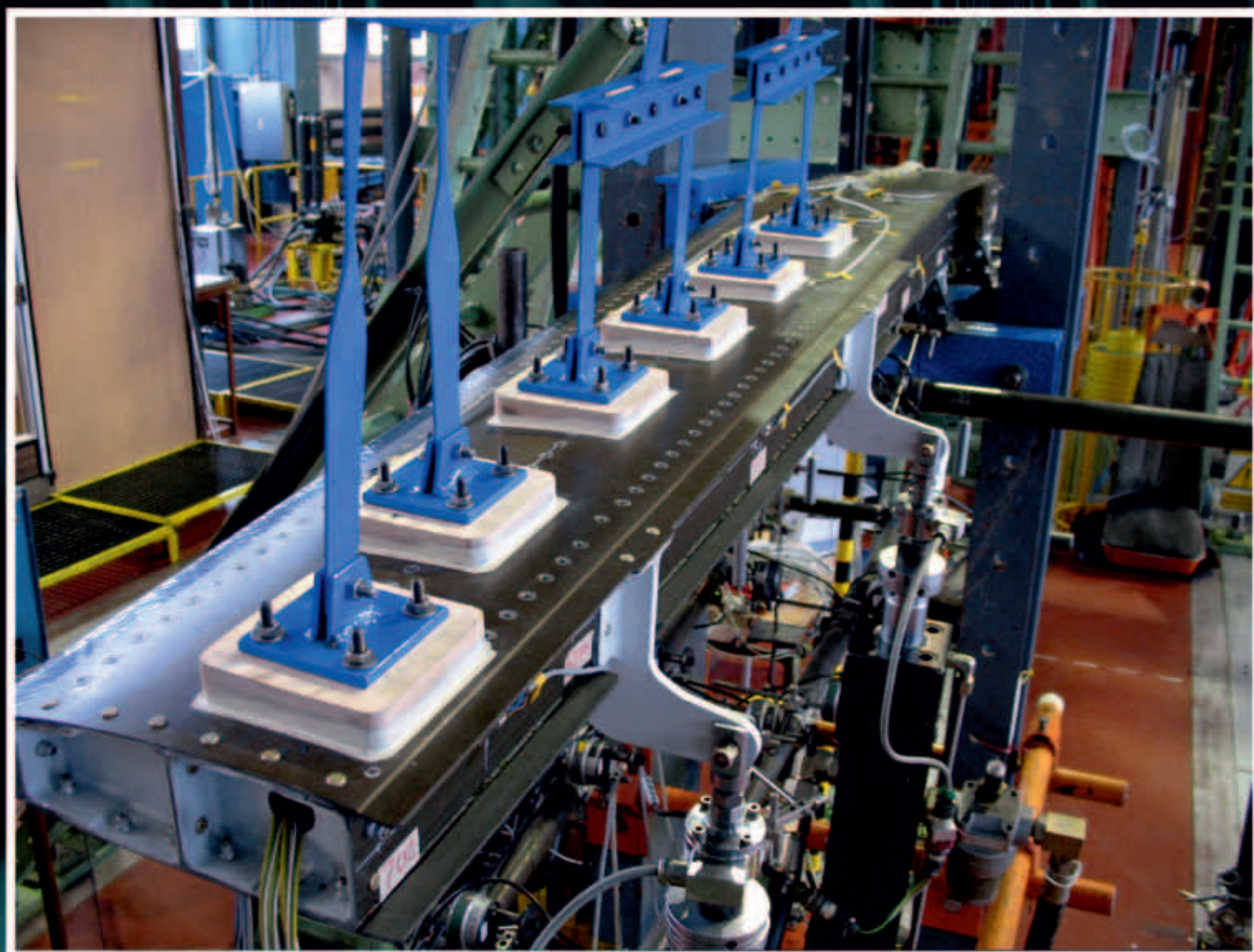


TRANSFER

Výzkum a vývoj pro letecký průmysl

č 19 / 2013



Toto číslo elektronického sborníku obsahuje příspěvky přednesené na 8. 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.
ZA PODPORY ASOCIACE LETECKÝCH VÝROBCŮ ČR A ČESKÉ TECHNOLOGICKÉ
PLATFORMY PRO LETECTVÍ A KOSMONAUTIKU
spolufinancované fondem EU

CZECH TECHNOLOGICAL PLATFORM FOR THE AVIATION AND SPACE



OPERATIONAL PROGRAMME
ENTERPRISE
AND INNOVATION



MINISTRY OF
INDUSTRY AND TRADE



EUROPEAN UNION
EUROPEAN REGIONAL DEVELOPMENT FUND
INVESTMENT IN YOUR FUTURE

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

4. 4. 2013

TRANSFER

Výzkum a vývoj pro letecký průmysl
Elektronický sborník VZLÚ, a.s.
číslo 19, duben 2013, 8. 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, a.s.

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 výrobcí a provozovateli letecké techniky. Předložený program je již devátým 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 v rámci RP EU. I k této nové situaci je nutno v tématech semináře přihlídnout. Je nutno reagovat i 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 zároveň pracovníků LAA ČR.

Organizační výbor semináře, pod garancí generálního ředitele VZLÚ

ČASOVÝ PRŮBĚH SEMINÁŘE:

8.30 - 9:00	Registrace účastníků
9:00 - 9:15	Zahájení
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	Diskusní blok
16:30	Zakončení semináře



Bezpilotní letoun vyvíjený VTÚL ve spolupráci s VZLÚ a jeho tunelový model

Obsah sborníku

- 6 **Permanentní vakuové plachetky pro výrobu kompozitních dílů**
Čechvalová O., LA composite
- 10 **Současný stav a výhledy použití multifunkčních kompozitů v konstrukci letadel**
Cabrnoch B., VZLÚ
- 15 **Zvyšování užitečných vlastností polymerních kompozitů použitím nanočástic**
Kadlec M., VZLÚ
- 18 **Perspektivy hromadné výroby kompozitních profilů v letectví**
Růžek R., VZLÚ
- 24 **Vývoj kompozitních deformačních členů pro dopravní prostředky**
Sháněl, V., Kulíšek, V., Hloušek, A., Růžička M., ČVUT
- 30 **Integrace kompozitních materiálů do konstrukce letounu L 410 - projekt INKOM**
Stündl M., Aircraft Industries
- 34 **Využití kompozitních materiálů v konstrukci UL letounu ATEC 321 Faeta**
Volejník P., Atec
- 39 **Kompozitní centrum Aero Vodochody**
Kocour P., Aero Vodochody

Permanentní vakuové plachetky pro výrobu kompozitních dílů

Ing. Olga Čechvalová, Ing. Petr Průcha

Pro výrobu kompozitních dílů je třeba uzavřít materiál na formě vakuovou plachetkou. Obvykle jsou používány jednorázové vakuové plachetky ve formě tenké plastové fólie, která může být vyrobena z různých druhů plastů dle teploty použití a chemické odolnosti.

Jednorázová plachetka je utěšňována k formě pomocí jednorázově-použitelné těsnicí pásky. Pokud je na formě díl vyráběn ve větších sériích, je velmi výhodné používat plachetku permanentní tj. plachetku opakovaně použitelnou. Tato plachetka poskytuje mnoho výhod. Při jejím použití se snižuje pracnost při mezioperačním vakuování (předlisování) i konečném vytvrzení dílu. Při jejím použití se často sníží vznik povrchových vad. Sníží se náklady na nákup technologických materiálů a v neposlední řadě se sníží i množství produkovaného odpadu.

V našem příspěvku je uveden postup zkoušek výroby permanentních plachetek ze silikonových i nesilikonových pryží použitelných pro výrobu kompozitních dílů autoklávovou technologií. Je zde popsán výběr materiálů, dostupné použité technologie a materiálové zkoušky. Jsou zde uvedeny zkušební způsoby těsnění permanentní plachetky k formě a to k formě vyrobené pro použití permanentní plachetky i k formě vyrobené pro použití jednorázové plachetky.

ÚVOD

Použití permanentních plachetek je pro sériovou výrobu kompozitních dílů velice výhodné a ekologické.

Použitím permanentních plachetek se snižuje množství povrchových vad.

Dále se významně zkracuje doba výroby dílu. Doba položení a zatěsnění permanentní plachetky je o více než 70% kratší oproti položení jednorázové plachetky. Tato úspora při výrobě 500 ks dílů měsíčně odpovídá přibližně úspoře 230 Nhodin.

Snížení hmotnosti odpadu vzniklého při výrobě kompozitních dílů je též významné. V případě jednorázových materiálů je na 1 m² plochy dílu potřeba jednorázová plachetka a těsnicí páska o celkové hmotnosti 0,195 kg. Opakovatelně použitelných materiálů je pro výrobu dílu o ploše 1 m² potřeba 4,5 kg, ale je možné jejich opakované použití pro výrobu minimálně 150 dílů. Po vyrobení 150 dílů o ploše jednoho dílu 1 m² je tak vyprodukováno 29,25 kg odpadu z jednorázových technologických materiálů nebo 4,5 kg odpadu v případě použití opakovatelně použitelných technologických materiálů. Při měsíční produkci firmy 30 různých typů dílů o celkovém počtu přibližně 500 kusů a celkové ploše dílů 650 metrů čtverečních, může být vyprodukováno měsíčně o 108 kg méně odpadu z plachetek. Pokud budou aplikovány opakovatelně použitelné technologické materiály je množství odpadu z plachetek a těsnících pásek sníženo o 85 hm. %.

ZKOUŠENÉ MATERIÁLY

V našem projektu jsme vyvíjeli postup výroby permanentních plachetek pro výrobu dílů z kompozitních materiálů v naší společnosti.

Naše společnost vyrábí kompozitní díly z prepregů převážně obsahujících fenolické a epoxidové pryskyřice vytvrzované nejčastěji při teplotě 125 °C. Díly se vytvrzují v peci za působení přetlaku atmosféry nebo v autoklávu při působení přetlaku až 1000 kPa. Pro tyto způsoby výroby jsme realizovali vývoj technologie výroby permanentních plachetek.

Pro tyto účely jsou určeny jak silikonové materiály, tak materiály na bázi nesilikonových elastomerů. Materiály se mohou používat ve formě nevytvrzených fólií s konstantní tloušťkou nebo materiály dvousložkové dodávané buď v kartuších mísené mísicími špičkami nebo ve dvou nádobách mísené ručně nebo speciálními stroji. Všechny tyto typy byly v rámci projektu zkoušeny (viz tabulka 1). Materiály mají různé mechanické vlastnosti a různě se zpracovávají. Některé vlastnosti zkoušených i nezkoušených materiálů jsou uvedeny v tabulce 2 a ceny v tabulce 3.

Chtěli jsme do zkoušení zahrnout fóliovou variantu silikonové pryže. Vynikající vlastnosti vykazují fólie od společnosti Airtech (kde je i možnost kombinovat fólie vytvrzené i nevytvrzené). Druhá varianta byla silikonová pryž Plastexil 53 SH. Tato pryž má výrazně horší vlastnosti. Vzhledem k ceně a minimálnímu odběru materiálů Airtech jsme se rozhodli zkusit si pouze technologii výroby a na to byla fóliová pryskyřice Plastexil 53 SH dostačující.

Dále byly zkoušeny výtuzné tkaniny doporučené dodavateli. Jednalo se o polyesterové tkaniny různých velikostí ok.

Provedli jsme zkoušky strukturální pevnosti dle ASTM D 624, zkušební těleso B pro tři materiály - Elastosil C 1200 A/B, EZ-Spray Silicone 20 a Plastexil 53 SH vyrobené v naší společnosti a to ve formě bez výtuzě a s výtuzí. Výsledky zkoušek materiálů bez výtuzě odpovídaly hodnotám deklarovaným v materiálových listech jednotlivých materiálů. Výsledky zkoušek materiálů s výtuzí prokázaly převážně zlepšení strukturální pevnosti.

Název materiálu	Druh materiálu	Forma materiálu a aplikace
Elastosil C 1200 A/B	Silikonový	Dvousložkový materiál v kartuši - vytlačovaný a roztíraný
EZ Spray Silicone 20	Silikonový	Dvousložkový materiál v kartuši - rozstříkovaný (nebo v nádobách rozstříkovaný strojně)
EZ-Brush Vac Bag Silicone	Silikonový	Dvousložkový materiál v nádobách - mísený ručně
Multi-Bag	Silikonový	Dvousložkový materiál v nádobách - mísený ručně
Plastexil 53 SH	Silikonový	Fóliový
Sprayomer Elastomer HT15	Nesilikonový elastomer	Dvousložkový materiál - rozstříkovaný strojně

Tab. 1 - Zkoušené druhy elastomerů

Název materiálu	Strukturní pevnost dle ASTM D 624, zkušební těleso B [N/mm]	Maximální protažení [%]	Tvrdość [°ShA]
Elastosil C 1200 A/B	25	500	25
EZ Spray Silicone 20	21	620	20
Plastexil 53 SH	8 (bez udání normy)	Neuvedeno	53
Transparentní Airtech 1024 (fóliový materiál) - nevytvrzená verze (Airtech 4124 - vytvrzená verze)	44	1300	40
Červená netransparentní Airtech 1050 (fóliový materiál) - nevytvrzená verze (Airtech 4140 - vytvrzená verze)	44	700	50

Tab. 2 - Údaje o materiálech - hodnoty dle materiálových listů

Název materiálu	Cena materiálu za měrnou jednotku	Cena za 1 m ² plachetky
Elastosil C 1200 A/B	1350 Kč/kg	7 020 Kč/m ² (pro doporučenou vrstvu cca 4 mm)
EZ Spray Silicone 20	886 Kč/kg	4 559 Kč/m ² (pro doporučenou vrstvu cca 4 mm)
Plastexil 53 SH	549 Kč/kg	1 287 Kč/m ² (v 1 vrstvě)
Airtech 1024	480 Kč/sqft	5 193 Kč/m ² (v 1 vrstvě)*
Airtech 1050	597 Kč/sqft	6 421 Kč/m ² (v 1 vrstvě)**

* minimální objednané množství 31 m² (v ceně 163 tis. Kč)

** minimální objednané množství 28 m² (v ceně 179 tis. Kč)

Tab. 3 - Ceny jednotlivých materiálů

ZPŮSOBY TĚSNĚNÍ

Způsoby těsnění permanentní plachetky jsou závislé na druhu formy na níž se bude plachetka používat.

Těsnění na formě s drážkou na okraji

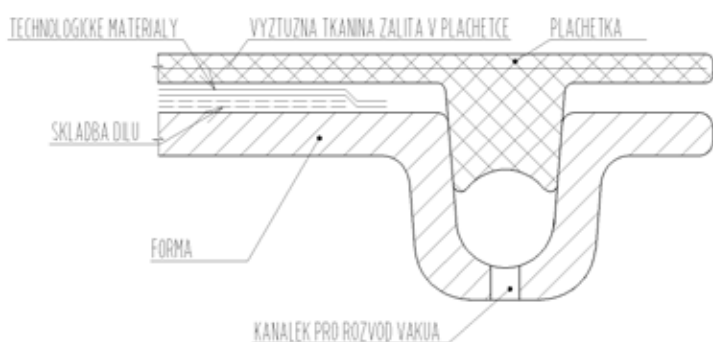
Forma může již být vyrobena s drážkou na okraji pro těsnění permanentní plachetkou (viz obr. 1). Způsob těsnění plachetky na formu je znázorněn na obr. 2.

Pro výrobu tohoto druhu plachetky jsme postupně našli vhodné pomocné materiály a vytvořili postup jejich aplikace.

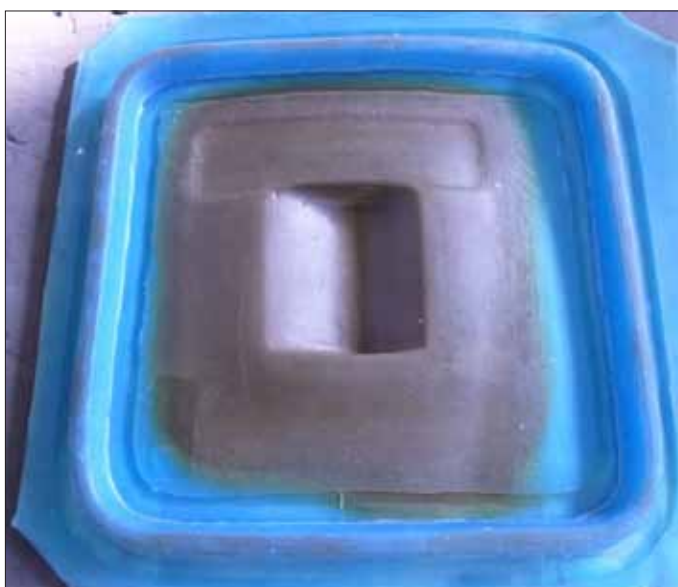
Nejprve jsme zkusili ručně mísený materiál Multi-Bag. Tento materiál je pro daný účel zcela nevhodný. Po prvním použití praskl klín umístovaný do těsnící drážky v celém průřezu.



Obr. 1 - Forma vyrobená s drážkou pro použití permanentní plachetky



Obr. 2 - Schéma těsnění permanentní plachetky k formě s drážkou



Obr. 3 - Plachetka o ploše 0,13 m² z materiálu Elastosil C 1200 A/B po výrobě 43 ks dílů

Dále jsme vyráběli plachetky z následujících materiálů (plachetky byly dlouhodobě zkoušeny při výrobě dílů):

EZ-Brush Vac Bag Silicone - plachetka byla dlouhodobě používána, i když drobné povrchové vady vznikly, ale nešířili se. Způsob její výroby postupným ručním mísením a odplyňováním je pro výrobu malých plachetek zdoluhavý a pro výrobu velkých plachetek zcela nevhodný.

Elastosil C 1200 A/B (viz obr. 3) - plachetka byla dlouhodobě používána, i když vznikly drobné výdutě. Nanášení vytlačováním z kartuše o hmotnosti 400 g a mísení mísicí špičkou bylo již výrazně rychlejší než při ručním mísení. Pro malé plochy je materiál použitelný, pro velké plochy jsou kartuše moc malé. Materiál je dražší než materiál EZ-Spray Silicone 20 i když při použití plachetek vyrobených z obou materiálů vykazovaly oba typy stejnou životnost.

EZ-Spray Silicone 20 (materiál vytlačovaný z kartuše o hmotnosti 1,7 kg a rozstříkaný z pneumatické pistole) - tento způsob nanášení je výrazně rychlejší než v předchozích způsobech. Je třeba správně nastavit rychlost posuvu pístu pistole a způsob rozstříkání pro optimální výsledek. Je fyzicky náročné držet pneumatickou rozstříkovací pistoli + kartuš po celou dobu nanášení. Vyrobili jsme dlouhodobě použitelnou plachetku, i když se opět vytvořili drobné výdutě. Vyrobili jsme plachetky s použitím výztužné tkaniny na celou plochu plachetky i pouze výztužené na okrajích.

EZ-Spray Silicone 20 (materiál nanášený ze speciálního stroje a rozstří-

kovaný pomocí tlakového vzduchu) - tento způsob nanášení a tato pryskyřice vykazovaly nejlepší výsledek. Vyrobili jsme dlouhodobě použitelnou plachetku o ploše 1,73 m² (viz obr. 4). Nanášení bylo nejméně fyzicky náročné.

Stroj lze nejlépe nastavit na optimální rozstřík a rychlost nanášení. Díky lepšímu nastavení lze vyrobit plachetku s rovnoměrnou tloušťkou a proto vyrobit soudržnou plachetku s menší spotřebou materiálu tj. plachetku lehčí a levnější. Samozřejmě nanášecí stroj je výrazně dražší než pneumatická vytlačovací pistole.

Plastexil 53 SH - tento fóliový materiál je nutné při výrobě opatřit technologickými materiály a vytvrdit v autoklávu s přetlakem alespoň 600 kPa. Plachetku se podařilo vyrobit, ale je příliš tuhá a tudíž netěsní.

Sprayomer Elastomer HT15 - Tento materiál se nanáší s použitím stroje s mísícím systémem, který umožňuje vysokou produktivitu výroby, ale plachetka z tohoto materiálu je zcela nevhodná pro naši výrobu. Permanentní plachetku bylo nutné separovat a přesto na ní ulpívalo pojivo, docházelo k trvalým plastickým deformacím a degradaci plachetky vlivem těžkých látek uvolňujících se z pojiva již po několika vytvrzovacích cyklech.

Forma bez drážky

Pokud forma neobsahuje drážku pro vakuování permanentní plachetky je způsob těsnění obtížnější. Bylo zkoušeno několik variant těsnění.

TĚSNĚNÍ SE ZABUDOVANOU SAMOLEPÍCÍ PÁSKOU V MÍSTĚ TĚSNĚNÍ

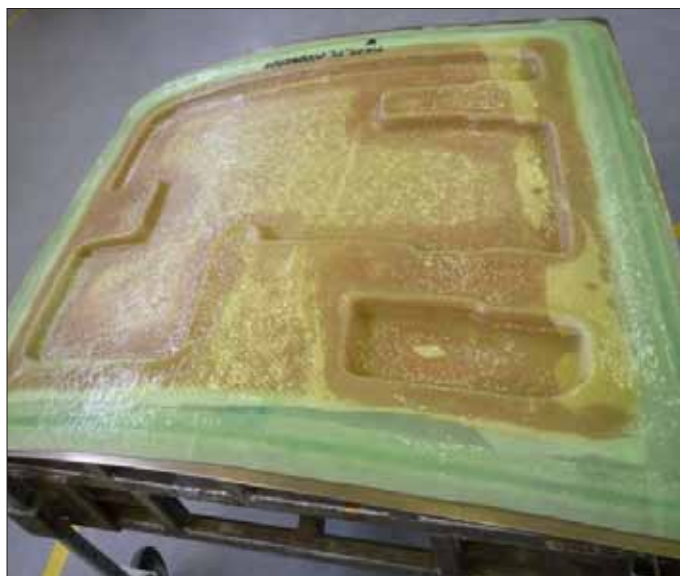
Tento druh těsnění spočívá v tom, že se plachetka přitěšňuje k povrchu formy pomocí těsnící pásky běžně používané k těsnění jednorázové plachetky. Aby bylo možné nalepit těsnící pásku na permanentní plachetku musí být v místě aplikace těsnící pásky přilnavý materiál. Tím je teplotně odolná samolepící páska. Tento způsob těsnění se neosvědčil. Páska nemá dostatečně silnou a dlouhodobou přilnavost k silikonové plachetce.

TĚSNĚNÍ S PŘILEPENÝM TĚSNÍCÍM PROFILEM NA FORMU I PLACHETKU

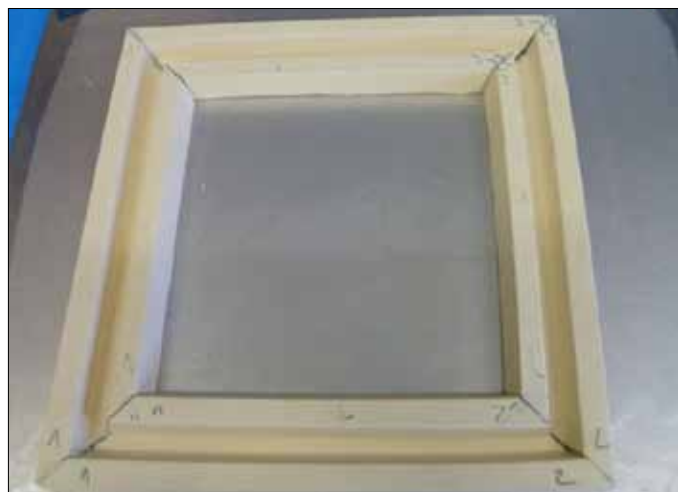
Zkoušeli jsme průmyslově vyráběný typ těsnění E-seal (schéma způsobu těsnění viz obr. 5). Bylo nutné vytvořit rámeček ze spodních částí profilu a přilepit ho na formu a horní rámeček stejného tvaru jako podkladový rámeček a tento přilepit k plachetce. Tento způsob se také neosvědčil. Je velice obtížné přesně a trvale spojit všechny části těsnění i plachetky zvláště v případě složitých tvarů.

TĚSNĚNÍ S PŘILEPENÝM TĚSNÍCÍM PROFILEM NA FORMU A TĚSNÍCÍM PROFILEM JAKO SOUČÁST PLACHETKY

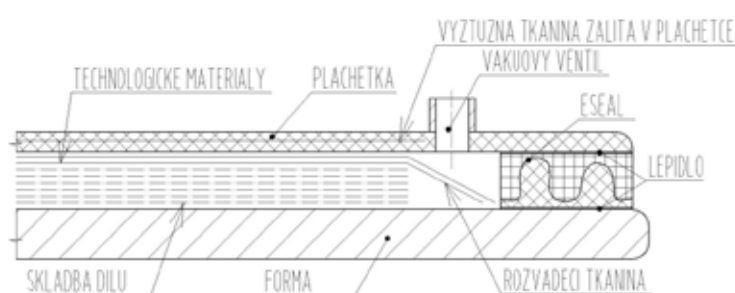
V tomto případě jsme se snažili napodobit systém formy s drážkou a na ní vyrobené plachetky s těsnícím klínem. Postupně jsme vytvořili samotný profil, který měl dostatečnou tuhost a požadovaný tvar. Z profilu jsme vyrobili rámeček a nalepili ho na formu. Přes formu s rámečkem jsme vyrobili těsnící plachetku (viz obr. 6 a 7). Tento způsob těsnění je vyhovující. Bohužel jeho výroba je zdoluhavá a je zcela nevhodná pro formy se složitějším tvarem a vyžaduje relativně široký okraj formy.



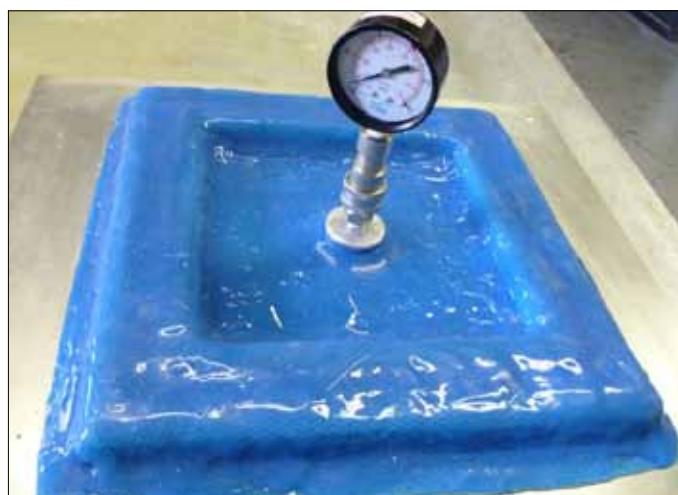
Obr. 4 - Plachetka o ploše 1,73 m² z materiálu EZ-Spray Silicone 20 nanesená stříkacím strojem po vyrobení 7 ks dílů



Obr. 6 - Těsnící profil přilepený na formě



Obr. 5 - Schéma těsnění pomocí profilu E-seal



Obr. 7 - Vzorek plachetky s přilepeným těsnícím profilem na formu a těsnícím profilem jako součást plachetky - kontrola těsnosti

TĚSNĚNÍ POMOCÍ DRÁŽKY V PLACHETCE

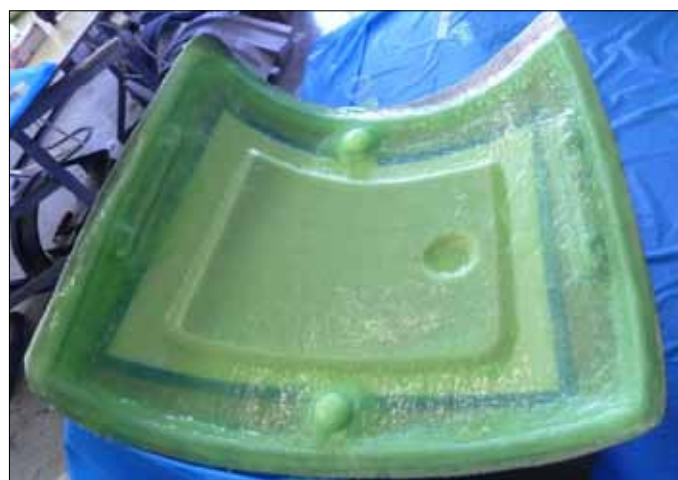
V tomto případě se na formu přilepí obdélníkový nebo lichoběžníkový profil. Přes něj se vyrobí plachetka a profil se následně odstraní. Tím vznikne těsnící profil v plachetce (viz obr. 8). Podtlak je přiveden na funkční plochu formy a těsnící profil je propojen s funkční plochou pomocí vsakovací tkaniny. Tento způsob se nejlépe osvědčil, protože je relativně jednoduchý a použitelný i na tvarově složitě díly, přitom bylo dosaženo požadované těsnosti srovnatelné s nákladnějšími způsoby těsnění.

ZÁVĚR

V projektu se nám podařilo vyrobit funkční plachetku používanou ve výrobě kompozitních dílů z fenolického prepregu na formě, která obsahuje těsnící drážku. Díl vyrobený za použití této plachetky vyhověl požadavkům kontroly jakosti a byl na něj vystaven FAI protokol a předán zákazníkovi.

Dále jsme vyrobili i funkční plachetku na formu bez těsnící drážky. Jako ideální řešení se jevila varianta těsnění s drážkou v plachetce. Při jejím použití se nemusí žádným způsobem upravovat forma. Vyrobili jsme funkční plachetku pro výrobu sendvičového dílu z epoxidového prepregu.

Díl vyrobený za použití této plachetky vyhověl požadavkům kontroly jakosti a byl na něj vystaven FAI protokol a předán zákazníkovi. V současnosti je řešena problematika potenciální kontaminace dílu materiálem



Obr. 8 - Plachetka s drážkou v plachetce před sejmutím z formy po vyrobení (plocha 0,75 m²)

permanentní plachetky. Po dokončení zkoušek a schválení procesu zákazníkovi bude možné zahájit výrobu permanentních plachetek v LA composite.

Projekt byl realizován s podporou TAČR.

Současný stav a výhledy použití multifunkčních kompozitů v letectví

Ing. Bohuslav Cabrnach, Ph.D. - VZLÚ a.s.

Článek pojednává o použití multifunkčních kompozitů v letecké technice. Popisuje důvody vzniku této kategorie materiálů, jejich současná technická řešení a aplikace a uvádí směry jejich dalšího vývoje.

ÚVOD

Nároky na zvyšování efektivity strojních zařízení stále rostou a letecká technika není výjimkou. Vývojový potenciál klasických kovových materiálů se zdá být vyčerpán, i když i v této oblasti bylo dosaženo v poslední době značného pokroku (vysokopevnostní oceli a hliníkové slitiny). Kompozitní materiály si našly svoje pevné místo v sekundárních a primárních dílech ultralehkých a malých letadel. V tomto odvětví kompozitní konstrukce úspěšně konkurují kovovým. V oblasti velkých letadel (FAR 23 - Commuter, FAR 25 a FAR 29) je již situace jiná. Požadavky na kvalitu výroby, životnost a odolnost vnějším vlivům kompozitních konstrukcí jsou již výrazně vyšší, což samozřejmě prodlužuje a prodražuje i jejich certifikaci. Získání potřebného rozsahu znalostí o vlastnostech a chování kompozitních konstrukcí v této kategorii letadel trvá déle a pro jejich uvedení do sériové výroby je zapotřebí enormních investic. I zde však dochází k rozšíření použití kompozitů v ekonomicky zdůvodněných případech.

Snaha o zvyšování efektivity leteckých konstrukcí zde však nekončí. Vývoj a výzkum je směřován nejen do vývoje nových materiálů (především na bázi nano částic), ale i do zlepšování vlastností stávajících materiálů. Zlepšování vlastností stávajících materiálů lze rozdělit na oblast zvyšování mechanických parametrů materiálů, jako je např. pevnost a tuhost, nebo rozšíření schopností daného materiálu o další, které rozšiřují jeho funkčnost.

MULTIFUNKČNÍ KOMPOZITY

Jednou z možností jak zvýšit efektivitu leteckých konstrukcí je aplikace multifunkčních kompozitů. Pod tímto pojmem je nutné chápat snahu o zvýšení efektivity využití základního materiálu, který nemá sloužit pouze k přenosu zatížení nebo mít potřebný tvar, ale má v sobě integrovat i další funkce a tím zvyšovat efektivitu nosné konstrukce. Tento pojem se začal používat celkem nedávno, ale určitě se nejedná o novou myšlenku. Multifunkční konstrukce se používají již delší dobu (stěny chladících zařízení tvoří nosnou konstrukci a zároveň izolují chlazený prostor). Nicméně rozsah plněných funkcí nosné konstrukce se zvýšil, což si zřejmě zasloužilo zavedení nového termínu. U kompozitních materiálů se předpokládá integrace následujících funkcí:

- Elektrická vodivost - stínění, statická elektřina, blesky
- Tepelná vodivost
- Ukazatel poškození
- Integrace snímačů, „Health Monitoring“
- Integrovaní funkčních povrchů (nátěry, odledování, ...)

SOUČASNÝ STAV

V současnosti je nejvíce propracován způsob zvýšení elektrické vodivosti kompozitních konstrukcí. Je to dáno tím, že se jedná o jeden z požadavků leteckých stavebních předpisů, bez jehož splnění nemůže být letecká konstrukce certifikována.

Integrace ostatních výše uvedených funkcí je u kompozitních konstrukcí stále v počátcích a jejich realizace se omezuje pouze na demonstrátory, i když některé funkce jako např. tepelná vodivost může být zvýšena přidáním kovovou vrstvou zajišťující zároveň elektrickou vodivost kompozitu.

Elektrická vodivost

Zvyšování elektrické vodivosti kompozitních konstrukcí se v současnosti provádí následujícími způsoby:

- Zemnicí pásy (Lightning Diverter Strips)
- Vodivé sítky
- Pokovená výtuzná vlákna
- Vetkaná kovová vlákna do výtuzě
- Elektricky vodivé nátěry

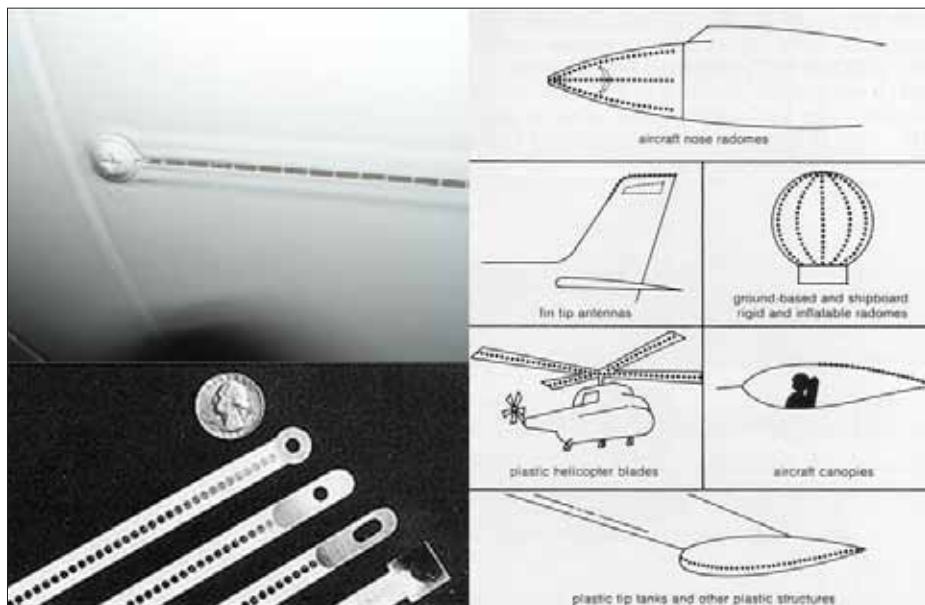
Zemnicí pásy

Zemnicí pásy patří mezi nejstarší způsoby zvýšení elektrické vodivosti kompozitních konstrukcí. Jejich použití začalo s aplikacemi kompozitů v konstrukci letadel, tj. radomy, koncové oblouky a rotorové listy vrtulníků. Funkcí zemnicích pásek je svod elektrostatického náboje z kompozitového dílu a ochrana letadla při přímém zásahu bleskem. Konstrukčně se jedná o měděné nebo hliníkové pásy, které jsou buď přilaminovány, nebo přilepeny ke kompozitové konstrukci.

Zemnicí pásy lze rozdělit na tři typy:

- Kompaktní
- Fóliové
- Segmentové

Ačkoliv se jedná o relativně starou metodu má její použití stále své opodstatnění. Především se jedná o radomy, kde by jiný způsob omezoval nebo znemožňoval použití radaru. Ovšem tato metoda je použita i v konstrukci vrtulníku NH 90, kde jsou tímto způsobem zemněny jak rotorové listy, tak i jeho trup.



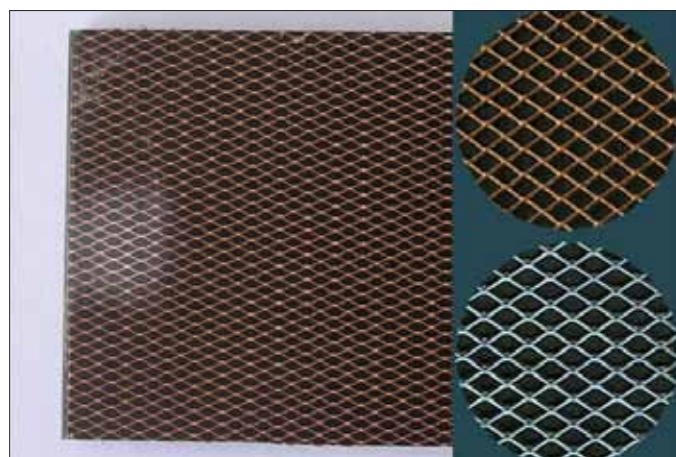
Obr. 1 - Zemnicí pásy

Vodivé síťky

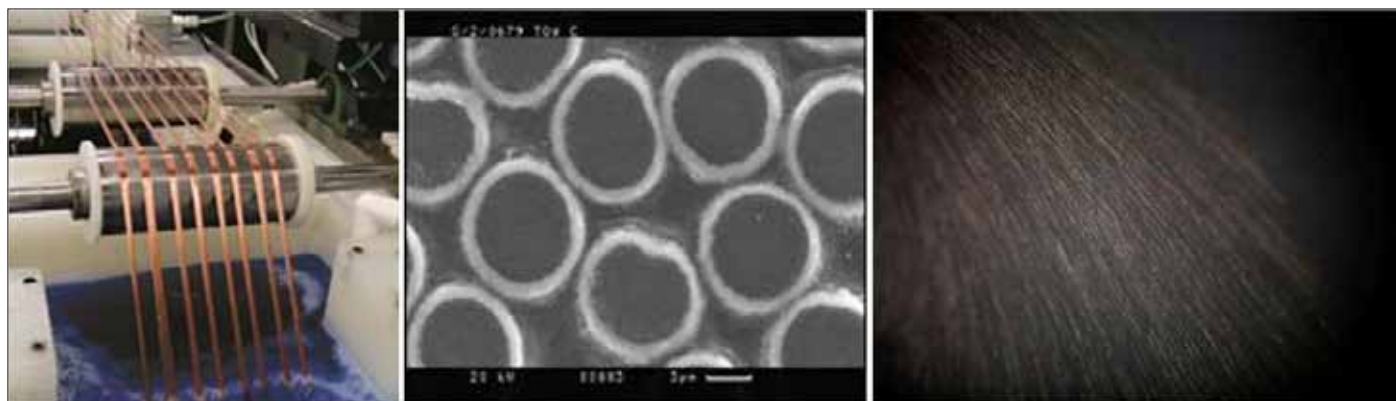
Novější metoda zvyšování elektrické vodivosti kompozitů je použití kovových sítěk. Kovové síťky se vyrábějí převážně z mědi nebo hliníku, popřípadě z nerezové oceli. Síťky lze dle způsobu výroby rozdělit na:

- Tkané
- Svařované
- Expandované

Plošná hmotnost kovových sítěk se pohybuje mezi 35 až 200 g/m² v závislosti na použitém materiálu a požadované funkci. Menší gramáže se používají především ke stínění nebo svodu elektrostatického náboje. Naopak velké gramáže pro ochranu letadla před přímými účinky blesků především v oblasti palivových nádrží. V současnosti se jedná o nejpoužívanější způsob zvyšování elektrické vodivosti kompozitů, který je aplikován na všech certifikovaných letadlech v posledních 20 letech včetně A380, A400, B787, A350 a CSeries.



Obr. 2 - Kovové síťky



Obr. 3 - Pokovená vlákna

Pokovená vlákna

Další z metod jak zvýšit elektrickou vodivost kompozitů je použití výztuže z pokovených vláken. Jedná se o poměrně starou metodu, která se používá více než 30 let. Forma výztuže jsou buď tkaniny, nebo netkané textilie. K výrobě výztuže se používají následující vlákna:

- Pohlinikovaná skelná vlákna
- Poniklovaná uhlíková vlákna
- Poměděná uhlíková vlákna

Výztuž z pokovených vláken má obecně menší vodivost než kovové mřížky, a proto se používá převážně ke stínění. Plošná hmotnost výztuže se pohybuje mezi 4 až 200 g/m² v závislosti na požadované úrovni stínění.

Vetkaná kovová vlákna do výztuže

Další z metod jak zvýšit elektrickou vodivost kompozitů je použití výztuže s vetkanými kovovými vlákny. Výztuž je formě tkaniny.

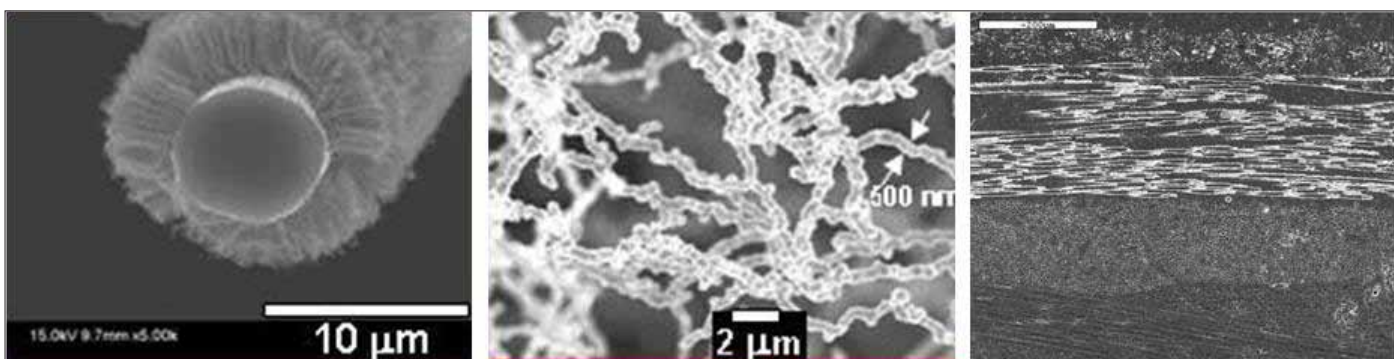
K výrobě výztuže se používají následující kovová vlákna:

- Hliníková vlákna
- Poniklovaná měděná vlákna
- Bronzová vlákna
- Vlákna z nerezové oceli

Výztuž s vetkanými kovovými vlákny má obecně menší vodivost než kovové mřížky. Nelze ji použít jako stínění, pouze jako svod elektrostatického náboje.

- Polymerní matrice s uhlíkovými nanotrubičkami
- Uhlíková vlákna s povrchovou úpravou uhlíkovými nanotrubičkami
- Vrstvy / skladba s mezivrstvou s uhlíkovými nanotrubičkami
- Vrstvy z uhlíkových nanotrubiček a nanovláken

Vzhledem k tomu, že při plnění polymerních matric nanočásticemi se má dosahovat 1 až max. 5% hm. podílu je největší problém jejich rovnoměrné rozložení v celém objemu. První aplikací uhlíkových nanotrubiček v letectví jsou koncové oblouky letounu Lockheed Martin F-35 Lightning II. Koncové oblouky jsou vyrobeny z termoplastu plněného uhlíkovými nanotrubičkami nazývaný APEXn-1 (Advanced Polymers Engineered for the Extreme).



Obr. 4 - Aplikace uhlíkových nanotrubiček



Obr. 5 - Lockheed Martin F-35 Lightning II a detail jeho koncového oblouku

SMĚRY PŘÍŠTÍHO VÝVOJE

Na vývoji multifunkčních kompozitů se v současnosti podílí všichni velcí letečtí výrobci. Úzce při tom spolupracují s akademickou sférou. Současně se pracuje na všech uvedených funkcích:

- Elektrická vodivost - stínění, statická elektřina, blesky
- Tepelná vodivost
- Ukazatel poškození
- Integrace snímačů, „Health Monitoring“
- Integrovaní funkčních povrchů (nátěry, odledování, ...)

Elektrická a tepelná vodivost

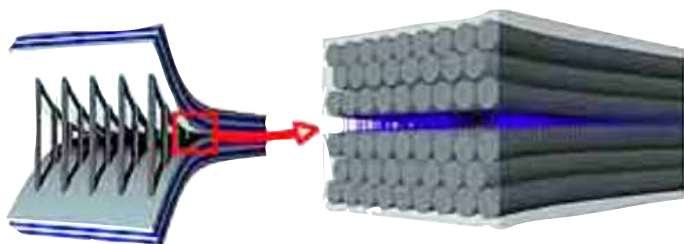
Nejslibnějším prostředkem pro zvýšení elektrické a tepelné vodivosti polymerních kompozitů se jeví uhlíkové nanotrubičky. Polymerní kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny jsou poměrně dobré vodiče elektřiny i tepla, ale pouze ve směru vláken. U uhlíkových laminátů je tepelná vodivost napříč vlákny nebo přes tloušťku laminátu cca 10x nižší než ve směru vláken. Aplikace uhlíkových nanotrubiček může být následující:

APEXn-1 je korozně a chemicky odolný, nehořlavý a recyklovatelný. Jak výrobce uvádí, z důvodů certifikačních nákladů se rozhodl uvedený materiál použít pouze u nenosných dílů. Díly z APEXn-1 lze vyrábět následujícími technologiemi:

- 3D tisk (Fused Deposition Modeling)
- Vstřikování
- Extruze profilů
- Termoforming

Jako perspektivnější a efektivnější metoda pro zvýšení elektrické a tepelné vodivosti se jeví vytvoření mezivrstvy s orientovanými uhlíkovými nanotrubičkami nebo aplikace vrstvy z uhlíkových nanotrubiček a nanovláken.

Mezivrstva s orientovanými uhlíkovými nanotrubičkami vytvořená mezi vrstvami vyztuženými uhlíkovými vlákny má zvyšovat jednak příčnou elektrickou a tepelnou vodivost uhlíkového laminátu a zároveň i interlaminární pevnost a rázovou houževnatost pro zvýšení odolnosti laminátu impaktu a následnému šíření delaminací.



Obr. 6 - Mezivrstva s orientovanými uhlíkovými nanotrubičkami

V posledních letech se podařilo několika výrobcům v USA podporovaných ze státních vývojových programů převést laboratorní výrobu nanočástic na sériovou a navázat se na finalisty, kterým se jejich produkty podařilo aplikovat ve svých konstrukcích. Příkladem mohou být plošné materiály BuckyPaper (NanoLab Inc.), NAHF-X (Third Frontier) nebo EMSHIELD (Nanocomp Technologies). Posledně jmenovaný produkt byl použit ke stínění elektronického vybavení družice Juno vyvinuté NASA a vypuštěné v roce 2011.

O jejich aplikaci se pokouší např. SAAB na náběžných hranách, kde použitá vrstva uhlíkových nanotrubiček a nanovláken má sloužit jako ochrana před účinky blesků, topná vrstva proti námraze a zvyšovat odolnost proti impaktu.

Structural Health Monitoring (SHM)

Monitorování stavu nosné konstrukce může při správné aplikaci výrazně snížit provozní náklady letadla. Jednou z nejpracovanějších metod je zakomponování optických vláken do skladby kompozitového dílu. Asi nejdále v zavedení této techniky do sériové výroby je firma Alenia, a to díky řadě vývojových programů podporovaných EU. První letová zkouška dílu vybaveného SHM proběhla 18. listopadu 2010. Díl byl součástí letounu Alenia C-27J Spartan a současně s optickým systémem byl vybaven i standardními tenzometry.

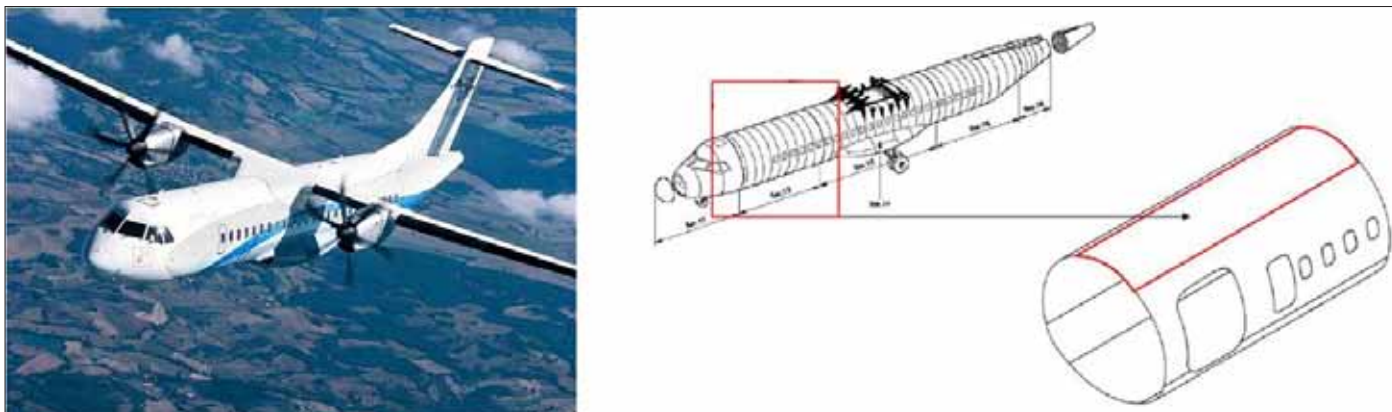
Tato zkouška je součástí vývojové plánu zavedení SHM do konstrukce letounu ATR72-600. Dle plánu má být v roce 2015 jeden trupový panel letounu ATR72-600 vybaven optickým systémem SHM pro jeho ověření v letovém provozu.



Obr. 7 - EMSHIELD a montáž družice Juno



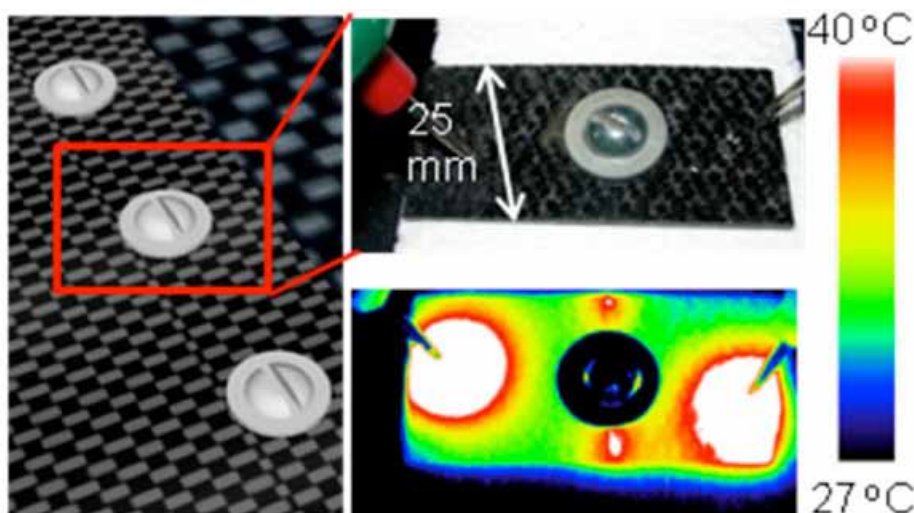
Obr. 8 - Letové ověření SHM na letounu Alenia C-27J Spartan



Obr. 9 - Demonstrátor trupového panelu se SHM na letounu ATR72-600

Self-Healing

Představa samo opravitelného materiálu je jistě úžasná. Tato idea se zkoumá především u plastů, kdy jsou do struktury plastu rozmístěny malé kapsle s opravnou látkou. V případě vzniku trhliny v základním materiálu dojde i k porušení kapsle a opravná látka vzniklými kapilárami vyplní vzniklé trhlinky. K polymerizaci opravné látky dojde po jejím kontaktu s katalyzátorem zakomponovaným v základním materiálu. K praktické aplikaci je však ještě daleko, není-li to při současném stupni poznání slepá ulička.



Obr. 10 - Ukázka indikace poškození průchodem elektrického proudu

Indikace poškození

Kompozitní konstrukce mají společnou nevýhodu v obtížně detekovatelných poškozeních. Pro zjištění poškození je nutné použít některou z NDT metod, které jsou drahé a časově náročné. Pokud by podařilo najít nějakou rychlou a levnou NDT metodu, tak by došlo k výraznému snížení provozních nákladů letadel.

Jednou z nově vyvíjených metod je rozmístění malých kapslí s barvivem do povrchové vrstvy kompozitní konstrukce. Při impaktu dojde k porušení kapslí s barvivem, které se rozšíří vzniklými trhlinkami do poškozených míst, které jsou následně snadno vizuálně zjištělné.

Další metodou může být opět využití orientovaných uhlíkových nanotrubiček v mezivrstvě mezi vlákny vyztuženými vrstvami. Při průchodu elektrického proudu takovou konstrukcí dojde k jejímu ohřevu. Pokud se ve struktuře kompozitu poškození je tok elektrického proudu přerušen a projeví se změnou teploty. K inspekci dílu pak stačí použít termokameru.

ZÁVĚR

Kompozitní materiály mají v sobě nepopíratelně vysoký potenciál. Pokud se podaří zvýšit jejich užitnou hodnotu rozšířením jejich funkčnosti, bude rozhodnuto o jejich ještě daleko širším uplatnění v konstrukci letadel.

Nicméně cesta k sériové aplikaci nových multifunkčních kompozitů v leteckých konstrukcích bude ještě dlouhá z důvodu nedořešených sériových výrobních technologií a jejich certifikace.

Literatura:

- [1] Kolektiv autorů: Advanced materials and manufacturing - Certification and operational challenges; ICAS Workshop 2011, <http://www.icas.org/ICAS-Workshop-2011.html>
- [2] <http://www.lockheedmartin.com/us/products/polymers.html>
- [3] <http://nanotechweb.org/cws/article/lab/46092>
- [4] <http://www.nano-lab.com/buckypaper.html>
- [5] <http://www.jeccomposites.com/news/composites-news/self-monitoring-composites-visualisation-impacts>

Zvyšování užitečných vlastností polymerních kompozitů použitím nanočástic

Ing. Martin Kadlec

Významným hlediskem při vývoji leteckých konstrukcí je dosažení co nejnižší hmotnosti při současném zvyšování spolehlivosti a užitečných vlastností. Použitím laminátu je možno uspořit přibližně 20 % hmotnosti letadla. Uhlíkové nanočástice umožňují ještě více zvýšit užitečné vlastnosti kompozitu a napravit některé jejich slabé stránky. V článku je shrnuta podstata přimíchávání nanočástic do matrice a výzkum mechanických a elektrických vlastností uhlíkového kompozitu s uhlíkovými nanotubami v epoxidové matrici.

ÚVOD

Vláknové kompozity s polymerní matricí patří v celosvětovém měřítku do nejdynamičtěji se rozvíjející skupiny nových materiálů a jejich využití směřuje do většiny průmyslových oborů. Použití nanočástic ke zlepšení vlastností polymerních kompozitů je v současnosti rychle akcelerující trend, který by měl vyřešit některé jejich slabé stránky jako je např. mezilaminární pevnost nebo nedostatečná elektrická vodivost.

Polymerní nanokompozity jsou kompozity s polymerní matricí, které navíc obsahují materiál s alespoň jedním rozměrem pod 100 nm. Na polymerní kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny lze pohlížet z několika úrovní. Makro úroveň je tvořena vrstvou s tloušťkou v řádu 100 až 1000 mikronů a mikroúroveň tvoří samotná vlákna s rozměrem řádu jednotek mikronů. S obsahem nanotub se přidává nano úroveň s rozměry řádově tisícin mikronů. Z tohoto důvodu se o polymerních nanokompozitech mluví jako o „multiscale“ kompozitech nebo jako o hybridní formě kompozitů ve složení nanotuby-vlákna-pojivo.

Zatímco uhlíková vlákna podporují strukturální a vodivé vlastnosti ve směru podélném s vlákny, vlastnosti ve směru kolmém k vláknům jsou dány dominantně vlastností matrice, která je křehká a elektricky nevodivá. Většina snahy u nanokompozitů je směřována ke zlepšení vlastností matrice disperzí uhlíkových nanotub v pojivo.

Jeden z hlavních problémů, kterému čelí nanokompozity, je značné zvýšení viskozity matrice už při malém obsahu nanotub. Zvýšení viskozity brání v injektáži matrice s nanotubami při metodách RTM a VARTM (vakuově asistované RTM). Výzkum se tedy zaměřuje na malý obsah nanočástic kolem 1 % hmotnosti matrice.

UHLÍKOVÉ NANOTUBY

Objev uhlíkové nanotuby (carbon nanotube – CNT) se datuje do roku 1991, kdy bylo zájmem vytvořit dlouhé nanočástice, z nichž by mohla být vytvořena vlákna s řádově větší pevností než má jakýkoliv současný materiál. Pomocí elektrického oblouku, který měl sloužit k výrobě fullerenu, bylo dosaženo struktury nanotub [1]. Fullereny a nanotuby nejsou pouze výrobkem laboratoří, vyskytují se také běžně v plameni při hoření metanu, etylenu nebo benzenu a byly nalezeny v sazí v atmosféře [2].

Uhlíkové nanotuby patří do skupiny fullerenu, a tvoří cylindrickou nanostrukturu. Rozlišujeme dvě kategorie. Jednotěnné (SWCNT) a mno

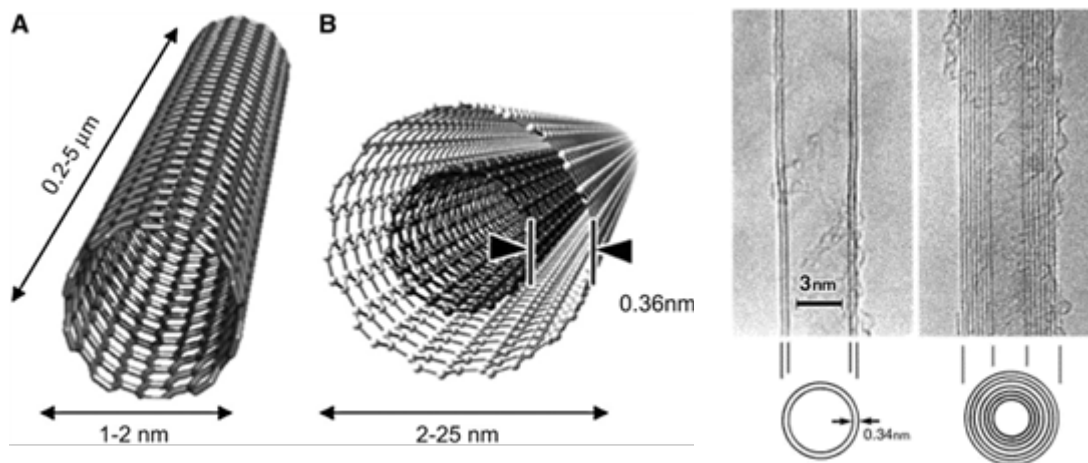
hostěnné (MWCNT) uhlíkové nanotuby (Obr. 1). Většina nanotub má průměr blízkým jednomu nanometru. Struktura může být konceptuálně znázorněna stočením jednoatomové vrstvy grafitu (grafen – Obr. 2) do válce a zavřením konců hemisférou fullerenu. Způsob jakým je stočení provedeno se popisuje pomocí indexů n a m , které popisují chirální vektor (Obr. 3). Podle velikosti parametru se nazývají „zigzag“, „armchair“ a „chiral“. Tyto a další parametry nanotub jako je délka a průměr mají velký vliv na jejich fyzikální vlastnosti, a proto i znesnadňují jejich výzkum.

Jednotěnné molekuly mají neobyčejné elektrické vlastnosti a jsou předurčeny k vývoji v elektronice. Nevýhodou je jejich dosud vysoká cena kolem 100 euro za gram. K vylepšení požadovaných vlastností konstrukčních materiálů jsou tedy vhodnější mnohostěnné nanotuby, kde se cena pohybuje řádově níže. Odnož tvoří dvoustěnné nanotuby, které mají vlastnosti jednotěnných nanotub a však jejich chemická odolnost je značně větší.

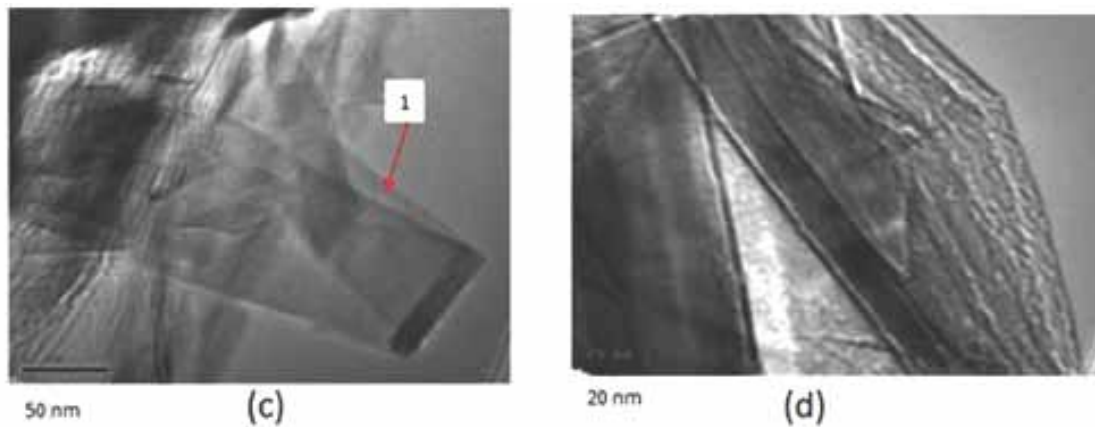
Uhlíkové nanotuby jsou dosud nejpevnějším a nejtužším materiálem ve smyslu pevnosti v tahu a modulu pružnosti (E-modulu). Pevnost se pohybuje v řádu desítek GPa a E-modul v řádu jednotek TPa. Předpokládaná tažnost je 20 až 30 %. Ještě více vyniknou tyto vlastnosti ve vztahu k jejich hustotě, která se pohybuje okolo 2 g/cm³. Při namáhání v tlaku, ohybu nebo torzi jsou hodnoty pevnosti nesrovnatelně menší, neboť dochází k porušení ve vzpěru. Výzkum fyzikálních vlastností samotných nanotub je složitý nicméně k určení E-modulu může být použito transmisního elektronového mikroskopu k měření amplitud tepelných vibračních módů [5]. Vlastnosti výsledného použitelného produktu v podobě například příze z nanotub jsou bohužel horší (Obr. 4).

ZPRACOVÁNÍ NANOKOMPOZITU

Již klasické polymerní kompozity jsou hybridní materiály využívající výhody organické a anorganické složky. S příchodem nanomateriálů přichází možnost zvýšení interakce mezi těmito dvěma složkami o několik řádů. Počáteční pokusy s přidáním nanočástic do matrice nepřinášely očekávané výsledky zlepšení vlastností. Stěny nanotub mají běžně velmi malou povrchovou energii, což přináší problémy při tvorbě vazeb nanočástic s matricí, zvláště pak polymerní. Dalším problémem je shlukování – tvoření aglomerátů spojených Van der Waalsovými silami nanočástic,



Obr. 1 - Jednotěnná a vícetěnná struktura uhlíkových nanotub [3]



Obr. 2 - Grafenové vrstvy

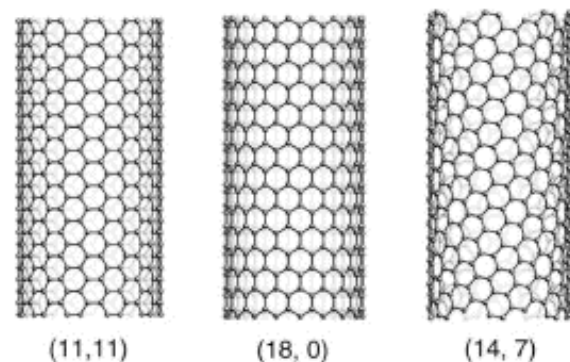
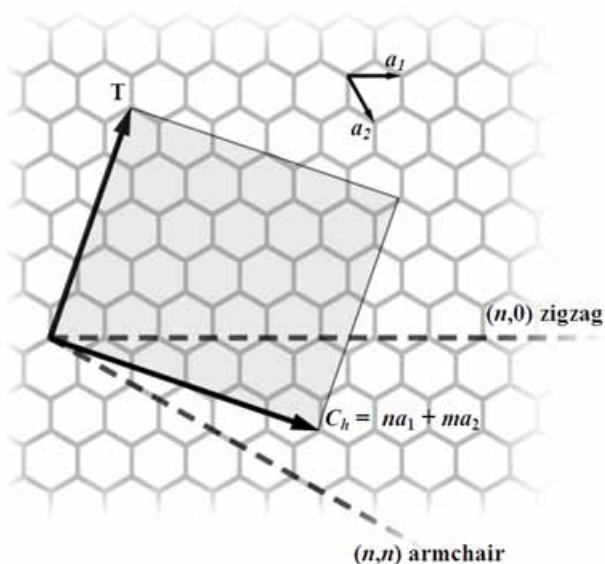
keré se poté chovají jako klasické mikročástice a nepřinášejí očekávaný efekt [7]. Problém s přidáním nanotub do polymeru přináší také velký poměr délky k průměru nanotub. Jedním z řešení těchto problémů je funkcionalizace – chemická změna povrchu nanotub (Obr. 5). V případě mikronových částic tato metoda funguje a po dostatečné disperzi již znovu nedochází k jejich shlukování. Tato úprava povrchu ale nemusí fungovat v nanoměřítku [8].

Jsou-li CNT efektivně dispergovány, dochází v polymerní matici při namáhání k značnému zpevnění již při malých hodnotách deformace.

Nanotuby mohou měnit morfologii polymerů a spolu se zvýšenou tuhostí a zvýšenou schopností absorpce energie vede jejich použití k delším únavovým životům [8].

Vliv na mechanické vlastnosti

Příměs nanotub zvyšuje mezilaminární smykovou pevnost (ILSS), kterou se při správném technologickém postupu [9] podařilo zvýšit o 33%. Osvědčilo se vysokotlaké vstřikování za vakua (VARTM), kde navíc dochází k preferované orientaci vláken ve směru toku pojiva, tedy v potřebném směru kolmém na vrstvy (Obr. 6).

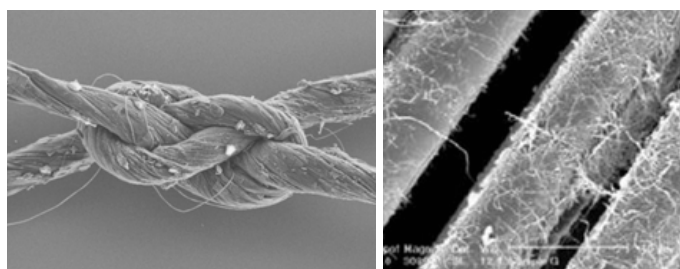


Obr. 3 - a) Chirální vektor s indexy (n,m) určuje směr srolování grafitové vrstvy pro tvorbu nanotuby. T značí osu tuby [3]. b) (11,11) Armchair typ, (18,0) zig-zag typ, (14,7) chiral typ [4].

Vliv na elektrické vlastnosti

Elektrická vodivost kompozitů má význam pro stavbu letadel ve smyslu ochrany proti blesku. Tento problém se řeší pokrytím kritických částí letounu kovovou fólií, která zvýší hmotnost dopravního letadla o 900 kg [10]. Zvýšení elektrické vodivosti také zvýší možnosti NDT v průběhu celé životnosti konstrukce.

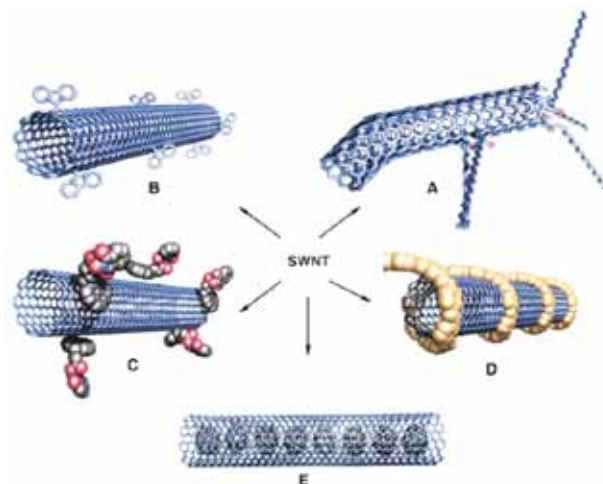
Zlepšení elektrických vlastností se připisuje novým formacím cest, které se vytvoří po překročení určitého obsahu nanoplňiva v objemu kompozitu. Kritickými parametry jsou disperzibilita nanočástic a schopnost se shlukovat. Délka nanotub přispívá k vodivosti z důvodu menšího počtu kontaktních odporů. Jakékoliv postupy vedoucí ke zkrácení vlákna (ultrazvuk, funkcionalizace) zvyšují hladinu elektrického průrazu, kdy dojde k náhlému skoku ve vodivosti při přidávání nanotub v jinak nevodivém polymeru. Obecně se požaduje snížení této hladiny. Teoreticky se hladina průrazu snižuje s rostoucím poměrem délky k průměru nanotuby (aspect ratio), ale vliv má i mnoho dalších parametrů. Pro získání vodivosti v polymeru se běžně jako příměsí používá uhlík, kterého musí být alespoň 20-30 hm. %.



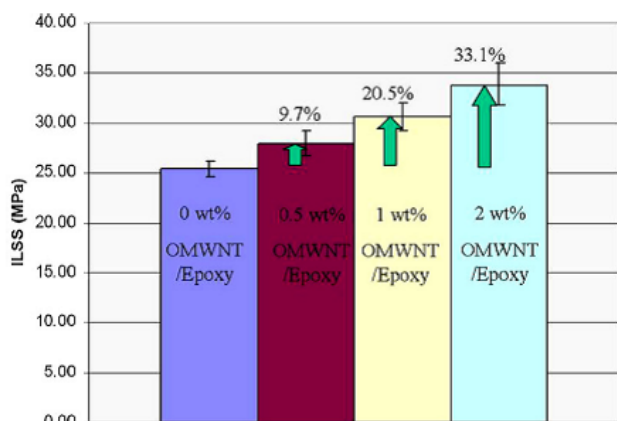
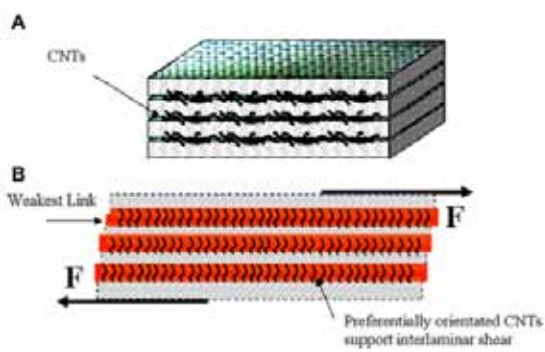
Obr. 4 - a) Příze z nanotub, b) uhlíková vlákna s deponovanými nanotubami [6]

ZÁVĚR

Byla provedena rešerše výzkumu nanokompozitů v zahraničních periodikách. Rešerše zahrnuje vlastnosti nanotub, jejich vliv na vlastnosti kompozitu a možnosti zpracování materiálu.



Obr. 5 - Funkcionalizace nanotub pro upravení jejich interakce s polymerem



Obr. 6 - Schematický obrázek principu zvýšení smykové pevnosti a dosažené výsledky z literatury [9].

Literatura:

- [1] Iijima S.: Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 1991, v. 354, s. 53-58.
- [2] Murr L.E., et al.: Carbon nanotubes, nanocrystal forms, and complex nanoparticle aggregates in common fuel-gas combustion sources and the ambient air. *Journal of Nanoparticle Research*, 2004, v. 6, s. 241-251.
- [3] Iijima S.: Carbon nanotubes: past, present, and future. *Physica B: Condensed Matter*, 2002, v. 323, s. 1-5.
- [4] Kebes. Carbon nanotube. Wikipedia. [Online] [Citace: 25. 2. 2013.] http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube.
- [5] Tracy M.M.J.: Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes. *Nature*, 1996, v. 381.
- [6] Bekzarova, E. et al. *Langmuir*, 2007, v.23, s. 3970-3974.
- [7] Ahir S.V., Huang E.M., Terentjev E.M.: Polymers with aligned carbon nanotubes: Active composite materials. *Polymer*, 2008, v. 49, s. 3841-3854.
- [8] Gupta K.R., et al. [editor]: *Polymer nanocomposites handbook*. Boca Raton : CRC Press, 2010. 978-0-8493-9777-6.
- [9] Zhihang F., Santare M.H., Advani S.G.: Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 2008, v. 39, s. 540-554.
- [10] Heonjoo H., et al.: An empirical equation for electrical resistivity of thermoplastic polymer/multi-walled carbon nanotube composites. *Carbon*, 2010, v. 48, s. 1939-1944.
- [11] Yang S., et al: Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanofibre/LCP composites. *Composites: Part A*, 2005, v. 36, s. 691-697.

Perspektivy hromadné výroby kompozitních profilů v letectví

Dr. Ing. Roman Růžek - VZLÚ a.s.

V práci je diskutován aktuální problém sériové výroby kompozitních dílů. Současné technologie používané ve výrobě nesplňují ve všech ohledech požadavky na realizaci velkého objemu sériové výroby a cenové efektivity výroby. V práci jsou uvedena možná technologická řešení hromadné výroby pro podélníky, nosníky, žebra a jiné výtuzné prvky konstrukce draků letadel různých tvarů, která mohou požadované parametry na hromadnou výrobu splnit. Tyto technologie byly vyvinuty a ověřeny v rámci řešení projektu 7RP EU IMAC-Pro.

ÚVOD

V současné době dochází k poměrně značnému nárůstu využití kompozitních materiálů v primárních konstrukcích draků letadel. Nejtypičtějším příkladem masivní aplikace kompozitních materiálů je nový letoun Boeing 787 Dreamliner. Nicméně i v konstrukcích jiných velkých letadel (dopravních i vojenských) je míra požití kompozitů významná (např. A380, A350, A400, Eurofighter, NH90, atd.) a stále se zvyšuje. Jednou z nejtypičtějšších aplikací použití kompozitních materiálů v primární konstrukci draků jsou potahy, podélné a příčné výtuzy, nosníky a závěsy. Vzhledem ke stále stoupající výrobě i poptávce po moderních letounech vyšší kategorie je v současné době možné odhadnout potřebu na výrobu různých profilů na stovky kilometrů ročně. Současný stav technologie výroby profilů však nedovoluje splnit tyto požadavky v požadovaném čase, množství a ceně.

Z těchto důvodů je nutné vyvinout nové technologické postupy umožňující cenově dostupnou hromadnou výrobu. Řešení problematiky výroby výtuzných a nosných konstrukčních prvků (podélníky, nosníky, vzpěry) bylo hlavním námětem projektu IMAC-Pro (Industrialization of Manufacturing Technologies for Composite Profiles for Aerospace Applications) realizovaného v uplynulých letech ([1] až [8]). Cílem předložené práce je podat základní informace o vyvíjených technologiích a způsobu ověřování vlastností výrobků.

CÍLE PROJEKTU

Základním cílem projektu bylo vyvinout kompletní integrovaný řetězec pro sériovou výrobu cenově efektivních optimalizovaných CFRP výtuz (tj. žeber, podélníků, vzpěr, podlahových trupových nosníků, apod.) pro různé typy letadel (dopravní letouny, vrtulníky, stíhací letouny, ...) založenou na textilních technologiích spolu s moderními technologiemi injektáže a vytvrzování.

Různé typy profilů jsou důležitým konstrukčním prvkem ve všech částech draků letadel. Spolu s potahy pak tvoří hmotnostně úsporné konstrukce s vysokou tuhostí a pevností. Jako reprezentativní prvky konstrukčního uspořádání byly v projektu zvoleny T, C, F a JF profily. Tyto profily jsou používány do podélných, příčných i podlahových systémů konstrukcí draku a mohou být brány jako reprezentativní profily, u kterých je nezbytná hromadná sériová výroba. V závislosti na ge-

ometrických požadavcích a na způsobu zatěžování je nutné vyrábět profily jak přímé s konstantním průřezem (například trupové podélníky), tak i profily přímé s proměnným průřezem (nosníky křídla) nebo složitě zakřivené profily (trupové přepážky).

SOUČASNÝ STAV

V současné době převažují integrované frézované kovové (slitiny hliníku) konstrukce. Největší potenciál pro váhově úsporné návrhy však nabízejí kompozitní materiály. Důvodem je především skutečnost, že kompozity dovolují optimalizovat návrh z hlediska geometrie, lokální tloušťky, lokálního uspořádání směru vláken a tedy optimalizovat návrh z hlediska mechanických vlastností.

Do současné doby se této problematice věnovalo mnoho výzkumných pracovišť i projektů. Hlavním používaným materiálem byly však prepregy (předimpregnované a jednosměrné vyztužené vrstvy). Jednotlivé vrstvy tenkého prepregu byly skládány v požadovaných směrech vláken (především 0, 90 a $\pm 45^\circ$). Takto skládané profily jsou vytvrzovány ve formách především v autoklávech. Tato výrobní technologie je velmi časově náročná a drahá, protože potenciál pro automatizaci takových prací je omezen více méně na rovinné geometrie. Prepregový materiál je také relativně drahý. Tyto technologie jsou využity např. při sériové výrobě ocasních ploch a trupu (Eurofighter, NH90), nebo při výrobě demonstrátorů v projektech TANGO, EMIR a ALCAS. Tyto technologie však nemohou splnit současné požadavky na čas, objem a výrobní náklady.

Mimo to nemůže být vysoký potenciál prepregových materiálů plně využit ve tvarově složitých profilech, protože počet jednotlivých vrstev je vysoký a cenově neefektivní (odpad z výroby tvoří 60% i více procent použitého polotovaru). Oblast, ve které je skladba vláken optimální, je velmi omezená, a to především u zakřivených profilů.

Důležitou částí výroby kompozitních dílů je také prosycení (injektáž) preformů a jejich následné vytvrzování. V současné době jsou využívány tzv. "closed mould technology" infuzní technologie s vytvrzování v uzavřené formě (RTM) nebo s vytvrzování v otevřené formě (VARI, VAP, SCRIMP, SLI apod.). Každá z metod má své výhody i nevýhody. Základním problémem se však jeví mimo jiné především čas potřebný na injektáž matrice a vytvrzení dílu.

NAVRHOVANÁ ŘEŠENÍ

Z výše uvedených důvodů musí být vyvinuty nové výrobní přístupy aplikovatelné v hromadné výrobě. Prioritně jsou řešení zaměřena na návrh výztužných systémů draku letadel, a to především s cílem získání optimálních mechanických vlastností s ohledem na jejich geometrii, lokální průřez a vrstvení laminátu ve vazbě a na požadovaný přenos zatížení a geometrii.

Pro tento účel se jeví využití vhodných textilních technologií v kombinaci se zlepšenými možnostmi injektáže a vytvrzovacího procesu. Využitelná se zdá především pultruze, RTM nebo VAP. Základními výhodami konstrukce vyrobené textilními technologiemi jsou:

- Vysoký potenciál pro automatizaci.
- Možnost optimalizace čistého průřezu v průběhu výroby (snížení objemu dodatečného obrábění a odpadu).
- Optimalizace skladby vláken (tkaniny) s ohledem na zatížení (3D).
- Možnost vysoké integrity konstrukce
- Dlouhodobá skladovatelnost preformů.



Obr. 1 - UD-opletení jádra (mandrel)



Obr. 2 - Radiální "braider" (vlevo) a opletené jádro (mandrel) (vpravo) [7], [8].

Projekt IMAC-Pro zaměřil hlavní směr vývoje z pohledu výše uvedených cílů na technologie pletení (braiding) a "záplatování" (Fibre Patch Preforming - FPP). Nové přístupy v oblasti pletení jsou:

- Non-crimp braiding (NC) s cílem zlepšení vlastností (snížení zvlnění/zvrásnění tkaniny) a snížení váhy jednotlivých vrstev zlepšením strojních možností a aplikací rozpustných (melttable) vláken v matici.
- Uzavřené kruhové opletení s těsnými smyčkami spolu s novým zařízením s kruhovým oplétáním, které může být otevřené.
- Kombinace pletení a navíjení s cílem zlepšení flexibility s ohledem na orientaci výztužných vláken
- Integrovaný posuv a manipulace s navíjecím jádrem (mandrel) s cílem zvýšení automatizace procesu.
- Progresivní "mandrel" technologie.
- Numerická simulace procesů pletení s cílem zlepšení možnosti rozvržení vrstev.

V oblasti pletení mají velké zkušenosti firmy EADS, USTUTT (University Stuttgart) a Kümpers. Dobře využitelné se jeví oplétání jader složitých tvarů vedených skrz středový kruhový "braider" a využití průmyslového robotu.

Aplikovatelnost pletení pro CFRP prvky s vysokými užitnými vlastnostmi podporuje také UD-technologie pletení, která je vyvíjena v EADS. Jednoduchá idea UD-pletení je nahrazena tenkými uhlíkovými pramenci (tzv. support yarns) na cívkách pohybujících se v jednom směru. Účelem těchto "support yarns" je udržet výztužná vlákna v požadovaných polohách na jádru. Na obr. 4 je ukázán příklad UD-opletené vrstvy na jádro v pletacím stroji. Viditelná +45° vrstva je překryta -45° vrstvou v okamžiku, kdy vřeteno změní směr pohybu ve stroji. Tento postup odstraní zvlnění vláken a vede k významnému zvýšení mechanických vlastností materiálu.

Poměrně nedávno vyvinutá technologie "záplatování" FPP (Fibre Patch Preforming) je vysoce flexibilní z pohledu skladby vláken. FPP dovoluje plně automatizovanou výrobu složitých výrobků. FPP technologie byla původně vyvinuta s cílem výroby tenkých skořepinových tvarů s proměnným úhlem vláken a tloušťkou stěny.

Jako základní prvek této technologie je speciální páska. Páska má šířku 20 mm, protože konvenční uhlíkový pramenec (12k nebo 14k) má právě tuto šířku. Na povrchu pásky je nanášeno speciální pojivo (binder).

Páska je řezána na kousky (záplaty) s definovanou délkou a tvarem. Speciální zařízení pro vrstvení tuto odříznutou část (záplatu) zvedne a umístí na požadované místo. Každá záplata může být umístěna zcela



Obr. 3 - FPP technologie.

individuálně s libovolně definovanou orientací. Zařízení pokládající jednotlivé záplaty pracuje se silikonovým gumovou raznicí, která přitlačí homogenně vlákna na zakřivený povrch.

FPP technologií je možné vyrábět velmi složité tvary. Díly, u kterých mohou vzniknout v případě použití běžných textilií tzv. "vrásky" (wrinkles) nebo mezery (gaps), jsou vhodné pro použití FPP technologie. FPP může být využita také pro tzv. "rapid prototyping", protože skladba vláken může být definována přímo v CAD/CAM modelu. Polotovary (preform) mají čistý tvar a odpad vláken je redukován na minimum.

Cílem dalšího způsobu aplikace FPP může být lokální zesílení (vyztužení) jiných textilních konstrukcí a polotovarů. Kritické oblasti (např. otvory a výřezy) lze zesílit pomocí dodatečných záplat. Frekvence kladečního cyklu 1 až 5 Hz v současné době limituje možnosti na malosériovou výrobu dílů. Pro některé aplikace, kdy není nutné při výrobě nutně využívat všechny stupně volnosti, může být rychlost kladení zvýšena. To bylo také jedním z cílů v projektu IMAC-Pro.

Velmi důležitým krokem v průběhu výroby je zajištění kvality polotovarů (preforms). Kvalitu v průběhu tkaní a záplatování lze poměrně jednoduše kontrolovat optickými systémy, které musí být schopny měřit nejen v rovině, ale i ve 3D uspořádání, nejméně tyto parametry:

- Geometrii polotovaru (preform).
- Odchylku úhlu vláken.
- Nehomogenitu vláken (zvlnění, mezery, přesazení).

Konečným výrobním krokem je prosycení (injektáž) preformu matricí a jeho vytvrzení. Dosud používané metody je nutné vylepšit tak, aby byly dost rychlé a udržely časové krok s výrobou preformů, protože cílem je kontinuální výroba výztužných prvků konstrukce, jako např. podélníky, nosníky, žebra, apod. Požadavek na rychlé vytvrzování je možné řešit např. předehříváním nástroje (formy), nebo aplikací mikrovln (což bylo také jedním z cílů projektu IMAC-Pro). V současné době se pracuje na dalším vývoji nových metod pro simulaci infuze, optimalizace toku pryskyřice a vytvrzování. Velmi důležitým prvkem je v tomto ohledu monitorování celého procesu s možností sledování změn parametrů vytvrzovacího procesu a zajištění kvality dílu.

POPIS PROJEKTU A VÝSLEDKY

Do řešení projektu IMAC-Pro bylo zapojeno 20 partnerů z EU. Hlavním cílem bylo vyvinout použitelné technologie pro výrobu kompozitních dílů - výztuh, podélníků, nosníků, apod. - pro hromadnou výrobu. Tyto díly byly rozděleny do dvou hlavních kategorií:

1. Masivní profily jako podlahové nosníky a žebra s rozměry mezi 50 až 400 mm a tloušťkou stěny od 0,5 do 8 mm. U těchto profilů je dodatečným požadavkem jejich měnící se průřez a tvar po délce.

2. Podélné výztuhy s relativně malým průřezem (do cca 50 mm), u kterých je průřez konstantní, ale jsou různě zakřivené a mají velkou délku (až do 30 m).

Pro výrobu profilů typu 1) byla jako prioritní zvolena technologie pletení. Pro profily typu 2) byla jako prioritní zvolena metoda FPP.

Technologie lisování za tepla (HP - Hot Pressing) byla použita především pro polotovary podélníků (EADS), vytvrzování HP preforms bylo realizováno pultruzí firmou SECAR. Alenia a DLR vyvíjely alternativní výrobní technologie (zpracování pletených "hadic" (braiding hoses)) a vytvrzování s využitím mikrovln. IAI (Israel Aerospace Industry) pak použilo různými metodami vyrobené podélníky na výrobu panelů určených pro mechanické zkoušky. Zobrazení panelu s FPP podélníky před zkouškou v tlaku ve VZLU je uvedeno na Obr. 5.

Pro žebra a nosníky byl vývoj zaměřen především na pletení polotovarů (SGL-Kümpers a IFB USTUTT (Institute of Aircraft Design z University Stuttgart)). Firmy RUAG, Fachhochschule Nordwestschweiz se zaměřily na alternativní vytvrzovací koncepcce spolu s firmou Westcam, která se zaměřila na výrobu nástrojů (forem).

Firma Dassault-Aviation porovnávala mechanické vlastnosti pleteného nosníku Falcon, který byl vyroben v IFB, se současnými existujícími profily. Umístění ověřovacího vzorku na nosníku spolu s principem zkoušky v ohybu je uveden na Obr. 6. Hlavní aktivitou firmy SABCA v projektu byl vývoj integrovaného demonstrátoru (cargo frame unit). Tento díl byl vybrán proto, že v takovém dílu je obsažena většina profilů, které byly objektem zájmu v projektu IMAC PRO:

- zakřivené profily
- proměnný průřez profilů
- lokální zesílení
- vysoká variabilita použitých typů profilů.

Výše uvedené vývojové práce byly podporovány numerickými analýzami prováděnými formou Cenaero. VZLU zajišťovalo zkoušku demonstrátoru a komplexní zkušební aktivity pro různé úrovně složitosti těles (vzorky, části konstrukce, díly, demonstrátor). Schematické zobrazení demonstrátoru je uvedeno na Obr. 7.

Firmy FIBRE, ISAM a Eurocopter se zaměřily na vizuální kontrolu a kontrolu kvality polotovarů a University of Patras vyvinula nový analytický nástroj pro cenové analýzy. INASCO a HAI kontrolovalo kvalitu vytvzovacího procesu a permeabilitu preformů. VZLU zajišťovalo také nedestruktivní kontrolu vyrobených dílů s využitím ultrazvuku (A, B a C-scan) - viz Obr. 8 - a metalografickou analýzu výrobků.



Obr. 4 - Zakřivený trupový panel s T-podélníky vyrobenými FPP technologií

VÝROBA PODÉLNÍKŮ

Cesty pro výrobu preformů

Jedna zvolená cesta je tváření NCF materiálu s využitím nespojitě technologie tváření za tepla (HP). Tato technologie poskytuje polotovary T-podélníků ve velmi dobré a reprodukovatelné kvalitě. Výstupní rychlost technologie tváření za tepla může dosáhnout až 25 m/hod. Druhý zvolený postup výroby je pokládání jednotlivých záplat vyříznutých z UD-pásek (FPP). Tato metoda dovoluje výrobu vysoce flexibilních pásů, které jsou vhodné pro zakřivené podélníky. Pro tento účel bylo vyvinuto a vyrobeno nové zařízení [9]. Oba typy vyrobených polotovarů jsou uvedeny na Obr. 9.

Cesty pro vytvzování podélníků

Byly zvoleny dvě rozdílné vytvzovací technologie. HP polotovary byly syceny pryskyřicí s využitím pultruze, FPP pásy byly vyráběny především RTM technologií - viz Obr. 7.

VÝROBA ŽEBER A NOSNÍKŮ

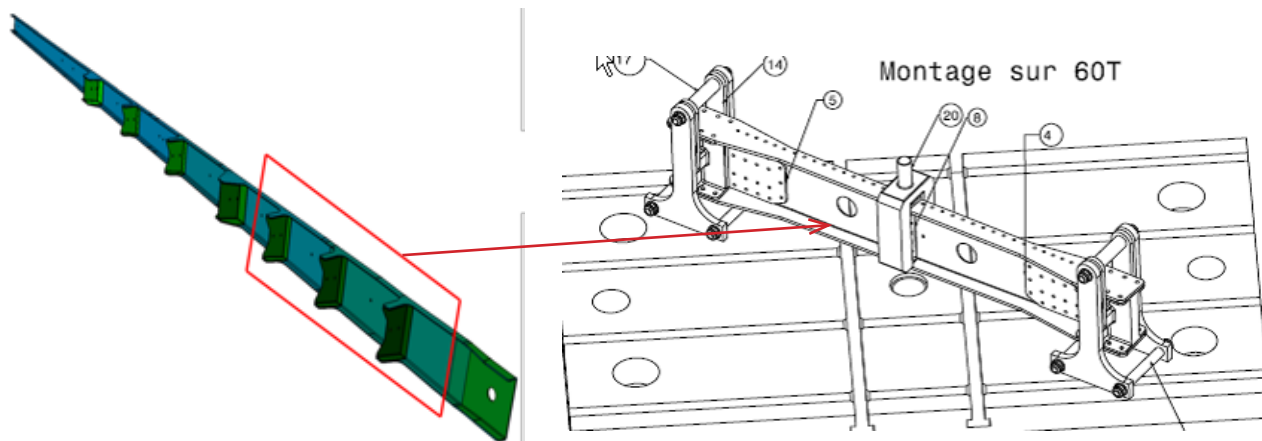
Cesty pro výrobu preformů

Preferovaná metoda pro masivní profily jako jsou žebra a nosníky je technologie UD-pletení. UD-pletením lze dosáhnout velmi dobré uspořádání vláken s malým zvlněním. JF-profil a C-profil byly zvoleny jako prioritní pro vývoj z hlediska jejich využití v leteckých konstrukcích. Pro výrobu nosníku s C-profilem byla použita metoda opletení pravouhlohlého hliníkového jádra. Po dokončení pletení je polotovar napůl rozříznut a tím jsou získány dva C-profily - viz Obr. 8.

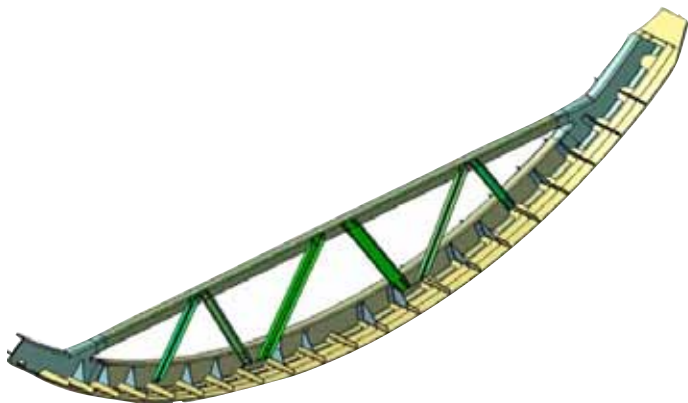
JF-profil je také získán opletením hliníkového jádra. Na rozdíl od výroby C-profilem je polotovar rozříznut pouze na jedné straně a není dokončen před jeho vložením do formy - viz Obr. 8.

Cesty pro vytvzování

Při výrobě každého profilu byla v průběhu řešení projektu použita nová technologie vytvzování. Pro nosník tvaru C byl vyvinut a použit inovovaný RTM nástroj (forma) pro velmi krátkou dobu vytvzování. Nepatrná mezera mezi preformem a nástrojem umožňuje velmi krátký infusní čas před úplným uzavřením formy pro vytvrzení.



Obr. 5 - Umístění vzorku na nosníku a princip zatěžování pro ověření mechanických vlastností nosníku [5]

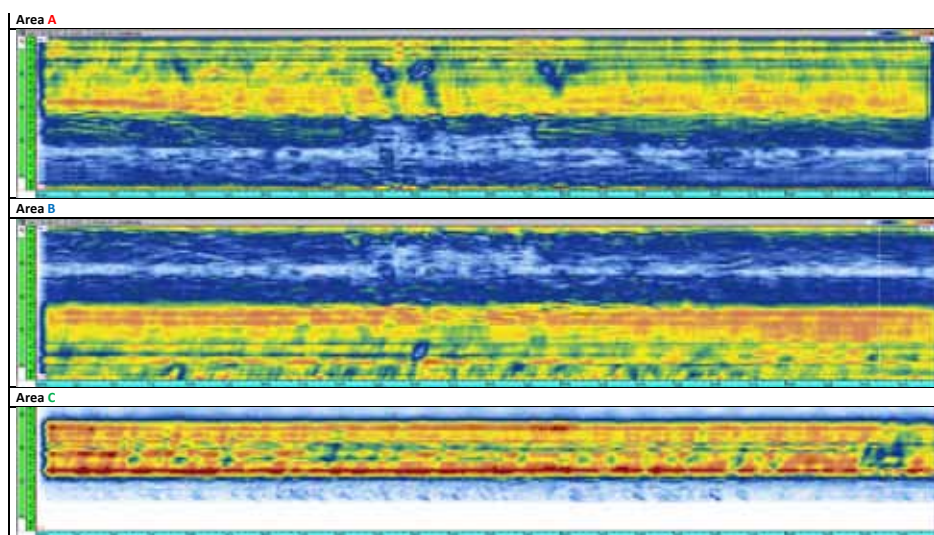


Obr. 6 - Model demonstrátoru části podlahy [2].

Pro JF-tvar byl vyvinut jiný nástroj. Také v tomto případě bylo cílem dosáhnout velmi krátkého času infuse. Samostatný nástroj s expandovatelným funkčním jádrem používá tlak vzduchu pro slisování preformy, což vede k vysoké kvalitě dílů. S cílem výroby zakřiveného žebra skutečné velikosti byl pro demonstrátor vyvinut a vyroben zcela nový nástroj (otevřená forma).

ZÁVĚR

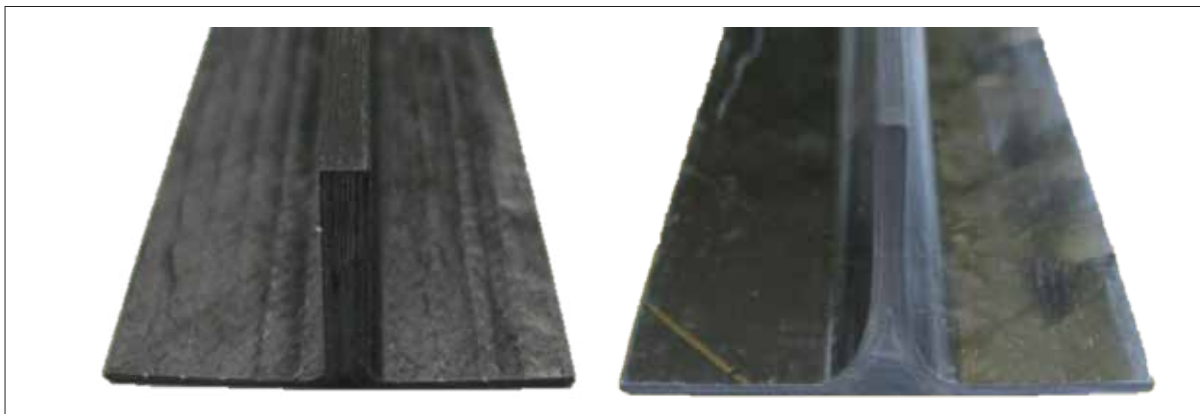
V práci je diskutován velmi aktuální problém hromadné výroby kompozitních dílů, především podélných výztuh, nosníků a žeber. Při sériové výrobě je nutné mít k dispozici cenově efektivní technologii pro výrobu dílů s kapacitou stovek kilometrů každého profilu ročně. To současné metody a technologie používané ve výrobě kompozitních konstrukcí neumožňují. V práci jsou uvedeny možné technologie, které byly ověřeny, a které mohou požadované parametry splnit. Tyto technologie byly vyvinuty v rámci řešení projektu 7RP EU IMAC-Pro.



Obr. 7 - Typický výsledek nedestruktivní kontroly ultrazvukem T-profilu v průběhu vývoje - VZLU



Obr. 8 - Preformy podélníků vyrobené HP (vlevo) a FPP (vpravo) technologií [1]



Obr. 9 - T-podélníky vyrobené pultruzí (vlevo) a RTM (vpravo)



Obr. 10 - Výroba preformů nosníku tvaru C (vlevo) a tvaru JF (vpravo) s využitím UD-pletení [1]

Literatura:

- [1] Gessler, A., Breu, Ch.: Industrialization of Profile Manufacturing Techniques - an Overview over the Project IMAC-PRO; 7th International Technical conference & Forum "Advanced Composites - Design & Process for Sustainability", SAMPE SETEC 12, 2012, September 19th - 20th, Luzern, ISBN: 978-3-952 3565-7-9.
- [2] Bara P., Xolin G., Gessler, A., Dumas, D., Danilov, M., Rittenschober, B., Růžek, R.: Innovative Aircraft Fuselage Frames Made from Tailored Braiding Profiles; 7th International Technical conference & Forum "Advanced Composites - Design & Process for Sustainability", SAMPE SETEC 12, 2012, September 19th - 20th, Luzern, ISBN: 978-3-952 3565-7-9.
- [3] Klautzsch, M., Stern, T., Rittenschober, B., Peikert, G., Fiedler, B., Klauser, S., Dransfeld, C., Masania, K., Moser, S.: Investigation of Tooling Strategies for high volume industrialized RTM Manufacturing of Profiles for Aerospace Applications; 7th International Technical conference & Forum "Advanced Composites - Design & Process for Sustainability", SAMPE SETEC 12, 2012, September 19th - 20th, Luzern, ISBN: 978-3-952 3565-7-9.
- [4] Dransfeld, D., Masania, K.: The Compression Resin Transfer Moulding Process for Efficient Composite Manufacture; 7th International Technical conference & Forum "Advanced Composites - Design & Process for Sustainability", SAMPE SETEC 12, 2012, September 19th - 20th, Luzern, ISBN: 978-3-952 3565-7-9.
- [5] Birkefeld, K., Y. Blanchard, Vigoureux, A.: IMACPRO: Mechanical Performance of an Ud-Braided Spar; 7th International Technical conference & Forum "Advanced Composites - Design & Process for Sustainability", SAMPE SETEC 12, 2012, September 19th - 20th, Luzern, ISBN: 978-3-952 3565-7-9, pp. 187-192.
- [6] Danilov, M.: Microwave-based curing of CFRP struts; 7th International Technical conference & Forum "Advanced Composites - Design & Process for Sustainability", SAMPE SETEC 12, 2012, September 19th - 20th, Luzern, ISBN: 978-3-952 3565-7-9.
- [7] Klauser, S., Gessler, A., Katsiropoulos, C.: Optimization of JF-Frames and C-Beams Manufacturing by Means of an Extensive Cost Analysis Study; 7th International Technical conference & Forum "Advanced Composites - Design & Process for Sustainability", SAMPE SETEC 12, 2012, September 19th - 20th, Luzern, ISBN: 978-3-952 3565-7-9.
- [8] Birkefeld, K.: Optimization of braided structures with a genetic algorithm considering production aspects; 7th International Technical conference & Forum "Advanced Composites - Design & Process for Sustainability", SAMPE SETEC 12, 2012, September 19th - 20th, Luzern, ISBN: 978-3-952 3565-7-9.
- [9] Breu, Ch. Gessler, A.: Project periodic report_19-12-2011 mont_19-12-2011. IMAC-Pro Project, December 2011.

Vývoj kompozitních deforačních členů pro dopravní prostředky

Ing. Adam Hloušek, MSc., Ing. Vít Sháněl, Ing. Viktor Kulíšek a Prof. Ing. Milan Růžička, CSc.

Příspěvek se zabývá vývojem deformačních členů určených pro použití v dopravním průmyslu. Cílem je vyvinutí lehké konstrukce z vláknových kompozitů, která se při stanoveném rázovém zatížení začne postupně bortit po délce absorbéru a tím zajistí vysokou absorpci energie. Absorpce energie kompozitních deformačních členů je zajištěna hned několika módy porušování. Mezi ty hlavní patří především lom vláken kompozitu a delaminace vrstev kompozitu. Byly navrženy a zkoušeny vzorky na bázi termosetových i termoplastových matric, vyztužené uhlíkovými, skleněnými a polypropylenovými vlákny. Zkušební tělesa byla testována kvazi-statickým zatížením i dynamickým zatížením na padostrojích a byly porovnány schopnosti absorpce kinetické energie.

ÚVOD

Kompozitní materiály se v dnešní době dostávají do popředí v mnoha oblastech. Výjimkou není ani oblast pasivní bezpečnosti dopravních prostředků, kde se tyto materiály uplatňují z důvodu velmi příznivých vlastností. V porovnání s klasickými konvenčními deformačními členy z kovů, které jsou založeny na plastické deformaci, mohou vhodně zkonstruované kompozitní deformační elementy vykazovat nejen nižší hmotnost, ale i výrazně vyšší měrnou absorbovanou energii. Děje se tak díky řízenému využívání zcela jiných mechanismů postupného porušování kompozitních materiálů.

Kompozitní absorbér je po tloušťce tvořen několika vrstvami základního stavebního materiálu (jednosměrná lamina případně tkanina a vhodná matrice). Výsledné vlastnosti absorbéru jsou určeny kompozitní skladbou, tj. typem vláken a matrice, orientací a počtem jednotlivých vrstev. Při vhodném návrhu je možno docílit přeměny kinetické energie na energii deformační pomocí disipaci vlivem delaminace, tj. vlivem oddělování jednotlivých vrstev s následnou disipací vlivem porušování matrice a porušování vláken. Kompozitní absorbér funguje v posloupnosti náráz - iniciace porušení, tj. nastartování mechanismu delaminace vrstev a dále porušování vláken a matrice - následné šíření poruchy. Vhodným materiálem a stavbou deformačního členu (např. využitím uhlíkových vláken s vysokou pevností, nebo s použitím termoplastických matric) lze dosáhnout energeticky výhodného šíření poruchy přes podstatnou část absorbéru a to bez ztráty stability vlastního prvku vlivem tlakového zatížení.

Návrh kompozitního deformačního členu je komplikovaný jak množstvím vstupních parametrů, tak problematikou volby vhodných numerických výpočetních modelů, které by měly predikovat deformační odezvu absorbéru. Obecně se jedná o materiál s nehomogenní strukturou a anizotropními vlastnostmi. Do procesu návrhu a výpočtu tak vstupuje velký počet parametrů (volba vláken a matrice, kompozitní skladba) i okrajových podmínek, které mohou ovlivňovat výsledné deformační chování. Experimentování na vzorcích a modelových tělesech je proto stále nezastupitelné.

V dnešní době se kompozitních deformačních členů využívá např. v leteckém průmyslu (podvozky letadel, vrtulníků) a v omezené míře

v průmyslu automobilovém. Zde se kompozitních deformačních elementů využívá pro závodní vozy, případně pro vozy sportovní, které jsou vyráběny v malých sériích. V sériové výrobě se tyto materiály zatím výrazně neprosadily, ale lze pozorovat nárůst dílčích aplikací. Prezentovaná práce byla zaměřena na porovnání deformačního chování několika typů kompozitních deformačních členů, jejichž použití je plánováno v prostředcích hromadné přepravy osob.

ZKUŠEBNÍ DEFORMAČNÍ ČLENY

Primárním úkolem studie bylo objasnit vliv konstrukčních parametrů na deformační odezvu zkušebního členu. Jako konstrukční parametry byl stanoven typ vláken, typ matrice a orientace vrstev kompozitní skladby. Experimenty byly prováděny na dvou základních typech vzorků. Z pohledu geometrie a materiálu lze vzorky dělit na:

- Deformační členy založené na navíjených kompozitních strukturách
- Deformační členy založené na lisovaných kompozitních polotovarech s termoplastickou matricí

Zkušební deformační členy založené na navíjených kompozitních strukturách

Deformační členy tohoto typu byly vyrobeny z navíjených kompozitních trubek. Testovány byly segmenty samostatných trubek, další zkušební vzorky byly tvořeny svazky čtyř nebo sedmi trubek, viz obr. 1. Všechna zkušební tělesa byla tvořena z trubek délky 150 mm a s vnitřním průměrem 26 mm. Tloušťka stěny se v závislosti na kompozitní skladbě pohybovala okolo 1 mm. Zkušební trubky byly navinuty z vysoko-pevnostního uhlíkového vlákna (T34-700) a epoxidové pryskyřice LG120.

Bylo vyrobeno 7 variant kompozitní skladby, jejichž přehled je uveden v tab. 1. Cílem bylo popsat vliv úhlu natočení vláken na silově deformační charakteristiku absorbéru (z 1, 4 i 7 trubek).



Obr. 1 - Zkušební deformační členy z navíjených kompozitních prvků (základní trubka, svazek 4 a svazek 7 trubek)

Vzorek	Skladba
Vz_1	87/0
Vz_2	0/87
Vz_3	0/23/-23
Vz_4	0/23/-23/87
Vz_5	0/15/-15
Vz_6	0/15/-15/87
Vz_7	0/7/-7/87

Tab. 1 - Kompozitní skladba trubek



Obr. 2 - Vzorek vlnovce z materiálu VC

Zkušební deformační členy založené na lisovaných termoplastech

Deformační členy na bázi lisovaných termoplastů byly vyrobeny ve formě vlnovců z tkanin s termoplastickou matricí. Ve společnosti LETOV LETECKÁ VÝROBA s.r.o. byly vyrobeny tři typy experimentálních vzorků, které se lišily v použitém materiálu. Testovány byly kombinace uhlíkových vláken s termoplastickým polyuretanem, ze skleněných vláken s polyamidem 6.6 a kombinace polypropylenových vláken s polypropylenovou matricí. Podrobnosti k jednotlivým typům vzorků jsou uvedeny v tab. 2.

Kompozitové desky byly vyrobeny lisováním přehřátého deskového polotovaru do tvaru vlnovce ve formě. Vlnovce byly vzájemně slepovány, případně bodově svařovány do bloků, skládajících se ze čtyř základních zvlněných desek, tak aby vytvořily analogii svazkům trubek. Výška finálních zkoušených vlnovcových bloků byla 120 mm, příčné rozměry bloku (viz obr. 2) byly 84 mm x 150 mm. Tloušťka stěny byla opět přibližně 1 mm.

Označení materiálu	VS	VP	VC
Materiál	TEPEX® dynalite 101-FG290(4)/45% Filament Glass/PA6.6	PURE polypropylen composit	TEPEX® dynalite 208-C200(4)/45% Carbon/TPU
Vrstvení	4 dvojrstvy x 0,25 mm	8 vrstev x 0,13 mm	4 dvojrstvy x 0,25 mm
Tloušťka [mm]	1	1,04	1
Skladba	[(0,90)/(+45,-45)]s	[(0/90)2]s	[(0/90)2]s
Vazba	Keprová vazba 50:50	Plátňová vazba	Keprová vazba 50:50
Vlákná	Sklo	Polypropylen	Uhlík
Polymer	Polyamid 6.6	Polypropylen	Termoplastický polyuretan

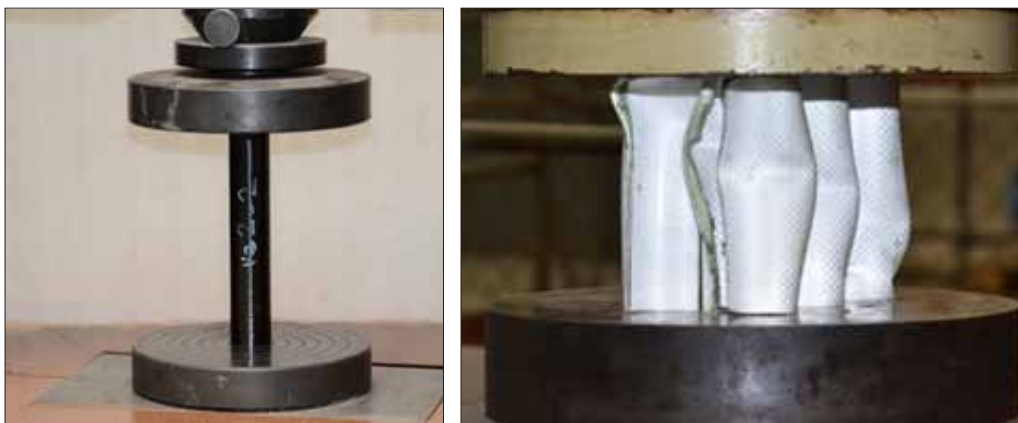
Tab. 2 - Přehled použitých termoplastických materiálů

TESTOVACÍ METODIKA

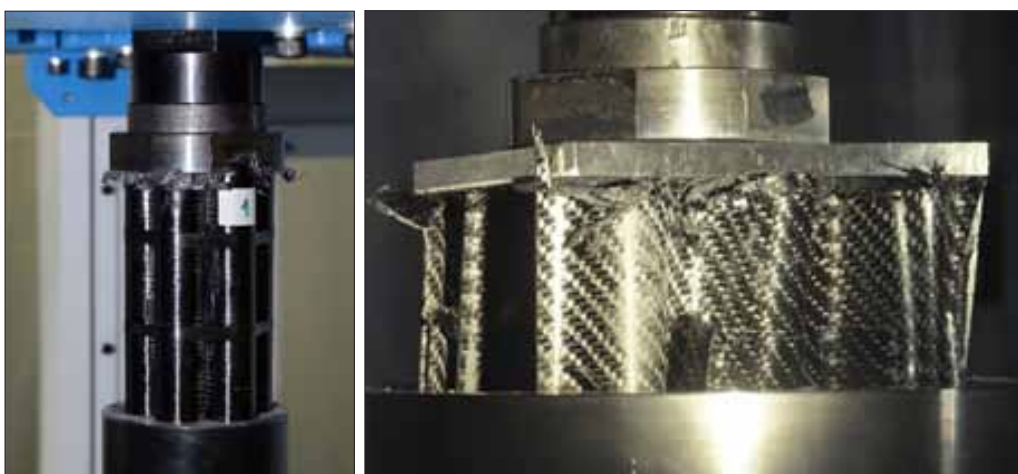
Cílem experimentálních prací bylo získat silově-deformační odezvu zkušebních deformačních členů při tlakovém zatěžování. Za tímto účelem byly primárně provedeny rázové zkoušky zkušebních vzorků na padostroji. Pro podporu vývoje deformačních členů a vývoj jejich výpočtových modelů byly také provedeny kvazi-statické zkoušky na trhacích strojích.

Kvazistatické zkoušky

Kvazistatické zkoušky byly provedeny v laboratořích Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS ČVUT v Praze. Zkušební tělesa byla uložena mezi dvě rovné tuhé desky, viz obr. 3. Zkoušky probíhaly v režimu řízení posuvem horní desky a z měření byly pořízeny záznamy síly a posuvu příčnicku stroje.



Obr. 3 - Zkouška tlakem jednotlivé trubky, počáteční stav



Obr. 4 - Konfigurace rázové zkoušky pro svazky a vlnovce

Zkoušky jednotlivých trubek byly provedeny na trhacím stroji Heckert FPZ100 v rozsahu silového snímače 0-20 kN, zkoušky svazků trubek a vlnovců byly provedeny na stroji Heckert Eu10 v rozsahu silového snímače 0 až 400 kN.

Rázové zkoušky na padostrojích

Rázové zkoušky byly provedeny na padostroji Imatek IM10T-30Hv ve společnosti Comtes FHT a.s. Testována byla zkušební tělesa všech typů (navíjené trubky a jejich svazky, vlnovce). Uložení těles bylo podobné jako u kazistatických zkoušek. Během zkoušky byl vzorek umístěn na spodní nepohyblivou čelist a následně zatížen pádem hmoty na tuhou desku umístěnou na horní straně zkušebních vzorků, viz obr. 4.

Vzhledem k rozdílným tuhostem a pevnostem zkušebních vzorků (zvláště mezi tělesy vyrobenými z 1, 4 a 7 navíjených trubek) byly pro následující kategorie vzorků zvoleny odlišné hodnoty energie rázu. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 3. To bylo realizováno změnou hmotnosti beranu padostroje (59 až 109 kg a výškou pádu). Bylo využito instrumentace stroje pro měření posuvu horní desky a měření okamžité síly. Velikost síly byla snímána pomocí piezo-snímače, snímkovací frekvence byla pro jednotlivé vzorky odlišná (80-200 kHz).

Zpracování výsledků zkoušek

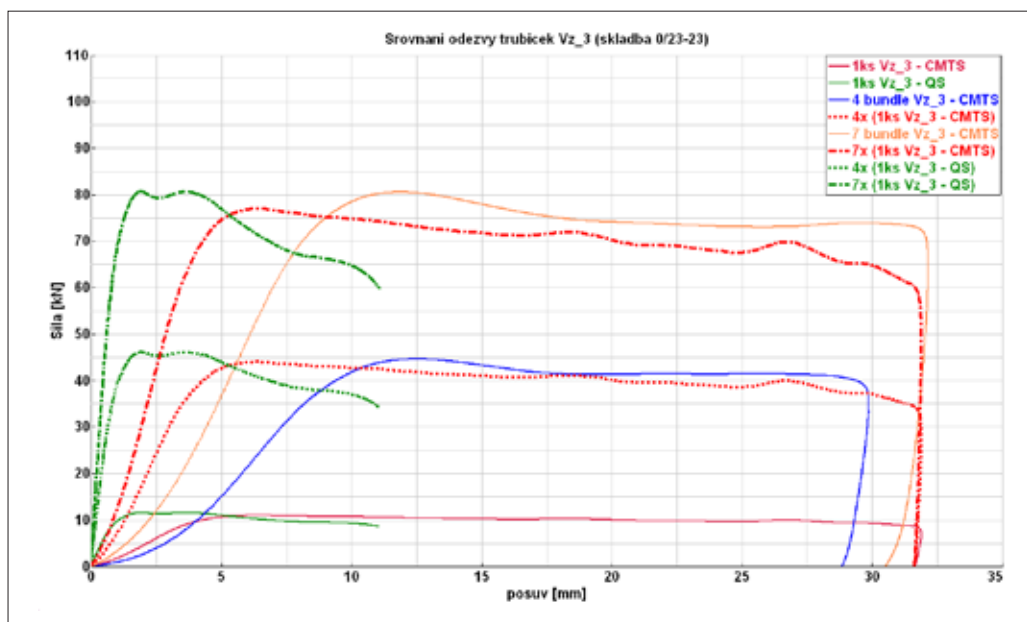
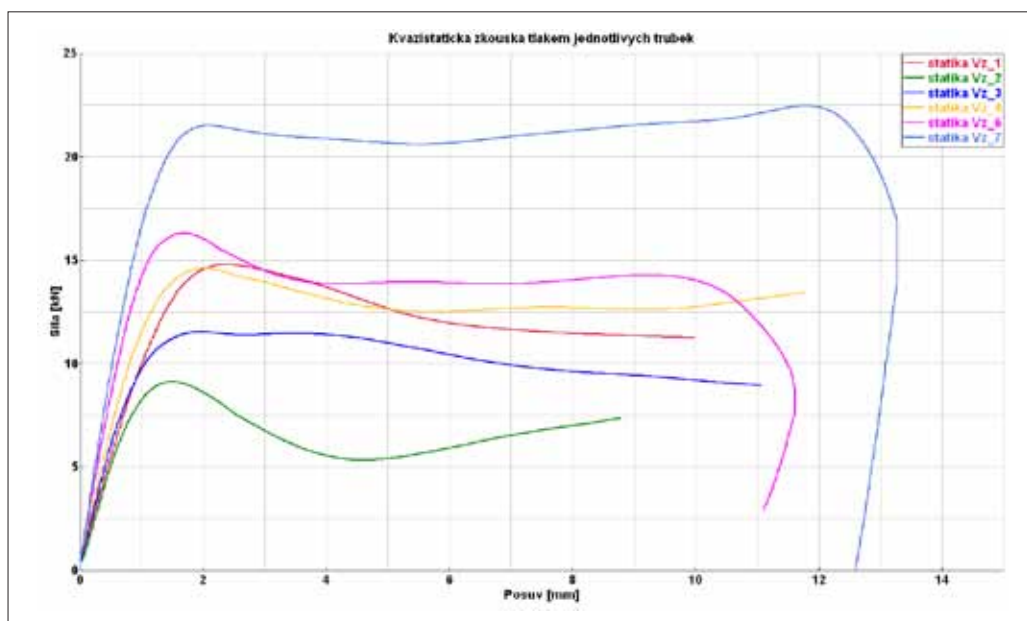
V průběhu experimentů byly snímány hodnoty síly a posuvu v závislosti na čase. Měřené signály byly v postprocesoru filtrovány filtrem CFC180. Z výsledné charakteristiky síla-posuv byly následně pro všechna tělesa vyhodnoceny následující parametry: maximální síla [kN], maximální deformace [mm], celková pohlcená energie, specifická energie pohlcená na 1mm deformace [J/mm] a u svazků trubek specifická energie pohlcená na 1mm a 1 trubku [J/mm.trubka].

Vzorek: materiál	Energie impaktu [J]
Deformační člen - 1 trubka: C/E	300
Deformační člen - 4 trubky: C/E	1000
Deformační člen - 7 trubek: C/E	2000
Vlnovec VS: E-glass/Pa6.6	500
Vlnovec VP: PP-fibres/PP	250
Vlnovec VC: C/TPU	2000

Tab. 3 - Přehled zatížení zkušebních deformačních členů pro rázové zkoušky

VÝSLEDKY ZKOUŠEK DEFORMAČNÍCH ČLENŮ

Průběhy silově-deformační odezvy testovacích vzorků byly použity pro posouzení vlivu kompozitní skladby na průběh deformační odezvy a dále pro posouzení rozdílu v odezvě na rázové a kvazi-statické tlakové zatížení, a v neposlední řadě pro posouzení rozdílu v chování termoplastových a termoplastových členů. U všech testovaných deformačních členů, s výjimkou termoplastových vzorků VS (E-glass/Pa6.6.) a VP (PP-vlákna/PP matrice), došlo k iniciaci a stabilnímu šíření porušení, které bylo tvořeno kombinací delaminace a poruchy vláken a matrice. tj. byl vyvolán požadovaný mechanismus deformačního chování pro maximalizaci absorpce energie.

Obr. 5 - Srovnání průběhů $F(u)$ pro Vz_3Obr. 6 - Závislost $F(u)$ při kvazistatické zkoušce tlakem jednotlivých trubek

Posouzení deformační odezvy na rázové a kvazistatické namáhání

Srovnání závislosti síly na posuvu $F(u)$ z jednotlivých pádových i kvazistatických zkoušek trubkových vzorků poskytuje obr. 5. V něm jsou vyneseny závislosti jednotlivých trubek a svazků. Plné křivky (zelená a červená) reprezentují průběh pro kvazistatickou a pádovou zkoušku jednotlivé trubky. Čárkované a čerchované (červená a zelená) poté tyto průběhy vynásobené 4krát, případně 7krát, tj. tyto průběhy představují idealizovaný deformační člen ze svazků trubek, jehož odezva byla vytvořena násobkem deformační charakteristiky základního deformačního prvku. Plná modrá křivka je pro pádovou zkoušku zkušebního svazku ze 4 trubek, plná oranžová křivka pro pádovou zkoušku zkušebního svazku ze 7 trubek.

Z průběhů vyplývá, že kvazistatická a pádová zkouška jednotlivé trubky dávají velmi podobné výsledky v průběhu stabilního šíření deformace. Nejvýraznější odlišnost je v počátku při iniciaci poškození. Při kvazistatickém zatěžování se trubka v prvních milimetrech posuvu jeví

tužší. Zajímavé také je, že prostým vynásobením výsledků jednotlivé trubky získáme průběhy velmi podobné jako při zkouškách svazků. Z toho vyplývá, že konkrétně pro tuto kompozitní skladbu lze výsledky jednotlivých trubek počítat.

Posouzení vlivu kompozitní skladby na deformační odezvy

Vliv skladby vrstev byl zkoušen rovněž na trubkových vzorcích. Výsledný průběh síly v závislosti na deformaci je pro stanovené varianty kompozitní skladby zobrazen na obr. 6. Z průběhů je patrné, že docházelo ke stabilnímu šíření deformace u všech skladeb kompositu. Po prudkém nárůstu reakční síly se její velikost ustálí kolem určité hodnoty. Velikost reakční síly je však výrazně závislá na kompozitní skladbě vzorku. Vzorky mající menší počet lamin (např. Vz_2, Vz_3) vykazovaly nižší tuhost. Naopak vzorky s větším počtem lamin a vláken orientovanými blízko k ose trubky (např. Vz_6, Vz_7) se jeví jako nejtuhší. Velikost síly mezi nejméně a nejvíce tuhým vzorkem je více než dvojnásobná.

Vzorek	Pádové zkoušky		Kvazistatické zkoušky	
	F_max [kN]	E_spec [J/mm]	F_max [kN]	E_spec [J/mm]
Vz_1	16,7	14,2	14,7	11,8
Vz_2	10,5	8,4	9,1	6,5
Vz_3	11,0	10,0	11,5	9,9
Vz_4	13,0	11,5	14,6	12,5
Vz_5	12,0	11,3		
Vz_6	14,9	13,1	16,5	13,5
Vz_7	20,4	18,5	22,2	20,3

Tab. 4 - Srovnání vyhodnocených parametrů pro jednotlivé trubky

Materiál	Dynamické zatížení		Kvazi-statika	
	Maximální síla [kN]	E_spec [J/mm]	E_spec [J/mm]	Maximální síla [kN]
VP	70,6	26,1	17,9	32,2
VC	186,6	76,9	98,4	156,2
VS	162,2	60,3	42	101

Tab. 5 - Porovnání termoplastických deformačních členů

V tab. 4 jsou srovnány vyhodnocené parametry experimentů jednotlivých trubek. Ze srovnání vyplývá, že kompozitní skladba má významný vliv na velikost reakční síly. Rozdíl mezi extrémními hodnotami dosahuje více než 100%. Rozdíly mezi reakčními silami v kvazistatických a pádových zkouškách pro jednotlivé kompozitní skladby nejsou příliš velké. Vliv skladby má pro oba případy zkoušek podobný vliv. V případě specifické pohlcené energie lze konstatovat podobný trend. Nejvyšší i nejnižší specifické absorpce energie bylo dosaženo v případě obou typů zkoušek u stejné skladby. Dále je z porovnání patrná závislost velikosti této energie na dosažené reakční síle a tím pádem na tuhosti samotné trubky.

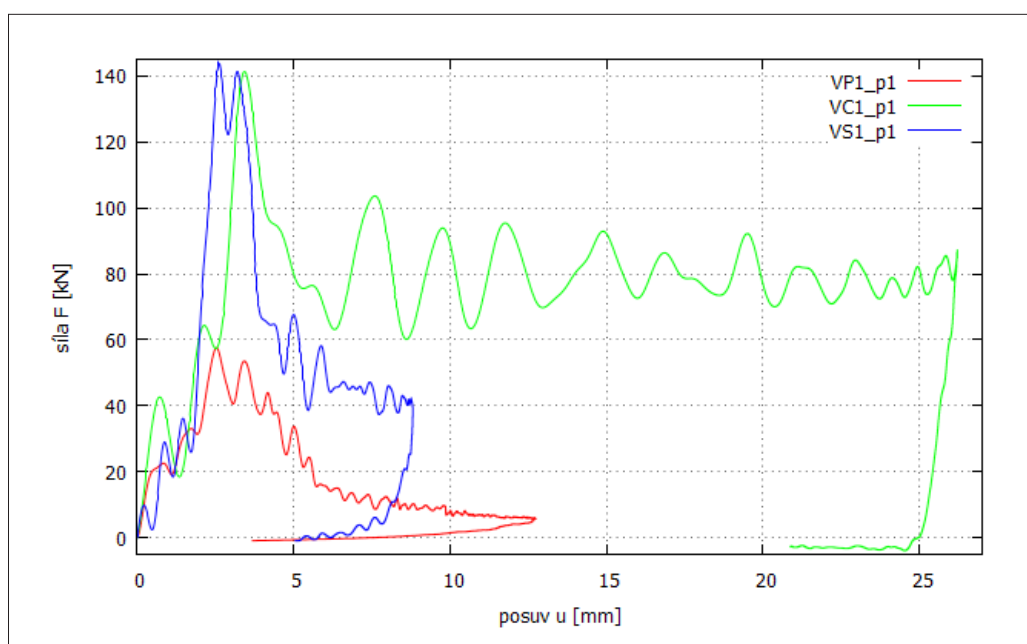
Posouzení deformační odezvy termoplastových zkušebních vzorků

Deformační odezva vlnovců z termoplastických materiálů je pro měření na padostroji zobrazena na obr. 7. Deformační odezva z kvazi-statických měření měla velmi podobný průběh. Stabilního šíření porušování bylo dosaženo pouze pro vzorek VC, tj. vzorek s matricí termoplastického polyuretanu vyztuženého uhlíkovými vlákny. U dalších dvou vzorků došlo ke ztrátě stability stěny vlnovců. Stabilní šíření se projevilo postupným borcením vzorku na jeho spodním nebo horním okraji, které bylo doprovázeno delaminací a postupným odlamováním malých částí kompozitních vrstev vzniklých drčením - viz obr. 8.

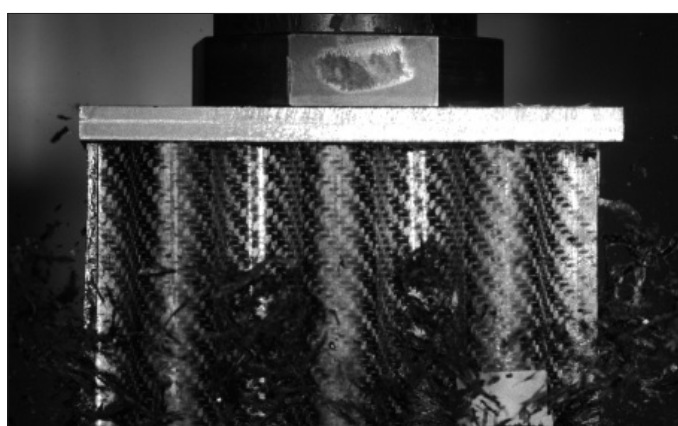
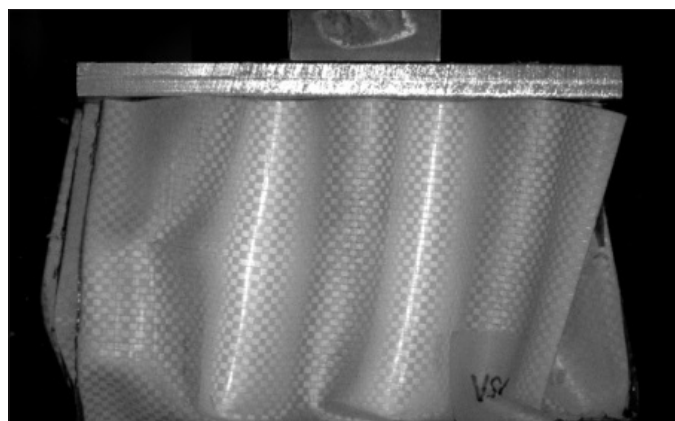
Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tab. 5. Měrná specifická energie byla zpracována z délky smluvní deformace 8 mm.

Porovnání výsledků kvazi-statických a rázových zkoušek termoplastických vlnovců ukázalo podstatně větší rozdíly v deformační odezvě, než tomu bylo u deformačních členů na bázi termosetových navíjených trubek. To bylo způsobeno u vzorku s uhlíkovou tkaninou především tím, že postupné borcení při kvazi-statické zkoušce probíhalo při síle o cca 42% vyšší než při zkoušce rázové.

Neshoda je patrná i pro zbylé dva materiály. Z uvedených výsledků je patrné, že pro zjištění odezvy termoplastových deformačních členů určených pro rázové zatížení je potřeba provedení rázových zkoušek, jelikož jejich odezva je závislá na rychlosti zatěžování.



Obr. 7 - Naměřené průběhy síly F v závislosti na posuvu u při dynamické pádové zkoušce



Obr. 8 - Deformace vlnovců během pádové zkoušky
(materiál: zleva VS, VP, VC)

Vzorek	Pádové zkoušky E_{spec} [J/mm ³]
Vz_1	0,72
Vz_2	0,47
Vz_3	0,58
Vz_4	0,54
Vz_5	0,60
Vz_6	0,57
Vz_7	0,75
VP	0,04
VC	0,11
VS	0,08

Tab. 6 - Porovnání měrné absorpce energie pro trubky z vláknových kompozitů a termoplastických vlnovců

ZÁVĚR

Bylo provedeno experimentální porovnání zkušebních deformačních členů na bázi termosetových a termoplastových vzorků. U vzorků s uhlíkovými vlákny bylo dosaženo stabilního šíření poruchy při rázovém i kvazi-statickém tlakovém zatížení, tj. bylo dosaženo nejpriznivějšího módu pro absorpci energie.

Přímé srovnání absorpčních schopností vzorků z navíjených termosetových kompozitů a z lisovaných termoplastů je uvedeno v tab. 6. Pro porovnání byla energie absorbovaná na 1 mm deformace normována ještě na plochu průřezu vzorků.

Porovnání měrné absorbované energie ukázalo, že u navržených deformačních členů z navíjených termosetových trubek bylo dosaženo podstatně vyšší efektivity ve využití materiálu než u termoplastových vlnovců. Vlivem změny natočení vrstev bylo možno ovlivnit měrnou absorpční energii v rozmezí 0,47÷0,72 J/mm³. Velmi podobných hodnot bylo dosaženo i pro deformační členy na bázi svazků trubek. Chování deformačních členů ze spojených trubek nebylo znehodnocováno poruchou spojovacích rozhraní mezi jednotlivými elementy a bylo dosaženo ustáleného šíření poruchy přes délku absorberu.

Nižší hodnoty deformačních členů vlnovce z uhlíkových vláken a termoplastické matrice lze vysvětlit poruchou spojovacího rozhraní - lepené spoje mezi 4 segmenty vlnovců. Vzorky ze skleněných nebo polypropylenových vláken se neukázaly vhodné z důvodu ztráty stability a rozlepení desek během rázového zatížení.

Výsledky prezentované v příspěvku byly podpořeny projekty MPO FR-T11/182 a FR-T11/463

Integrace kompozitních materiálů do letounu L410 - projekt INKOM

Miloslav Stündl - Aircraft Industries a.s.

Cílem projektu INKOM je, aplikací kompozitových dílů, snížení výrobních nákladů a pracnosti při montáži, snížení hmotnosti, zlepšení užitných vlastností a celkových provozních vlastností letounu L410. Inovace konstrukčních celků tohoto letounu se zaměřuje na tři oblasti, kterými jsou interiér kabiny cestujících, motorové gondoly a dveře jak nouzové, tak i vstupní společně s nákladovými.

ÚVOD

Projekt INKOM je realizován za finanční podpory MPO v rámci programu TIP. Projekt byl zahájen v únoru 2012 a bude ukončen v roce 2015.

Cílem projektu je snížení výrobních nákladů a pracnosti při montáži, snížení hmotnosti, zlepšení užitných vlastností a celkových provozních vlastností letounu L410 pomocí aplikace kompozitních materiálů do interiéru kabiny cestujících, motorových gondol a dveří. Všechny tři konstrukční části mají být dotaženy do fáze prototypu s ověřením jejich funkce při pozemních a letových zkouškách.

Výrobní náklady je možno snížit hlavně díky použití nových technologií výroby kompozitových konstrukcí. Snížení pracnosti při montáži těchto nových částí letounu se předpokládá dosáhnout především zvýšením opakovatelnosti rozměrů a tvarů vyráběných dílů a jejich konstrukčním návrhem, který bude respektovat postup montáže a lícování dílů na letounu.

Aircraft Industries výrobce letounů řady L410 má v projektu pozici řešitele. Vedoucím projektu je Miloslav Stündl. Jeho hlavním úkolem je specifikovat zadání jednotlivých úkolů a koordinovat práci spoluřešitelů. Al dále na základě designové studie provádí konstrukční práce a přípravu výkresové dokumentace interiérových panelů.

Firmy Evekter a 5M jsou spoluřešiteli úkolu modernizace interiéru kabiny cestujících. Evekter zde provedl "Designovou studii interiéru", která je základem pro další konstrukční práce na nových kompozitových panelech a dalších částech vybavení kabiny cestujících. 5M zajišťuje výzkum a vývoj na poli nových materiálů a lepidel pro letecké použití. Dále zkoumá způsoby skladby materiálů s ohledem na co nejefektivnější tlumící vlastnosti interiérových panelů. Jeho úkolem je v závěru příprava technologie výroby a výroba samotná.

VZLÚ a Evekter spolupracují na modernizaci motorových gondol. VZLÚ má za úkol provést "Aerodynamickou optimalizaci", která je podkladem dalších prací na konstrukci nových kompozitových motorových gondol. Dále provádí výzkum a vývoj v oblasti materiálů a jejich skladby. Bude zajišťovat také technologii a výrobu prototypových gondol. Evekter je pověřen konstrukčními pracemi a zpracováním dokumentace pro výrobu.

LA composite provádí kompletní řešení úkolu modernizace dveří. Od výběru vhodných materiálů a jejich skladby, přes konstrukční práce, přípravu výroby, až po výrobu prototypových sad dveří.

V průběhu prvních měsíců trvání projektu probíhaly schůzky mezi vedoucím projektu a jednotlivými účastníky za účelem stanovení celkové filozofie projektu, náplně technických zadání, stanovení nejbližších úkolů

a doladění harmonogramů prací. Byla stanovena hlavní kritéria a rozsah prací pro splnění úkolů v jednotlivých oblastech, tj. snížení hmotnosti budoucích nových konstrukčních částí, snížení jejich výrobních nákladů a zlepšení užitných vlastností.

Do konce roku 2012 byly v souladu s harmonogramem prací provedeny a dokončeny některé dílčí úkoly, jako třeba "Designová studie", "Příprava referenčních ploch" v rámci interiéru kabiny a "Aerodynamická optimalizace" spolu s "Výběrem a zkouškami materiálů" v úkolech modernizace dveří a motorových gondol.

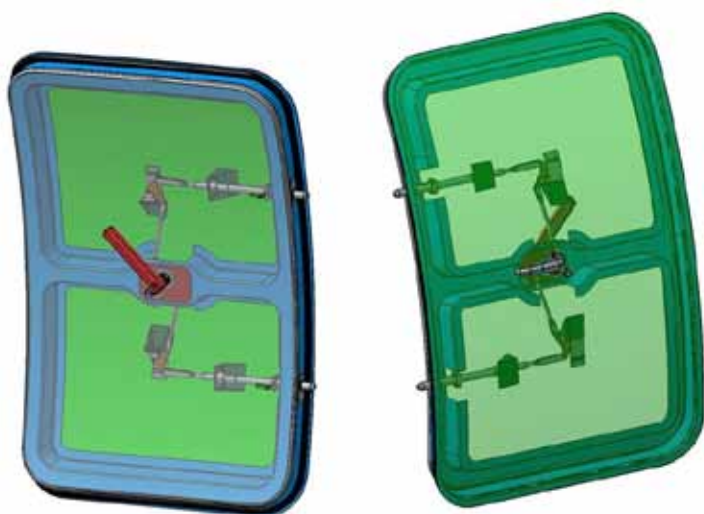
MODERNIZACE DVEŘÍ

LA composite zastoupená Ing. Petrem Průchou se od začátku zodpovědně zhostila plnění svých úkolů. Začala zpracovávat výběr a zkoušky materiálů pro stanovení nevhodnějších materiálů, jejich skladby, technologií a konstrukčního provedení. Pro tato rozhodnutí byla nejdříve prozkoumána stávající celokovová konstrukce dveří a jejich mechanismů zavírání a zamykání. Mechanismy jsou, až na přední nouzové dveře (obr. 2), modifikovány. U nouzových dveří v kabině cestujících (obr. 1) byla zapuštěna klika do vnitřního obrysu dveří v souladu s designovým návrhem a vnější klika byla zapuštěna do obrysu trupu s ohledem na estetiku povrchu letounu a v menší míře i z hlediska aerodynamiky. Dále byly naskenovány jak dveře, tak rámy dveří v trupu letounu pro porovnání výrobních tolerancí a teoretických ploch. Vzhledem k tomu, že naskenovaná data dveří a rámu obsahují statisíce bodů, bylo nutné vytvořit program, který umožňuje filtrovat body z naměřených dat podle různých kritérií. Tímto výběrem bylo možné významně redukovat počet bodů a s jejich využitím vymodelovat nové tvořící plochy dveří. V současné době se také zpracovávají data pro rozbory a porovnání hmotností a výrobních nákladů. Ke snížení hmotnosti dojde zejména u nouzových a nákladových dveří, kde základní konstrukční řešení bude převedeno z celokovového na kompozitové. Vstupní dveře (obr. 3) doznají zásadní změny v tom, že budou rozděleny na horní a dolní část. V dolní části budou integrovány nástupní schody. Tím jejich hmotnost v celku stoupne, ale bude vyvážena zrušením stávajících schůdků a jejich úložného prostoru v kabině cestujících.

Tyto změny jsou provedeny jak z důvodů uživatelských, tak s ohledem na celkové vnitřní uspořádání interiéru kabiny v souladu s "Designovou studií". U této části projektu se dají předpokládat vyvážené výsledky v úspoře hmotnosti, snížení výrobních nákladů a zvýšení užitečných vlastností.



Obr. 1 - Konstruktivní řešení kompozitových nouzových dveří v kabině cestujících



Obr. 2 - Konstruktivní řešení kompozitových nouzových dveří v kabině pilotů



Obr. 3 - Konstruktivní řešení kompozitových vstupních a nákladových dveří

MODERNIZACE MOTOROVÝCH GONDOL

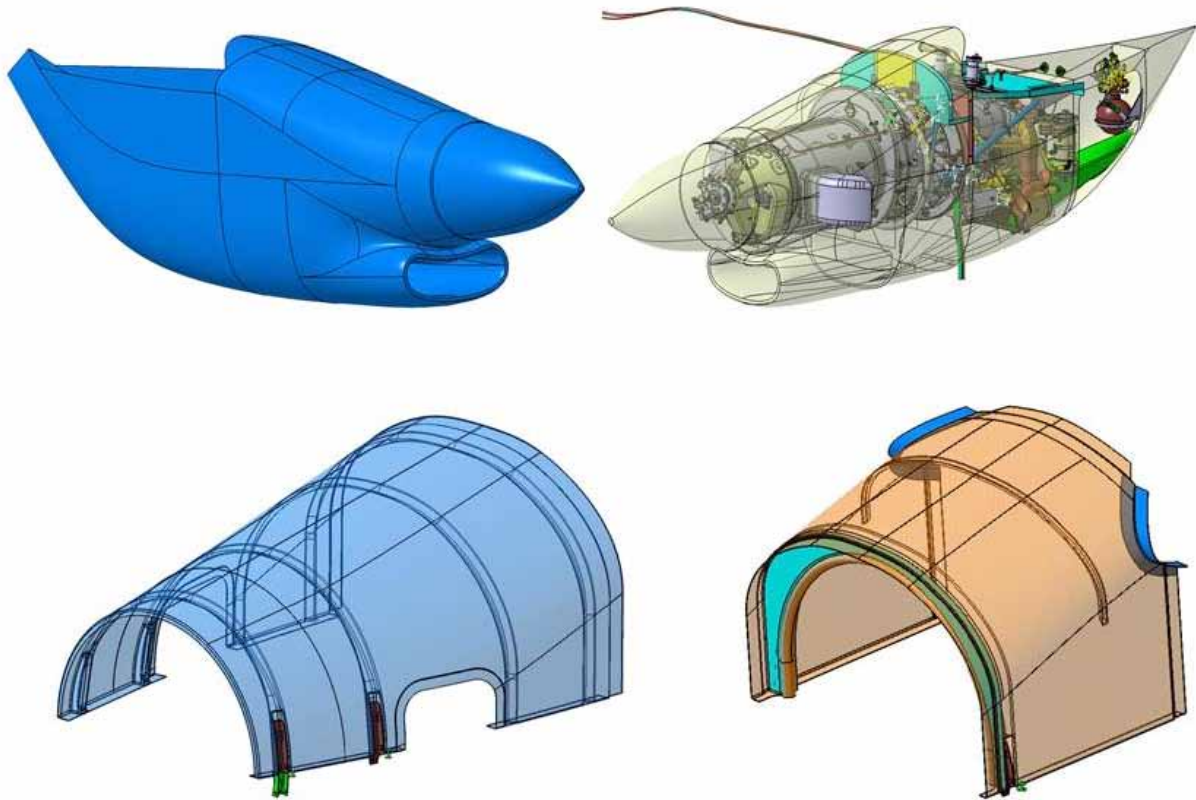
VZLÚ ve spolupráci s Evektořem mají za úkol modernizaci motorových gondol. Vedoucím úkolu ve VZLÚ je Ing. V. Pompe. Prvním vývojovým krokem bylo provedení aerodynamické optimalizace vnějších a vnitřních ploch motorových gondol, kterého se zhostil Ing. V. Hanzal. Vnější plochy byly upravovány s ohledem na celkový aerodynamický odpor motorových gondol tak, aby se zmenšil čelní průřez a zlepšilo se obtékání jak gondol samotných, tak i nosníku vztlakových klapek. Ten se v současném provedení nachází poblíž povrchu motorové gondoly a výrazně ovlivňuje její samotné obtékání. Z tohoto důvodu došlo při optimalizaci gondoly k výrazné změně tvaru v její odtokové části. Přední část gondoly doznala výrazné změny hlavně v oblasti vstupního kanálu vzduchu do motoru. Byl natočen do směru vrtulového proudu vzduchu, což zlepší plnění motoru a umožní lépe využít jeho výkon. Celkově byl také změněn čelní průřez a to jak do velikosti tak i tvarově. Obě úpravy sníží celkový aerodynamický odpor gondol. Vnitřní plochy doznají změny v oblasti kanálu vzduchu plnění motoru, plnicí komory, odmrazovací klapky, výstupu vzduchu za odmrazovací klapkou, vstupu a výstupu vzduchu z olejového chladiče. Nové řešení bude naprosto odlišné od stávajícího. Dojde k úplnému oddělení vstupu do chladiče pomocí NACA vstupu a novému provedení výstupu z chladiče bez regulační klapky. Ing. B. Cabrnach (VZLÚ) dále ve spolupráci s Evektořem připravuje technologii a výrobu prvních prototypů a zabývá se výběrem a zkouškami materiálů použitelných hlavně z hlediska vysokých provozních teplot v motorovém prostoru.

Pan ing. M. Gořalík z Evektořu pod vedením Ing. V. Černého a ve spolupráci s VZLÚ zpracovává konstruktivní řešení, 3D data a výrobní dokumentaci. Vše je navrhováno tak, aby byla v co největší míře zachována stávající zástavba motoru a dalších systémů zde umístěných. Také bylo rozhodnuto zachovat strukturu dělení motorové gondoly, co se týká jejich krytů, pevných a odnímatelných částí s ohledem na dobré zkušenosti z provozu.

Nejvýraznější se u této části projektu jeví úspora na výrobních nákladech a snížená spotřeba paliva vlivem lepší aerodynamiky. Hmotnost nových kompozitových motorových gondol by neměla přesáhnout hmotnost nynějších celokovových. V rámci toho se revidují použité materiály a komponenty použité pro vybavení gondol.

MODERNIZACE VYBAVENÍ INTERIÉRU KABINY CESTUJÍCÍCH

Modernizace kabiny cestujících byla zahájena designovou studií, kterou provedli Ing. F. Plešinger a Ing. M. Křivan pod vedením Ing. V. Černého v Evektořu. Studie řeší celkové uspořádání a vzhled prostoru kabiny cestujících. Splnila požadavky obchodního oddělení AI na moderní designové pojetí, zlepšení ergonomie a naznačila další konstruktivní a technologická zlepšení vybavení interiéru, proto byla po náročných jednáních schválena zástupci AI a uvolněna k zpracování konkrétního konstruktivního řešení. K tomuto návrhu se zejména vyjadřovalo obchodní oddělení zastoupené panem Kožíškem, který zohledňoval i přání současných zákazníků. Panem K. Urbánkem (Evektor) byly zpracovány 3D referenční plochy, kterými se řídí celá tvorba konstruktivních a výrobních dat pro přípravu výroby interiérových panelů v 5M a vnitřních ploch dveří v LA composite. Pan Urbánek se již dříve podílel na vývoji současného interiéru letounu L410 a mohl proto uplatnit své znalosti a zkušenosti v této oblasti.



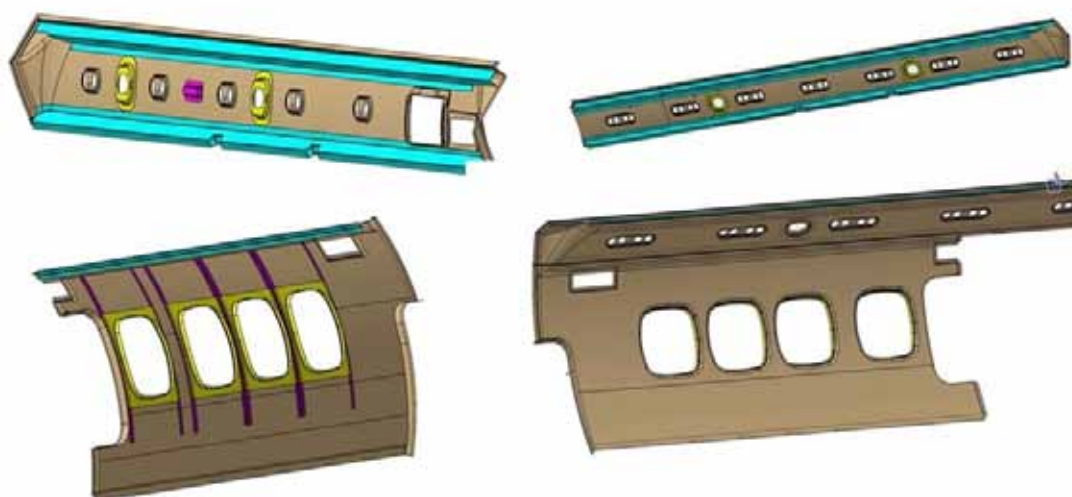
Obr. 4 - Optimalizované plochy, řešení zástavby a konstrukční řešení kompozitových krytů motorových gondol



Obr. 5 - Řešení vnitřní plochy vstupních a nákladových dveří spolu s interiérovými panely



Obr. 6 - Celkové řešení interiérových panelů



Obr. 7 - Konstrukční řešení kompozitových interiérových panelů

V 5M pod vedením Ing. R. Straky probíhá příprava technologie výroby první prototypové sady interiérových panelů. Zároveň 5M pracuje na vývoji nového laminačního systému vhodného pro použití v letectví. Cílem nově vyvíjeného laminačního systému je uplatnění nejen v letectví, ale i v dalších odvětvích, kde jsou na finální produkt kladeny specifické nároky. V rámci projektu je dále řešena otázka vývoje a návrhu skladby materiálů pro zvýšení útlumových vlastností panelů z hlediska snížení hluku uvnitř kabiny. Za tímto účelem byly studovány podklady o dřívějším měření hluku na letounech L410 a L610 v AI. Zároveň jsou v plánu vlastní měření hluku akustickou kamerou na letounu L410 s novými motory a vrtulí. Z naměřených parametrů budou určena hluková pole, která naznačí optimální rozložení útlumových materiálů v ploše panelů vzhledem ke zdroji hluku (vrtule). Tato měření byla plánována již na rok 2012, ale bohužel se zatím neuskutečnila, neboť nebyl k dispozici letoun v potřebné konfiguraci. V rámci plnění úkolu snížení hluku v kabině byla v 5M připravena řada vzorků panelů a v součinnosti s VZLÚ byla provedena porovnávací akustická měření s panely stávajícími. U této konstrukční části se opět předpokládá, že celková hmotnost panelů nepřekročí hmotnost panelů stáva-

jících. Hmotnost ušetřená díky novým technologiím bude investována do zlepšení útlumových vlastností, takže s žádnou větší úsporou hmotnosti se nepočítá. Zde bude největším efektem výrazná změna designu prostoru cestujících, úspora výrobních nákladů a zvýšení komfortu v kabině cestujících.

ZÁVĚR

Řešení projektu má za sebou pouze jeden rok. Práce probíhají převážně dle harmonogramu. Dosud dosažené výsledky projektu ukazují, že rozhodnutí o modernizaci letounu L410 pomocí kompozitních materiálů bylo správné. Jejím přínosem bude zvýšení atraktivity letounu na trhu a to jak z pohledu moderního interiéru kabiny, tak i z hlediska užitných parametrů letounu.

Projekt INKOM - Integrace kompozitních materiálů do konstrukce malého dopravního letounu č. FR-T14/543 je řešen za podpory MPO v rámci programu TIP.

Využití kompozitních materiálů v konstrukci UL letounu Atec 321 Faeta

Petr Volejník - pilot, konstruktér a majitel firmy ATEC v.o.s., Libice n.C.

Firma ATEC byla založena před více než 20 lety. Již od počátku je jejím primárním výrobním programem výroba ultralehkých letadel za pomoci dřeva a kompozitu. První typy letounů vycházely z konstrukční kanceláře Ing. Oldřicha Olšanského. Během dvacetiletého vývoje letadel Atec postupně docházelo k zvětšování podílu kompozitu v jejich konstrukcích, až u prozatím posledního, vlastního typu s názvem Atec 321 Faeta, nahradily už kompozity téměř veškeré díly. Přesto je stopa po původní dřevěné konstrukci dodnes patrná. Naše technologie zpracování kompozitu vychází z požadavků trhu. Konstrukce musí být bezpečná, snadno kontrolovatelná a laikem udržovatelná, cenově dostupná a lehká tak, aby vyhovovala přísným váhovým limitům kategorie UL. Proto přistupujeme ke každému jejímu dílu individuálně a hledáme optimální konstrukci a technologii, která bude nejvýhodnější pro dosažení požadovaných parametrů. Tento příspěvek popisuje konstrukční a technologická řešení kompozitových dílů v konstrukci UL letounu ATEC 321 Faeta.

Z HISTORIE VÝROBCE

Společnost ATEC v.o.s byla založena v roce 1992 za účelem výroby UL letadel. První naše kroky byly spojeny s legendárním konstruktérem Ing. Olšanským. Spolupracovali jsme jako subdodavatelé křídel a ocasních ploch pro UL JORA a CORA. Vzájemná spolupráce vyústila ve společný projekt prvního sériově vyráběného samonosného dolnoplošného UL letounu v ČR - Zephyra. Po tragické smrti Ing. Olšanského jsme pokračovali v jeho konstrukční filozofii kompozitového trupu a křídel s dřevěným nosníkem a laminátovým potahem.

Dnes má firma 22 zaměstnanců a produkuje 2 UL letouny měsíčně. Za svou historii vyrobila 380 letadel, která létají v mnoha zemích světa, což klade značné nároky na splnění všech požadavků při provozu v rozdílných klimatických podmínkách.

V rámci udržení minimálních nákladů na vývoj a výrobu bylo k vývoji Faety přistupováno s kompromisem, a tak vznikl i model o konstrukční vzletové hmotnosti 550 kg pro tehdy nově vznikající kategorii LSA a současně i pro kategorii UL. Při udržení nízké prázdné hmotnosti, která za dodržení minimální výbavy a komfortu posádky může být již od 263 kg, je užitečné zatížení pro kategorii LSA až 287 kg. Bonusem pro kategorii UL je nízká pádová rychlost. Při ploše křídla 10,1m² a velmi účinné štěrbínové klapce je pádová rychlost v přistávací konfiguraci jen 59 km/h.

KONSTRUKCE

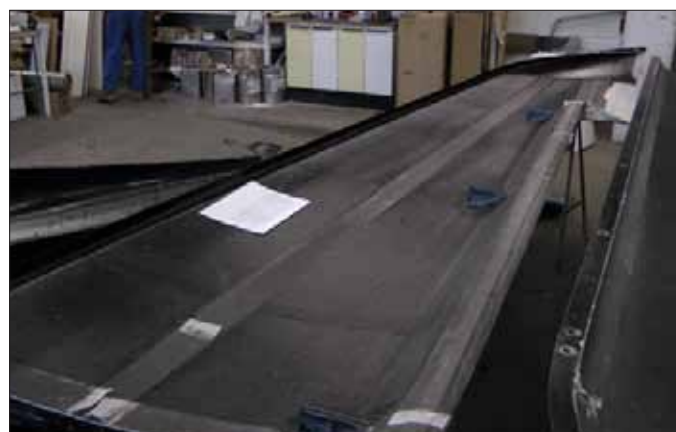
Idea

Konstrukční uspořádání letounu vychází z požadavku umístit posádku maximálně do těžiště tak, aby změnou hmotnosti posádky, která tvoří až 40% vzletové hmotnosti, docházelo k minimálnímu ovlivňování centráže letounu. Abychom zbytečně nezvětšovali průřez trupu, bylo nutné umístit centroplán křídel před sedačky pilotů a křídly dát kladný šíp. Tak

bylo možné piloty umístit do těžiště letounu pod obrys profilu křídel. Toto řešení však značně zkomplikovalo obvyklé řešení průběžných krakorců. Proto jsme křídla spojily ocelovým centroplánem a použily konstrukci dřevěného hlavního nosníku s ocelovým kováním. Použití nosníku s kompozitovými pásnicemi jsme zavrhlí z důvodu problematického spojení relativně malé uhlíkové pásnice s mohutným ocelovým kováním, které musí být schopno přenést sílu až 138.600 N.

Křídla

Konstrukce křídla je jedonosníková s jedním dřevěným nosníkem z jednosměrného vrstveného buku. Potah je tvořen uhlíkovým sendvičem, který je ještě vyztužen pomocnými žebry. Kořenové žebro, které vynáší přes kulové čepy do trupu posouvající sílu a klopný moment, je vyrobeno ze zdvojeného sendviče z uhlíkové tkaniny a nomexové voštiny tloušťky 10 mm.



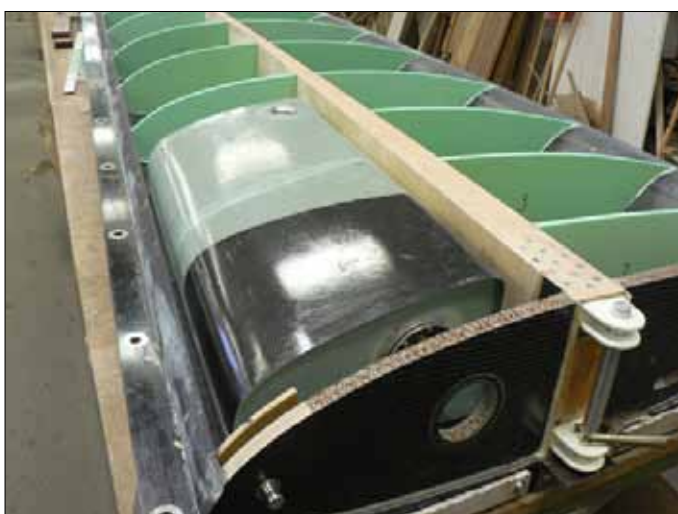
Obr. 1 - Potah křídla s kapsami pro závěsy vztlačové klapky

Takto vyrobené žebro má vysokou míru stability a pevnosti. Navíc je v porovnání s překližkovým žebrem o 25% lehčí. V místech, kde jsou upevněna pouzdra kulových čepů, je překližková výztuž, která dobře rozvádí osamělé síly do plochy žebra. Uhlíkový potah je tvořen sendvičem z pikamatu tloušťky 1,2 mm a po laminování vytváří sendvič tlustý pouze 2 mm. Takto tenký sendvič není sám schopný přenést krut křídla, a proto je vyztužen žebry z Herexu tl. 10 mm. Optimalizace rozmístění žebor byla provedena po zatížení křídla na maximální krut. V potahu jsou vylaminovány kapsy, do kterých jsou následně zalepeny laminátové závěsy vztlakové klapky.

Díky této konstrukci křídla byla dosažena hmotnost kompletního polokřídla včetně vztlakových klapok a křídélek pouze 32,5 kg. Tato konstrukce je velmi odolná flutteru, což prokázaly pozemní frekvenční zkoušky provedené na ČVUT v Praze.



Obr. 4 - Ovládání a závěs vztlakové klapky.



Obr. 2 - Konstrukce křídla s kořenovým sendvičovým žebrem.

Vztlaková klapka

Štěrbínová vztlaková klapka je vyrobena ze skelné tkaniny a sendviče, tvořeného nomexovou voštinou tl. 2 mm. Ovládací závěs je integrální součástí potahu a je laminovaný zároveň při jeho výrobě. Toto řešení nezvyšuje hmotnost konstrukce a optimálně zavádí sílu od ovládání do konstrukce. Závěs klapky je též laminátový a oba kusy spolu v zavřeném stavu tvoří jeden aerodynamický celek. Slep v náběžné části vztlakové klapky je proveden na laminátovou punčochu, která kromě slepu vlastního vytváří i torzně tuhé těleso.



Obr. 3 - Laminace potahu vztlakové klapky

Křídélka

Křídélko je svou konstrukcí podobné vztlakové klapce. I zde je použita skelná tkanina s nomexovou voštinou o tloušťce 2 mm. Potah je v náběžné části vyztužen uhlíkovou tkaninou a podepřen žebry. Slep je vytvořen na vnější lem a současně vytěsňuje prostor mezi křídélkem a pomocným nosníkem. Křídélko není tradičně zavěšeno na pomocný nosník, ale do boční stěny oddělující křídélko od vztlakové klapky. Tuhý kotevní bod vznikl pouhým vyztužením této stěny a nebylo tedy třeba vytvářet další kotevní místa. Na konci je křídélko uloženo do vyztuženého žebra koncového oblouku. Ovládací "kování" je celé z uhlíkového kompozitu, tudíž je výrazně lehčí než klasické kovové. Hmotnost křídélka je tak pouhých 1060 g. Nespornou výhodou takto lehkých křídélek je, že není nutné další zvyšování hmotnosti z důvodu statického vyvažování. Závěsový moment je tak pouze 16 N/m.



Obr. 5 - Nalaminovaný sendvič s nomexovou voštinou křídélka

Trup

Trup je koncipován jako vyztužená kompozitová skořepina. Jako výztuhy jsou zde použity olaminované púlené mitalonové trubky, které slouží jako velmi lehké "ztracené bednění". Rozmístění těchto výztuh bylo upraveno dle místních poruch při pevnostních zkouškách trupu.

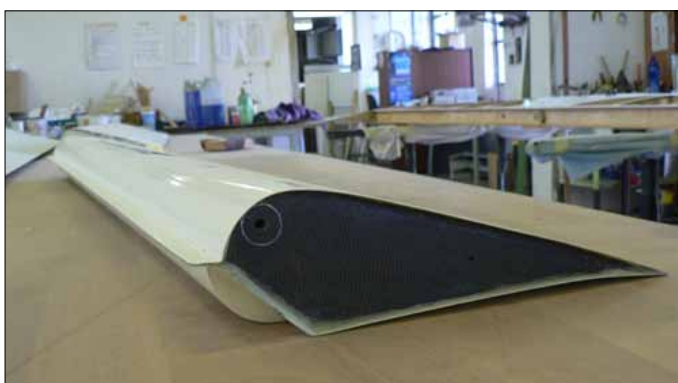
Tato konstrukce je velmi odolná, dobře opravitelná a odolává i neopatrné manipulaci při hangárování. Snadno se řeší vyvedení osamocených sil od křidel, ocasních ploch a podvozku.



Obr. 6 - Ovládací uhlíkový závěs křídélka



Obr. 9 - Steven vyrobený z uhlíkového kompozitu a herexu



Obr. 7 - Křídélko po slepení. Slep na vnější lem, který současně zatěsňuje štěrbinu

Ocasní plochy

Svislá ocasní plocha je integrální součástí trupu. Kormidlo má obdobnou konstrukci jako všechny řídicí plochy. Je to uhlíkový sendvič s nomexovou voštinou. Uchycení společně s ovládáním je řešeno tak, že v kormidle je vytvořeno uložení pro závěs ve tvaru U a ten je zajištěn pomocí dvou šroubů, které současně tvoří i ovládací čepy. Proti vytržení je v místech ovládacích šroubů zalaminována duralová vložka ve tvaru U. Viz obrázek níže.

Stabilizátor vodorovné ocasní plochy je celý z uhlíkového kompozitu. Hlavní nosník je průběžný uhlíkový sendvič s pásnicemi tvořenými z uhlíkového rovingu. Jako u kormidel i zde je potahem uhlíkový sendvič z nomexové voštiny. Hmotnost stabilizátoru je pouhých 4,1 kg a zatížení výškovky při pevnostních zkouškách bylo 460 kg.

Kormidlo VOP je opět stejné konstrukce sendviče s nomexovou voštinou. Slep náběžné části kormidla je proveden na "punčochu", která zvyšuje torzní tuhost kormidla.

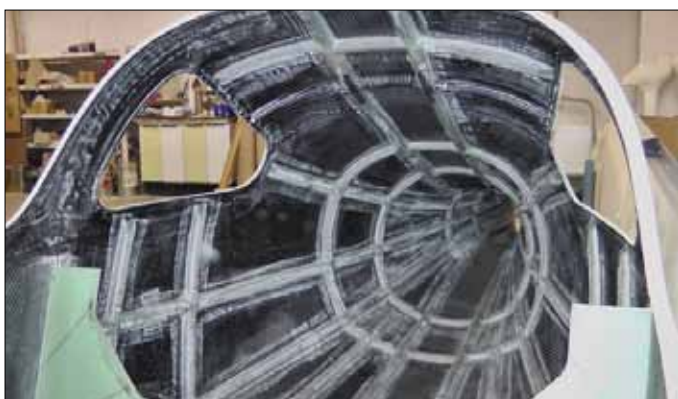
Ohybový moment křídel přenáší ocelový centroplán. Posouvající síla a krut je zaveden do trupu pomocí dvou kulových čepů. Distribuce sil je řešena pomocí překližkových výztuží a polozeber. Překližka se s kompozitovou konstrukcí dobře pojí a díky svým příznivým mechanickým vlastnostem do ní dobře rozvádí osamocené síly.

Motorová přepážka je vyrobena ze sendviče tvořeného uhlíkovou tkaninou a nomexovou voštinou tl. 10mm. Po vyplnění prostoru v nomexové voštině zahuštěnou epoxidovou pryskyřicí vznikají pevné body pro uchycení motorového lože a příďového podvozku. Hmotnostní úspora oproti překližkové přepážce je 0,7kg.

Vodorovná ocasní plocha v uspořádání do "T" je přichycena k trupu přes ocelové kování do stěvu směrovky. Steven je vyroben jako uhlíkový sendvič a v místě uchycení kování je sendvičová pěna nahrazena bukovou vložkou.



Obr. 10 - Závěs a ovládací směrového kormidla



Obr. 8 - Soustava výztuží v trupu



Obr. 11 - Konstrukce VOP před zavřením horního potahu

Podvozek

Podvozek je pevný, tříkolový s říditelným předovým kolem. Hlavní podvozek je tvořen kompozitovou pružinou. Pro zajištění dostatečné pružnosti je podvozková noha navržena s malou tloušťkou tak, aby mohly uhlíkové pásnice dostatečně pružit. Slep je skleněný a taktéž zaručuje dostatečnou pružnost konstrukce. Podvozek je dutý a vypěněný epoxidovou pryskyřicí proti zborcení.

Podvozek je do trupu zasunut v překližkovém kaslíku a reakce je zachycena do koutu přechodu mezi spodní částí trupu a kořenovým žebrem, které svým tvarem tvoří dostatečně stabilní plochu pro distribuci sil. Na druhé straně je podvozek zachycen do šikmé překližkové bočnice, která rozvádí síly od podvozku do dostatečně velké plochy. Bočnice je následně po obvodu prolaminována do stěn trupu.

Předový podvozek je laminátový, ze skelného laminátu a uhlíkových výtuzí. Hlavní trubku podvozku tvoří laminátová punčocha a v místě největšího ohybového momentu je zalaminován ocelový převlek. Kolo je uchyceno přímo v nosné laminátové vidlici, která je součástí aerodynamického krytu kola. Integrací předového podvozku do jednoho celku byla značně ušetřena jeho hmotnost a zjednodušena pracnost jeho výroby.

Použití uhlíkového kompozitu na hlavním i předovém podvozku se z důvodu malé pružnosti neosvědčilo.



Obr. 12 - Vnitřní konstrukce trupu v prostoru kabiny před přelaminováním bočních žebér zachycujících síly od hlavního podvozku



Obr. 13 - Předový podvozek před slepením obou polovin

POUŽITÉ TECHNOLOGIE A MATERIÁLY

Idea

Naší ideou při návrhu technologie je udržení vysoké míry bezpečnosti, zaručení snadné a kontrolovatelné opakovatelnosti výroby při dodržení nízké hmotnosti a ceny výrobku.

Laminační postupy

Většina dílů je vyráběna v negativních laminátových formách. Po separaci a nanesení bílého gelcoatu T35 jsou dle předem připravených stříhů kladeny do forem jednotlivé vrstvy tkanin dle technologického plánu a syceny epoxidovou pryskyřicí GMS 285. Používáme výhradně kontaktní laminaci. Teplotní stabilizaci provádíme u již hotových celků ve stříkacím boxu před závěrečnou povrchovou úpravou.

Mezi sendvičovými materiály se nám nejlépe osvědčila nomexová voština, kterou lze zpracovávat bez použití vakuování, a s kterou dosahujeme nižších hmotností a vyšší stability výsledného sendviče než za použití pěny. Nomexový sendvič také dobře odolává vibracím a nemá tendenci k odlupování.

Spojování polovin dílů se liší dle konstrukčních požadavků. Tam, kde je ke spoji přístup, se pro spojení obou polovin forem, jako např. trup, běžně používá přelaminování páskem o stejné pevnosti jako spojované skořepiny.

Aby nevznikal v místě spoje vrub, jsou jednotlivé vrstvy postupně uskakovány směrem od dělicí roviny do plochy. V místech, kde bude probíhat další lepení až po vytvrzení prvního operačního cyklu, je použita strhávací páska. Lepící plocha je tak až do odstranění strhávací pásky dobře chráněna před mastnotou a prachem a vytváří vysoce adhezní povrch pro další lepení.

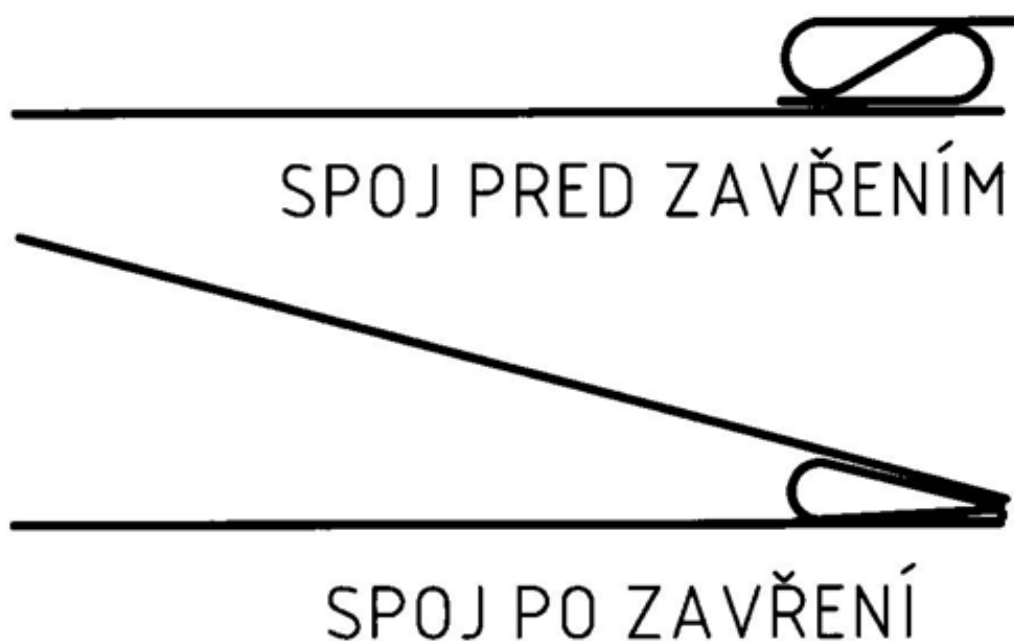
Křídla jsou v náběžné části slepována na široký lem. Pro lepení používáme epoxidové lepidlo Araldit 2011(AW 106 + HV953U), které dosahuje vysoké stříhové a adhezní pevnosti a spoj je přitom dostatečně houževnatý.

Pro lepení žebér z Herexu používáme epoxidovou pryskyřici s vypěňovačem DY 5054, který dokáže zvětšit objem pryskyřice o 100 až 300% dle přimíchaného množství vypěňovače. Tím je zaručeno přilepení žebér po celé jejich ploše. Pevnost takto napěněného epoxidu stále značně převyšuje pevnost samotných pěnových žebér.

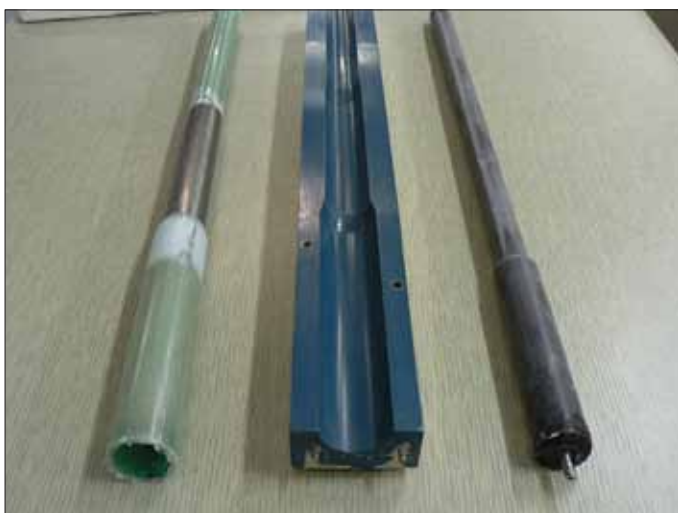
Slepování odtokových hran se provádí na "ruličku" skelného pásku ve tvaru "S". Tím je odtoková hrana ostrá, tvarově zpevněná, houževnatá a lehčí než slep na "epoxidovou pastu". Princip tohoto slepu je patrný na obrázku níže.

Laminátová trubka předového podvozku je vyráběna tak, že jsou na její jádro kladeny předsycené vrstvy jednosměrného skla v kombinaci se skleněnou punčochou. Nakonec se navlékne ocelový převlek a vše se zavře do dělené formy. Poté se do jádra, přes které je navlečena gumová duše, pustí tlak a vznikne tak otisk vnější formy přesných kruhových rozměrů. Takto vyrobená trubka se zavře do obou polovin předového podvozku.

Hlavní podvozek je vyráběn obdobně. Nejprve se do obou polovin formy nalaminují nosné pásnice, poté se na nafukovací pytl ještě za mokra vytvoří centrální spoj a po zavření formy se pytel nafoukne, čímž zaručí přilehnutí spojovacích skladeb k pásnicím. Po vytvrzení se pytel odstraní a dutina se vyplní vypěněným epoxidem.



Obr. 14 - Schéma provedení spoje na odtokových hranách



Obr. 15 - Polovina formy, nafukovací trn a vlastní laminátová trubka příďového podvozku



Obr. 16 - Řez nohou hlavního podvozku v místě uchycení v trupu

ZÁVĚR

Díky výše popsaným jednoduchým konstrukčním a technologickým řešením se nám podařilo vyrobit ultralehké letadlo, které je dostatečně bezpečné, splňuje přísné váhové limity kategorie UL letadel a je cenově dostupné širokému okruhu příznivců létání. Konstrukční a technologickou odolnost konstrukce v provozu máme ověřenou v letecké škole Fly for Fun na letišti Sazená. Celkem 5 provozovaných letounů má dohromady nalétáno 30 tisíc letových hodin, přičemž jednotlivé letouny mají nálety přes 6 tisíc hodin a 70 tisíc vzletů a přistání v náročném provozu letecké školy. Toto jsou zároveň i nejlepší testy, jež potvrdily správný směr naší cesty a podpořily nás v pokračování této sofistikované filozofie konstrukce a dalšího vývoje a výroby našich letadel.

Kompozitní centrum Aero Vodochody

Pavel Kocour - Aero Vodochody a.s.

Aero Vodochody a.s. se zabývá kompozity již od konce 70. let minulého století. Hlavním zaměřením byl vývoj a podpora vlastní výroby, postupně dochází k rozšíření kapacity o sériovou výrobu kompozitů pro stávající zákazníky firmy.

HISTORIE KOMPOZITŮ V AERU VODOCHODY

ÚVOD

Kompozitové materiály se rozšiřují v letectví zhruba od 60tých let minulého století a dnes je bez nich letectví prakticky nepředstavitelné.

V České republice a potažmo v AERO Vodochody se tato technická disciplína systematicky rozvíjí od druhé poloviny 70tých let 20. století. Začátky byly složité, kdy bylo nutno začít z důvodu nemožnosti zajistit informace a získat materiály a know-how z tehdy západního světa s vývojem vlastních materiálových systémů a výzkumem v této oblasti. Vznikla tak rozsáhlá spolupráce v rámci tehdy státních výzkumných organizací a průmyslu. Odborná skupina v AERO postupně přecházela na řešení specifických problémů spojených s vývojem v 80tých letech zahájeného projektu L-39MS. Bylo vyvinuto prodloužení vzduchového kanálu, kdy kompozitové řešení jediné mohlo zaručit odolnost této části konstrukce proti akustickému zatížení od motoru DV-2, stejně tak kovová konstrukce přední části kanálu musela být vyztužena kompozitovou výstelkou. Mimo této unikátní primární kompozitové konstrukce, která je do dnešních dnů v provozu, bylo na letounu L-39MS/59 použito konstrukční lepení kovových částí křídla a zadní části trupu a další drobné sekundární díly – kryty. Změny po roce 1989 přinesly AERO zásadní odbočkové potíže, na druhou stranu otevřely přístup k novým materiálům, technologiím a mezinárodní spolupráci se západními zeměmi. Z toho vycházel i vývoj kompozitových řešení pro po roce 1990 zahajovaných projektů nových letadel AERO – L-139, L-159 a Ae-270. Pro L-139 byl vyvinut kompozitový vzduchový kanál k motoru Garret TFE-731, pro L-159 bylo vyvinuto unikátní kompozitové pancéřování kabiny pilota a následně instalováno do 72 sériových letounů. V rámci kooperace s americkou Marion Composites byl vyvinut kompozitový radom radaru a kryty antén systému RWR. Následně byla technologie výroby RWR radomů převedena do AERO a stejně tak byla získána technologie opravy kompozitového radomu radaru. Pro dvoumístnou verzi L-159 byly vyvinuty kompozitové hřbetní kryty. Pro Ae-270 bylo vyvinuto množství kompozitových sekundárních dílů a komplet interiérových panelů.

Systematický rozvoj kompozitů v AV s využitím podpory ze státního rozpočtu a ve spolupráci s českými výzkumnými institucemi

Od roku 2003 začíná AERO využívat programy podpory výzkumu a vývoje se státní dotací jako zdroj financování pro náročné vývojové projekty. AERO je vysoce úspěšné v soutěžích MPO Progress,

Konsorcia, Impuls, Tandem a TIP i díky promyšlené strategii interního rozvoje, který je primárně orientován na systematické modernizace vlastních výrobků AERO a s tím související technologický i materiálový vývoj hlavně v oblasti leteckých kompozitů.

Sumarizace řešených projektů a jejich výsledků a jsou zde zmíněny projekty související s problematikou kompozitů.

1. Kompozitové opravy

V rámci 2 projektů VaV s podporou MPO (Konsorcia 2003 až 2005 a Tandem 2006 až 2009) má AERO vyvinut systém opravy únavového poškození primární konstrukce letadla metodou kompozitové záplaty. V rámci projektu bylo získáno know-how od analytického a konstrukčního řešení a optimalizace opravy letadel, metody přípravy povrchu pro lepení včetně materiálového a technologického vývoje, výroba laděných kompozitových záplat na bázi uhlíkové výtzuže nebo výtzuže z borových vláken a vlastní proces lepení při zaručených mechanických vlastnostech spoje a jejich garantované životnosti v náročných podmínkách provozu letounu.

Byly získány a ověřeny metody kontroly stavu opravy, experimentálně bylo řešeno sledování stavu opravy metodou health monitoring/smart structure.

2. Aplikace kompozitových materiálů na sekundární konstrukci letadel

V rámci tohoto projektu řešitelský tým vyvinul unikátní řešení krytu přístrojové desky letounu L-159B. Byly vyřešeny otázky elektromagnetického stínění zařízení umístěných pod krytem a s tím spojené vodivé propojení kompozitového dílu s ostatní konstrukcí s požadovanými vlastnostmi, simulacemi byly ověřeny mezní stavy zatížení takové konstrukce od aerodynamických sil v rámci definovaných kritických případů provozu letounu a pevnostně/hmotnostně/výrobních nákladů optimalizovaná konstrukce. Byl realizován materiálový a technologický vývoj hybridní kompozitové konstrukce na bázi uhlíkové (CFRP), kevlarové (AFRP) a skleněné výtzuže (GFRP) v kombinaci s voštinovou (nomex) a pěnovou výtzuží.

Bylo vyvinuto speciální přípravkové vybavení pro výrobu prototypů. Bylo provedeno množství zkoušek od vzorků po komplexní ověření řešení v rámci zkušebního provozu letounu L-159B.

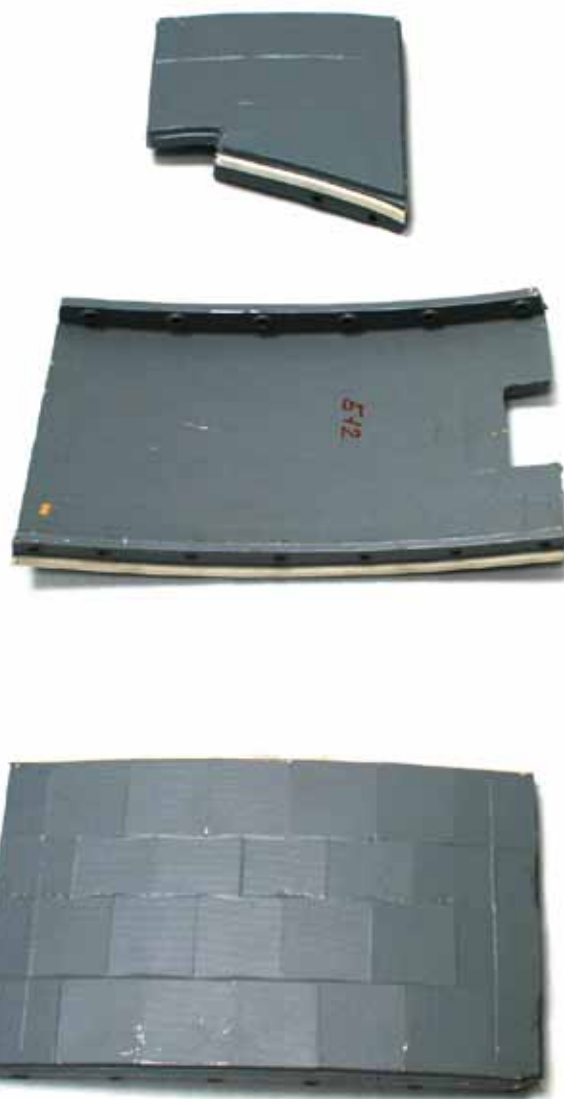
3. Modernizace vystřelovacího sedadla

V rámci podprojektu rekonstrukce VS z důvodu úspory hmotnosti konstrukce byla navržena kompozitová varianta schránky nouzové dávky a sedák sedadla. Vyvinutá konstrukce je z důvodů specifických požadavků kombinací laminátu s kevlarovou výztuží (AFRP) a voštinového (nomex) jádra. Vyvinuté díly byly ověřeny rozsáhlým programem zkoušek.

4. Kompozitové křídélko

Projekt je společností AV chápán jako klíčový pro získání know-how potřebného jako zdroj pro budoucí strategii plánované komerční vývojově/výrobní projekty.

První fáze projektu spadá do období 2003-2005 (program Konsorcium), kdy vznikl a mechanickým zkouškám byl podroben prototyp křídélka vyvinutý pro letoun L-159. Vznikly databáze konstrukčního řešení a materiálových hodnot, metody výpočtu takového typu kompozitové konstrukce, byly vyzkoušeny nové metody výrobních postupů kompozitových částí včetně přípravkového vybavení. Výsledná konstrukce celokompozitového křídélka (CFRP, CFRP sendvičové panely s voštinovým jádrem, lepení sestavy za studena) znamenala úsporu hmotnosti cca o 30% v porovnání s předchozím celokovovým provedením. V rámci interního vývoje v období 2006 až 2009 byly revidovány některé konstrukční uzly a doplněny další hlavně mechanické zkoušky. Další regulérní vývojová etapa je řešena v rámci projektu programu TIP (2009 až 2013), kdy ovšem z důvodů přehodnocení strategie AV došlo k revizi projektu tak, aby projekt navázal a využil dosažené výsledky vývoje kompozitového křídélka pro vojenský proudový letoun L-159 ale dále se řešitelský tým zabýval vývojem pohyblivé řídicí plochy dle stavebních předpisů platných pro velká dopravní letadla (EASA CS 25) s cílem projít v rámci projektu kompletní vývojový proces až po virtuální certifikaci takové konstrukce. Součástí je rozsáhlý vývoj v oblasti analytických metod, nových materiálů (proces získání zaručených materiálových hodnot kompozitových materiálů dle platných standardů), technologie včetně alternativních řešení k primárně uvažované výrobní technologii prepreg layup/autoclave curing. Konstrukce je navrhována v prostředí pokročilých CAD systémů specializovaných na návrh a výpočet kompozitů.



Obr. 2 - pancéřování L159



Obr. 1 - prodloužení vzduchového kanálu L39 MS

Další rozvoj v oblasti leteckých kompozitů

AERO Vodochody a.s. prošlo v období zásadními změnami, kdy se i měnila strategie oblasti kompozitů. V roce 2009 došlo ke schválení strategie, kdy vývojové a výrobní schopnosti budou budovány přímo v AERO Vodochody a.s., Odolena Voda a to metodou „krok za krokem“, která zásadně snižuje rizika nutné investice. Tento plán navazuje na předchozí stav pracoviště v areálu AV, provedené akvizice v nedávné minulosti a logicky počítá s využitím dosažených výsledků a vlastněného know-how.

Druhá polovina 1970 - vznik provizorního vývojového pracoviště
 1980 až 1990 - systematický rozvoj vývojového pracoviště, zahájení provozu autoklávu VZLÚ, který je využíván pro výrobu AV
 2002 - vybudována čistá místnost
 2005 - nová vytvrzovací pec
 2007 - akvizice, Rotortech Aero Ltd. (výroba kompozitů), Cambridge, UK
 2009 - schválení etapového plánu rozvoje kompozitů v AV
 2010 - Etapa 1 - rozšíření vývojového pracoviště o autokláv
 Schválení zahájení realizace Etapy 2, sériové kompozitové pracoviště
 2011 - certifikace vývojového pracoviště kompozitů v AV

Nové sériové pracoviště pro výrobu kompozitů

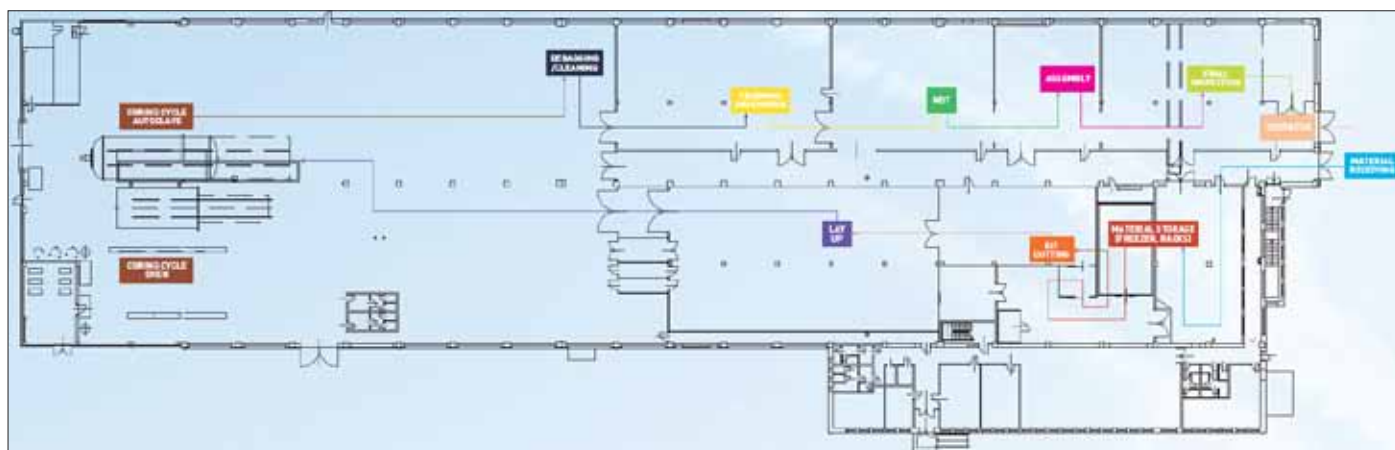
V dubnu 2012 Aero Vodochody otevřelo nové pracoviště pro sériovou výrobu kompozitů. V současné době největší letecké kompozitové pracoviště v České republice si vyžádalo investici 105 milionů korun, na které se podílela i Evropská unie. Výroba bude pokrývat hlavně potřeby stávajících projektů Aera. Pracoviště je prvoplánově postaveno za účelem uspokojit stávající zákazníky a v případě volných kapacit nabídnout tyto kapacity i třetím stranám.

PARAMETRY NOVÉHO PRACOVISTĚ

Na celkové výrobní ploše 5.400m² se v nové hale kompozitů, tzv. Hale 4, nebo Shop 2, nachází nejmodernější vybavení pro výrobu kompozitů v České republice pro kompozitovou výrobu. Uspořádání haly a tok výroby halou byly plánovány tak, aby splňovaly podmínky pro lean výrobu.



Obr. 5 - čistá místnost



Obr. 4 - Uspořádání Haly 4

TECHNOLOGIE VÝROBY

V nové hale kompozitů jsou na základě požadavků zákazníků v současné době používány základní technologie výroby kompozitů, tj. ruční kladení prepregů do forem, jejich vytvrzení v autoklávu, nebo peci, obrobení dílů a jejich setava. Sestavou rozumíme nýtování, instalaci do vyšší sestavy, ale také lepení.

Aero Vodochody má pro plynulý tok výroby nainstalován řezací plotr na zhotovení nástřihů, jehož rozměry jsou 4m délka a 2m šířka, čistou místnost class 1 (100.000), která splňuje podmínky pro konstrukční lepení, celková plocha čisté místnosti je 500m². Tato plocha může být v případě potřeby až zdvojnásobena.

V červnu letošního roku bude čistá místnost vybavena projekčními lasery určenými k zajištění precizního ukládání nástřihů do forem.

Autokláv, nebo podle označení výrobce Econoclave, byl stejně jako pec pro vytvrzování, vyroben firmou ASC Process Systems, LA. Výroba samotné nádoby probíhala pod dohledem ASC v České republice, ve Excon v Hradci Králové. V lednu loňského roku pak byl autokláv převezen do AV a zde proběhla finální sestava autoklávu, včetně nezbytné instalace řídicích systémů a testování autoklávu. Autokláv má pracovní průměr 3,7m, jeho pracovní délka je 9m a pracuje s tlakem maximálně 11 barů a maximální teplota je 250 C. V autoklávu se

nachází 72 termočlánků a 18 vakuových sond pro kontrolu a měření úrovně vakua a 18 vakuových vstupů. Z bezpečnostních důvodů je autokláv plněn dusíkem. Je rovněž vybaven mnoha bezpečnostními prvky, jež odpovídají přísným standardům.

Výhodou autoklávu je mimo jiné umístění topicích a chladicích jednotek pod podlahou, čímž dochází k eliminaci "chluchých" míst v porovnání s konvenčními autoklávy.

KVALIFIKACE

Loňský rok byl ve znamení nejen slavnostního otevření pracoviště (26.4.2012), ale hlavně rokem kvalifikací pracoviště a to jak obecnými, nezbytnými pro leteckou výrobu, tak stávajícími zákazníky.

Hned od počátku byla zahájena postupná kvalifikace pracoviště firmou Sikorsky. V srpnu 2012 jsme dosáhli schválení výroby monolitních kompozitů bez lepení a ihned započala výroba kvalifikačních dílů. Zároveň jsme pokračovali v kvalifikaci pro jednotlivé speciální procesy pro firmu Sikorsky a tento proces nadále pokračuje.

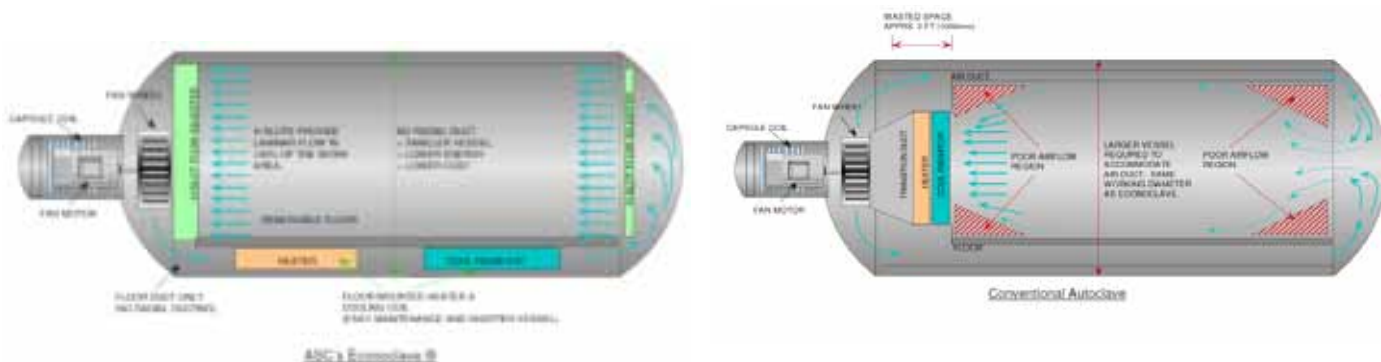
V současné době jsme držiteli schválení B1, což platí pro použití foli-

ových a pastových lepidel. V dubnu tohoto roku proběhne audit na schválení lepení voštinových sestav. Autokláv i pec získaly schválení podle SAC normy AMS2750 a zároveň podle předpisu firmy Boeing D6. Tímto jsou splněny požadavky většiny OEM firem.

V říjnu 2012 jsme také úspěšně absolvovali audit a získali rozšíření certifikátu AS9100 rev. C pro kompozity. V tu dobu vrcholily také přípravy pro jednu z nejdůležitějších kvalifikací a to NADCAP. Auditem jsme úspěšně prošli v prosinci 2012 a od ledna 2013 se pyšníme certifikátem NADCAP, jehož rozsah je prepreg, lepení a RTI.

Aero je také držitelem oprávnění pro výrobu kompozitových krytů na letou JAS39 Gripen pro firmu SAAB, probíhá kvalifikační proces firmou Embraer (projekt KC390).

Díky těmto získaným certifikacím je Aero schopno nabídnout svým zákazníkům široké spektrum výrobků a konstrukčních celků od obráběných dílů, přes tvářené díly, sestavy a to včetně instalace kompozitových celků.



Obr. 6 - Porovnání Econoclave a konvenčního autoklávu

Vytvrzovací pec o rozměrech 3x2,5x8m pracuje rovněž s maximální teplotou 250 C.



Obr. 7 - Autokláv



Obr. 8 - Pec