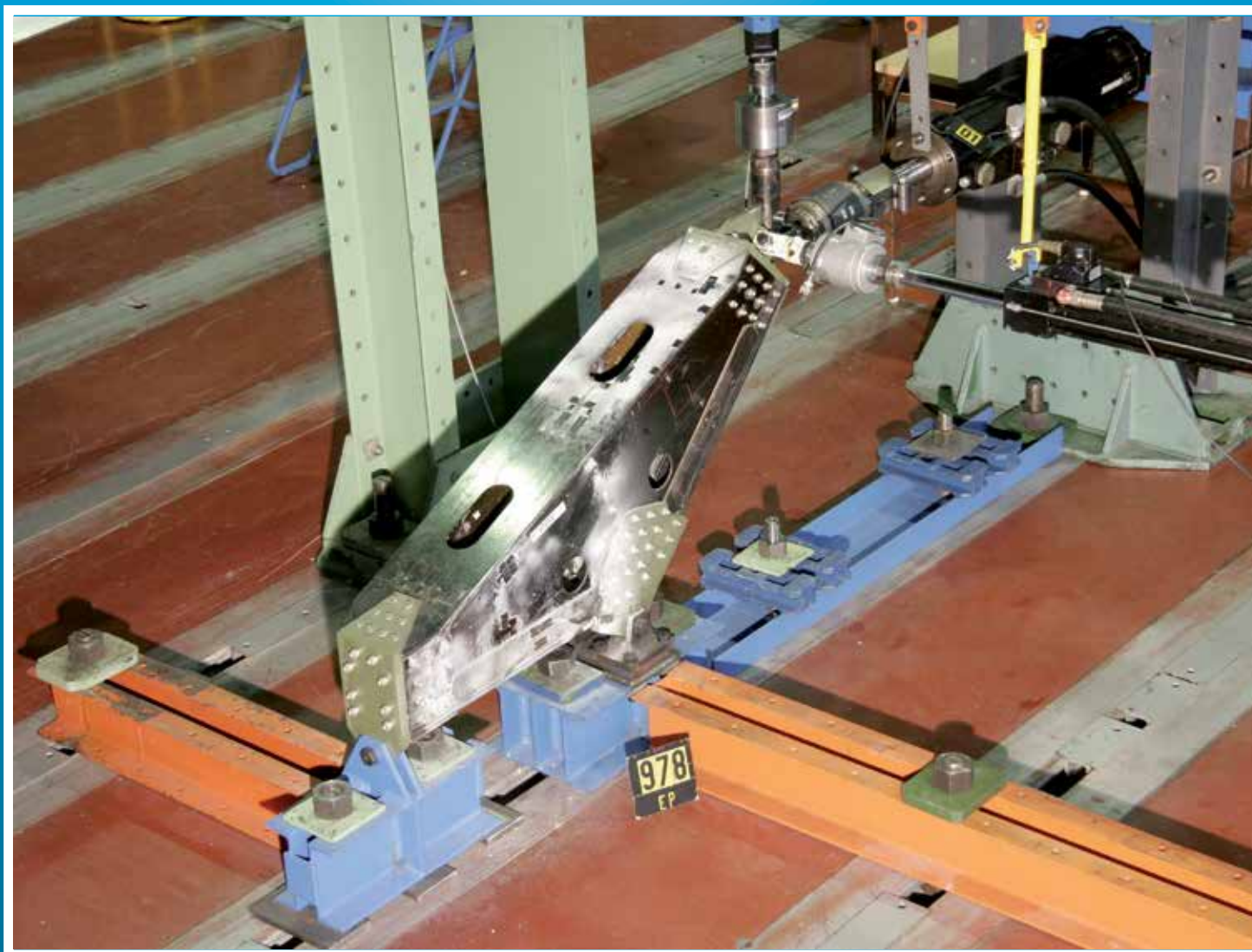


TRANSFER

Výzkum a vývoj pro letecký průmysl

č 21 / 2014



Toto číslo elektronického sborníku obsahuje příspěvky přednesené na 9. 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“

3. 4. 2014

TRANSFER

Výzkum a vývoj pro letecký průmysl
Elektronický sborník VZLÚ
číslo 21, duben 2014, 9. 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

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, úvodní slovo technického ředitele VZLÚ
9:15-10:45	I. blok přednášek 1. Metody určování teplotní odolnosti kompozitů Cabrnok B., VZLÚ 2. Systém NDT kontroly kompozitních a lepených struktur při výrobě letecké techniky Zavadil Z., ATG 3. Ultrazvuková nedestruktivní kontrola kompozitních konstrukcí ve VZLÚ Bělský P., VZLÚ
10:45-11:00	Přestávka
11:00-12:30	II. blok přednášek 3. Odolnost kompozitního profilu tvaru T vyrobeného nízkonákladovou metodou Kadlec M., VZLÚ 4. Vliv materiálu formy a separátoru na kvalitu povrchu kompozitního dílu Víttek P., ČVUT FS 5. Stabilita tenkostěnných kompozitních konstrukcí Hraška M., VZLÚ
12:30-13:30	Oběd
13:30-15:30	III. blok přednášek 6. Technologie sendvičových dílců s FDM voštinou aplikovaná na koncovou část křídla letounu SportStar EPOS Drštica M., Evektor 7. Demonstrátor kompozitového křídélka Hásek J., Aero Vodochody 8. Využití kompozitních materiálů v konstrukci UL letounu Phoenix D-14 Štěpánek M., Phoenix Air 9. Celokompozitní proudový letoun Flaris LAR-1 Průcha P., LA composite
15:30-15:45	Přestávka
15:45-16:30	Panelová diskuze
16:30	Ukončení semináře

Obsah sborníku

- 6 **Metody určování teplotní odolnosti kompozitů**
Cabrnoch B., VZLÚ
- 11 **Ultrazvuková nedestruktivní kontrola kompozitních konstrukcí ve VZLÚ**
Bělský P., VZLÚ
- 18 **Odolnost kompozitního profilu tvaru T vyrobeného nízkonákladovou metodou**
Kadlec M., VZLÚ
- 24 **Vliv materiálu formy a separátoru na kvalitu povrchu kompozitního dílu**
Víttek P., ČVUT FS
- 26 **Celokompozitní proudový letoun Flaris LAR-1**
Průcha P., LA composite



Statická zkouška celokompozitního vrtulového listu

Metody určování teplotní odolnosti kompozitů

Ing. Bohuslav Cabrnach, Ph.D. - VZLÚ, Praha

Článek pojednává o metodách určování teplotní odolnosti polymerních kompozitů. Teplotní odolnost polymerních kompozitů je dána především vlastnostmi použité matrice. Teplotní odolnost se tedy nejčastěji stanovuje na základě teploty skelného přechodu polymerní matrice. Proto jsou zde popsány nejpoužívanější metody stanovující teplotu skelného přechodu a uvedeno jejich porovnání.

ÚVOD

Teplotní odolnost konstrukčních materiálů je jednou z mnoha vlastností, které rozhodují o jejich vhodnosti použití pro konkrétní aplikaci. Teplotní odolnost materiálu lze definovat jako teplotní interval, ve kterém je zvolený konstrukční materiál schopen plnit požadovanou funkci, neboli jeho mechanické vlastnosti jsou zaručené a dosahují požadovaných hodnot.

V běžné praxi se převážně používají dlouhovláknové kompozity s polymerními maticemi a to jak termosetickými, tak i termoplastickými. V následujících odstavcích jsou popsány charakteristické teploty plastů, způsob jejich zjišťování a přístupy ke stanovení jejich teplotní odolnosti.

CHOVÁNÍ PLASTŮ V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ

Plasty jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvarovatelnými. Pokud je změna z plastického do tuhého stavu opakovaně vratná, nazývají se tyto polymery termoplasty. Pokud jde o změnu nevratnou (neopakovatelnou, trvalou), protože výsledkem je chemická reakce mezi molekulami většinou za zvýšené teploty, mluvíme o reaktoplastech (termosety, pryskyřice).

Vysoká molekulová hmotnost polymerů způsobuje, že jejich bod varu je ve všech případech vyšší, než je teplota jejich rozkladu (degradace). Z tohoto důvodu u polymerů neexistuje plynný stav. Polymery se mohou nacházet pouze v kapalném nebo tuhém stavu. Podle uspořádání makromolekulárních řetězců v tuhém stavu rozlišujeme vysoce uspořádaný stav - krystalický a téměř neuspořádaný stav - amorfní (sklovitý).

Na rozdíl od nízkomolekulárních látek je pro polymery charakteristický ještě přechodový stav mezi stavem sklovitým a kapalným, tzv. stav kaučkovitý. Polymer nelze definovat jako tuhý látka ani jako kapalinu, protože při deformaci dochází k nevratnému toku, který je charakteristický pro stav plastický (kapalný). Je patrné, že polymery mohou existovat ve čtyřech fázových stavech: krystalickém a 3 amorfních (sklovitém, kaučkovitém a plastickém). O tom, ve kterém z těchto stavů se polymer nachází, rozhoduje především jeho chemické složení, molekulová hmotnost, struktura a teplota.

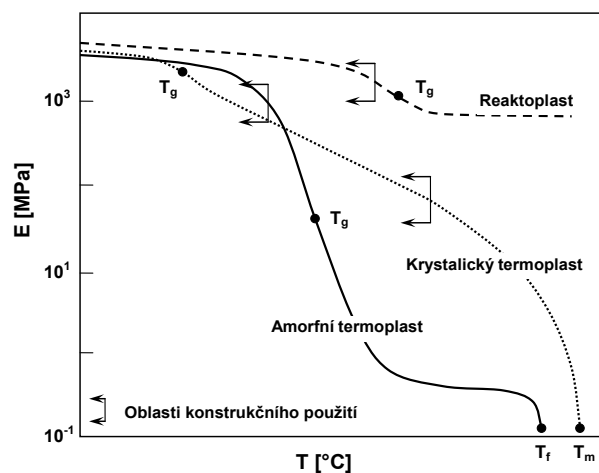
Amorfní termoplasty lze z hlediska teplotního chování charakterizovat teplotou zesklenní T_g (teplota skelného přechodu) a teplotou plastického toku T_f . Pod teplotou T_g se amorfní termoplast nachází ve sklovitém stavu a mezi teplotami T_g a T_f v kaučkovitém stavu. Nad teplotu T_f se hmota mění na vysoce viskózní kapalinu.

Krystalické termoplasty nevykazují tak náhlé změny vlastností s rostoucí teplotou jako amorfní jak je patrné z průběhu modulu pružnosti na obr. 1. Avšak i krystalické termoplasty lze charakterizovat teplotou skelného přechodu T_g , i když vysoce krystalické polymery nevykazují

kaučkovitou oblast. Při zvyšování teploty nad T_g jsou totiž krystalicity stále kompaktní. K jejich rozpadu (tání) dochází až při teplotě tání T_m .

U semikrystalických termoplastů se pod T_g amorfní podíl nachází ve sklovitém stavu, mezi T_g a T_f je amorfní podíl v polymeru v kaučkovitém stavu, nad T_m přechází do kaučkovitého stavu i krystalický podíl.

U reaktoplastů (termosetů) byla při jejich vytvrzení vytvořena velmi hustá trojrozměrná síť chemických vazeb. Díky nim nevykazují reaktoplasty teploty T_f ani T_m a další zahřívání vede k rozpadu vazeb a rozkladu polymeru.

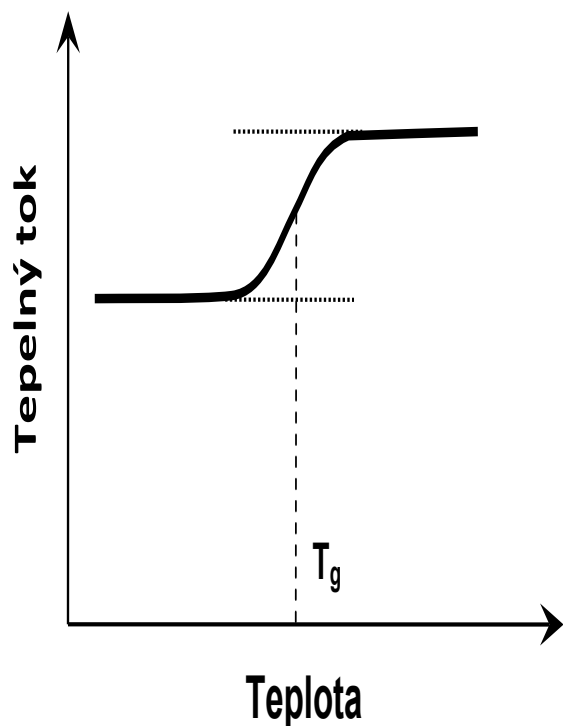


Obr. 1 Teplotní závislost modulu pružnosti E při konstantním čase.

METODY ZJIŠŤOVÁNÍ TEPLoty SKLENÉHO PŘECHODU

Jak je uvedeno výše, s rostoucí teplotou klesá modul pružnosti polymerů. Kromě modulu pružnosti se však s teplotou mění i další fyzikální vlastnosti. Změna mechanických vlastností je totiž vyvolána změnou struktury polymeru. Se změnou struktury je spojena i změna specifického objemu, hustoty, tepelné kapacity a dielektrických vlastností. Na základě měření změn výše uvedených vlastností jsou založeny i metody určující T_g . V současné době nejpoužívanější metody zjišťující teplotu skelného přechodu jsou následující:

- Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) - tepelná kapacita
- Termomechanická analýza (TMA) - součinitel teplotní roztažnosti
- Dynamická mechanická analýza (DMA) - moduly pružnosti + tlumení

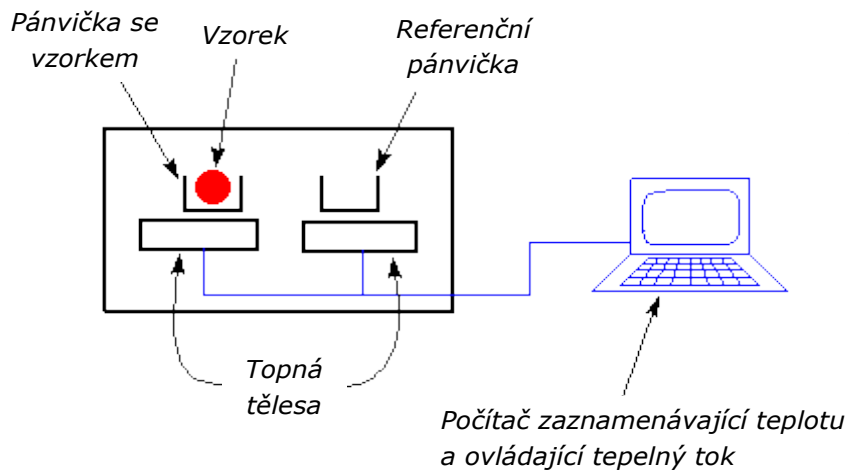


Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)

Metoda DSC určuje T_g jako inflexní bod změny tepelného toku při řízeném ohřevu vzorku materiálu. Polymery mají obecně vyšší tepelnou kapacitu nad teplotou skelného přechodu. T_g je pak přesně uprostřed přechodové oblasti, viz. obr. 2.

Vzorek materiálu u této metody je velice malý. Obvykle váží několik miligramů a nemůže tak reprezentovat vlastnosti většího celku konstrukce. Objemový podíl výztuže může ovlivnit citlivost metody, zvláště pokud vzorek obsahuje velký podíl výztuže. Metoda je relativně levná a rychlá.

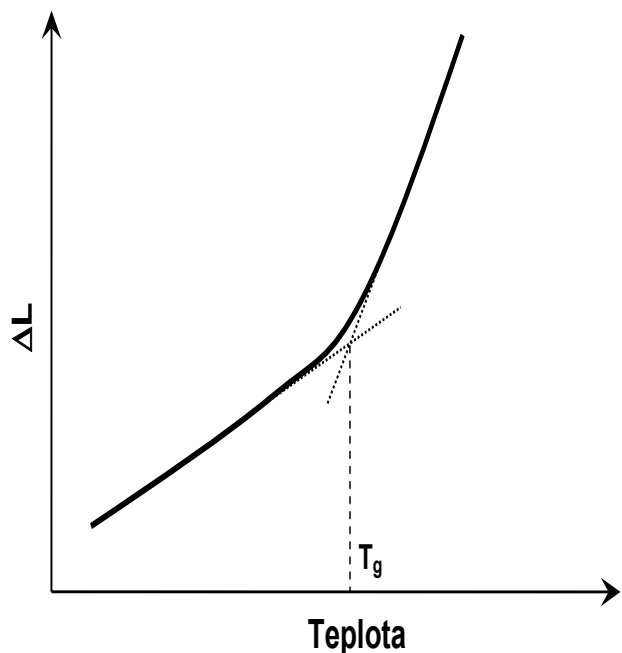
Obr. 2 Určení T_g pomocí DSC.



Obr. 3 Schéma diferenčního skenovacího kalorimetru.



Obr. 4 Diferenční skenovací kalorimetr používaný ve VZLÚ.



Termomechanická analýza (TMA)

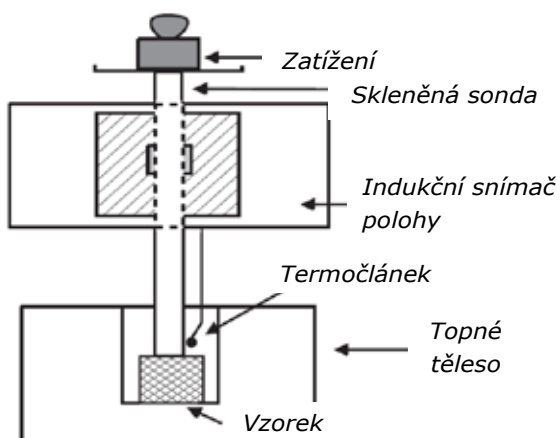
Při určování T_g pomocí TMA je měřena závislost rozměrových změn vzorku na teplotě. Teplota T_g je určena jako bod náhlé změny součinitele teplotní roztažnosti vzorku, který vzroste nad teplotou T_g , viz. obr. 5.

Vzorek materiálu je řádově větší než u metody DSC. Rozměry vzorků se již pohybují v jednotkách mm. U laminátů se rozměrové změny obvykle zjišťují ve směru jeho tloušťky, kdy jsou rozměrové změny matrice výztuží ovlivněny nejméně. Objemový podíl výztuže může ovlivnit citlivost metody, zvláště pokud vzorek obsahuje velký podíl výztuže.

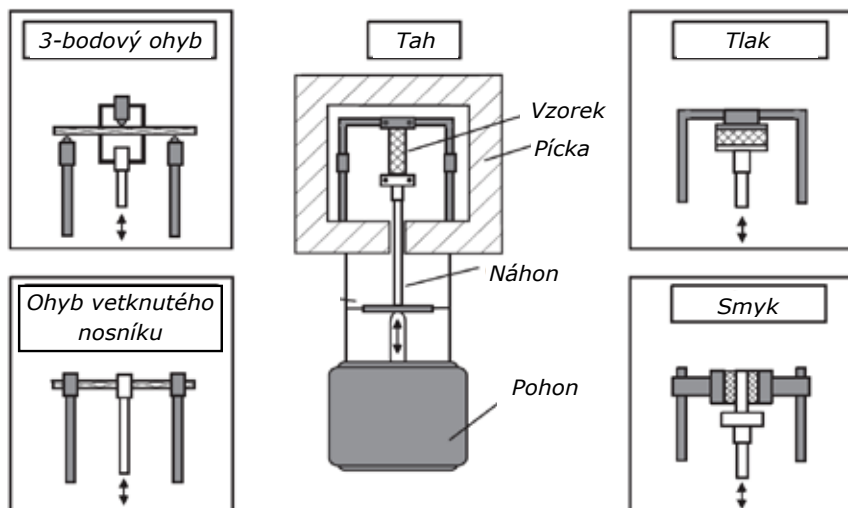
Dynamická mechanická analýza (DMA)

DMA zaznamenává mechanickou odezvu materiálu na budící sílu při konstantní nebo proměnné frekvenci zatížení v závislosti na teplotě. Zatěžovací mód a rozměry vzorku materiálu mohou být různé jak je patrné z obr. 7. Dynamické mechanické analyzátoři jsou uzpůsobeny pro aplikaci různých zatěžovacích módů pomocí zatěžovacích přípravků.

Obr. 5 Určení T_g pomocí TMA



Obr. 6 Princip měření metodou TMA a termomechanický analyzátoři.



Obr. 7 Zatěžovací módy vzorků při DMA analýze.



Obr. 8 Dynamický mechanický analyzátor.

Vyhodnocení T_g pomocí DMA je provedeno na základě porovnání průběhu budící síly a průběhu poměrné deformace vzorku, která se s teplotou mění a vykazuje charakteristický průběh. Budící síla má obvykle sinusový průběh a měřená poměrná deformace vzorku je díky viskoelastickému chování a vnitřnímu tlumení polymerů odlišná, viz obr. 9.

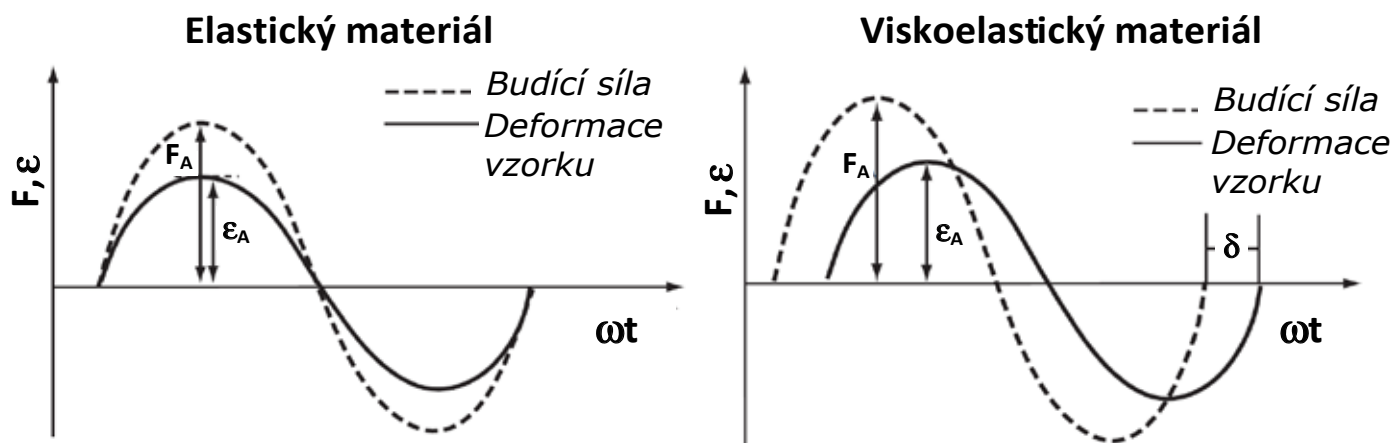
Porovnáním obou průběhů se vyhodnotí závislost následujících třech veličin na teplotě:

- Soufázový modul E' (Storage modulus)
 - » Představuje elastickou odezvu materiálu
 - » Úměrný akumulované elastické deformaci během zátěžného cyklu
- Ztrátový modul E'' (Loss modulus)
 - » Vyjadřuje množství mechanické energie, která je vzorkem absorbována a přeměněna na teplo.
 - » Teplota při dosažení tohoto maxima reprezentuje teplotu, při které polymerní materiál podstupuje maximální změnu v pohyblivosti polymerních řetězců. Tato definice nejvíce koresponduje s chemickou definicí teploty skelného přechodu.
- Ztrátový součinitel $\tan \delta$ (Tan Delta)
 - » Charakterizuje tlumící vlastnosti materiálu.

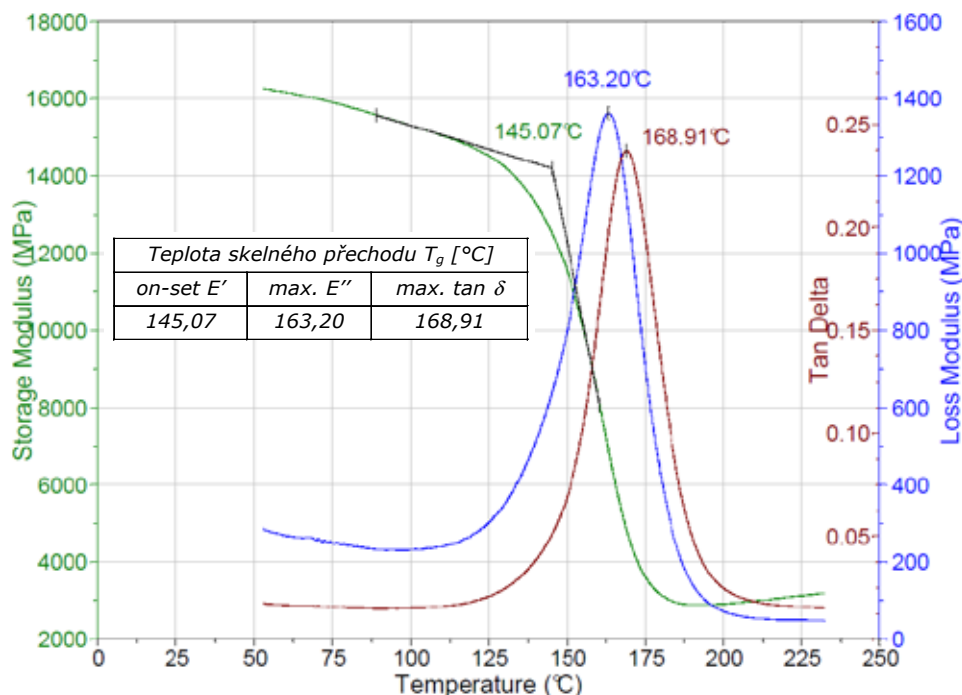
Teplota skelného přechodu je následně analyzována ve všech fázích měření a ze všech výše uvedených veličin a to následujícím způsobem:

- Storage modulus: on-set teplota poklesu modulu E' ,
- Loss modulus: teplota při dosažení nejvyšší hodnoty E'' ,
- Tan Delta: teplota při dosažení nejvyšší hodnoty Tan Delta.

Příklad výsledku měření pomocí DMA skelného laminátu s epoxidovou maticí je uveden na obr. 10. Z vyhodnocení průběhu hodnot sledovaných veličin je zřejmé, že se hodnoty T_g od sebe poměrně výrazně liší. Při vyhodnocování výsledků je tedy důležité si uvědomit, co je cílem měření. Pokud nás zajímá pokles mechanických vlastností, tak je potřeba sledovat Storage modulus. Pokud optimalizujeme vytvzovací cyklus nebo nás zajímají jiné chemické procesy probíhající v materiálu při různých teplotách, je nutné sledovat špičky Loss modulus.



Obr. 9 Průběhy budící síly a elastického a viskoelastické materiálové odezvy.



Obr. 10 Výsledky měření pomocí DMA - G/E kompozit.

POROVNÁNÍ METOD ZJIŠŤOVÁNÍ TEPLoty SKLENÉHO PŘECHODU

Každá z uvedených metod má své výhody i nevýhody a její použití je optimální jen pro určité činnosti. Teplota skelného přechodu stejného materiálu bude různá pro všechny metody a neexistuje univerzální postup pro jejich převod.

DSC je relativně levná a rychlá metoda, avšak v žádném případě není schopna kvantifikovat změny v mechanickém chování materiálu. Je to dáno tím, že zkušební vzorek je velice malý (řádově miligramy). Tato metoda je však velice efektivním nástrojem (díky rychlosti a ceně) při sledování kinetiky vytvrzovacích procesů, optimalizaci vytvrzovacích cyklů, určování stupně konverze a sledování kvality výroby. Touto metodou se však nedá posoudit vliv prostředí na T_g daného materiálu.

TMA je metoda vhodná především pro určení součinitelů teplotní roztažnosti a jejich závislosti na teplotě.

Metoda DMA je nejvhodnější metoda pro zjištění závislosti mechanických vlastností polymerních materiálů na teplotě i na expozici v různých prostředích. Rozměry vzorků jsou již dostatečně velké, aby postihly reálnou strukturu kompozitních materiálů. Metoda DMA je také předepsána FAA pro určování maximální provozní teploty leteckých kompozitních konstrukcí.

ZÁVĚR

Teplotní odolnost polymerů se nejčastěji stanovuje na základě teploty skelného přechodu polymerní matrice. Pro její stanovení existuje řada metod, avšak jejich výsledky nejsou identické ani vzájemně převoditelné. Volba správné metody stanovení T_g závisí na tom, zda se jedná o vývoj nového materiálového systému, optimalizaci vytvrzovacího cyklu nebo je potřeba určit rozsah pracovních teplot materiálu.

Literatura:

- [1] Pluhař J. a kol.: Nauka o materiálech, SNTL, 1989
- [2] Ehrenstein G.W.: Polymerní kompozitní materiály, Scientia, 2009
- [3] Ehrenstein G.W., Riedel G., Trawiel P.: Thermal Analysis of Plastics, Hanser Gardner Publications, Cincinnati, 2004

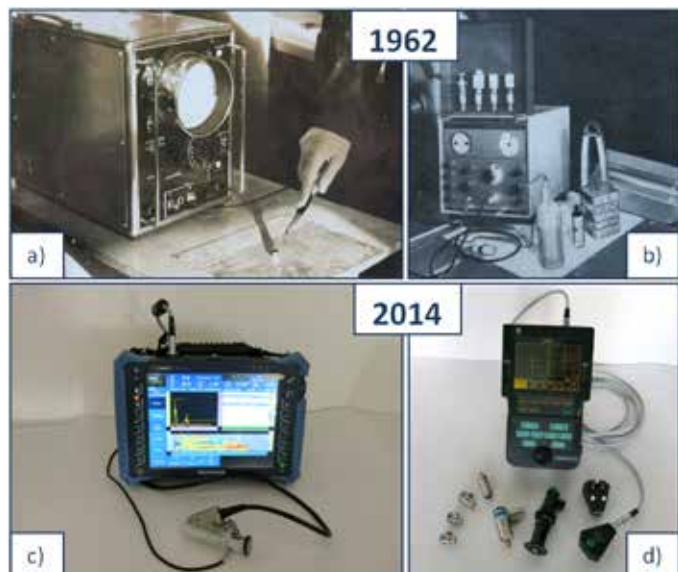
Ultrazuková nedestruktivní kontrola kompozitních konstrukcí ve VZLÚ

Ing. Petr Bělský, VZLÚ, Praha

V úvodní části příspěvku jsou stručnou formou shrnuty základní principy ultrazukové defektoskopie, používané typy sond a zkušebních metod. Následuje představení současného ultrazukového NDT vybavení používaného ve VZLÚ, a.s. na divizi Pevnost letadel. Na konkrétních příkladech aplikací z praxe jsou prezentovány výsledky dosažené v uplynulých dvou letech a dokumentován tak rozvoj oboru ultrazukové defektoskopie na tomto pracovišti. V závěru příspěvku je uveden nástin dalších aktivit plánovaných v budoucnu.

ÚVOD

Nedestruktivní kontrola dnes představuje samostatnou vědní disciplínu, která prodělala během posledních několika desetiletí bouřlivý rozmach a její význam neustále stoupá v souvislosti se stále se zvyšujícími nároky na nově vyvíjené letecké i neletecké konstrukce. Ultrazuková defektoskopie je s oblastí kompozitních materiálů od začátku jejich vývoje velmi úzce spojena. To je dáno především univerzálním principem ultrazukové metody. Její počátky lze položit přibližně do období 30.- 40. let 20. Století (viz O. Mülhäuser-1933, F. Firestone-1940, D. Sproule-1942), kdy byla vyvinuta pulzní-echo metoda pro detekování vad v pevných látkách. K širšímu rozšíření do praxe však došlo až koncem 50. let. VZLÚ na tyto nové trendy zareagovalo poměrně rychle a již na počátku 60. let byly ve výzkumném ústavu aktivně používány nejmodernější ultrazukové přístroje (Kretz 6000 K, Usomat, Fokker-Bond-Tester) a UT metody nejprve pro kontrolu kvality lepených spojů, kovových sendvičových konstrukcí a později i dílů z kompozitních materiálů. Podoba těchto přístrojů a jejich srovnání s jejich současnými ekvivalenty je uvedena na Obr.1.



Obr.1 Přístrojová NDT technika používaná ve VZLÚ:
a) Kretz 6000 K, b) Fokker-Bond-Tester,
c) Omniscan MX2, BondMaster 1000

Základní podstata ultrazukové defektoskopie se od jejich počátků v zásadě nezměnila. Princip je založen na měření změn prostupnosti a odrazivosti ultrazukových vln vlivem necelistvostí v materiálu. Pro detekci necelistvostí je využíván ultrazuk, který lze definovat jako mechanické kmitání částic šířící se pružným prostředím ve frekvenčním rozsahu nad 20 kHz. V ultrazukové defektoskopii se nejčastěji využívá rozsahu frekvencí od 1 MHz do 20 MHz. U kompozitních materiálů typu CFRP, které se vyznačují značnou nehomogenitou, anizotropií a především vysokým útlumem se používá spíše spodní část tohoto rozsahu, nejčastěji 1MHz - 10 MHz.

Metody zkoušení je možné rozdělit podle různých hledisek, ale nejčastěji se používá dělení na metodu průchodovou a metodu odrazovou. Technicky mohou být obě buď spojitě, nebo impulzní (50Hz - 10kHz) podle časového průběhu elektrického budicího signálu. V současné době se však již spojitě varianty téměř nepoužívají.

Průchodová metoda využívá dvou sond umístěných na dvou protilehlých stranách kontrolovaného dílu. Jedna sonda je vysílací a druhá přijímací. Vyhodnocení vady spočívá ve vyhodnocení poklesu akustického tlaku. Tato metoda je vhodná zvláště pro větší tloušťky materiálu a větší úrovně útlumu. Na druhou stranu nevýhodou je, že prokázání vady je u této metody nepřímé, a proto není možné určit hloubku, ve které se nalézá. Navíc odchylky akustického tlaku v měřicím systému nebo rozdílná akustická vazba neumožňuje přesnější určení velikosti necelistvosti.

Více používaná je metoda odrazová, která využívá jednu sondu pracující zároveň jako vysílač i jako přijímač. Velkou výhodou je, že u této metody stačí přístup jen z jedné strany a především že umožňuje hloubkovou lokalizaci místa vady a přesnější stanovení její velikosti.

Další možností dělení UT zkoušení je podle druhu používané akustické vazby na metody:

- a) kontaktní
- b) imerzní
- c) bezkontaktní (se vzduchovou vazbou)

Kontaktní metoda se nejčastěji používá při ručním zkoušení a díky obecně nižším nárokům na technické vybavení patří k nejrozšířenějším. Sonda je v tomto případě v těsném kontaktu s povrchem zkoušeného dílu a pouze nerovnosti jsou vyplněny vazebním prostředkem (např. vazební gel na vodní bázi).

U imerzní metody je ultrazvuk přenášen ze sondy do zkoušeného předmětu pomocí vodního sloupce nebo vodního paprsku. Vlastnosti akustické vazby jsou díky tomu výrazně stabilnější, což se projevuje vyšší kvalitou výstupů NDT kontroly. Důležité je, aby se ve vodě ani na povrchu zkoušeného předmětu nevyskytovaly vzduchové bublinky a nečistoty. Metoda je vhodná pro automatizované nebo mechanizované zkoušení.

Bezkontaktní ultrazvukové zkoušení se vzduchovou vazbou patří zatím mezi méně rozšířené metody. To je dáno fyzikálními a technickými omezeními. Využívají se buď sondy s velmi nízkými frekvencemi (50kHz-500 kHz) nebo se přenos ultrazvukového vlnění přes vzduchové prostředí „obchází“ jeho přímým generováním v materiálu pomocí laserového paprsku nebo elektromagnetických sil (metoda EMAT).

Pro interpretaci výsledků UT kontroly se používají různé typy zobrazení. Nejčastěji se jedná o zobrazení typu A, B a C, ale setkat se můžeme i s metodami D, P a F.

U základního typu A je zobrazován zesílený vysokofrekvenční ultrazvukový signál na lineární nebo logaritmické stupnici (vertikální osa) v závislosti na času, respektive dráze šíření vlny (horizontální osa). Z praktických důvodů se na monitoru obvykle zobrazuje dráha odpovídající polovičnímu času neboli přímo v milimetrech hloubky v materiálu. Typ B je v podstatě zobrazení výsledků ultrazvukového zkoušení v příčném řezu zkoušeným předmětem, který je kolmý ke skenovanému povrchu a rovnoběžný s referenčním směrem pohybu sondy. Dává tak jasnější představu o rozložení případných necelistvostí po tloušťce ve směru skenování.

Dalším způsobem interpretace výsledků zkoušení je zobrazení C, které dává představu o plošném rozložení necelistvostí při pohledu shora neboli v řezech, které jsou rovnoběžné se skenovaným povrchem. Typický C-scan je vytvořen jako barevná mapa, u které je každé barvě přiřazena daná hloubková úroveň (TOF C-scan) nebo amplituda signálu. Amplitudové C-scany se nejčastěji vytvářejí pro velikost koncového echa nebo maximální velikost meziecha (vadového echa).

Ultrazvukové vlnění se v klasické UT defektoskopii vytváří nejčastěji pomocí piezoelektrického měniče uloženého v ultrazvukové sondě spojené s defektoskopem. Piezoelektrické sondy je možné rozdělit podle různých hledisek. Podle způsobu přenosu ultrazvukového vlnění do kontrolovaného dílu rozděluje sondy na kontaktní a imerzní. Podle úhlu, pod kterým sonda vysílá ultrazvukový svazek do materiálu na sondy přímé a úhlové. Další rozdělení může být podle počtu měničů na jednoměničové, dvouměničové (dvojitě sondy) a víceměničové (např. Phased Array sondy). Každá ze sond je navíc charakterizována svými parametry, jako je jmenovitá frekvence, šířka pásma, délka blízkého pole, úhel rozevření akustického svazku, jmenovitý úhel sondy, úhel sklonu měničů (u dvojitě sondy), poloha ohniska u fokusovaných sond,...atd. Volba vhodné sondy se vždy odvíjí od její konkrétní aplikace a je výsledkem celé řady kompromisů.

Komplikovanějším typem ultrazvukových sond jsou tzv. PA sondy (Phased Array). Jedná se o víceměničové sondy (standardně 8 až 128 měničů), které umožňují používat metodu fázového pole. Její princip spočívá v časování a řízení amplitudy impulzů z jednotlivých pulzů tak, aby interferencí dílčích vln bylo dosaženo požadované výsledné podoby ultrazvukového svazku. Díky tomu je u jedné sondy možné provádět sektorové skenování, dynamické řízení hloubky fokusace, elektronické (lineární) skenování nebo vzájemně tyto funkce kombinovat. PA sondy tak mohou nahradit použití většího množství klasických sond při současném zvýšení spolehlivosti (náhrada mechanických zařízení elektronickým skenováním) a produktivity NDT kontroly. Problematika ultrazvukových sond a dalšího UT vybavení výrazně překračuje rozsah tohoto článku. Více informací viz literatura, např. [2] a [4].

ULTRAZVUKOVÉ NDT VYBAVENÍ VE VZLÚ

Současná skladba přístrojového vybavení pro ultrazvukové zkoušení ve VZLÚ, a.s. je výsledkem postupného rozvoje od roku 2000. Ultrazvuková defektoskopie ve výzkumném ústavu byla po předchozím období

Lineární PA sondy							
Označení sondy	Frekvence [MHz]	Počet elementů	Rozteč [mm]	Délka elementu [mm]	Aktivní Apertura [mm]	Vnější rozměry [mm]	
Sondy pro kontaktní zkoušení							
5L64-A2	5.0	64	0.6	10.0	38.4	53x29x35	
Imerzní sondy							
5L128-I2	5.0	128	0.6	10.0	76.8	83x21x35	
2.25L128-I3	2.25	128	0.75	12.0	96.0	102x21x35	
PA sondy pro kontrolu rádiusových přechodů							
Označení sondy	Frekvence [MHz]	Počet elementů	Rozteč [mm]	Délka elementu [mm]	Poloměr [mm]	Úhlový rozsah [°]	Vnější rozměry [mm]
5CC25-32-R4	5.0	32	1.32	6.0	25.0	90	42x42x16
Imerzní předsádka pro kontrolu rádiusů							
Označení předsádky	Typ sondy	Úhlový rozsah kontroly [°]	Rozsah poloměrů [mm]	Typ kontroly	Vnější rozměry [mm]		
SR4-IE90-ADJ	R4	90	3 to 20	OD/ID	95x78x46		

Tab.1 Seznam PA sond používaných ve VZLÚ

útlumu budována prakticky znovu od základů a její návrat úzce souvisel s novými výzkumnými aktivitami v oblasti kompozitních materiálů. Aktuální stav umožňuje splnit většinu požadovaných úloh nedestruktivní kontroly.

Základem tohoto vybavení jsou 4 typy defektoskopů (MasterScan 340, USMGo, Omniscan MX, BondMaster 1000). Pro kontaktní A-scan kontrolu a měření tloušťky jsou používány defektoskopy SonaTest MasterScan 340 nebo Krautkramer USMGo. Jedná se o digitální přístroje, jejichž možnosti jsou přibližně srovnatelné (barevný displej, 2 nezávislé clony, zesílení 110 dB, AVG, DAC, TCG, frekvenční rozsah 2-22 MHz nebo 0,2-20 MHz). Výhodou USMGo je ale extrémně nízká hmotnost (0,85 kg), vysoká mechanická odolnost a vodotěsnost (IP 67). Tento menší přístroj je proto přednostně používán při měření tloušťek nebo pro práce, při kterých se obsluha pohybuje ve výškách, prostorově omezeném nebo pro přístroje rizikovém prostředí.

Pro každého ultrazvukaře je velmi důležitá možnost volby vhodné ultrazvukové sondy podle dílčích aspektů příslušné aplikace (materiál, tloušťka, použitá technologie výroby, geometrie dílu atd.). V současnosti jsou pro kontaktní NDT kontrolu kompozitních konstrukcí ve VZLÚ, a.s. nejvíce používány jednoměničové přímé sondy Olympus V204-2.25 MHz, Sonatest PRDT 5 MHz a Olympus V202-10 MHz. Všechny s velikostí měniče 0.25" (6,35 mm). Pro kontrolu rádiusových přechodů je možné použít imerzní jednoměničovou nefokusovanou sondu Panametrics V310-SM-5MHz-0.25" se speciální distanční předzádkou. Dále je k dispozici jednoměničová přímá sonda Sonatest SLM 2-10 (2.25 MHz, průměr měniče 10 mm) a dvojité sondy Sonatest CD 1-15, D 5-5 a Krautkramer SEB 5 KF3. Pro měření tloušťky je používána jednoměničová sonda Olympus M208H-RM (20 MHz, průměr měniče 3 mm) nebo GE K-pen sonda 20 MHz.

Významným krokem v rozšiřování možností ultrazvukové kontroly ve VZLÚ, a.s. bylo zavedení Phased Array (PA) a C-scan technologie v roce 2011. Základem nového systému se stala platforma Olympus MX. Jedná se o modulární defektoskop umožňující prostřednictvím různých specializovaných modulů provádět nedestruktivní kontrolu pomocí ultrazvuku nebo pomocí metody vířivých proudů. Tělo defektoskopu se vyznačuje rozměrnou (8,4") LCD obrazovkou s SVGA rozlišením umožňující provádět nedestruktivní kontrolu při téměř libovolných světelných podmínkách. Omniscan MX umožňuje po připojení externí myši a klávesnice ovládání jako u klasického PC. Přístroj je vybaven standardním PC rozhraním t.j. USB, RS232, výstupy alarmů, vstupem dvojitého enkodéru, VGA výstupem a síťovým rozhraním Ethernet. Ultrazvukový modul OMNI-M-PA 16128 umožňuje připojení jak konvenčních, tak PA sond. Frekvenční rozsah systému je v rozmezí 0.25-28 MHz pro konvenční UT kanály a 0.6-18 MHz pro PA kanály. Modul umožňuje připojení PA sond obsahující až 128 elementů a s volitelnou aktivní aperturou 1-16 elementů. Seznam PA sond, které jsou ve VZLÚ, a.s. používány je uveden v Tab.1.

Kontroly kompozitních dílů pomocí C-scanu byly zpočátku prováděny kontaktní metodou pomocí PA sondy 5L64-A2, předzádky SA2-0L (nebo SA2-0L-IHC) a jednoosého minienkoderu. Jako vazební prostředí byl používán gelový přípravek ULTRAGEL II nebo voda přiváděná pod předzádku čerpadlem z externí nádoby. Další variantou bylo ponoření menších dílů (např. kompozitních profilů) do improvizovaných nízkých vodních nádrží vyrobených z krytů zářivkového osvětlení. Tyto kontaktní C-scany nedosahovaly v některých případech uspokojivých výsledků. Zvláště obtížná se tímto způsobem ukázala realizace C-scanů malých vzorků.

Proto byla v prosinci 2012 zprovozněna velká imerzní nádrž s manuálním 3-osým pojezdovým systémem (viz Obr.2). Nádrž vyrobená z polypropylenu má vnější rozměry 2000x1200x600 mm a pracovní objem imerzní lázně 1320 litrů. Maximální rozměry zkušebního kusu jsou cca 1500x1000x400 mm. Pro imerzní zkoušení je důležité, aby

lázeň neobsahovat větší množství vzduchových bublinek a nečistot. Její teplota by měla být navíc rovnoměrná a po dobu zkoušení přibližně konstantní. Proto je nádrž vybavena pískovým filtračním systémem Peraqua QT a vytápěcí jednotkou SCS 885 - 9 kW řízenou PID regulátorem OMRON E5CN.



Obr.2 Ultrazvukový NDT systém pro imerzní zkoušení

Zkoušené předměty musí být vůči sondě v průběhu imerzního zkoušení ve stabilní a přesně definované poloze. V imerzní vaně jsou proto k dispozici dva speciální profily 40x40x1750 mm s T-drážkami na dně nádrže a deset upínacích desek 80x80 mm v bocích nádrže ve výšce cca 400 mm nad dnem. Tyto části slouží pro upevnění různých upínacích přípravků. V současné době je nádrž vybavena čtyřmi posuvnými sloupy s univerzálními upínacími hlavicemi a jedním přípravkem pro zkoušky většího množství malých plochých vzorků.

Pojezdový systém vytvořený z extrudovaných hliníkových profilů, nerezových kolejnic a lineárních ložisek je přimontován přímo na horní okraj nádrže. Všechny tři pojezdové osy (X,Y,Z) jsou ovládané pouze manuálně, přičemž osy X a Y jsou vybavené polohovým snímáním pomocí minienkoderů ENC1-5-DE pracující s rozlišením cca 0.08 mm. Na konci posuvné tyče osy Z je umístěn držák sondy, který je úhlově nastavitelný kolem třech rotačních os (α , β , γ).

Významnou součástí popsaného imerzního C-scan systému je také analytický software TomoView Inspection 2.10R9. Jedná se o velice výkonný a víceúčelový software pro sběr zkušebních UT dat, jejich zobrazení v reálném čase a off-line analýzy. Nabízí celou řadu analytických nástrojů (SNR funkce, FFT, binarizer,...atd.) a podstatným způsobem tak rozšiřuje možnosti celé platformy Omniscan.

Specifickou oblastí NDT aktivit je kontrola lepených spojů. Pro tyto práce se ve VZLÚ, a.s. používá buď klasická impulsní odrazová metoda ve spojení s výše uvedeným vybavením nebo speciální defektoskopický přístroj BondMaster 1000. Jedná se o přenosné multirežimové zařízení pro nedestruktivní kontrolu kompozitních materiálů a lepených spojů. Tento defektoskop umožňuje použití rezonanční, Pitch-Catch nebo MIA metody. Nejedná se o klasický ultrazvukový přístroj, protože využívá odlišné principy zkoušení a některé z uvedených metod navíc pracují na pomezí slyšitelné a ultrazvukové části spektra. Je možné jej použít pro kontrolu lepených spojů mezi voštinou a potahem u sendvičových konstrukcí, klasických lepených spojů mezi dvěma či více kompozitními nebo kovovými částmi nebo i pro kontrolu jednotlivých kompozitních částí.

PŘÍKLADY SOUČASNÝCH NDT AKTIVIT VE VZLÚ

Ultrazvuková defektoskopie je ve VZLÚ, a.s. využívána pro kontrolu kompozitních konstrukcí vyvíjených v rámci různých evropských, státních nebo ryze komerčních R&D projektů. Jako příklady těchto aktivit je možné uvést následující projekty:

Projekt MPO FR-TI1/290

Tento projekt nazvaný „Demonstrátor kompozitové řídicí plochy velkého dopravního letounu podle předpisu CS-25“ byl zaměřen na pokročilý konstrukční a technologický vývoj primárních kompozitních dílů (klapka, křídélko) letounu v kategorii velkých dopravních letounů. V rámci tohoto úkolu řešitelský tým věnoval významnou část své pozornosti otázce kontroly kvality výroby kompozitních dílů i celých sestav. Otázka ultrazvukové nedestructivní kontroly byla řešena jak při vytváření základu výrobního předpisu kvality řídicí plochy, tak i při kontrole jednotlivých dílů nebo celých sestav zkušebních demonstrátorů před a po jejich statické nebo únavové zkoušce.

Po ukončení konstrukční fáze návrhu demonstrátorů řídicí plochy byly navrženy a vyrobeny referenční vzorky reprezentující jednotlivé části konstrukce. Tyto měřky posloužily jak pro odladění postupů nedestructivní kontroly jednotlivých částí konstrukce řídicí plochy, tak i pro nastavování citlivosti NDT systémů a ověřování jejich bezchybné funkce během prohlídek zkušebních kusů. K výrobě umělých vad typu delaminace v kompozitních dílech a typu neprolepení lepených spojů byly použity inzerty z kaptonové fólie o tloušťce 0,025 mm. Technologii výroby těchto inzertů byla věnována značná pozornost s ohledem na dosažení co nejuvěrnější napodobeniny reálného defektu (dvě zcela od sebe oddělené přesně definované plochy). Otestovány byly různé postupy výroby včetně obvodového lepení nebo laserového svařování dvou vrstev fólie. Obvodové zajištění inzertů mělo zabránit případnému průniku matrice nebo lepidla během vytvrzování do meziprostoru inzertu. Jako neoptimálnější se nakonec ukázal nejjednodušší typ inzertu vyrobený obyčejným přehnutím proužku fólie bez obvodového zajištění. Žádné problémy se zaplněním meziprostoru inzertu a jeho případné znehodnocení nebyly zaznamenány. Každá z měrek musela být po dokončení podrobena detailní ultrazvukové kontrole. Na Obr.4 je znázorněn příklad amplitudového C-scanu referenční měřky simulující vady lepených spojů v oblasti odtokové hrany řídicí plochy. Jedná se o spoje mezi potahem, pánsnicí zadního nosníku a koncovým žeb-

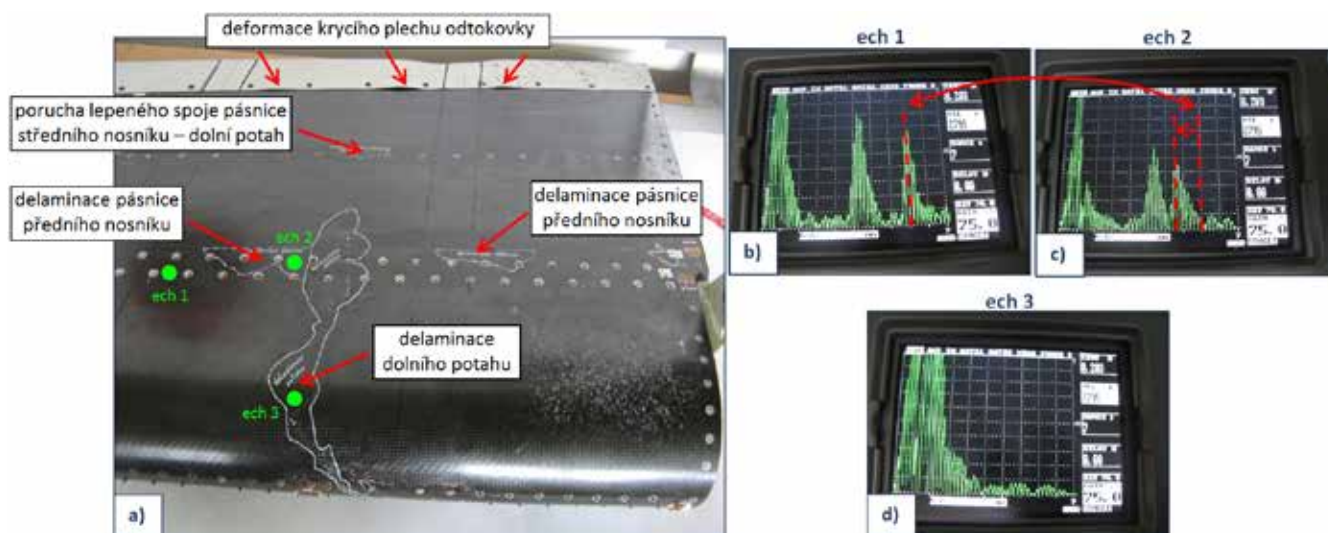
rem. Na obrázku je uveden C-scan vygenerovaný pro rozhraní potah-pánsnice. Z tohoto C-scanu je zřejmé výrazné kolísání kvality lepeného spoje způsobené pravděpodobně v důsledku nerovnoměrného přitlaku při výrobě.

Jak již bylo výše uvedeno, detailní kontrole byly podrobeny všechny zkušební segmenty a finální demonstrátory řídicí plochy. Každá ne-destructivní kontrola byla zahájena přímou vizuální prohlídkou vnějšího povrchu a nepřímou kontrolou vnitřních částí konstrukce pomocí videoendoskopu Olympus IW-2 s přímým objektivem AT 60D/FF. Poté následovala kontrola potahu a všech lepených spojů impedanční a rezonanční metodou za použití přístroje BondMaster. Nakonec proběhla klasická kontaktní ultrazvuková kontrola celé konstrukce pomocí pulzní odrazové metody.

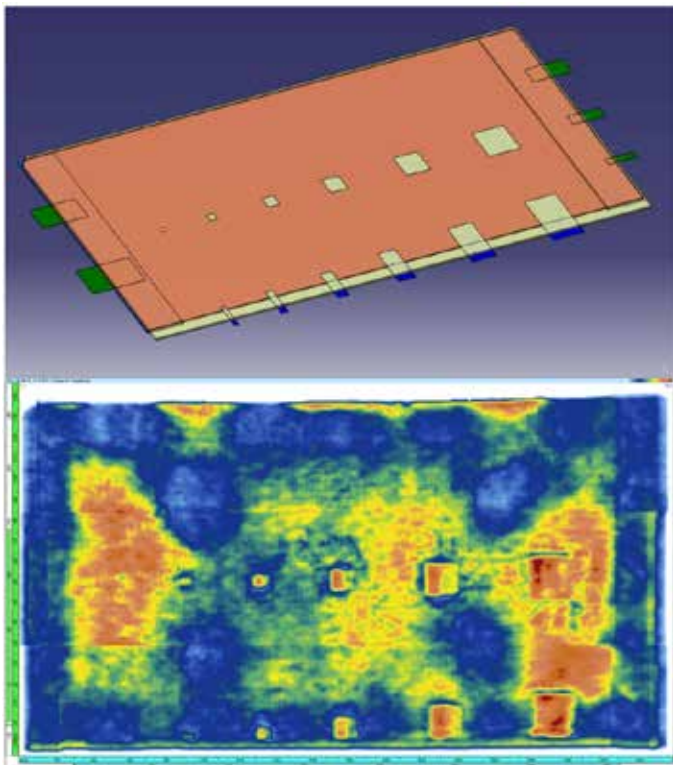
Příklad výsledků NDT kontroly demonstrátoru kompozitní řídicí plochy je uveden na Obr.3. Konkrétně se jedná o demonstrátor č.01 ve stavu po provedení jeho statické zkoušky do lomu. Během statické zkoušky došlo u tohoto zkušebního kusu k jasně viditelnému porušení dolního potahu. Jednalo se o poruchu ve formě trhliny přerušující většinu vrstev potahu ve vzdálenosti cca 312 mm od kořenového žebra. Později bylo zjištěno, že došlo rovněž k poruše stojiny předního a středního nosníku. Na obrázku Obr.3a je patrné stanovení hranic delaminací dolního potahu vycházející z místa hlavní trhliny. Echogram z tohoto místa je dokumentován na Obr.3d.

Za velmi zajímavou lze považovat indikaci delaminačního poškození pánsnice předního nosníku v blízkosti hlavní poruchy dolního potahu. V těchto místech lepený spoj zůstal překvapivě bez újmy a naproti tomu došlo k rozvoji poruchy uvnitř pánsnice a v některých místech současně i náznakům delaminace potahu. Na obrázcích Obr.3b a Obr.3c jsou pro porovnání dokumentovány echogramy z místa bez poškození a z oblasti s rozvinutou delaminací pánsnice předního nosníku. K potvrzení těchto zjištění došlo po rozřezání zkušebního kusu během projektové fáze „Ověření programu NDT“.

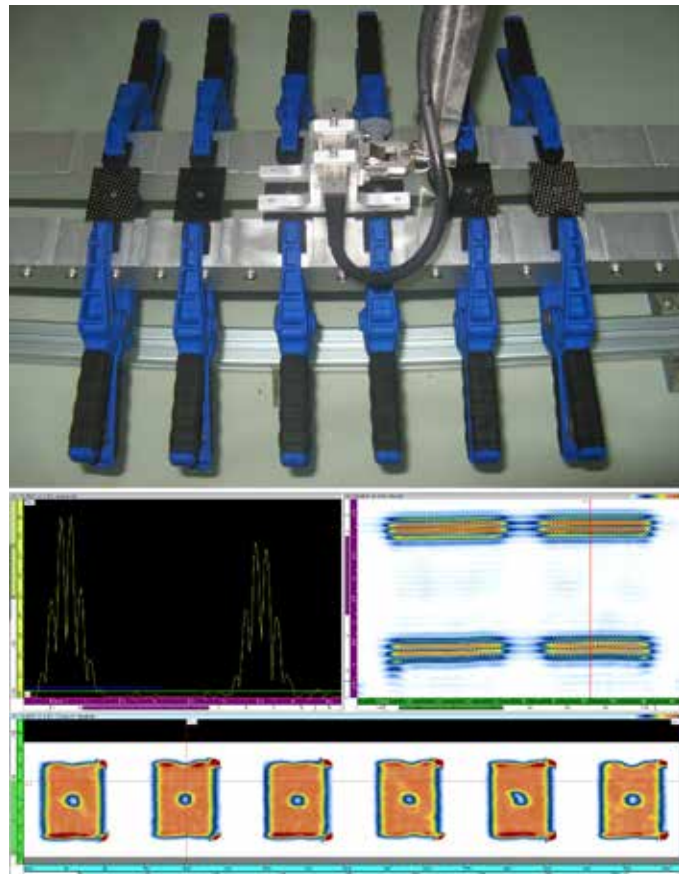
V průběhu projektu se uskutečnil také pokus o kompletní C-scan obou potahů zkušebního demonstrátoru č.03. Jednalo se o doposud největší (rozměry 1460x605x85 mm) kompozitní díl podrobený této technice v imerzní vaně VZLÚ, a.s.. Vzhledem k značně omezeným možnostem vedení sondy a snímání její polohy bylo u současného systému možné C-scan provést pouze u rovinné části potahů. Zakřivená oblast náběžné hrany byla proto podrobena klasické kontaktní A-scan kontrole.



Obr.3 Ultrazvuková kontrola demonstrátoru kompozitní řídicí plochy č.01: a) stanovení rozsahu poškození v okolí hlavní poruchy dolního potahu, b) echogram č.1 v místě bez vady, c) echogram č.2 indikující delaminaci pánsnice hlavního nosníku, d) echogram č.3 indikující delaminaci dolního potahu



Obr.4 C-scan referenční měřky simulující oblast lepených spojů odtokové části řídicí plochy



Obr.5 NDT kontrola malých vzorků s vrubem pro kvalifikační zkoušky nového kompozitního materiálu

KVALIFIKACE A CERTIFIKACE NOVÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Nové typy leteckých konstrukcí často využívají zcela nové, vylepšené nebo různým způsobem modifikované materiály. V současné době se nejčastěji jedná o kompozitní materiály založené na bázi polymerní matrice a uhlíkových, skleněných nebo aramidových vláken. Žádný z těchto nových materiálů nemůže být používán v konstrukci letadel, aniž by nebyl podroben detailním zkouškám a analýzám. Proces kvalifikace a certifikace je základním předpokladem pro zajištění toho, aby tyto materiály splňovaly všechny požadavky kladené z pohledu bezpečnosti, spolehlivosti a funkčnosti.

VZLÚ, a.s. již tradičně zajišťuje tento druh služeb pro své domácí i zahraniční zákazníky z leteckého průmyslu. V případě kompozitních materiálů je nedestruktivní kontrola integrální součástí celého procesu kvalifikace a certifikace. Testovaný materiál je obvykle dodán od výrobce v podobě desek, ze kterých jsou ve VZLÚ, a.s. vyrobeny zkušební vzorky. Pokud zákazník neprováděl vlastní výstupní NDT kontrolu tohoto polotovaru, je tato provedena ještě před jeho rozřezáním. Další prohlídka je realizována po dokončení všech obráběcích operací. Všechny finální zkušební vzorky musí projít důkladnou NDT kontrolou vylučující přítomnost větších vnitřních defektů způsobených obráběním, které by mohly ovlivnit výsledky následných mechanických nebo jiných zkoušek. Pozornost kontroly se obvykle zaměří především na okraje obráběných ploch, kde hrozí vznik delaminací.

Protože se obvykle jedná o stovky nebo tisíce zkušebních vzorků, není z časových důvodů možné provádět kontrolu kontaktním A-scannem. Pro tyto práce se osvědčil C-scan v imerzní nádrži, který kromě vyšší produktivity nabízí i výrazně lepší způsob dokumentace výsledků kontroly. Typický výstup a uspořádání NDT kontroly zkušebních vzorků je patrný na Obr.5.

EU PROJEKTY IMAC-PRO A IMS&CPS

Tyto projekty podporované Evropskou Unií se zaměřily na oblast vývoje inovativních výrobních technologií zaměřených především na výrobu kompozitních profilů využívající nové postupy a nové kompozitní materiály.

Hlavním cílem projektu Imac-Pro (Industrialization of Manufacturing Technologies for Composite Profiles) byl vývoj kompletního integrovaného řetězce pro cenově efektivní sériovou výrobu optimalizovaných CFRP profilů vhodných pro všechny typy leteckých konstrukcí. Pro dosažení vysoké produktivity bylo od počátku počítáno s využitím nových textilních technologií v kombinaci s pokrokovými technologiemi injektáže a vytvrzování (např. mikrovlnný ohřev). Vývojové práce byly rozděleny do dvou hlavních směrů, z nichž první směr se zaměřil na oblast výroby relativně menších podélníků s konstantním průřezem vhodných například pro systém podélných výtuh trupových panelů. Druhý směr byl naopak věnován oblasti výroby silnostěnným nebo rozměrnějších podlahových nosníků a žeber s konstantním nebo proměnným průřezem.

Nedestruktivní kontrola se v tomto projektu stala nedílnou součástí procesu hodnocení nově vyvíjených výrobních postupů. Kompozitní profily vyrobené na prototypch výrobních strojů musely projít detailní C-scan kontrolou před a v některých případech i po jejich mechanických zkouškách. Jednalo se obvykle o profily typu T, L nebo I. Při NDT kontrole byly nejprve vytvořeny amplitudové C-scany všech rovinných částí profilů (pásnice a stojiny) vygenerované pro koncové echo nebo meziecho. Fakt, že se ve všech případech jednalo o relativně rovné, přímé profily značně zjednodušilo postup prací. V případě zakřivených profilů by musely být vytvořeny speciální přípravky s rolnami umožňující definovaný pohyb kontrolovaného profilu vůči sondě (resp. sondy vůči profilu) a současně i snímání polohy ve směru skenování.

Po prohlídce rovných částí profilů následovala kontrola rádiusů, kterou lze obecně považovat za složitější úlohu. Tato část se u jednotlivých typů profilů často výrazně odlišovala. Proto bylo pro úspěšnou kontrolu naprosto nezbytné znát detailní informace o skladbě a vnitř-

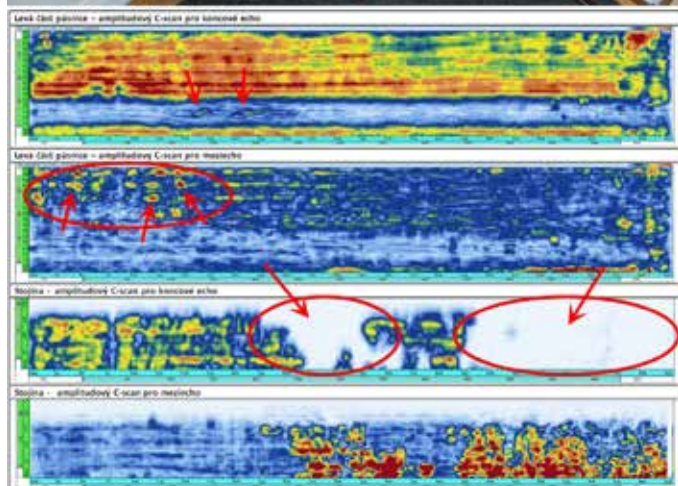
ním uspořádání profilu. Kontrolu rádiusových přechodů bylo zpočátku možné provádět jen pomocí A-scanu a jednoměničové imerzní sondy Panametrics V310-SM vybavené distanční předsádkou. Toto řešení se ukázalo jako vhodné i pro složitější profily s kombinovaným rádiusovým přechodem a měnicím se průřezem. U profilů s konstantním průřezem a klasickým kruhovým rádiusovým přechodem bylo možné provést C-scan pomocí rádiusové PA sondy.

Projekt IMS&CPS (Innovative Material Synergies & Composite Processing Strategies) byl v porovnání s Imac-Pro více zaměřen na vývoj a využití nových materiálů. Testovány byly především možnosti nanočástic (především uhlíkových nanotub – CNT) pro zlepšení užitných vlastností polymerních kompozitů. Současně se výzkumné a vývojové aktivity zaměřily i na vývoj cenově efektivních výrobních technologií umožňující využití výhod těchto nových modifikovaných materiálů při výrobě multifunkčních kompozitních dílů s vysoce lokálně definovanými vlastnostmi (například zlepšení vlastností spoje podélník-potah).

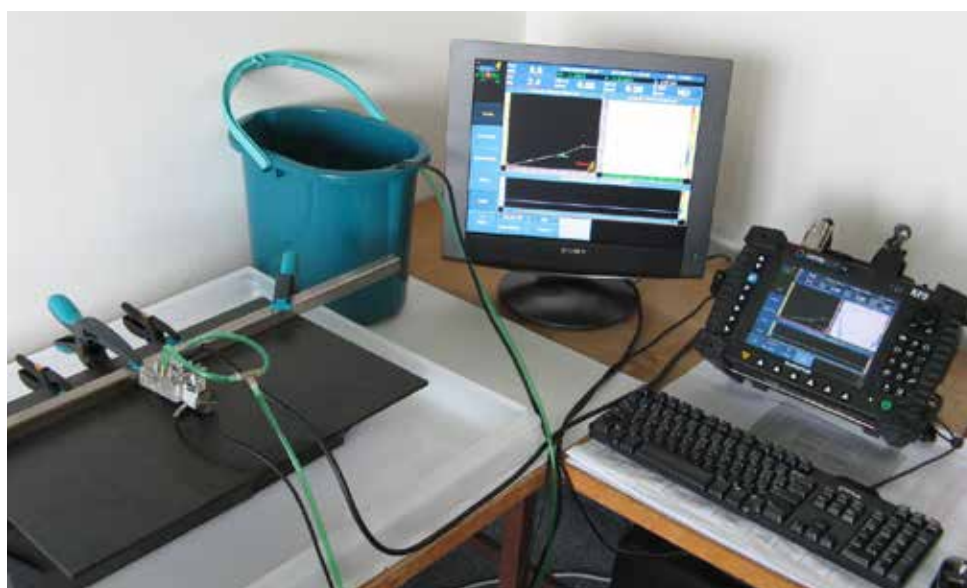
Pomocí ultrazvukové metody byly v průběhu prací na projektu IMS&CPS kontrolovány nejrůznější typy kompozitních profilů, nosníků, desek a vyztužených panelů. Vzhledem k tomu, že speciální imerzní PA sondy a imerzní nádrže se skenovacími pojízdky byla ve VZLÚ, a.s. k dispozici až v závěru řešení projektu, musely být potřebné C-scany prováděny pomocí běžné PA sondy v kombinaci s kontaktní imerzní předsádkou s přívodem vody pomocí čerpadla nebo pomocí různých improvizovaných imerzních nádržek. Tento způsob se ukázal jako značně problematický s ohledem na dodržení konstantní akustické vazby a zajištění pohybu snímače polohy. Zvláště nevhodný se ukázal tento způsob kontroly například při stanovování rozsahu impaktového poškození malých a úzkých T-vzorků o šířce menší než samotná PA sonda. Vzhledem k omezeným rozměrům vzorků bylo nutné poměrně složitě řešit pohyb polohového miniencoderu. K zásadnímu zlepšení došlo až po zprovoznění velké imerzní vany vybavené manuálním pojízdkovým systémem.

EU PROJEKT CERFAC

Mezi velmi důležité oblasti ve vývoji nových typů kompozitních leteckých konstrukcí zcela jistě patří i problematika spojování. Ta se stala náplní projektu CERFAC (Cost Effective Reinforcement of Fastener Areas in Composites), který bude dokončen v letošním roce. Jeho hlavním cílem je zvýšení poměru pevnosti nových typů spojů k jejich



Obr.6 Ultrazvuková C-scan kontrola kompozitního profilu pomocí kontaktní Phased Array sondy



Obr.7 Kontaktní C-scan kontrola kompozitního T-vzorku pro ohybové zkoušky

výrobním nákladům při současném zlepšení damage tolerance vlastností. Těchto zlepšení by mělo být dosaženo, aniž by u nových typů spojů došlo k zásadnější změně hmotnosti, tloušťky nebo snížení tuhosti. Nová řešení by měla vést k významné redukci počtu mechanických spojů a celkovému snížení výrobních nákladů (až 20%). Těchto smělých cílů bude dosaženo díky nekonvenčním konstrukčním řešením spojů, využívání nejmodernějších kompozitních materiálů a výrobních technologií (NCF, TFP-Tailored Fiber Placement, FPP-Fiber Patch Preform, atd.).

Ultrazvuková NDT kontrola se u tohoto projektu logicky více zaměřila na kontrolu spojů. Jednalo se o T-vzorky pro ohybové a smykové zkoušky a tahová zkušební tělesa s tzv. Pi-spojem. Kontrola před mechanickými zkouškami byla založena na vyhodnocení C-scanů rovinných částí v místě a bezprostřední blízkosti spojů. Obdobně jako u výše uvedených EU projektů musela být použita kontaktní C-scan metoda (viz Obr.7), protože po významnou část projektu nebyla k dispozici velká imerzní nádrž. Kontrola rádiusových přechodů probíhala za použití A-scan metody pomocí jednoměničové sondy s distanční předsádkou.

ZÁVĚR

Ultrazvuková defektoskopie se ukazuje jako nenahraditelná v oblasti výzkumu, vývoje a výroby kompozitních konstrukcí. VZLÚ, a.s. se podařilo v uplynulých letech tuto oblast významně posílit jednak díky postupné modernizaci přístrojového vybavení a jednak díky aktivnímu získávání praktických zkušeností v průběhu řešení různých národních a evropských projektů. Tyto zkušenosti jsou následně zúročovány při realizaci komerčních R&D zakázek.

Za jeden z nejdůležitějších milníků v rozvoji ultrazvukové defektoskopie ve VZLÚ, a.s. v posledních letech lze považovat zavedení Phased Array technologie a imerzní C-scan metody. Implementace a uvedení do praxe těchto nových technik je však jen prvním krokem a základním předpokladem ke zvládnutí nejmodernějších ultrazvukových technik, které jsou již nyní běžně používány u předních leteckých výrobců. Současné NDT vybavení pro imerzní zkoušení ve VZLÚ, a.s. má celou řadu zásadních technických omezení, které bude nutné postupně řešit. V současné době například probíhá úprava stávajícího upínacího systému, který by po dokončení měl lépe vyhovovat upínání i tvarově složitějších zkušebních kusů. Další velkou výzvou je automatizace pojezdového systému, která by významně zlepšila kvalitu C-scanů, a tím i celkovou úroveň NDT kontroly kompozitních dílů.

PODĚKOVÁNÍ

Autor by chtěl touto cestou poděkovat za finanční podporu poskytnutou prostřednictvím institucionální podpory z rozpočtu Ministerstva průmyslu a obchodu. Tyto finanční prostředky byly využity pro rozvoj nových ultrazvukových metod a pomohly nám tak posunout naše technické možnosti při vývoji nových typů kompozitních konstrukcí.

Autor dále vysoce oceňuje spolupráci s kolegy z Aero Vodochody a s partnerskými subjekty z evropských projektů IMS&CPS, Imac-Pro a CERFAC.

Literatura:

- [1] Hospodka Z., Křena J.: Automatizace NDT pro výrobu primárních kompozitních dílů, Transfer č.11, str.26-31, VZLÚ, a.s., Praha 2010.
- [2] Regazzo R., Regazzová M.: Ultrazvuk – základy ultrazvukové defektoskopie, BEN – technická literatura, Praha 2013.
- [3] Štekner B. a kol. : Nedestruktivní zkoušení lepených spojů,V 715/64, VZLÚ Letňany, Praha 1963.
- [4] Kreidl M., Šmíd R.: Technická diagnostika, BEN-technická literatura, Praha 2006.
- [5] Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline, Olympus NDT, Third printing 2007.
- [6] Bělský P., Hásek J., Štefl M.: Výrobní předpis kvality kompozitové řídicí plochy, R-5510, VZLÚ, a.s., Praha 2013.
- [7] Flaška M., Růžička A., Štekner B.: Speciální letecké technologie, skripta ČVUT 1996.

Mechanical resistance of a composite profile manufactured by a novel low-cost technology

Martin Kadlec VZLÚ, Timo Grieser Institut fuer Verbundwerkstoffe GmbH, Pierre Severin Coexpair s.a.

This article reviews measurement methods and results from a beam testing to make prerequisites about mechanical resistance of a low-cost profile manufactured using a novel carbon fabric preform technology. The T- and I-sections are used in primary aerospace construction such as wings and fuselages where they are used as stiffeners, beams, and various complex structures with integrated parts and devices. An I-beam was loaded by 4-point bending and deformations were measured using an optical system, strain gages, and LVDT strings. The experiment provided data for finite element modelling and proved the high mechanical resistance that exceeded numerical predictions.

PROJECT IMS&CPS INTRODUCTION

Mutation of transport industry to carbon fibre reinforced polymer (CFRP) is now unavoidable in order to reduce our mobility environmental imprint. This sector is at a turn of its conversion from metal to composite, which should impose a radical rethinking of the whole supply chain. Combined developments of materials and matched processes was the main strategy of IMS&CPS project, only such a concerted effort could favour best synergies in the final part within a cost-effective process.

The Main challenges for definitive conversion of transport sector to CFRP remains: (1) improvement of mechanical properties (mainly impact properties and interlaminar failure) (2) development of cost-effective manufacturing processes. IMS&CPS addressed both challenges. The aim was achieved by manufacturing CFRP by closed mould technologies: adapted RTM and SQRTM (RTM with prepreg) processes, the today most compe-

titive processing alternatives to autoclaves. Cheap and automated 3D-preform was also developed for offering highest and easiest part integration in order to reduce at maximum assembly costs, which counts for one third of a CFRP part costs. Such improvements were studied in IMS&CPS [1].

COMPOSITE BEAM MANUFACTURING

T-section geometries

Most published studies focus on classic T-joints made of web-flange parts that are co-cured or bonded with a skin. However, to enhance the performance of the T-joint specimens, various geometries and designs have been studied, including overlamination, modular Pi profiles [2], z-direction pinning [3], or bio-inspired design [4] (Fig. 1). Experiments examining T-joints made of skin and flange parts were undertaken by various authors, revealing that the skin/flange interface near the junction is critical [5, 6].

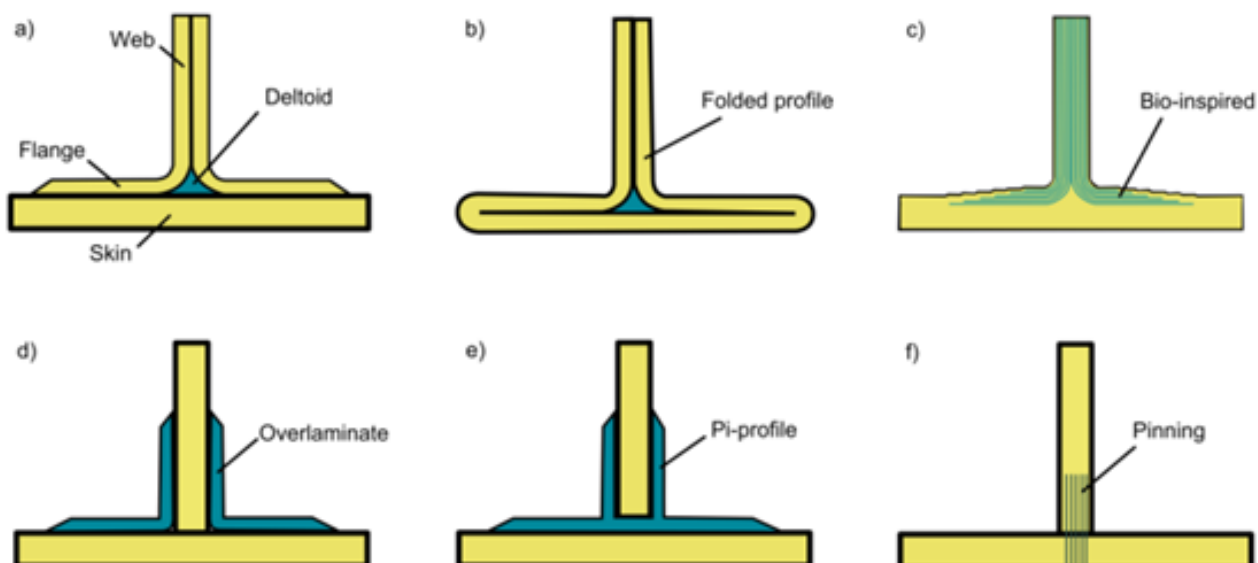


Figure 1 - Various designs of T-section geometries: a) Classic design with a filled deltoid, b) folded profile studied in this work, c) bio-inspired, d) overlaminated, e) pi-profile modular, f) Z-pinning.

Automatic preforming

The folded I-profile preforms for RTM technology were manufactured utilising the Continuous Profile Preforming System (CPPS) developed in the frame of the IMS&CPS project [7]. The dry fabric plies can be stacked, folded, fixed, and cut in single process step (Fig. 2). In this

case, stitching was utilized as fixing technology and the seams were applied near the web/flange junctions. The lay-up used for the I-beams is shown in Fig. 3. Prepregs for the SQRTM beam were preformed manually.

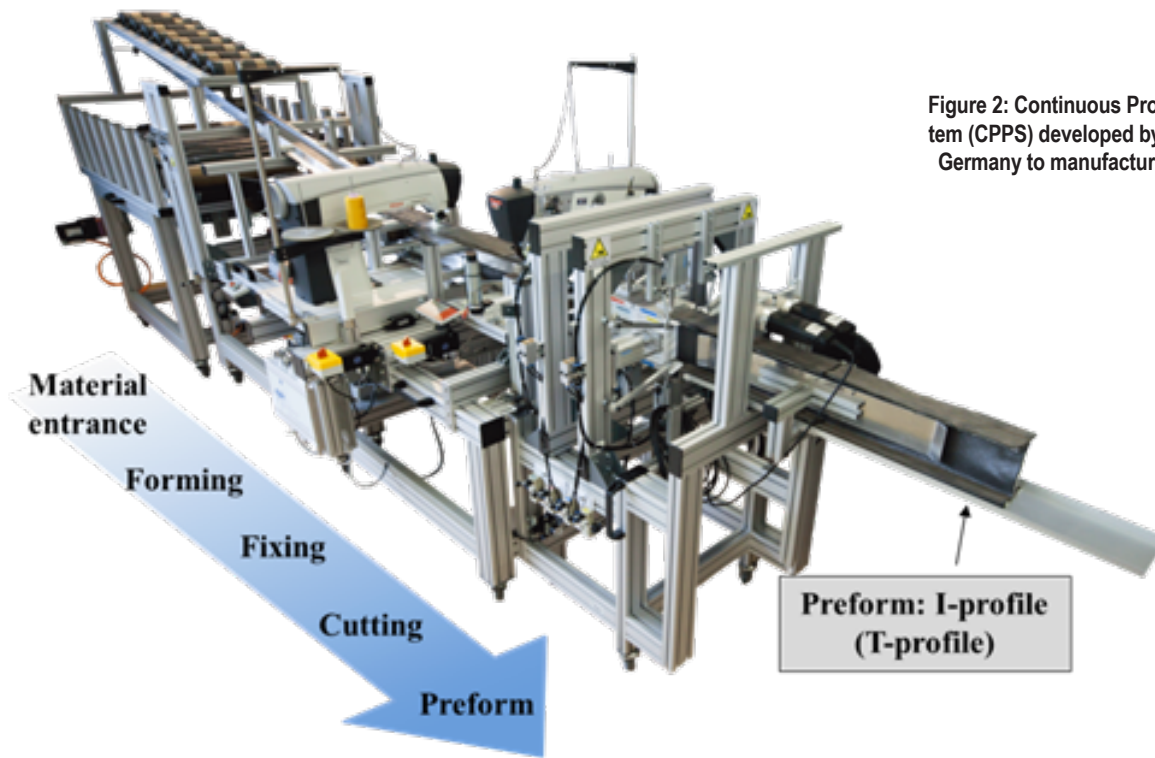


Figure 2: Continuous Profile Preforming System (CPPS) developed by the IVW institute in Germany to manufacture I-profile preforms

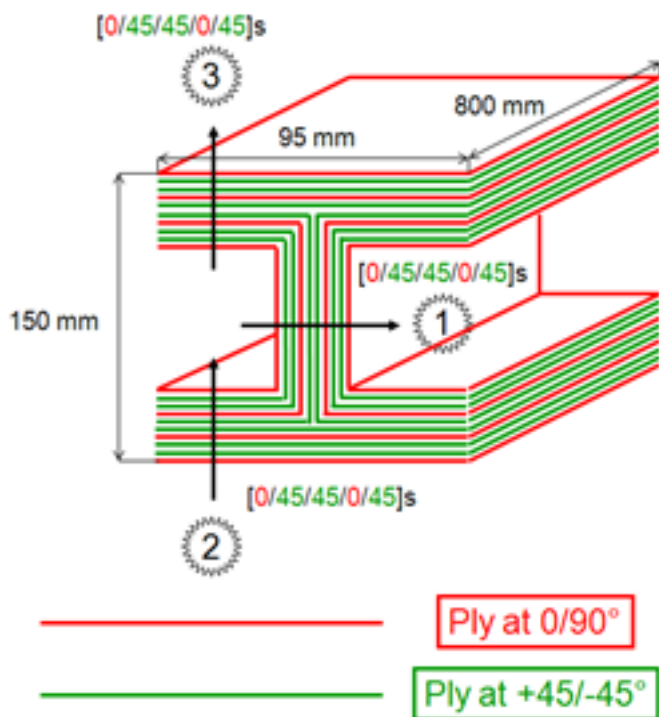


Figure 3: Lay-up used for the manufactured and tested I-beam.

SQRTM technology

The tested beam was made of prepreg with 40% of M21 resin and HTA 6K carbon fibres as 2x2 twill weave with fibre mass of 285 g/m². M21 is a high performance, very tough epoxy matrix for use in primary aerospace structures. The Same Qualified Resin Transfer Moulding (SQRTM) method was used.

What sets SQRTM apart from standard RTM is that, in place of a dry fibre preform, it substitutes a prepreg lay-up. Prepreg plies are arranged within the mould, the mould is closed, and then, somewhat counter intuitively, liquid resin is injected into the tool. SQRTM is similar to RTM in that a vacuum is drawn on the tool and the press and tool are heated. With SQRTM, however, heat is applied at the same ramp rate as specified for the prepreg under autoclave conditions, and resin is injected via a process controller that also monitors and adjusts the press temperature. The SQRTM cure cycle can be as much as two hours shorter than an autoclave cycle. There are other advantages compared to conventional RTM. Part thickness is controlled by matched tooling, avoiding the potential thickness variation inherent in the vacuum bagging process [8]. In terms of the IMS&CPS project, a complex structure with 2 x 1 meter curved skin of a nose landing gear door was developed using the SQRTM (Fig. 4).

BEAM BENDING TEST METHODS

The beam was delivered to VZLU for the 4-point bending test (Fig. 5 and 6). The aim of the testing was to validate the FEM model in terms of stiffness and strength predictions.

The testing was supported by:

- MTS testing frame of a load-capacity of 1MN.
- Two steel beams connected to the CFRP beam by aluminium blocks and epoxy resin.

- Lower supports bolted to the ground. Upper supports attached to the loading beam connected to the loading machine.
- Modular strain-gauge data acquisition system BMCM in specified locations (Fig. 8)
- LVDT String system to measure displacements. The displacements were measured at 10 points displayed in Fig. 7.
- ARAMIS system for contactless optical measurements of deformation.



Figure 4: Nose landing gear door developed in collaboration with partners of the FP7 project IMS&CPS. This realisation demonstrates the maturity of the SQRTM process [9].



Figure 5: Overall photo front side



Figure 6: Overall photo rear side

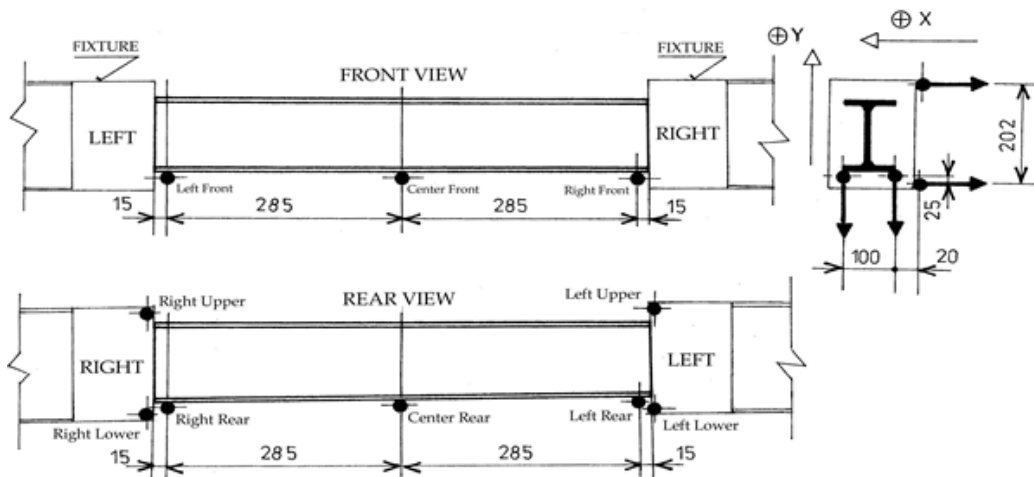


Figure 7: Displacement measurement diagram

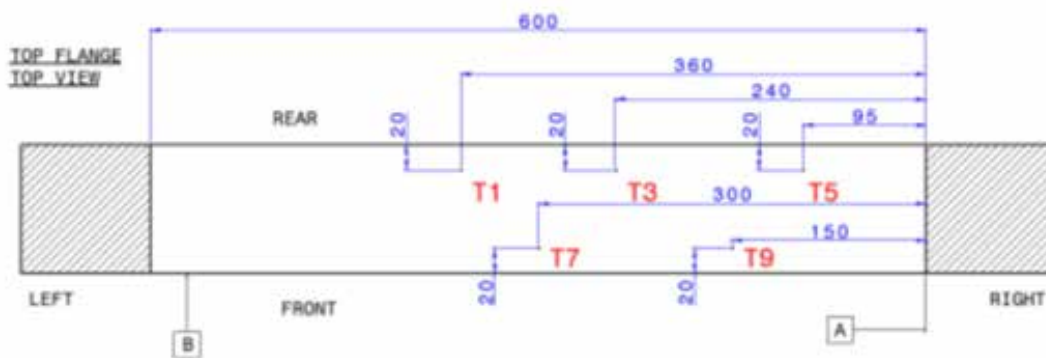


Figure 8: Example of Strain gage positions (top flange - top view)

BENDING TEST RESULTS

The beam was loaded in static 4-point bending up to failure. The following steps were performed:

- Preload up to 3 kN and unloading
- Reset of all instrumentation before starting of the next static test session
- Strain, deflection and load data scans were taken step by step at each 1 kN of loading up to 23 kN and then returned to 0%.

The buckling was predicted for 10722 N. The failure did not occur when reaching the predicted value. Therefore, the loading continued up to 23 kN where the test stopped because of possible resin and test jig bolts failure. Beginning at 15 kN up to reached 23 kN load, there was significant buckling of both flange and web section (Fig. 9 to Fig. 11). There was no

visible residual deformation after unloading (Fig. 12).

The software used for the predictions was Femap as a pre-postprocessor and NXNastran as a solver. The comparison with FE model in linear deformations computed by Coexpair looked very well for displacements and strain gages on the flanges (Fig. 13 displacement and Fig. 14 for strain). Only the web rosettes had quite higher values, maybe the shear modulus in FEM can adjust the difference.

At the loading of about 15 kN, a non-linear deformation occurred and caused significant deviations of the strain in the flanges that depended on the buckling mode. The buckling mode was predicted with 4 local extremes (Fig. 15). The visible buckling state of the flanges and the measured displacements of the web section using the ARAMIS system showed 5 local extremes (Fig. 16).



Figure 9: Buckling of the upper flange buckling from front side.



Figure 10: Buckling of the upper flange from rear side. Symmetrical mode with 5 local extremes is visible.



Figure 11: Buckling of the upper flange at maximum load.



Figure 12: The beam after the test with no visible residual deformation

CONCLUSION

A low-cost profile manufacturing system was developed and different types of I-profiles were tested. Profiles, manufactured by the SQRTM process were successfully tested by 4-point bending. The results showed very good agreement of predictions and measurements in terms of displacement and strain in linear deformations. The experiment provided data for finite element modelling and proved the high mechanical resistance that exceeded numerical predictions.

Acknowledgment

The work has been funded by the European Union Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013), as part of the project IMS&CPS (Innovative Material Synergies & Composite Processing Strategies). The beam tested in VZLU was preformed and cured in Coexpair facilities. Their work is gratefully acknowledged.

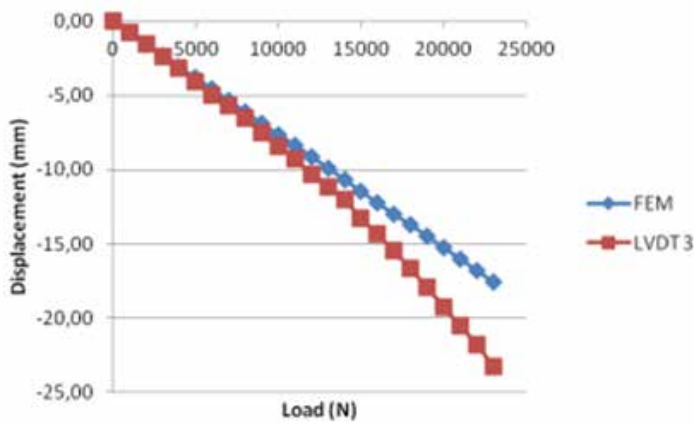


Figure 13: Displacement of the beam centre in comparison with FE model.

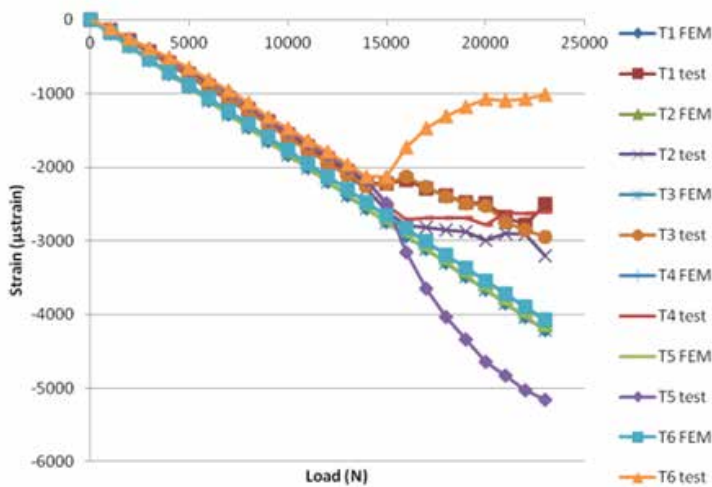


Figure 14: Top flange strain comparison with FEM for T1-T6. Buckling is evident at 15 kN load.

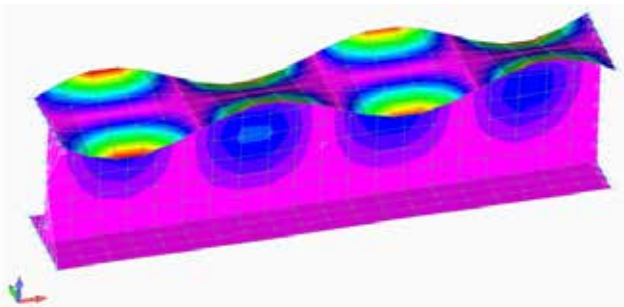


Figure 15: Buckling mode predicted by FEM.

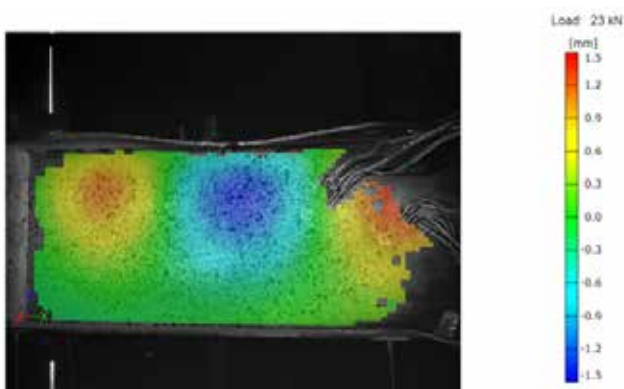


Figure 16: Measured buckling of the web at maximum load. Displacement Z normal to the web section is visualised in colour.

Literatura:

- [1] Innovative Material Synergies & Composite Processing Strategies. 7th framework programme. Annex I. Project abstract. 2010.
- [2] Tserpes KI, Pantelakis Sp, Kappatos V. The effect of imperfect bonding on the pull-out behavior of non-crimp fabric Pi-shaped joints. *Comp Mater Sci* 2011;50(4):1372-1380.
- [3] Toral J, Castanié B, Barrau JJ, Swiergiel N. Multi-level analysis of low-cost Z-pinned composite joints: Part 2: Joint behaviour. *Compos Part A* 2011;42(12):2082-2092.
- [4] Burns LA, Mouritz AP, Pook D, Feih S. Bio-inspired design of aerospace composite joints for improved damage tolerance. *Compos Struct* 2012;94(3):995-1004.
- [5] Thomson RS, Falzon PJ, Nicolaidis A, Leong KH, Ishikawa T. The bending properties of integrally woven and unidirectional prepreg T-sections. *Compos Struct* 1999;47(1-4):781-787.
- [6] Orifici AC, Shah SA, Herszberg I, Kotler A, Weller T. Failure analysis in postbuckled composite T-sections. *Compos Struct* 2008;86(1-3):146-153.
- [7] Grieser T, Rieber G, Mitschang, P. Production of continuously formed high performance preforms for FRPC profiles. *Proceedings of ECCM15, Venice, 2012.*
- [8] Black S, SQRTM enables net-shape parts. High performance composites, Sep 2010. <<http://www.compositesworld.com/articles/sqrtm-enables-net-shape-parts>>
- [9] Coexpair s.a. <<http://www.coexpair.com/>>

Vplyv materiálu formy a separátorov na kvalitu povrchu kompozitných dielov

Pavol Vittek, Fakulta strojní - ČVUT

Článok posudzuje vhodnosť použitia separátorov pre jednotlivé materiály foriem a vplyv rôznych materiálov foriem a separátorov na kvalitu povrchu kompozitných dielov.

ÚVOD

Kompozitné diely sú často krátko tvarovo zložené, a preto je potrebné zaistiť ich bezpečné odformovanie po ukončení výrobných technológií. Nesprávna funkcia zvoleného separačného prostriedku môže spôsobiť fatálne poškodenie vyrábaného dielu a veľké finančné straty, pretože náklady spojené s opravou, prípadne výrobu nových foriem určených na výrobu kompozitných dielov sú často veľmi vysoké. Preto je dôležité zvoliť správnu kombináciu materiálu formy a separátoru, ktorá bude spoľahlivo fungovať a zabezpečí maximálnu životnosť formy.

NÁVRH EXPERIMENTU

Experiment bol naplánovaný tak, aby medzi sebou porovnal vplyv kombinácie 4 materiálov foriem a 5 druhov separátorov na potrebnú odtrhovú silu a výslednú drsnosť jednotlivých vzoriek. Pre zaujímavosť boli v experimente použité dva separačné „nano“ produkty a málo využívaný pozinkovaný plech.

Materiál a parametre vzoriek

Vzorky boli vyrobené zo skleneného prepregu HexPly 1454 GM/50%1035. Ide o sklenený tkaninový prepreg s prímiesou farbiva. Vlákennú výstuž tvorí sklenená tkanina s keprovou väzbou. Pojivom prepregu je epoxidová živica, ktorá môže byť vytvrdzovaná pri teplotách v rozmedzí 100°C až 150°C. Jednotlivé vrstvy prepregu rozmerov cca 100 x 25 mm boli na seba skladané v počte 10 vrstiev. Medzi piatou a šiestou vrstvou bol umiestnený prípravok (oceľový háčik), potrebný k meraniu hodnôt odtrhovej sily.

Materiály foriem

Pred použitím boli drsnosti foriem premerané drsnomerom Mitutoyo SJ-301. Ako formy boli použité 4 materiály:

- | | | |
|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| • Sklo: | $R_a = 0,01 \mu\text{m}$, | $R_z = 0,1 \mu\text{m}$ |
| • Leštený oceľový plech: | $R_a = 0,49 \mu\text{m}$, | $R_z = 2,69 \mu\text{m}$ |
| • Pozinkovaný plech: | $R_a = 0,53 \mu\text{m}$, | $R_z = 2,75 \mu\text{m}$ |
| • Hliníkový plech (dural): | $R_a = 0,53 \mu\text{m}$, | $R_z = 3,46 \mu\text{m}$ |

Separátory

- Ako separátory boli použité:
- Frekote 700-NC – semipermanentný separátor, výrobca Loctite Henkel Inc.
- Permagard – s obsahom nanočastíc kremíku, od firmy Nanotrade s.r.o., primárne určený k ochrane povrchov pred nečistotami a vlhkosťou

- Lackgard – s obsahom nanočastíc kremíku, od firmy Nanotrade s.r.o., primárne určený k ochrane povrchov pred nečistotami a vlhkosťou
- Mirror Glaze 16 - voskový separátor, výrobca Meguiar's
- PVA (Polyvinylalkohol) - fóliový separátor, dodávateľ firma Havel Composites CZ s.r.o.

TECHNOLÓGIA VÝROBY

Pre správne priľnutie vzoriek k povrchu formy a eliminovaniu prípadných vnútorných vzduchových bublín, bolo zvolené vytvrdzovanie technológiou lisovania pomocou vákuua, bez použitia odtrhovej tkaniny.

Na forme bola nasledujúca skladba vrstiev:

- separátor - aplikovaný v závislosti na konkrétnom type
- kompozit - v počte 10 vrstiev
- perforovaná priepustná fólia
- rozvodná tkanina - slúžiaca k rozvodu vákuua a pohltenu prebytočnej živice
- vákuovacia fólia pripevnená k forme pomocou tesniacej pásky

APLIKÁCIA SEPARÁTOROV

Pred každým použitím formy a aplikáciou separátoru, bolo potrebné zľahka odstrániť zvyšky materiálu po predošlom použití oceľovou škrabkou a dôkladne očistiť acetónom. Separátory boli na formy nanesené podľa príslušného návodu na použitie.

Permagard a Lackgard

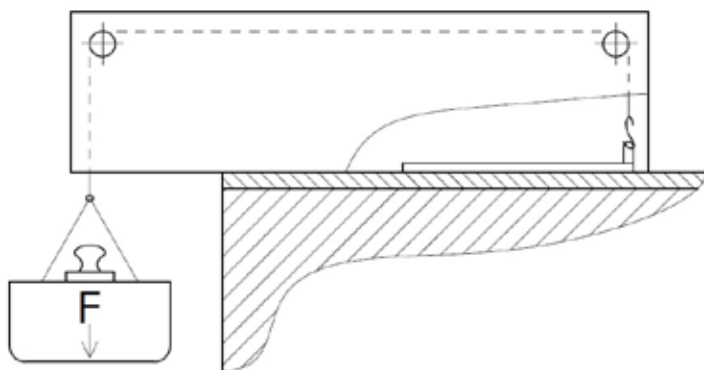
Oba separátory boli nanesené štetcom na formu v troch vrstvách. Každá vrstva bola po odparení rozpúšťadla (cca. 20 min.) ručne preleštená.

VYTVRDZOVANIE

Vytvrdzovanie prebiehalo technológiou lisovania pomocou vákuua v komorovej peci s cirkuláciou vzduchu pri teplote 125°C, s výdržou 90 min. a gradientom zmeny teploty 3°C/min., za použitia vákuového čerpadla.

MERANIE HODNÔT ODRHOVÝCH SÍL

Za účelom merania odtrhových síl bolo potrebné pripraviť meracie zariadenie (obr. 1). Pozostávalo z oceľového plechu ohnutého do tvaru „U“ a krátkych oceľových tyčiek. Do visiacej misky pripojenej motúžkom s háčikom ku kompozitnému vzorku sa ukladali závažia. Výsledná hmotnosť potrebná k oddeleniu vzorky od formy bola následne meraná na váhach. Vzhľadom k charakterom merania postačovalo hmotnosť zaokrúhľovať na celé desiatky gramov. Hmotnosti boli gravitačným zrýchlením $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ prenášobené na silu v Newtonoch.



Obr. 1 Meracie zariadenie a schéma merania odtrhových síl

MERANIE DRSNOSTÍ VZORIEK

Meranie drsností vytvrdených vzoriek bolo vykonávané kolmo na smer odlupovania vzoriek vo vzdialenostiach 25, 50 a 70 mm od dolného okraja vzorku. Hodnoty pre vzdialenosť 70 mm boli nepoužiteľné z dôvodu negatívneho ovplyvnenia povrchu prítomnosťou háčika v tejto oblasti. Meraná bola drsnosť R_a (stredná aritmetická odchýlka profilu) a R_z (najväčšia výška profilu).

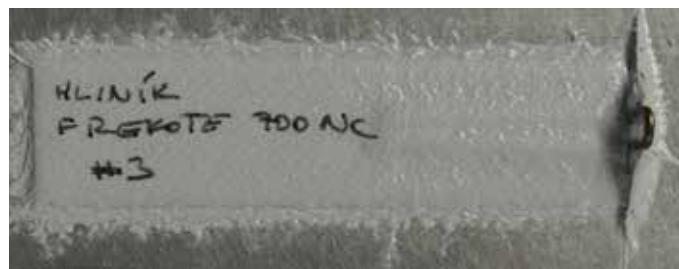
VYHODNOTENIE EXPERIMENTU

Z grafu zhrnutia hodnôt odtrhových síl (graf 1) je možné sledovať výborné hodnoty pri použití separátora Frekote 700-NC, okrem aplikácií na oceľ. Dobré hodnoty dosahuje separátor Permagard, rovnako okrem použitia v kombinácii s oceľou. Ako nevhodný pre použitie je možné označiť separátor Lackgard, ktorého vzorky aplikované na oceľ a pozinkovaný plech, bolo možné oddeliť len pri vynaložení hrubej manuálnej sily a vzorky na skle zostali pevne prichytené k povrchu formy. Separátor Mirror Glaze 16 zlyhal pri použití v kombinácii so sklom a Polyvinylalkohol so separátorom Permagard dosiahli celkovo priemerné hodnoty odtrhových síl. Pozinkovaný plech zlyhal v 40% aplikáciách. Najvyššie odtrhové hodnoty boli dosiahnuté pri použití ocele ako materiálu formy. Najvhodnejším materiálom pre použitie so všetkými typmi separátorov, vychádza hliníkový (duralový) plech.

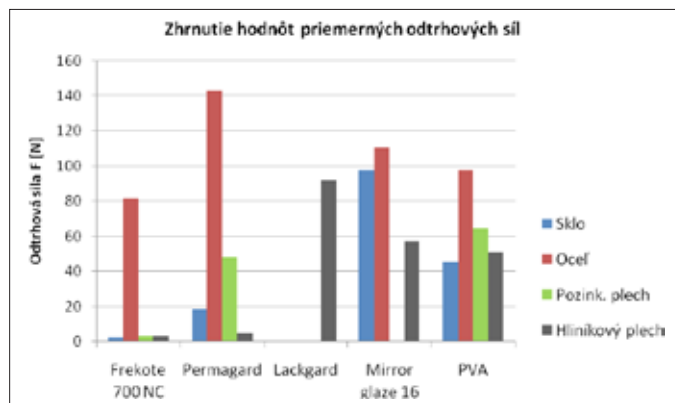
Z grafov zhrnutí priemerných drsností R_a a R_z (graf 2, graf 3) je viditeľné, že aj keď pre separátor Frekote 700-NC boli namerané najnižšie hodnoty odtrhových síl, dosiahnuté drsnosti sú priemerné. Dobré hodnoty boli dosiahnuté pri použití separátorov Permagard a Mirror Glaze 16. Najlepšie dopadlo PVA a najhoršie separátor Lackgard, keď v kombinácii s pozinkovaným plechom zostali kúsky živice z povrchových vrstiev vzoriek prichytené na forme. Prichytené kúsky živice z povrchových vrstiev vzoriek zostali na forme aj pri kombinácii pozinkovaného plechu so separačným voskom Mirror Glaze 16.

Z pohľadu drsnosti povrchu na vhodnosť materiálu formy, sú najvyššie hodnoty drsností dosiahnuté pre oceľovú formu a najnižšie pre sklo. Jeho využitie je ideálne len na rovinné formy bez zakrivení, a preto je možné považovať ako optimálny materiál hliník (dural).

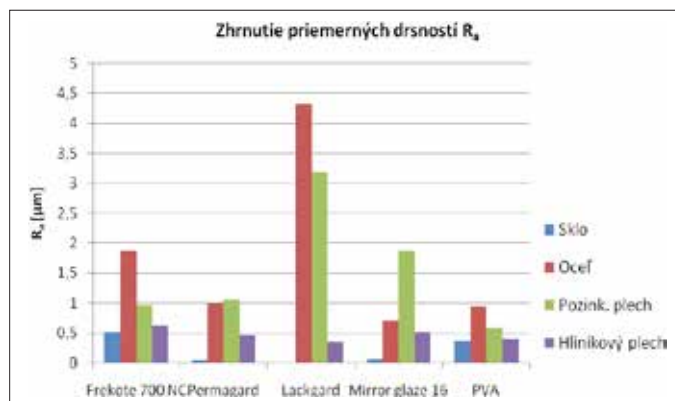
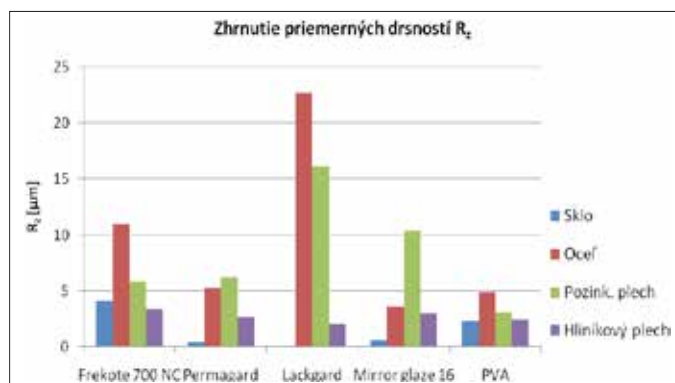
Z pohľadu separátora sa ako najvhodnejší javí PVA pre svoju vysokú spoľahlivosť a schopnosť zachovať povrchové charakteristiky formy. Podobne dobre vychádza separátor Frekote 700-NC, aj keď má horšie výsledky z pohľadu kvality povrchu. Z pohľadu materiálu foriem sa ako najvhodnejší ukazujú hliníkové (duralové) formy, ktoré bez ohľadu na použitý separátor vždy zaistili oddelenie dielu od formy a povrch výsledného dielu mal najlepšie charakteristiky R_a a R_z .



Obr. 2 Vzhľad vzorku po vytvrdení



Graf 1 Porovnanie odtrhových síl vytvrdených vzoriek

Graf 2 Porovnanie drsností R_a vytvrdených vzoriekGraf 3 Porovnanie drsností R_z vytvrdených vzoriek

Literatura:

- [1] VITTEK, Pavol. Vliv materiálu formy a separátorů na kvalitu povrchu kompozitních dílů. Praha, 2012. 63 s. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Bc. Ing. Barbora Bryksí Stunová, Ph.D.

Metakrylátová lepidla v letectví a technologie oprav kompozitních konstrukcí v letectví.

Ing. Petr Průcha Ph. D.

Metakrylátová lepidla mají v současnosti široké uplatnění v řadě aplikací včetně strukturálního lepení. Přesto je v letectví jejich použití velmi omezené. Proto je tento příspěvek zaměřen na ověření vlastností metakrylátových lepidel a jejich potenciální využití při lepení leteckých konstrukcí. Pozornost byla v první řadě věnována porovnání pevnosti ve smyku jednoduchého přelátovaného spoje, pro vybraná metakrylátová lepidla. Sledován byl rovněž vliv tloušťky lepené spáry na pevnost lepeného spoje. Opravy kompozitních konstrukcí představují velmi složitou problematiku, která dalece přesahuje rámec tohoto příspěvku. Proto je pozornost zaměřena pouze na 6 typů nejčastěji prováděných oprav kompozitní primární konstrukce letadel. V příspěvku je uveden popis těchto vybraných typů oprav. Následně je uveden popis experimentálního ověření vlastností opravy. Výsledky experimentálního měření opravených zkušebních těles jsou porovnány s výsledky experimentálního měření nepoškozených těles.

METAKRYLÁTOVÁ LEPIDLA V LETECTVÍ

Úvod

Lepení v současnosti představuje jeden z nejčastěji používaných spojů v letectví, a to především v konstrukci menších letadel kategorií: UL, LSA, VLA, CS/FAR 23. Téměř výhradně se pro strukturální lepení v letectví používají epoxidové lepicí systémy, vytvrzované za normální teploty (tixotropní pasty) nebo za zvýšené teploty (folie). Lepení je speciální proces s řadou parametrů, které je nezbytně nutné udržet v povolených mezích. Jedním z těchto parametrů je tloušťka lepené spáry. Lepený spoj je rovněž velmi citlivý na zatížení, které způsobuje odlup adherendů. Epoxidové lepicí systémy jsou navíc po vytvrzení poměrně křehké, což negativně ovlivňuje například odolnost proti rázům. V ostatních strojírenských oborech jsou velmi často využívána metakrylátová lepidla, která nabízí proti epoxidovým lepicím systémům řadu výhod. Proto byl ve spolupráci LA composite, s. r. o. a ČVUT v Praze realizován projekt zaměřený na ověření základních vlastností metakrylátových lepidel. K tomu účelu byla vybrána tři metakrylátová lepidla od různých výrobců, která byla porovnávána mezi sebou a s referenčním epoxidovým lepicím systémem Hysol 9394. Bylo provedeno porovnání smykové pevnosti lepených spojů s jednoduchým přelátováním namáhaných tahem dle normy ČSN EN 1465.

Základní pojmy k procesu lepení

V textu příspěvku je používána následující terminologie:

- Adhezivo - lepidlo
- Adherend - lepené prvky
- Adheze - přilnavost lepidla k adherendu. Jedná se o kombinaci chemických vazeb, mezimolekulárních vazeb a fyzikálních sil.
- Koheze - vnitřní soudržnost lepidla

Vzhledem k výše uvedenému jsou rozeznávány tři typy poruch lepeného spoje a jejich kombinace. Pokud porušení vznikne mezi vrstvou adheziva a jedním z adherendů, jde o adhezivní poruchu. Porušení, při kterém na obou adherendech zůstane vrstva adheziva, se nazývá kohezivní porucha ve vrstvě lepidla. Pokud je spoj dostatečně silný, může porucha

nastat v jednom z adherendů mimo spoj. Taková porucha je nazývána porucha adherendu. Nicméně na vzniku poruchy se obvykle podílí více druhů porušení zároveň. Porušení se pak popisuje jako procentuální podíl adhezní, kohezivní poruchy nebo poruchy adherendu. Ideálním případem je 100% porucha adherendu nebo kohezivní porucha, protože je zcela vyčerpána pevnost materiálu.

Metakrylátová lepidla

Není nutné znovu opakovat všechny výhody a nevýhody lepených spojů, proto je pozornost zaměřena jen na výhody metakrylátových lepidel proti epoxidovým systémům.

- V komerční podobě se metakrylátové lepicí systémy dodávají jako dvoukomponentní. Vzhledem ke své povaze nejsou tato lepidla příliš citlivá na přesné dodržení mísičného poměru.
- Menší citlivost na kvalitu přípravy povrchu před lepením. Řada výrobců dokonce uvádí, že není nutné broušení či pískování.
- Rychlé tuhnutí i za pokojové teploty, které může být ještě urychleno zvýšením teploty nebo přidáním akceleratorů. Lepidla se tak dodávají s různou rychlostí vytvrzování od jednotek až po desítky minut.
- Velká pevnost lepeného spoje při namáhání na odlup. Vysoká houževnatost v porovnání s epoxidy.
- Vysoká odolnost vůči vnějšímu prostředí a zvýšeným teplotám.
- Velmi malá citlivost na tloušťku lepené spáry. Někteří výrobci dokonce doporučují větší tloušťky lepených spár (z technologických důvodů).
- Použití pro lepení řady materiálů od houževnatých po křehké včetně kovů a plastů.

Potenciální uplatnění v letectví

Akrylátová lepidla v dnešní době nejsou v leteckých konstrukcích téměř vůbec využívána. Důvodem jsou chybějící kvalifikace a zkušenosti, které jsou podmínkou pro použití takového adheziva v letectví. Současně nabí-

žená konstrukční lepidla na bázi akrylátů umožňují jejich využití v letectví v následujících případech:

- Spoje adherentů s různými koeficienty teplotní roztažnosti (metakryláty jsou houževnaté a umožňují pojmout rozdílné tepelné dilatace adherentů)
- Spoje a sestavy s různou tloušťkou lepené spáry (metakrylátová lepidla mají po relativně stálou pevnost i při rostoucí tloušťce lepené spáry)
- Zrychlení procesu výroby (oproti běžně používaným epoxidovým systémům mají podstatně kratší dobu do vytvrzení)
- Odhlučnění vnitřních prostor letounů (vzhledem k poměrně velké houževnatosti dobře tlumí vibrace)
- Opravy částí letounů v provozních podmínkách bez nutnosti použít čisté klimatizované prostory (menší citlivost na vnější prostředí při lepení a jakost přípravy povrchu před lepením než epoxidové systémy)
- Spoje namáhané rázovým zatížením (díky jejich poměrně velké houževnatosti)

Popis zkušebních těles a jejich výroba

Použitá lepidla

Pro ověření vlastností byla vybrána tři lepidla metakrylátová a jeden epoxidový systém Hysol 9394 jako referenční. Druhy použitých lepidel jsou uvedeny v tabulce níže.

Materiál zkušebních těles

Vzhledem k potenciálnímu využití metakrylátových lepidel pro strukturální lepení bylo rozhodnuto použít tělesa vyrobená z kompozitního

materiálu s výztuží ve formě uhlíkových vláken s epoxidovým pojivem. Zkušební tělesa byla vyrobena z prepregů vytvrzených při teplotě 125°C. Skladba těles je uvedena v další tabulce. Použity byly prepregy: GG160T-DT120-47% (materiál s výztuží ve formě tkaniny s uhlíkovými vlákny), UTS120-DT120-35% (materiál s jednosměrnou výztuží ve formě uhlíkových vláken).

Provedení zkušebních těles lepeného spoje

Pro každé z metakrylátových lepidel bylo vyrobeno 6 zkušebních těles pro čtyři různé tloušťky lepené spáry (0,2mm; 0,5mm; 1mm; 2mm). V případě epoxidového systému Hysol 9394 byla vyrobena pouze 2 zkušební tělesa pro každou tloušťku lepené spáry. Nebylo nutné vyrábět více těles, protože vlastnosti tohoto systému jsou známé, a tak bylo účelem těchto těles ověřit dodržení technologického postupu při lepení a metodiky zkoušení. Rozměry a návrh zkušebních těles viz další obrázek.

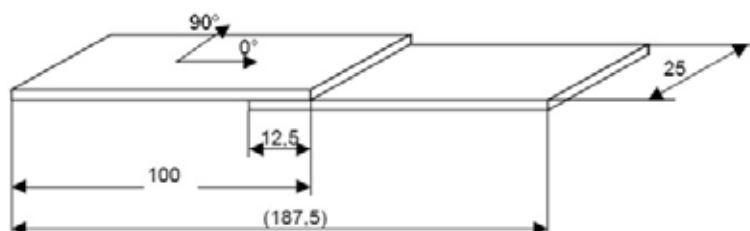
Před lepením (max. 20 minut) bylo každé zkušební těleso očištěno acetonem a broušeno v místě budoucího spoje, byl použit smirkový papír hrubosti 100. Broušení probíhalo, dokud se neobjevila první obnažená vlákna. Tím nedošlo k narušení vláken a nebyla tak oslabena vnitřní struktura kompozitního materiálu. Po zbroušení bylo každé těleso očištěno stlačeným vzduchem a následně očištěno čistým bílým bavlněným hadrem s rozpouštědlem. U takto připravených těles byla pro pozdější přesný výpočet tloušťky lepené spáry změřena skutečná tloušťka v místě zbroušení. Vlastní lepení probíhalo v přípravku, který je v LA composite, s. r. o. k tomuto účelu již dlouhou dobu používán.

Označení lepidla	Název lepidla	Druh lepidla	Doba zpracovatelnosti	Doba do vytvrnutí	Udávaná pevnost ve smyku
A	Sci grip SG230-HV	akrylátové	30-45 min.	60min. +	15-20 MPa
B	Lord 406/17	akrylátové	6-10 min.	30-40min.	16-23 MPa
C	Plexus MA420	akrylátové	4-6 min.	20-25 min.	16-19 MPa
D	Hysol 9394	epoxidové	60-90 min.	3-5 dní	22-29 MPa

Tab. 1 - Vybraná lepidla včetně jejich základních vlastností dle výrobce

Číslo vrstvy	Orientace osnovy [°]	Materiál
1	45	GG 160T-DT 120 - 47%
2	0	UTS 120-DT 120 - 35%
3	0	UTS 120-DT 120 - 35%
4	45	GG 160T-DT 120 - 47%
5	0	UTS 120-DT 120 - 35%
6	0	UTS 120-DT 120 - 35%
7	0	UTS 120-DT 120 - 35%
8	0	UTS 120-DT 120 - 35%
9	45	GG 160T-DT 120 - 47%
10	0	UTS 120-DT 120 - 35%
11	0	UTS 120-DT 120 - 35%
12	45	GG 160T-DT 120 - 47%

Tab. 2 - Skladba zkušebních těles pro lepený spoj



Obr. 1 - Geometrie zkušebních těles

ZKOUŠKY PEVNOSTI LEPENÉHO SPOJE S JEDNODUCHÝM PŘEPLÁTOVÁNÍM NAMÁHANÉHO TAHEM

Princip zkoušky a parametry zkoušky

"Pevnost přeplátovaného lepeného spoje ve smyku se stanoví smykovým namáháním jednoduchého přeplátovaného spoje mezi tuhými adherendy, na které působí tahová síla, která je rovnoběžná s plochou lepeného spoje a hlavní osou zkušební tělesa. Výsledkem zkoušky je síla nebo napětí zjištěné při porušení spoje." [1]

Zkoušky byly realizovány na trhacím stroji se samosvornými čelistmi na ČVUT v Praze. Hlavním parametrem zkoušky byla rychlost zatěžování. Norma požaduje, aby k poruše zkušební tělesa došlo po $65s \pm 20s$. Tento parametr byl dodržen při rychlosti posuvu čelisti 3,7 mm/min. Zkouška byla provedena za podmínek normální teploty a vlhkosti (24,5°C, 54% vlhkosti) bez kondicionování těles.

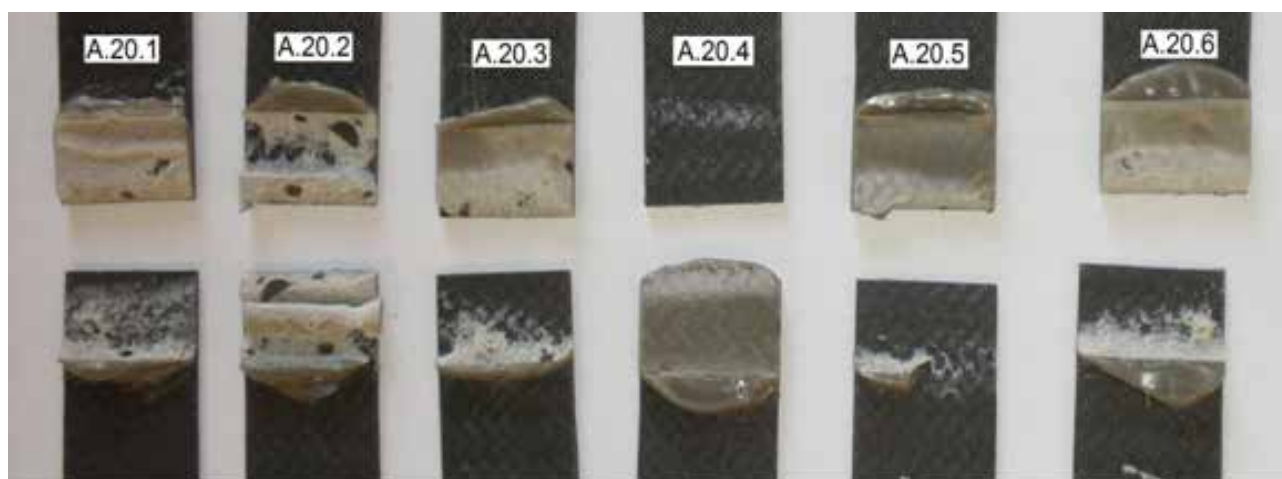
Vyhodnocení

U zkušebních těles lepených lepidlem Sci grip SG230-HV došlo téměř výhradně ke koheznímu porušení u tloušťek lepené spáry 0,2 a 0,5 mm. U větších tloušťky lepeného spoje docházelo k porušení kombinací adhezní a kohezní poruchy. U zkušebních těles lepených lepidlem LORD 406/17 došlo k adheznímu porušení u lepených spojů tloušťky 0,2; 0,5 a 1 mm.

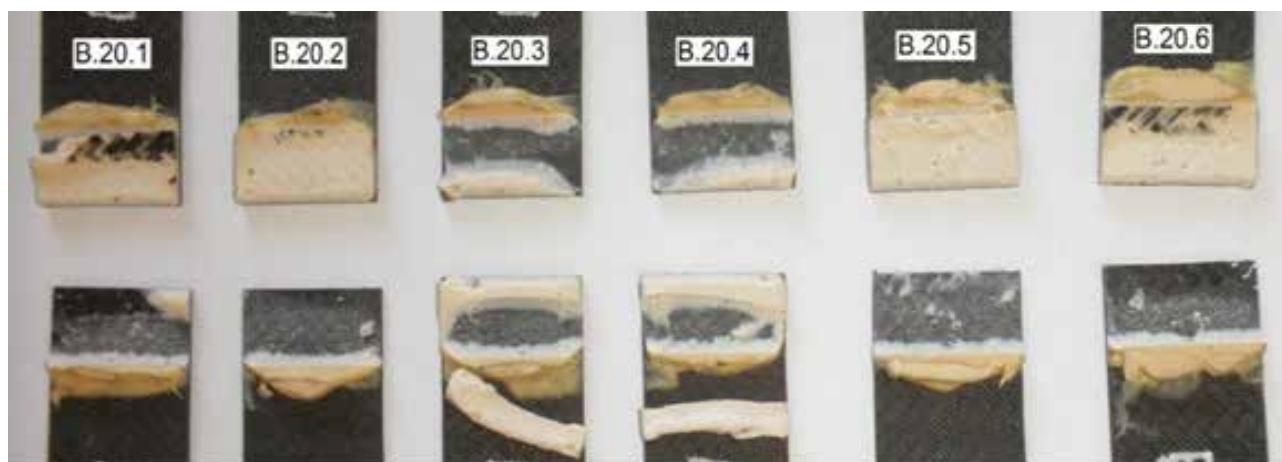
U těles s tloušťkou lepené spáry 2 mm bylo na dvou tělesech pozorováno i porušení adherendu, ale většina lepených spojů byla porušena adhezní poruchou.

U těles lepených lepidlem Plexus MA420 došlo k adheznímu porušení u lepených spojů s tloušťkou 0,2 a 2 mm. U spojů s tloušťkou 0,5 a 1 mm bylo porušení primárně adhezní s malým zastoupením poruch kohezních.

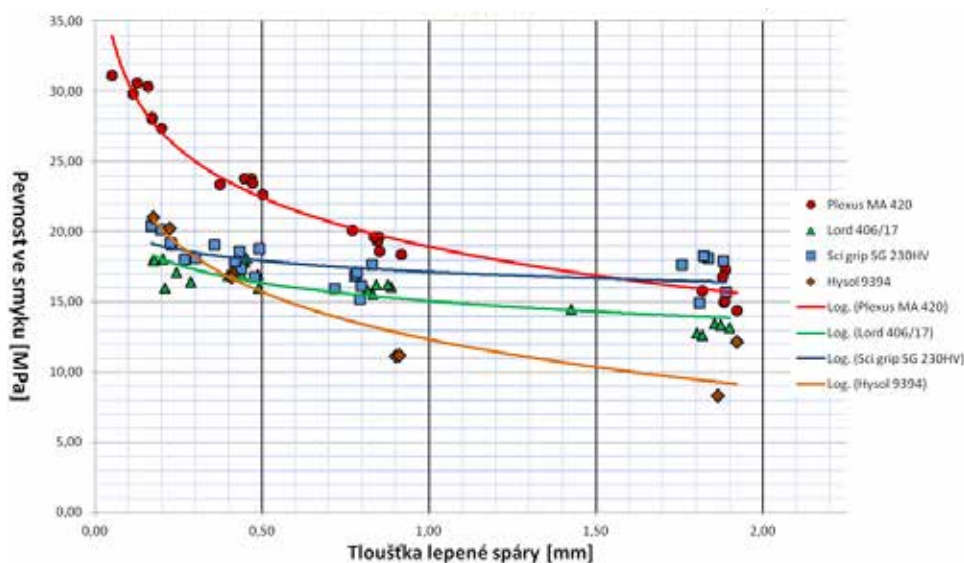
U referenčních zkušebních těles lepených lepidlem Hysol 9394 došlo k adheznímu porušení lepeného spoje. Nicméně jsou patrné i oblasti kde došlo k porušení adherendu.



Obr. 2 - Poruchy těles lepených lepidlem Sci grip (tl. 2 mm).
Tělesa A.20.1 a A.20.2. porušeny kohezně. Ostatní tělesa téměř výhradně adhezně.



Obr. 3 - Poruchy těles lepených lepidlem LORD 406/17 (tl. 2 mm).
Tělesa porušena adhezní. U těles B.20.1 a B.20.6 došlo částečně i k vytržení adherendu.



Obr. 4 - Porovnání pevností ve smyku lepených těles s jednoduchým přeplátováním spojem pro různé typy lepidel a tloušťky lepené spáry [2].

Metakrylátová lepidla závěr

Z grafu na obrázku 4 je patrné, že metakrylátová lepidla co se týče pevnosti ve smyku lepeného spoje s jednoduchým přeplátováním, převyšují referenční epoxidový systém Hysol 9394 pro větší tloušťky lepeného spoje (od 0,5 mm). Lepidlo od firmy Plexus dosáhlo největších hodnot pevnosti pro tloušťky 0,2; 0,5 a 1 mm. Ale pokles pevnosti s rostoucí tloušťkou lepené spáry je u lepidla Plexus MA 420 dokonce větší než u epoxidového systému Hysol 9394. Vzhledem k tomu, že při lepení reálných sestav se tloušťka lepené spáry na jedné lepené sestavě může měnit od několika desetin milimetru až po milimetry, je vhodné použít lepidla s malou citlivostí na tloušťku lepené spáry.

Aby mohla být tato lepidla použita pro strukturální lepení leteckých konstrukcí je nicméně nutné důkladněji ověřit vlastnosti metakrylátových lepidel. Především je to provedení zkoušek za podmínek zvýšené teploty a vlhkosti se vzorky po expozici (zvýšená teplota a vlhkost). Je nutné provedení zkoušek rázové odolnosti, zkoušek pevnosti lepených spojů v odlupu, únavové zkoušky a zkoušky odolnosti proti vybraným chemickým látkám. Předpokládáme rovněž provedení řady technologických zkoušek, protože technologie lepení s použitím metakrylátových lepidel se v některých ohledech odlišuje od technologie lepení s použitím epoxidových systémů.

TECHNOLOGIE OPRAV KOMPOZITNÍCH KONSTRUKCÍ V LETECTVÍ

Úvod do technologie oprav kompozitních konstrukcí

Opravy kompozitních konstrukcí představují velmi složitou problematiku, která dalece přesahuje rámec tohoto příspěvku. Proto je pozornost zaměřena pouze na několik typů nejčastěji prováděných oprav primární konstrukce letadel. V příspěvku jsou v úvodu uvedeny základní skutečnosti týkající se klasifikace vad a poškození, přehled hlavních typů vad a poškození, přehled hlavních technologií oprav a jejich dělení včetně základních požadavků kladených na opravu. V hlavní části příspěvku je pozornost zaměřena na vybrané typy oprav, jejich popis a experimentální ověření vlastností opravené konstrukce a porovnání s konstrukcí nepoškozenou. Tento projekt byl řešen ve spolupráci LA composite, s. r. o. a ČVUT v Praze. V dalším textu bude hovořeno o vadách a poškozeních. Vada vzniká výhradně při výrobním procesu nedodržení parametrů procesu z různých důvodů. Poškození vzniká buď při výrobním procesu

(typicky manipulace, obrábění) nebo v provozu. V anglické literatuře jsou používány dva termíny: Rework a Repair. Termínem "Rework" je myšlena úprava neshodného dílu tak, aby byl shodný (rework se týká pouze výroby). Termín "Repair" označuje opravu poškození vzniklého v provozu. Pro potřeby tohoto příspěvku bude používán jeden český termín oprava bez rozlišení, kdy je prováděna, zda při výrobě nebo v provozu konstrukce.

Klasifikace vad a poškození, základní typy vad a poškození

V principu se vady rozdělují na zanedbatelné, opravitelné a neopravitelné. Zanedbatelné vady jsou takové, které zasahují pouze do vnější vrstvy pojiva a nikoliv vlákna. Jedná se o vady spíše vzhledové, které není nutné opravovat. Vady opravitelné jsou v principu vady, které mohou zasahovat i do strukturálních vrstev a výtuzě, ale jejich umístění či rozsah umožňují jejich opravu. Neopravitelné vady jsou takové, které nelze opravit, nebo by náklady na opravu vynaložené převyšovaly náklady na výrobu nového dílu.

Rozeznáváme následující výrobní vady: chybějící matrice, chybějící vrstva, vrásky, cizí předmět ve skladbě, nedotlačenina, rozlepení, dutiny, deformace jádra, chybějící jádro, špatná poloha jádra nebo vrstvy.

Rozeznáváme následující výrobní poškození: otěr, trhlina, zlomenina, delaminace, promáčknutí, rýha, průchozí a neprůchozí díra, zářez, špatný řez.

Základní požadavky na opravy

Požadavky kladené na opravy kompozitních konstrukcí jsou shrnuty v následující tabulce [3].

Obnova původní pevnosti: Je otázkou, zda je nutné skutečně obnovovat původní pevnost, protože oprava může být v místě, kde to není nutné.

Požadavky na tuhost: Nejčastěji největší problém představuje nestabilita při tlakovém zatížení a rekonstrukce původní tuhosti. Analýza poškození je nutná pro nalezení místa se sníženou mezí stability a určení způsobu jejího odstranění.

Technologie oprav

Technologií oprav je opět celá řada, proto budou dále uvedeny jen opravy, jejichž vlastnosti byly ověřovány experimentálně. Byly zvoleny čtyři typy oprav skořepinových dílů záplatováním a dvě opravy sendvičových dílů.

Požadavky	Důležité ovlivňující faktory
Statická pevnost a stabilita	Úplné nebo částečné dosažení původní pevnosti Požadavky na stabilitu
Životnost opravy	Únavové zatížení Koroze Degradace vlivem působení vnějšího prostředí
Požadavky na tuhost	Přípustné posuvy a průhyby Flutter a další aeroelastické jevy Přerozdělení zatížení vlivem změny tuhosti
Aerodynamická čistota	Výrobní technologie Degradace aerodynamických vlastností v důsledku opravy
Hmotnost a vyvážení	Velikost opravy Vliv na posuv těžiště
Provozní teplota	Požadavky na široké rozmezí teplot Vliv teploty
Vliv prostředí	Druh expozice vnějšímu prostředí Vliv na pojivo
Vliv na palubní systémy letadla	Těsnění palivového systému Ochrana před účinky blesku Funkčnost mechanických soustav letounu
Náklady a plánování	Prostoje a manipulace Prostory, vybavení a materiály Kvalifikovanost personálu Dostupnost materiálu

Tab. 2 - Základní požadavky na opravy kompozitních konstrukcí

1) Záplatování typ II - jednostranné

Tento typ se používá, když je nutné nahradit nebo doplnit vrstvy materiálu z jedné strany. Postup opravy:

- Je provedena kontrola vady dle kritérií opravitelnosti. Následně je označena a očištěna oblast opravy a hrana opravy je ohraničena lepicí páskou. Pro výpočet vzdálenosti okraje opravy od konce vady/poškození je možné použít vztah:

(počet zasažených vrstev – 1) 15 = vzdálenost v mm (primární konstrukce) (1.1)

- Poškozené vrstvy se odbrušují až na neporušenou vrstvu. Každá odbroušená vrstva musí mít odsazení 15 mm od přilehlé vrstvy. Očištění rozpouštědlem.
- Při skladbě opravy je nutné dodržet typ materiálu a orientaci opravovaných vrstev. Přesnost uložení opravovaných vrstev na tupo 0/-1 mm. Nakonec se položí jedna vrstva přes celou opravu s přesahem 50 mm pro opravu primární konstrukce a 25 mm pro sekundární konstrukci viz obrázek níže.
- Vytvrzení
- Dokončení opravy - odstranění technologických materiálů a případné přebroušení.

3) Záplatování typ III - jednostranné

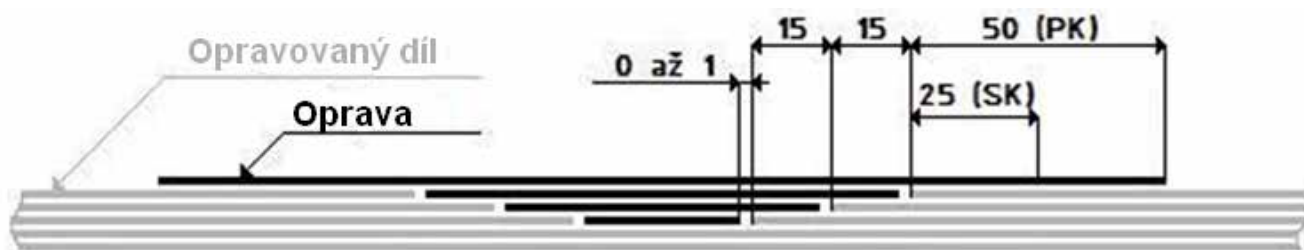
Tento typ opravy je obdobný typu II, ale broušení vrstev je méně složité díky použití nástroje s vhodným úkosem. Postup opravy:

- Je provedena kontrola vady dle kritérií opravitelnosti. Následně je označena a očištěna oblast opravy a hrana opravy je ohraničena lepicí páskou. Pro výpočet vzdálenosti okraje opravy od konce vady je možné použít vztahy:

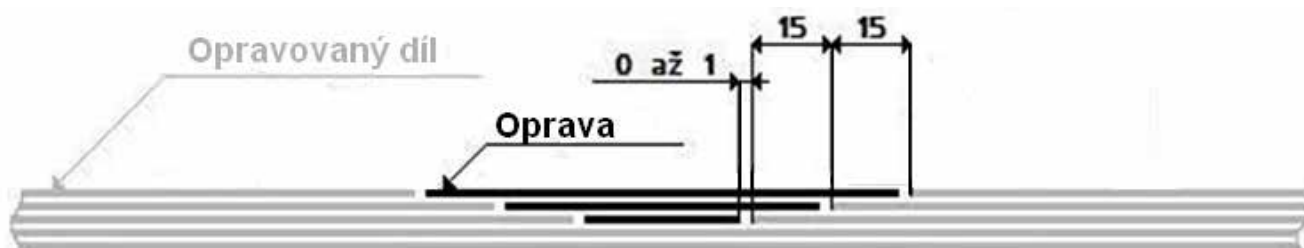
100 x tloušťka laminátu = vzdálenost v mm (primární konstrukce) (1.2)

70 x tloušťka laminátu = vzdálenost v mm (sekundární konstrukce) (1.3)

- Poškozené vrstvy se odbrousí až na vrstvu nepoškozenou. Vybrousí se pravidelný geometrický tvar s minimálním rádiusem R5. U primární konstrukce se provede zkosení hrany v délce 100 x tloušťka laminátu. Do tvaru komolého kužele. U sekundární konstrukce se provede zkosení hrany v délce 70 x tloušťka laminátu. Do tvaru komolého kužele. Očištění rozpouštědlem.
- Skladba opravy: Je nutné dodržet druh materiálu a orientaci vláken jednotlivých vrstev dle výrobního výkresu. Nástřihy jednotlivých vrstev musí být velice přesně nalicovány, aby vždy doléhaly k původní vrstvě. Po vyskládání vrstev dle výkresu se provede přeplátování jednou vrstvou výztuže o orientaci vláken 45° a přesahem od předešlé vrstvy



Obr. 5 - Schéma opravy záplatováním typ II - jednostranné [4]



Obr. 6 - Schéma opravy záplatováním typ IIa - jednostranné [4]

25 mm. Druh materiálu je shodný s poslední položenou vrstvou dle výkresu.

- Vytvrzení
- Dokončení opravy - odstranění technologických materiálů a případné přebroušení.

4) Záplatování typ II - oboustranné

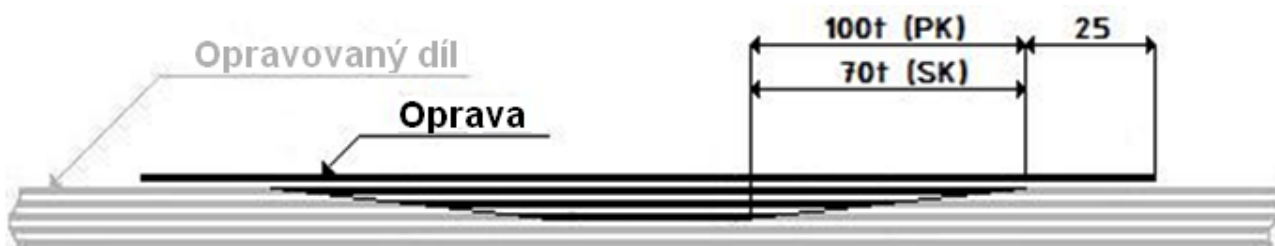
Tento typ opravy je včetně postupu shodný s typem II popsaným v bodě 1), ale záplatování je aplikováno na obě strany dílu. Vhodné například na opravy průchozích vad či poškození. Oprava je na obrázku níže.

5) Opravy vad a poškození zasahujících do jádra typ I - jednostranná

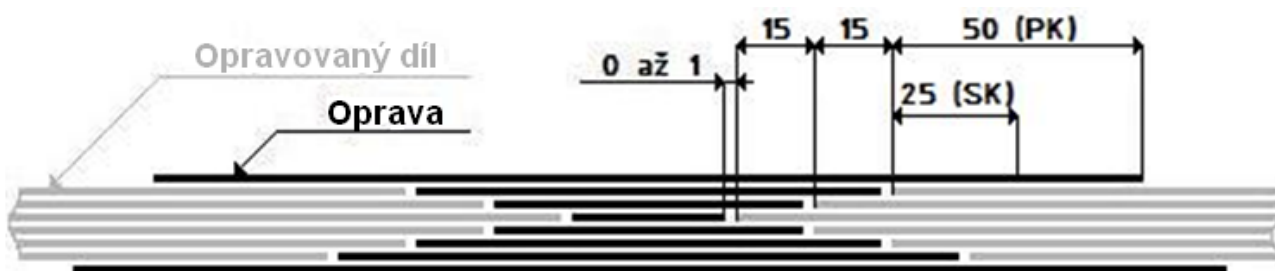
Tento typ opravy se používá v případě poškozených dílů sendvičové konstrukce kdy vada či poškození zasahuje až do jádra. Ale velikost vady/poškození není větší než 25 mm. Postup opravy:

- Je provedena kontrola vady dle kritérií opravitelnosti. Následně je označena a očištěna oblast opravy a hrana opravy je ohraničena lepicí páskou. Pro výpočet vzdálenosti okraje opravy od konce vady je možné použít vztah (1.1)

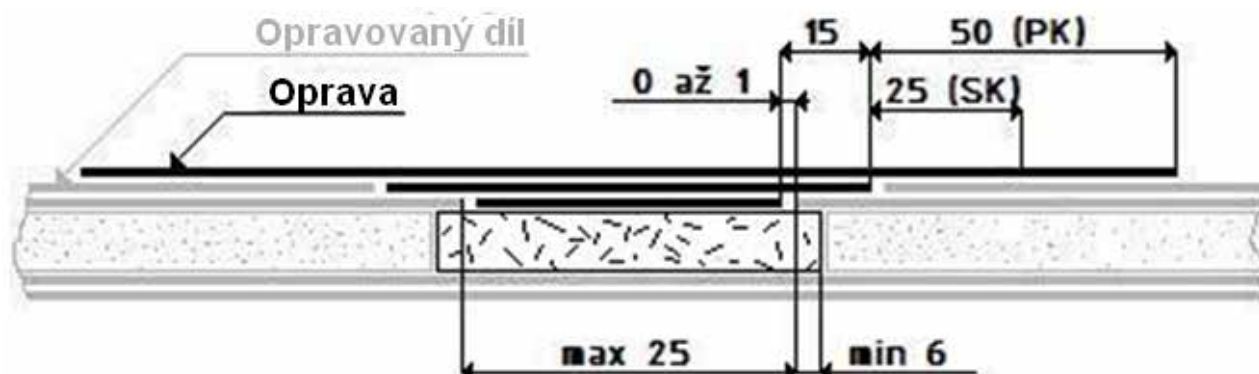
- Poškozené vrstvy i s jádrem se odbrousí do pravidelného geometrického tvaru o minimálním rádiu R5. Každá odbroušená vrstva musí mít odsazení 15 mm od vrstvy předešlé. Jádro musí být obrobena tak aby vznikl přesah vnějšího potahu minimálně 6 mm, viz obrázek níže. Očištění rozpouštědlem.
- Dutina po odstraněném jádře se zaplní směsí pojiva a plniva. Následuje vytvrzení
- Při laminování opravy je nutné dodržet typ výztuže a orientaci opravovaných vrstev. Přesnost uložení opravovaných vrstev na tupo 0/-1 mm. Nakonec se položí jedna vrstva přes celou opravu s přesahem 50 mm pro opravu primární konstrukce a 25 mm pro sekundární konstrukci. Typ výztuže a orientace stejná jako u předchozí vrstvy.
- Vytvrzení
- Dokončení opravy - odstranění technologických materiálů a případné přebroušení.



Obr. 7 - Schéma opravy záplatování typ III - jednostranné[4]



Obr. 8 - Schéma opravy záplatování typ II - oboustranné [4]



Obr. 9 - Schéma opravy díl sendvičové konstrukce s poškozením/vadou o velikosti max. 25 mm [4].

6) Opravy vad a poškození zasahujících do jádra typ II - jednostranná

Tento typ opravy se používá v případě poškozených dílů sendvičové konstrukce kdy vada či poškození zasahuje až do jádra. Velikost vady/poškození je větší než 25 mm, ale není větší než 150 mm. Postup opravy:

- Je provedena kontrola vady dle kritérií opravitelnosti. Následně je označena a očištěna oblast opravy a hrana opravy je ohraničena lepicí páskou. Pro výpočet vzdálenosti okraje opravy od konce vady je možné použít vztah (1.1)
- Poškozené vrstvy i s jádrem se odbrousí do pravidelného geometrického tvaru o minimálním rádiu R5. Každá odbroušená vrstva musí mít odsazení 15 mm od vrstvy předešlé. Poškozené jádro musí být zcela odstraněno, ale nesmí být poškozen dolní potah. Provedení opravy viz obrázky níže. Očištění rozpouštědlem.
- Do dutiny po odstraněném jádře se vloží nové jádro. Pěnové jádro musí být do připraveného otvoru nalícováno s vůlí max. 1 mm. Jádro z voštiny je nutné vyrobit o 2,5 mm větší na každou stranu. Očištění rozpouštědlem.
- Při laminování opravy je nutné dodržet typ výztuže a orientaci opravovaných vrstev. Přesnost uložení opravovaných vrstev na tupo 0/-1 mm. Nakonec se položí jedna vrstva přes celou opravu s přesahem 50 mm pro opravu primární konstrukce a 25 mm pro sekundární konstrukci. Typ výztuže a orientace stejná jako u předchozí vrstvy. Provedení opravy viz obrázky níže.
- Vytvrzení
- Dokončení opravy - odstranění technologických materiálů a případné přebroušení.

Experimentální ověření vlastností dílů po opravě

Pro ověření vlastností skořepinových dílů opravených záplatováním viz kapitola Technologie oprav body 1), 2), 3) a 4) byla vybrána tahová zkouška dle normy ČSN EN ISO 527 - 4. Délka vzorků 250 mm, šířka vzorků 25 mm. Byly použity lepené příložky z materiálu se skelnou výztuží a epoxidovým pojivem o délce 50 mm.

Pro ověření mechanických vlastností sendvičových dílů opravených dle postupů uvedených v kapitole Technologie oprav body 5) a 6), byla vybrána zkouška tříbodovým ohybem dle normy ASTM D790. Rozměry vzorků: délka 250 mm, šířka 25 mm, tloušťka 10 mm. Vzdálenost podpor při zkoušce 154 mm.

Zkušební tělesa

Zkušební tělesa pro ověření oprav záplatování typ II, typ IIa a typ III viz kapitola Technologie oprav body 1), 2 a 3), byla vyrobena ze čtyř vrstev prepregu s označením GG160T - DT120 - 47% (výztuž ve formě tkaniny z uhlíkových vláken a epoxidové pojivo). Oprava byla provedena stejným druhem prepregu. Oprava zahrnovala opravu všech čtyř vrstev. Pro každý typ opravy bylo vyrobeno 6 zkušebních těles.

Zkušební tělesa pro ověření opravy záplatováním typ II- oboustranný viz kapitola Technologie oprav bod 4), byla vyrobena z osmi vrstev prepregu s označením GG160T - DT120 - 47%. Oprava byla provedena stejným druhem prepregu. Oprava zahrnovala opravu všech osmi vrstev (čtyři z každé strany). Pro každý typ opravy bylo vyrobeno 6 zkušebních těles.

Byla vyrobena tři referenční zkušební tělesa ze čtyř vrstev prepregu GG160T - DT120 - 47% a tři referenční zkušební tělesa z osmi vrstev téhož prepregu. Tato tělesa byla použita pro stanovení vlastností neporušených těles.

Zkušební tělesa pro ověření oprav vad/poškození zasahujících do jádra typ opravy I a II viz kapitola Technologie oprav body 5) a 6) byla vyrobena z prepregu GG160T - DT120 - 47% a nomexové voštiny. Oprava byla provedena epoxidovým pojivem a suchou tkaninou stejnou jaká je použita ve výše uvedeném prepregu. Pro každý typ opravy bylo vyrobeno 6 zkušebních těles a tři referenční bez vady/poškození.

Výsledky zkoušek

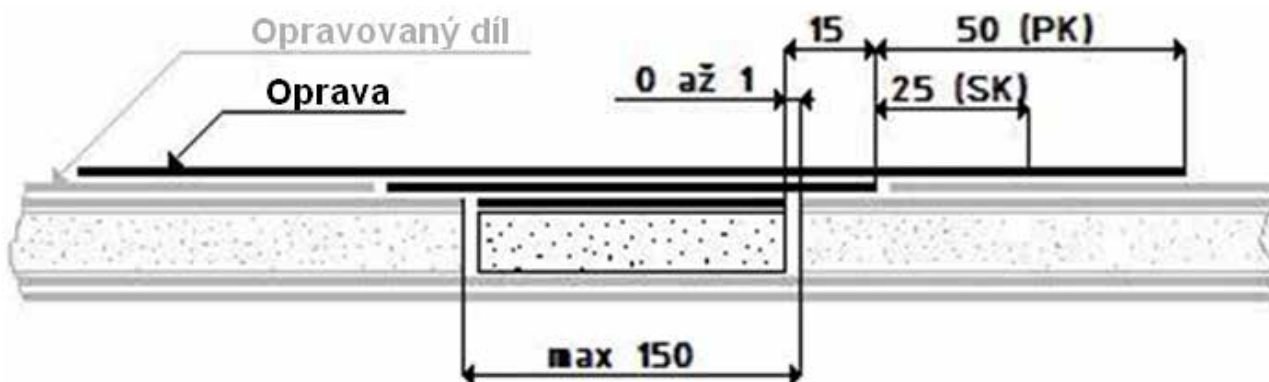
Výsledky zkoušek převzaty z [4]

Tahová zkouška

Síla potřebná k přetržení čtyřvrstvého zkušebního tělesa bez vady/poškození je $F = (5,950 \pm 0,096)$ kN. Hmotnost zkušebního tělesa průměrná 21,7g (včetně příložek).

Zkušební tělesa opravená technologií záplatování typ II - jednostranné. Síla při přetržení tělesa $F = (6,556 \pm 0,444)$ kN. Průměrná hmotnost zkušebního tělesa 23,5g (včetně příložek).

Zkušební tělesa opravená technologií záplatování typ IIa (bez krycí vrstvy). Tento typ opravy byl testován z důvodu ověření vlivu absence jedné opravné vrstvy. Zatěžovací síla při přetržení tělesa $F = (5,238 \pm 0,608)$ kN. Průměrná hmotnost zkušebního tělesa 22,4g (včetně příložek).



Obr. 10 - Schéma opravy dílu sendvičové konstrukce s poškozením/vadou o velikosti max. 150 mm [4]

Zkušební tělesa opravená technologií záplatování typ III. Síla při přetržení tělesa $F = (6,125 \pm 0,603)$ kN. Průměrná hmotnost zkušebního tělesa 23,6g (včetně příložek).

Síla potřebná k přetržení osmivrstvého zkušebního tělesa bez vady/poškození je $F = (11,270 \pm 0,743)$ kN. Hmotnost zkušebního tělesa průměrná 28g (včetně příložek).

Zkušební tělesa opravená technologií záplatování typ II - oboustranné. Síla při přetržení tělesa $F = (12,270 \pm 1,079)$ kN. Průměrná hmotnost zkušebního tělesa 31,5g (včetně příložek).

Zkouška třibodovým ohybem

K dosažení mezního stavu únosnosti sendvičového vzorku bez vady/poškození došlo při zatížení silou $F = (277,353 \pm 18,442)$ N. Hmotnost zkušebního tělesa průměrná 9,93g.

K dosažení mezního stavu únosnosti sendvičového vzorku oprava sendvičů typ I dle bodu 5) kapitola Technologie oprav, došlo při zatížení silou $F = (525,463 \pm 20,803)$ N. Hmotnost zkušebního tělesa průměrná 13,9g. Velikost vady/poškození 25 mm ve směru délky zkušebního tělesa a po celé jeho šířce.

K dosažení mezního stavu únosnosti sendvičového vzorku opraveného metodou typ II dle bodu 6) kapitola Technologie oprav, došlo při zatížení silou $F = (545,102 \pm 7,165)$ N. Hmotnost zkušebního tělesa průměrná 16,0g. Velikost vady/poškození 60 mm ve směru délky zkušebního tělesa a po celé jeho šířce.

Technologie oprav, závěr

V příspěvku jsou popsány 4 technologie oprav skořepinových (monolitických) dílů včetně postupu opravy. Vlastnosti skořepinových dílů opravených pomocí těchto čtyř technologií byly zjišťovány při tahové zkoušce shodných zkušebních těles monolitických opravených a zkušebních těles skořepinových bez vady/poškození. Závěry z experimentálních měření:

Oprava záplatováním typ II (jednostranná) vykazuje výrazné zvýšení tuhosti a rovněž pevnosti zkušebního tělesa o 10% proti referenčnímu. To může být v některých případech nežádoucí. Rovněž nárůst hmotnosti není zanedbatelný.

Oprava záplatováním typ IIa (jednostranná) vykazuje nižší pevnost než referenční zkušební tělesa o 12%, ale při zanedbatelném nárůstu hmotnosti. Tato oprava může být v některých případech použitelná.

Oprava záplatováním typ III (jednostranná) vykazuje zvýšení pevnosti proti referenčnímu tělesu o 3%. Nárůst hmotnosti je stejný jako u opravy typ II. Nicméně velkou výhodou tohoto typu opravy je výrazně menší pracnost a citlivost na zručnost operátora. Tato technologie je nejvhodnější i pro opravu oboustrannou.

Oprava záplatováním typ II (oboustranná) vykazuje zvýšení pevnosti proti referenčnímu tělesu o 9%. Nezanedbatelné je i zvýšení tuhosti. Nárůst hmotnosti je rovněž výrazný. Nicméně technologie je použitelná.

Dále jsou popsány dvě technologie oprav dílů sendvičových, a to včetně postupu opravy. Vlastnosti sendvičových dílů opravených pomocí těchto dvou technologií byly zjišťovány při zkoušce třibodovým ohybem. Zkoušena byla zkušební tělesa opravená a shodná zkušební tělesa sendvičová bez vady/poškození. Závěry z experimentálních měření:

Oprava typ I způsobuje výrazný nárůst pevnosti o 90% a tuhosti v místě opravy. Navíc způsobuje velký nárůst hmotnosti zkušebního tělesa o 40%. Tento typ opravy je vhodný pouze pro velmi malé vady/poškození.

Oprava typ II způsobuje výrazný nárůst pevnosti o 97% a tuhosti v místě opravy. Nárůst hmotnosti zkušebního tělesa o 61%. Tento

typ opravy, ale poskytuje menší nárůst hmotnosti vzhledem k velikosti opravované vady/poruchy než typ I, proto je vhodný i pro rozsáhlejší opravy. Velký nárůst hmotnosti zkušebního tělesa je totiž dán jeho rozměry, které jsou relativně malé vzhledem k velikosti opravy, proto se může nárůst hmotnosti zdát na první pohled příliš velký pro praktické použití.

Literatura:

- [1] ČSN EN 1465 Lepidla- Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav. Praha: ÚNMZ, říjen 2009
- [2] Voslář J.: Akrylátová lepidla v letectví; bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze - Fakulta dopravní, vedoucí práce: Novák M., Průcha P., Praha 2013
- [3] ASM Handbook: Volume 21 Composites. Ohio (OH): ASM International, 2001. 1201 s. ISBN 0-87170-703-9
- [4] Hergessel J.: Postupy oprav vybraných výrobních vad a poškození kompozitních dílů pro LAC; bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze - Fakulta dopravní, vedoucí práce: Novák M., Průcha P., Praha 2013