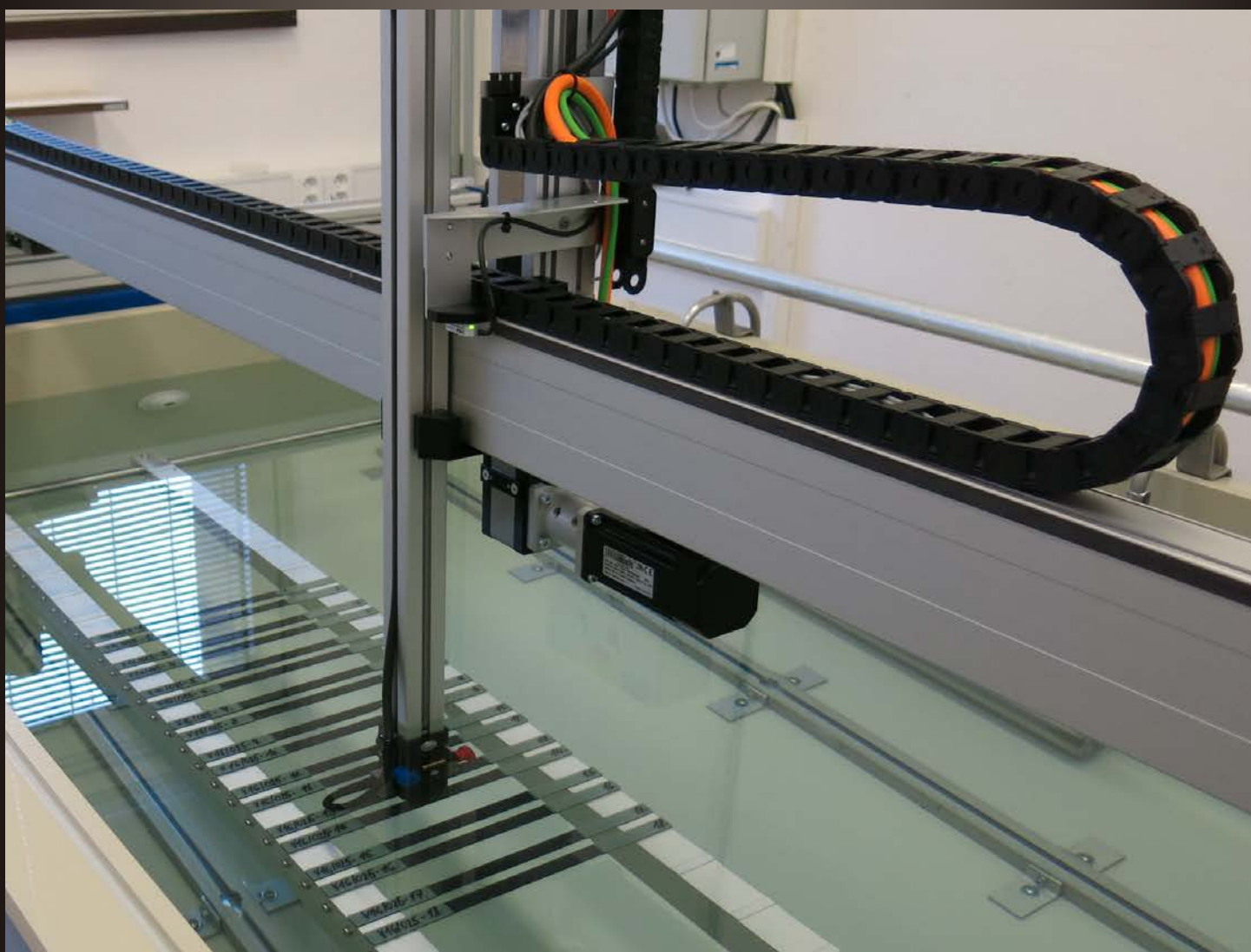


TRANSFER

Výzkum a vývoj pro letecký průmysl

č 27 / 2016



Toto číslo elektronického sborníku obsahuje příspěvky přednesené na 11. ročníku seminářů 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

Výzkumný a zkušební letecký ústav, a. s.
si Vás dovoluje pozvat na seminář VZLÚ z cyklu

"VÝZKUM, VÝVOJ A INOVACE V ČESKÉM LETECKÉM PRŮMYSLU"

**„Nové poznatky a výsledky v oblasti materiálů, technologií,
zkoušek a aplikací kompozitů v leteckém průmyslu ČR“**

14. 4. 2016

TRANSFER

Výzkum a vývoj pro letecký průmysl

Elektronický sborník VZLÚ, a.s.

číslo 27, duben 2016, 11. 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:

Martina Monteforte Hrabětová (e-mail: monteforte@vzlu.cz)

Odborní garanti semináře:

Bohuslav Cabrnach (VZLÚ) • 225 115 480 • cabrnach@vzlu.cz
Josef Jironč (VZLÚ) • 225 115 122 • jironc@vzlu.cz

Vydavatel:

Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.
© 2010 VZLÚ

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

VÝZKUM, VÝVOJ A INOVACE V ČESKÉM LETECKÉM PRŮMYSLU:

„Nové poznatky a výsledky v oblasti materiálů, technologií, zkoušek a aplikací kompozitů v leteckém průmyslu ČR“

Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. v Praze (VZLÚ) se v rámci národní i evropské spolupráce v současné době intenzivně zabývá problematikou kompozitů, a to především v oblasti výpočtů, technologií a zkušebnictví tzv. pokročilých kompozitů. Výzkum a vývoj v této oblasti má ve VZLÚ dlouholetou tradici, podpořenou výměnou zkušeností s výrobci a provozovateli letecké techniky. Předložený program je již dvanáctým ročníkem semináře VZLÚ na téma – Kompozity v leteckém průmyslu ČR.

V posledních letech jsou v ČR realizovány významné výrobní programy tuzemských a zahraničních společností v oboru kompozitních konstrukcí a řešeny výzkumně-vývojové projekty na národní úrovni i v rámci RP EU. I k této nové situaci je nutno v tématech semináře přihlídnout. Je nutno reagovat rovněž na úspěšné kompozitní konstrukce v kategorii UL letounů a větroňů.

Jednodenní setkání ve VZLÚ je významnou příležitostí pro setkání odborníků z různých podniků českého leteckého průmyslu, akademických pracovišť, státních úřadů, armády ČR a LAA ČR.

Organizační výbor semináře, pod garancí generálního ředitele VZLÚ

ČASOVÝ PRŮBĚH SEMINÁŘE:

8.30 - 9:00	Registrace účastníků
9:00 - 9:15	Úvodní slovo GŘ VZLÚ
9:15 - 10:45	I. blok přednášek
10:45 - 11:00	Přestávka
11:00 - 12:30	II. blok přednášek
12:30 - 13:30	Polední přestávka s občerstvením
13:30 - 15:30	III. blok přednášek
15:30 - 15:45	Přestávka
15:45 - 16:30	Panelová diskuze
16:30	Zakončení semináře

Obsah sborníku

6. **Technologie výroby kompozitních vzduchovodů**
Cabrnich B. (VZLÚ)
11. **Kompozity s geopolymerní maticí**
Martaus F. (VZLÚ)
14. **Nedestruktivní zkoušky primární konstrukce UL letounu pomocí bond testeru**
Hergessel J. (LA composite)
17. **Analýza delaminací v uhlíkových kompozitech při různých zkušebních podmínkách**
Michalcová L. (VZLÚ)
20. **Chování kompozitních konstrukcí při rychlém zatěžování**
Doubrava R. (VZLÚ)
24. **Vývoj a zkoušky optimalizovaného žebra z kompozitu C/PPS**
Křena J., Roškanin P. (Latecoere CZ)
28. **Vývoj kompozitního vzduchovodu pro letoun L-39NG**
Václavík J. (Aero Vodochody)
35. **Automatizované pracoviště pro ultrazvukovou kontrolu kompozitních dílů ve VZLÚ**
Ing. Petr Bělský



Zkouška prohoření kompozitního panelu

Technologie výroby kompozitních vzduchovodů

Ing. Bohuslav Cabrnach, Ph.D., VZLÚ

Článek se zabývá technologií výroby kompozitních vzduchovodů klimatizačních a ventilačních systémů. Je zde uveden stručný přehled požadavků na vzduchovody. Dále jsou zde popsány aktuálně používané technologie výroby kompozitních vzduchovodů a představuje další směry jejich vývoje.

ÚVOD

Nízkotlaké rozvody vzduchu v dopravní technice jsou především součástí pohonných jednotek a klimatizačních a ventilačních systémů. Vzduchovody jsou složité tvarované soustavy vzduchových kanálů obvykle kruhového nebo eliptického průřezu s většími nároky na tvarovou přesnost a nízkou drsnost vnitřních ploch. To je vyvoláno snahou po jejich co největší aerodynamické účinnosti. Aerodynamická účinnost vzduchovodů u pohonných jednotek ovlivňuje např. průtok vzduchu olejovým chladičem. U klimatizačních a ventilačních jednotek pak především jejich energetickou účinnost. Dalšími požadavky na vzduchovody jsou, stejně jako u ostatních částí dopravní techniky, jejich minimální hmotnost a výrobní a provozní náklady.

V minulosti byly vzduchové kanály vyráběny pouze z hliníkových slitin. Nevýhodou kovových rozvodů vzduchu jsou hlavně jejich omezené tvarové možnosti dané technologickými omezeními při jejich výrobě, což samozřejmě ovlivňuje i jejich aerodynamickou účinnost. Další nevýhodou jsou velké nároky na přípravkové vybavení i vlastní výrobní proces, především v případě jejich svařování z více kusů. Výhodou naopak je jejich tepelná odolnost a dlouhá životnost při použití vhodných antikoročních úprav.

V současné době je drtivá většina vzduchových rozvodů vyráběna z kompozitních materiálů. Je to dáno relativně nižšími výrobními náklady na jejich výrobu a větší volností v jejich tvarování.

MATERIÁLY KOMPOZITNÍCH VZDUCHOVODŮ

Nízkotlaké kompozitní vzduchovody jsou převážně skořepiny o tloušťce stěny kolem 1 mm. V případě plošších tvarů jsou stěny vyztuženy výztuhami nebo sendvičovými konstrukcemi jak je naznačeno na obr. 2. Kompozitní vzduchovody jsou převážně vyztuženy skelnými tkaninami, i když v případě vyššího vnitřního přetlaku se aplikují i uhlíkové tkaniny. Volba vhodné matrice závisí na konkrétních požadavcích na daný díl. V interiéru velkých dopravních letadel se používají převážně fenolické pryskyřice, které jsou jednak levné, ale hlavně splňují FST požadavky. V případě potřeby vzduchových kanálů s vyšší tepelnou odolností nebo mechanickými vlastnostmi je možné použít kyanoestery nebo bismaleimidy (BMI). V případě BMI lze dosáhnout maximální provozní teploty kolem 200°C.



Obrázek 2 Vzduchovod se sendvičovou výztuhou. [1]

TECHNOLOGIE VÝROBY VZDUCHOVODŮ

Kompozitní vzduchovody je možné vyrábět řadou technologií běžně používaných pro výrobu kompozitních konstrukcí. Obecně se jedná o následující technologie:

- Kontaktní laminace
- Prepregy
- Přesné navíjení
- Infuzní technologie (VIP, RTM, RFI)

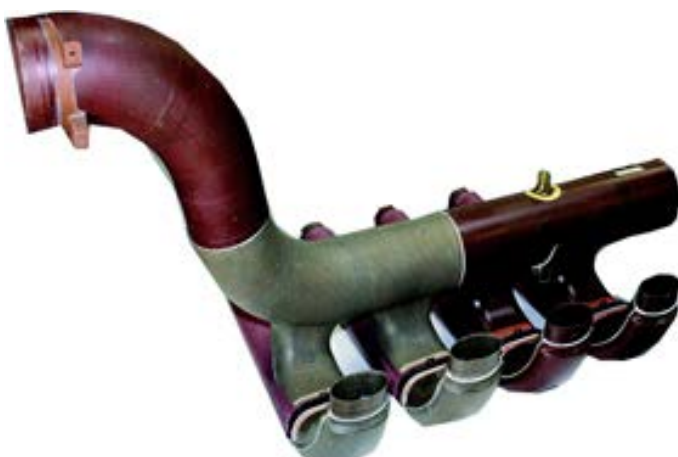


Obrázek 1 Rozvody vzduchu klimatizace ve velkém dopravním letadle

Použití konkrétní technologie závisí na požadované geometrii dílu, předpokládané sériovosti a dostupných materiálech pro dané konstrukční požadavky.

V leteckých aplikacích je nejrozšířenější použití prepregů s vytvrzováním v autoklávu nebo peci.

S technologií výroby úzce souvisí i konstrukční členění vyráběných dílů. Někdy převládá snaha o maximální integraci dílů, tj. vyrobít vzduchový kanál jako jeden kus. Další možností je složitě tvarovaný kanál rozdělit na několik částí a ty následně spojit. Na obr. 3 je znázorněna lepená sestava poměrně složitého vzduchového rozvodu. Naproti tomu na obr. 4 je znázorněn poměrně složitě tvarovaný vzduchovod vyrobený jako jeden kus.



Obrázek 3 Lepená sestava vzduchovodu. [7]

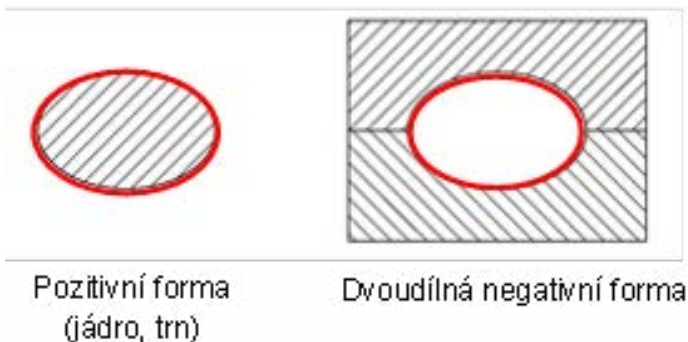


Obrázek 4 Komplexní vzduchovod vyrobený z jednoho kusu. [6]

VYTVRZOVACÍ PŘÍPRAVKY

Při výrobě kompozitních dílů přichází v úvahu použití dvou základních typů vytvrzovacích přípravků, a to pozitivních nebo negativních, viz obr 5. Výběr základního typu přípravku závisí na složitosti dílu, ale především na nalezeném kompromisu mezi tvarem dílu,

požadavkem na kvalitu vnitřního povrchu, nákladech na přípravkové vybavení a vlastní výrobu sériového dílu.



Obrázek 5 Základní typy vytvrzovacích přípravků.

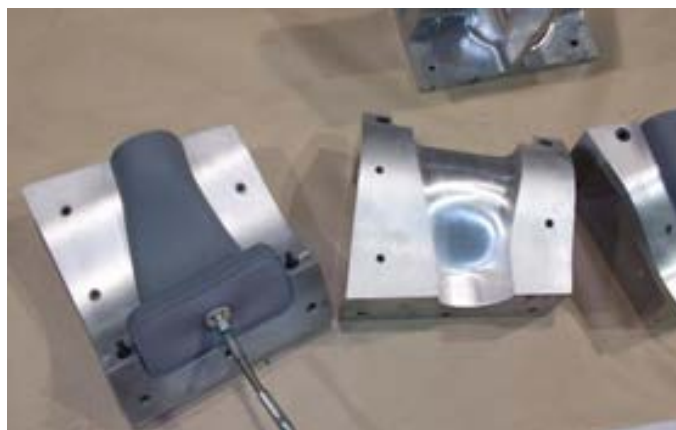
Negativní formy

Negativní formy pro výrobu vzduchovodů jsou obvykle dvou a více-dílné. Používají se v případech, kdy nejsou kladeny přílišné nároky na vnitřní povrch kanálu nebo ve spojení s expandujícím jádrem.

Expandující jádra lze rozdělit na nafukovací jádra a jádra využívající rozdílu součinitelů roztažnosti negativní formy a jádra.

Nafukovací jádra jsou tvořena převážně elastomery. Skladba kompozitního dílu může probíhat několika způsoby. Jednou z možností je provedení skladby kompozitu přímo do negativní formy. Další možností je skladba kompozitu na externí pozitivní trn/jádro, ze kterého je následně nevytvrzený kompozit sejmuto a vložen do negativní formy. V obou případech je, po provedení skladby a jejího umístění do negativní formy, vloženo do dutiny nafukovací jádro, které pak funguje pouze jako vakuová plachetka. V jednodušších případech při vytvrzování dílu v autoklávu lze nafukovací jádro nahradit standardní vakuovou plachetkou ve formě plastové folie.

Expandující jádra se s výhodou využívají v přetlakových přípravcích, kdy je možné je přetlakovat stejným tlakem jako v autoklávu, avšak vytvrzení může probíhat pouze v peci.



Obrázek 6 Nafukovací jádro a negativní forma [2]

Další variantou nafukovacích jader jsou jádra vyplněná tuhými částicemi. V případě odsátí vzduchu z pružného vaku dojde k jeho ztuhnutí a je možné provést skladbu kompozitu přímo na něm. Po dokončení skladby je možné jádro vložit přímo do negativní formy a díl vytvrdit bez další manipulace s vyskládaným kompozitním dílem. Po vytvrzení dílu je v jádru vyrovnán tlak, což vede k jeho změknutí (výplňový materiál se stane opět sypkým) a umožní jeho vyjmutí z dutiny dílu.

Pozitivní formy

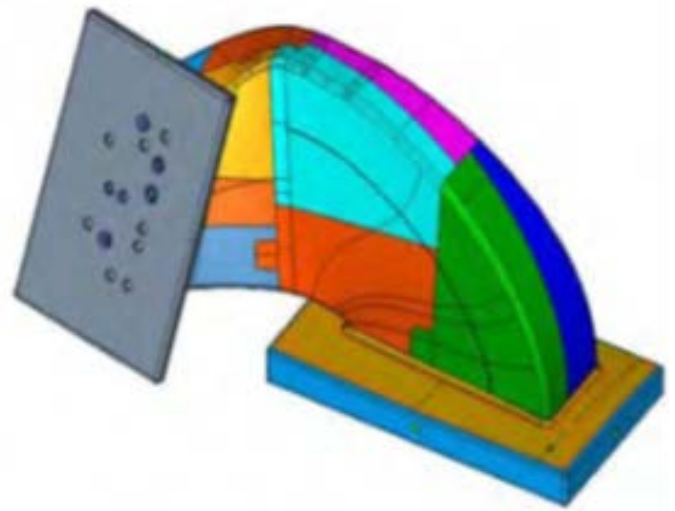
Pozitivní formy (laminační jádra, trny) je možné vyrábět z řady materiálů a různými postupy. Pozitivní formy je možné rozdělit do následujících skupin:

- Dělená jádra
- Skládaná jádra
- Ztracená jádra

Dělená nebo skládaná jádra jsou vyrobena obráběním z kovových polotovarů. Dělená jádra jsou pozitivní formy s odnímatelnými přírubami pro umožnění vyjmutí jádra z dutiny dílu. Skládaná jádra jsou složitěji tvarovaná dělená jádra ve vnitřním prostoru dílu tak, aby je po vytvrzení dílu bylo možné z dutiny vyjmout. Příklad děleného jádra je zobrazen na obr. 7 a vytvrzený díl na obr. 8. Skládaná jádra jsou zobrazena na obr. 9 a 10.



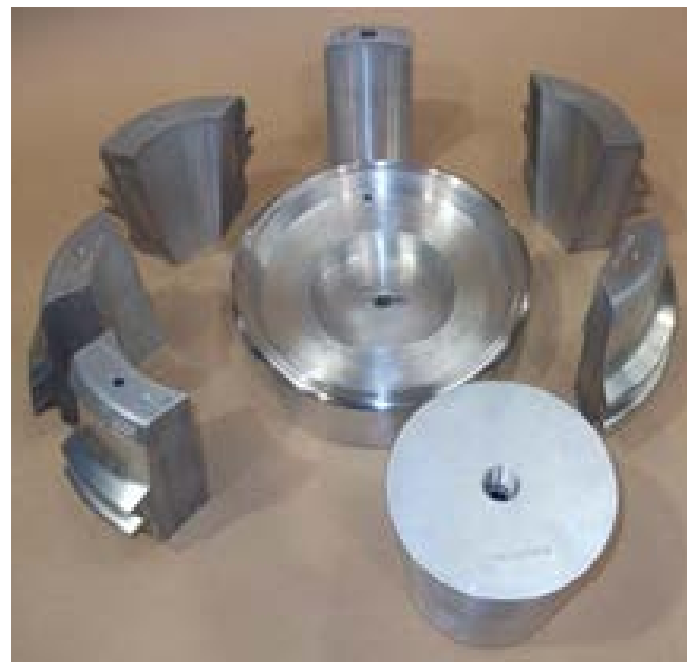
Obrázek 7 Dělená pozitivní forma navržená ve VZLÚ



Obrázek 9 Skládaná pozitivní forma [5]



Obrázek 8 Vzduchovod vyrobený ve VZLÚ na dělené pozitivní formě



Obrázek 10 Skládaná pozitivní forma z Al slitiny [2]

Ztracená jádra je možné rozdělit na následující podskupiny:

- Vytloukáci
- Vytavitelná
- Vyplavitelná

Vytloukáci a vytavitelná jádra patří ve výrobě pozitivních forem mezi nejstarší, což je dáno jejich původem ve slévárenství.

Vytloukáci jádra jsou obvykle vyráběna ze sádry. Ač se může zdát, že se z hlediska kompozitů jedná o drastickou metodu, která povede ke zničení nebo poškození dílu, praxe ukázala, že tato metoda může být spolehlivá. Sádra je výrazně křehčí a má menší pevnost než kompozitní materiály a zvláště pro dutá jádra není velký problém jádro po vytvrzení dílu rozbit na menší kusy a ty z dutiny dílu vyjmout. Rozbitná laminační jádra se vyrábí ze sádry odlité do formy. Formy pro odlévání sádrových jader jsou obvykle vícedílné z kompozitu vyztuženého skelnou výztuží, viz obr. 11.



Obrázek 11 Lící formy pro odlévání sádrových jader [2]

Vytavitelná jádra patří k nejstarším metodám a jejich použití je stále poměrně rozšířené. Jádra jsou tvořena eutektickými solemi, což jsou směsi kovových solí se specifickou teplotou tavení obvykle 160°C, 210°C a 270°C. Maximální teplota použití je o cca 15% nižší. Tuhá fáze i tavení na má vzhled a vlastnosti sádry. Díky vyšším tavicím teplotám je k jejich výrobě nutné použití kovových odlévacích forem.

Na povrch jader je nutné aplikovat nátěr uzavírající póry a umožňující jeho separaci před laminací kompozitu.



Obrázek 12 Forma pro odlévání solných jader [2]

Použití vyplavitelných laminačních jader je poslední metodou výroby ztracených laminačních jader. Dle způsobu výroby je možné je rozdělit na obráběná, lisovaná, odlévaná a vyráběná 3D tiskem.

Obráběná vyplavitelná jádra se vyrábí obráběním bloku základního materiálu dodaného od výrobce. Tato varianta je vhodná především pro osově symetrické navíjecí trny, kdy obrábění probíhá pouze na soustruhu. Další možností je obdržet od výrobce materiál ve formě pasty, která se ve formě vylisuje do požadovaného tvaru. Poslední možností je odlití jádra do formy. Do této kategorie lze zařadit i některé typy solných a sádrových jader, které lze po vytvrzení dílu z jeho dutiny také vyplavit pomocí vody, vodní páry nebo rozpouštědel. V případě vodou vyplavitelných jader je dodaný materiál ve formě prášku rozmíchaný s vodou a odlit do formy. Po vylisování, popřípadě odlití jádra je nutné jeho vysušení při teplotách kolem 135°C v horkovzdušné peci. Doba sušení jádra závisí na jeho tloušťce (cca 1,5 hod na 25 mm tloušťky).



Obrázek 13 Odlitá vyplavitelná jádra

Po vysušení jádra je možné jeho případné nedokonalosti vyspravit dodávaným tmelem.

Na závěr je nutné na povrch jádra aplikovat nátěr uzavírající póry a umožňující separaci jádra před laminací kompozitu. Po vytvrzení dílu je možné vyplavit jádro studenou vodou z vodovodu.



Obrázek 14 Kompozitní kanály vyrobené ve VZLÚ pomocí systému Aquapour™, Aquafill™, Aquaseal™

Příkladem jsou vyplavitelná jádra od americké firmy Advanced Ceramics Manufacturing (produkty Aquacore™, Aquapour™, Aquafill™ a Aquaseal™) [8].

Pro 3D tiskem vyráběná vyplavitelná jádra se používá metoda FDM (Fused Deposition Modeling). Pro výrobu jader 3D tiskem používá americká firma Stratasys materiály sloužící při běžném 3D tisku k vytváření podpěrných konstrukcí nosného materiálu pod označením SR-30 (maximální teplota použití 93°C) a SR-100 (maximální teplota použití 121°C) [3]. Další americká firma Advanced Ceramics Manufacturing nabízí výrobu jader z materiálu RapidCore s maximální teplotou použití 120°C. Pro vyplavení jader od firmy Stratasys je nutné použít speciální rozpouštědlo. Jádro RapidCore by dle výrobce mělo jít vyplavit vodou z vodovodu. V obou případech je nutné povrch jádra po 3D tisku vyhladit broušením a následně aplikovat nátěr uzavírající póry a umožňující jeho separaci před laminací kompozitu.

POROVNÁNÍ DOSTUPNÝCH TECHNOLOGIÍ

Vyplavitelná jádra na první pohled vypadají jednoduše, zvláště v případě vodou vyplavitelných variantách. Nicméně výroba odlévaných vodou vyplavitelných jader je poměrně náročná, a to jak přípravkově tak časově. Nejprve je nutné odlít jádro. K tomu je potřeba mít odlévací formu, která může být z Al slitiny, licího PUR, kompozitu apod. Následuje sušení jádra za zvýšené teploty po relativně dlouhou dobu. Po vysušení jádra je nutné ho přetmelit a nanést ochranný nátěr. Teprve nyní může nastat separace a vlastní skladba kompozitního dílu. Po vytvrzení dílu nastává vymytí jádra. Inzerované snadné vymytí vodovodní vodou, dle našich zkušeností, rozhodně snadné není, zvláště v případě větších objemů jader. Jako vhodné řešení se ukázalo použití tlakové vody s vyplavením jádra nejprve od stěn dílu a vnitřní část jádra následně rozbít a vyjmout. Pro sériovou výrobu kompozitních dílů touto technikou je nezbytné zřídit vymývací linku s potřebným vybavením a vhodným vodním hospodářstvím.

Aplikace vyplavitelných jader vyrobených 3D tiskem má omezení v maximální provozní teplotě 120°C. Tato technika je tedy vhodná pro materiály vytvrzované při pokojové teplotě nebo do 120°C s možností následného dotvrzení po vyplavení jádra. Další otázkou jsou jednotkové náklady na výrobu jednoho jádra při vyšších počtech kusů. Efektivita výroby malého počtu jader se jeví jako cenově výhodná, protože k jeho výrobě není nutné vyrábět další přípravkové vybavení.

Všechna nekovová nebo elastomerní jádra jsou citlivá na vodu. Proto nejsou vhodná pro výrobu dílů z fenolických kompozitů, kde je jedním z produktů chemické reakce při jejich vytvrzování voda. Dalším omezením pro použití vyplavitelných jader může být citlivost použité matrice na vodu, případně horkou vodu, vodní páru nebo rozpouštědla. Vlhkost a teplota obecně snižují mechanické vlastnosti polymerních matic. Ač to nemusí být na první pohled zřejmé, voda je velice silné rozpouštědlo a teplá voda může způsobit i částečné vymytí matrice z kompozitu.

Naproti tomu použití kovových negativních forem s vnitřní plachetkou nebo nafukovacím jádrem vyžaduje sice nižší celkové náklady na přípravkové vybavení, ale může znamenat vyšší pracnost jednotlivých sériových kusů.

Jako ideální varianta se jeví použití skládaných jader, která lze použít opakovaně bez dalších požadavků na jejich povrchovou úpravu před laminací dílu. Ovšem výrobní náklady takovýchto jader jsou několika násobně vyšší než u negativních nebo licích forem. Dalším negativem může být geometrické omezení tvaru dílu pro umožnění vyjmutí částí jádra z dutiny dílu nebo zjednodušení jeho konstrukce.

ZÁVĚR

Pro výrobu kompozitních vzduchovodů lze použít řadu technologií a koncepcí výrobních přípravků. Výběr vhodné technologie výroby a koncepce výrobních přípravků závisí na složitosti dílu, ale především na kompromisu mezi tvarem dílu, požadavkem na kvalitu vnitřního povrchu, nákladech na přípravkové vybavení a vlastní výrobu sériového dílu. Cílem článku je systematizovat dosud známé poznatky v této oblasti a upozornit na některá jejich úskalí, na základě získaných zkušeností při výrobě vzduchovodů v negativních formách s vnitřní plachetkou, s děleními, skládanými a vyplavitelnými jádry.

Reference:

- [1] <http://aim-aerospace.com>
- [2] <http://www.loftingservices.co.uk/>
- [3] <http://www.stratasys.com/>
- [4] <http://www.tiinternational.com/>
- [5] <http://www.webermfg.ca/>
- [6] <http://www.royalcomposites.com/>
- [7] <http://www.composite-industrie.com/>
- [8] <http://www.acmtucson.com>

Kompozity s geopolymerní matricí

Ing. František Martaus, VZLÚ

Článek se zabývá charakteristikou tzv. geopolymérů, resp. kompozitů s geopolymerní matricí a jejich uplatněním v technických aplikacích. Materiály na bázi geopolymérů představují novou, cenově a výrobně efektivní alternativu k vyspělým keramickým matricím v teplotně namáhaných kompozitních konstrukcích. V článku jsou prezentovány dosavadní výsledky projektu, v jehož rámci probíhá v útvaru Kompozitní technologie VZLÚ vývoj lopatky axiálního ventilátoru a integrálně vyztuženého panelu, jako dvou reálných aplikací tohoto materiálu.

ÚVOD - CO JSOU GEOPOLYMERY

Geopolymery (jinak též aluminosilikáty), jsou amorfní až semikrystalické, třídimenzionální anorganické sloučeniny. Vznikají podobně jako některé organické polymery polykondenzací, ovšem v silně zásaditém prostředí a, což je významné, za normální teploty a tlaku. Geopolymery jsou tvořeny řetězci, skládajícími se z křemíku a hliníku, s přítomností alkalických kationtů ve struktuře. Jsou anorganickým ekvivalentem uhlovodíkových polymerů. Hlavními surovinami pro výrobu jsou běžně dostupné sloučeniny jako metakaolin (lupek), oxid křemičitý a vodný roztok křemičitanu sodného nebo draselného (vodní sklo). Geopolymerní matrice je ve výchozím stavu kapalné či pastovité konzistence a je tudíž vhodná ke zpracování do podoby vláknového kompozitu. Předností jsou dobré mechanické vlastnosti, vysoká teplotní odolnost (až 1 100°C), dosažitelná již při normální teplotě zpracování, bez nutnosti dodatečné tepelné úpravy materiálu (žhánění, slinování). Geopolymerní matrice vynikají vysokou chemickou odolností v agresivním prostředí, a to vůči alkáliím i kyselinám. Jejich zpracování je jednoduché, nevyžadující speciální vybavení. Vyznačují se příznivou cenou, až řádově nižší v porovnání s pokročilými keramickými materiály či teplotně odolnými uhlovodíkovými polymery. Výztužnou fázi v geopolymerní matrici mohou obecně tvořit všechny standardní formy výztuží tvořené vlákny s vysokým modulem, s adekvátně vysokou teplotní odolností a resistantními vůči alkáliím. Těžiště možných aplikací geopolymerních kompozitů leží tam, kde jsou s vysoké požadavky na teplotní odolnost a FST (Fire Smoke Toxicity) vlastnosti, tj. např.: vzduchovody, požární přepážky, architektonické prvky, izolace, výfuky, tepelné štíty, apod. Zvláště perspektivní je uplatnění v interiérech dopravních prostředků včetně letadel. Kompozity na bázi geopolymérů mají ambice vyhovět požadavkům všech bodů letectvého předpisu FAR 25.853 app. F, ale i mnohem náročnějších norem (např. ISO 2685) a perspektivně se mohou stát novou generací lehkých materiálů vhodných pro ohni - a žáruvzdorné aplikace.

Materiál	Hustota (kg/m ³)	Tahový modul (GPa)	Ohybová pevnost (MPa)	Max. provozní teplota (°C)
Konstrukční ocel	7860	200	400	700
Al slitina (7000 Series)	2700	70	275	300
C tkanina/fenol	1550	49	290	200
E-sklo tkanina/fenol	1900	21	150	200
C tkanina/geopolymer	1850	76	245	>800

Tabulka 1

Geopolymerní kompozity vs. klasické materiály

V Tabulce 1 [1] je provedeno orientační porovnání základních parametrů geopolymerního kompozitu s ocelí, Al slitinou a kompozity na bázi fenolické matrice¹.

GEOPOLYMERNÍ KOMPOZITY VE VZLÚ

V rámci interního projektu byl v útvaru Kompozitní technologie vyvinut a odzkoušen unikátní geopolymerní pojivový systém L30, primárně určený pro aplikaci v kompozitech. Pojivo bylo testováno ve dvou formách vláknových kompozitů, a to v kompozitní směsi BMC (Bulk Molding Compound) a jako standardní kompozit s tkaninovou výztuží. Základní mechanické parametry jsou uvedeny v Tabulce 2 a 3:

a) kompozitní BMC směs sestávající z L30, částicových plniv a výztuže z recyklovaných uhlíkových vláken délky 6-60 mm:

typ zkoušky	standard	v _f	ρ	hodnoty
Zkouška v tahu ohybem	ASTM C348	~2%	~2,2 g/cm ³	~28 Mpa
Pevnost v tlaku	atypická zkouška			>66 MPa

Tabulka 2

b) standardní kompozit L30/tkaninová výztuž uhlík (UD a plátno):

typ zkoušky	standard	v _f	ρ	hodnoty
3 bodový ohyb	ISO 178	~44%	~1,85 g/cm ³	~430 MPa
Tahová zk. - pevnost	ASTM D638			~216 MPa
Tahová zk. - modul	ASTM D638			~66 GPa

Tabulka 2

¹Pozn.: Sklo-fenolické prepregy jsou v současnosti často užívaným materiálem interiérů dopravních prostředků. V kabinách letadel certifikovaných dle CS-25 jsou zavedeným standardem.

GEOPOLYMERNÍ KOMPOZITY V REÁLNÝCH KONSTRUKCÍCH

Lopatka průmyslového ventilátoru

V útvaru Kompozitní technologie proběhl vývoj, konstrukce a výroba funkčních vzorků a následně i ověřovací série teplotně odolných lopatek rotoru průmyslového ventilátoru ($\varnothing$ rotoru 1 120 mm, $n=1500$ ot/min), zhotovených z geopolymerního kompozitu a oceli.

Tvarová část lopatky je tvořena skořepinou z kompozitu geopolymerní / alkalivzdorné skleněné rouno a jádrem z geopolymerní matrice, plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny délky 6 – 60 mm. Kořenovou část lopatky tvoří jednoduchá ocelová vložka – různě provedená dle konstrukční varianty.

Lopatky byly standardně zhotovovány metodou BMC v dělené negativní formě sevřené v lisu. Vytvrzovací teploty nepřesáhly 80°C .

První vyrobená ověřovací série byla primárně určena pro provedení mechanických statických a modálních zkoušek při normální teplotě.



Obrázek 1 Lopatka - konstrukční varianta A



Obrázek 3 Statická zkouška simulující odstředivé zatížení lopatky



Obrázek 2 Lopatka - konstrukční varianta B (těsně po odformování)



Obrázek 4 Modální zkouška lopatky rázem

Jako hlavní přínosy aplikace geopolymerního kompozitu v konstrukci ventilátorové lopatky lze uvést:

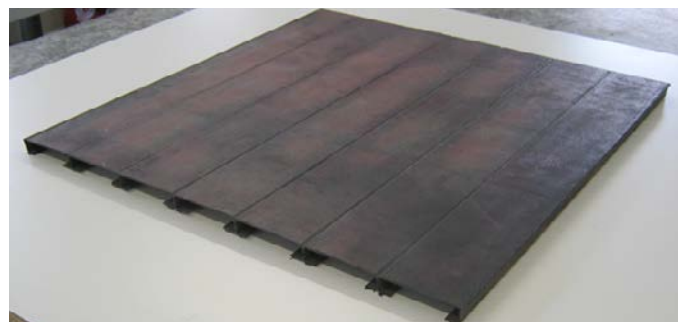
- Nižší hmotnost lopatky i celého rotoru (úspora ~15 - 20 %) v porovnání s celokovovým provedením a s tím související energetické úspory v provozu.
- Vysokou teplotní odolnost (~800 °C).
- Celkově nižší výrobní náklady (předběžný odhad ~10 - 15 %) v porovnání s kovovým či keramickým provedením. Důvodem jsou nízké ceny vstupních materiálů a jednoduchý způsob výroby.

Tenkostěnná skořepina s integrovanými výztuhami

V další fázi projektu IP 3308 se útvar Kompozitní technologie zaměřil na konstrukci a výrobu funkčního vzorku - demonstrátoru panelu na bázi geopolymerního pojivového systému s integrovanými „T“ výztuhami. Panel byl zamýšlen pro použití v prostředí se zvýšenými nároky na požární a Fire/Smoke/Toxicity (FST) bezpečnost, tj. např. v interiérech dopravních prostředků, jako požární přepážka, apod.

Panel o rozměrech 600 x 600 x 15 mm byl tvořen potahem z uhlíkové tkaniny s pojivovým systémem L30 a systémem integrovaných „T“ výztuh z téhož materiálu. Celý panel i s výztuhami byl zhotoven v jedné vytvrzovací operaci.

Cílem bylo demonstrovat možnost konstrukce a výroby integrovaných kompozitních konstrukcí na bázi geopolymerních matric, které nehořlavostí a FST vlastnostmi předčí stávající řešení, založená převážně na bázi sklofenolických prepregů. Panel byl podroben zkoušce prohoření dle standardu ISO 2685 (Obr. 8).



Obrázek 7 Vytvrzený panel – lícová strana



Obrázek 8 Zkouška prohoření dle ISO 2685. Vlevo panel sklo/fenol v 1. minutě zkoušky. Vpravo integrovaný panel uhlík/geopolymer L30 v 15. minutě zkoušky (zkušební útvar Motory VZLÚ, 116 kW/m², 1 100°C, palivo JET A1). Geopolymerní panel přešel zkoušku bez zjevného poškození a při zachování původní integrované soudržnosti.



Obrázek 5 Vytvrzení panelu bylo provedeno ve vakuové obálce za současného působení tlaku v hydraulickém lisu



Obrázek 6 Vytvrzený panel – rubová strana

ZÁVĚR

Výsledky dosavadního aplikovaného vývoje v rámci projektu GEO-POLYMERy jsou optimistické. Podařilo se vyvinout a odzkoušet pojivový systém L30 se solidními mechanickými parametry. Pojivo je vhodné pro většinu standardních výrobních procesů, jako kontaktní laminace, prepreg - vakuum, prepreg - autokláv, BMC, SMC, apod. Na konkrétních aplikacích (lopatka, panel) byla prokázána možnost výroby reálných kompozitních výrobků, a to s použitím běžných technologií a se standardním přípravným vybavením. Nepopiratelným kladem geopolymerních kompozitů, jak bylo prokázáno řadou zkoušek, je vynikající odolnost vůči vysokým teplotám, žáru a ohni. Materiál neprodukuje žádné toxické zplodiny či kouř a snadno splňuje jak např. standardy FAR 25, app. F či AITM, tak i přísnější normy (ISO 2685). Nicméně zbývá řada oblastí, které je třeba zmapovat. Jsou to např. únavové, creepové či dlouhodobé klimato-technologické vlastnosti. Na mikromateriálové úrovni by stálo za to věnovat pozornost studiu mezifázového rozhraní matrice – vlákno, které se ukazuje být slabým článkem materiálu. Aplikovaný vývoj geopolymerních kompozitů dále pokračuje, a to ve dvou větvích, v interním projektu VZLÚ a v rámci evropského projektu Clean Sky 2.

Literatura:

- [1] www.geopolymer.org. [online]. 4.2.2016 [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/meyeb.pdf

Nedestruktivní zkoušky primární konstrukce UL letounu pomocí bond testeru

Ing. Jiří Hergessel; LA composite, s. r. o.

Základní cíle projektu byly, použití nedestruktivního zkoušení pomocí bond testeru Zetec S-21R v sondikátorovém módu na primární konstrukci letounu z kompozitních materiálů a ověření kvality lepených spojů. Projekt se řešil ve spolupráci LA composite, s.r.o., ATG, s.r.o. a ČVUT v Praze Fakultou dopravní. Spolupráce zainteresovaných subjektů byla následovná, LA composite, s.r.o. zajistila prepregové polotovary, materiály používané v sériové výrobě leteckých dílů a zároveň nejmodernější technologie výroby jako například vytvrzování v autoklávu. S firmou ATG, s.r.o. byla konzultována základní znalost s měřením pomocí bond testeru. Společnost také požadovala, abych se zabýval NDT kompozitních sendvičových konstrukcí složených z vnějších uhlíkových panelů s jádrem z nomexové voštiny a pokusil se tak rozšířit zkušenosti v této oblasti. ČVUT v Praze Fakulta dopravní pak poskytla kompletní měřicí techniku. Vzhledem k finalizaci ultralehkého letounu UL39 byl tento stroj zvolen jako nejvhodnější kandidát pro aplikaci NDT testů. Naše pozornost se soustředila především na křídlo zmíněného letounu, které mělo zanedlouho projít statickou pevnostní zkouškou. Pro úspěšné splnění vytyčených cílů bylo zásadní prokázání schopností detekce přístroje na použitých materiálech a konstrukcích. Z toho důvodu byla vyrobena řada laboratorních úloh a etalonů určených kritických spojů. Výsledky zkušebních měření jsou uvedeny v tomto článku. Úlohy byly voleny tak, aby obsahovaly základní typy vad kompozitních konstrukcí. Praktické měření se provádělo na prototypu křídla letounu UL39.

ZPRACOVÁNÍ ZADÁNÍ LABORATORNÍCH VZORKŮ

Laboratorní úlohy by měly objasnit možnosti přístroje, především určit minimální detekovatelný rozměr vady. Výrobce přístroje samozřejmě udává jeho základní nastavení pro určité druhy materiálů, ale vzhledem k různorodosti orientací vláken a typů pryskyřic jednoznačně doporučuji provedení laboratorních testů pro přesné přizpůsobení nastavení přístroje. Právě druh, počet vrstev a orientace výztuže společně s typem matrice zásadně ovlivňují výsledné akustické vlastnosti materiálu.

Z předešlého požadavku vyvstávají tři základní otázky, které bylo potřeba objasnit. Nejprve jsem se zabýval typem testované konstrukce. Bylo rozhodnuto, že vzorky budou monolitické, sendvičové a lepené konstrukce. Výčet těchto konstrukcí totiž zcela pokrývá typy, které se použily na letounu UL39. Následně bylo třeba popsat vady v kompozitních konstrukcích, které má přístroj detekovat. Byly zvoleny základní druhy vad jako jsou delaminace v monolitické i sendvičové konstrukci a samozřejmě také nesprávné provedení lepeného spoje, na což je přístroj primárně určen, jak je vidno už z jeho samotného názvu. Poslední neznámou byla skladba vzorků. Pro objasnění skladby byly určeny kritické oblasti konstrukce letounu UL39. Výslednou skladbu vzorků určuje skladba, která je aplikovaná v kritické oblasti letounu. Tyto dvě zmíněné skladby musí být totožné, aby byla zajištěna autenticita výsledků naměřených na vzorcích. Dle požadavku firmy ATG, s. r. o. byl zařazen i vzorek s materiály, které v této kombinaci na letounu UL39 použity nebyly, jedná se o sendvičovou konstrukci z vnějších uhlíkových panelů a jádra z nomexové voštiny.

Pro určení minimálního detekovatelného rozměru vady byla zvolena konstrukce vzorku se sérií vytvořených po sobě jdoucích vad se zvětšujícím se rozměrem. Nad vadou jasně indikovanou přístrojem byl rozměr vady prohlášen za nejmenší detekovatelný rozměr pro danou konstrukci a materiály. Základní představu o velikosti detekovatelného rozměru určila ověřovací úloha. Tato úloha měla monolitickou i sendvičovou část s vadami klínovitěho tvaru. V monolitické části vzorku byla implementována ještě vada o rozměru 6 x 6 mm, která je konvenčně používána jako horní hraniční rozměr pro přijatelnou delaminaci, respektive se jedná o velikost vady, která je ještě detekovatelná.

VÝROBA ÚLOH

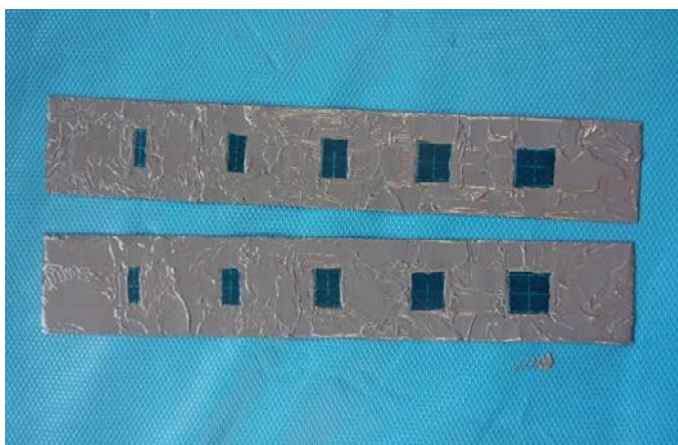
Výroba vzorků probíhala naprosto stejnou technologií jako výroba dílů letounu. To znamená kladení prepregů dle výkresu, zabalení technologií vacuum bag a následné autoklávové vytvrzení. Vzorky se od skutečných dílů liší pouze uměle vytvořenými vadami. V sendvičové konstrukci byly delaminace vytvořeny pomocí výřezů ve fóliovém lepidle viz obrázek 1.

Delaminace v monolitické konstrukci byla vytvořena vložením dvou vrstev separační fólie slepených tak, aby mezi nimi vznikla vzduchová kapsa. Velikost separačních fólií byla volena dle požadovaného rozměru delaminace.

Neslepené oblasti v poslední úloze byly vyrobeny vyznačením linie, kde nemá dojít ke slepení a zamaskování těchto oblastí. Lepidlo se poté nanášelo, mimo inkriminované plochy viz obrázek 2.

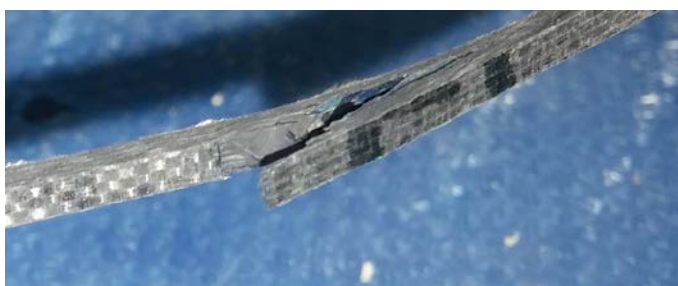


Obrázek 1 Výroba delaminací v sendvičové měrcce pomocí fóliového lepidla



Obrázek 2 Výroba delaminací v monolitické lepené konstrukci pomocí přesného nanášení lepidla

Před použitím všech zmíněných technologií výroby vad byla zhotovena ověřovací úloha, na které byly všechny tyto technologie použity. Ověřovací úloha byla následně podrobena destruktivní zkoušce, aby bylo zřejmé, zda jsou použité technologie výroby vad k této aplikaci vhodné. Destruktivní zkouškou se prokázalo, že opravdu došlo k porušení vzorků v místě s vadou a tudíž jsou dané technologie vyhovující.



Obrázek 3 Lom v místě delaminace 6 x 6 mm

VÝSLEDKY MĚŘENÍ VZORKŮ

Měření bylo zahájeno na ověřovací úloze. Testováním této úlohy vedlo k dosažení prvních poznatků o možnostech přístroje. Z těchto základních zjištění vyplynuly návrhy vad do laboratorních vzorků. Běžně volená míra přípustné delaminace 6 x 6 mm nebyla v monolitu vůbec indikována. Proto byl zvětšen jeden rozměr vady tak, aby oba kontakty sondikátorové sondy (sonda má vysílací a přijímací kontakt) byly nad vadou.

Rozteč kontaktů sondy je 12,5 mm, proto byl zvolen rozměr aplikace v laboratorních vzorcích od 3 x 13 mm do 15 x 13 mm (ve vzorku aplikováno 5 vad, každá následující zvětšená o 3 mm).

V sendvičové části vzorku se prokazatelná indikace zjistila až na rozměru 30 mm u delaminace klínovitého tvaru jak v části s nomexovou voštinou, tak také v oblasti se strukturální pěnou. Proto vady v sendvičové laboratorní úloze měly rozměr od 3 x 30 mm do 15 x 30 mm se stejným počtem a zvyšující se tendencí jako u monolitického vzorku.

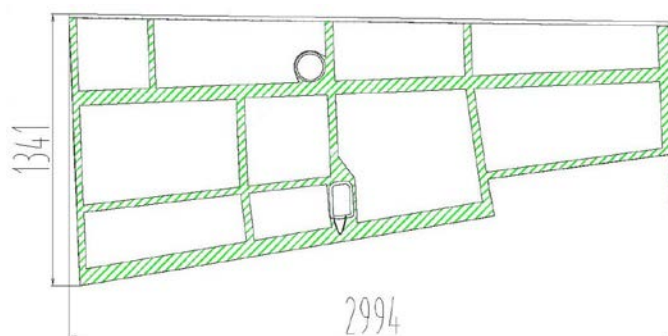
Při testování již popsaných laboratorních úloh jsem zjistil následující minimální detekovatelné rozměry 9 x 13 mm pro měрку z monolitické a lepené konstrukce. U sendvičové konstrukce je minimální detekovatelný rozměr 9 x 30 mm. Od zmíněných rozměrů směrem k větším došlo ke spolehlivé indikaci vad. Vady rozměrově menší jsou neprokazatelné za klasických podmínek měření (posun sondy přibližně 25 mm/s). Menší vady se mohly identifikovat pouze za předpokladu, že se postižené oblasti věnovala nadměrná pozornost a měření se několikrát opakovalo, ale i v tomto případě nebyla indikace zaznamenána ve všech případech.

APLIKACE NA LETOUN

Jak jsem se již zmínil, pro aplikaci nedestruktivního testování pomocí bond testeru byl zvolen jako nejvhodnější kandidát letoun kategorie ultralehkých letadel UL39, který se vyznačuje celokompozitní konstrukcí vyrobenou z prepregů vytvrzovaných v autoklávu s množstvím unikátních řešení a dmychadlovým pohonem.

Aplikace na letoun se konala v několika krocích. Testování bond testeru probíhalo na prototypu křídla letounu UL39. V počátku bylo zásadní určit kritické oblasti křídla a pro tyto spoje vytvořit etalony. Celkem byly vyrobeny dva etalony. První etalon simuloval spoj pásnice hlavního nosníku a potahu křídla, tento spoj byl vybrán z důvodu vysokého obsahu jednosměrné výtzuže v pásnici nosníku. Druhý etalon reprezentoval spoj odtokové hrany křídla, protože svojí materiálovou skladbou odpovídal zbytku konstrukce křídla, tak byl použitelný jako etalon i pro zbytek křídla. Všechny vybrané kritické oblasti, které podléhaly kontrole, jsou vyznačeny zelenou barvou na obrázku 4, kde je znázorněna pouze pravá polovina křídla. Levá polovina je identická pouze s minimálními odlišnostmi.

Vzhledem k neobvyklé technologii lepení křídla bylo zapotřebí zkontrolovat hlavně horní sací stranu křídla, kde vzniká největší riziko provedení nekvalitního spoje. UL39 je dolnoplošník s průběžným křídlem z tohoto důvodu je spodní potah tvořen pouze jedním dílem. To znamená, že se složitá vnitřní konstrukce křídla složená z mnoha dílů musí najednou nalepit nejdříve do spodního potahu a až následně se konstrukce uzavře horním potahem. Spoj spodního potahu a vnitřní konstrukce je možné zkontrolovat vizuálně před lepením horního potahu. Ale po nalepení horního potahu již vizuální kontrola možná není. Proto byla testována pouze horní tlakově namáhaná strana křídla.



Obrázek 4 Vybrané kritické oblasti ke kontrole

Kalibrace přístroje a postup provedení kontroly

Prvotním krokem všech kontrol je kalibrace přístroje na etalonu odpovídajícímu dané měřené části konstrukce. Hlavní veličinou je hranice, kdy bude echo vyhodnoceno jako vadové. Tato hranice je určena pomocí etalonu. Etalon představuje nepoškozenou, správně slepenou konstrukci bez veškerých vad. Kalibrace se provede tak, aby bylo přijímané echo zřetelné a jeho výška byla přibližně 25 až 33 % celé obrazovky. Hranice indikace se posune těsně nad nejvyšší přijímané echo na etalonu tak, aby při kontrole etalonu nedošlo k žádné indikaci. Následně se provede kontrola celé oblasti, na kterou je přístroj kalibrován s podélnou polohou sondy a příčnou polohou sondy.



Obrázek 5 Nahoře etalon spoje pásnice hlavního nosníku a potahu, dole etalon spoje odtokové hrany.

Vyhodnocení zkoušky

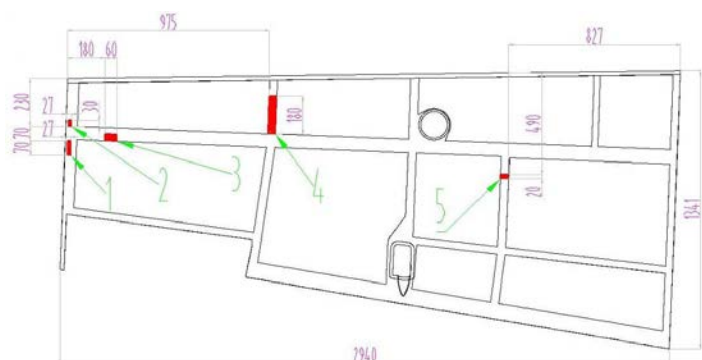
Indikované oblasti při zkoušce jsou na obrázku 6 vyznačeny červenou barvou. Každá oblast je zakótovaná a označena číslem. Vždy je důležité si poznamenat orientaci sondy, při které byla indikace zaznamenána, protože tato skutečnost vypovídá o skutečném tvaru indikované oblasti.

ZÁVĚR

Nedestruktivní zkoušení primární konstrukce letounu pomocí bond testeru je vhodné pouze tehdy, pokud nároky na indikované rozměry vad nepřevyšují schopnosti přístroje popsané v tomto článku. Pro prvotní aplikaci bych doporučil vždy přístroj vyzkoušet na etalonu, který odpovídá požadované oblasti. Testování zmíněným způsobem probíhalo spolehlivě bez větších komplikací. Spíše pro zajímavost bych uvedl, že zkouška horní strany křídla trvala přibližně 3 hodiny.

Literatura:

- [1] HERGESSEL, Jiří. NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY PRIMÁRNÍ KOSTRUKCE LETOUNU POMOCÍ BOND TESTERU. Praha, 2015. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA DOPRAVNÍ. Vedoucí práce Ing. Petr Průcha, Ph.D., Ing. Martin Novák, Ph.D.



Obrázek 6 Levá polovina křídla s vyznačenými neslepenými oblastmi

Analýza delaminací v uhlíkových kompozitech za různých zkušebních podmínek metodou akustické emise

Ing. Lenka Michalcová, VZLÚ

Nové multifunkční materiály pro letecký průmysl musí být testovány v podmínkách, které simulují skutečné provozní prostředí. Mezi takové materiály patří uhlíkové kompozity (CFRP) s obsahem nanočástic zvyšující elektrickou vodivost i pevnostní charakteristiky. Typickým poškozením kompozitních materiálů je delaminace, proto je znalost jejího šíření klíčová, a to jak za nízkých, tak i za vysokých teplot. V tomto článku je popsáno sledování šíření delaminace na DCB tělesech, zatěžovaných módem I v klimatické komoře při -55°C a $+80^{\circ}\text{C}$ s využitím metody akustické emise (AE). Výsledky jsou porovnány pro referenční materiál a materiál s nanočásticemi (MWCNT). Mechanické vlastnosti jsou reprezentovány lomovou houževnatostí GIC, která je korelována s AE daty.

ÚVOD

Metoda akustické emise (AE)

Akustickou emisí se rozumí fyzikální jev, kdy je při porušování materiálu dynamicky uvolňována mechanická energie v podobě šířících se elastických vln. Tyto vlnové balíky se šíří sféricky od místa zdroje poškození v ultrazvukovém spektru od desítek kHz po 1 MHz. Jejich detekci (nejčastěji piezoelektrickými snímači) se zabývá metoda akustické emise. Metoda AE zaznamenává pouze aktivní defekty. Její využitelnost pokrývá celou řadu aplikací, především detekci netěsností a úniku média z tlakových nádob (kontrola potrubí během tlakových zkoušek) a SHM (Structural Health Monitoring) stavebních a leteckých konstrukcí. Snímače AE lze s úspěchem použít jak na kovové materiály, tak na kompozity, keramiku, beton atd.

DCB test

Odolnost proti poruše přímo odráží mechanické vlastnosti uhlíkových vláknových kompozitů, které jsou reprezentovány lomovou houževnatostí. Delaminace jakožto nejběžnější poškození je projevem interlaminární ztráty pevnosti a může vzniknout během tří různých zatěžovacích podmínek (módy I, II, III). Pro určení lomové houževnatosti v tahovém módu I je používáno DCB těleso.

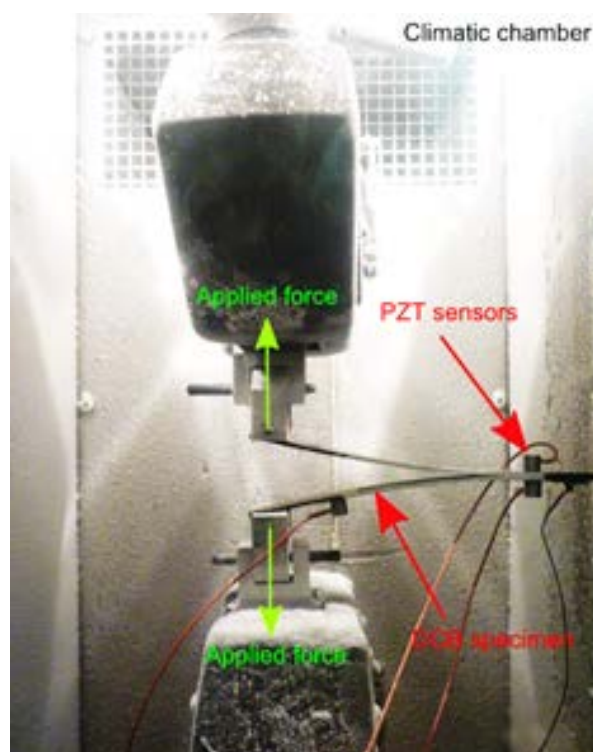
Lomová houževnatost G_{IC} je dle normy [1] určována jako medián z dílčích hodnot G_{IC} pro konkrétní délky trhliny změřených během šíření delaminace. Parametr délky trhliny je tedy zásadní. Vizualní pozorování může být v určitých situacích limitováno, proto je vhodné použít další experimentální metody za účelem určení schopnosti detekce čela trhliny. Vhodnou metodou se jeví právě AE.

EXPERIMENT

Zkoušky interlaminární lomové houževnatosti pro mód I byly provedeny dle normy [1]. Zkušební tělesa byla vyřezána ze dvou panelů. Jeden byl označen jako referenční, druhý obsahoval 0.5hm% nanočástic (MWCNTs). Umělou vadu představovala 60mm polymerní fólie vložená do střední roviny zkušebního tělesa (viz. Obrázek 2). Zkoušky probíhaly

na zatěžovacím stroji Instron 55R 1185, jehož čelisti byly umístěny v klimatické komoře (viz. Obrázek 1). Tělesa byla zatěžována konstantním posuvem 5mm/min ve dvou environmentálních režimech: -55°C a 80°C .

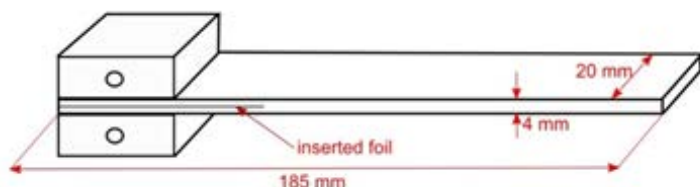
Snímače AE (IDK09 PZT senzory od firmy Dakel - varianta s rozšířeným teplotním rozsahem) byly připevněny na těleso v lineárním uspořádání zejména z důvodu možnosti lineární lokalizace. Jako analyzátor AE byl použit měřicí a diagnostický systém Dakel Xedo. Citlivost snímačů byla podpořena 34dB předzesilovačem, celkové zesílení tedy činilo včetně 20dB SW zesílení 54dB.



Obrázek 1 Schéma uspořádání zkoušky

VÝSLEDKY

Vizuálním pozorováním byly získány pozice aktuálního čela trhliny, které byly následně použity k určení hodnot lomové houževnatosti GIC, sumarizované v Tabulce 1. Čela trhlín byla dále určena metodou AE, a to jednak pomocí kumulativní energie signálu a jednak pomocí lokalizace zdrojů AE. Finální křivky šíření byly s využitím lokalizace ještě zpřesněny vhodným výběrem klastrů.



Obrázek 2 Schéma DCB tělesa

Energie AE

Křivky šíření trhliny - tedy závislost délky trhliny na čase - lze určit z kumulativní energie signálu AE. Ta je lineárně závislá právě na délce trhliny. Z lineární regrese vypočítané koeficienty se následně použijí na přepočítání kumulativní energie na délku trhliny položenou v čase (viz. Obrázek 3).

V Tabulce 2 jsou zobrazeny průměrné odchylky vizuálně naměřených délek trhlín a délek určených pomocí kumulativní energie AE.

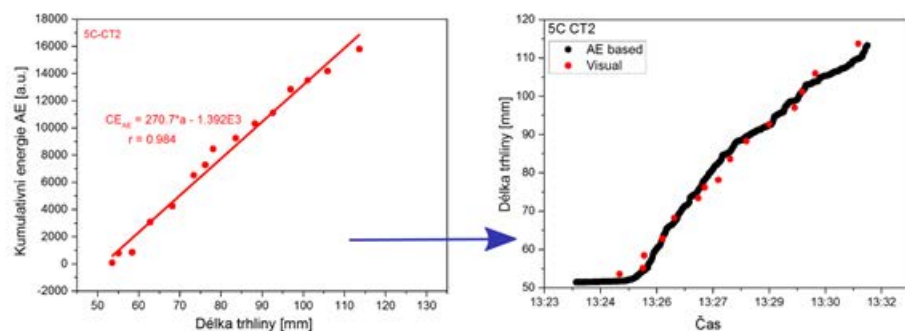
Specimen	GIC [J/m ²]	Specimen	GIC [J/m ²]
4B HW1	519	5C HW1	462
4B HW2	449	5C HW2	463
4B HW3	513	5C HW3	440
4B CT1	413	5C CT1	502
4B CT2	787	5C CT2	672
4B CT3	361	5C CT3	337

Tabulka 1 Interlaminární lomová houževnatost GIC

Lokalizace zdrojů AE

Z rozdílu časových příchodů signálů na snímače lze lokalizovat zdroje AE. V mikroměřítku se jedná o mechanismy uvolňování energie, které nastávají během delaminace. Jedná se zejména o lámání vláken a praskání matrice. Pro výpočet určení místa zdroje je kromě vzdálenosti mezi snímači nutné znát rychlost šíření zvuku v daném materiálu. Experimentálně (Pen testem) naměřená hodnota byla ze 32 měření zprůměrována na 6000 m/s.

Lokalizované události na Obrázku 4a reprezentují různé mechanismy poškození, a to jak na základě jejich pozice, tak i dle parametrů událostí AE. Je zřejmé, že v rámci krátkých časových intervalů vznikalo mnoho zdrojů AE před i za čelem trhliny.

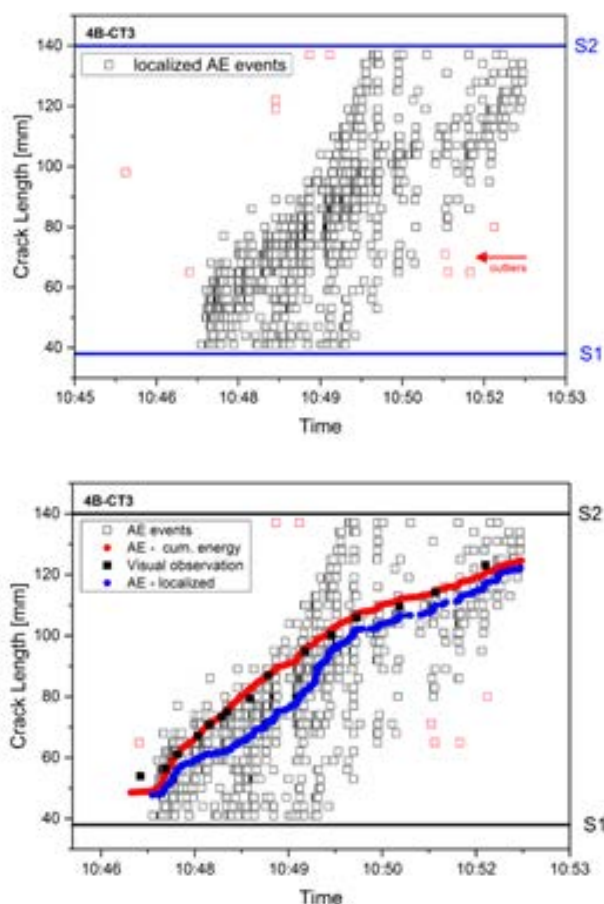


Obrázek 3 Určení křivky šíření delaminace z kumulativní energie AE

Specimen	MAPE [%]	Specimen	MAPE [%]
4B HW1	2.67	5C HW1	5.47
4B CT1	2.23	5C CT1	3.60

Tabulka 2 Průměrné odchylky: křivka z energie AE vs. vizuálně odečtené hodnoty

Velké množství dat, v tomto případě zlokalizovaných událostí, je nutné je hodnotit statisticky. Nejprve byly odstraněny odlehle hodnoty, poté byla klouzavým průměrem určena křivka šíření delaminace. Srovnání vizuálně odečtených hodnot, křivky šíření z energie AE a křivky určené z lokalizovaných událostí je zřejmé z Obrázek 4b. Průměrné odchylky vizuálně naměřených délek trhlín a délek určených z lokalizace jsou uvedeny v Tabulce 3.



Obrázek 4 a) Všechny lokalizované události, b) porovnání křivek určených vizuálně, z AE energie, lokalizací

Specimen	MAPE [%]	Specimen	MAPE [%]
4B HW1	6.07	5C HW1	7.24
4B CT1	8.38	5C CT1	6.60

Tabulka 3 Průměrné odchylky: křivka z lokalizovaných událostí AE vs. vizuálně odečtené hodnoty

Pro docílení přesnějších výsledků, byly lokalizované události klasifikovány dle jejich délky.

U každého tělesa byly identifikovány 3 klastry, které mohou odpovídat různým mechanismům poškození (viz Obrázek 5). Krátké události (cca 1300 μs) se vyskytovaly po celou dobu zkoušky v široké oblasti před a za čelem trhliny. Středně dlouhé (cca 2000 μs) byly lokalizovány do poměrně úzké oblasti kolem čela trhliny. V literatuře [2] jsou krátké události přiřazeny k lámání vláken a delší k delaminaci a praskání matrice. Křivky šíření určené právě ze středně dlouhých událostí byly porovnány s vizuálně naměřenými daty. Jejich průměrné odchylky jsou uvedeny v Tabulce 4. Dílčí odchylky rostou s délkou delaminace. To může být způsobeno chybou v lokalizaci. Důvodem může být rozdílná rychlost šíření elastických vln v poškozené a nepoškozené části DCB tělesa.

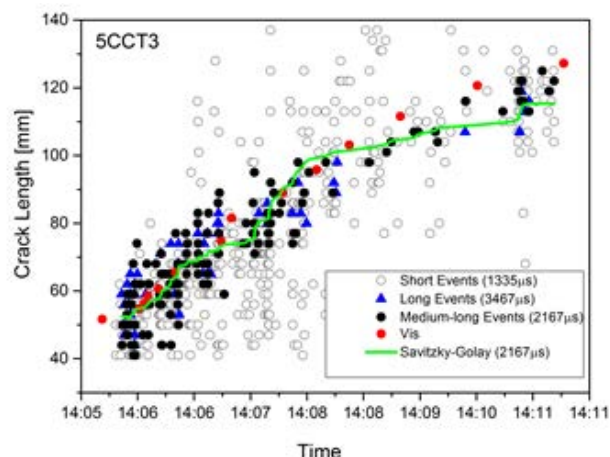
Statistické hodnocení a diskuze

Data byla zhodnocena s využitím dvoufaktorové analýzy rozptylu (ANOVA). Prošetřeny byly vztahy faktorů - prostředí (CT/HW) a materiál (5C/4B) s měřenou veličinou. Analýzy vedly k následujícím závěrům:

- Shoda křivek šíření delaminace z energie AE s vizuálně naměřenými délkami je ovlivněna typem materiálu. Přestože je dobrá shoda pro oba materiály, pro referenční materiál je lepší.
- Míra shody křivek určených z lokalizovaných událostí s vizuálně naměřenými daty nemá vztah ani s typem materiálu ani s prostředím. Křivky jsou posunuty pod vizuálně určené body, což může být způsobeno silnější aktivitou AE v oblasti „fibre bridging“.
- Křivky šíření určené ze středně dlouhých událostí poskytují lepší shodu, avšak také nezávisí ani na jednom faktoru.
- Četnost událostí AE závisí jak na materiálu, tak na prostředí. Vyšší četnost se projevila u zkoušek v nízkých teplotách.
- Sklon lineárních funkcí, vyjadřující míru uvolňování energie je závislý na prostředí. Pro nízké teploty jsou křivky strmější. Stejný trend vykazují i hodnoty GIC. Z pevnějšího rozhraní se může uvolnit více energie AE.
- Průměrné délky událostí AE z centrálně lokalizovaných klastrů závisí na prostředí. Při zvýšených teplotách se vyskytovaly kratší události.

ZÁVĚR

Křivky šíření delaminace v DCB tělesech byly určeny třemi metodami. Vizuálně, pomocí kumulativní energie AE a z průběhu lokalizovaných událostí. Křivky určené z kumulativní energie měly odchylku jen 3.49%, lokalizační křivky 7.13% a modifikované lokalizační křivky určené z klastrů 4.39%. Křivky získané ze všech událostí AE byly posunuty za aktuální čelo trhliny, což pravděpodobně ukazuje na maximum AE v oblasti „fibre bridging“. Odchylka křivek z klastrů se zvyšovala se šířící se delaminací. To mohlo být způsobeno různou rychlostí šíření elastických vln na obě strany od místa zdroje, tj. na poškozenou a ne-



Obrázek 5 Lokalizované události rozdělené do skupin dle jejich délky

Specimen	MAPE [%]	Average Event Duration [μs]	Specimen	MAPE [%]	Average Event Duration [μs]
4B HW1	4.75	1910	5C HW1	4.74	1760
4B CT1	3.36	2350	5C CT1	4.71	2170

Tabulka 4 Průměrné odchylky: křivka z centrálně lokalizovaných událostí AE vs. vizuálně odečtené hodnoty

poškozenou stranu zkušební tělesa.

Analýza rozptylu byla použita ke stanovení vztahu mezi protředím, materiálem a měřenými veličinami. Zjištěn byl podobný trend v četnostech událostí AE, kumulativní míře uvolněné energie (sklon lineární funkce) a v hodnotách lomové houževnatosti GIC.

Velkou výhodou měření AE během DCB testu je způsob zatěžování během zkoušky, který zaručuje naměřená data AE téměř nezatížená rušením. Další studie se tedy mohou věnovat zpřesňování křivek šíření delaminace, ať již analýzou lokalizovaných událostí nebo modifikací lokalizace z pohledu proměnných rychlostí šíření elastických vln.

Literatura:

- [1] ASTM D5528-13. Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites, West Conshohocken: ASTM International; 2013.
- [2] Nimdum P, Renard J. Use of acoustic emission to discriminate damage modes in carbon fibre reinforced epoxy laminate during tensile and buckling loading. ECCM 15 – 15th European Conference on Composite Materials, Jun 2012, Venice, Italy.

Chování kompozitních konstrukcí při rychlém zatěžování

Ing. Radek Doubrava, Ph.D., VZLÚ

Jedním z případů rychlého zatížení zejména letecké konstrukce je střet s ptáky, kroupami nebo jinými cizími částicemi. Tyto vysokorychlostní impakty s různou energií dopadu představují nebezpečí vedoucí k vážnému poškození konstrukce s možnými fatálními následky. Z tohoto důvodu je mezinárodními úřady pro certifikaci požadován průkaz odolnosti navržené konstrukce buď experimentálně, nebo výpočtem ověřenou metodikou. V případě kovových materiálů používaných v letectví existují ověřené materiálové modely včetně materiálových charakteristik zahrnujících chování těchto materiálů při rychlém zatěžování. U kompozitních materiálů jsou vlastnosti tvořeny individuální skladbou a typem použitého nosného systému a matrice, které zásadně ovlivňují mechanické vlastnosti a odolnost vůči impaktům. V příspěvku je ukázán přístup k hodnocení navržených kompozitních částí konstrukce na základě experimentálního měření a aplikace numerických metod.

ÚVOD

Požadavky na odolnost leteckých konstrukcí proti nárazům ptáků je definována pro pilotované prostředky například v FAR 23.775, FAR 25.631, FAR 25.571 a pro bezpilotní prostředky například v STANAG 4671.

Zkoušky odolnosti navržených konstrukcí vůči nárazům ptáků jsou většinou prováděny na zkušebních kusech po provedení předepsaných pevnostních a únavových zkoušek nebo na modelových částech konstrukce. Důvodem jsou velké finanční náklady a především vysoká pravděpodobnost poškození nebo zničení zkušebního kusu. Vývojem numerických metod simulací rychlých rázových dějů a především nárůstu výkonnosti výpočetní techniky umožňuje optimalizaci konstrukcí v období návrhu. Letecké předpisy umožňují provedení průkazu odolnosti v uvedených havarijních případech pomocí ověřených výpočetních metod. V případě kovových konstrukcí nebo oken jsou většinou k dispozici experimentální ověření, která s uplatněním výpočetních metod a dědičnosti konstrukčních návrhů usnadní průkaz nově navržené konstrukce.

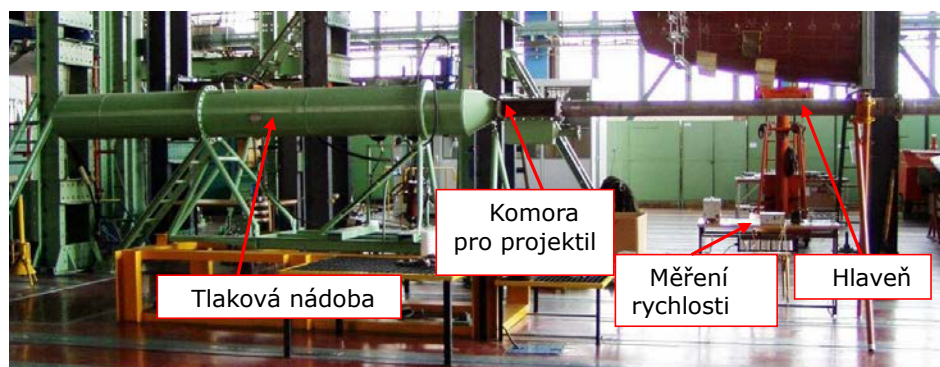
U kompozitních materiálů je situace ztížena neznalostí ovlivněním materiálových charakteristik skladbou a především vlivu technologie výroby.

Pro zkoušky odolnosti zejména leteckých konstrukcí jsou předpisem definovány jako impaktory ptáci a ledové kroupy. Při řešení havarijních případů mohou být definovány i jiné typy impaktorů jako např. betonové úlomky, šterky, zbytky pneumatik atd.

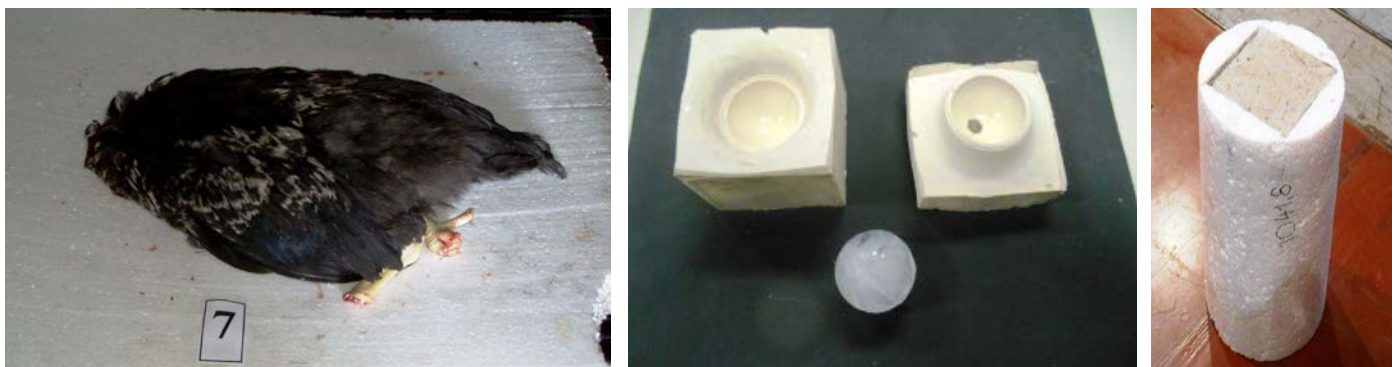
Typy používaných projektilů pro průkaz odolnosti zejména kompozitových konstrukcí jsou znázorněny na obr. 2.

ZKOUŠKY VYSOKORYCHLOSTNÍM NÁRAZEM

Pro zkoušky vysokorychlostních nárazů je ve VZLÚ používáno vzduchové dělo umožňující střelbu projektilů o průměru 125 mm (viz. obr. 1).

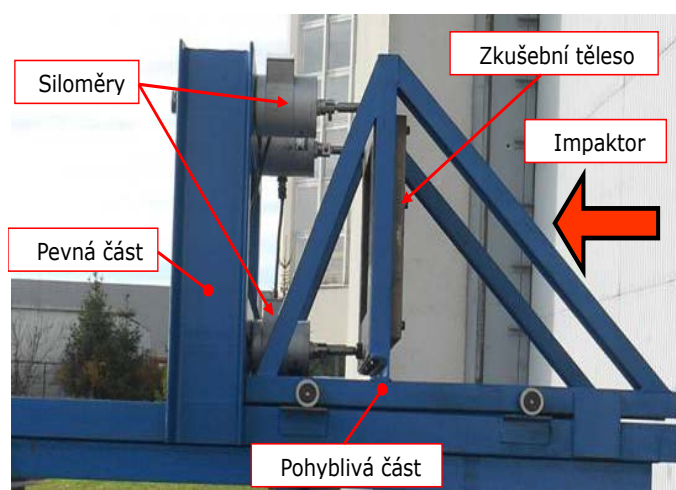


Obrázek 1 Zařízení VZLÚ (vzduchové dělo) pro zkoušky nárazu za vysokých rychlostí

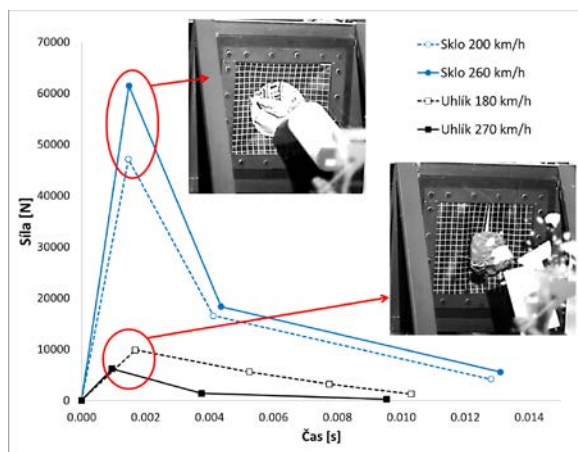


Obrázek 2 Typy používaných projektilů ve VZLÚ pro zkoušky odolnosti kompozitních konstrukcí (zleva kuře, umělé ledové kroupy, betonové kostky - úlomky)

Výsledky zkoušek jsou většinou posuzovány vizuálně ze záznamu rychloběžných kamer a rozsahu poškození zkoušené konstrukce. Dalšími možnostmi jsou tenzometrická měření přímo na zkušební tělese nebo měření reakční síly v místě uchycení zkušební tělesa. Na obr. 3 je ukázka přípravku pro porovnávací zkoušky plochých zkušebních těles s měřením reakční síly od nárazu.



Obrázek 3 Přípravek VZLÚ pro vysokorychlostní nárazové zkoušky plochých zkušebních těles



Obrázek 4 Průběh špiček reakční síly při zkoušce nárazu ptáka na kompozitové desky tloušťky 1.2 mm se skleněnou a uhlíkovou výztuží

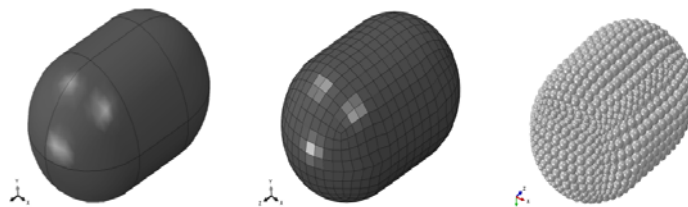
Na obr. 4 je ukázka porovnání výsledků zkoušek nárazu ptáka hmotnosti 1 kg do kompozitní desky tloušťky 1.2 mm s různým typem výztuže (sklo, uhlík). V grafu jsou znázorněny špičky zatížení z experimentálního měření. Rozsah rychlostí použitých při zkoušce odpovídá provozu např. bezpilotního létajícího prostředku.

Na základě získaných podkladů ze zkoušek na plochých zkušebních tělesech se stejnými okrajovými podmínkami je možné provést první posouzení zvoleného materiálu a současně ověřit a nastavit parametry výpočtového modelu tak, aby byl aplikovatelný pro optimalizaci a případně průkaz nové konstrukce.

NUMERICKÉ SIMULACE VYSOKORYCHLOSTNÍCH NÁRAZŮ

Pro numerické simulace jsou používány explicitní řešiče MKP [1]. Ve VZLÚ je pro tento typ úloh používán program ABAQUS/Explicit.

Model impaktoru (ptáka) je nahrazen ekvivalentní geometrií nejčastěji válcovým tělesem se sférickými konci (viz. obr. 5). Pro simulaci živé tkáně je používán hydrodynamický materiálový model popsáný parametry stavové rovnice využívající tabelované Hugoniotovy křivky pro vodu. Geometrický model je pro simulaci zasíťován elementy typu C3D8R, které jsou v průběhu analýzy změněny na tzv. částicové ele-

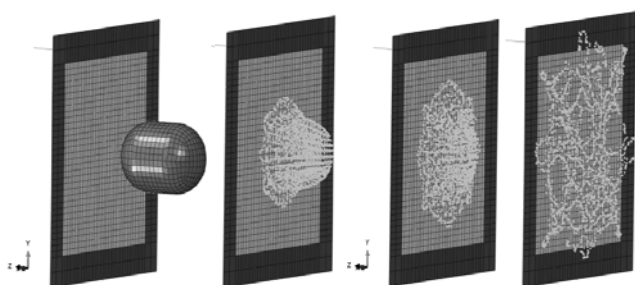


Obrázek 5 Náhradní geometrie projektilu pro simulaci ptáka (zleva geometrický model, síť konečných prvků a SPH elementy)

menty SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics).

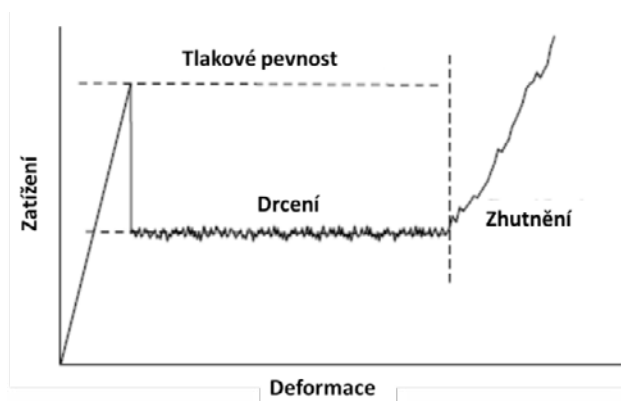
Kontakt mezi projektilem resp. jeho částicemi po porušení je při výpočtu definován pomocí tzv. obecného kontaktu.

Na obr. 6 je ukázka sekvence nárazu numerického modelu ptáka na pevnou překážku.



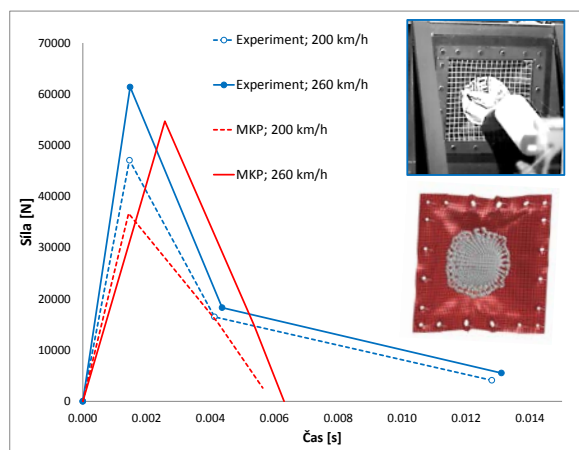
Obrázek 6 Sekvence simulace nárazu numerického modelu ptáka na pevnou překážku

Pro simulaci zkušebních těles jsou používány 2D elementy s materiálovým modelem typu Lamina definující skladbu a orientaci jednotlivých vrstev kompozitního materiálu. Pro modelování vzniku a šíření poškození je používáno Hashinovo energetické kritérium. V případě simulace sendvičové konstrukce je pěnový materiál modelován pomocí materiálového modelu Crushable Foam integrovaném v programu ABAQUS (viz. obr. 7).

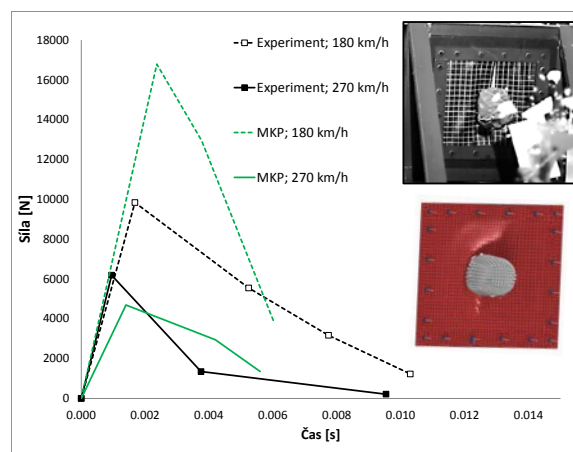


Obrázek 7 Závislost zatížení na deformaci pro materiálový model pěny

Na obr. 8 a obr. 9 je ukázka porovnání experimentálního měření s numerickou simulací kompozitních potahů tloušťky 1.2 mm se skleněnou a uhlíkovou výztuží.



Obrázek 8 Porovnání výsledků experiment s numerickou simulací na kompozitním materiálu tloušťky 1.2 mm se skleněnou výztuží



Obrázek 9 Porovnání výsledků experiment s numerickou simulací na kompozitním materiálu tloušťky 1.2 mm s uhlíkovou výztuží

Při porovnávání výsledků zkoušek nárazu ptáka je nutné uvážit větší rozptyl kvalitativních i kvantitativních výsledků měření z důvodu náhodného rozložení měkké tkáně a kostry použitého ptáka (nejčastěji kuře) v době impaktu. Dalším faktorem je jedinečnost každé zkoušky z hlediska rozptylu dopadové rychlosti a reálné hmotnosti impaktoru. V případě kompozitních materiálů mohou být výsledky ovlivněny lokálními vadami jako např. neprosycením, větší porozitou, neprůlepy atd., které je nutné identifikovat ještě před vlastní zkouškou NDT metodami.

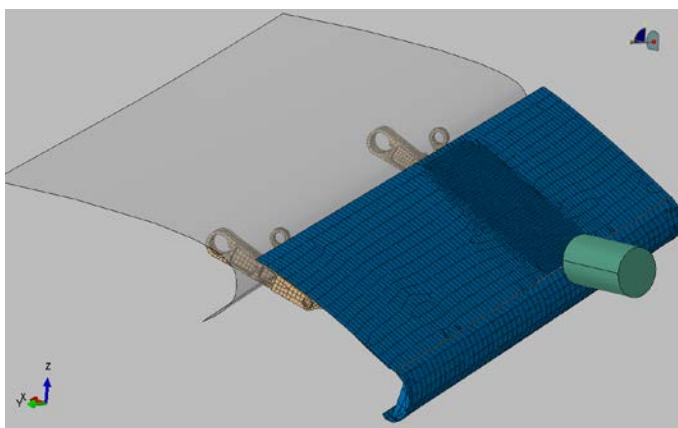
Na základě verifikace nastavení numerického modelu pro daný typ materiálu (zejména výztuže) je následně možný přenos na reálnou konstrukci zahrnující vliv geometrické tuhosti a reálných šikmých úhlů dopadu impaktoru.

APLIKACE NUMERICKÝCH SIMULACÍ VYSOKORYCHLOSTNÍCH NÁRAZŮ

V rámci řešení evropského projektu AFLoNext (Active Flow Loads & Noise control on next generation wing) byly ve VZLÚ provedeny numerické simulace nárazu ptáka pro analýzu zatížení mechanismu otvírání tzv. Kruegerovy klapky s cílem poskytnutí podkladů pro optimalizaci konstrukce ve fázi návrhu.

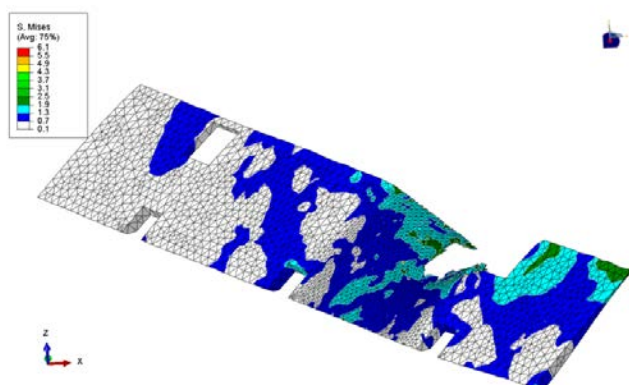
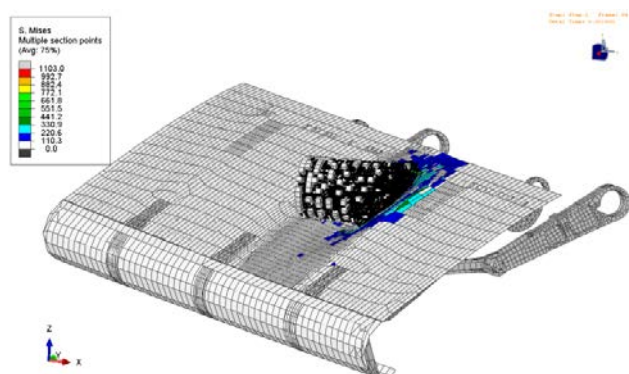
Pro simulaci nárazu byla uvažována hmotnost ptáka 4 lb (1.8 kg) a rychlost nárazu 500 km/h.

Vlastní klapka včetně samostatné náběžné hrany (bull nose), byla modelována jako kompozitová skořepina s pěnovou výplní. Pro model kompozitového potahu byly použity 2D elementy typu S4R s aplikací materiálového modelu Laminate a modelem poškození s Hashinovým energetickým kritériem. Pěnová výplň byla modelována pomocí 3D elementů typu C3D4 s aplikací materiálového modelu Crushable Foam (viz. obr. 7). Z důvodu aplikace rozdílných typů elementů s nekoincidentní sítí resp. uzly potahu a výplně, byl mezi elementy potahu a výplně aplikován kontakt s podmínkou vyloučení oddělení v případě ztráty kontaktu, simulující lepený spoj. Kovové části mechanismu otvírání klapky byly modelovány pomocí 1D a 3D elementů s aplikací Johnson-Cook materiálového modelu. Na obr. 10 je ukázka sestavy MKP modelu Kruegerovy klapky s modelem impaktoru a potahem pevné náběžné hrany modelovaným jako "rigid surface" pro analýzu kontaktu poškozených částí klapky a zabránění reziduálního impaktu na zakryté části mechanismu.

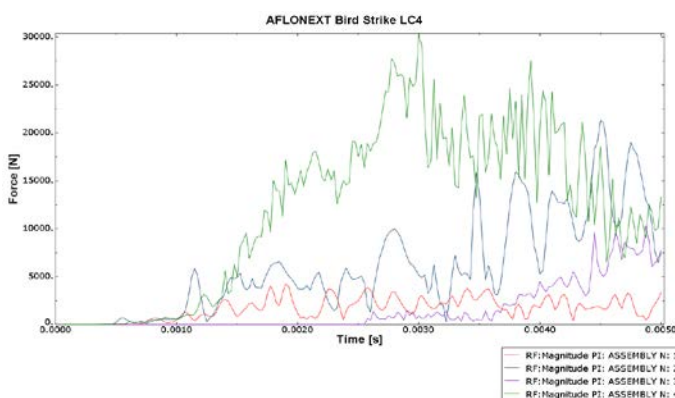
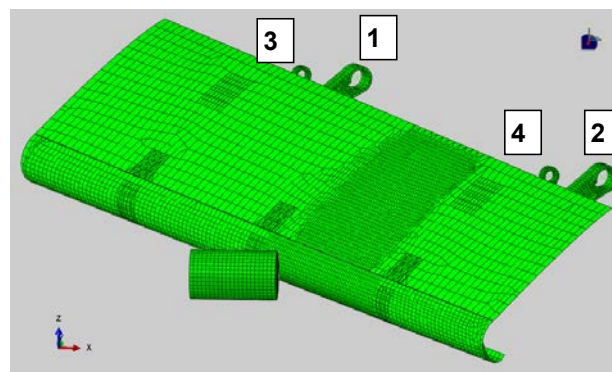


Obrázek 10 MKP model sestavy Kruegerovy klapky pro simulace nárazu ptáka

Výsledky simulací byly vyhodnoceny z hlediska poškození kompozitní části konstrukce a především z hlediska zatížení jednotlivých částí mechanismu ovládání klapky. Na obr. 11 je ukázka deformace a poškození náběžné části klapky a modelu výplně (pěny) v průběhu simulace nárazu ptáka.



Obrázek 11 Simulace nárazu ptáka na Kruegerovu klapku (redukované napětí na potahu a v pěně)



Obrázek 12 Ukázka výsledků průběhů zatížení v místě uchycení ovládacího mechanismu klapky

Na obr. 12 je ukázka průběhů zatížení mechanismu ovládání klapky při nárazu ptáka.

Výsledky simulací, které zahrnují vlivy jako pohlcení energie nárazu porušením části konstrukce a vlastního impactoru umožňují více realistické posouzení odolnosti navržené konstrukce a případné změny ještě ve fázi návrhu.

ZÁVĚR

V příspěvku je ukázán přístup k verifikaci výpočetních metod pro aplikaci vysokorychlostních impactů pro fázi konstrukčního návrhu a optimalizaci konstrukce. Zejména při řešení havarijních a nestandardních případů zatížení je uplatnění numerických metod přínosné z hlediska redukce nákladů na výrobu a případnou modifikaci konečného produktu. Ověřené výpočetní metody nacházejí stále širší uplatnění také v certifikačních procesech.

Literatura:

- [1] Doubrava, R.: Metodika aplikace SPH pro simulace rychlých rázových dějů; report VZLU R-5841, VZLÚ, Praha, 2013

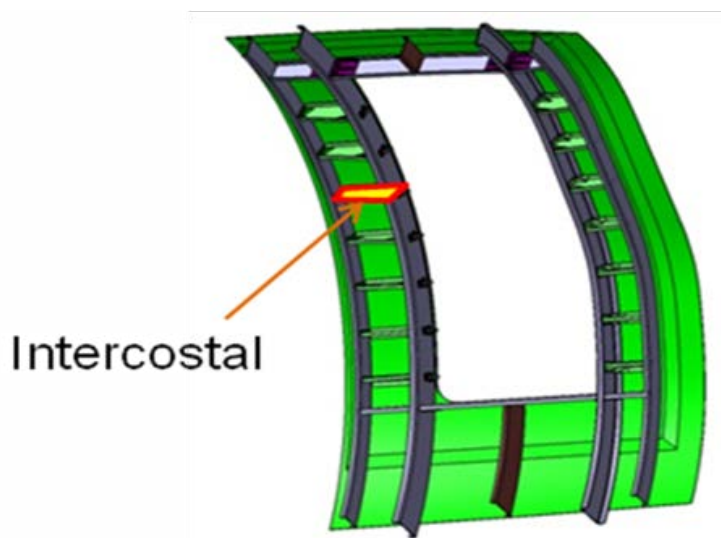
Vývoj a zkoušky optimalizovaného žebra z vyztuženého termoplastu C/PPS

Ing. Josef Křena, Ing. Petr Rožkanin, Ph.D.

V příspěvku je popis návrhu, výroby a zkoušek žebra z vyztuženého termoplastu, u kterého byl optimalizován jednak tvar a jednak skladba. Novostí pro tento typ kompozitu je použití stupňované skladby s nekonztantní tloušťkou. Ta byla navržena na základě napěťové analýzy pomocí MKP. Žebro bylo vyrobeno v přípravku vlastní konstrukce a podrobeno mechanické statické zkoušce.

SOUČASNÝ STAV TECHNOLOGIE

V posledních 10 letech se použití vyztužených termoplastů v letecké konstrukci významně rozšiřuje. Jejich hlavní výhodou je rychlost jejich zpracování ve srovnání s dosud masivně používanou prepregovou technologií s vytvrzením v autoklávu. To je dosaženo zatím nejčastěji používaným procesem termoforming, kdy se za tepla tváří již předem vyrobená kompozitová deska dané skladby a tloušťky. Rychlost této technologie je však dosažena za cenu zatím malé možnosti optimalizovat také skladbu vrstev. Jednou možností je individuálně položit vrstvy polotovaru, který se následně konsoliduje do rovinné desky a ta se pak tvaruje běžným postupem. Druhá cesta je pokládat a kontinuálně konsolidovat pás vyztuženého termoplastu přímo na daný tvar formy. Tato druhá cesta je přístrojově velmi náročná, protože se musí velmi přesně řídit parametry při kladení, kterými jsou teplota, přitlačná síla, rychlost kladení a ochlazování. To je možné zaručit nejčastěji robotem s kladecí hlavou, kde se ohřev provádí laserem. Pro dále popsanou výrobu žebra byl použit postup první.



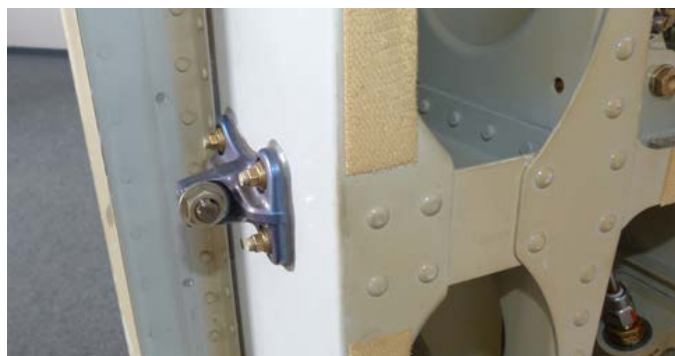
Obrázek 1 Schéma trupové skořepiny v okolí dveří

POPIS DÍLU "INTERCOSTAL"

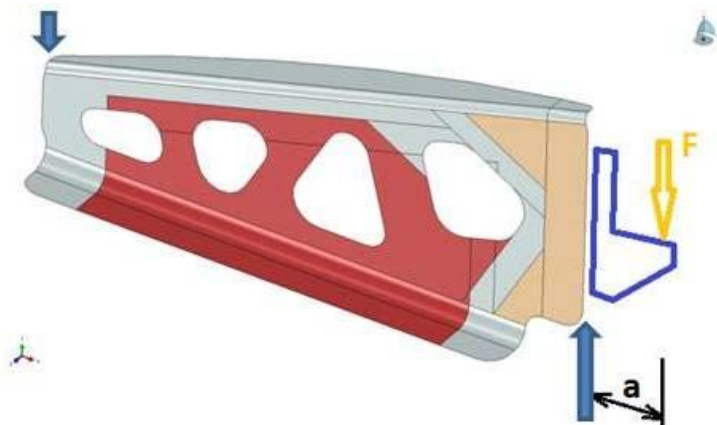
Pro demonstrátor použití nové technologie byl vybrán díl nazvaný dále Intercostal. Je to výztuha, která spojuje dvě přepážky trupu dopravního letounu v okolí dveřního otvoru. Představu o umístění dává obrázek 1. Díl je tedy mechanickými prvky připojen k dvěma přepážkám, kdy jedna z nich je současně rámem dveří, a potahu. Čtvrtá strana Intercostalu je volná. V místě Intercostalu je na rámu dveří namontována konzola, o kterou se opírají dveře v zavřeném stavu. Tato síla je právě pomocí Intercostalu převedena jednak do potahu trupu v jeho okolí ale zejména do sousední přepážky.

Konzoly pro zachycení lokálních sil od zámků dveří jsou v současnosti nejčastěji vyrobeny z titanu. Na dveřích je obdobná konzola - zámek, který je na obrázku 2. Tento zámek je vlastně protikusem v kontaktu s konzolou na rámu dveří v trupu z obrázku 3, do kterého zavádí sílu F.

Pro Intercostal bylo v tomto případě definováno zatížení podle obrázku 3.



Obrázek 2 Titanová konzola na dveřích



Obrázek 3 Zjednodušené zatížení prvku Intercostal

Typ i velikost zatížení je dána silou od zámku vyvolanou vnitřním přetlakem v trupu na dveře. Síla "F" je ve vzdálenosti "a" od rámu dveří. Do rovnováhy je tento díl pak uveden silami od přepážky procházející rámem dveří a té nejbližší sousední. Tyto síly jsou v obrázku 2 znázorněny modře.

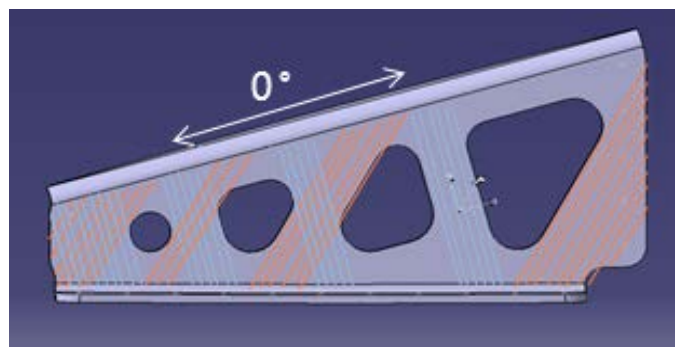
NÁVRH A DIMENZOVÁNÍ

Základní návrh geometrie dílu je na obrázku 4.

Je to klasický tvar žebra, který je běžně používán v kovové konstrukci draku, která nedává tak široké možnosti k optimalizaci jako kompozit. Kompozit s termoplastovou matricí je zatím stále relativně dražší, a proto bylo záměrem projektu provést optimalizaci tvaru i skladby, aby tato nevýhoda byla co možná nejvíce eliminována a bylo použito minimálního množství materiálu z důvodu ceny i hmotnosti.

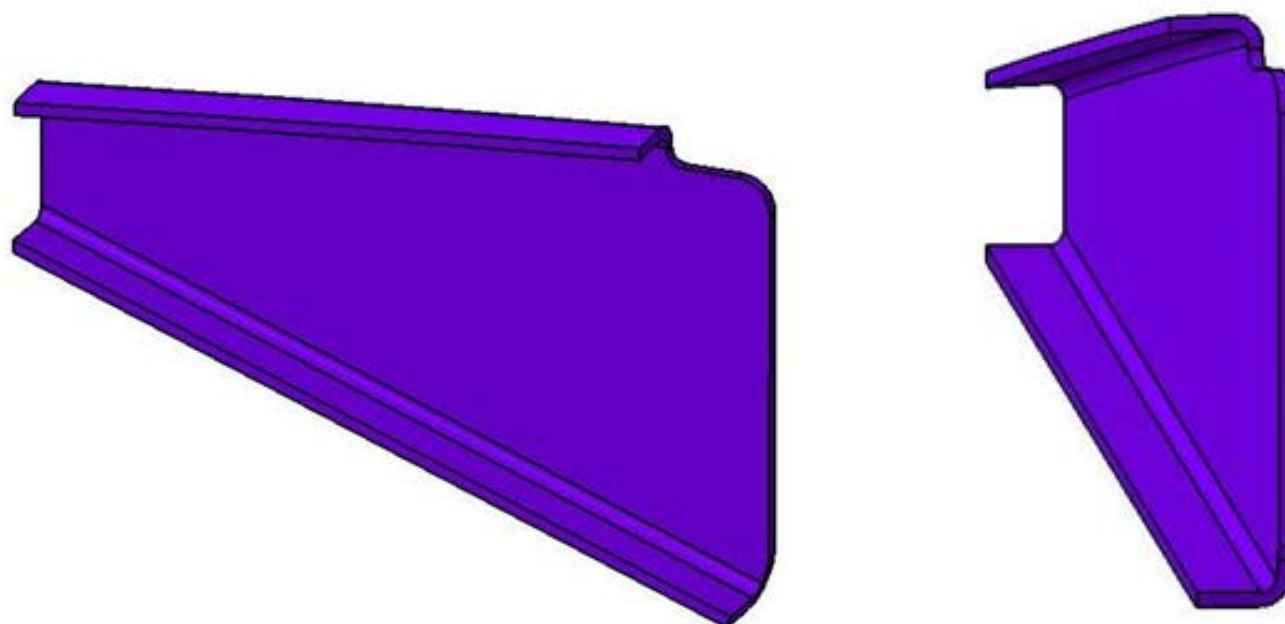
Optimalizace geometrie dílu

Volná strana Intercostal je pro udržení stability u základního tvaru vyztužena pásnicí o konstantní šířce. Pro zvýšení stability stojiny v ohybu je vhodná nejširší pásnice ve středu délky, proto byla tato navržena s proměnnou šířkou. Dále z napěťové analýzy bylo zřejmé, že stojinu je možné oslabit. Oslabení pouze v tloušťce by vedlo k nízké stabilitě ve smyku. Proto byly zvoleny odlehčovací otvory, jejichž tvar navíc konvenoval se základními směry orientace vláken ve skladbě. To je znázorněno na obrázku 5.



Obrázek 5 Tvar odlehčovacích otvorů v relaci k orientaci vláken

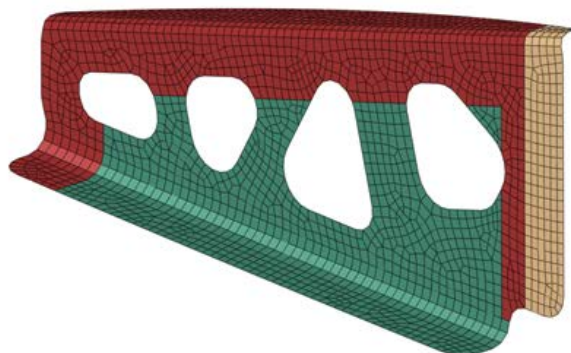
Poslední geometrickou změnou bylo otočení volné pásnice na opačnou stranu vůči pásnici přiléhající k potahu. To bylo učiněno z důvodu snazší technologie výroby. Tvar je zřejmý už z obrázku 2.



Obrázek 4 Základní schéma geometrie dílu "Intercostal"

Optimalizace skladby dílu

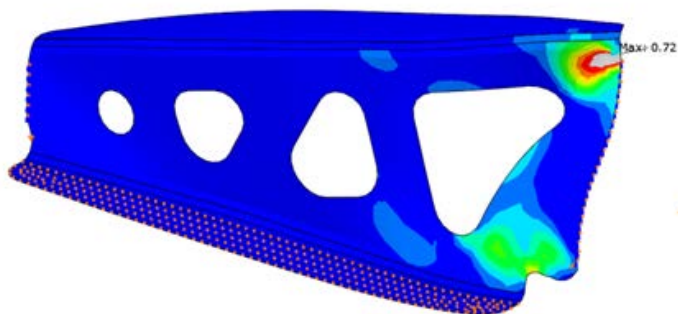
Jako základ modelu pro výpočet napěťové analýzy byla zvolena vnější geometrie dílu, kde byly v jednotlivých alternativách měněny tvary otvorů ve stojině a skladba vrstev. Příklad modelu rozděleného na prvky je na obrázku 6.



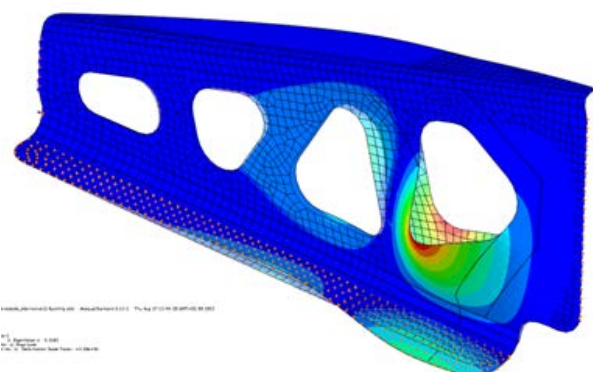
Obrázek 6 Síť prvků modelu MKP

Pro výpočet byly použity prvky skořepinové s typickou velikostí 5 mm. Barevně jsou odlišeny oblasti s rozdílným počtem vrstev. Kritickým místem bylo lokální zavedení síly od šroubového spoje na pravé straně a zejména v pravém horním rohu. Změny jednotlivých alternativ modelu spočívaly v úpravách skladby i tvaru otvoru právě v této oblasti.

Hodnocení jednotlivých alternativ bylo podle pevnostních kritérií Hashin a LaRC. Jako příklad je uvedeno zobrazení hodnoty indexu porušení v barevné škále pro alternativu 8 na obrázku 7.



Obrázek 7 Zobrazení indexu porušení podle kritéria LaRC pro laminy ve směru T.

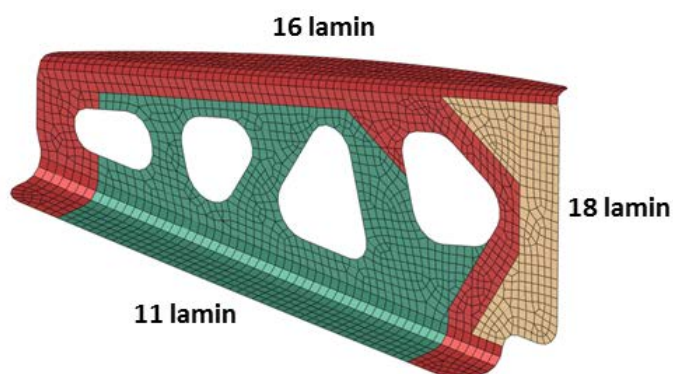


Obrázek 8 První tvar ztráty stability alternativy 12

Byla simulována také stabilita dílu, kdy cílem bylo nalézt zásobu stability vůči velikosti specifikovaného zatížení. Zobrazení prvního tvaru ztráty stability alternativy 12 je na obrázku 8.

Vyhodnocena byla pětinasobná zásoba stability. Jak je vidět na obrázku 7, k vybočení by došlo v dolním okraji největšího otvoru.

Popsaným způsobem byla jako optimální nalezena alternativa 12, která je zobrazena na obrázku 9.

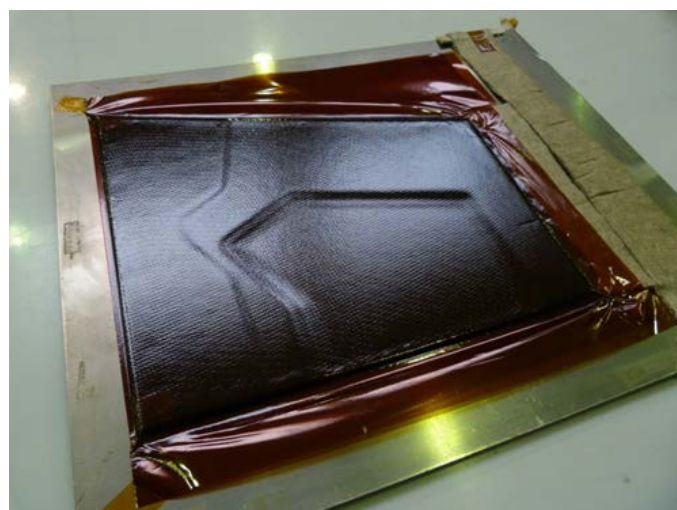


Obrázek 9 Alternativa 12 s vyznačením počtu vrstev

Stupňování počtu vrstev bylo provedeno postupně v určitém úseku, aby změna zejména mezi 11 a 16 vrstvami nebyla zdrojem koncentrace napětí. Tento konstrukční uzel byl zkoušen na tahových vzorcích pod statickým i cyklickým zatížením.

VÝROBA DEMONSTRÁTORU

Základní vrstvou použitou pro skladbu je semipreg s uhlíkovou tkaninou atlasové vazby 5HS o plošné hmotnosti 285 g/m² a pojivem polyfenylen-sulfid (dále jen PPS) s hmotnostním podílem 43 %. Její tloušťka v konsolidovaném stavu je 0,3 mm. Technologie zpracování tohoto polotovaru spočívá ve dvou teplotních cyklech. Prvním je konsolidace rovné desky, která již má požadovanou skladbu a druhým krokem je po opětovném ohřátí desky její tvarování ve formě, které se nazývá termoforming.



Obrázek 10 Konsolidovaný blank s optimalizovanou skladbou

Příprava rovné desky dané skladby (dále již "blank") se provádí skládáním jednotlivých vrstev semipregu požadované velikosti a orientace na sebe. Vzájemná poloha se fixuje bodovou ultrazvukovou svářečkou. Složený polotovár se následně konsoliduje při teplotě přibližně 320°C a vhodném tlaku. Výsledný blank je na obrázku 10.

Pro blank s proměnnou tloušťkou byla konstruována také forma s požadovaným tvarem a odpovídající tloušťkou dutiny. Forma byla zhotovena z duralu, jehož povrch byl upraven speciálním separátorem. Pro vlastní termoforming musí být forma ohřátá na teplotu 160 - 200°C a blank na teplotu 330°C. Délka lisovacího cyklu zahrnující dobu ohřátí blanku, jeho zalisování, ochlazení a vyjmutí z formy je 5 - 7 minut. Obrobění obrysu bylo provedeno běžnými metodami pro kompozitové díly.

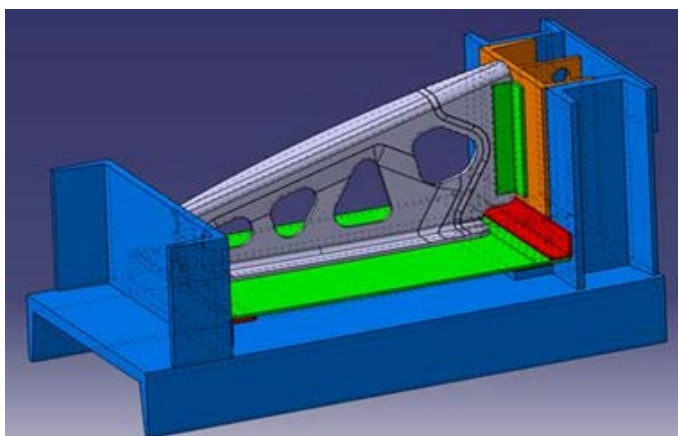


Obrázek 11 Demonstrátory Intercostal

U dílu proběhla geometrická kontrola úhlů a tloušťek. Rovněž byla provedena nedestruktivní inspekce pomocí ultrazvuku pro hodnocení výskytu vnitřních vad. Žádná porosita ani jiné lokální vady nebyly nalezeny.

ZKOUŠKY DÍLU "INTERCOSTAL"

Jeden demonstrátor byl použit pro statickou zkoušku pod specifikovaným zatížením. V souladu s okrajovými podmínkami byl konstruován zatěžovací přípravek, který je znázorněn i s upnutým dílem na obrázku 12.



Obrázek 12 Schéma zatěžovacího přípravku pro Intercostal

Pro sledování posuvů byla použita metoda Aramis, která umožňuje sledovat posuvy na celém viditelném povrchu dílu. Při zatížení až do specifikované síly nebylo pozorované žádné porušení. Další zatěžování pak proběhlo až do destrukce, která nastala poměrně vysoko nad specifikovanou hodnotou zatížení.

ZÁVĚR

Tento projekt měl využít metody konstruování pro díl z vyztuženého termoplastu pro návrh jeho tvaru a optimalizované skladby. Byly vyvinuty a ověřeny základní principy přípravy blanku s individuální skladbou a technologie termoformingu pro něj. Kvalita demonstrátoru byla vyhovující a potvrdila správnost technologie. Pevnostní zkouška prokázala pevnost větší, než předpověděl výpočet MKP a další práce budou orientovány na hledání větší shody.

Tento projekt byl uskutečněn v rámci programu podpory ALFA TA03010209 organizovaném TAČR. Významně na něm spolupracovalo oddělení pevnosti VZLÚ při výpočtech MKP a pevnostní zkoušce.

Vývoj kompozitního vzduchovodu pro letoun L-39 NG

Ing. Jan Václavík a kolektiv

Kompozitní vzduchovod pro letoun L-39NG vzniká v rámci projektu TE02000032 vypsaného Technologickou agenturou ČR "Výzkumné centrum pokročilých leteckých konstrukcí" v úzké spolupráci řešitelského týmu vedeného společností AERO Vodochody AEROSPACE a.s., jehož členy jsou VZLÚ, a.s., ČVUT v Praze - Ústav letadlové techniky, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, VUT v Brně - Letecký ústav a Honeywell International s.r.o. Jedná se o demonstrátor primární kompozitní konstrukce letounu spadajícího do kategorie CS-23, na který jsou kladeny komplexní nároky v oblasti životnosti, spolehlivosti a ekonomiky provozu.

ZÁKLADNÍ PARAMETRY A PŘÍNOS PROJEKTU

Letoun L-39NG a integrace kompozitního vzduchovodu

Aero Vodochody Aerospace a.s. vyvíjí novou generaci cvičného proudového letounu L-39 NG. Konstrukce letounu vychází z osvědčeného typu L-39, který byl vyráběn bezmála 40 let, dodáván do letectev 36 států po celém světě a je rovněž užíván mnoha soukromými uživateli. Mezi hlavní změny patří nová pohonná jednotka, motor Williams FJ44-4M, "mokrý" křídlo s integrálními palivovými nádržemi, nově řešené uspořádání kabiny se záchranným systémem včetně integrace moderní avioniky, instalace podtrupového závěsníku a mnohé další. Projekt rovněž počítá s vyšším podílem kompozitních dílů zejména v sekundární konstrukci, než jak tomu bylo na L-39 přechodí generace, kde byl podíl kompozitů celkově nízký. Vizualizace letounu L-39NG je znázorněna na obrázku 1.



Obrázek 1 Vizualizace projektu letounu L-39NG

To je patrné i v konstrukci střední části trupu, do které je kovový vzduchový kanál zintegrován bez možnosti další demontáže nebo větší opravy v případě jeho poškození např. nárazem ptáka nebo cizího předmětu. Velkým problémem může být rovněž akustická únava celé tratě vzduchovodu způsobená tlakovými rozruchy, které jsou buzeny motorem. To může být markantní zejména při instalaci jiného motoru než AI-25 použitého na původním letounu. Tyto problémy již v minulosti několikrát rodinu letounů L-39 postihly. Např. pro letoun L-59 bylo nutné při použití motoru DV-2 dodatečně celý vzduchový kanál vystužit kompozitní výstelkou, která svými útlumovými vlastnostmi snížila míru akustické únavy konstrukce kanálu na přípustnou mez.

V případě L-39NG lze rovněž očekávat obdobné problémy s akustickou únavou. Možným řešením je zcela nová konstrukce vzduchovodu z kompozitního materiálu, který bude vykazovat výrazně lepší útlumové hodnoty oproti původní kovové variantě. Jako demonstrátor pokročilý primární kompozitní konstrukce velkého letounu byl proto zvolen vzduchovod jako hlavní náplň pracovního balíčku 1 výzkumného projektu "Výzkumné centrum pokročilých leteckých konstrukcí".

Přínosy projektu

Očekávaným přínosem tohoto řešení je úplné odstranění problémů s akustickou únavou, její hlubší zkoumání spojené s detailním vhlédem do této problematiky, snížení hmotnosti kanálu a optimalizace konstrukce kanálu dle požadavků konceptu "Damage tolerant", který musí tento typ konstrukce splňovat. Dále bude vyvíjena metodika konstrukčního návrhu pokročilých konstrukcí, metodika průkazu "Damage tolerant", výzkum a vývoj pokročilých FEM nástrojů pro analýzu impaktního poškození a únavových vlastností kompozitní konstrukce s ověřením v průběhu plánované zkušební kampaně.

Charakter konstrukce bude klást také zvýšené nároky na technologické procesy a detailnější výzkum nových procesů v oblasti integrálních spojů, které budou součástí konstrukce. Bude nutné se detailně zabývat integrací kovových subkomponent do kompozitní konstrukce. Samotnou kapitolou je vývoj přípravečného vybavení, které bude

vzhledem k geometrickým podmínkám relativně komplikované, neboť nejvyšší nároky na kvalitu povrchu kanálu jsou na jeho vnitřní straně, která je obtékána nabíhajícím proudem vzduchu a jakékoliv odchylky tvaru jsou nežádoucí. Tento požadavek, i vzhledem ke tvaru kanálu, bude vyžadovat konstrukci více dílné vnitřní formy (typu trn) která zároveň umožní vytvrzování integrálních dílů při co-curing procesech.

Nezbytné také bude kontrolovat konstrukci v průběhu jak výrobního procesu, tak i během následujících zkoušek pomocí pokročilých NDT metod. V projektu budou využity a dále rozvíjeny ultrazvukové a termografické metody nedestruktivních zkoušek.

Předpis požaduje průkaz odolnosti vůči impaktnímu poškození, kterým je v případě kanálu náraz ptáka nebo krup. Ty mohou, krom jiného, způsobit obtížně viditelné poškození (BVID) stěny vzduchovodu s potenciálem rozvoje větších trhlin. Z tohoto důvodu je nutné během provozu letounu kontrolovat stav konstrukce vzduchovodu a detekovat případný vznik trhlin. V dnešní době je tedy logickým krokem integrace SHM systému (Structure Health Monitoring), který by kompozitní stěny vystavené nárazům průběžně monitoroval a vyhodnocoval jejich stav. V rámci projektu budou vyvíjeny dva vzájemně nezávislé systémy, jejichž data bude možné pro potřeby vývoje porovnávat. První systém bude analyzovat posuv vlnové délky v Braggově mřížce uvnitř optického vlákna zakomponovaného ve skladbě laminátu. Druhý systém počítá se senzory řízených ultrazvukových vln umístěnými z vnější strany kanálu.

Jedná se tedy o poměrně rozsáhlý výzkumný projekt, který není možné realizovat pouze jedním pracovištěm, proto byl pro jednotlivé partnery rozdělen na tyto základní okruhy:

- » Aero Vodochody Aerospace a.s. - návrh konstrukce, metodika konstrukce primárního kompozitního dílu, vývoj a výroba přípravkového vybavení, výroba vzorků pro potřeby zkoušek, technologické zkoušky, výroba demonstrátoru kompozitního vzduchovodu s integrovaným SHM systémem
- » VZLÚ a.s. - návrh zkušebního programu, realizace zkoušek demonstrátoru zahrnující impakty, náraz ptáka a akustickou únavu, metodika výpočtu a průkazu konstrukce v souladu s filosofií "Damage tolerant", vývoj a experimentální ověření pokročilých NDT metod
- » ČVUT v Praze - řešerše požadavků a předpisů, návrh a provedení materiálových zkoušek a zkoušek spojů, FEM analýza akustického zatížení a optimalizace skladby a výtuh vzduchovodu s ohledem na toto zatížení, aplikace pokročilých NDT metod, vývoj SHM systémů (FBG)
- » VUT v Brně - výpočtová metodika, vývoj výpočetních metod, zejména pak impaktního poškození konstrukce (náraz krup a ptáka), optimalizace skladby z pohledu impaktu, definice certifikačních zkoušek
- » Honeywell International s.r.o. - vývoj a integrace SHM systému pro monitoring impaktního poškození do konstrukce vzduchovodu.

Vstupní podmínky a návrh konstrukce

S ohledem na návrh letounu L-39NG musí demonstrátor vzduchovodu splnit podmínky pramenící jednak z celkových nároků na konstrukci letounu, a také ty, které plynou z interakce mezi kompozitním vzduchovodem a kovovým drakem letounu, jsou to zejména:

- » Odolnost vůči akustickým vibracím buzených motorem - materiálové tlumení
- » Celková únavová odolnost - do konstrukce vzduchovodu vstupuje celá škála zatížení, jako je zatížení od tepelné dilatace

mezi jednotlivými materiály použitými v draku letounu, statické zatížení trupu od aerodynamických a setrvačných sil a zejména pak již zmíněné akustické vibrace

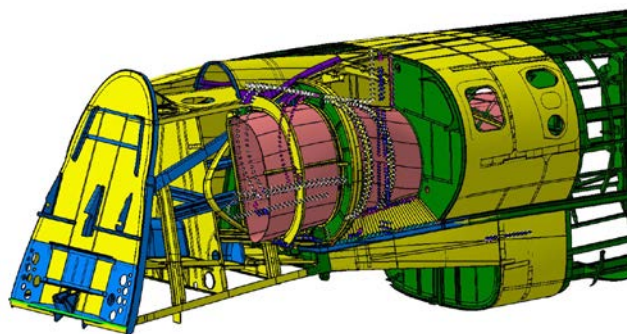
- » Teplotní odolnost a tvarová stálost - rozsah operačních teplot je plánován v rozmezí $-55^{\circ}\text{C}/+72^{\circ}\text{C}$, za těchto podmínek nesmí dojít ke změně mechanických vlastností a tvarovým deformacím
- » Konstrukce musí být navržena v souladu s evropským vojenským stavebním předpisem EMACC s primárním certifikačním kódem CS-23, k tvorbě předpisové báze musí být použit proces tzv. "tailoringu" kterým jsou sestavovány požadavky do matricové struktury
- » Odolnost proti nárazu drobných předmětů, zejména krup - konstrukce musí odolat nárazu kroupy do maximální velikosti $r=50$ mm při rychlosti dopadu $\text{IAS}=190$ kts
- » Odolnost vůči nárazu ptáka - vzduchovod musí odolat nárazu ptáka definovaným předpisem EMACC jako 4 libry vážící těleso, letící rychlostí $v=200$ kts
- » Elektrická vodivost a odolnost vůči zásahu bleskem, odolnost vůči elektro galvanické korozi na rozhraní kompozitu a kovovým drakem
- » Technologická jednoduchost a vyměnitelnost - konstrukce musí být navržena s minimem spojů tak, aby v případě vzniklého poškození jí bylo možné buď opravit (což vyžaduje další vývoj metodiky oprav nad rámec tohoto projektu) anebo vyměnit za nepoškozený díl
- » Výrobní technologie - vzhledem k dostupným technologickým možnostem bude vzduchovod vyrobený autoklávovou technologií, tj. základním materiálem bude prepreg certifikovaný pro leteckou výrobu

NÁVRH A SROVNÁVACÍ ZKOUŠKY

Po detailní definici vstupů byly zahájeny práce na předběžném konstrukčním návrhu. Srovnávací testy materiálových vlastností pak mají za cíl vybrat nejvhodnějšího kandidáta z vytipované množiny materiálů, který svými vlastnostmi vyhoví nejvíce požadavkům uvedeným v předchozí kapitole. Součástí návrhu jsou také práce na návrhu a konstrukci přípravkového vybavení - forem, jedním z klíčových prvků celého projektu.

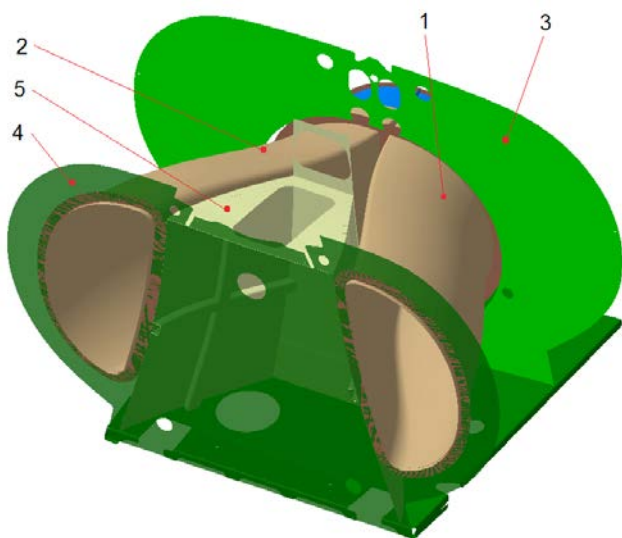
Konstrukční návrh

Instalační studie potvrdila možnost vyměnitelnosti vzduchovodu, což v případě letounu L-39C nebylo u kovové varianty možné vzhledem k integraci v okolní struktuře draku (viz. obr. 2). Tato vyměnitelnost je ovšem podmíněna konstrukčními úpravami samotného vzduchovodu včetně okolní konstrukce draku. Na obrázku 2 je znázorněn 3D model střední části trupu stávající podoby letounu L-39C.



Obrázek 2 3D model střední části trupu letounu L-39C

Jak je patrné z obrázku 3, dojde k rozdělení vzduchového kanálu na dvě separátní ramena (pozice 1, 2), která budou uložena v mezi trupovými přepážkami číslo 26 (pozice 4) a číslo 29 (pozice 3). Mezi rameny vzduchovodu zůstane i nadále trupová nádrž číslo 5 tvořená gumovým vakem. Ta však bude umístěna v odděleném boxu (pozice 5), který převede zatížení od paliva vzniklé účinkem gravitačních a setrvačných sil dále do draku letounu, aniž by došlo k namáhání vzduchovodu a dále pak bude zvyšovat tuhost draku střední části trupu.

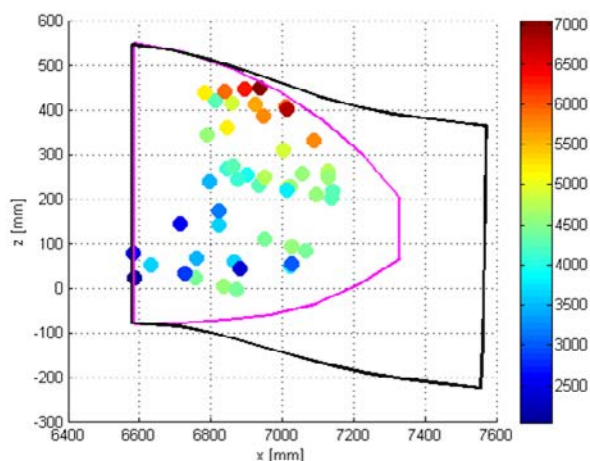


Obrázek 3 3D model modifikované střední části trupu s kompozitním vzduchovodem

Takto uložená ramena vzduchovodu budou k trupovým přepážkám připevněna pomocí přírubových spojů, které lze v případě potřeby rozebrat a jedno nebo druhé rameno vyjmout. Obě ramena je možné vyrobit v celku s i s přírubami, které budou integrovány do stěn vzduchovodu.

Takto upravená kompozitní konstrukce bude zatížena pouze aerodynamickými silami a akustickým zatížením od motoru. Rozdíl v tepelných dilatacích mezi kompozitem a okolní duralovou konstrukcí lze řešit pomocí vhodného spoje, například táhel, za která bude vzduchovod zavěšen v přepážce č. 29. Volba vhodného spoje bude předmětem dalšího vývoje.

Byla provedena analýza kritických oblastí vzduchovodu z pohledu nárazu krup a ptáka, která definovala ty zóny kanálu, kde hrozí největší riziko poškození z hlediska maximální energie nárazu cizího předmětu, viz. obrázek 4. Podrobně se touto analýzou zabývá zpráva [1].



Obrázek 4 Znázornění energií nárazu a vyšetření oblastí impaktů pro jednotlivé případy

Jak je patrné z obrázku 4, veškeré impakty se soustřeďují na vnější stěnu vzduchovodu do oblastí s největší křivostí. V této oblasti je maximální normálová složka energie nárazu pro kroupu o průměru 50mm 255 J a pro ptáka o hmotnosti 4 lbs dosahuje složka energie hodnoty 5617 J. Tento poznatek je důležitý jednak pro dimenzování skladby, která musí být optimalizována pro podmínky nárazu krup a ptáka a dále pak pro zástavbu komponent vně vzduchovodu v oblastech potenciálně ovlivněných průrazem vzduchovodu. Nebude zde vhodné instalovat kritické agregáty a komponenty jako např. palivovou instalaci nebo palivové nádrže.

Volba materiálu a srovnávací materiálové zkoušky

Vzhledem k vysokým nárokům na materiál, zejména na jeho impaktní vlastnosti a schopnost útlumu akusticky buzených rozruchů, byla vytipována množina materiálů, které by těmto nárokům měly svými vlastnostmi vyhovět. Vzhledem k očekávané povaze zatížení je zvolena ve všech případech tkaninová výztuž s plátěnou vazbou. Jak bylo uvedeno výše, vzhledem k použití autoklávkové technologie se tedy jedná ve všech případech o prepregové materiály. Vybrána byla tato množina materiálů:

- » Uhlíkový prepreg Hexply 8552/40%/AGP 193P
- » Kevlarový prepreg SS-9612
- » Skelný prepreg Hexply 7781 8552S
- » Hybridní skladba s kombinovanými vrstvami uhlíkového a kevlarového preregu
- » Hybridní skladba s kombinovanými vrstvami skelného a kevlarového preregu
- » Prepreg s hybridní tkaninou sklo/kevlar EP250FR1/CKF165P/45120

Pro získání potřebných dat do rozhodovací matice pro finální volbu materiálu byly navrženy srovnávací materiálové testy, na nichž se podílí všichni partneři projektu, zejména pak VZLÚ, ČVUT, VUT a Aero Vodochody. V současné době srovnávací testy dobíhají a po dosazení získaných dat do rozhodovací matice bude vybrán nejvhodnější materiál. Stručně jsou testy popsány níže.

IMPAKTNÍ ZKOUŠKY MATERIÁLOVÝCH KUPONŮ

Jedním z hlavních výběrových kritérií je rázová odolnost materiálu. V literatuře se podařilo dohledat jen minimum informací, bylo proto nutné přistoupit k realizaci zkoušek na materiálových kuponech.

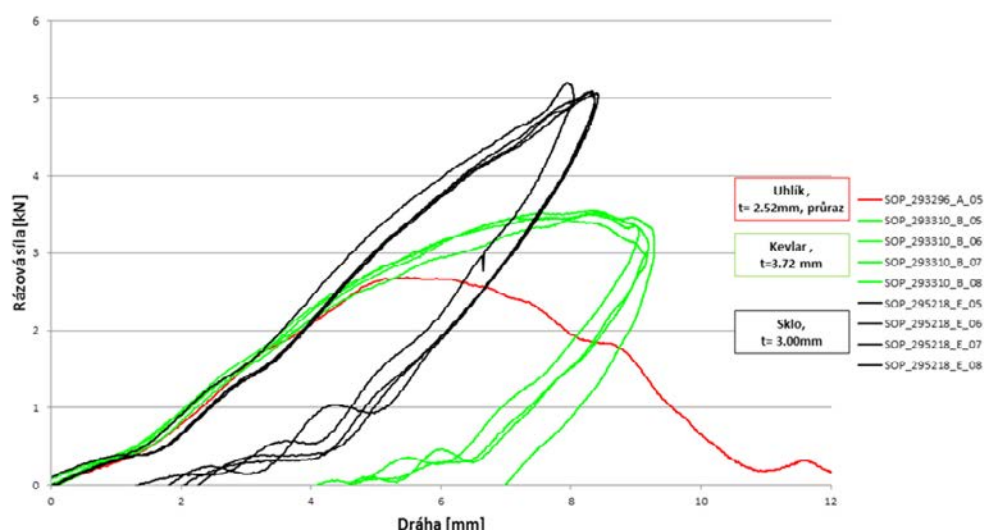
Zkoušky plochých kuponů byly provedeny ve spolupráci s VZLÚ na zkušebním padostroji - impaktoru SUPR dle metodiky upravené pro potřeby srovnávacích testů. Byly zkoušeny kupony se stejnou skladbou na stejných úrovních nárazové energie razníku, který měl průměr 12,5mm a 25mm pro zkoumání vlivu velikosti razníku na míru poškození.

Celkem bylo zkoumáno 6 sad vzorků po 20 kuponech v prvním kampani zkušek a 2 sady vzorků po 20 kuponech v druhé upřesňovací kampani. Cílem bylo zjistit míru pohlcené energie nárazu razníku pro jednotlivé materiály při definovaných energiích nárazu, míru pevnosti jednotlivých materiálů a způsob porušení vzorků. Data získaná měřením v průběhu zkušek dále slouží k naladění výpočtového modelu v řešičích DYTRAN a NASTRAN, který byl navržen na VUT.

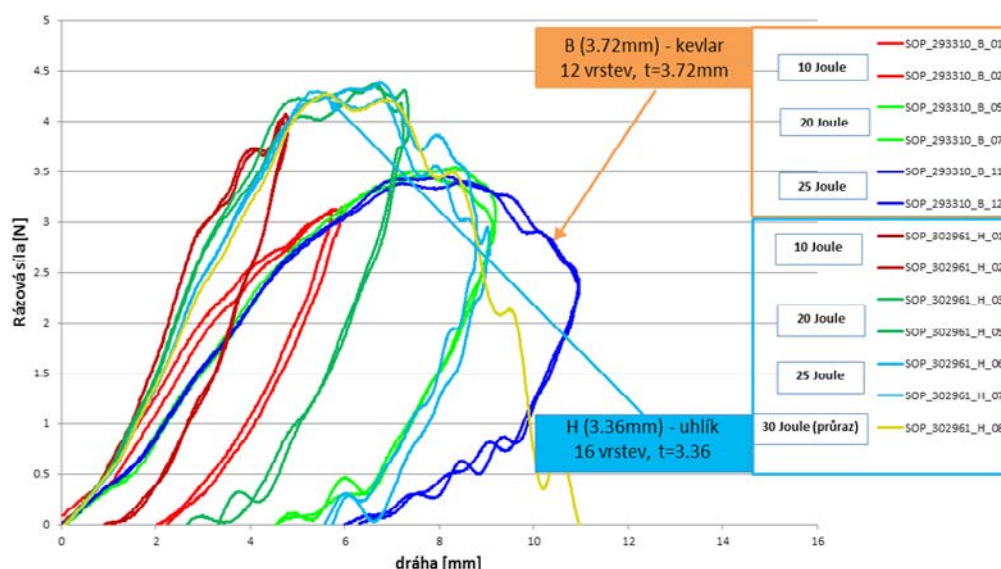
Jako hlavní hodnotící kritérium byla vzata velikost rázové síly v závislosti na deformaci vzorku. Integrace plochy pod touto křivkou vyjadřuje energii absorbovanou materiálem.

Výsledky pro danou konfiguraci zkoušky ukázaly následující:

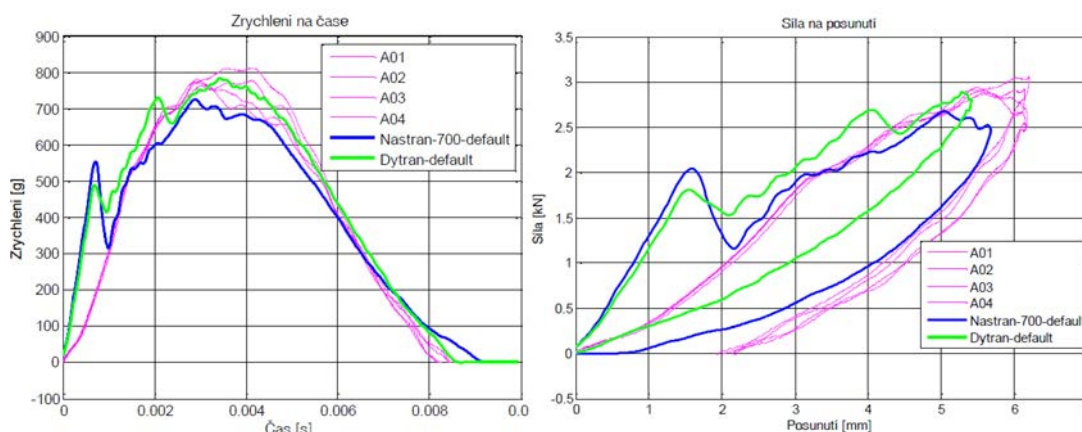
- » Nejlepší impaktní charakteristiky má jednoznačně skelný kompozit (přenesl nejvyšší rázovou sílu a je pružný při trvalé deformaci)
- » Při stejné skladbě má kevlarový kompozit lepší vlastnosti než uhlíkový (s tím, že uhlíkový prepreg má výrazně menší nominální tloušťku než kevlarový), jak je patrné z průběhu grafu na obrázku 5.
- » Při použití skladby pro dosažení stejné tloušťky uhlíkového i kevlarového kompozitu se Uhlíkový kompozit vyztuží a je schopen přenést výrazně větší rázovou sílu a tím absorbovat vyšší rázovou energii, což znázorňuje graf na obrázku 6.
- » Kombinace různých kombinovaných skladeb s kevlarom nepřináší významné zlepšení impaktních charakteristik
- » S vyšším průměrem impaktního tělesa se značně zvyšuje odolnost proti impaktu



Obrázek 5 Porovnání průběhu rázové síly pro uhlíkový, kevlarový a skelný laminát stejné skladby při impaktu o energii 20J



Obrázek 6 Porovnání impaktních vlastností Uhlík/Kevlar (stejně tloušťky) při různých rázových energiích



Obrázek 7 Porovnání výsledků výpočtu řešiči Dytran a Nastran s experimentem při energii nárazu 10J

ZKOUŠKY REZIDUÁLNÍ OHYBOVÉ PEVNOSTI

Vzorky s impaktním poškozením budou následně použity pro zjištění reziduální ohybové pevnosti při čtyř bodém ohybu na zkušebním zařízení ČVUT. Cílem je porovnat ohybovou pevnost jednotlivých materiálů při různé úrovni impaktního poškození. V době psaní tohoto článku docházelo k přípravám na realizaci zkoušky a nebyla tedy známá žádná naměřená data. Výsledky však budou důležitou informací pro rozhodovací proces výběru materiálu.

MĚŘENÍ POMĚRNÉHO ÚTLUMU

Na vzorcích jednotlivých materiálů bez poškození bylo na pracovišti Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky ČVUT provedeno měření poměrného útlumu.

Při měření byly zavěšené vzorky buzeny modálním kladívkem a odezva byla snímána akcelerometrickým snímačem s frekvenčním rozlišením 0,25 Hz. Detailní popis měření a dosažených výsledků je uveden ve zprávě [2]. Dílčím závěrem této zprávy je, že zkušební vzorky, jejichž skladba je komponována z uhlíkových vláken jsou tužší (první vlastní frekvence volného kmitání vzorků se pohybuje v rozsahu 530 až 630 Hz v závislosti na konkrétní kompozici) než vzorky, jejichž skladba je založena na skelných vláknech (první vlastní frekvence volného kmitání vzorků je přibližně 430 Hz). Dále zpráva uvádí, že poměrný útlum materiálu je závislý na frekvenci kmitání. Výsledky naznačují, že v případě vzorků s uhlíkovými vlákny dochází s rostoucí frekvencí kmitání k růstu poměrného útlumu. V případě vzorků složených ze skelných a aramidových vláken je tomu naopak. Pro další výpočetní práce bude nutné proměřit dynamické chování kompozitních vzorků (materiálů) i na vyšších frekvencích buzení, které se vyskytují ve spektru buzení od proudového motoru.

Předběžná FE analýza vzduchovodu

Pro podrobnější analýzu konstrukce vzduchovodu bylo nutné provést předběžný FE výpočet modelu kanálu na základě dostupných dat. Touto analýzou se kompletně zabývalo pracoviště ČVUT, resp. Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky. Vstupní data poskytl AERO Vodochoď AEROSPACE a.s. ve formě předchozích měření na letounech rodiny L-39 a ve formě dat z měření hladiny akustického tlaku na kanálu letounu L-39CW se zastavěným motorem Williams FJ44-4M.

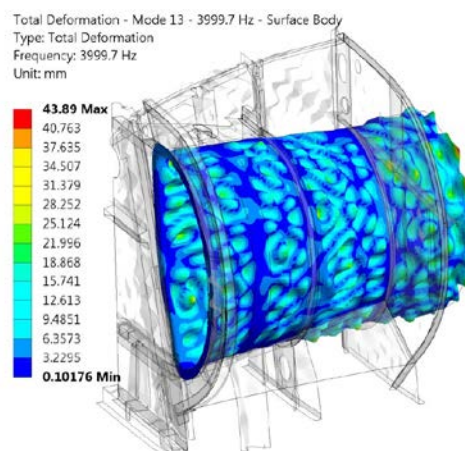
Cílem výpočetních analýz bylo nalezení vhodných přístupů v oblasti MKP modelování (kompozitního) vzduchovodu pro následující návrh a

optimalizaci kompozitového vzduchovodu (optimalizace sklady, tloušťky stěn, rozložení a velikost výztuh, uložení v draku letounu apod.) s ohledem na jeho pevnost a životnost.

Postup tvorby modelu, zatížení a zpracování dat podrobně shrnuje zpráva [2].

Základem pro hodnocení výpočetních postupů a volbu definice okrajových podmínek a zatěžování byly modální analýzy jak samotného vzduchovodu (bez vlivu zástavby v draku letounu), tak i komplexní střední části letounu se zastavěným vzduchovodem. Tyto analýzy poskytly informace o vlastnostech FE modelů, které budou dále používány ve statických a dynamických analýzách a umožnily zpřesnit rozsah a požadavky na provedení dalších numerických simulací.

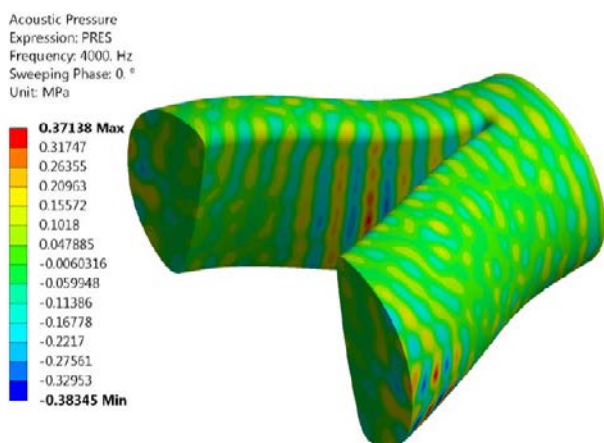
Modální analýzy byly provedeny v blízkosti frekvence první harmonické složky akustického buzení, což je v blízkosti frekvence 4000 Hz. Na obrázku 8 je příklad vlastních tvarů kmitání vzduchovodu v zástavbě draku letounu s frekvencí 3999,7 Hz.



Obrázek 8 Vlastní tvary kmitání vzduchovodu s frekvencí 3999,7Hz

Dalším typem provedených analýz byly harmonické akustické analýzy vnitřní části vzduchovodu, které byly provedeny za účelem otestování možnosti přímé simulace akustických dějů v interiéru vzduchovodu. Výsledkem je distribuce tlakových pulzací uvnitř vzduchovodu, jak je

znázorněno na obrázku 9. Je z něj patrné, že po průřezu rovnoměrný harmonický tlakový puls buzení o amplitudě 0,1 MPa a frekvenci 4000 Hz na straně motoru se vlivem interakce se stěnami značně mění, přičemž je možné vytipovat místa na stěnách vzduchovodu, kde dochází k lokálnímu navýšení amplitudy tlakových pulzací a naopak.



Obrázek 9 Distribuce tlakových pulzací uvnitř vzduchovodu

Dosažené výsledky ukazují, že pokud bude možné přesněji stanovit (odhadnout) způsob akustického buzení na straně motoru (pravděpodobně se jedná o interakci rázových vln vznikajících na prvním stupni nízkotlakého kompresoru) a že se podaří zahrnout vliv rychlosti a tlaku vzduchu ve vzduchovodu na akustické jevy, bude možné pro dané harmonické složky buzení vypočítat rozložení amplitud akustického tlaku na povrchu vzduchovodu a tím stanovit jeho zatěžování. V opačném případě bude buzení vzduchovodu pro potřeby FE analýz odvozeno z amplitudo-frekvenčních charakteristik vytvořených pomocí FFT (fast Fourier Transform) analýz ze změřených signálů tlakových pulzací v daných bodech na povrchu vzduchovodu.

Návrh přípravkového vybavení

Funkční vytvrzovací forma vzduchovodu je jedním z klíčových prvků celého projektu. Vzhledem k tomu, že obě ramena kanálu jsou navržena jako integrální díl včetně přírub pro uchycení do draku letounu, je nutné navrhnout formu jako komplexní celek, který zajistí požadovaný tvar výrobku. Výhodou tohoto řešení pak bude absence dalších spojů, což výrazně přispěje k zjednodušení celé konstrukce a snížení pravděpodobnosti výskytu poruch.

Příruby budou vyrobeny metodou co-curingu, čemuž bude nutné rovněž přizpůsobit také konstrukci formy a vyvinout takové přípravkové vybavení, které umožní přesné ustavení přírub na stěně vzduchovodu.

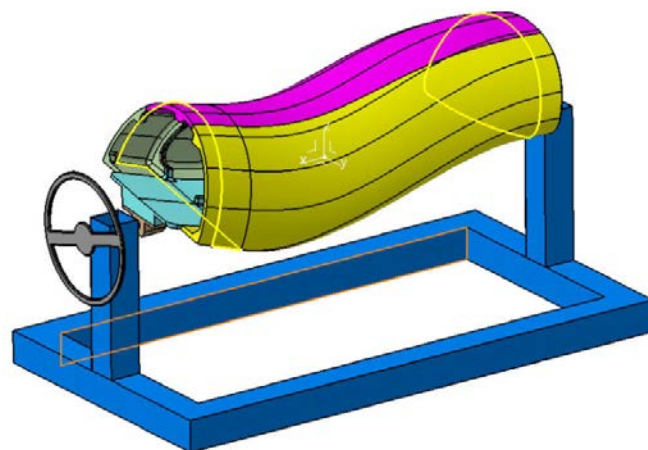
Forma musí zaručit následující požadavky:

- » Vnitřní stěna kanálu bude v kontaktu s nabíhajícím proudem vzduchu, musí tedy být adekvátně hladká - forma bude typu "male" (tm)
- » Musí být zaručena tvarová stálost a tuhost formy při vytvrzovací teplotě 180°C
- » Forma musí být opakovatelně použitelná, tudíž i spoje dělicích rovin formy musí být navrženy jako rozebratelné
- » Díl musí být vyjmutelný z formy bez poškození formy a samozřejmě i dílu samotného

» Vyrobené díly musí být tvarově shodné a splňovat požadované tvarové tolerance

V současné době probíhá návrh samotné formy, jenž je schematicky znázorněn na obrázku 10.

Návrh počítá s dělenou formou skládající se ze 4 segmentů. Rame-



Obrázek 10 Koncept více dílné formy ramena vzduchového kanálu

na vzduchovodu jsou zrcadlově symetrická, proto levé i pravé rameno vzduchovodu bude mít vlastní vytvrzovací formu.

Zejména kvůli odstranění problému rozdílných teplotních roztažností formy a dílu v průběhu vytvrzovacího procesu a dále také kvůli snížení ceny a lepší manipulace v průběhu výrobního procesu (zejména skladby a kladení technologických vrstev) bude forma rovněž z kompozitu. Výztuž bude tvořena buď skelnými anebo uhlíkovými vlákny v závislosti na finálním výběru materiálu vzduchovodu. Dělicí roviny budou navrženy tak, aby bylo možné jednotlivé segmenty postupně vyjmout směrem dovnitř kanálu. Segmenty budou vzájemně spojeny šrouby v přírubách umístěných v oblasti dělicích rovin.

Součástí vývoje forem budou rovněž prvky pro ustavení a vytvrzení integrálních přírub na stěnách vzduchovodu. Tyto prvky musí přesně definovat polohu přírub v rámci požadovaných geometrických tolerancí. Bude nutné rozhodnout v závislosti na zvoleném technologickém postupu, jakým způsobem budou tyto prvky ustaveny na vytvrzovací formě anebo na samotném ramenu vzduchovodu. Toto rozhodnutí závisí na probíhajících technologických zkouškách, které mají za cíl zjistit dosažitelnou přesnost vyráběných přírub a zjistit nejvhodnější přístup k integraci přírub do stěn vzduchovodu. Výsledky zkoušek budou zohledněny v detailním konstrukčním návrhu formy, který proběhne v tomto pololetí.

PRÁCE NA PROJEKTU V ROCE 2016

V průběhu tohoto roku se dále budou rozvíjet výše popsané kapitoly, budou plněny i další kapitoly, týkající se zejména NDT, Damage tolerance a FE analýz. Hlavní aktivity jsou následující:

- » Aero Vodochody Aerospace a.s. bude pokračovat na konstrukčním návrhu vzduchovodu, zkonstruuje a vyrobí přípravkové vybavení nezbytné k jeho výrobě. Bude se věnovat návrhu a odladění výrobní technologie a rovněž vyrábět vzorky pro potřeby partnerů projektu

- » VZLÚ a.s. navrhne zkušební zařízení pro zkušební kampaň nárazu ptáka, která proběhne na zkušebních plochých panelech při úhlech dopadu odpovídající úhlům dopadu do vzduchovodu, získaná data vyhodnotí a porovná s FE výpočtem. Navrhne a sestaví zkušební zařízení pro měření akustických vlastností zkušebních kompozitních panelů. Bude se věnovat vývoji pokročilých NDT metod a v neposlední řadě také tvorbě zkušební metodiky dle filosofie "Damage tolerance" pro zkoušky demonstrátoru vzduchovodu.
- » ČVUT - Ústav letadlové techniky navrhne zkušební kampaň materiálových testů a začne pracovat na její realizaci, ve spolupráci s Aerem Vodochody navrhne zkušební kampaň pro zkoušky typických konstrukčních uzlů a začne rovněž jejich testy. Ve spolupráci s VZLÚ se bude podílet na vývoji a zkouškách pokročilých NDT metod.
- » ČVUT - Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky se bude zabývat FE modelováním akustických vlastností vzduchovodu a ověření výpočtu na základě výsledků zkoušek. Následně pak optimalizací konstrukce vzduchovodu dle těchto výpočtů. Bude se věnovat integraci SHM systému (FBG) do skladby zkušebních panelů, návrhu jeho integrace do struktury demonstrátoru a rovněž vyhodnocování dat naměřených při zkouškách nárazu ptáka do zkušebních panelů.
- » VUT - bude pokračovat ve vývoji FE modelu zkušebních panelů se simulací impaktního poškození kroupami a ptákem, naladění výpočetního modelu dle výsledků impaktních zkoušek, optimalizací konstrukce vzduchovodu na základě tohoto výpočetního modelu. Bude rovněž tvořit metodiku výpočtu impaktního poškození.
- » Honeywell s.r.o. - bude pokračovat ve vývoji SHM systému a jeho integraci do konstrukce vzduchovodu, bude ověřovat jeho funkčnost při zkušebních kampaních, které se v tomto roce v rámci projektu uskuteční.

ZÁVĚR

Projekt propojuje relativně velké množství oborů, které spolu musí úzce spolupracovat, aby byly naplněny všechny požadavky, které jsou na takto specifický díl primární letecké konstrukce kladeny. Budou využívány nejmodernější poznatky z těchto oborů a dojde k praktickému ověření nových technologií s potenciálem jejich využití v praxi. Funkční demonstrátor bude také důležitým prvkem pro vývoj letounu L-39NG neboť integrace kompozitního vzduchovodu do draku letounu vzhledem k akustickým vlastnostem použitého motoru se jeví jako nezbytná pro zajištění požadovaných únavových vlastností jak z hlediska požadavku předpisů, tak i pohledu konkurence schopnosti vůči letounům stejné kategorie, které jsou v současnosti na trhu.

Literatura:

- [1] Borkov D.: Analýza kritických oblastí vzduchovodu letounu L-39 z hlediska nárazu cizích objektů, zpráva číslo TR-AV-9954-0002, Aero Vodochody Aerospace, Odolena Voda, 2015
- [2] Jurenka, J., Růžicka, M., Doubrava, K., Bartošák, M.: COMPOSITE AIRDUCT DEVELOPMENT - Methodology of analysis and compliance manufacturing processes and experimental methods I, číslo zprávy: 12105/15/32, FS-ČVUT v Praze, 2015

Automatizované pracoviště pro ultrazvukovou kontrolu kompozitních dílů ve VZLÚ

Ing. Petr Bělský

V úvodní části příspěvku je stručnou formou shrnuta historie budování současného pracoviště ultrazvukové defektoskopie ve VZLÚ, a.s. Následuje prezentace nově vyvinutého automatizovaného manipulátoru pro nedestruktivní zkoušení a realizace řady dílčích úprav příslušenství nádrže pro imerzní zkoušení. Uveden je rovněž nástin dalšího plánovaného rozvoje tohoto pracoviště. V závěru příspěvku jsou zmíněny některé zajímavé příklady každodenních aktivit pracoviště ultrazvukové kontroly útvaru VZLÚ PK3200.

Úvod

Budování současného pracoviště ultrazvukové kontroly ve VZLÚ bylo zahájeno v roce 2000 a úzce souviselo s návratem výzkumných aktivit v oblasti kompozitních materiálů, které byly krátkodobě přerušeny v průběhu 90. let v důsledku složitých ekonomických podmínek. Z přístrojového vybavení byl nejprve pořízen přístroj BondMaster 1000 umožňující používat 3 typy akusto-ultrazvukových metod pro kontrolu lepených spojů, sendvičových a monolitických kompozitních konstrukcí. Později přibyl klasický ultrazvukový defektoskop Sonatest Masterscan 340 a sada klasických jednoměničových sond pro provádění A-scan kontrol. Tyto přístroje byly primárně používány pro manuální kontrolu jednotlivých zkušebních kusů nebo jejich částí.

Významným milníkem v dalším rozvoji ultrazvukové defektoskopie na tomto pracovišti bylo zavedení Phased Array technologie v roce 2011, která umožňuje efektivně provádět C-scan inspekci i většího množství kontrolovaných dílů. Zpočátku byly prováděny pouze kontaktní skeny za použití PA sondy s předsádkou a minienocoderu. Jako vazební prostředek byl používán gel na vodní bázi (ULTRAGEL II). Kvalita těchto skenů značně závisela na kvalitě povrchu skenovaných dílů, jejich celkové geometrii a zkušenosti operátora. Výsledný C-scan byl významně ovlivňován kolísáním kvality akustické vazby. Tloušťka vazebního gelu se měnila v důsledku nerovnoměrného přitlaku operátora i lokálního profilu geometrie kontrolovaného dílu. Jakékoliv zadrhnutí předsádky sondy a nerovnoměrnosti v jejím pohybu často znamenaly ztrátu dat a tím i většinou opakování celého procesu skenování. Časová efektivita takového NDT kontroly byla tímto významně ovlivněna. Snaha o zlepšení kvality akustické vazby logicky vedla k použití imerzního způsobu zkoušení. Z počátku byla používána předsádka s přívodem vody z externí nádoby nebo v případě nízkých kontrolovaných dílů různých improvizovaných vodních nádrží vyrobených například z krytů zářivkového osvětlení. Významným způsobem se tak zlepšila kvalita akustické vazby, ale časová náročnost kontrol se snížila jen částečně. I nadále byl používán kontaktní způsob skenování pomocí sondy s předsádkou.

Vzhledem k narůstajícímu počtu výzkumných aktivit v rámci různých EU projektů vyžadujících provádět

ultrazvukovou kontrolu kompozitních vzorků ve stovkách a tisících kusech bylo nutné zvýšit kapacitu NDT zařízení. Proto byla v prosinci 2012 zprovozněna velká imerzní nádrž s jednoduchým manuálním pojezdovým systémem. Tento krok znamenal zásadní proměnu charakteru NDT kontroly kompozitních vzorků. Došlo k výraznému zlepšení kvality prováděných skenů při současném zvýšení celkové kapacity pracoviště ultrazvukové kontroly. Tak jako každé vybavení i toto mělo svá omezení a limity. Umožňovalo používat pouze standardní odrazovou metodu, skeny mohly být efektivně prováděny jen za pomoci investičně náročných PA sond a přesnost určování polohy sondy byla dána možnostmi obyčejných rotačních minienocoderů.

Počet kontrolovaných zkušebních těles i nároky na možnosti používaných NDT metod v dalších letech nadále narůstaly. Významný impuls přišel tentokrát přímo od českých výrobců kompozitních dílů. Z jejich strany se jednak významně zvýšila poptávka po společných R&D aktivitách a zároveň byly požadovány NDT kontroly, u kterých bylo zapotřebí použít jiné ultrazvukové metody než jen klasickou odrazovou v kombinaci s plným ponořením zkušebního kusu v imerzní lázni. Pro zkoušení některých dílů by byla výrazně vhodnější například průchodová metoda a ostříkovaný způsob zkoušení (např. pro C-scan sendvičových dílů.). To však nebylo prakticky možné



Obr.1 – Realizace kontaktního C-skeny kompozitního panelu v improvizované imerzní nádrži

realizovat za použití manuálně poháněných pojezdů. Tím postupně dozrával čas k provedení dalších zásadnějších úprav vybavení pro imerzní zkoušení a zavedení prvků automatizace do každodenních NDT aktivit na útvaru VZLÚ PK3200.

Nový automatizovaný pojezdový systém

Požadavky na nový automatizovaný pojezdový systém pro imerzní zkoušení byly formulovány koncem roku 2014. Od počátku tohoto úkolu bylo zřejmé, že půjde o vývoj specifického manipulátoru šitého na míru konkrétní imerzní nádrži a specifickým požadavkům VZLÚ, a.s.. Osloveno bylo celkem 10 domácích a zahraničních výrobců, z nichž do užšího výběru postoupily pouze dvě společnosti z ČR. Rozhodujícími faktory pro výběr finálního dodavatele byla cena, splnění základních podmínek zadání, zkušenosti v dané oblasti a ochota spolupracovat na dalším vývoji tohoto specifického zařízení. Pro společný vývoj byla nakonec vybrána společnost INDETEC ndt, s.r.o.. VZLÚ, a.s. v těchto aktivitách neslo odpovědnost za návrh, výrobu samonosné základny a testy finálního systému, zatímco firma INDETEC pak za vývoj a dodávku celé pojezdové části včetně řídicího systému. Mezi základními zadávacími podmínkami bylo požadováno, že musí být zachována původní imerzní nádrž včetně příslušenství, automatizovaný pojezdový

systém bude mít alespoň 3 řízené osy s rychlostí skenování až 500 mm/s. Požadovaná opakovatelná přesnost polohování systému měla být 0,1 mm nebo lepší. Nový systém musí umožňovat rozšíření o další dvě řízené osy a musí být kompatibilní s defektoskopem Omniscan MX2. Dalším významným požadavkem bylo, aby systém umožňoval jak řízený (automatický) režim, tak plně manuální pro případ poruchy řídicího systému.

Výsledný pojezdový systém splňující výše uvedené požadavky je sestaven z pojezdových modulů UNIMOTION typu MTJ a CTJ schopných pracovat s přesností polohování 0,08 mm. Pro jejich pohon byly zvoleny synchronní servopohony řady 8LV, které jsou určeny pro aplikace, kde je požadována velká dynamika a přesnost pohybu. Srdcem řídicího systému je programovatelný logický automat X20CP1585 od společnosti B&R Automation. Jedná se o modulární PLC osazený procesorem ATOM 1GHz s pasivním chlazením, který dále obsahuje 256 MB DDR2 SDRAM, USB, Ethernet, PowerLink a CompactFlash slot a slot pro rozšiřující moduly. Programování řídicího systému se provádí pomocí G-kódu podobným způsobem jako u CNC strojů.

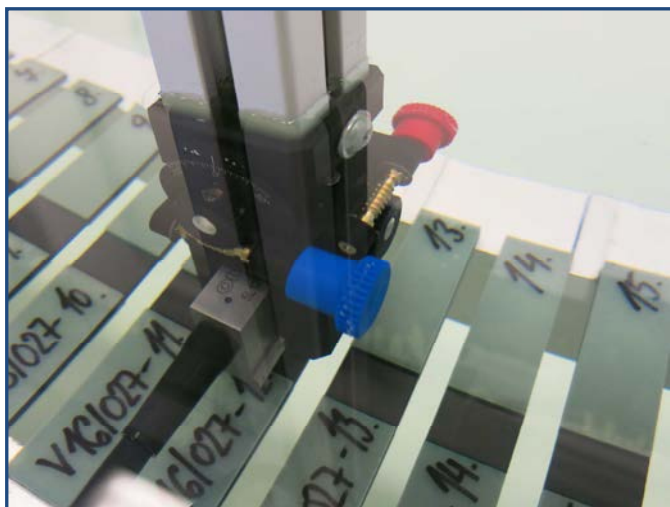
Pro odečet polohy byly zvoleny dva nezávislé systémy odměřování polohy. První, který je integrován přímo v servopohonech, je využíván pro řízení a polohování samotného manipulátoru. Druhý je určen pro připojení k ultrazvukovému defektoskopu a je založen



Obr.2 – Automatizovaný systém pro imerzní zkoušení instalovaný ve VZLÚ, a.s. na útvaru PK3200

na magnetických lineárních snímačích pracujících s přesností cca 0,05 mm. Toto oddělení obou systémů bylo zvoleno z důvodu ochrany enkodérových vstupů defektoskopu a zároveň toto uspořádání umožňuje práci s celým systémem i v plně manuálním režimu (např. v případě poruchy řídicího systému).

Důležitou částí je bezesporu také držák ultrazvukových sond, který umožňuje použití jak víceměničových Phased Array sond, tak rovněž standardních jednoměničových sond díky speciálnímu adaptéru. Držák dovoluje jemné nastavení náklonu UT sond pomocí šnekových převodů ve dvou rovinách v rozmezí $\pm 50^\circ$.



Obr.3 – Nový držák ultrazvukových sond

Manipulátor jako celek je uložen na masivní samonosné ocelové základně, která byla navržena a vyrobena ve VZLÚ, a.s. Skládá se ze 2 základních svařovaných čel a 4 spojovacích bočnic. Po smontování základna obepíná imerzní vanu, aniž by se jí jakkoliv dotýkala. Původní systém byl uložen přímo na horní straně nádrže, což způsobovalo možnost přenosu deformace imerzní nádrže (např. při nechtěném kontaktu obsluhy s nádrží během manipulace) na pohybový systém manuálně ovládaného manipulátoru.

V průběhu příprav i během samotné instalace nových automatizovaných pojezdů byla provedena i řada dílčích úprav příslušenství imerzní vany, z nichž některé jsou uvedeny dále.

Nové příslušenství imerzní vany

Pro dosažení kvalitních výsledků NDT kontrol pomocí imerzní UT metody je velmi důležité přesné a stabilní ustavení zkoušených dílů a zajištění tak jejich definované polohy vůči UT sondě.

Původní systém složený ze 4ks plastových upínek pohybujících se po hliníkových profilech se v předchozích letech příliš neosvědčil. Tyto upínky nebyly výškově stavitelné a vyznačovaly se malou tuhostí. U hliníkových profilů docházelo k významné korozi v důsledku poškozování ochranné vrstvy eloxu při přesouvání jezdců upínek. Tím vznikaly nárůstky

bránící v pohybu jezdců a rovněž docházelo ke kontaminaci lázně a následnému napadání jiných kovových částí imerzní vany. Systém téměř neumožňoval ustavení tvarově složitějších dílů.

Z těchto důvodů bylo rozhodnuto o návrhu zcela nového sofistikovanějšího upínacího systému. V průběhu roku 2014 byl ve VZLÚ, a.s. navržen a vyroben unikátní modulární nerezový systém, jehož základem je šest libovolně stavitelných upínacích sloupů. Ty se mohou pohybovat buď pomocí jezdců po nerezových kolejnicích, nebo mohou být díky přemístitelným podstavcům umístěny do libovolné pozice v imerzní vaně. Systém je díky své univerzálnosti používán i mimo imerzní nádrž pro zcela jiné výzkumně-vývojové aktivity.

Důležitým pokrokem ve zvýšení celkové úrovně pracoviště imerzní ultrazvukové kontroly bylo také podstatné zlepšení procesu řízení kvality imerzní lázně. Používání obyčejné pitné vody z vodovodního řádu bez jakékoliv úpravy se během prvních 2 let provozu ukázalo jako nevyhovující. Voda dostupná v lokalitě Praha-Letňany je poměrně tvrdá a způsobovala řadu technických problémů. Usazování vodního kamene významně sťažovalo a prodražovalo údržbu imerzní vany a docházelo rovněž k trvalému poškozování některých částí jejího příslušenství. Přítomnost částic vodního kamene navíc zhoršovala celkovou čistotu vazebního prostředí v imerzní vaně. Z tohoto důvodu došlo počátkem roku 2015 k instalaci systému reverzní osmózy spolu s novou UV lampou a odlučovačem vzduchu. V současné době je v imerzní nádrži používána demineralizovaná voda. Ta v uzavřeném okruhu prochází během provozu čištěním v pískové filtrační jednotce, sterilizací UV lampou a následně odvzdušněním pomocí průtokového odlučovače vzduchu. Voda v imerzní nádrži je navíc ohřívána na požadovanou teplotu a orientačně kontrolována měřením hodnoty svého pH. Další novinkou v příslušenství imerzní vany jsou různé technické přípravky pro odstraňování drobných vzduchových bublinek na povrchu kontrolovaných dílů, které mohou způsobit znehodnocení prováděných skenů a chybnou interpretaci některých měření.

Další plánovaný rozvoj

Jedním z mnoha přínosů automatizace pojezdového systému pro imerzní zkoušení je možnost využívat metody a NDT postupy, které u manuálního typu nebylo možné realizovat. Jednou z takových metod je například ostřiková průchodová metoda využívající obyčejných jednoměničových sond. Průchodová metoda využívá dvou sond umístěných na dvou protilehlých stranách kontrolovaného dílu. Jedna sonda je vysílací a druhá přijímací. Detekce vady spočívá ve vyhodnocení poklesu akustického tlaku. Tato metoda je vhodná zvláště pro větší tloušťky materiálu a větší úrovně útlumu. V kombinaci s přenosem ultrazvukového vlnění pomocí vodního paprsku je vhodná například i pro kontrolu sendvičových struktur s pěnovým nebo voštinovým jádrem. V průběhu roku 2016 by měl být navržen, vyroben a otestován tzv. C-frame pro upevnění dvou bubblerů s jednoměničovými sondami. Přívod vody do

bubblérů bude proveden pomocí ponorného čerpadla s elektronickou regulací.



Obr.4 – Komponenty budoucího ostříkového systému

Možnosti využití ostříkové technologie bude testována i ve spojení s Phased Array sondou pro kontrolu rádiusů. Pro tento typ sondy bude navržena speciální tryska, která by měla být podle plánu vyrobena z polyamidu pomocí 3D tisku laser-sintering metodou. Možnosti nového automatizovaného manipulátoru imerzní vany bude možné využít rovněž i pro jiné NDT metody a aplikace. Například se s ním počítá pro aktivity využívající metodu vířivých proudů pro vodivé materiály nebo akusto-ultrazvukovou Pitch-Catch metodu vhodnou pro kontrolu sendvičových struktur. Pro tyto aplikace bude imerzní vana doplněna krycími upínacími deskami, pomocí kterých bude možné jednoduchým způsobem proměnit imerzní nádrž v upínací stůl vhodný pro realizaci různých typů výzkumných aktivit.

Pro maximální využití všech možností automatizovaného manipulátoru a zajištění dostatečné bezpečnosti jeho ovládání je velmi důležité přehledné uživatelské rozhraní. To je v současné době jen v základním provedení umožňující manipulátor používat. V dalších letech se předpokládá vylepšení této části systému. Nabízí se zde například i možnost softwarového spojení ultrazvukové a ovládací části tohoto zařízení do jednoho uživatelského prostředí. Z dlouhodobého pohledu je možné uvažovat o rozšíření manipulátoru o další dvě řízené osy, které by umožňovaly kontrolu zkušebních kusů obecného tvaru. Tento krok by ale znamenal zásadnější přestavbu osy Z a doplnění elektroniky řídicího systému. Rovněž by bylo nutné provést řadu dalších zásadnějších změn v procesu přípravy a provádění NDT kontroly.

Příklady současných NDT aktivit ve VZLÚ, a.s.

Objem prací v oblasti ultrazvukové defektoskopie kompozitních konstrukcí na útvaru PK3200 v posledních dvou letech opět významně vzrostl. Pracovníci VZLÚ, a.s. se podíleli na celé řadě prestižních projektů zaměřených na vývoj špičkových kompozitních konstrukcí. Jako doklad této skutečnosti

můžeme uvést následující příklady, v rámci nichž byly významnou měrou prováděny NDT prohlídky:

Certifikační zkoušky horizontálního stabilizátoru vrtulníku AW169

V druhé polovině roku 2014 probíhaly na útvaru PK3200 intenzivní certifikační zkoušky horizontálního stabilizátoru nového dvoumotorového vrtulníku Agusta Westland AW169 určeného pro dopravu 8-10 pasažérů. Velmi zdařilá konstrukce stabilizátoru o rozměrech cca 3000x620x150 mm byla vyrobena z termoplastického kompozitu uhlík/PPS a skládá se z 5 základních částí: náběžné hrany s 12 žebry, středového nosníku, odtokové hrany se 14 žebry, koncových wingletů vyrobených z kompozitu uhlík/epoxid a duralových závěsů. Použití termoplastických místo termosetických kompozitů přineslo úsporu hmotnosti přibližně o 15% při současném zlepšení některých materiálových a výrobně-technologických parametrů. Za pozornost stojí zvláště konstrukce středového nosníku složeného ze dvou omega profilů a krycího potahu. Tato koncepce byla původně vyvinuta pro podlahové panely nákladních letadel a plně se osvědčila i v této aplikaci.

Zkoušky ve VZLÚ, a.s. se sestávaly z několika statických a únavových testů. Do zkušebního kusu byla zavedena řada umělých výrobních vad v podobě inzerťů a několik impakťových BVID poškození, které byly v průběhu únavové zkoušky pozorně sledovány. Během zkoušek bylo provedeno značné množství detailních NDT prohlídek sestávajících se z přímé i nepřímé (pomocí videoskopu) vizuální kontroly a ultrazvukové A-scan kontroly celého zkušebního kusu. V omezeném množství byly prováděny rovněž kontaktní C-skeny v místech umělých výrobních vad.

Vesmírné projekty

V portfoliu výzkumných a vývojových aktivit VZLÚ, a.s. nechybí ani prestižní oblast vesmírných aplikací. Tato oblast je obecně známa svými vysokými nároky na použitá technická řešení a důsledné řízení kvality všech činností. Využití špičkových kompozitních materiálů pro konstrukce kosmických prostředků a moderních NDT metod pro jejich kontrolu během jejich vývoje i finální výroby je logickou nutností.

Aktuálně se VZLÚ, a.s. účastní v roli subdodavatele například velkých vesmírných projektů EUCLID a JUICE. Hlavním cílem projektu EUCLID je vývoj vesmírné sondy nesoucí speciální teleskop o průměru 1,2 m pomocí něhož a dalších přístrojů bude studovat rozložení tzv. temné hmoty a energie ve vesmíru. Aktivita v ČR jsou pod vedením společnosti 5M s.r.o. zaměřeny na vývoj, výrobu a kvalifikaci strukturálního sendvičového panelu vesmírné družice. Podíl VZLÚ, a.s. spočívá v konstrukčním návrhu strukturálního panelu, návrhu a realizaci kvalifikačních zkoušek.

V projektu JUICE jsou aktivity rovněž zaměřeny na vývoj strukturálního panelu vesmírné sondy, ale zcela jiného zaměření. Cílem části českých aktivit je v tomto případě vývoj a kvalifikace panelu obsahující protiradiační stínění, které má ochránit elektroniku sondy před přímými účinky radiace v okolí planety Jupiter. Dílčí podprojekt této mise zvaný MAGBoom

vedený v ČR společností Frentech Aerospace je zaměřen na vývoj výklopného ramene nesoucí magnetometr.

Ve všech uvedených vesmírných projektech jsou ve VZLÚ používány NDT metody jak během fáze výběru a kvalifikace materiálu, tak i pro kontrolu finálních demonstrátorů. Jedná se o ultrazvukovou odrazovou metodu (kontaktní i imerzní) v případě monolitických vzorků nebo akusto-ultrazvukové metody (impedanční či Pitch-Catch) v případě sendvičových struktur.

Aktivity v rámci projektu SARISTU

V rámci řešení EU projektu SARISTU se pracovníci útvaru PK3200 mimo jiné zúčastnili etapy zavádění definovaných impaktových poškození do velmi sofistikovaných kompozitních demonstrátorů. Tato akce proběhla v druhé polovině roku 2015 v německém výzkumném středisku DLR - CFK NORD ležící na periferii městečka Stade, cca 30 km západně od Hamburku. Pracoviště CFK NORD je vybavené špičkovou technikou na nejvyšší úrovni. Je zde například instalován největší výzkumný autokláv na světě sloužící pro výrobu rozměrných kompozitních dílů (trupové panely, panely křídel,...atd.). Dále jsou zde ve velkém počtu používána robotická pracoviště pro automatizované kladení kompozitů. Cílem aktivit VZLÚ, a.s. bylo vytvoření definovaných impaktových poškození v celokompozitních zkušebních demonstrátorech, které představovaly trupový panel velkého dopravního letadla a části jeho nákladových dveří. Oba zkušební kusy byly osazeny speciálními piezo snímači (trupový panel - 584 ks, minidoor - 108ks) systémem monitorování stavu konstrukce (SHM) využívající UT metodu Guided Waves. Impaktování



Obr.5 – Impaktovací tým VZLÚ, a.s ve výzkumném středisku DLR – CFK NORD

bylo střídavě prováděno německým a českým týmem, přičemž před a po každém impaktování byla prováděna pečlivá NDT kontrola pomocí C-skenů místa impaktu i jeho okolí. Všechny impakty musely mít určitou definovanou velikost. Pokud této velikosti nebylo dosaženo už při prvním impaktu, musel být celý postup zopakován s větší energií. Velikost energie (30-116 J) závisela na místě lokalizace impaktu v konstrukci zkušebního kusu. Z české strany bylo postupně provedeno cca 30 konečných impaktů.

Závěr

V uplynulých dvou letech se podařilo významně posunout možnosti ultrazvukové defektoskopie na útvaru VZLÚ PK3200. Byla provedena zásadní přestavba zařízení pro ultrazvukové zkoušení v imerzní vaně. Nové automatizované zařízení umožňuje významným způsobem zvýšit produktivitu NDT kontrol při současném zlepšení jejich opakovatelnosti a celkové kvality. Také umožňuje používat řadu nových NDT metod, které dříve nebylo u manuálně ovládaného systému možné aplikovat. Další zdokonalování a rozvoj tohoto systému se předpokládá i v budoucích letech.

Poděkování

Autor by chtěl touto cestou poděkovat za finanční podporu poskytnutou prostřednictvím institucionální podpory z rozpočtu Ministerstva průmyslu a obchodu. Poskytnuté finanční prostředky umožnily v uplynulých dvou letech posunout a rozšířit možnosti laboratoře ultrazvukových NDT metod ve VZLÚ, a.s.

Autor rovněž vysoce oceňuje spolupráci s kolegy z firem INDETEC ndt, s.r.o., 5M s.r.o., Aero Vodochody AEROSPACE, a.s. i s partnerskými subjekty z evropského projektu SARISTU.

Literatura:

- [1] Regazzo R., Regazzová M.: Ultrazvuk – základy ultrazvukové defektoskopie, BEN – technická literatura, Praha 2013.
- [2] Bělský P.: Ultrazvuková nedestruktivní kontrola kompozitních konstrukcí ve VZLÚ, a.s., TRANSFER, No.21, VZLÚ, a.s., březen 2014, ISSN 1801-9315, p.11-17.
- [3] Bělský P.: Funkční vzorek – Upínací systém pro ultrazvukovou kontrolu v imerzní vaně, Zpráva VZLU R-6485, 2016