

č. 9 / 2009



Toto číslo elektronického sborníku obsahuje příspěvky přednesené na VIII. semináři VZLÚ - Věda, výzkum a vývoj v českém leteckém průmyslu, jehož téma bylo "Nové poznatky v oblasti materiálů, technologií, zkoušek a aplikací kompozitů v leteckém průmyslu ČR".

ISSN 1801 - 9315

TRANSFER

Výzkum a vývoj pro letecký průmysl Elektronický sborník VZLÚ, a.s. Číslo 9, duben 2009, 4. 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 (<u>dudek@vzlu.cz</u>)

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

© 2009 VZLÚ, a.s.

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

8. vědeckotechnický seminář

Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. uspořádal dne 9. dubna 2009 vědecko-technický seminář na téma "Nové poznatky v oblasti materiálů, technologií, zkoušek a aplikací kompozitů v leteckém průmyslu ČR".

Kompozity a letecký průmysl byly, jsou a budou vždy spojeny s pojmem výrazného dynamického růstu ve všech výzkumných, vývojových a výrobních oblastech. Kompozity ve všech podobách učinily za poslední období v leteckém průmyslu ve všech kategoriích letadel podstatný krok, což se týká i stavu v ČR.

Předložený program je už pátým ročníkem semináře VZLÚ na téma – Kompozity v leteckém průmyslu ČR.

Během roku byla řešena zajímavá témata v této oblasti. Letos je tématika semináře soustředěna opět na širší oblast zájmu, tj. jak materiálů a technologií, tak zkoušek a aplikací. Jde opět o nové informace, nové pohledy na trendy v oboru a zároveň o prezentaci současných výsledků činností v zajímavých technických tématech na vybraných pracovištích v ČR. V posledních letech jsou v ČR realizovány významné výrobní programy zahraničních společností v oboru kompozitních konstrukcí a řešeny výzkumně-vývojové projekty v rámci RP EU. I k této nové situaci je v tématech seminářů přihlédnuto.

Jednodenní setkání ve VZLÚ je významným kontaktním místem setkání odborníků z různých podniků z českého leteckého průmyslu, akademických pracovišť, státních úřadů, armády ČR a zároveň pracovníků LAA ČR. Přínosem pro každého účastníka je získání přehledu, zhodnocení stavu a možnost diskuse k aktuálním problémům.



3

Obsah sborníku

- 5 Monitorování stavu zatěžované kompozitní konstrukce metodou akustické emise J. Běhal, VZLÚ, a.s., Praha
- **13 Spojování vyztužených termoplastů svařováním** J. Křena, Letov letecká výroba, s.r.o., Praha
- 21 Popis recyklačního procesu tepelného rozkladu významných termosetických polymerních kompozitních matric, teplotní oxidační rozklad vyvíjený ve VZLÚ, a.s. *Z. Mašek, B. Štekner, K. Cihelník, VZLÚ, a.s., Praha*
- **33 Zkoušky únavového chování segmentu křídla** J. Juračka, P. Augustin, V. Koula, LÚ VUT Brno
- 46 Environmentální zkoušky pokrokových nátěrových systémů kompozitových konstrukcí s uhlíkovou výztuží. Metodika zkoušek *M. Pazderová, VZLÚ, a.s., Praha*
- 51 Podvozkový kompozitní nosník malého dopravního letounu. Výroba a zkoušení
 V. Pompe, F. Martaus, V. Snop, VZLÚ, a.s., Praha
- 63 Celokompozitní trup malého dopravního letounu. Konstrukce, technologie, zkoušení (část 1) *P. Průcha, LA composite s.r.o.*
- 75 Vysokomodulové grafitové kompozitní konstrukce, 3D struktury, aplikace na vinutém nosníku O. Uher, Compotech s.r.o.

4

Monitorování stavu zatěžované kompozitní konstrukce metodou akustické emise

Jiří Běhal

Metodou akustické emise je monitorován stav konstrukce během pevnostní zkoušky. Diskutovány jsou některé charakteristické rysy měření akustické emise při zatěžování kompozitních materiálů a identifikace probíhajícího porušování materiálu.

Úvod

Pevnost konstrukcí bývá ověřována při experimentech. V laboratorním prostředí jsou simulovány provozní podmínky a je sledována odezva zkoušené konstrukce na aplikované zatížení. Mezi sledované parametry patří tuhost zkušebního kusu, poloha kritických míst a pevnost konstrukce.

Pro monitorování stavu zkušebního kusu se používají prostředky Structural Health Monitoring (SHM). Mezi metody SHM osvědčené při pevnostních zkouškách draku letecké konstrukce patří i metoda akustické emise, která vykazuje značnou flexibilitu ve smyslu široké řady konstrukčních materiálů, množství informací plynoucí z analýzy experimentálních dat i vlastní aplikaci při zkouškách nových konstrukcí s předem neznámými vlastnostmi.

Metoda akustické emise

Akustickou emisí (AE) se rozumí uvolnění elastické vlny, která se šíří od svého zdroje materiálem konstrukce. Fyzikálními zdroji akustické emise jsou např. tření volných ploch dvou těles nebo porušování struktury materiálu. Terminologii používanou při zkoušení akustickou emisí definuje norma [1]. Při zkoušení metodou akustické emise je na povrch zatěžované konstrukce umístěna soustava piezoelektrických snímačů. Elastická vlna je v nich přeměněna na elektrické napětí a měřený signál je zpracován v analyzátoru, obr.1.

Při monitorování stavu zatěžované konstrukce vyrobené z vlákny vyztužených kompozitů jsou metodou akustické emise nejčastěji řešeny úlohy:

- lokalizace kritického místa,
- určení kritického zatížení pro lokální oblast,
- predikce dosažení mezního stavu únosnosti,
- dokumentace šíření poškození.



Obr. 1 Analyzátor akustické emise

Samotné měření akustické emise je čistě nedestruktivní, snímače jsou na povrch zkušebního tělesa obvykle lepeny nebo je použit kontaktní gel. Průměr kontaktní plochy snímače se pohybuje v řádech mm. Se současným vybavením lze zaznamenávat velmi rychlé děje (analyzátor rozlišuje µs) i dlouhodobá měření [2].

Proces porušování kompozitních materiálů analyzuje např. [3]. Detekci probíhajícího porušování pomocí akustické emise prezentuje např. [4]. Podle energie události, maximální amplitudy a délky je rozlišováno porušování vláken, matrice i jejich vzájemné rozlepování [5]. Souhrnné pojednání o úspěšných aplikacích podává [6]. Dále budou popsány některé charakteristické rysy identifikace poškození nosného systému kompozitní konstrukce při zkoušce statické pevnosti (global approach) a možnosti dokumentace šíření delaminace (local approach).

Predikce ztráty únosnosti

Jednoduché zkoušky statické pevnosti konstrukce se realizují při konstantní rychlosti zatěžování. Výsledkem je hodnota dosažené pevnosti, při které konstrukce ztratila schopnost dále přenášet aplikované zatížení. Protože cena zkušebního kusu je u větších konstrukcí velmi vysoká a zkoušku nelze s daným kusem již opakovat, bývá zatížení obvykle zvyšováno po krocích, mezi kterými probíhají podrobná měření aktuálních deformací tělesa, lokálních napětí a další dokumentace průběhu zkoušky. Události AE detekujeme při růstu zatížení jako důsledek přerozdělování napětí v nosném systému a jako projev stálých zdrojů typu tření mezi pohyblivými plochami dílů, když je zkušební kus při změně zatížení deformován.

Při přechodu na novou hladinu zatížení pozorujeme zpravidla prudké zvýšení emisní aktivity a její postupné ustávání při výdrži na hladině. Od diagnostického systému očekáváme indikaci výskytu mimořádné emisní aktivity, která bude znamenat překročení elastického stavu materiálu a porušování některého prvku nosného systému konstrukce. Při první aplikaci zatížení předpokládáme exponenciální závislost počtu emisních událostí na zatížení materiálu. Přírůstek počtu AE událostí můžeme vyjádřit jako

$$\hat{R}_{L}^{i} = n_{AE}^{i} - n_{AE}^{i-1} = e^{\alpha L^{i} + \beta} \cdot \left(e^{\alpha \left(L^{i} - L^{i-1} \right)} - 1 \right)$$

kde *R* je přírůstek počtu detekovaných událostí, L je hladina zatížení v daném časovém okamžiku a i je pořadí v sekvenci měření, resp. vyhodnocování. Hodnoty parametrů α a β odhadneme z chování konstrukce na nižších hladinách napětí a při dalším chodu zkoušky je můžeme průběžně upřesňovat. Při výdrži na hladině zatížení pozorujeme postupný útlum emisní aktivity způsobený uváděním soustavy do rovnovážného stavu. Pro útlum předpokládejme exponenciální průběh v čase

$$\hat{R}_{att}^{i} = R_{att}^{i-1} \cdot e^{\gamma(t^{i} - t^{i-1})}$$

kde t_i-t_{i-1} je časový interval, po kterém změny vyhodnocujeme a γ určuje rychlost útlumu. Emisní aktivitu zkušebního kusu během aplikace zatěžovacího profilu s výdrží na hladinách předpokládáme jako součet příspěvků od dílčích vlivů:

$$\hat{R}^i = \hat{R}_L^i + \hat{R}_{att}^i$$

Vztah by bylo možné dále upřesňovat, např. členem zohledňujícím prosté zvyšování hladiny zatížení (opakování kmitu), rychlost zatěžování (nelineární vliv tření), Kaiserův efekt (emisní aktivita až po překročení předcházející špičky zatížení) a jeho časovou relaxaci, Felicity jev (emisní aktivita již na nižších hladinách zatížení) při opakovaných cyklech zatížení atd. Kriterium pro detekci mimořádného stavu formulujeme jako rozdíl předpokládaného a skutečného přírůstku počtu AE událostí v časovém intervalu, který překročí prahovou hodnotu

$$\mathcal{E}_R = R^i - \hat{R}^i$$

Překročení prahové hodnoty vyhodnocujeme jako alarm, na který můžeme reagovat změnou dalšího průběhu zkoušky. Zaznamenávaná emisní aktivita zkušebního kusu se nám redukuje na ojedinělé mimořádné události. Situaci při zatěžování podvozkového nosníku znázorňuje obr. 2. Kritická hladina alarmu byla nastavena tak, aby v počáteční etapě zatěžování nedocházelo k falešným indikacím. Ojedinělý výskyt alarmu je následován rychlým uklidněním emisní aktivity, zatímco dosažení kritické poruchy předchází masivní indikace porušování konstrukce s progresivním nárůstem emisní aktivity již při výdrži na předcházející hladině.

Ztráta únosnosti bývá indikována s předstihem cca 0,5 s u jednoduchých těles (ohýbaný nosník) až 2 s u staticky neurčitých konstrukcí (torzní skříň křídla). Pokud uvažujeme reakci řídícího systému v řádech cca 100 ms [7], poskytuje nám metoda AE informaci o dosažení mezního stavu konstrukce v předstihu dostatečném pro odlehčení zkušebního kusu právě před ztrátou jeho integrity.

Jednotlivé události ve smyslu poruch určitého prvku nosného systému je možné při použití vícekanálového analyzátoru lokalizovat a určit oblast, kde k porušování materiálu došlo [8].



Obr. 2 Výskyt mimořádné emisní aktivity při zatěžování kompozitního nosníku

Šíření delaminace

Mezilaminární lomová houževnatost se měří při šíření delaminace ve standardních [9] DCB tělesech (Double Cantilever Beam). Těleso z vrstveného kompozitu je zatěžováno modem I a aktuální délku delaminace je v řezu možné odečítat vizuálně.



Obr. 3 Zkušební těleso pro určení mezilaminární lomové houževnatosti

Snímače akustické emise byly umístěny u kořene a na konci tělesa ve vzdálenosti 200 mm s cílem průběžně dokumentovat postup čela delaminace. K šíření delaminace docházelo ve skocích. Při větších skocích byla délka odečítána i vizuálně a její hodnota byla použita pro výpočet mezilaminární lomové houževnatosti. Metodou akustické emise bylo možné vyhodnocovat aktuální délku delaminace průběžně v dobré shodě s vizuální metodou, obr. 4.



Obr. 4 Dokumentace šíření delaminace

Monitorování šíření poruchy lepeného spoje zatěžovaného obvyklým modem II (smyk) je prezentováno např. v [10].

Pro dokumentaci šíření delaminace v daném směru je používán jeden pár snímačů umístěný tak, aby čelo delaminace leželo mezi nimi. Poloha zdroje AE události se určí na základě časového rozdílu v příchodu signálu do jednotlivých snímačů a známé rychlosti šíření elastické vlny materiálem tělesa. Při požadavku na plošné mapování poškozené oblasti lze použít soustavu více snímačů a hyperbolickou lokalizaci zdroje AE události.

Diskuze

Vysoký útlum kompozitních materiálů lze s výhodou využít při zónové lokalizaci emisního zdroje, kdy je u vícekanálové soustavy snímačů předpokládána poloha kritického místa v blízkosti snímače vykazujícího nejvyšší aktivitu. V případě jednoduchých tvarů zkušebního tělesa nebo konečně-prvkového modelu je možné sestavit algoritmus určení emisního zdroje zohledněním relativní úrovně aktivit všech snímačů. Aktivitou zde rozumíme buď četnost detekovaných událostí nebo amplitudu událostí.

Při zkouškách v prostředí je monitorování zkušebního kusu možné výhradně přístrojovými metodami. Metoda akustické emise byla úspěšně aplikována v prostředí zvýšené teploty (70°C) i vlhkosti (90%) a během kondiciování (235h) si

instalovaný AE systém udržel schopnost plnohodnotné funkce. Při zatěžování zkušebního kusu byla rozpoznána dvě kritická místa a průběžně byl dokumentován proces jejich porušování, obr.5. Místo na PS se jevilo po celou dobu jako aktivnější, v závěru zkoušky však byla indikována sekvence rostoucí četnosti AE událostí lokalizovaných do oblasti LS, obr.6, kde následně skutečně došlo k lomu zkušebního kusu [11]. Přítomnost poruchy i v oblasti PS byla později potvrzena vizuálně.



Obr. 5 Proces porušování materiálu v kritických místech konstrukce



Obr. 6 Rostoucí emisní aktivita indikuje blížící se lom v oblasti LS

Závěr

Stav zatěžované kompozitní konstrukce lze monitorovat metodou akustické emise. Získané informace jsou použity pro dokumentaci a analýzu procesu porušování konstrukčního materiálu, spojů i celých konstrukcí. On-line vyhodnocené indikace alarmu by bylo možné použít pro predikci blížícího se kritického stavu konstrukce a k operativnímu řízení chodu zkoušky. Zatěžování by tak bylo možné ukončit před ztrátou únosnosti a zkušební kus by zůstal zachován pro detailní analýzu kritického místa, příčiny a velikosti poškození.

Obvyklou úlohu sledování šíření delaminace v tělese z vrstvených kompozitů je rovněž možné realizovat pomocí metody akustické emise. Přesnost určení čela delaminace je srovnatelná s vizuálním pozorováním trhliny v řezu. Metoda AE navíc přináší průběžnou dokumentaci šíření delaminace při pevném umístění snímačů a vzdálený přenos měřených signálů.

Poděkování

Tento projekt byl realizován za finanční podpory ze státních prostředků prostřednictvím Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy, projekt Výzkumné záměry MSM 0001066903.

Literatura

- [1] ČSN EN 1330-9: *Nedestruktivní zkoušení Terminologie Část 9: Termíny* používané při zkoušení akustickou emisí; Český normalizační institut 2001, 24s.
- [2] Běhal, J., Horák, V.: *Výzkum efektivních metod nedestruktivní detekce poruch leteckých konstrukcí*; Zpráva R3979, VZLÚ 2006, str. 9-23
- [3] Laš, V., Zemčík, R., Kroupa, T.: Numerické simulace porušení kompozitů a jejich experimentální ověření; Sborník TRANSFER 3/2007, VZLÚ 2007, ISSN 1801-9315, str. 42-67
- [4] Hahn, P.A. a kol.: An Algorithm for Life Time Prediction of Fatigued Loaded CFRP-Structures Derived from the Rate of Acoustic Emission; Proceedings of the Fourth European Workshop, Krakow 2008, ISBN 978-1-932078-94-7, str. 1173-1182.
- [5] Cokonaj, V. a kol.: Structural Health Monitoring Algorithms Set; CESAR-AERN-D2.4.2-2 report, Aernnova 2008, str. 25
- [6] Moore, P.O. a kol.: Nondestructive Testing Handbook Vol. 6 Acoustic Emission Testing; American Society for Nondestructive Testing 2005, ISBN 1-57117-106-1, 446 s.
- [7] Běhal, J.: Modelová zkouška ocasních ploch; Zpráva R-3307/01, VZLÚ 2001, str. 62
- [8] Vilain, T.: Platform 3 Presentation; ALCAS Year 4 Annual Review, Filton 2009

- [9] ISO 15024:2001(E): Fibre-reinforced plastic composites Determination of mode I interlaminar fracture toughness, G_{IC}, for unidirectionally reinforced materials, ISO 2001, str.3
- [10] Běhal, J., Makarov, V.: Health Monitoring of Composite Patch by Acoustic Emission Method; the 7th International Exhibition - Conference NDT and Technical Diagnostics in Industry, Moskva 2008, ISBN 978-5-94275-394-8, str. 42-43
- [11] Vavřík, J. a kol.: *Statická pevnostní zkouška zadního kompozitního podvozkového nosníku X2*; Protokol P-PK-106/ZK/2008, VZLÚ 2008, str. 32-34

Spojování vyztužených termoplastů svařováním

Ing. Josef Křena (Letov letecká výroba, s.r.o.)

Je podán stručný přehled a porovnání metod spojování kompozitových dílů. Dále je pak pojednáno o svařování vyztužených termoplastů s popisem dvou metod. Pro experimentální vývoj je použita odporová metoda. Cílem bylo nalézt vhodné procesní parametry a vyrobit vzorky pro měření smykové pevnosti spojů. Byla analyzována struktura spoje i charakter lomové plochy po zkoušce. Dosažené smykové pevnosti na vzorcích různého typu byly porovnány se smykovou interlaminární pevností samotného materiálu.

Spojování kompozitových dílů

Je známým faktem, že kompozitová konstrukce by měla být navržena s maximální integrací tak, aby měla minimum spojů. Přesto se však spojům není možné u většiny konstrukcí vyhnout. Právě spoje bývají velmi často kritické místo celé konstrukce, a tak na volbě typu spoje včetně jeho správném technologickém provedení a dimenzování velmi záleží.

V případě vyztužených termosetů byly základní dvě metody spojování, a to jednak mechanickými prvky (nýty nebo šrouby), jednak lepením. Použití termoplastové matrice přineslo další možnou technologii, kterou je teplotavné spojování, jenž se v literatuře stručně nazývá svařování. Následující tabulka shrnuje parametry jednotlivých metod.

Metoda	Mechanické prvky	Lepení	Svařování	
Náklady	Pracnost přípravy otvorů	Pracnost přípravy povrchů	Nízká pracnost	
Rozložení zatížení	Diskrétní (koncentrace napětí)	Spojité rozložení	Spojité rozložení	
Určení	Všechny kompozity	Nevhodné pro chemicky odolné termoplasty	Pro všechny termoplasty	
Kontrola kvality	Vizuální snadná	NDT odhalí fyzické vady ale nikoli kvalitu adheze	NDT odhalí fyzické vady, jimiž je dána adheze	
Nevýhoda	Riziko koroze	Nerozebiratelný spoj	Obtížně rozebiratelný spoj	

Tabulka 1. Charakteristiky spojů kompozitů

Klasické mechanické prvky (šrouby nebo nýty) vyžadují poměrně velmi přesné otvory, speciální spojovací prvky a nářadí. Spoj je relativně spolehlivý a snadno kontrolovatelný. Rizikem je elektrochemická koroze mezi kovovým spojovacím prvkem a uhlíkovými vlákny. Lepený spoj je velmi citlivý zejména na přípravu povrchu pod lepidlo. V případě semikrystalické matrice je adheze nízká a pouze kompozity s termosetickým nebo amorfním termoplastovým pojivem dosahují uspokojivé adheze lepidla. Velkým problémem stále zůstává kontrola. Známé metody mohou detekovat vady typu poresita nebo neprolepení. Není možné však posoudit adhezní pevnost.

Svařovaný spoj prakticky nevyžaduje povrchovou přípravu. Protože po roztavení pojiva v místě kontaktu se oba lepené díly spojí kompaktním splynutím matrice, tak adhezní rozhraní ve svařeném spoji zmizí. Pro svařování jsou vhodnější semikrystalické termoplasty, ale tuto metodu je možné aplikovat i u amorfních.

Metody svařování

Metody svařování se rozlišují podle způsobu ohřevu materiálu v kontaktní ploše. Základní principy jsou odporové a indukční.

Odporové svařování

Princip spočívá v ohřevu vodivé vrstvy vložené do místa spoje elektrickým proudem. Vodivou vrstvou je obvykle kovová síť, ale může jí být také uhlíková tkanina. Touto metodou se poměrně snadno docílí rovnoměrného rozložení teploty v ploše spoje.

Indukční svařování

Ohřev se docílí vířivými proudy, které se indukují pomocí vysokofrekvenčního elektromagnetického pole vytvořeného cívkou umístěnou v blízkosti spoje. Vířivé proudy se mohou indukovat pouze ve vodivém materiálu. Jestliže je výztuží kompozitu uhlíková tkanina, tak je pro tento účel postačující. Pokud je kompozit vyztužený pouze skleněnými vlákny, tak se musí do místa spoje umístit kovová síť nebo uhlíková tkanina. Tato metoda je vhodná pro automatizaci procesu, která umožní, aby plocha spoje mohla mít i poměrně složitý prostorový tvar.

Experimentální program

Dále popsané vývojové práce byly provedeny s využitím odporového svařování. Spojovaným materiálem byly desky z kompozitu s uhlíkovou výztuží a pojivem PPS (polyfenylensulfid).

Příprava vzorků

Skladba vrstev spoje je zřejmá z obrázku 1. Materiál izolační podložky bude dále popsán. Folie PPS je z materiálu shodného s pojivem kompozitu avšak bez výztuže. Ocelová síť má plátnovou vazbu a v experimentech byly použity dvě varianty.

Typ 265/50 (průměr drátu [nerez] 0,05 mm, světlost mezi dráty 0,265 mm) Typ 67/25 (průměr drátu [nerez] 0,025 mm, světlost mezi dráty 0,067 mm) Zobrazená sestava je umístěna na základně a na horní izolační podložku působí přítlačná deska přípravku, která vyvozuje kontaktní tlak. Pro popisované experimenty byla použita metoda fixace konstantní silou.





Parametry procesu

12,5 mm

Obr. 1 Řez sestavou svařovaného spoje

Na obrázku 2 je pohled na sestavu spoje, kde je zřejmé uspořádání topné sítě, která musí vybíhat ze spoje, aby bylo možné připojit svorkami zdroj elektrického proudu.

Pro experimenty byl použit laboratorní zdroj QPX1200, který má rozsah napětí 0 – 60 V proudu 0 – 50 A Pro práci byl využit režim konstantního napětí i konstantního proudu.

Nejdůležitějšími parametry jsou měrný tepelná výkon [kW/m²] a doba ohřevu. Teplota tavení pojiva je 275°C. Důležité je, aby folie PPS a pojivo na povrchu v kontaktu byly zcela roztavené tak, aby se vytvořil kompaktní spoj. Naproti tomu roztavení kompozitového dílu v plné tloušťce je nežádoucí, protože to vede ke změně tloušťky a deformaci okolí spoje. Výše uvedené parametry je nutné nalézt vždy pro danou konfiguraci spoje. Ta je dána zejména typem a tloušťkou kompozitu ale i materiálem izolační podložky.

Zkouškami prošlo několik materiálů pro izolační podložku. Použila se keramika, epoxid se skleněnými vlákny a fenolické pojivo s vlákny.

V grafu 1 je možno posoudit vliv parametrů procesu na teplotu v kompozitu C/PPS s 5 vrstvami tkaniny o celkové tloušťce 1,66 mm. Kompozitová deska má navíc ještě na obou površích skleněnou tkaninu US120 (pro takový kompozit je dále používáno označení A05 2G). Teplota byla měřena termočlánky umístěnými v kompozitu ve

vzálenosti cca 0,4 mm od kontaktní plochy, proto měřená teplota byla vždy nižší než ve vlastním spoji. Umístění termočlánků přímo do spoje nebylo možné z důvodu zamezení elektrického kontaktu se sítí.



Graf 1. Vliv procesních parametrů na teplotní průběh

Z grafu je zřejmý vliv topného výkonu i fenolické podložky s větším tepelným odporem.

Výroba vzorků

Pro zkoušku pevnosti ve smyku byla zvolena konfigurace zkušebního tělesa definovaná v normě ASTM 1002 pro zkoušky lepených spojů jednoduše přeplátovaných. Bylo vyrobeno několik sad vzorků lišících se parametry procesu svařování a skladbou spoje.

Označení sady	Typ kompozitu	Folie PPS	Síť	Řízený parametr	Plošný topný výkon	Doba ohřevu [s]
5	A05 2G	0,08 mm	67/25	17 V	48 kW/m ²	150
9	A05 2G	0,08 mm	67/25	7A	49 kW/m ²	150
10	A05 2G	0,08 + 0,08 mm	265/10	14 A	45 kW/m ²	150

Tabulka 2. Parametry sad vzorků pro smykovou zkoušku

Vzorky jedné sady byly vždy vyrobeny v panelu (viz obr. 3) v jedné operaci a následně byly rozřezány vodním paprskem s abrazivem (paser). Tak bylo zajištěno, že nebudou poškozeny mechanickým obráběním. Kontaktní tlak při svařování byl 0,4 MPa.



Obrázek 3. Svařený panel pro výrobu smykových vzorků

Zkoušky pevnosti ve smyku

Byly vyhodnoceny pevnosti jednotlivých vzorků a standardní statistické parametry. Dále byly měřeny a vypočteny tloušťky kompozitu ve spoji a tloušťka vlastního spoje a spáry. Z posouzení lomové plochy byl odhadnut plošný rozsah kohezní poruchy a také její typ. Lom mezi skleněnou tkaninou a ocelovou sítí je označen G/Fe a lom mezi skleněnou a uhlíkovou tkaninou je označen G/C. Výsledky jsou v tab. 3.



Obrázek 4. Řez kompozitem v místě spoje (nerez síť je bílá)

Sada	Šířka	Tlouš.	Tlouš.	Tlouš.	Tlouš.	Přeplát.	Smyková	Aritm.	Stand.	Rozsah	Místo
		1.	2.	spoje	spáry		pevnost	průměr	odchylka	koheze	lomu
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	MPa	MPa	MPa		
5.1.	25,55	1,67	1,66	3,35	0,02	11,18	20,78			90	G/C
5.2.	25,4	1,66	1,65	3,34	0,03	11,45	25,97			100	G/C
5.3.	25,42	1,67	1,65	3,34	0,02	11,43	25,80			100	G/C
5.4.	25,4	1,66	1,65	3,32	0,01	11,52	24,91			100	G/C
5.5.	25,38	1,65	1,64	3,3	0,01	11,04	23,05	24,10	1,96	100	G/C
9.1.	25,51	1,69	1,69	3,45	0,07	14	23,09			100	G/C
9.2.	25,59	1,68	1,67	3,39	0,04	14,1	22,66			100	G/C
9.3.	25,58	1,67	1,66	3,41	0,08	13,6	23,66			100	G/C
9.4.	25,58	1,66	1,67	3,4	0,07	13,4	23,97			100	G/C
9.5.	25,51	1,65	1,66	3,37	0,06	13,28	25,22	23,72	0,88	100	G/C
10.1.	25,54	1,67	1,66	3,43	0,1	13,1	19,62			100	G/Fe
10.2.	25,51	1,66	1,66	3,41	0,09	13,8	19,66			100	G/Fe
10.3.	25,49	1,65	1,66	3,4	0,09	13,3	20,03			100	G/Fe
10.4.	25,52	1,65	1,66	3,38	0,07	13,1	20,82			100	G/Fe
10.5.	25,52	1,64	1,65	3,38	0,09	13	22,23	20,47	0,98	100	G/Fe

Tabulka 3. Charakteristiky a pevnosti smykových vzorků





Obrázek 5. Lomová plocha typu G/C u vzorku 9.5.



Obrázek 6. Lomová plocha typu G/Fe u vzorku 10.5.

Pro daný typ kompozitu byla také experimentálně měřena smyková pevnost mezi jeho vrstvami na vzorku s jednoduchým a dvojitým přeplátováním (na kompaktním nesvařovaném vzorku). Výsledky jsou v tab. 4.

Šířka vzorku	Pevnost ve smyku				
	Jednoduše přeplátovaný	Dvojitě přeplátovaný			
[mm]	[MPa]	[MPa]			
12,7	16,54	23,48			
20	17,93	24,14			

Tabulka 4. Smyková interlaminární pevnost kompaktních kompozitů C/PPS

Souhrn

Z výsledků je zřejmé, že smyková pevnost svařeného spoje je prakticky shodná s interlaminární smykovou pevností dvojitě přeplátovaného spoje samotného materiálu C/PPS. Při optimálních technologických parametrech je mikrostruktura spoje bez vad a rozptyl smykových pevností je relativně malý.

Literatura:

[1] Stavrov, D., Persee, H.E.N.: *Resistance Welding of Thermoplastic Composites* - an Overview; 2004 Elsevier.

Popis recyklačního procesu tepelného rozkladu významných termosetických polymerních kompozitních matric, teplotní oxidační rozklad vyvíjený ve VZLÚ, a.s.

Ing. Zdeněk Mašek, Ing. Bedřich Štekner, Ing. Karel Cihelník

Technologie tepelného oxidačního rozkladu uhlíkových vláknových termosetických kompozitů. Chování termosetických plastů v průběhu rozkladu. Produkty rozkladu. Vlastnosti recyklovaných vláken po aplikaci rozkladného procesu ve srovnání s původními vlákny. Aplikace recyklátů do nových výrobků. Vlastnosti nových výrobků.

Úvod

Problematika recyklace kompozitních materiálů s termosetickou matricí prošla vývojem. Základní myšlenkou recyklace je oddělení vláknové výztuže kompozitů od polymerní matrice. Jako řešení byla zvolena cesta tepelného rozkladu. Řešení bylo nastartován stavbou experimentálního zařízení pro tepelný rozklad materiálu. Zařízení VZLU bylo navrženo tak, aby provádělo tepelný rozklad materiálů v inertním i oxidačním prostředí a současně aby dokázalo monitorovat proces tepelného rozkladu. První výsledky ukázaly, že touto cestou lze získat skelnou i uhlíkovou výztuž. Aramidovou výztuž se pochopitelně získat nepodařilo, aramidová tkanina neodolá vysokým teplotám potřebným pro rozklad polymerní matrice. Výsledky rovněž ukázaly, že pyrolýzní rozklad (v inertní atmosféře dusíku) produkuje vlákna znečištěná zuhelnatělou polymerní matricí a kdežto oxidační rozklad produkuje čistá vlákna jen s nepatrnými zbytky popela. Použití dusíku rovněž zhoršuje ekonomiku procesu. Ukázalo se rovněž, že skleněná vlákna po tepelném rozkladu kompozitu výrazně ztratila na svých vlastnostech, takže jako recyklát se zpevňující funkcí ho už nelze použít. Vývoj nakonec vyústil v zaměření na recyklaci materiálů vyztužených cennými uhlíkovými vlákny cestou termooxidačního rozkladu. Tento přístup je zajímavý nejen z environmentálního hlediska, ale rovněž z hlediska ekonomického.

Experimentální zařízení RoKo1 vyvinuté ve VZLÚ

Základ zařízení je teplotní komora (pec), ve které dochází k teplotnímu rozkladu kompozitních materiálů. Materiál je umístěn ve ocelovém koši, který je postaven na podstavci připojenému k vážnímu systému. Plynné produkty jsou vedené potrubím

přes škrtící klapku do kondenzační komory chlazené vzduchem a dále pokračují do filtračního systému. Maximálně lze v peci dosáhnout teploty 750° C.

Sledované parametry

Průběh teplot rozkladu lze předem naprogramovat. Lze nastavit rychlost růstu teploty, dobu teplotní výdrže. V průběhu rozkladu je registrován úbytek hmotnosti vzorku a teplota v peci. Na výstupu z chladiče lze provádět měření obsahu základních plynných složek : O₂, CO, CO₂, NOx a SO₂.

Model procesu v TUPO

Návrh procesu rozkladu byl modelován v TUPO (Technický ústav požární ochrany MV-ČR) s ohledem na toxickou vydatnost škodlivin. Požární model spočíval ve spalování určených vzorků při pevně stanovené teplotě a s řízeným poměrem mezi objemem vzduchu a hmotností vzorku. Poté byl proveden pokus se spalováním s dostatečným přísunem kyslíku i se spálením v inertní atmosféře dusíku. Byly analyzovány hlavní plynné toxikanty a spočtena toxická vydatnost, označovaná LC50. Toxická vydatnost byla vyjádřena jako množství látky, jejímž spálením vznikne koncentrace škodlivin postačujících k usmrcení 50 % zkušebních zvířat.

Model spalování TUPO

Schema:

- vzorek látky => elektrická pec + N₂/O₂ + 600-800 °C => kvantitativní analýza plynů (CO, CO₂, HCN, HCl, org. látky) => Toxická vydatnost
- Toxická vydatnost látky (LC50,30min) = množství látky, jejímž spálením vznikne takové množství toxických plynných látek, které v objemu 1 m³ a po stanovenou dobu expozice usmrtí 50 % zkušebních zvířat.

Toxická vydatnost vybraných materiálů dle tabulek TUPO					
Materiál	Teplota hoření ° C	Přítomnost O ₂	LC50,30min g/m ³	Hlavní toxikanty	
Dřevotříska+30% minerální plnivo	800	0,25	57,2	CO, CO ₂ , HCN	
PVC+ ftaláty	800	0,38	27,6	CO, CO ₂ , HCl, benzen, toluen	
PA 800 0,32 10,		10,9	CO, CO ₂ , HCN, benzen,benzonitril		
Polykarbonát	800	0,72	56	CO, CO ₂ , benzen	
PP (koberec)	800	1,91	25,6	CO, CO ₂ , benzen, styren	
Dřevo - smrk 800 0,49 7		78,9	CO, CO ₂		
PS pěna	800	0,81	15,8	CO, CO ₂ , benzen, styren	
PU pěna	800	0,66	21,9	CO, CO ₂ , HCN, benzen, toluen CO_2	
Vzorky termosetických vláknových kompozitů					
Epoxy/ CF	600	0,35	27,5	CO, CO ₂ , HCN, HCl, toluen	
Fenol/GF 600 0,40 29,0 CO, CO		CO, CO ₂ , HCN, HCl, fenol			
BMI/CF 600		0,55	20,3	CO, CO ₂ , HCN, HCl, fenol, benzofuran	

Srovnání hodnot toxické vydatnosti je jen orientační, model spalování TUPO je odlišný od podmínek spalování aplikovaných v VZLU. Odlišnost spočívá v rychlosti a teplotě rozkladu. Vyvíjený postup spočívá v pomalém rozkladu za nízké řízené teploty.

Experimentální ověřené postupy

V současné době máme odzkoušeny materiálové kombinace uhlík-epoxid a uhlíkbismaleimid, probíhají testy s materiálovou kombinací sklo-fenol. Postup lze aplikovat na některé typy kompozitů s termoplastickou matricí (uhlík-PPS, sklo-PEI).

U každého odzkoušeného materiálu byl proveden návrh a optimalizace metodiky (postupu zpracování), která zahrnuje: teplotu zpracování Tz, nutnou dobu výdrže na teplotě Tz v závislosti na tlouštce materiálu, průběh teploty rozkladu,vliv velikosti a tvaru zpracovávaného dílu a umístění materiálu v zařízení.

Tvar a umístění materiálu

Laboratorně je doporučeno zpracovávat materiál deskovitého tvaru s co možná nejmenší tlouštkou. Běžně je ovšem možno zpracovat materiál do tloušťky 20 mm. Není vhodné zpracovávat sypký materiál, kvůli problémům s umístěním v peci a prouděním vzduchu a zplodin. Materiál je potřeba umisťovat tak, aby po všech jeho stranách docházelo alespoň k nějakému proudění vnitřní atmosféry zařízení, aby nebyla vytvořena teplotní bariera.

Teplotní křivka a teplota zpracování Tz

Pro kompozit typu uhlík-epoxid byla teoreticky a následně experimentálně zjištěna teplota zpracování Tz = 550° C, průběh teplotní křivky byl postupně experimentálně optimalizován, podle charakteru zpracovávaného kompozitního dílu (konkrétní typ pryskyřice, procento výztuže, způsob výroby).

Pro materiál uhlík-bismaleimid (BMI) byla určena teplota zpracování rovněž Tz = 550° C, postupnou optimalizací byl zjištěn optimální teplotní režim zpracování.



Teplotní křivky pro recyklaci epoxi kompozitů a BMI kompozitů

Doba výdrže na teplotě Tz

Doba výdrže na teplotě je funkcí tloušťky materiálu, závisí na ní, jak dokonale se materiál rozloží a jak znečištěná zůstane výztuž. Pro každý konkrétní testovaný materiál se musí závislost doby výdrže na tloušťce materiálu zjistit experimentálně.



Graf nutné výdrže na teplotě zpracování v závislosti na tlouštce materiálu pro materiály uhlík- BMI a uhlík-epoxid

Experimentálně bylo zjištěno, že teplota 550° C dává nejlepší vlastnosti recyklované výztuže z hlediska degradace povrchu vláken, materiálových úbytků a mechanických vlastností při současném dokonalém zplynování matrice, viz následující obrázky.



Vzorky kompozitů vypálené při různých teplotách



Znázornění hmotnostního úbytku kompozitních při různých teplotách zpracování

Kvalitativní model tepelně oxidačního rozkladu RoKo1

První nejjednodušší s kyslíkem je vyjádřena schema je často s hašením požáru. Schema procesu hoření musí být 3 vzduch a iniciační energie. znamená, že vznikající



představa o reakci látek požárním trojúhelníkem. Toto publikováno v souvislosti říká, že pro udržení a šíření činitelé: reagující látky – palivo, Třetí činitel v podstatě teplo právě hořícího materiálu

musí být účinně předáno materiálu ještě nehořícímu v takové míře, aby zvýšilo jeho teplotu nad zápalnou teplotu. Uvolňované teplo a jeho sdílení je rozhodující faktor pro rychlost šíření požáru. Účinným chlazením lze uhasit požár a naopak je-li palivo stěsnáno v rozžhaveném kotli, začne rychlost hoření vzrůstat do té míry, že o rychlosti hoření začnou rozhodovat další faktory, např. rychlost přístup vzduchu.

Mechanismus oxidačního rozkladu

Rozkládaný plast je umístěn v elektrické peci, ve které je řízený nárůst teploty. Růst teploty v peci je řízen programem, který nastavuje výkon topení dle teploty plynu odsávaného z pece. Z pece jsou odsávány zplodiny rozkladu a netěsnostmi je přisáván vzduch. Vzduch je přisáván ve výrazném stechiometrickém nadbytku, který udržuje nízkou koncentraci zplodin mimo rozsah hořlavosti. Program nárůstu teploty je volen tak, aby rozklad probíhal při nízké teplotě a aby vznikající reakční teplo nevyvolalo nekontrolovatelný nárůst reakční teploty. Termický oxidační rozklad se liší od běžného hoření tím, že není dosaženo iniciační teploty hoření.



Schematické znázornění procesu hoření a termického oxidačního rozkladu

Srovnání charakteristických znaků hoření a termického oxidačního rozkladu			
Hoření	Termický oxidační rozklad		
vysoká reakční teplota	nízká a řízená reakční teplota		
intenzivní uvolňování tepla	pomalé uvolňování tepla		
Uvolněné teplo iniciuje proces hoření	uvolněné teplo je odváděno přebytkem vzduchu a plynnými produkty rozkladu, nestačí iniciovat proces rozkladu		
Rychlost procesu je řízena přívodem vzduchu	Rychlost procesu je řízena teplotou		

Vzniklé i dodané teplo je odváděno proudem vzduchu a reakce rozkladu probíhá pomalu při teplotě, která nepatrně převyšuje teplotu atmosféry v peci. Teplotní gradienty mezi povrchem těles a teplotou uvnitř těles je malý. Model rozkladu předpokládá, že rozkladné reakce postupují od povrchu tělesa dovnitř a vytváří tak několik vrstev. Intenzita reakcí a tloušťky vrstev se mění s růstem teploty a s časem. Na začátku procesu je materiál tvořen pouze vrstvou nezreagovaného materiálu, kdežto na konci procesu už převládá inertní povrchová vrstva se zbytky oxidační vrstvy.

Reakční vrstvy dle modelu rozkladu

1) Inertní povrchová vrstva

Plastová matrice se zcela rozložila na plynné zplodiny, zůstává jen inertní výztuž, která je porézní a umožňuje difúzi vzduchu dovnitř a difúzi zplodin k povrchu.

2) Oxidační reakční vrstva

Reakce rozkladu probíhá, tepelný rozklad již natolik pokročil, že je se v materiálu vytvořily póry a je umožněna difúze vzduchu k rozkladnému procesu. Proces je výrazně exotermní.

3) Pyrolýzní reakční vrstva

Reakce rozkladu probíhá bez přístupu vzduchu, materiál buďto není ještě dostatečně porézní nebo proud pyrolýzních zplodin zabraňuje difúzi vzduchu. Tepelné zabarvení se předpokládá nevýrazné.

4) Vrstva nezreagovaného materiálu

Existuje přechodně na počátku procesu, kdy ještě není nastartován rozkladný proces.

Tok tepla a látky u tenkých těles



Tok tepla a látky u těles s odlišnou tlouštkou

V reakční vrstvě probíhá množství paralelních a následných reakcí, jejichž průběh je ovlivňován mnoha faktory. Obecně lze každou jednotlivou reakci popsat kinetickou rovnicí, jejíž rychlostní konstanta závisí na teplotě exponenciálně a reakční enthalpií. Rychlost rozkladné reakce závisí na teplotě přibližně exponenciálně a proto bude intenzita vyvíjeného tepla přibližně sledovat tuto exponenciální závislost. Na rozdíl od exponenciální závislosti reakční rychlosti na teplotě je odvod tepla z reakční zóny jednoznačně lineární funkcí teplotních gradientů v povrchové vrstvě materiálu. Tlouštka rozkládaného materiálu je faktorem, který ovlivňuje tok tepla v průběhu reakce a difúzi materiálu. Tenké materiály mají intenzivní výměnu tepla mezi povrchovou a reakční vrstvou a nevytváří vysoké teplotní gradienty uvnitř materiálu. Materiály s větší tlouštkou mají ztíženou výměnu tepla mezi povrchem a reakční vrstvou, neboť inertní vrstva vypálené výztuže působí jako tepelný izolátor. Kromě toho je vrstva vypálené výztuže dostatečně porézní, aby umožnila difúzi vzduchu k reakční vrstvě. Tepelná izolace na povrchu způsobuje zvýšení teploty reakce. Vyšší reakční teplota může proces rozkladu posunout mimo oblast stability a následně může i iniciovat hoření. Vzniku nestabilních stavů s nepřiměřeným růstem teplot uvnitř vzorků se předchází volbou teplotní křivky, která je volena s ohledem na množství a rozměrové parametry rozkládaných vzorků.



Stabilní a nestabilní stavy tepelného rozkladu

Produkty rozkladu při recyklaci termosetických kompozitů

Při teplotní degradaci materiálu jsou z polymerního řetězce nejdříve odštěpovány boční řetězce. Tyto dále reagují spolu a se vzduchem za vzniku dalších produktů. Následně dochází k nahodilému štěpení hlavních polymerních řetězců, příklad epoxidového polymerního řetězce a možných produktů rozkladu na obrázku. Rovněž může docházet k depolymerace produktu na původní mery.

Na obrázku je znázorněna část řetězce epoxidové pryskyřice a jsou vyznačeny úseky, které podléhají náhodnému štěpení. Tyto odštěpené úseky vytvářejí v podstatě molekuly produktů rozkladu.



Epoxidový polymerní řetězec a příklad následných produktů štěpení

Vlastnosti recyklovaných uhlíkových vláken

Vlastnosti recyklovaných vláken byly zkoušeny na Technické univerzitě v Liberci. Byly porovnávány vlastnosti vláken Virgin (tzn. nerecyklovaných) s recyklovanými při teplotách 550° C, 600° C a 650°C.



Porovnání fyzikálně-mechanických vlastností vláken Virgin a recyklovaných za různých teplot.

U vláken recyklovaných při 550° C dochází sice k poklesu pevnosti v tahu, ale ne k příliš výraznému, modul pružnosti je snížen asi na polovinu, naopak tažnost se výrazně zvýší. Z grafu je patrno, že čím vyšší teplota, tím větší materiálové úbytky vláken nastávají.

Délka recyklovaného uhlíkového vlákna je limitována rozměry experimentálního zařízení. Takže je možno upravit délku recyklovaného vlákna před zpracováním (řezání vzorku) nebo po zpracování (stříhání , mletí). Mletím dosud byla získána zatím vlákna 0,2 – 0,5 mm.

Aplikace recyklovaných uhlíkových vláken

V současnosti probíhají zkoušky aplikací recyklovaných vláken do termoplastů, do betonů, do geopolymerů a vodivých past, plánuje se aplikace výroby vodivého uhlíkového papíru.

Zkoušky aplikací do betonů

Byly zkoušeny aplikace vláken dlouhých 60 mm do klasických betonových směsí, tyto zkoušky se nezdařily, z důvodu nemožnosti rozptýlení vláken rovnoměrně do směsi, materiál tvořil shluky, motal se na míchací segmenty. Viz. obrázky. Zkoušky budou pokračovat, pracuje se na metodě rovnoměrného rozptýlení vláken do směsi. Dále probíhají zkoušky aplikace mletých vláken (délka cca max.0,5 mm) do vysokopevnostních betonových směsí, z těchto experimentů výsledky zatím nejsou. Zkoušky aplikací do betonů pro nás provádí Fakulta stavební ČVUT Praha.



Vzorky betonu ČVUT Praha obsahující uhlíková vlákna

Zkoušky aplikací do termoplastů

V současné době jsou odzkoušeny aplikace vláken délek 0,2 až 0,5 mm do polypropylenu, polyamidu 6, probíhají zkoušky s PVC. Při zkouškách s polypropylenem a polyamidem bylo zjištěno, že i když recyklovaná vlákna nemají žádnou povrchovou úpravu (ta byla zničena během recyklace), jejich zakomponování do termoplastů nepředstavuje problém. Adheze vlákna k termoplastu je dobrá, jsou ovšem patrné rozdíly mezi jednotlivými modifikacemi uvedených termoplastů. Adheze vláken k termoplastu závisí i na typu a modifikacích konkrétního PP nebo PA 6.



C vlákna v nemodifikovaném PP



C vlákna v nemodifikovaném PA 6



C vlákna v modifikovaném PP



C vlákna v modifikovaném PA 6

Vlastnosti nových materiálů

Mechanické vlastnosti

Byly zkoušeny na VŠCHT Praha a na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně. Na VŠCHT byly provedeny zkoušky pevnosti v tahu a vrubové houževnatosti u PP a PA 6, v závislosti na obsahu mletých uhlíkových vláken, v řadě koncentrací 0, 10, 20 a 30 % hmotnosti. Pevnost v tahu PP se přidáváním uhlíku zvyšovala, až o 50 %, pevnost v tahu PA 6 se zvýšila až skoro na dvojnásobek.

Vrubová houževnatost PP se zhoršila, vrubová houževnatost PA 6 se nejdřív zhoršila, při nižším obsahu uhlíku, při 30% hmotnosti se naopak zlepšila.

Na UTB Zlín byly provedeny zkoušky vrubové houževnatosti PA 6 a PA 5E.

U těchto zkoušek došlo naopak už při 10% koncentraci uhlíku v PA 6 ke zlepšení vrubové houževnatosti na čtyřnásobek.Viz poslední graf. Předpokládáme, že rozdílné výsledky ve zkouškách vrubové houževnatosti z UTB a VŠCHT byly způsobeny jiným typem použitého PA 6 na obou pracovištích, tím pádem výše zmíněnou rozdílnou přilnavostí vláken k termoplastu v závislosti na konkrétním typu termoplastu a jeho modifikacích.



Porovnání mechanických vlastností originálních a plněných PP a PA 6 (VŠCHT)



Vrubová houževnatost PA6 a PA 5E (UTB Zlín)

Elektrické vlastnosti

Elektrické vlastnosti plněných termoplastů byly zkoušeny na UTB Zlín a ve VZLŮ a.s. Na UTB byla změřena měrná elektrická vodivost různých materiálů, z grafu je jasně vidět velký rozdíl mezi vodivostí plněného a neplněného termoplastu.



Graf měrné elektrické vodivosti (konduktivity)

Ve VZLÚ a.s. proběhly zkoušky specifické vodivosti v závislosti na proudové hustotě a proudové hustoty v závislosti na elektrické intenzitě, při obsahu uhlíku 20 – 30 %, v polypropylenu, nebo v polyamidu. Z grafů je vidět, že největší zlepšení elektrických vlastností nastalo u polyamidu s 30 % uhlíku.



Specifická vodivost

Proudová hustota

Zkoušky únavového chování segmentu křídla

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D. ; Ing. Petr Augustin, Ph.D.;Ing. Václav Koula, CSc.

Příspěvek popisuje průběh a výsledky zkoušek segmentů křídel, které byly zkoušeny při únavovém zatěžování s cílem definovat kritické místo konstrukce, najít způsob lokalizace místa poruchy, pokusit se identifikovat blížící se poruchu a prokázat bezpečnou životnost navržené modelové konstrukce. V rámci zkoušek byly zkoušeny dva vzorky, jeden standardním spektrem s náhodným uspořádáním letů, druhý zrychlený způsob se spektrem s konstantní amplitudou. Výsledky zkoušek prokázali významnou časovou náročnost standardních zkoušek, ověřili metodu identifikace místa poruchy a metodiku zrychlených zkoušek.

Úvod

Rozvíjející se uplatnění kompozitních konstrukcí v oblasti ultralehkých letounů a kluzáků přináší s sebou otázky zabývající se životností kompozitních konstrukcí. V rámci uvedeného příspěvku se autoři s přispěním projektů EU a MŠMT zaměřili na část problematiky prokazování životnosti kompozitní konstrukce a monitorování jejího stavu s lokalizací vznikající poruchy.

Motivací snažení bylo získat nové poznání o chování kompozitní konstrukce standardně navržené při cyklickém zatížení, a rozvinout diagnostické metody aplikovatelné při průkazných zkouškách.

V rámci zkoušek bylo stanoveno, že nebudou posuzovány vlivy prostředí a provozního poškození, které mohou být posuzovány při dílčích zkouškách a které by pouze rozšířily škálu neznámých v řešené problematice.

Zkušební vzorek a zatížení

V okamžiku definování cílů výzkumu chování konstrukce bylo třeba definovat zkušební vzorek. Na základě dosavadních poznatků byla vybrána konstrukce křídla jako kritický uzel, a to její kořenová část. Dále bylo stanoveno, že monitorovanou částí bude nosník s krakorcem. Tato volba byla upřednostněna z důvodu dosavadních konstrukčních řešení, kdy všechna křídla kluzáků a UL letounů jsou konstruována tímto způsobem, tj. ohybový moment je přenášen krakorcem do nosníku (někdy i žebra) protějšího křídla a posouvající síla s kroutícím momentem je přenášena přes kořenové žebro do trupu.

Zkušební vzorek

Vzhledem k velmi náročné a drahé výrobě modelu a formy byla v rámci prvotních úvah vybrána konstrukce standardně vyráběná zavedeným výrobcem kompozitních kluzáků s dostatečnou zkušeností personálu. Po dohodě s výrobcem byly vyrobeny tři zkušební vzorky, jeden pro zkoušku statické únosnosti, druhý pro zkoušku standardním spektrem zatížení a třetí pro zkoušku s extrémním zatížením(zkrácený cyklus).

S ohledem na cenu zkušebního vzorku a způsob zatěžování byl vyráběn 4 m dlouhý segment s 60 cm krakorcem. Kořenová část byla identicky shodná s reálným křídlem, ale nebyly redukovány průřezy pásnic a stojiny po rozpětí segmentu. Pro další úsporu ceny byla na potahu použita uhlíková tkanina pouze u kořene v šířce 1 m a zbývající potah byl vyroben ze skelného sendviče.



Obr. 1 Zkušební vzorek

Definice zatížení

Zatížení bylo stanoveno na základě obvyklých způsobů návrhu konstrukce. Pro vzorek s odpovídajícími reálnými rozměry u kořene křídla byla definována velikost provozní posouvající síly (pro max. násobek zatížení) a ohybového momentu odpovídajícímu návrhu. Dalším krokem bylo na základě literatury a výsledků měření stanoveno spektrum zatížení [1] a vygenerována zatěžovací sekvence. Spektrum pro zkoušku je založeno na standardním spektru KoSMOS, které bylo vyhodnoceno z dlouhodobých měření zatížení prováděných na kluzáku JANUS v reálném provozu. Vzhledem k tomu, že toto spektrum obsahuje jak letová, tak pozemní zatížení, nebylo při únavové zkoušce aplikováno žádné další samostatné spektrum pozemních zatížení. Důsledkem spojení spekter letových a pozemních zatížení do jednoho spektra je, že vzájemný poměr hodnot ohybového momentu při násobku 1 pro letová a pozemní zatížení nelze měnit a byl proto při zkoušce segmentu křídla kluzáku totožný s kluzákem JANUS.

Bylo použito jednoparametrické formy spektra, přičemž kmity byly utvářeny lokálními maximy z kladné obálky a lokálními minimy ze záporné obálky spektra, kterým odpovídá stejná kumulativní četnost. Jde o postup, který na základě zkušeností z oblasti únavy kovových konstrukcí poskytuje pro dané spektrum nejvyšší únavové poškození.

Při odvození spektra KoSMOS pro praktické použití je třeba zadat maximální násobek vyskytující se v příslušném spektru. V tomto případě bylo předpokládáno, že tento násobek je totožný s maximálním kladným provozním násobkem modelového kluzáku. Obrázek 2 ukazuje porovnání spektra KoSMOS pro únavovou zkoušku segmentu křídla se spektry naměřenými na kluzácích G304C a L-13AC provozovaným Leteckým ústavem. U obou měření jde o poměrně nízké počty letových hodin, a proto je toto porovnání pouze orientační. Je vidět, že spektrum G304C je výrazně méně ostré, což odpovídá využití tohoto kluzáku převážně pro termické létání a přelety. Naproti tomu spektrum kluzáku L-13AC se blíží svým charakterem spektru KoSMOS a obsahuje také podobný podíl akrobatického provozu (12,5 %). Spektrum L-13AC je ovšem ostřejší, přičemž v záporné větvi spektra byly naměřeny násobky cca o 25 % vyšší. Tato skutečnost je dána akrobatickým určením této verze kluzáku L-13AC i jeho skutečným používáním.



Obr. 2 Porovnání navrženého spektra s naměřenými

Spektrum KosMOS vztažené 6000 LH obsahuje přibližně 1E7 kmitů, tzn. 1667 kmitů na jednu letovou hodinu. Tato hodnota je z hlediska časových nároků na provedení únavové zkoušky nerealistická. Proto muselo být provedeno zkrácení spektra vypuštěním nejnižších amplitud na 1 646 450 kmitů, čemuž odpovídá 274,4 kmitů na LH. Tato hodnota se nachází na horní hranici akceptovatelnosti a je podstatně vyšší, než bývá zvykem u zkoušek leteckých konstrukcí z kovových materiálů. Důvodem je skutečnost, že je doposud k dispozici málo informací o vlivu zkrácení spektra vypuštěním kmitů malých amplitud na velikost únavového poškození v případě kompozitních materiálů. Stejně tak nebylo provedeno nahrazení vypuštěných kmitů ekvivalentním zatížením na vyšších hladinách, protože zatím nebyla uspokojivě vyřešena problematika hypotéz kumulace únavového poškození pro kompozity.

Nejvyššímu lokálnímu maximu spektra KoSMOS odpovídá kumulativní četnost přibližně 17. To umožňuje pro praktickou realizaci zredukovat počet kmitů ve spektru a tím i v zatěžovací sekvenci na 1/17. Spektrum pro zkoušku bylo proto vztaženo na 6000 / 17 = 352,94 LH. Nejvyšší provozní násobek n = 5,57 se potom ve spektru vyskytuje jedenkrát. Rozmezí násobků mezi touto maximální hodnotou a minimální, do zkráceného spektra zařazeným násobkem bylo rozděleno na 14 tříd.

NA základě výzkumu LÚ bylo z rozboru provozu 22 celokompozitních jednomístných kluzáků létaných v České republice zjištěna průměrná délka letu 2,369 LH. Tato hodnota byla převzata také pro návrh zatěžovací sekvence. Znamená to, že celkový počet letů v sekvenci je 149, přičemž každý let je tvořen 650 kmity. Rozdělení sekvence do jednotlivých letů je ale pouze formální. Vzhledem k tomu, že ve výchozím spektru KoSMOS nelze jednotlivé kmity letových i pozemních zatížení
od sebe odlišit, jsou pozemní zatížení zařazována mezi zatížení letová náhodnou volbou a nejsou tedy deterministicky umístěna na konec letů, jak je to obvyklé v případě, že jsou spektra letových a pozemních zatížení separována.

Pro třetí vzorek byla použita sekvence s konstantní amplitudou zatížení, přičemž maximální zatížení přičemž parametry maximálního násobku n= 5,57, a minimálního n= -2,55 odpovídají nejvyšším zatížením vyskytujícím se ve spektru použitém pro druhý vzorek. Takto navržené spektrum není nejvhodnější z pohledu střední hodnoty n= 1,51, ale přesto bylo zachováváno pro realizaci zkrácené zkoušky za konzervativních podmínek.

Průběh zkoušek

Sestava zkoušek

Pro realizaci zkoušek byl vyvinut a vyroben speciální přípravek umožňující zavádění odpovídajících sil do závěsů segmentu křídla (jeřábem pro statickou zkoušku a podporou pro únavovou zkoušku). Tento přípravek je schématicky zobrazen na obr. 3 a umožňuje nesymetrické velikosti posouvající síly v segmentu a zatěžující síly do přípravku zaváděné válcem, při dodržení odvedené posouvající síly ze segmentu do přípravku.

Zkouška statické únosnosti

Pro ověření statické únosnosti byla proveden zkouška segmentu staticky do lomu při zvýšené teplotě (t mim = 54 st. C). Tato zkouška navazovala na zkoušky provedené na jiných vývojových vzorcích, kdy bylo dosaženo přes 200% provozního zatížení.

Vlastní realizace proběhla velmi jednoduše, tj. fixovaný vzorek byl i s topným a regulačním systémem přikryt, tak aby nedocházelo k výraznému úniku tepla, temperován po dobu 4 hod výkonem 10 kW a následně odzkoušen za současného zatěžování válcem a jeřábem.



Obr. 3 Sestava statické zkoušky

Během temperace a zkoušky byla provedena měření napjatosti a teploty na vybraných místech konstrukce.

Zkouška cyklickým zatěžováním při náhodném spektru

Shodný vzorek jako v předchozím případě byl opět vložen do přípravku (viz obr. 4) a volný konec segmentu byl fixován ke zkušebnímu roštu. Zatěžování probíhalo lineárním hydromotorem MTS (100kN) řízeným ovládacím systémem f. INOVA. Hydraulický válec na základě vygenerované náhodné sekvence zatěžoval vzorek s průměrnou frekvencí 0,4 Hz. Požadovaných 6000 LH (1 646 450 kmitů) bylo odzkoušeno během tří měsíců zkoušek s 24 hod. provozem v pracovní dny.



Obr. 4 Zkouška třetího vzorku s instalovanými senzory AE.

Následně proběhla měření tuhosti konstrukce a pokračoval se v zatěžování dalších 6000 LH v rozsahu 3,5 měsíců, opět s následným tuhostním měřením. Poté byla zkouška přerušena pro velkou časovou náročnost a absenci jakýchkoliv změn chování konstrukce. Předpokládá se pokračování zkoušky paralelně s jinou významnou zkouškou. Pro časovou úsporu bylo přistoupeno ke zkoušce třetího segmentu.

Zkouška cyklickým zatěžováním s konstantní amplitudou

Třetí vzorek byl shodně jako předchozí upnut do přípravku a zkušebního roštu a cyklicky zatěžován konstantní amplitudou. Vzhledem k velmi velkým deformacím bylo dosaženo průměrné frekvence 0,15Hz. Po 14 dnech zkoušek došlo k porušení vzorku a zastavení zkoušek.

Realizovaná měření

V rámci zkoušek probíhala tenzometrická měření ve vybraných řezech konstrukce a na druhém a třetím vzorku defektoskopická pozorování s využitím akustické emise.

Tenzometrická měření probíhala ve třech referenčních řezech, tj. na krakorci, na nosníku uvnitř segmentu a v kořeni. Tenzometry byly umístěny tak, aby zaznamenávali napjatost v pásnicích a stojině (viz obr. 5).



Obr. 5 Rozmístění tenzometrů na horním potahu(pásnice a stojina)

Pro diagnostiku porušování metodou akustické emise byla vybrána dodavatelská společnost, která provedla instalaci měřícího zařízení DAKEL-XEDO-3, měření a vyhodnocení.

Pro měření bylo použito 14 snímačů rozmístěných v kořenové části segmentu v očekávaném místě poruchy. Po ověření funkce měřících řetězců byla provedena kalibrace pentesty, změřeny rychlosti šíření akustických vln v konstrukci a ověřena lokalizovatelnost. Emisní události (EU) byly zaznamenávány v časové závislosti a současně s velikostí zatěžující síly.

Po spuštění běhu cyklických zkoušek byla veškerá data ukládána na disky a následně analyzována. Výstupem analýz pak byly lokalizační mapy pro různé rozsahy zatížení v daném sledovaném období. Součastně byly vyhodnocovány kumulativní četnosti jednotlivých emisních událostí v kritických regionech.

Výsledky experimentů

Výsledky experimentů lze rozdělit do následujících kategorií, tj. výsledky dosažené životnosti segmentu, výsledky dosažené při monitorování konstrukce akustickou emisí a získané "know how".

Výsledky zkoušek

Výsledkem referenční statické zkoušky je celková únosnost konstrukce (154 %) při zkoušce za zvýšené teploty, znalost kritického místa a typu poruchy a závislost napjatosti ve vybraných řezech na velikosti zatížení.

Kritickým místem konstrukce je horní pásnice namáhané tlakem v kořeni a spoj horní pásnice - stojina v úseku od kořenového žebra po její lomení cca 600 mm od kořene (viz obr.6). Naměřená přetvoření na pásnici v tomto místě byla cca 4800 e-6, což odpovídá cca 670 MPa při modulu pružnosti v tahu 140 GPa. Tenzometrická měření rovněž potvrdila lineární průběh přetvoření v závislosti na zatížení.



Obr. 6 Porucha staticky zatěžovaného vzorku

Výsledků zatěžování druhého vzorku, tj. náhodným reálným spektrem, není mnoho. Lze pouze konstatovat, že vzorek doposud prokázal dosažení životnosti 12 000 simulovaných letových hodin bez poruchy. Dále lze konstatovat, že provedená tuhostní měření neprokázala významný pokles tuhosti vzorku (odchylky deformace byly do 2% a odchylky přetvoření do 10% s častějším nárůstem tuhosti).

Výsledky zrychlené únavové zkoušky prokázaly dosažení více jak 60 tis. cyklů s následnou poruchou v oblasti krakorce, kde došlo k porušení spoje stojina-pásnice a k vytažení pásnice z omotávky (viz obr.8). Dále lze konstatovat, že těsně před dosažením poruchy byl zaznamenán pokles tuhosti konstrukce, zobrazený na obr. 7.



Obr. 7 Pokles tuhosti třetího vzorku s časem

Výsledky ukazují na postupný pokles tuhosti vzorku v průběhu zkoušky. Jako mezní hodnotu můžeme vzít pokles tuhosti na 98%, s následnou degradací konstrukce dalších 3180 kmitů (6 hod. zkoušky) při max. provozním zatížení. Při znalosti úrovně poškozování by pak bylo možné stanovit životnost konstrukce, případně periodu mezi ověřovacími zkouškami tuhosti.



Obr. 8 Porucha třetího vzorku(vytažení pásnice z omotávky)

Výsledky defektoskopie

Výsledkem defektoskopie mělo být ověření metody akustické emise a její využití pro případnou lokalizaci vznikající poruchy.

Nevýhodou prováděného monitorování bylo vyhodnocení výstupů ex post, čímž sice byla garantována stálost a stabilita měření a ukládání velkého množství dat, ale nebylo možné zavčas odhalit vznikající poruchu.

Shrneme-li výstupy monitorování konstrukce, získáme lokalizační mapu pro vybraný časový interval měření a pro vybraný interval hladin zatěžující síly (viz například obr. 9). Dále pak můžeme vyhodnotit intenzitu a kumulativní četnost jednotlivých emisních událostí (EU) v závislosti na čase pro konkrétní místo (viz například obr. 10). Tato metoda umožnila prokázat kritické místo (viz obr.12).

Ze všech získaných výstupů pak také byla provedeno vynesení jednotlivých EU na čase pro vybraný snímač (tzv. "hvězdnou mapu"), což přineslo možnost definovat oblasti "mlhovin" které představují hustší oblasti výskytu EU. (viz obr 11). Tyto pásy obvykle s časem postupně posouvají do oblasti nižší síly až zaniknou. Proto byly vytvořeny množiny EU ve vyznačených barevných pásech a tyto množiny byly opět použity pro standardní lokalizaci s kompletními daty z ostatních snímačů. Ukazuje se, že s poruchou nosníku souvisí červená množina (množina max. síly). Z obrázku patrné pásy se zvýšenou koncentrací EU, které po vzniku mají převážně klesající tendenci připomínající únavovou Wöhlerovu křivku a po určitém počtu vymizí . Souvisejí-li tyto pásy s nějakým deformačním procesem v určitém místě segmentu křídla, probíhá tento proces s přibývajícím počtem zatěžovacích cyklů při stále nižší zatěžovací síle, až vymizí. Zřejmě dochází k redistribuci napětí v zatěžované konstrukci a proces degradace se posune do jiného místa, kde je pak lokalizován další emisní zdroj. Tomu nasvědčují i výsledky ze zkoušky vzorku standardním spektrem.



Obr. 9 Lokalizační mapa vzorku



Obr. 10 Průběh intenzity a kumulativní četnosti EU na čase



Obr. 11 "Hvězdná mapa EU s "mlhovinami"



Obr. 12 Lokalizace místa poruchy (řez nosníkem segmentu)

Diskuse výsledků

Závěr

Hodnotíme-li dosažené výsledky experimentu, lze je shrnout do následujících závěrů:

- poprvé byly na Leteckém ústavu provedeny rozsáhlejší výzkumy únavové životnosti konstrukčních celků letounu a bylo získáno prvotní know-how,
- byla lokalizována kritická místa standardní a standardně navržené kompozitní konstrukce jak z pohledu statické pevnosti, tak i únavové životnosti,
- byla aplikována metodika zkrácených zkoušek konstrukce, která však vyžaduje další rozpracování zejména se zohledněním popisu intenzity únavového poškozování konstrukce,
- bylo aplikováno monitorování konstrukce metodou akustické emise s vynikajícími výsledky, které by mohly umožnit aplikaci přímo v provozu "online" vyhodnocování a hodnocení případného porušování konstrukce a stanovení zbytkové životnosti.

Literatura

- [1] Augustin P.: Spektrum a sekvence zatížení pro únavovou zkoušku segmentu křídla ; Zpráva č. LU60/2006, Centrum leteckého a kosmického výzkumu, Letecký ústav, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2006
- [2] Koula V., Varner M., Abrahám P., Slunéčko T.: Měření akustické emise během únavové zkoušky kompozitního křídla vzorek X-06; Zpráva č. LU30-2008-ARC.ZK, Centrum leteckého a kosmického výzkumu, Letecký ústav, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2008
- [3] Koula V., Varner M., Abrahám P., Slunéčko T., Rydlo M.: Měření akustické emise během únavové zkoušky segmentu kompozitního křídla vzorek X-07; Zpráva č. LU58-2008-CES.ZK, Centrum leteckého a kosmického výzkumu, Letecký ústav, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2008

Environmentální zkoušky pokrokových nátěrových systémů kompozitových konstrukcí s uhlíkovou výztuží. Metodika zkoušek

Ing. Martina Pazderová, Ph.D.

Kompozitové konstrukce nachází svoje využití ve stále širší oblasti. Hlavními důvody pro jejich použití je zejména lehkost, dobré elektrické a mechanické vlastnosti, výborná odolnost vůči působení korozního prostředí atd. Následná povrchová úprava nátěrovými systémy není nutná, ovšem v řadě případů se používá. Každý ze systémů substrát - nátěr je do určité míry ovlivněn korozním prostředím. Působení okolního prostředí lze do určité míry nasimulovat pomocí laboratorních zkoušek. Možností využití takových zkoušek se zabývá následující práce.

Úvod

Jak už vyplývá z názvu, kompozitové materiály představují systém skládající se ze dvou nebo více fází, které se v sobě vzájemně nerozpouští a jsou kombinovány tak, aby vznikl vhodný materiál s požadovanými vlastnostmi, samostatnými fázemi nedosažitelnými. Minimálně jedna fáze je pevná, tvořená silnými vlákny, obklopená slabší matricí. Matrice jednak rozloží rovnoměrně vlákna a zároveň na vlákna přenáší zatížení.

Nátěrový systém obecně zvyšuje korozní odolnost systému. V případě kompozitů probíhá koroze odlišně než u kovových materiálů. Běžné korozní prostředí jako chloridy, SO₂ a další chemické sloučeniny na kompozity nemají vliv. Nátěry na kompozitových konstrukcích působí především jako bariéra zamezující vlhkosti pronikat do matrice.

Kompozity

Vlákna

Tkanina používaná v kompozitových materiálech se skládají s tisíce vláken o rozměru 5 až 15 µm. Základní materiály používané na tkaniny jsou sklo, uhlík, bór, křemík, karbidy a kevlar. Podle rozmístění a směru vláken lze kompozitové materiály rozdělit do několika skupin. Roztřídění je zobrazeno na obr. 1.



Obr. 1 Skupiny kompozitů podle použitých vláken

Pro vysoce výkonné součástky se používají uhlíková vlákna. Polyakrylonitrilová vlákna, která se získávají ze zbytků ropných produktů, jsou oxidována při vysoké teplotě (300° C) a pak dále ještě zahřátá na 1500° C v atmosféře dusíku. Vznikne tak hexagonální uhlíkový řetězec (viz obr. 2) z černých a lesklých vláken. Tažením za vysoké teploty se získá vlákno s vysokým modulem pružnosti.



Obr. 2 Struktura uhlíkového vlákna

Pryskyřice

Matrice používané v kompozitech lze rozdělit do dvou skupin – termosetické a termoplastické. Termosetické pryskyřice jsou obvykle nízkomolekulární monomery nebo oligomery obsahující zesíťovací funkční skupinu. Polymerizace těchto pryskyřic se provádí buď kondenzací (např. fenolické pryskyřice), získaná struktura je nerozpustná a netavitelná ve většině organických rozpouštědel, nebo adiční reakcí bez uvolnění těkavých látek (např. epoxidové pryskyřice, nenasycené polyestery atd.).

Termosetické pryskyřice mohou být kapaliny nebo pevné látky s nízkou nebo vysokou viskozitou. U pryskyřice s nízkou viskozitou lze dosáhnout dobrého

navlhčení vláken bez použití vysoké teploty nebo tlaku. Impregnace vláken pryskyřicemi s vysokou viskozitou se provádí za vysoké teploty nebo tlaku.

Řada termosetických pryskyřic byla syntetizována, aby splnily požadavky na materiál, který si zachová výborné vlastnosti při zvýšených teplotách (až 400° C). Požadované fyzikální vlastnosti jsou vysoká teplota rozkladu, tepelná stabilita, dobré mechanické vlastnosti (tj. tuhost, odolnost proti únavě, pevnost v tahu a průtažnost), nízké hodnoty pohlcování vody a vysoká nehořlavost.

Hlavní problém termosetických materiálů představuje jejich křehkost, která způsobuje jejich nízkou odolnost vůči šíření trhlin. Tato vlastnost je způsobena tuhou molekulární strukturou a vysokou hustotou zesítění.

Epoxidové pryskyřice jsou relativně nízkomolekulární polymery, které mohou být zpracované při různých podmínkách. Uvedené pryskyřice mají dvě důležité výhody – mohou být částečně vytvrzené a v takovém stavu uložené a během vytvrzování vykazují nízkou ztrátu objemu. Vytvrzené pryskyřice mají vysokou chemickou a korozní odolnost, dobré tepelné a mechanické vlastnosti, výjimečně dobrou adhezi k různým substrátům a dobré elektrické vlastnosti. Hlavní omezení představuje dlouhá vytvrzovací doba a špatné chování v prostředích s vysokou teplotou a vlhkostí.

Nátěrové systémy

Nátěrové systémy se ve většině případů využívají pro zvýšení odolnosti systému proti působení okolního prostředí, které může různými způsoby poškozovat konstrukční materiál. V případě kompozitových konstrukcí nemusí ovšem dodatečná povrchová úprava představovat vždy nutnou operaci. Nátěrové systémy jsou používány zejména z důvodů dekorativních nebo za účelem zvýšení ochrany samotného kompozitního dílu.

Z hlediska používaných nátěrových systémů existuje značná rozmanitost závislá zejména na volbě jednotlivých výrobců. Ovšem s rostoucím zájmem o ekologičnost výrobních procesů dochází ke změnám i v oblasti povrchových úprav. Do popředí se dostávají tzv. ekologické vodou ředitelné nátěry.

Předúprava povrchu pod nátěrový systém se vždy nepoužívá. Závisí to především na vlastnostech kompozitu, tj. charakter povrchu, použité technologie výroby atd. Důležitý je zároveň i vliv maziv a separátorů, protože obvykle znečistí povrchovou vrstvu kompozitu mastnotou a mohou výrazně ovlivnit adhezi nátěru. Používané předúpravy povrchu lze rozdělit do dvou skupin:

- chemická odmaštění a odstranění barev, obvykle se používají komerční odmašťovací činidla (tj. aceton)
- mechanická zejména pro přeúpravu povrchu pro lepené spoje, méně již pro nátěry a povrchové úpravy, využívá se hlavně broušení, otryskávání atd.

Metodika zkoušení

Po prostudování literatury na téma dané problematiky bylo zjištěno, že možnost vhodného zkoušení systému kompozit – nátěr zatím nebyla nijak řešena. Pro hodnocení korozní odolnosti kompozitových dílů s nátěry nelze využít stávající metody zkoušení, protože korozní chování kompozitů a kovových dílů je zcela odlišné. Zároveň je třeba vzít do úvahy i možnost využití odlišných nátěrů, jejichž vlastnosti více vyhovují mechanickým vlastnostem kompozitů.

Na rozdíl od kovových materiálů nepůsobí na kompozity prostředí obsahující chloridy, SO₂ a další chemické sloučeniny. Důležitou roli hraje působení vlhkosti, zejména v kombinaci s vysokou teplotou. V souvislosti s použitím nátěrů má velkou vypovídací schopnost i zkouška vlivu slunečního záření, případně ozonu. Samozřejmě je důležité najít vhodnou kombinaci zkoušek, která by vhodně simulovala degradaci materiálu působením okolního prostředí.

Výsledky experimentu

Použité substráty a nátěry

Na základě získaných informací byly vybrány kompozitové materiály a povrchová úprava. Kompozitové vzorky byly tvořeny uhlíkovými vlákny spolu s epoxidovou pryskyřicí a sledovaná plocha měla rozměry 100 x 150 mm. Aby se zvýšila nasákavost, byl nátěrovým systém aplikován pouze na jednu stranu vzorku. Během zkoušek byly sledovány tři typy nátěrových systémů – polyuretanový nátěr, akrylátový nátěr a bezchromanová technologie. Tloušťka nátěru byla stanovena z výbrusů pomocí mikroskopu (např. Obr. 3).



Obr. 3 Snímek z mikroskopu kompozitového vzorku s nátěrem

Environmentální zkoušky

Takto připravené vzorky byly vystaveny působení vysoké teploty a vlhkosti. Jedna část testů proběhla v kondenzační komoře při teplotě 50° C a 100% relativní vlhkosti. Účinnost povrchové úpravy byla ověřena mřížkovou zkouškou a povrch byl dále vyhodnocen z hlediska změn vzhledu nátěru atd. Druhá část testů byla provedena za účelem ověření vlivu rychlých teplotních změn. Vzorky byly exponovány v šokovém teplotním zařízení. Teplota se měnila v rozmezí -60° C až +70° C, přičemž délka setrvání na teplotě byla 30 min. Po skončení 50 cyklů v šokovém teplotním zařízení byly vzorky opět exponovány v kondenzační komoře. Vyhodnocení vzorků probíhalo v pravidelných intervalech, aby bylo možné získat informace o adhezi z dlouhodobého hlediska.

Závěry

Z výše uvedených informací je zřejmé, že je velmi obtížné stanovit vhodnou metodiku pro zkoušení kompozitových dílů chráněných nátěrovým systémem. Existuje řada zkoušek určených pro sledování odolnosti nátěrů, jsou stanoveny zkoušky pro zjištění odolnosti kompozitových dílů, ovšem problematika systémů kompozit – nátěrový systém není zcela dořešena. Nelze předpokládat, že použití stejné metodiky jako pro kovové materiály přinese odpovídající výsledky, protože chování kovů a kompozitů je odlišné.

Tato práce nastínila možný způsob zkoušení, představuje ovšem pouze začátek řešení složité problematiky.

Literatura:

- [1] J. R. Vinson: *Behavior of Structures Composed of Composite Materials*; University of Delaware, 2004
- [2] S. V. Hoa: Composite Materials Design and Application; 2002
- [3] I. K. Varma, V. B. Gupta: *Comprehensive Composite Materials*; IIT, Delhi, India, 2004

Podvozkový kompozitní nosník malého dopravního letounu. Výroba a zkoušení

Ing. Vilém Pompe, Ph.D., Ing. František Martaus, Ing. Vladimír Snop VZLÚ, a.s.

Podvozkový nosník je jednou z nejvíce namáhaných částí letadla. Použití kompozitu v jeho konstrukci je podmíněno podřízením návrhu vlastnostem tohoto materiálu a konkrétní technologii výroby. Napodobování klasické kovové konstrukce není přínosné a v některých případech ani neumožňuje nalezení funkčního řešení. Příspěvek poskytuje ucelené shrnutí postupu návrhu, výroby a zkoušek technologických demonstrátorů i úplných kompozitních nosníků.

Úvod

Podvozkový nosník je součástí kompozitní trupové sekce, která je navržena jako ekvivalent k existující tradiční celokovové konstrukci. VZLÚ, a.s., útvar Letecké vrtule, byl pověřen konstrukcí a výrobou nosníků, které se jeví jako vhodným díl pro aplikaci infuzní technologie výroby RTM (Resin Transfer Moulding).

V průběhu řešení projektu bylo přistoupeno k výrobě technologických demonstrátorů, které jednak podpořily přípravu výroby kompletních podvozkových nosníků, ale také zároveň poskytly řadu důležitých podkladů pro konstrukční práce a výpočty v MKP.

Dílčí projekt podvozkového nosníku je zajímavý díky svému komplexnímu záběru od konstrukce a technologie, přes výpočty až ke zkouškám pevnosti. Vzniká tak mimořádná příležitost využití úplné zpětné vazby pro porovnávání požadovaných a skutečně dosažených vlastností konstrukce a pro hodnocení používaných výpočtových metod.



Obr. 1: Trupová sekce s kovovými nosníky a první představa o řešení z kompozitů

Konstrukce nosníku

Původní představa řešitelů o úplné zaměnitelnosti kompozitního nosníku za kovový musela být opuštěna, protože se postupně v plné míře projevila potřeba přizpůsobit konstrukci nosníku novému materiálovému systému včetně změn v připojovacích rozměrech do trupu a ve způsobu zavěšení. Potvrzuje se takto praktická zkušenost, která říká, že prosté napodobování kovových konstrukcí je pro aplikace kompozitů nevýhodné až kontraproduktivní. Protože nosník je určen pro kompozitní trupovou sekci, která je řešena společně s ním, není tato změna problémem a naopak ji lze vhodným způsobem zakomponovat do celku.



Obr. 2: Původní I-profil nosníku byl nahrazen uzavřeným profilem s lepším využitím materiálu pro prostorový ohyb a torzní namáhání



Obr. 3: Dva skříňové nosníky propojené smykovými deskami tvoří sestavu schopnou přenést s dostatečnou zálohou bezpečnosti všechna provozní zatížení

Na Obr. 2 je znázorněna principielní změna hlavní průřezové charakteristiky nosníku, která má přímý vliv na jeho tuhost a schopnost přenášet prostorový ohyb a torzní

zatížení. Přitom poskytuje dostatečný prostor pro zakomponování konstrukce kování pro bodové zatížení nosníku v místě závěsu podvozku a závěsu do trupu.

Obr. 3 znázorňuje MKP model sestavy nosníků na jednom z významných provozních režimů. Nosníky jsou propojeny kompozitními deskami, které významně přerozdělují zatížení mezi předním (se závěsy pro pracovní válce zatahování podvozku) a zadním nosníkem. Toto přerozdělení je v řádu cca 15% až 20% výsledných napětí v konstrukci.

Technologické demonstrátory

Jak již bylo uvedeno, velmi důležitou roli sehrály v procesu návrhu nosníku a jeho přípravy výroby tzv. technologické demonstrátory. Ty byly rozděleny na dva druhy:

- 1) Demonstrátor typ 1: Ověření vyrobitelnosti daného konstrukčního řešení.
- 2) Demonstrátor typ 2: Ověření vyrobitelnosti a následného zpracování vybraného řešení, získání dat pro výpočty.

Součástí přípravy demonstrátorů byly i simulace technologie výroby v MKP, které jsou důležité pro návrh formy a optimálního řešení vstupních a výstupních ventilů pro distribuci pojiva.



Obr. 4: Nosník s I - profilem, CAD model a simulace RTM



Obr. 5: Nosník s I - profilem, výroba demonstrátoru typu 1

Ačkoli bylo později od nosníku s profilem I ustoupeno, proběhla simulace jeho výroby a byl také vyroben jeho demonstrátor typu 1, viz Obr. 4 a 5.

Na základě prvních výsledků pevnostních výpočtů následovala konstrukce skříňového nosníku, jehož demonstrátor typu 1 byl vyroben v podobě bez výřezu a s výřezem, viz Obr. 6 až 9.



Obr. 6: Skříňový nosník, simulace RTM



Obr. 7: Skříňový nosník, výroba demonstrátoru typu 1 (použito sklo místo uhlíku)



Obr. 8: Skříňový nosník s výřezem, simulace RTM



Obr. 9: Skříňový nosník s výřezem, demonstrátor typu 1

Postupně, jak byla získávána data z výpočtů a technologické podklady k výrobě z demonstrátorů, byla připravena konečná verze řešení konstrukce nosníku a zahájena výroba demonstrátoru typu 2, viz následující série obrázků.



Obr. 10: Na připravené jádro demonstrátoru byla naneseny suché vrstvy uhlíkové výztuže. Důraz byl kladen na dodržení počtu vrstev a výsledné tlouštky stěny



Obr. 11: Suchá výztuž (vlevo) byla vložena do formy a injektována. Výsledný polotovar (vpravo) obsahuje přesně požadovaný objem vlákna a matrice



Obr. 12: Na demonstrátoru typu 2 byly ověřeny i všechny následující technologické kroky - obrábění, měření a princip ustavovacích a lepicích přípravků



Obr. 13: Dokončený demonstrátor typu 2 připravený k předání pro mechanické zkoušky na pevnostní zkušebně VZLÚ, a.s.



Obr. 14: Zkouška pevnosti demonstrátoru typu 2 a porovnání s MKP výpočtem

Využití demonstrátorů bylo v projektu završeno zkouškou pevnosti a porovnáním výsledku s MKP výpočty. Na základě tohoto srovnání byly provedeny poslední dílčí úpravy konstrukce nosníku a kalibrace výpočtového modelu.

Výroba nosníků

Po dokončení všech experimentů s technologickými demonstrátory bylo možno přikročit k výrobě prvních nosníků určených pro další program projektu. Výroba včetně přípravkového zabezpečení proběhla až na malé odchylky zcela v souladu s postupy odvozenými od zkušenosti s technologickým demonstrátorem typu 2.



Obr. 15: Na jádro nosníku byly naneseny vrstvy výztuže a vzniklý polotovar byl vložen do formy



Obr. 16: Po infuzi pojiva byla forma vložena do chladící nádoby a proběhlo vytvrzení za nízké teploty



Obr. 18: Nosník je dotvrzován na zvýšené teplotě v tepelně izolačním boxu



Obr. 19: Před i po dotvrzení probíhá jeho rozměrová kontrola na souřadnicovém měřicím stroji



Obr. 20: Obráběcí operace a montáže probíhají dle dříve odladěného technologického postupu



Obr. 21: Hotový nosník



Obr. 21: Hotová sestava nosníků



Obr. 22: Trupová sekce s nosníky na zkušebně VZLÚ, a.s.

Zkoušky

V rámci úvodního programu zkoušek byly mimo jiné realizovány dva případy statické zkoušky nosníků až do lomu. V prvním z nich bylo aplikováno nesymetrické zatížení, které v sobě zahrnovalo prostorový ohyb a torzní namáhání nosníku ve stavu bez vlivu prostředí.

Druhý případ byl orientován na zachycení vlivu zvýšené teploty a vlhkosti při symetrickém ohybu v jedné rovině. Saturace nosníku pro druhý případ byla zabezpečena v klimatickém boxu za podmínek 1000 hodin ve vodní páře 70° C a 90% relativní vzdušné vlhkosti.

Případ obtížení 1

Nosník byl zavěšen v konstrukci zkušebního přípravku a nesymetricky zatěžován pracovními válci, situace viz Obr. 23. Lom nosníku nastal v okolí závěsu do trupu. Tuhost a pevnost nosníku zjištěná při zkoušce odpovídala předpokládaným hodnotám (chyba cca 12 až 15 %), přičemž je třeba zohlednit i výrobní tolerance samotného materiálu, zejména rozptyl v gramáži dodávané výztuže. Příklad shody použitých kritérií pevnosti s místem lomu je patrny z dalších obrázků. Výsledky jsou uvedeny pro jeden společný napěťově deformační stav. Rozdíly v zobrazení kritických míst plynou z rozdílných teorií, které jsou za kritérii skryty.



Obr. 23: Nosník zavěšený ve zkušebním přípravku pro statickou zkoušku



Obr. 24: Lom nosníku (nahoře) a porovnání predikce lomu dle zobecněného Hoffmanova kritéria (uprostřed) a modifikovaného kritéria maximálního napětí (dole)

Případ obtížení 2

Druhý případ obtížení byl realizován v klimatické komoře. Proto také Obr. 25 zobrazuje pouze situaci při úvodní zkoušce nosníku ještě před aplikací vlivu horké páry. Po naměření průhybové charakteristiky byla komora uzavřena, proběhla saturace nosníku za podmínek 1000 hodin / 70° C / 90% RV. V těchto klimatických podmínkách byl také na závěr nosník zatížen až do lomu bez otevření klimatické komory.



Obr. 25: Nosník zavěšený do přípravku v klimatické komoře před zahájením zátěže aplikací zvýšené vlhkosti a teploty

Výpočty byly prováděny pro původní, klimatickými vlivy nezasažený materiál. Proto bylo předpokládáno, že výsledek této statické zkoušky bude ležet cca 25 % pod teoretickou pevností. Zobecněné Hoffmanovo kritérium poskytlo z části zavádějící výsledky co do identifikace místa lomu i velikosti kritického silového účinku. Oproti tomu podstatně jednodušší modifikované kritérium maximálního napětí prokázalo opět velmi dobrou shodu s experimentem - v místě lomu indikuje cca 75 % vyčerpané pevnosti materiálu (rozhraní zelené a žluté barvy na stupnici, viz Obr. 26), což odpovídá očekávanému poklesu pevnosti.



Obr. 26: Lom nosníku (nahoře) a porovnání predikce lomu dle zobecněného Hoffmanova kritéria (uprostřed) a modifikovaného kritéria maximálního napětí (dole)

Závěr

Z řešení dílčího projektu podvozkového nosníku byl získán bohatý soubor materiálu, který může být následně dále zpracováván. Byla řešena i řada dalších zajímavých témat nad rámec tohoto příspěvku, jako již například okrajově zmíněná problematika kritérií, defektoskopie, akustické emise, atd.

Příspěvek byl připraven v rámci řešení projektu FT-TA3/153 "Uplatnění hi-tech kompozitních materiálů v primární konstrukci trupu civilního dopravního letadla v kategorii CS/FAR 23[°], který je součástí programu TANDEM. Tento projekt je realizován za finanční podpory ze státních prostředků prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu ČR.

Celokompozitní trup malého dopravního letounu. Konstrukce, technologie, zkoušení (část 1)

Ing. Petr Průcha, LA composite s. r. o.; Ing. Vladimír Snop, VZLÚ, a.s.

Příspěvek se zabývá vývojem celokompozitového trupu malého dopravního letounu. Je zde prezentován aktuální stav použití kompozitních materiálů v konstrukci letadel navržených v České Republice i ve světě. Dále je popsáno konstrukční řešení celokompozitového trupu MDL i technologie výroby. Ve druhé polovině článku jsou popsány statické pevnostní zkoušky konstrukčních částí kompozitního trupu MDL - podvozkových nosníků, smykových panelů a zadní přepážky, které byly v útvaru Pevnost konstrukcí VZLU provedeny v roce 2008. Popsány jsou sestavy jednotlivých zkoušek, zatěžovací systémy a provedení zkoušek.

Úvod

Příspěvek se zabývá vývojem kompozitového trupu malého dopravního letounu (MDL) kategorie FAR 23/EASA CS 23. MDL jsou určeny pro dopravu osob a nákladů, svojí velikostí a hmotností převyšují čtyř a pětisedadlové letouny sportovněturistického charakteru a nejsou určeny pro speciální druhy provozu, jako je například akrobacie, zemědělské nebo protipožární akce. Projekt je řešen konsorciem společností LA composite, VZLÚ, ATG a Evektor. LA composite je řešitelem projektu, který zajišťuje hlavní část vývojových prací, výrobu konstrukčních uzlů a zkušebních sekcí trupu. VZLÚ vyvíjí kompozitní nosníky hlavního podvozku, metodiku zkoušek, navrhuje zkušební zařízení a provádí vlastní zkoušky uzlů a sekcí. ATG provádí NDT kontroly vyrobených dílů a vypracovává metodiku provádění NDT kontrol dílů primární konstrukce letounu z kompozitních materiálů. Evektor poskytuje podklady pro vývoj trupu. Jedná se především o geometrii, koncepční uspořádání, definice zatížení pro statické i dynamické zkoušky a oponuje jednotlivé vývojové kroky.

Cílem projektu je modelově vyvinout celokompozitový trup MDL s vyšší životností, nižší hmotností a menším počtem dílů v sestavě, než srovnatelný letoun celokovové konstrukce. V rámci výše uvedených cílů bude vypracována metodika statických a dynamických zkoušek potřebných pro případnou certifikaci takové konstrukce. Navržená koncepce bude ověřena vyrobením zkušební sekce trupu takového letounu, která bude podrobena statické a dynamické zkoušce. Pozornost je věnována nejvíce namáhané nosné části trupu, tedy střední části trupu kde se nachází závěsy křídlo-trup, podlaha a nosníky hlavního podvozku.

Stávající stav použití kompozitních materiálů na letounech domácí i zahraniční konstrukce

Letouny navržené v zahraničí

Z rešerše konstrukčních řešení MDL zahraničních výrobců lze dospět k závěru, že pro danou kategorii se takřka výlučně pro konstrukci trupů (většinou přetlakových) využívá především sendvičové řešení s převažujícím použitím potahů vyztužených uhlíkovými vlákny. Tento konstrukční přístup je používán jak při ručním způsobuvýroby z prepregů (např. typy Adam A500 a A700), tak při automatizované pokládce nebo navíjení pásků prepregu pomocí ukládacích a navíjecích automatů (ATL – automatic tape lay-up) u výrobců, kteří si to mohou dovolit (např. typy Raytheon – Premier I a Hawker 4000).



Obr. 1 Letouny Adam A500 a Adam A700

Letouny navržené v České Republice

Letoun Ae 270 vyvíjený v Aeru Vodochody v rámci společného česko-tchajwanského podniku IBIS získal koncem roku 2005 evropský certifikát letové způsobilosti EASA a v roce 2006 také americký certifikát od FAA. V jeho konstrukci jsou použity kompozitní materiály na různých sekundárních dílech jako jsou koncové oblouky, podvozkové dveře, panely interiéru; jsou však také použity pro výrobu primárního dílu v oblasti náhonu vztlakových klapek, a sice torzní uhlíkové trubky v křídlech.

Dalším letounem, v jehož konstrukci jsou uplatněny kompozitní materiály, je letounu EV-55 Outback. Jeho vývojem se zabývá firma Evektor za pomoci státní podpory a s účastí dalších podniků v rámci Asociace leteckých výrobců (ALV). Typ je zatím ve stadiu výroby prvního prototypu. Z kompozitních materiálů jsou části konstrukce vyznačené na obrázku 2.



Obr. 2 Kompozitové díly na letounu IBIS Ae 270 a EV55

Konstrukční řešení celokompozitního trupu MDL

Při návrhu konstrukčního řešení trupu MDL byl kladen důraz na minimální počet dílů primární konstrukce a omezení počtu nutných spojů. K spojování jednotlivých podsestav je předpokládáno použití studeného konstrukčního lepidla Hysol EA 9394, za použití výsledků a zkušeností získaných v rámci programu TANDEM, projekt FT-TA/026, téma "Výzkum chování moderních tenkostěnných klasických i kompozitových konstrukcí podle zatížení a mezních stavů, výzkum metod EAN a deformací, sběru a vyhodnocení dat", část věnovaná studeným lepidlům v primární konstrukci letadel kategorie CS/FAR 23 [2]. V částech konstrukce, kde je nutné zavedení osamělých sil, je navrhováno použití mechanických spojů provedených šroubovými spoji. Trup je rozdělen na tři sekce, tak aby bylo možné jejich vytvrzení v autoklávu. Na obrázku 3 je znázorněno členění jednotlivých sekcí trupu.

Základní konstrukční koncepcí trupu je sendvič s potahy C/E kompozitu a jádrem

z PMI pěny. Potahy sendviče budou skládány z prepregů a celek pak vytvrzován v autoklávu. Toto řešení bylo zvoleno z několika důvodů. Jednak je toto řešení nejpoužívanější v zahraničních konstrukcích stejné kategorie letadel, konstrukce má nízkou hmotnost při vysoké tuhosti, zvládnutá technologie (v LA composite se touto technologií sériově vyrábí díly pro vrtulníky Eurocopter) a dobrá certifikovatelnost. Nevýhodou může být složitější opravitelnost a nižší odolnost vůči rázovému zatížení oproti integrální konstrukci.



Obr. 3 Konstrukční členění sekcí trupu MDL

Součástí konstrukce trupu jsou dva nosníky hlavního podvozku. Těmto dílům je věnován samostatný příspěvek.

Zkušební sekce trupu

Střední část trupu byla zvolena jako předloha pro návrh zkušební sekce trupu MDL. Jedná se o nejvíce namáhanou část trupu, která tvoří spojovací článek mezi užitečným nákladem, nosnou plochou a podvozkem. Taktéž je do ní nutno zavést řadu poměrně velkých osamělých sil. Technologické členění střední části trupu je totožné s technologickým řešením celého trupu a jsou zde nejkritičtější místa z hlediska přenosu sil, která je nutno konstrukčně a technologicky spolehlivě vyřešit. Takže při vyřešení výroby střední části trupu již lze tuto výrobu snadno upravit pro výrobu celého trupu.

V rámci projektu budou vyrobeny dvě trupové sekce, které budou sloužit jako full-

scale model pro zkoušky statické pevnosti a životnosti. Pro splnění účelů, pro které je trupová sekce určena, není nutné vyrábět celou střední část trupu. Proto byla vyrobena zkušební trupová sekce, která je jen jakýmsi výřezem střední části trupu, zahrnující nejproblematičtější části konstrukce, jako závěsy křídla a závěsy nosníků hlavního podvozku. Rozpad zkušební sekce trupu je na obrázku 4.



Obr. 4 Rozpad zkušební sekce trupu



Obr. 5 Skořepina v autoklávu a sekce 001

Konstrukční uzly

Potahový panel

Potahový panel reprezentuje část potahu trupu. Konstrukční uzel sloužil k odladění technologických parametrů při vytvrzování a ověření statické únosnosti panelu při různém stupni poškození panelu a prostředí. Vyrobeny byly 4 kusy potahových panelů.

Podvozkové nosníky

Zkušební vzorky předního nosníku č.v. LV55-0001-1 a zadního nosníku č.v. LV55-0001-2 (X2), určené ke statické pevnostní zkoušce, byly vyrobeny útvarem 3300 VZLÚ Letecké vrtule.

Přepážka trupu

Přepážka trupu konstrukčně i technologicky odpovídá integrovaným přepážkám trupové sekce včetně kování závěsů křídla a uchycení podvozkového nosníku. Konstrukční uzel byl použit k ověření statické únosnosti přepážky a verifikaci výpočtového modelu.

Zkoušky konstrukčních uzlů trupu MDL

Zkouška předního podvozkového nosníku X1

Případ 45

Zkušební kus byl uchycen přes přípravek pro uchycení nosníku do roštu. Do závěsů podvozků L1 a P1 byly zavedeny zatěžovací síly $F_{L1YZ} = 97803N$ (tah), $F_{P1YZ} = 158073N$ (tlak) a boční síly $F_{L1X} = F_{P1X} = 600N$ (tah). Do závěsů hydraulických válců L2 a P2 byly zavedeny zatěžovací síly $F_{L2YZ} = 99420N$ (tlak), $F_{P2YZ} = 159436N$ (tah).

Po kontrolním předtížení byla provedena zkouška do provozního zatížení (50% Ppoč). Následovala realizace umělého poškození BVID padostrojem SUPR (energie 30J, průměr hrotu 12,5 mm) s kontrolou stavu před a po impaktu ultrazvukem. Po kontrolním předtížení byla provedena opakovaná zkouška do provozního zatížení (50% Ppoč).

Výsledek zkoušky:

Při zkoušce předního kompozitního podvozkového nosníku v.č. X1 do provozního zatížení bez a s umělým poškozením typu BVID nebyly zjištěny po odlehčení žádné trvalé deformace na zkušebním kusu.

Případ 42

Zkouška byla sestavena podle výkresové dokumentace LV55-EP-142.

Zkušební kus byl pevně uchycen přes přípravek pro uchycení nosníku do roštu. Do závěsů podvozků L1 a P1 byly zavedeny zatěžovací síly $F_{L1XYZ} = F_{P1XYZ} = 149609N$ (tlak). Do závěsů hydraulických válců L2 a P2 byly zavedeny zatěžovací síly $F_{L2YZ} = F_{P2YZ} = 97021N$ (tah).

Při zkoušce předního kompozitního podvozkového nosníku v.č. X1 do provozního zatížení s umělým poškozením typu BVID nebyly zjištěny po odlehčení žádné trvalé deformace na zkušebním kusu.

Při zkoušce předního kompozitního podvozkového nosníku v.č. X1 do početního zatížení s umělým poškozením typu BVID bylo dosaženo max hodnoty zatížení 88,6% Ppoč. Poté došlo k porušení nosníku - zlomení levé části těsně za pouzdrem čepu uchycení.

Zkouška zadního podvozkového nosníku X2

Zkušební vzorek zadního nosníku č.v. LV55-0001-2 (X2), určeného ke statické pevnostní zkoušce, byl vyroben útvarem 3300 VZLÚ Letecké vrtule.

Případ 74

Kondiciovaný nosník X2, př. 74, zkouška do porušení, 201008 Ê Load (kN) Position (n Ο Time (s) Card 3 - Position Card 4 - Position -Card 3 - Load Card 4 - Load

Zkouška byla sestavena podle výkresové dokumentace LV55-EP-174.

Obr. 7 Záznam zatěžování, př. 74, 85% Ppoč a sestava zkoušky případ 74

Zkušební kus byl pevně uchycen přes přípravek pro uchycení nosníku do roštu. Do závěsů podvozků L1 a P1 byly zavedeny zatěžovací síly $F_{L1XYZ} = F_{P1XYZ} = 146859N$ (tah).

Na nosníku X2 bylo provedeno umělé poškození BVID stejným způsobem, jako u nosníku X1. Po kontrolním předtížení byla provedena zkouška do provozního zatížení (50% Ppoč). Následovalo kondiciování nosníku v klimatické komoře (70° C, 90%RV, 1000 hodin). Po kondiciování byl nosník zatěžován do provozního zatížení (50% Ppoč) a poté do porušení. Při dosažení hodnoty zatížení 85% Ppoč došlo k porušení nosníku.

Výsledek zkoušky:

Při zkoušce zadního kompozitního podvozkového nosníku X2 př. 74 do provozního zatížení s umělým poškozením typu BVID za normální teploty nebyly zjištěny po odlehčení žádné trvalé deformace na zkušebním kusu.

Při zkoušce do provozního zatížení s umělým poškozením typu BVID při teplotě

70° C a RV 90% (po kondiciování 1000 hodin) nebyly zjištěny po odlehčení žádné trvalé deformace na zkušebním kusu.

Při zkoušce do porušení s umělým poškozením typu BVID při teplotě 70° C a RV 90% (po kondiciování 1000 hodin) bylo dosaženo max. hodnoty zatížení 85% Ppoč, při kterém došlo téměř okamžitě k porušení nosníku – zlomení levé části cca 240 mm od osy.



Obr. 8 Př. 74 – detail porušení zkušebního kusu X2

Smykové panely

Smykové panely představují svou skladbou skořepinu trupové sekce MDL. Panely byly zatěžovány diagonálním tahem ve zkušebním přípravku "rameček". Měřena byla závislost deformace panelu v závislosti na zatížení. Zatížení je považováno za statické. Při experimentálních měřeních byla snímána celoplošná deformace panelů systémem Aramis a posun ve směru diagonály, který byl měřen v místě zavedení zatížení. Na potahových panelech PP2 a PP3 bylo taktéž provedeno měření napjatosti s použitím růžicových tenzometrů. Uspořádání zkoušky a vyznačení měřené oblasti je na obrázku 9.



Obr. 9 Uspořádání experimentu a umístění tenzomterů na smykovém panelu

Výsledky měření

Výsledky meření byly vyneseny do grafů závislosti posuvu vybraných bodů na Body s největším posuvem posuvem ve směru kladné osy z a s největším posuvem ve směru záporné osy z.



Obr. 10 Posuvy vybraných bodů smykového panelu v závislosti na deformaci

Hodnoty zatížení naměřené přied ztrátou únosnosti panelu jsou uvedeny v tabulce 1. Panel PP4 byl na rozdíl od ostatních panelů kondiciován a následně zkoušen v klimatizační komoře při podménkách 70°C a 85% vlhkosti.

Panel	Zatížení při porušení	Poměr k vypočtené hodnotě početního zatížení			
	(kN)	(%)			
PP1	149,192	120			
PP2	129,749	104			
PP3	134,825	109			
PP4*	97,897	78,8			

Tab. 1 Zatížení panelŭ PP1 až PP4 před porušením	Tab.	1	Zatížení	panelů	PP1	až PP4	před	porušením
--	------	---	----------	--------	-----	--------	------	-----------

Výsledek zkoušky:

Panely PP2 PP3 vykazují dle grafů na obrázku 5 rozdílnou křivku závislosti deformace na zatížení. Panel PP2 se vyznačuje vetší deformací ve směru negativních hodnot osy z, zatímco panel PP3 větší deformací ve směru kladných hodnot osy z. Změnu směrnice je možné na grafu 5 zaznamenat pro zatížení cca 50 kN. U panelu PP3 je možné zaznamenat dvě změny směrnice při cca 20 kN a 80 kN. Oba panely byly vyzkoušeny až do porušení. K poruše došlo stejným způsobem jako u panelu PP1. Z měření celoplošných deformací je patrné, že zkušební panel již na počátku zatížení zaujme první deformační tvar a s narůstajícím zatížením se pak jen zvětšuje absolutní velikost deformací.

K poruše panelu došlo při zatížení 97,897 kN, mód porušení byl opět shodný jako u předchozích panelů. Z výsledku je patné, jak silný vliv má působení vlhkosti a teploty na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů.



Obr. 11 Deformace panelu PP2 vlevo a PP3 vpravo. Při uvedených zatíženích

Zkouška zadní přepážky modelové sekce trupu MDL

Zkušební vzorek přepážky č.v. MP26_1_2000-000/001, určený ke statické pevnostní zkoušce, byl vyroben firmou LA composite, s.r.o. Zkouška byla sestavena podle výkresové dokumentace LV55-EP-139.

Zkušební kus byl byl uchycen přes přípravky pro uchycení přepážky do podlahy roštu. Do závěsů přepážky byly zavedeny ve svislém a vodorovném směru zatěžovací síly F_{LY}, F_{LZ}, F_{PY}, F_{PZ} výše uvedenými hydraulickými válci.



Obr. 12 Sestava zkoušky přepážky a schéma zatěžujících sil

Typ případu	Případ	Hmotová konfigurace	Levý závěs		Pravý závěs	
			FYL	FZL	FYP	FZP
			[N]	[N]	[N]	[N]
Závěsy K-T	39	2710	47 830	0	-121 224	0
	82	1005	-60 970	-13 491	97 632	251
	284	1005	70 666	-61 537	75 758	61 775
Podvozek	45	2610	11 694	-17 460	-42 261	-17 460
	74	2710	-137 200	-7555	-137 200	7555

Tab. 2 Zkušební zátěžné případy, početní silové účinky ($f_c = 1,94$)
Případ 284

Po předtížení byla provedena zkouška do provozního zatížení (51,55%Ppoč) s vizuální kontrolou na případné poruchy.

Při zkoušce přepážky do provozního zatížení nebyly zjištěny po odlehčení žádné trvalé deformace na zkušebním kusu.

Případ 82

Po předtížení byla provedena zkouška do provozního zatížení (51,55%Ppoč) s vizuální kontrolou na případné poruchy.

Při zkoušce přepážky do provozního zatížení nebyly zjištěny po odlehčení žádné trvalé deformace na zkušebním kusu.

Případ 39

Po předtížení byla provedena zkouška do provozního zatížení (51,55%Ppoč) s vizuální kontrolou na případné poruchy.

Při zkoušce přepážky do provozního zatížení nebyly zjištěny po odlehčení žádné trvalé deformace na zkušebním kusu.

Případ 74

Po předtížení byla provedena zkouška do provozního zatížení (51,55%Ppoč). Při zatížení 50% Ppoč došlo při zřetelném praskání k poruše zkušebního kusu.

Při zkoušce přepážky do provozního zatížení bylo dosaženo maximální hodnoty zatížení 50% Ppoč. Poté došlo k porušení pevnosti (místní delaminaci) obou stojin žebra přepážky v pravé horní části.



Obr. 13 Detail místa poruchy přepážky

Závěr

Zvolená koncepce trupu MDL byla ověřena po technologické stránce byla ověřena úspěšnou výrobou jak konstrukčních uzlů, tak zkušební sekce trupu v. č. 001 určené ke statickým zkouškám.

Po pevnostní stránce byly ověřeny nosníky podvozku a smykové panely potahu trupové sekce. Smykové panely byly schopny snést početní zatížení. K porušení nosníků podvozku došlo před dosažením početního zatížení, ale to bylo očekáváno, protože zatížení nosníků po montáži na zkušební sekci bude menší než při statické zkoušce samotného nosníku. K porušení trupové přepážky došlo při dosažení 50% početního zatížení případ č. 74. Předčasné porušení je důsledkem toho, že při výrobě byl na přepážku v této oblasti použit jiný materiál, než byl předpokládán při pevnostním návrhu. Materiál nebyl v letecké kvalitě a při doplňkových zkouškách tohoto materiálu bylo zjištěno, že materiál má ve skutečnosti poloviční hodnotu meze pevnosti než udává výrobce.

Projekt dále pokračuje realizací statické zkoušky sekce 001 a bude následovat zkouška únavová na sekci číslo 002. Porovnání výsledků pevnostních analýz a výsledků statických a únavových zkoušek a popis jejich realizace bude uveřejněn v příštím roce.

Projekt je podporován Ministerstvem průmyslu a obchodu v rámci projektu: FT-TA3/153 "Uplatnění hi-tech kompozitních materiálů v primární konstrukci trupu civilního dopravního letadla v kategorii CS 23 / FAR 23"

Literatura:

- [1] Kolektiv autorů: *Projektová studie celokompozitního trupu MDL*; zpráva LA composite č. LA033/MPO/06, 2006
- [2] Snop V.: *Statická pevnostní zkouška předního kompozitního nosníku X1*; zkušební protokol VZLÚ P-PK-101 / ZK/2008
- [3] Snop V.: *Statická pevnostní zkouška zadního kompozitního podvozkového nosníku X2*; zkušební protokol VZLÚ P-PK-106/ZK/2008
- [4] Snop V.: *Statická pevnostní zkouška zadní přepážky modelové sekce celokompozitového trupu*; zpráva VZLÚ č.R-4381, 2008
- [5] Průcha P.: "Únosnost konstrukčních uzlů MDL"; zpráva LA composite č. LA040/MPO/07