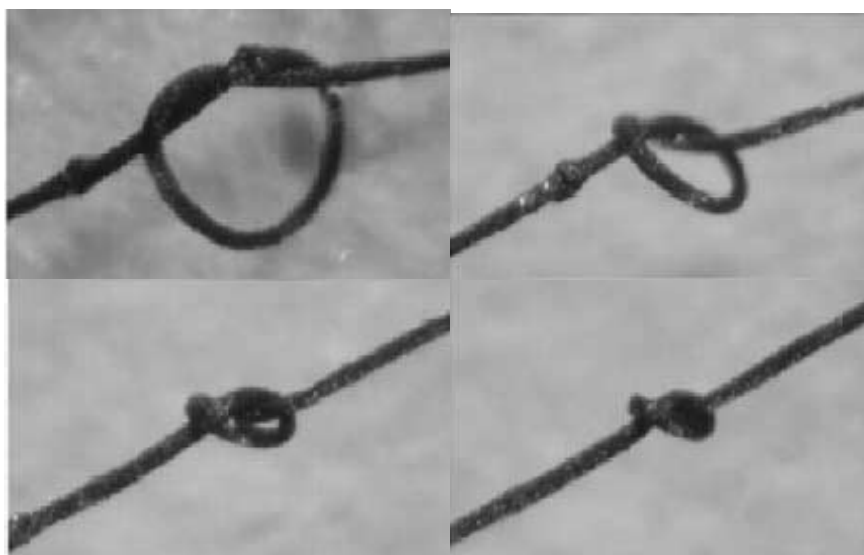


Obr. 8 Špička kapiláry

Uhlíková nanovlákná

Uhlíková nanovlákná jsou používána jako výstuž jak termosetických (epoxidové, fenolické atd.), tak i termoplastických matric kompozitů (polypropylénové, polystyrénové, polymethylmethakrylátové, polyamidové). Uhlíková nanovlákná se vyznačují velkou strukturní různorodostí a taktéž zajímavými vlastnostmi.

Například oproti uhlíkovým vláknům tvořícím klasickou uhlíkovou tkaninu, jsou vlákna vytvořená na bázi uhlíkatých nanotub a nanovláken velmi ohebná, jak je vidět z obrázku 9 [5].



Obr. 9 Ohebnost vlákna vytvořeného na bázi uhlíkatých nanotub a nanovláken

Jako nejlepší v adhezi k polypropylénové matrici byla vybrána nanovlákná vyrobená technologií "long gas phase feedstock", tzn. s dlouhodobým dodáváním plynných uhlovodíků pro růst uhlíkových nanovláken. Tyto kompozity zároveň vykazovaly zlepšení pevnosti v tahu a modulu pružnosti. Oxidace povrchu uhlíkových nanovláken zlepšuje adhezi k polypropylénové matrici a pevnost v tahu těchto

kompozitů. Pro tuto povrchovou úpravu uhlíkových nanovláken je potřeba najít optimální podmínky, neboť příliš dlouhá doba oxidace naopak zhoršuje adhezi k matrici.

V automobilovém průmyslu by mohly najít praktické využití díly z uhlíkových nanovláken s polystyrénovou matricí. Tyto díly lze vyrábět vstřikováním. Výsledné materiály měly při stejném obsahu vlákně složky lepší mechanické vlastnosti a lepší zpracovatelské vlastnosti [5, 8-9].

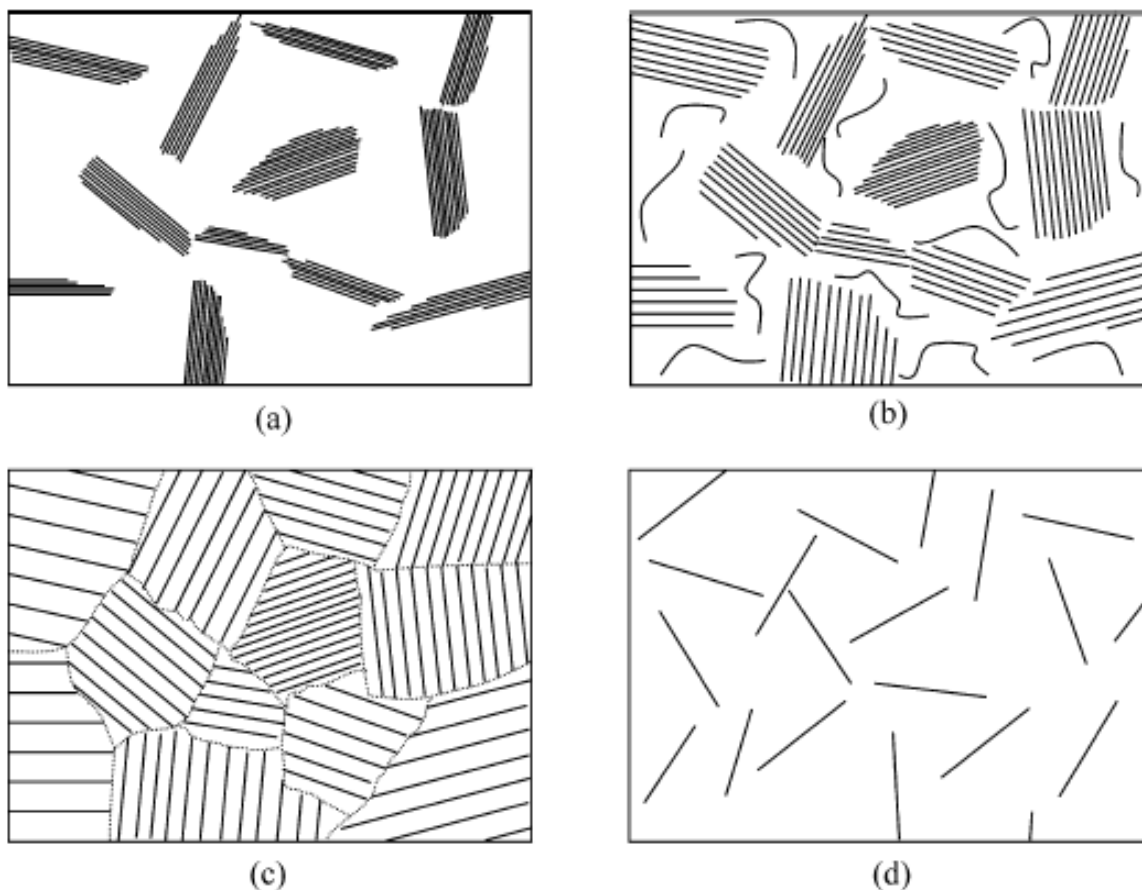
Nanokompozity s jílovými nanočásticemi

Nanokompozity s jílovými nanočásticemi jsou jedním ze směrů, kterým se výzkum kolem nanokompozitů ubírá.

Krystalická struktura některých jílu je vrstevná a tyto vrstvy jsou mezi sebou vázány van der Waalsovými vazbami. Proto jíly, ale i jiné anorganické materiály, mohou být rozštěpeny na destičkovité útvary až do submikronových rozměrů. Tyto útvary/vrstvy mohou mít tuhost až 170 GPa, tloušťku 1 nm a poměr šířky a tloušťky 100-1000. Z toho vyplývá i velký povrch těchto útvarů a to přibližně 750 m²/g. Nanokompozity s jílovými nanočásticemi lze rozdělit na čtyři kategorie odlišené koncentrací jílových nanočástic v matrici a jejich separací a dispergací.

Tyto kategorie jsou:

- Kompozity s agregovanými částicemi (obr. 10a) – v tomto případě jsou jílové částice agregované, spojené van der Waalsovými vazbami, polymerní matrice neodděluje jednotlivé vrstvy. Vliv jílových částic na výsledné vlastnosti kompozitu je malý.
- Kompozity s částečně interkalovanými a expandovanými vrstvami (obr. 10b) – toto je asi nejběžnější způsob rozdělení jílových nanočástic v matrici kompozitu. Expandované a interkalované vrstvy jsou v matrici distribuovány náhodně. Výhodou tohoto strukturního uspořádání je výrazné vylepšení termomechanických vlastností kompozitu.
- Kompozity s interkalovanými vrstvami (obr. 10c) – vrstvy jednotlivých jílových klastrů jsou odděleny molekulami polymeru matrice, ale tyto vrstvy nejsou jednotlivě od sebe oddělené. Stále jsou poměrně silně vázány van der Waalsovými vazbami.
- Kompozity s expandovanými vrstvami (obr. 10d) – v kompozitech s expandovanými vrstvami jsou tyto vrstvy dostatečně odděleny od dalších vrstev molekulami polymerní matrice.

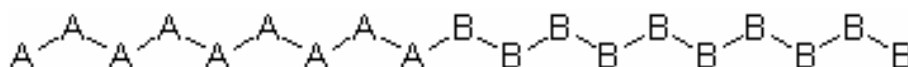


Obr. 10 Strukturní typy kompozitů s jílovými nanočásticemi: a) kompozit s agregovanými částicemi, b) kompozit s částečně interkalovanými a expandovanými vrstvami, c) kompozit s interkalovanými vrstvami, d) kompozit s expandovanými vrstvami [10]

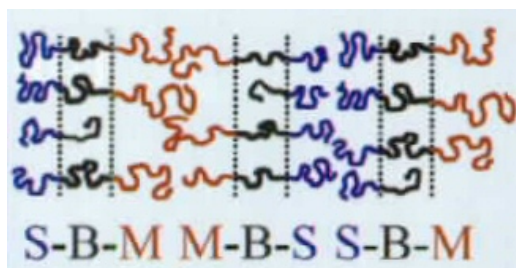
Nanokompozity s tzv. samoorganizujícími se částicemi

Jednou z vlastností makromolekulárních látek, za určitých podmínek, je jejich schopnost tzv. samoorganizace na molekulární úrovni.

Máme-li blokový kopolymer, tj. polymer vzniklý z více než jednoho druhu monomeru, kde jsou jednotlivé monomerní jednotky uspořádány do homopolymerních bloků propojených chemickou vazbou (viz obr. 11), s bloky tvořenými monomerními jednotkami s odlišnými vlastnostmi v prostředí, v němž se mohou řetězce tohoto typu kopolymeru volně pohybovat, zorganizují se tyto řetězce tak, aby repulzní síly mezi těmito bloky byly co nejmenší, viz obrázek 12.



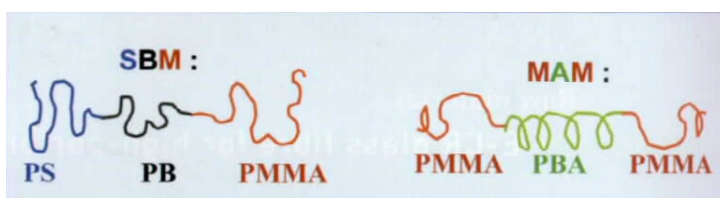
Obr. 11 Blokový kopolymer



Obr. 12 Uspořádání jednotlivých makromolekulárních řetězců blokového kopolymeru

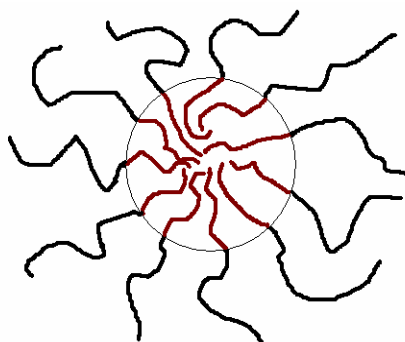
Kopolyмеры používané k přípravě nanokompozitů mají v prvním přiblížení právě centrální blok odlišný od bloků okrajových. Firma Arkema vyvinula produkt zvaný Nanostrenght. Ten se skládá ze dvou skupin kopolymerů (viz obr. 13) a to:

- SBM - poly(styren)-block-poly(1,4-butadien)-block-poly(methylmethakrylát)
- MAM - poly(methylmethakrylát)-block-poly(butylakrylát)-block-poly(methylmethakrylát)



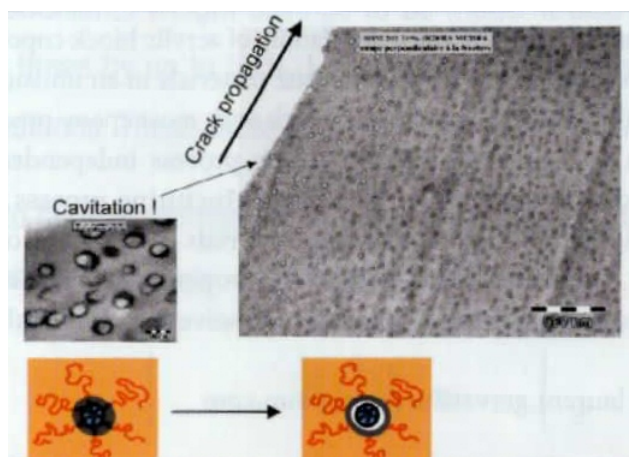
Obr. 13 Schematická ukázka kopolymerů vyvinutých firmou Arkema (PS - poly(styrén), PB - poly(butadien), PMMA - poly(methylmethakrylát), PBA - poly(butylakrylát))

Poly(methylmetakrylát) je rozpustný ve většině průmyslově používaných epoxidových prekurzorů, kdežto poly(1,4-butadien) nebo poly(butylakrylát) jsou buďto málo rozpustné nebo nerozpustné. Tyto makromolekulární řetězce se poté v epoxidu formují do takzvaných micel. Micely jsou asociáty, s jádrem tvořenými špatně rozpustnými bloky kopolymeru a korunou tvořenou dobře rozpustnými bloky (viz obrázek 14).



Obr. 14 Schematické znázornění micely

Micely jsou pak klíčem k vynikajícím vlastnostem tohoto typu nanokompozitů. Ve zjednodušeném popisu, se mohou poměrně hodně smotané řetězce nerozpustné části kopolymeru, které se snaží v daném prostředí zaujmout co nejmenší objem, narovnávat a tak vyrovnávat tahové zatížení kompozitu. Dále se u nich projevuje jev tzv "kavitace", kdy na absorpci zatížení nestačí narovnání řetězců, ale tyto řetězce (nerozpustný blok v jádru micely) se utrhne. Dojde tak k přerušení kovalentních vazeb spojujících jednotlivé bloky jak je ukázáno na obrázku 15 [11].



Obr. 15 Kavítace

Závěr

Využití nanočástic, jako plniva polymerních matric kompozitů je sice v počátku, ale už se objevují první příznivé výsledky, ze který se dá vysledovat:

Uhlíkové nanotuby by měly zvyšovat pevnostní charakteristiky matrice, jako je pevnost v tahu, lomová pevnost, ovlivňovat Youngův modul pružnosti a elektrické vlastnosti matrice, jako je vodivost.

Vhodná polymerní nanovlákná a materiál na bázi polymerních nanovláken by měla zlepšovat lomovou pevnost, pevnost v tahu i interlaminární pevnost nanokompozitu.

Jílové nanočástice by měly být vhodné ke zvýšení mechanických a tepelných vlastností nanokompozitu, jako jsou tepelná stabilita a samozhášení.

Polymerní, samoorganizující se částice, podobně jako v předchozích případech, by měly vylepšovat mechanické vlastnosti. Pevnost v tahu, lomovou pevnost atd.

Příspěvek byl zpracován za využití finančních prostředků Výzkumného záměru MSM0001066904 „Výzkum chování kompozitních materiálů v primární konstrukci zařízení s rotujícími nosnými plochami“.

Literatura

- [1] Bareš R. A.: *Kompozitní materiály*; SNTL, 1988
- [2] Svoboda J.: *Nízkoteplotní příprava uhlíkových nanostruktur*; PČF UK, 2001
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube
- [4] <http://www.me.vt.edu/nrylander/home/home.html>
- [5] Thostenson E. T., Ren Z., Chou T.-W.: *Comp. Sci. Tech.* 2001, 61, 1899
- [6] Huang Z.-M., Zhang Y.-Z., Kotaki M., Ramakrishna S.: *Comp. Sci. Tech.* 2003, 63, 2223
- [7] Vohlídal J.: *Makromolekulární chemie*; Karolinum, Praha, 1995
- [8] Košťáková E., Grégr J., Očeretna L.: *Nanovlákná a možnosti jejich uplatnění v kompozitních materiálech*; XXII Vyztužené plasty, 24.-26.5.2005, Karlovy Vary
- [9] <http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/nano/nanoact.ppt>
- [10] Luo J.-J., Daniel I. M.: *Comp. Sci. Tech.* 2003, 63, 1607
- [11] Gervat L., Guerret O.: *JEC Composites* 2005, 16, 100

Nanokompozity s uhlíkovými nanotubami

Mgr. Jakub Podzimek, Ing. Vilém Pompe, Ph.D.

V této práci jsou uvedeny výsledky experimentů s uhlíkovými nanotubami a epoxidovou matricí. Analyzovány byly mechanické vlastnosti matrice, různě tepelně zpracované, plněné různými koncentracemi uhlíkových nanotub.

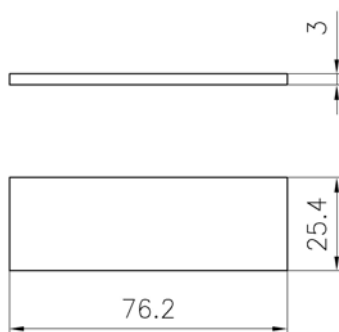
Úvod

Nanomateriály a nanotechnologie se dnes těší značné přízni a pozornosti vědců i průmyslových společností. Uhlíkové nanotuby jsou nadějným materiálem blízké budoucnosti, který se testuje v mnoha aplikacích a jehož vlastnosti jsou intenzivně studovány. Naše práce je zaměřena na změnu mechanických vlastností epoxidové matrice po přidání určitého množství uhlíkových nanotub. Spolu s vlivem koncentrace nanotub byl sledován i vliv různých způsobů dotvrzení matrice.

Experimentální část

Příprava vzorků

Požadované množství uhlíkových nanotub bylo rozmícháno v potřebném množství epoxidové pryskyřice. Následně bylo do směsi přidáno tužidlo, směs řádně rozmíchána a odplyněna. Do přípravku byla směs plněna technologií RTM. Takto připravené desky byly rozřezány na menší panely, které byly vytvrzeny na požadovanou teplotu. Z vytvrzených panelů byly připraveny vzorky pro zkoušky ohybové pevnosti o rozměrech uvedených na obrázku 1. V případě desek, bez příměsi nanotub (desky s čistou matricí), byl postup obdobný, pouze bez počátečního kroku rozmíchávání nanotub v epoxidové pryskyřici.



Obr. 1 Rozměry vzorků pro zkoušky pevnosti v ohybu

Vytvrzení vzorků

Jednotlivé sady vzorků prodělaly celkem tři různé způsoby dotvrzení. První sada (viz tabulka 1) byla vytvrzena při laboratorní teplotě. Druhá sada (viz tabulka 2) byla vytvrzena při 50° C a třetí sada (viz tabulka 3) byla vytvrzena při teplotě 100° C.

Identifikace vzorků

Jednotlivé sady vzorků jsou označeny tříznakovým kódem. První znak udává teplotu, při které byla sada vytvrzena (A - laboratorní teplota, B - 50° C, C - 100° C). Druhý znak, číslice, udává koncentraci nanotub ve vzorku. 1 - nejnižší koncentrace (čistá pryskyřice), 6 - nejvyšší koncentrace. Stejná čísla značí vždy stejnou koncentraci nanotub. Třetí znak, X, značí pořadové číslo vzorku v jednotlivé sadě. Každá sada měla vždy šest vzorků.

Výsledky

Při pohledu do tabulek 1 až 3 zjistíme, že z hlediska změny mechanických vlastností se projevuje přítomnost nanotub v matrici prakticky zanedbatelně. Pevnost v ohybu se nemění nebo jsou změny tak malé, že z provedených zkoušek nelze stanovit procentuální změnu.

U změřených modulů pružnosti v ohybu platí obdobný závěr jako pro pevnosti, nicméně je možno vysledovat tendenci k vyztužení s nárůstem objemového podílu nanotub, což odpovídá našemu očekávání.

Zdaleka nejvýrazněji se na mechanických charakteristikách projevuje způsob tepelného zpracování – dotvrzení. Tento vliv převyšuje význam přítomnosti nanotub. Jak lze z tabulek s výsledky vysledovat, dotvrzení, ať už při 50° C nebo 100° C výrazně snižuje rozptyl sledovaných vlastností.

Označení sady vzorků	Pevnost v ohybu - střed [MPa]	Pevnost v ohybu - min [MPa]	Pevnost v ohybu - max [MPa]	Variační koeficient - pevnost [%]	Modul pružnosti v ohybu [GPa]	Var. koef. - modul pružnosti [%]
A1X	117,957	115,428	120,081	1,496	3,601	0,497
A2X	127,191	101,627	132,893	9,851	3,610	0,314
A3X	107,489	89,004	116,339	11,032	3,610	0,273
A4X	123,915	100,186	132,632	10,177	3,603	0,574
A5X	114,997	107,737	118,745	4,053	3,641	0,601
A6X	101,758	89,703	113,432	9,166	3,711	0,679

Tab. 1 Výsledky zkoušek pevnosti v ohybu pro vzorky vytvrzené při laboratorní teplotě

Označení sady vzorků	Pevnost v ohybu - střed [MPa]	Pevnost v ohybu - min [MPa]	Pevnost v ohybu - max [MPa]	Variační koeficient - pevnost [%]	Modul pružnosti v ohybu [GPa]	Var. koef. - modul pružnosti [%]
B1X	119,490	116,352	121,885	1,696	3,424	0,496
B2X	118,601	115,532	120,085	1,398	3,444	1,210
B3X	131,092	129,653	132,071	0,659	3,483	0,300
B4X	119,867	118,565	121,210	0,871	3,477	0,724
B5X	117,468	115,791	118,867	1,084	3,488	0,593
B6X	121,298	120,275	122,441	0,813	3,556	0,422

Tab. 2 Výsledky zkoušek pevnosti v ohybu pro vzorky vytvrzené při 50° C

Označení sady vzorků	Pevnost v ohybu - střed [MPa]	Pevnost v ohybu - min [MPa]	Pevnost v ohybu - max [MPa]	Variační koeficient - pevnost [%]	Modul pružnosti v ohybu [GPa]	Var. koef. - modul pružnosti [%]
C1X	111,425	109,760	113,367	1,115	3,023	0,613
C2X	110,980	105,492	112,833	2,472	3,046	1,312
C3X	114,680	101,711	125,494	8,491	3,122	0,826
C4X	112,173	110,807	113,662	1,009	3,059	1,102
C5X	115,007	112,796	116,631	1,201	3,117	0,509
C6X	113,530	105,495	120,475	5,672	3,132	0,879

Tab. 3 Výsledky zkoušek pevnosti v ohybu pro vzorky vytvrzené při 100° C

Závěr

Původním cílem práce bylo zjistit, jakým způsobem je možno upravit mechanické charakteristiky matrice pomocí uhlíkových nanotub.

Bohužel z hlediska konstruktéra nejsou obdržené výsledky v tomto smyslu povzbudivé. Ovšem pomocí nanočástic je možno měnit i jiné charakteristiky matrice a právě v této práci bylo prokázáno, že vhodným způsobem přípravy výroby a konečného tepelného zpracování lze docílit změny v rozptylu výsledků, eventuelně navrátit matici některé z vlastností, které by byly jinak sníženy.

Velmi pozitivním zjištěním je skutečnost, že vhodným tepelným zpracováním a přípravou dochází k nezanedbatelnému snížení rozptylu změřených charakteristik. Jinými slovy, bude-li použito nanočástic k úpravě určitých specifických vlastností matrice, tepelným zpracováním lze matici navrátit mechanické vlastnosti, které by měla, pokud by nebyly nanočástice přítomny. Například bychom teoreticky mohli pozitivně ovlivnit elektrickou vodivost a negativně pevnost. Tepelným zpracováním ale snížíme negativní dopady přítomnosti nanočástic.

Provedené experimenty navazují na další práce s nanokompozity, které sledují možné změny v jiných zajímavých vlastnostech matrice. V takovém případě je znalost trendů změn mechanických vlastností a jejich možná eliminace důležitým podkladem pro konstruktéra a technologa.

Z tohoto hlediska bylo plně dosaženo plánovaného cíle pro vybraný materiálový systém. Byl prozkoumán vliv procentuálního objemu nanočástic na vlastnosti matrice v závislosti na tepelném zpracování a zvolený postup je možno využít jako metodický pro další materiálové kombinace.

Příspěvek byl zpracován za využití finančních prostředků Výzkumného záměru MSM0001066904 "*Výzkum chování kompozitních materiálů v primární konstrukci zařízení s rotujícími nosnými plochami*".

Vrtule pro repliku letounu Avia B.H.5

Ing. Jindřich Rosa

V letech 2003 – 2007 byla sdružením *Historická letka republiky československé* stavěna letuschopná replika letounu Avia B.H.5. Ve své době vzniku v roce 1923 to byl velmi progresivní letoun jednak svojí dolnoplošnou koncepcí a jednak posloužil pro zkoušky a prokázání úspěšnosti v té době právě dokončené první čs. konstrukce leteckého motoru firmy Walter. Útvar Letecké vrtule VZLÚ, a.s. pro repliku tohoto významného letounu navrhnul a vyrobil novou vrtuli, samozřejmě při základním požadavku na příslušný historický vzhled.

Na jaře roku 2003 byl útvar Letecké vrtule VZLÚ, a.s. kontaktován panem Marcellem Sezemským ve věci návržení a výroby vrtule pro připravovanou letuschopnou repliku letounu Avia B.H.5.

Uvedený projekt sdružení Historická letka Republiky Československé měl za cíl postavit repliku tohoto významného letounu ve skutečné velikosti a při co největším respektování dobových materiálů a technologií používaných před 80 lety. Jako pohonná jednotka byl uvažován originální motor Walter NZ-60 zapůjčený ze sbírek Vojenského historického ústavu (Leteckého muzea Kbely) a náležitě repasovaný. Vzhledem k maximální vzletové hmotnosti cca 580 kg byla stavba dozorována ÚCL a letoun bude provozován v kategorii Experimental. Právě vzhledem ke skutečnosti, že jediným oprávněným výrobcem pevných dřevěných vrtulí v ČR pro letouny této kategorie je VZLÚ, a.s., učinili představitelé sdružení HLRČS poptávku po možnosti dodání příslušné vrtule na našem pracovišti.



Obr. 1 Letoun Avia B.H.5 z roku 1923

Podle obdrženého zadání se mělo jednat o pravotočivou dvoulistou vrtuli o průměru 2350 mm, která by byla určena pro výkonové parametry zmíněného motoru Walter NZ-60 a měla by být schopna samozřejmě zajistit letové výkony repliky minimálně takové, jaké jsou známy z historických analýz u původního letounu...

Neméně důležitým byl vzhled vrtule, která měla tvarem pochopitelně co nejvíce odpovídat typickým konstrukcím dřevěných vrtulí z 20. let minulého století. Proto byla do VZLÚ zapůjčena z Leteckého muzea Kbely dobová vrtule, svého času sloužící na jednom dolnoplošném školním letounu Avia, jehož přímým předchůdcem byl právě typ B.H.5. Z označení vyraženého na náboji (B.10 W60 v. č. 55) sice vyplývá, že se jednalo o poněkud menší a lehčí jednomístnou akrobatickou verzi (Avia B.H.10), tudíž tato vrtule měla nejen o něco menší průměr, ale také úhel nastavení listů byl patrně „optimalizován“ právě pro tento typ letounu. Hlavním záměrem zápůjčky však nebylo jednoduše kopírovat, ale získat typické geometrické charakteristiky jako průběhy šířek listů a tlouštěk profilů. Důležité bylo také vypořádat provedení přechodu z profiláže listů do soudkovitého tvaru náboje. Vrtule se tedy ujali pracovníci na montážní dílně útvaru LV a byla důkladně ve stanovených řezech oměřena.

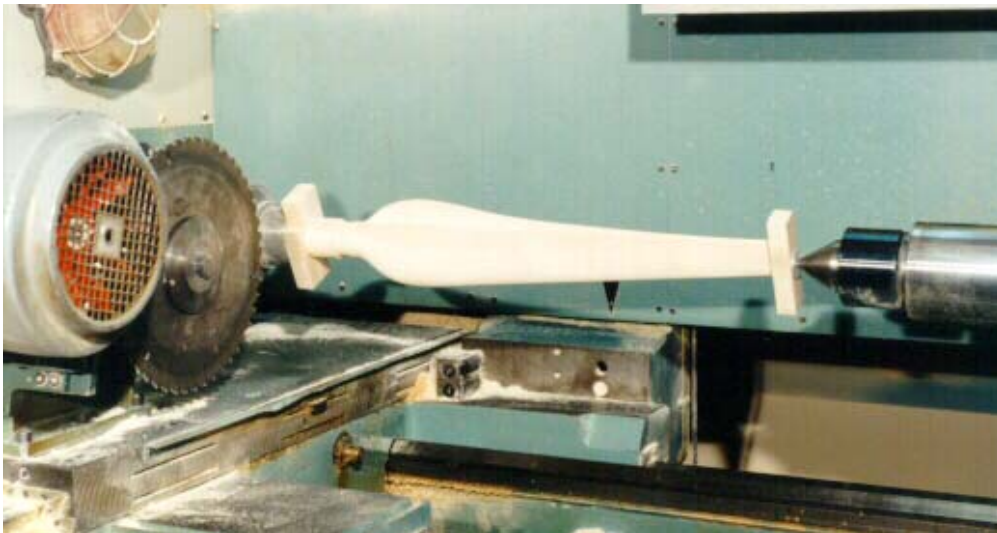


Obr. 2 až 5 Originální vrtule letounu Avia B.H.10 zapůjčená z LM Kbely

Soubor získaných základních geometrických charakteristik sestávající z průběhů šířky a tloušťky po poloměru listu spolu s polohou náběžné hrany a úhlem nastavení profilu tvoří jakousi kostru, na kterou se posléze „navléká“ vlastní profiláž. Tato byla totiž po dohodě se zadavatelem použita soudobá – jde o profilovou řadu VZLÚ V4exp. Důvody jsou veskrze praktické. Tuto odchylku od historického tvaru vrtule, který byl kdysi pracně ručním způsobem vytvářen truhláři snad na bázi profilů RAF6, pozná zblízka jen odborník, nám však dovoluje (kromě očekávání poněkud lepších výkonů) plně využít všech možností standardních návrhových a výrobních postupů používaných na útvaru Letecké vrtule.

Tento řetězec výpočtových programů umožňuje velmi rychle zanalyzovat jednotlivé geometrické varianty z hlediska nejlepších vrtulových charakteristik (tahu, účinnosti), to vše při současné kontrole pevnostního namáhání listů v základních režimech práce vrtule a jejich frekvenčního naladění pro zabránění nežádoucích rezonancí při provozu. Vybraná optimální varianta je pak přímo vstupem pro další program, který generuje data pro NC obráběcí stroj. Vlastní výkres vrtule se tedy kreslí a tiskne pro potřeby finálního dokončení vrtule (dotvarování špičky, stanovení konečných radií) často až ve chvíli, když to pracovníci z dílen LV už opravdu potřebují a klepou na dveře místnosti konstrukce. To už samozřejmě dnes není ve strojírenství nikterak zvláštní jev. Stojí však za připomenutí, že tento řetězec byl navržen a rozvíjen už od dob znovuoobnovení výzkumu a vývoje vrtulí ve VZLÚ na přelomu 70. a 80. let minulého století a ve své době představoval unikátní podobu *de facto* CAD-CAM systému návrhu a výroby. Jen je možné za oněch 25 let zaznamenat určitý rozdíl ve stylu vlastní práce. Zatímco dnes postačuje z hlediska hardware to nejobyčejnější kancelářské PC a případně drobná „fleška“ na data, v minulosti bylo potřeba při přenosu dat k obráběcímu stroji použít i dvoukolák, neboť geometrie takového běžného vrtulového listu byla zaznamenána na kotouči děrné pásky o délce přes 5 km...

V případě vrtule pro Avii B.H.5 jsme ale narazili na její velikost. Blok polotovaru o délce cca 2,5 m totiž už nebylo možné obrábět na našem NC-stroji typu SUI-63, který pracuje pro výrobu vrtulových listů velmi výhodnou a přesnou metodou okružního frézování a pro který je určeno výše popsané generování dat. Velikost stroje vyhovuje pro výrobu jednotlivých vrtulových listů do stavitelných vrtulí nebo pevných dvoulístých vrtulí maximálně do průměru 1,9 m (tj. pro menší sportovní stroje – např. ultralighty). Výroba tak byla nakonec realizována na běžné vertikální NC-frézce v kooperaci s útvarem 4400 „Výroba“. Vrtule byla upnuta na stole frézky za svůj střed a pro obrobení zvlášť jednotlivých polovin a stran listů musela být otáčena a přeupínána. To znamenalo nejdříve vymyslet postup přesného a opakovaného ustavování, který byl realizován systémem kontrolních ploch a hran na základním bloku materiálu tak, aby se řídicí systém vždy ziniclizoval do základních os a rovin vrtule a výsledný tvar vrtulových listů nebyl oproti návrhu deformován. Řídicí kód pro obrábění řádkovým vrstevnicovým způsobem tak také musel být vygenerován pomocí profesionálního systému AlphaCAM.



Obr. 6 Standardní metoda obrábění vrtulových listů okružním frézováním



Obr. 7 Obrábění tvaru vrtule pro letoun Avia B.H.5 na běžné NC-frézce

Vraťme se ale na začátek do doby úvodního návrhu vrtule. Coby podklad jsme tedy měli „historický“ tvar vrtule (resp. listů), který se zvětšením upravil na požadovaný průměr. Výpočtem tahových charakteristik při startu a účinnosti při cestovním letu byly kontrolně prověřeny různé varianty měřítkových změn šířek listů a byla vybrána provozně nejvhodnější, s nejlépe sladěnými (tedy kompromisními) parametry. Pro tyto orientační výpočty byly zprvu použity aerodynamické charakteristiky profiláže (závislosti C_L , C_D a C_M na úhlu náběhu) používané pro typické podmínky na soudobých lehkých letounech (VLA, moderní ULL). Moderní

vysokootáčkové pístové motory jsou sice redukovány na maximálně cca 2500 otáček za minutu, ovšem hvězdicový motor Walter NZ-60 dosahoval nejvíce otáček 1450 min^{-1} , což znamená jiná Machova čísla pro práci jednotlivých profilů. Tyto byly na charakteristických výpočtových řezech navíc podstatně tlustší. Proto byly speciálně pro tuto vrtuli vypočítány nové vstupní aerodynamické charakteristiky profiláže.

Aerodynamický výpočet vrtule se na našem pracovišti realizuje podle teorie uvažující tzv. izolovanou vrtuli, tedy vrtuli volně umístěnou v proudu vzduchu bez výraznějšího aerodynamického ovlivnění. Ve skutečnosti je ovšem vrtule na letounu vždy určitým způsobem umístěna, zastavěna do konstrukce. Bezesporu nejsložitější je situace pro vrtuli v tlačném uspořádání, naopak relativně nejméně je ovlivněna vrtule na štíhlém dlouhém „čumáku“ stíhačky z druhé světové války vybavené výkonným řadovým pístovým motorem. V každém případě má však vrtule vlivem zástavby oproti teoretické vrtuli pracující ve volném proudu vyšší součinitel výkonu (slangovější terminologií je takzvaně „těžší“) a tahový účinek na letoun je nižší, než by odpovídalo tahu vrtule ve volném proudu, neboť povrch letounu je obtékán rychlostí vyšší, než je rychlost letu, což následně vede ke zvýšení odporu částí letounu, ležících ve vrtulovém proudu. Výkonové a tahové charakteristiky vrtule tedy musí být na vliv zástavby určitým způsobem korigovány. Při komplexním a plně financovaném vývoji vrtule se tyto charakteristiky zjišťují experimentálně měřením v aerodynamickém tunelu či na pozemních stendech (jako tomu bylo v případě vývoje vrtulí pro menší dopravní letouny L-410/L-610 v 80. letech minulého století), je však zřejmé, že pro malá sportovní letadla se nanejvýše využívá zkušeností s podobnými případy. Na letounu Avia B.H.5 pak vrtule pracuje nikoli před aerodynamicky propracovanou kapotáží draku, ale těsně před dosti rozměrným hvězdicovým motorem...

I přes použití relativně přesných korekčních koeficientů se nicméně obvykle nelze vyhnout jisté etapě doladování prototypové vrtule pro provoz na konkrétním typu letounu vybaveném určitou verzí motoru. U vrtulí stavitelných za letu stačí k doladění, pokud je vůbec třeba, úprava polohy narážek malého a velkého úhlu nastavení listů. Vrtule přestavitelné na zemi lze pak podle výkonů dosažených při prvních záletech jednoduše nastavit na nejvýhodnější úhel. Tyto jednoduché, avšak jednorežimové vrtule, používané na letounech pro běžné cestovní, rekreační či školní létání, se obvykle nastavují tak, že při plném plynu dojde k ustálení maximálně povolené rychlosti letounu právě při maximálních přípustných otáčkách motoru. Při běžných letových režimech se tak zamezuje případům tzv. „přetočení“ motoru, dosažení takových otáček, pro které není již pohonná jednotka dimenzována a hrozí její poškození či přímo destrukce.

Při potřebě korekce pevné dvoulisté vrtule pak nastává nikterak snadně řešitelná situace. Pevný úhel nastavení nelze změnit, je nutné vyrobit další vrtuli s korigovaným úhlem nastavení listů, nebo v nouzi nejvyšší reznými nástroji chirurgicky zasáhnout do geometrie vrtule (zkrátit, zúžit...).

Další velkou nejistotou byly skutečné výkonové charakteristiky samotného repasovaného motoru. Optimistická varianta počítala s platností výkonové křivky z dobového manuálu (nebo to byl jen prospekt výrobce?) a také s tím, že pečlivě prováděná oprava dokáže spolu s použitím soudobých kvalitních paliv a oleje vrátit motoru stejnou sílu. Do pesimistických úvah jsme se raději příliš nepouštěli.

Rovněž vlastní aerodynamické charakteristiky a výkony letounu, který se právě nacházel ve stavbě v jediném exempláři, byly v podstatě jen návrhovými vypočtenými hodnotami zatíženými určitou nejistotou.

Tímto tedy byly splněny všechny podmínky, které jsou současně i důvody (jak je před několika lety definoval bývalý leader vrtulářů ve VZLÚ, Ing. Benda), aby byla podobná zakázka na návrh a výrobu pevné vrtule pro individuálně stavěné letouny zásadně odmítána. V případě vrtule pro Avii B.H.5 však vzhledem k významnosti tohoto projektu pochopitelně převládly prestižní důvody.

Celá realizace probíhala v letech 2003 – 2007 v závislosti na postupu stavby samotného letounu, kdy poněkud větší zdržení způsobil proces náročné opravy motoru do provozuschopného stavu. Po definitivním potvrzení zájmu zákazníka byla vrtule na jaře 2005 vyrobena. Pro pořádek obdržela oficiální typové označení V238 s výrobním číslem X1 (tedy statut prototypu) a rovněž odpovídající výrobní štítek, umístěný na poměrně skrytém místě zezadu na přechodu z náboje do jednoho listu tak, aby příliš nerušil historický vzhled. Pro úplnost je možné zmínit ještě několik odchylek. Tato vrtule je vyrobena z bloku sklížených lamel bukového dřeva, původní vrtule pro dolnoplošné avie „bosky“ byly jasanové. Rovněž se vyznačovaly ochranou náběžné hrany před poškozením (např. deštěm, vysokým travním porostem, zvířenými odletujícími kaménky) pomocí okování ve vnější části listu plechem, nejčastěji mosazným. Tato náročná a pracná technologie je však dnes už zapomenutým řemeslnickým uměním, proto vrtule V238 z VZLÚ tento typický prvek postrádá.



Obr. 8 Vrtule V238 byla dokončena na začátku léta 2005



*Obr. 9 Vrtule V238 v původním provedení instalovaná na replice letounu
(foto M. Sezemský, HLRČS)*

Z výše uvedených důvodů byly první provozní zkušenosti očekávány s velkým napětím. První běhy pohonné jednotky na zkušebně motorů Walter za podmínek statického režimu (nulová dopředná rychlost) dávaly výsledky celkem v souladu s teoretickými výpočty. To nebylo překvapivé, ovlivnění zástavbou se projevuje daleko více při vlastním letu. Replika letounu Avia poprvé vzlétla na konci května 2007. Vrtule se projevovala jako těžší, motor při takovém zatížení nedotáčel své povolené maximum cca o 100 otáček za minutu. S touto situací se při návrhu počítalo a byl už rozpracován postup dodatečné úpravy vrtule odlehčením. Jediným možným způsobem je mírné zeštíhlení listů zmenšením jejich šířky (hloubky profilů), a to seříznutím části u odtokové hrany. Uvažovány a propočítány byly různé varianty, samotná úprava geometrie se provádí ručně a ovšem s co největší pečlivostí tak, aby nedošlo k výraznějším rozdílům u obou listů a vzniku aerodynamické i hmotové rozváženosti. Vždy se ale jedná o poměrně nepříznivý zásah do původní profiláže. Celá operace proběhla s jistou opatrností na dva kroky s dílčím letovým ověřením a výsledkem je dosažení požadovaného využití výkonových možností motoru.

Replika letounu Avia B.H.5 s novodobými poznávacími značkami OK-BOS absolvovala během podzimu komplexní program záletu pro schválení letounu a jeho provozu Úřadem pro civilní letectví ČR a už v příští sezóně bude ozdobou mnoha leteckých dnů.



*Obr. 10 Replika letounu Avia B.H.5 s vrtulí V238 vyrobenou ve VZLÚ
(foto E. Všečka, HLRČS)*

Literatura

Bližší informace o replice letounu Avia B.H.5 a její stavbě:

- [1] Letectví+Kosmounautika, 2004, roč. 80, č. 5
- [2] Letectví+Kosmounautika, 2005, roč. 81, č. 5
- [3] Letectví+Kosmounautika, 2007, roč. 83, č. 7
- [4] AeroHobby, 2007, roč. 4, č. 3
- [5] <http://historicflight.cz>
- [6] <http://avia.vyrobce.cz>