

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Ing. Karel Kunz

**TECHNOLOGIE VYZTUŽOVÁNÍ A OPRAV KONSTRUKCÍ
ZE SLITIN HLINÍKU S VYUŽITÍM
KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ UHLÍK / EPOXY**

**APPLICATION OF C/EPOXY PREPREGS FOR REINFORCING
AND REPAIRS OF ALUMINIUM STRUCTURES**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: Doc. Ing. Josef Klement, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Radko Samek, CSc.
Doc. Ing. Tomáš Kopřiva, CSc.
Ing. Jaroslav Juračka, PhD.

Datum obhajoby: 25. 6. 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

C/epoxy kompozit, vyztužování, oprava, lepení, letecké konstrukce

KEYWORDS

C/epoxy composite, reinforcing, repair, adhesive, aircraft structures

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně

© Karel Kunz, 2002
ISBN 80-214-2169-X
ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 OBSAH PRÁCE	5
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	6
3.1 Stav v oblasti povrchové úpravy hliníkových slitin	6
3.2 Stav v oblasti způsobů vytvrzování	7
3.3 Stav v oblasti technologií vyztužování	8
3.4 Stav v oblasti využití kompozitů na vyztužování a opravy konstrukcí	8
4 CÍL PRÁCE	10
5 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	10
6 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	11
6.1 Použité experimentální metody	11
6.2 Výroba vzorků	11
6.3 Výsledky zkoušek.....	14
6.4 Diskuse výsledků zkoušek	16
6.4.1 Vliv velikosti vytvrzovacího tlaku.....	16
6.4.2 Vliv přípravy povrchu	17
6.4.3 Vliv metody spojování	19
6.4.4 Vliv umělého stárnutí po dlouhodobém působení kapaliny	20
6.4.5 Vliv cyklického teplotního zatěžování	21
7 ZÁVĚR	22
8 SUMMARY	25
8.1 Present state in the field of aluminium alloy surface pretreatments.....	25
8.2 Present state of the reinforcement techniques.....	26
8.3 Thesis objectives	26
8.4 Main results	27
8.5 Conclusion.....	27
9 LITERATURA	28
10 AUTOROVO CV	31

1 ÚVOD

K nejdůležitějším mechanickým vlastnostem konstrukčních materiálů patří jejich pevnost a tuhost. V současnosti má konstruktér pro náročné aplikace na vybranou z celé škály materiálů s velmi dobrými vlastnostmi. Jde především o ocel, hliníkové slitiny nebo titan, nověji pak o různé druhy kompozitů. Nynější trendy ovšem nutí konstruktéry navrhovat součásti a celé konstrukce tak, aby nejen splňovaly dané pevnostní požadavky, ale zároveň měly i nízkou hmotnost. Jednou z možností je využití kompozitů, které výše uvedené podmínky splňují. Ve srovnání s kovovými materiály je však stále jejich nevýhodou relativně vysoká cena. S „klasickými“ materiály jsou navíc obrovské a dlouholeté zkušenosti, konstruktéři se proto při návrhu různých aplikací stále obrací spíše k nim. Výjimkou jsou snad jen konstrukce letecké a raketové techniky nebo oblast vrcholového sportu, kde mají špičkové vlastnosti přednost před vyšší cenou výroby.

U konstrukce, která nevyhovuje po stránce tuhosti je výhodné použít jako vyztužující materiál uhlíkový kompozit. Ve spojení s hliníkovou slitinou se tak zachová nízká hmotnost i příznivá cena celé konstrukce. Nemusí se však jednat pouze o zvýšení tuhosti, ale je možné této techniky s výhodou použít i při opravách, pro poddimenzované díly, jako zastavovače šířících se únavových trhlin, pro korozi oslabené díly, nebo pro nadměrně zatížené části konstrukce.

2 OBSAH PRÁCE

Disertační práce se zabývá tématem vyztužování a oprav konstrukcí ze slitin hliníku pomocí uhlíkových kompozitů a je zaměřena převážně na technologickou stránku problému.

Po úvodu, který objasňuje důvody volby tohoto tématu, následuje kapitola, která je věnována kompozitním materiálům. Cílem je představení těchto materiálů s uvedením jejich mechanických i užitných vlastností. V další kapitole je uveden přehled různých úprav povrchů, s jejich výhodami i možnými nevýhodami a to i s ohledem na použití v „polních“ podmínkách. Po krátkém představení nejběžnějších způsobů vytvrzování pak práce pokračuje další částí, která se celá věnuje kombinaci uhlíkových kompozitů a hliníkových slitin a jejímu využití při vyztužování a opravách různých konstrukcí. Tato kapitola se dá pomyslně rozdělit na dvě části - na teoretickou a na praktickou.

Teoretická část představuje jednotlivé metody aplikace kompozitu na konstrukci. Jsou zde uvedeny jejich technologické možnosti, a jejich výhody i nevýhody. Druhá část se týká řady příkladů použití v praxi. Jde o zhodnocení současného stavu v této oblasti u nás a ve světě.

Největší a nejpodstatnější část práce se již týká vlastních experimentálních prací. To zahrnuje popis výroby vzorků, představení jednotlivých druhů zkoušek pro vyhodnocení jednotlivých zkoumaných vlivů a také všechny zjištěné výsledky ve formě tabulek. Následuje rozbor jednotlivých vlivů na mechanické vlastnosti podle dosažených výsledků. V závěru jsou uvedeny další možné směry práce, která by

měla mimo jiné přispět k získání větších zkušeností s tímto způsobem vyztužování a oprav konstrukcí ze slitin hliníku, což by mohlo pomoci i k rychlejšímu rozvoji samotných kompozitních materiálů u nás.

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

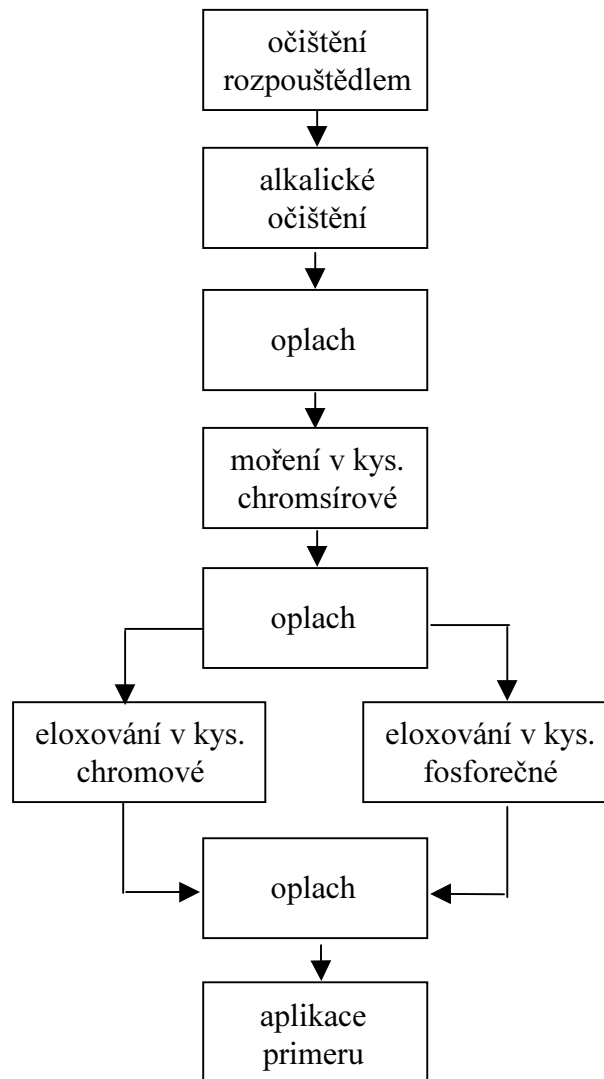
3.1 Stav v oblasti povrchové úpravy hliníkových slitin

Dobry spoj kompozit-hliníková slitina vyžaduje dodržení mnoha předpokladů. Prvořadou podmínkou úspěšné aplikace kompozitů pro vyztužování, resp. opravu libovolné konstrukce je dokonalé spojení obou tak rozdílných materiálů. Velmi důležitým předpokladem je proto kvalitní úprava povrchu vyztužovaného materiálu, v tomto případě hliníkové slitiny (u lepení za studena i kompozitu).

Povrch je nezbytné zbavit nečistot a mastnoty, odstranit starou, křehkou a tedy nevhodnou vrstvu oxidů a vytvořit novou, kvalitní a stabilní vrstvu. Existuje množství různě složitých postupů, které se vzájemně kombinují: čištění rozpouštědly nebo ředidly, alkalická čištění, mechanické postupy (např. broušení nebo otryskávání), moření v různých kyselinách, eloxování, konverzní povlakování, apod. Nakonec se povrch většinou pokrývá tzv. primerem, který zabraňuje korozi a zvyšuje adhezi.

Nejrozšířenější je dnes zřejmě moření v kyselině chromsírové a následné eloxování v kyselině chromové, které se používá nejvíce v Evropě a z části i v USA. Tam se však častěji můžeme setkat s eloxováním v kyselině fosforečné, které používá například i firma Boeing. Oba (tzv. standardní) postupy jsou znázorněny na obr.1.

Prvním krokem standardního procesu úpravy povrchu je **odmašťování**, které se skládá: z *předběžného očištění, alkalického očištění a oplachu*. Jeho úkolem je vytvořit fyzikálně i chemicky čistý povrch vhodný pro následné moření. Následuje **odstranění staré vrstvy oxidů** nevhodného typu nebo tloušťky a vytvoření tenké a stejnoměrné vrstvy oxidů po celém povrchu. To lze provést *chemickým* nebo *mechanickým způsobem*. Na chemické moření (leptání) se používají např. kyselina chromsírová, kyselina fosforečná nebo hydroxid sodný. K mechanickým způsobům patří např. broušení nebo otryskávání. Poměrně novou metodou je broušení metodou Scotch Brite, vyvinutou firmou 3M z Minnesoty, založenou na broušení povrchu pomocí speciálních kartáčů nebo kotoučů, jejichž nylonová vlákna jsou obalena pryskyřicí obsahující částice minerálů SiC nebo Al₂O₃. Nejdůležitější, ale i nejsložitější a nejdražší částí celého procesu povrchové úpravy je **tvorba povrchové vrstvy oxidů**. Ta zahrnuje *eloxování a konverzní povlakování*. Principem konverzního povlakování je nanesení anorganické vrstvy na povrch dílu. K hlavním přednostem oproti eloxování patří jednoduchost, nižší náklady a relativně snadné použití v polních podmínkách (konverzní povlak může být aplikován i ve formě gelu). Závěrečným krokem povrchové úpravy je nanesení primeru. Primery se používají jako prostředek antikorozi ochrany a pro zvýšení adheze.



Obr. 1: Standardní proces úpravy povrchu hliníkových slitin [24]

3.2 Stav v oblasti způsobů vytvrzování

K možným způsobům, jak dosáhnout spojení kompozitu a hliníkové slitiny, patří použití autoklávu, lisu s pryžovou membránou nebo vakuové vývěvy. Z ostatních zařízení se pro vytvrzování hodí různé jednoúčelové vytvrzovací přípravky.

Vakuový způsob je vhodný jen pro tenčí výztuhy. Dá se však použít „in-situ“ - tedy přímo na konstrukci (např. u obtížně demontovatelných nebo rozměrných dílů). Pro vytvrzování za přetlaku se používají autoklávy. Tento způsob se používá pro výrobu kvalitních kompozitových výztuh s vysokým obsahem vláken a nízkou pórovitostí. Jeho největší výhodou je možnost dosažení vyšších vytvrzovacích tlaků. Nevýhodou je, že nelze vytvrzovat přímo na konstrukci, ale je nutné umístit vyztužovaný nebo opravovaný díl do autoklávu (tj. omezení velikostí autoklávu). V případě vytvrzování v lisu s pryžovou membránou se celá sestava umístí do lisu, na jehož horní desce je připevněna pryžová membrána. Vytvrzovací síla je vyvozena za pomoci tlakového vzduchu, který působí přes pryžovou membránu. Lisovací desky obsahují topná tělíska. Tato metoda je však omezena jen na rovné

nebo mírně zakřivené plochy a také velikostí použitého lisu. Jak je tedy zřejmé, bude vždy záležet na konkrétní aplikaci a na možnostech a vybavení pracoviště.

3.3 Stav v oblasti technologií vyztužování

Možností aplikace kompozitu na vyztužovaný díl je více. Může jít o lepení, společné vytvrzování bez použití lepidla, společné vytvrzování s použitím lepidla nebo ruční laminování metodou mokrého kladení.

Princip společného vytvrzování spočívá ve vytvrzování kompozitové výztuhy přímo na konstrukci, na kterou byla předtím ve formě prepregů nakladena. Při vytvrzování kompozitu tedy zároveň dojde k jeho spojení s vyztužovaným dílem. Pro vyztužování konstrukcí s využitím lepení jsou významné dvě skupiny lepidel. První jsou „studená“ lepidla, u kterých není nutné ohřev aplikovat. Druhou skupinou jsou lepidla s vytvrzovací teplotou shodnou s vytvrzovací teplotou kompozitového prepregu. Zde je výhodné provádět lepení zároveň s vytvrzováním kompozitu. To však předpokládá fóliový typ lepidla, na který se prepreg dá bez problémů nanést. Ostatní druhy lepidel jsou též použitelné, u nich se však ztrácí výhody výše uvedených skupin.

Ruční laminování metodou mokrého kladení je metoda velmi rozšířená u oprav leteckých konstrukcí a při pečlivé práci je možné dosáhnout dobrých výsledků. Její výhodou jsou nízké náklady, nevýhodou je především její nízká reprodukovatelnost, která je dána množstvím možných chyb při ručním laminování. V kompozitovém prepregu je s velmi malým rozptylem zaručen určitý poměr vláken a matrice, a tím i výsledné mechanické vlastnosti. Navíc je tento prepreg již částečně vytvrzen a práce s ním je mnohem snazší.

3.4 Stav v oblasti využití kompozitů na vyztužování a opravy konstrukcí

Samotná myšlenka vyztužování není jistě nová. Vyztužení přichází v úvahu v okamžiku, kdy je zapotřebí zlepšit vlastnosti určitého dílu, případně již při jeho návrhu. Existuje mnoho možností, jak dosáhnout větší pevnosti nebo tuhosti konstrukce. Může jít o náhradu nevyhovujícího dílu za jiný s odlišnými proporcemi nebo tvarem, výrobu daného dílu z vhodnějšího materiálu (včetně kompozitů), přidání výztuhy ze stejného materiálu a jeho spojení běžnými metodami spojování (nýtování, šroubování, svařování, lepení), nebo se může jednat o vyztužení pomocí kompozitů. Stejně tak se dá využít výhod takovéto kombinace dvou různých materiálů i ve fázi návrhu daného dílu. Z této oblasti není dostupná téměř žádná literatura, což je jeden z hlavních důvodů volby tohoto tématu. Kombinací dvou rozdílných materiálů se mohou zvýraznit jejich výhody a potlačit jejich nevýhody. Jedná se především o mechanické vlastnosti, hmotnost, počet dílů nebo cenu.

Na rozdíl od vyztužování je využití kompozitů při opravách leteckých konstrukcí již relativně rozšířené. Opravy se většinou řeší pomocí různých kompozitových

výztuh. Na rozhodnutí o realizaci opravy má vliv i důležitost funkce dílu a potřeba obnovení jeho pevnosti, stability, tuhosti, aerodynamického tvaru nebo těsnosti.

Tab.1. Aplikace kompozitových výztuh na existující kovové konstrukce [22]

VYZTUŽENÍ PODDIMENZOVANÝCH OBLASTÍ	pro zmenšení průhybu
	pro redukci flutteru
	pro zvýšení statické pevnosti
	pro zvýšení vzpěrné pevnosti
	pro zvýšení meze únavy
OBNOVENÍ PEVNOSTI A TUHOSTI	na zkorodovaných místech
	na místech s výskytem trhlin
	po vypršení jmenovité únavové životnosti
REDUKCE VELIKOSTI NAPĚTÍ	na místech s výskytem trhlin (únava, koroze)
	na místech špatně navržených
	na místech špatně vyrobených
	na místech poškozených špatnou manipulací
	na místech poškozených v boji
PRO DAMAGE TOLERANCE	u „safe-life“ dílů

Velké zkušenosti s využitím kompozitů při opravách konstrukcí různých dopravních letounů má například letecká společnost British Airways. Během provozu jejího leteckého parku bylo třeba provádět nejrůznější opravy na řadě dopravních letounů. Jednalo se o opravy náběžných hran, krytů antén radiolokátorů, krytů motorů, motorových pylonů, podlahových panelů, ovládacích ploch nebo vstupních dveří [22]. U RAF byly kompozity použity na vyztužení nebo opravy na 8 typech letounů (např. Harrier nebo BAe Hawk). Jak uvádí literatura [4], kompozitová výztuha má oproti „klasicky“ provedené:

- vyšší poměr pevnost/hmotnost
- eliminuje koncentrace napětí, které by v dílu vznikly vlivem existence otvorů pro nýty
- vyšší odolnost vůči korozi
- jednoduché natvarování k obrysu trupu
- ekonomické výhody

Efekt opravy pomocí kompozitové výztuhy spočívá především v zabránění otevírání trhliny díky vysoké tuhosti vláknového kompozitu, ve snížení intenzity napětí, zpomalení růstu trhliny a plynulém spojení na rozhraní. Aplikace výztuh je vhodná prakticky na jakákoliv přístupná místa (potahy, nosníky, přepážky, vzpěry apod.) a zvláště užitečná je na konstrukcích s dvojitým zakřivením, kde by tvarování podobné kovové výztuhy bylo velmi obtížné.

4 CÍL PRÁCE

Cílem práce je vyhodnocení technologických vlivů a vlivů prostředí na vlastnosti spoje slitiny hliníku a kompozitu uhlík/epoxy. Kompozit je zde využit pro vyztužení konstrukčních prvků ze slitin hliníku nebo na jejich opravu. Spojením těchto dvou materiálů se zachovává nízká hmotnost i příznivá cena. Této techniky je možné využít pro vyztužování, při opravách, pro poddimenzované díly, jako zastavovače šířících se únavových trhlin, pro korozi oslabené díly, nebo pro nadměrně zatížené části konstrukce. Následující body shrnují hlavní cíle práce:

- zhodnocení současného stavu v oblasti:
 - povrchové úpravy hliníkových slitin
 - způsobů vytvrzování kompozitu
 - technologií vyztužování hliníkových slitin pomocí kompozitů
 - využití kompozitů na vyztužování a opravy konstrukcí z hliníkových slitin
- stanovení vhodné povrchové úpravy hliníkové slitiny s ohledem na nepříznivé podmínky při vyztužování a opravách rozměrných konstrukcí
- stanovení vhodné metody spojení uhlíkového kompozitu a hliníkové slitiny
- stanovení vhodného způsobu vytvrzování
- stanovení vlivu velikosti vytvrzovacího tlaku
- stanovení vlivu umělého stárnutí po dlouhodobém působení kapaliny
- stanovení vlivu cyklického teplotního zatěžování

Práce by měla přinést nové poznatky z této oblasti a přispět k získání zkušeností s tímto způsobem vyztužování a oprav, což by mohlo pomoci i k rychlejšímu rozvoji samotných kompozitních materiálů u nás.

5 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Řešená problematika zahrnuje tři vzájemně související oblasti: povrchovou úpravu hliníkových slitin, způsoby vytvrzování kompozitových prepregů nakladených na vyztužovaný díl a různé technologie vyztužování dílů ze slitin hliníku pomocí kompozitů. Pro zhodnocení současného stavu bylo proto nutné nepřetržitě studovat převážně zahraniční literaturu, týkající se všech tří výše zmíněných oblastí.

Celá práce je zaměřena na technologickou stránku problému, z čehož vyplývá velký podíl praktických zkoušek pro určení jednotlivých technologických vlivů a vlivů prostředí na mechanické vlastnosti spoje kompozit-slitina hliníku. Před samotnými zkouškami bylo třeba se seznámit se způsobem práce s kompozitními materiály, vyzkoušet si jednotlivé metody vytvrzování, tj. práci s autoklávem, vakuovou vývěvou a hydraulickým lisem se zabudovanou pryžovou membránou. Dalším krokem pak byla nutnost vybrat a vyzkoušet si jednotlivé povrchové úpravy a nejvhodnější postup výroby vzorků. Vzhledem k tomu, že zkoušky byly vyhodnocovány s pomocí počítačového programu, který zaznamenával data

z měřicí ústředny propojené se siloměrem, bylo třeba získat dostatečné zkušenosti s prací na tomto vybavení a s postupem při vyhodnocování výsledků zkoušek. Pro zkoušku ILSS bylo také nutné vyrobit zkušební přípravek s rozměry podle normy EN 2563. Bez těchto nezbytných záležitostí by vlastní práce nemohla dospět ke zdárnému splnění všech stanovených cílů.

6 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

6.1 Použité experimentální metody

Vyhodnocení jednotlivých zkoumaných vlivů bylo prováděno na základě:

– *zkoušky smykové pevnosti přeplátovaných spojů*

Tato zkouška patří ke standardním zkouškám lepených spojů. I v případě spoje kompozit-hliníková slitina bez využití lepidla se epoxidová matrice kompozitu chová obdobně jako lepidlo. Průběh a parametry zkoušky vycházely z normy ČSN EN 1465. Pevnost ve smyku se vyjadřuje podle vzorce [42]:

$$\tau = \frac{F}{bp} \text{ [MPa]} \text{ kde „F“ je maximální síla v momentě lomu, „b“ je šířka vzorku (25}$$

mm) a „p“ je přeplátování vzorku (12,5 mm).

– *zkoušky interlaminární smykové pevnosti (ILSS)*

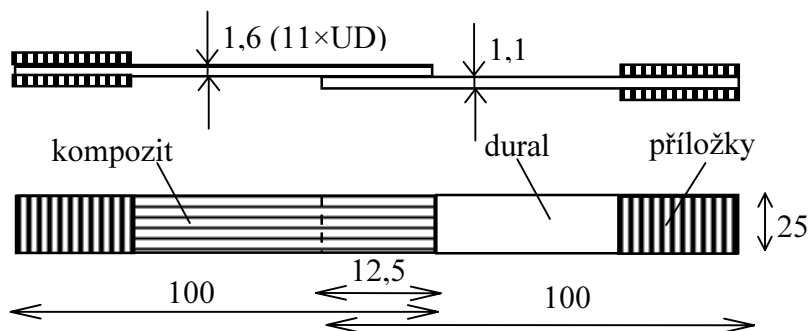
Tato zkouška je určena pro zjišťování interlaminární smykové pevnosti čistě kompozitových vzorků. Jde o tříbodový ohyb s velmi malou roztečí podpor, při kterém dochází k namáhání vzorku velkým smykovým napětím a k porušení interlaminárním smykem (delaminací). I v případě spojů kompozit-hliníková slitina dokáže tato zkouška dobře vystihnout důsledky jednotlivých zkoumaných vlivů působících především na jejich rozhraní. Průběh a parametry zkoušky vycházely z normy ČSN EN 2563. Vzorek byl při zkoušce orientován kompozitovou stranou dolů (tahová strana). Hodnota ILSS se vypočte ze vzorce [46]:

$$ILSS = \frac{3F}{4bh} \text{ [MPa]} \text{ kde „F“ je maximální síla v momentě prvního porušení, „b“ je}$$

šířka vzorku (10 mm) a „h“ je tloušťka vzorku.

6.2 Výroba vzorků

Vzorky pro zkoušky smykové pevnosti přeplátovaných spojů byly vyrobeny podle normy ČSN EN 1465 [42], s tím rozdílem, že jedna část vzorku byla kompozitová (11 vrstev uhlíkového UD prepregu). Oproti normě, která požaduje tloušťku obou adherendů 1,6 mm, byl použit plech o tloušťce 1,1 mm (obr.2.). Snížená tuhost duralové části však byla vyrovnána větší tuhostí části kompozitové, což zaručovalo srovnatelné podmínky zkoušky.



Obr. 2: Vzorek pro zkoušku smykové pevnosti překlátovaných spojů [42]

Vzorky pro zkoušky ILSS byly vyrobeny podle normy ČSN EN 2563 [46], s tím rozdílem, že horní část vzorku byla duralová. Kompozitová část se pak skládala ze 4 vrstev uhlíkového UD prepregu. Příčné rozměry vzorků byly 20×10 mm s delší stranou ve směru vláken. Označení jednotlivých skupin vzorků společné pro obě zkoušky je uvedeno v tabulce 2.

Tab.2. Označení a charakteristika jednotlivých skupin vzorků

skup. vzorků	povrchová úprava duralu	postup dosažení spoje	vytvrz. tlak
1	aceton + piklování + primer	společné vytvrzení (bez lepidla)	0,1 MPa
2	aceton		
3	aceton + piklování + primer	společné vytvrzení (fóliové lepidlo KFL-120)	
4	aceton		
5	aceton + piklování + primer	lepení za studena (2-složkové lepidlo PL-20)	
6	aceton		
7	aceton + piklování + primer	společné vytvrzení (bez lepidla)	0,3 MPa
8	aceton		
9	aceton + SB + isoprophyl + primer	společné vytvrzení (bez lepidla)	0,1 MPa
10	aceton + Xintox + primer		
11	aceton + SB + isoprophyl + primer	společné vytvrzení (fóliové lepidlo KFL-120)	
12	aceton + Xintox + primer		
13	aceton + SB + isoprophyl + primer	lepení za studena (2-složkové lepidlo PL-20)	
14	aceton + Xintox + primer		

poznámky k tab.2.:

aceton = odmaštění tamponováním acetonem

piklování = moření v roztoku kyseliny chromsírové + oplach studenou a 60⁰C teplou vodou + sušení za teploty 45÷60⁰C

primer = nanesení primeru PFL-120 [33]

SB = broušení brusným kotoučem střední drsnosti Scotch Brite [32] upevněným v ruční vrtačce ve dvou kolmých směrech

isoprophyl = očištění čistým Isoprophyl alkoholem

Xintox = tamponování kyselým čistícím prostředkem Xintox (pH=1, povrchově aktivní činidla, inhibitory a kyselé urychlovače [41])

společné vytvrzením (bez lepidla) = duralová část se spojila přeplátováním s 11 vrstvami prepregu. Následovalo vytvrzování v lisu s pryžovou membránou při teplotě 120⁰C a tlaku 0,1 MPa působícím po dobu 25 minut.

společné vytvrzení (fóliové lepidlo KFL-120) = postupovalo se obdobně jako v předchozím případě jen s tím rozdílem, že mezi dural a prepregy byla vložena vrstva fóliového lepidla KFL-120

lepení za studena (2-složkové lepidlo PL-20) = nejdříve se musela vyrobit kompozitová část (opět z 11-ti UD prepregů) v lisu s pryžovou membránou při teplotě 120⁰C a tlaku 0,1 MPa působícím po dobu 25 minut. Poté byla očištěna acetonem, smirkována (drsnot 220) a opět očištěna acetonem. Nakonec se při pokojové teplotě lepila na duralový panel s použitím 2-složkového lepidla PL-20 při vytvrzovacím tlaku 0,05 MPa působícím po dobu 48 hodin.

Tab.3. Vlastnosti prepregu Strafil[®] C-EPI-150/42 [38]

VLÁKNA		
plošná hmotnost	g/m ²	150 ± 8
pevnost v tahu	MPa	3900
modul pružnosti v tahu	GPa	238
hustota	g/cm ³	1,77
tažnost	%	1,55
MATRICE		
teplota skelného přechodu	⁰ C	110 ± 5
PREPREG		
plošná hmotnost	g/m ²	259 ± 13
obsah pryskyřice	% hmot.	42 ± 3
obsah těkavých látek	% hmot.	≤ 1,2
VYTVRZENÝ KOMPOZIT		
pevnost v tahu	MPa	> 1900
modul pružnosti v tahu	GPa	> 120
pevnost v ohybu	MPa	> 1840
modul pružnosti v ohybu	GPa	> 100
interlaminární smyk. pevnost	MPa	> 80
max. provozní teplota za sucha	⁰ C	80
- za mokra	⁰ C	60
VYTVRZOVACÍ CYKLUS		
teplota a doba vytvrzování	⁰ C/min	120/25 , 140/15 nebo 160/10
vytvrzovací tlak	MPa	0,03÷1
tloušťka vrstvy po vytvrzení	mm	0,14

V průběhu zkoušek byly použity následující materiály:

- plech ze slitiny hliníku ČSN 424203.61 (AlCu4Mg1) o tloušťce 0,75 mm pro zkoušky ILSS a 1,1 mm pro zkoušky smykové pevnosti přeplátovaných spoju

- UD prepreg Strafil[®] C-EPI-150/42 firmy Hexcel Composites, který obsahuje uhlíková vlákna typu HS uložená v matrici z epoxidové pryskyřice (Tab.3.)

Pro lepení byla používána dvě epoxidová lepidla systému Letoxit [29], [33] od firmy 5 M s.r.o. - konstrukční fóliové lepidlo KFL-120 a 2-složkové lepidlo PL-20 vytvrzující za pokojové teploty a primer PFL-120 (ten má složení 2,2-Dimethyl - 4,4-Methylenbis a slouží jako základ pod lepidla systému Letoxit). Lepidla vznikla jako tuzemská alternativa zahraničních lepidel pro letecké konstrukce (Tab.4.).

Tab.4. Vlastnosti lepidel PL-20 a KFL-120 [33]

lepidlo		PL-20	KFL-120
smyková pevnost	MPa	34÷41	36÷41
vytvrzovací teplota	⁰ C	20	120÷125
vytvrzovací tlak	MPa	0,05	0,05÷0,1
doba vytvrzování	hod.	48	1
rozsah teplot použití	⁰ C	-75 ⁰ C až +60 ⁰ C	-75 ⁰ C až +100 ⁰ C

6.3 Výsledky zkoušek

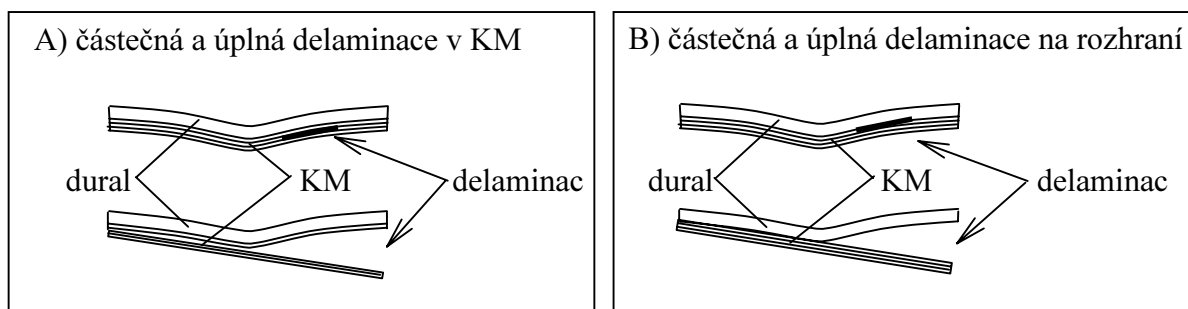
Tab.5. Výsledky zkoušek technologických vlivů

skup. vzorků	zkouška smykové pevnosti přeplátovaných spojů		zkouška ILSS		
	smyková pevnost [MPa]	typ lomu	ILSS [MPa]	odpovídající průhyb [mm]	typ lomu
1	24,3 ± 0,4	kohezní	77,8 ± 2,3	0,762 ± 0,042	převažuje B
2	15,9 ± 0,1	adhezní	59,9 ± 4,0	0,463 ± 0,030	B
3	34,7 ± 1,0	kohezní	76,5 ± 2,3	0,958 ± 0,030	A
4	31,6 ± 0,1	adhezní	77,5 ± 0,6	0,950 ± 0,043	A
5	28,0 ± 0,6	smíšený	70,3 ± 2,2	0,980 ± 0,107	A, B
6	14,5 ± 0,2	adhezní	-	-	-
7	nezkoušeno	-	77,9 ± 2,0	0,736 ± 0,038	převažuje B
8	nezkoušeno	-	63,2 ± 2,4	0,499 ± 0,029	B
9	21,2 ± 1,3	adhezní	62,5 ± 1,5	0,552 ± 0,014	B
10	18,5 ± 0,6	adhezní	56,7 ± 1,9	0,461 ± 0,018	B
11	34,3 ± 0,4	smíšený	78,7 ± 3,0	1,194 ± 0,053	A
12	31,0 ± 0,5	smíšený	70,7 ± 2,6	0,852 ± 0,022	převažuje A
13	6,9 ± 0,4	adhezní	65,7 ± 1,8	0,816 ± 0,028	B
14	5,5 ± 0,6	adhezní	-	-	-

poznámky k tab.5.:

- typ lomu u zkoušky ILSS byl rozdělen do 2 kategorií (obr.3.):
 - A - částečná nebo úplná delaminace v kompozitové části vzorku

- B - částečná nebo úplná delaminace na rozhraní spoje kompozit-dural (obdoba adhezního lomu u zkoušky smyk. pevnosti přeplátovaných spojů)
- u zkoušky ILSS nebyly vzorky 6 a 14 hodnoceny, protože neměly ani minimální manipulační pevnost



Obr. 3: Charakteristický vzhled jednotlivých typů lomů u zkoušky ILSS

V tabulce 6 jsou uvedeny výsledky zkoušek ILSS pro určení vlivu umělého stárnutí po dlouhodobém působení kapaliny. Vzorky byly vystaveny působení vody a zvýšené teploty 70⁰C po dobu 72 hodin, což simuluje stárnutí materiálů a degradaci jejich vlastností při působení vlivů prostředí, ve kterém se v praxi mohou nacházet. U epoxidové matrice by navíc mohlo docházet k absorpci vody a tedy k bobtnání nebo k jiným jevům, které jsou plastickým hmotám vlastní. Po 3 dnech vystavení těmto ztíženým podmínkám byla standardním způsobem provedena zkouška ILSS.

Tab.6. Výsledky zkoušek vlivu umělého stárnutí

skup. vzorků	ILSS [MPa]	odpovídající průhyb [mm]	typ lomu
1V	49,9 ± 4,9	0,429 ± 0,042	B
2V	42,9 ± 5,2	0,355 ± 0,054	B
3V	> 86,3 ± 0,1	> 1,790 ± 0,044	bez poruchy
4V	45,1 ± 6,1	0,602 ± 0,106	B
5V	61,9 ± 3,1	0,997 ± 0,065	převažuje B
7V	46,3 ± 1,0	0,389 ± 0,015	B
8V	44,2 ± 1,0	0,349 ± 0,012	B

poznámky k tab.6.:

- charakteristiky jednotlivých skupin vzorků 1V až 8V, které podstoupily zkoušku dlouhodobého působení kapaliny, odpovídají charakteristikám skupin vzorků 1 až 8 (viz tab.2.)
- označení typu lomu má stejný význam jako u tab.5.
- typ lomu u vzorků 3V není uveden, protože vzorky byly v okamžiku ukončení zkoušky (při dosažení limitního průhybu) bez viditelné poruchy

V tabulce 7 jsou uvedeny výsledky zkoušek ILSS pro určení vlivu cyklického teplotního zatěžování ($T_{MIN} = 50^0C$, $T_{MAX} = 100^0C$, 4500 cyklů), kterého bylo

dosaženo střídavým zapínáním a vypínáním proudu procházejícího přes vzorky. Chlazení bylo zintenzívněno proudem vzduchu od ventilátoru. Měření teploty pro její regulaci bylo zajištěno bezkontaktním zařízením RAYNGER®3i™ pro infračervené měření teploty. Signál o skutečné teplotě vzorku se v reálném čase přenášel do programovatelného regulátoru MIKROTHERM MT 825. Ten po celou dobu zkoušky zajišťoval požadovanou minimální a maximální teplotu.

Tab.7. Výsledky zkoušek vlivu cyklického teplotního zatěžování

skup. vzorků	ILSS [MPa]	odpovídající průhyb [mm]	typ lomu
1C	77,7 ± 2,0	0,764 ± 0,035	B
3C	76,2 ± 2,2	0,954 ± 0,051	A
5C	70,5 ± 2,0	0,985 ± 0,076	A, B

poznámka k tab.7.:

- označení typu lomu má stejný význam jako u tab.5

Cílem této zkoušky bylo určit vliv cyklického ohřevu a ochlazování, což simuluje střídání teplot na leteckých konstrukcích v průběhu jejich provozu. Minimální teplota byla pro zkoušku zvolena 50⁰C, což je více než odpovídá skutečné „minimální“ teplotě na kovové konstrukci v létě. Tato hodnota však zajišťovala rychlejší průběh celé zkoušky, protože bylo snazší ochladit vzorek na 50⁰C, než například na teplotu 30⁰C, což je hodnota příliš blízká teplotě okolí. Vzorky byly vyráběny obdobným způsobem jako pro předchozí zkoušky ILSS, jejich rozměry však byly 250×10 mm s delší stranou ve směru vláken kompozitu. Po skončení zkoušek cyklického teplotního zatěžování byly vzorky ve tvaru pásků rozřezány na standardní velikost 20×10 mm pro následné zkoušky ILSS.

6.4 Diskuse výsledků zkoušek

6.4.1 Vliv velikosti vytvrzovacího tlaku

Porovnávány byly následující hodnoty vytvrzovacích tlaků:

- tlak 0,1 MPa (vzorky 1, 2)
- tlak 0,3 MPa (vzorky 7, 8)

Hodnota 0,1 MPa byla zvolena záměrně pro potvrzení nebo zamítnutí možného budoucího využití vakuového způsobu výroby kompozitových výztuh. Hodnota 0,3 MPa pak leží zhruba uprostřed intervalu doporučeného výrobcem.

Srovnáním výsledků zjistíme, že v obou případech jsou hodnoty ILSS i průhybů v momentě poruchy takřka identické. Pokud jde o rozdíly v typu lomu, u vzorků 1, 2, 7 i 8 došlo k delaminaci na rozhraní kompozit-dural. Celkově lze konstatovat, že pokud se vytvrzovací tlak pohybuje v rámci výrobcem doporučeného rozmezí, nemá

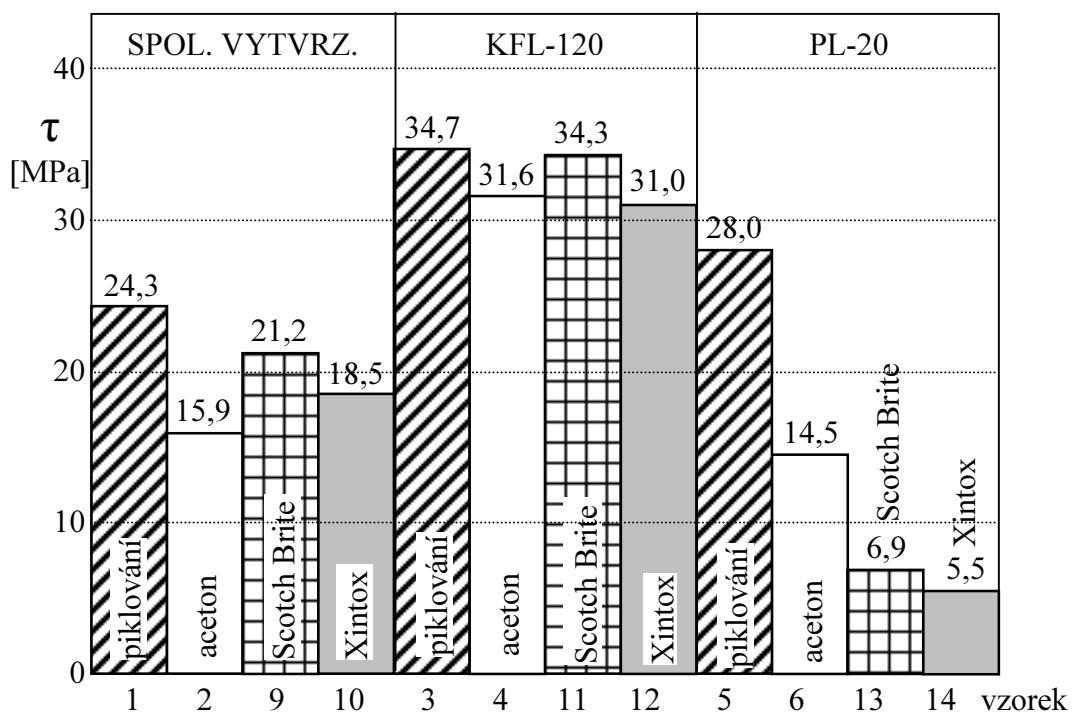
jeho velikost vliv na hodnotu ILSS, velikost průhybu v okamžiku poruchy ani charakter lomu.

6.4.2 Vliv přípravy povrchu

Porovnávány byly následující postupy povrchové úpravy duralu:

- odmaštění v acetonu + piklování + primer (vzorky 1, 3, 5, 7)
- odmaštění v acetonu (vzorky 2, 4, 6, 8)
- odmaštění v acetonu + broušení metodou Scotch Brite + očištění Isoprophyl alkoholem + primer (vzorky 9, 11, 13)
- odmaštění v acetonu + tamponování prostředkem Xintox + primer (vzorky 10, 12, 14)

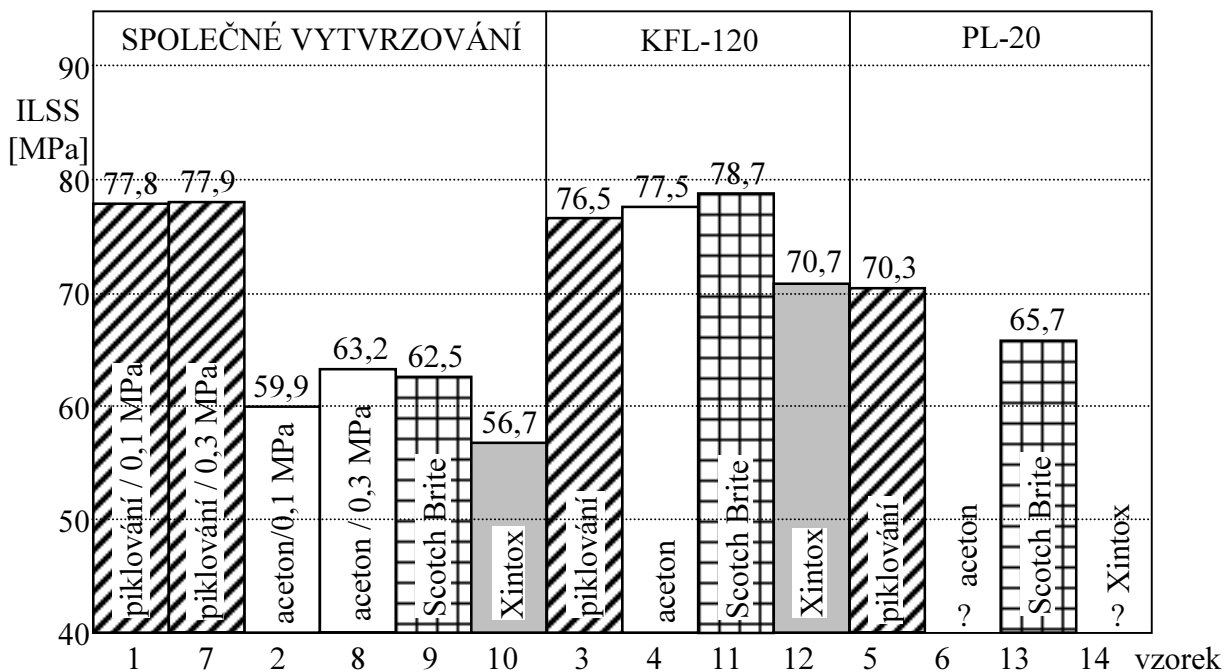
Grafické znázornění výsledků zkoušky smykové pevnosti přelátovaných spojů je na obrázku 4. Z výsledků je patrné, že nejlépe vychází u všech třech porovnávaných skupin povrchová úprava piklováním. Pokud jde o rozdíly ve vzhledu lomové plochy v závislosti na druhu povrchové úpravy, u všech třech porovnávaných skupin vykazovaly vzorky s nejvyšší smykovou pevností kohezní (vzorky 1 a 3) nebo alespoň smíšený (vzorky 5, 11 a 12) lom. To znamená, že pokud jde o vzhled lomové plochy tak nejlepších výsledků dosáhly všechny piklované vzorky a při použití lepidla KFL-120 i vzorky upravené metodou Scotch Brite, resp. prostředkem Xintox. U kohezně porušených vzorků byly z kompozitu vytrženy jeho povrchové vrstvy, které zůstaly na duralové části popřípadě ve vrstvě



lepidla.

Obr. 4: Výsledky zkoušek smykové pevnosti přelátovaných spojů pro určení vlivu povrchové úpravy

Graf na obrázku 5 znázorňuje výsledky zkoušek ILSS pro určení vlivu povrchové úpravy. Z výsledků je tentokrát patrné, že neexistuje jednoznačně nejlepší povrchová úprava, ale že výsledky jsou závislé na použité metodě spojení. Přesto lze konstatovat, že mezi nejlepší typ povrchové úpravy patří opět piklování (vzorky 1, 3, 5 a 7). Jako velmi dobrá povrchová úprava se ukázala i metoda Scotch Brite (především vzorky 11 a 13). Naopak jako nejhorší vychází očištění přípravkem Xintox a v některých případech i očištění acetonem. Nejvíce jsou na druhu povrchové úpravy závislé vzorky lepené za studena lepidlem PL-20, kde se také objevily dva případy, u kterých nebylo dosaženo ani manipulační pevnosti (vzorky 6 a 14). Při použití lepidla PL-20 se tak ukázala nezbytnou povrchová úprava piklováním. Nejvyrovnanějších výsledků bylo dosaženo ve skupině vzorků společně vytvrzovaných s využitím fóliového lepidla KFL-120, kde prakticky nezáleželo na použité povrchové úpravě (rozdíl v dosažených hodnotách smykových pevností i ILSS byl přibližně do 10 % a hodnoty naměřených průhybů patřily k nejvyšším).

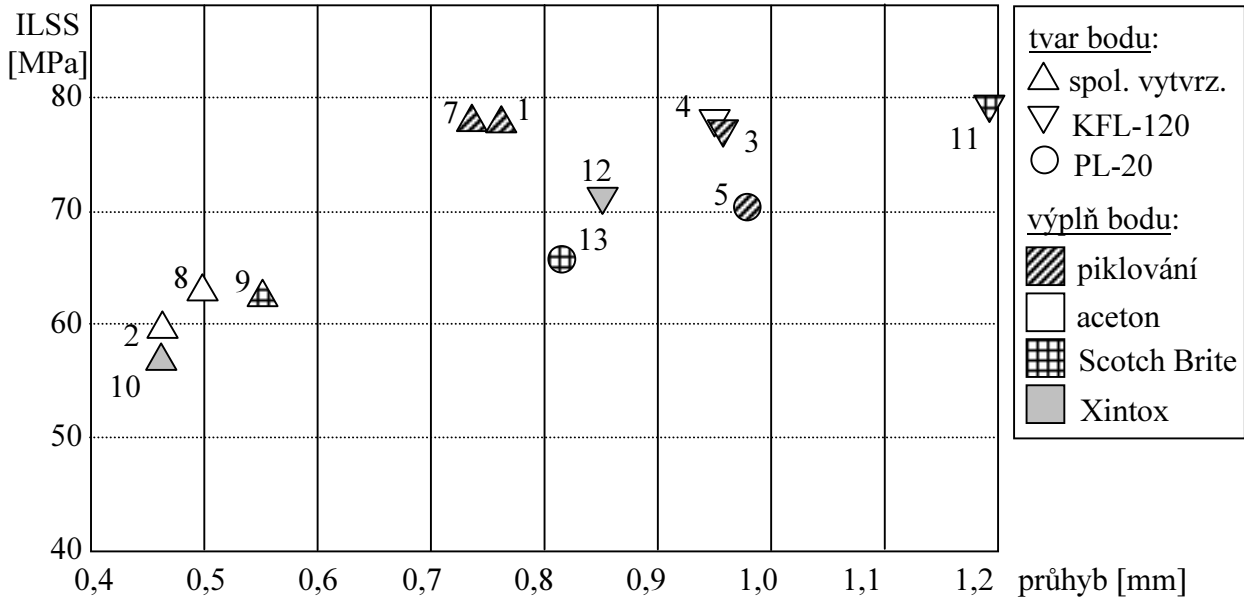


Obr. 5: Výsledky zkoušek ILSS pro určení vlivu povrchové úpravy

Graf na obrázku 6 také znázorňuje výsledky zkoušek ILSS pro určení vlivu povrchové úpravy. Jsou však zobrazeny v souřadnicích ILSS-průhyb v momentě poruchy. Zde je třeba zdůraznit, že žádoucí je co možná největší průhyb při poruše a při odpovídající hodnotě ILSS – neboli k poruše by mělo dojít co nejpозději. Bod by tak měl být v grafu umístěn co nejvýše a nejvíce vpravo. Porovnávají se opět výsledky pouze v rámci jednotlivých hodnocených skupin. Každé skupině pak odpovídá jiný tvar bodu.

Celkově lze shrnout, že ve všech případech patří k nejkvalitnějším povrchová úprava piklováním. Naopak jako nejhorší vychází očištění přípravkem Xintox a v některých případech i očištění acetonem. Velkou předností pouhého očištění

povrchu acetonem nebo přípravkem Xintox je především jejich jednoduchost a nízké náklady. Tyto postupy jsou však vhodné jen pro méně zatížené spoje. Pokud jde o vzorky společně vytvrzované s využitím fóliového lepidla KFL-120, lze o nich konstatovat, že hodnoty smykových pevností a ILSS těchto vzorků nejsou na druhu povrchové úpravy závislé.



Obr. 6: Výsledky zkoušek ILSS pro určení vlivu povrchové úpravy

6.4.3 Vliv metody spojování

Porovnávány byly následující metody spojení kompozitu a duralu:

- společné vytvrzení bez použití lepidla (vzorky 1, 2, 7, 8, 9, 10)
- společné vytvrzení s použitím fóliového lepidla KFL-120 (vzorky 3, 4, 11, 12)
- lepení za studena dvousložkovým lepidlem PL-20 (vzorky 5, 6, 13, 14)

V případě zkoušek smykové pevnosti přepřátovaných spojů jak hodnoty smykových pevností, tak i vzhled lomových ploch ukazují na pozitivní vliv kvalitní metody spojování v tomto případě především společným vytvrzením s použitím lepidla KFL-120. Všechny vzorky, které byly takto spojeny (vzorky 3, 4, 11, 12), dosáhly v rámci všech porovnávaných skupin nejvyšších hodnot smykových pevností a ostatní vzorky předčily (nebo se jim alespoň vyrovnaly) i ve vzhledu lomových ploch.

I z výsledků zkoušek ILSS je patrné, že jednoznačně nejkvalitnější metodou spojování duralu a kompozitu je společné vytvrzení s použitím lepidla KFL-120. Mimo vysokých hodnot ILSS vykazovaly všechny tyto vzorky i vysokou hodnotu průhybu v momentě poruchy. Vzorky 4 (acetón), 11 (Scotch Brite) a 12 (Xintox) dosáhly maximální hodnoty ILSS v rámci jednotlivých hodnocených skupin a vzorky 3 (piklování) zaznamenaly pokles pouze o necelé 2%. Vzorky společně vytvrzené bez použití lepidla vykázaly pokles přibližně 20% (vzorky 2, 8, 9 a 10) přičemž vzorky 1 a 7 (piklování) dosáhly maximálních hodnot ILSS. Naopak jako

nejhorší vychází lepení za studena lepidlem PL-20 (vzorky 5, 6, 13 a 14). Vzorky 6 a 14 dokonce neměly ani minimální manipulační pevnost. Velkou předností této metody spojování je především to, že probíhá za teploty okolí. Tento postup je však vhodný jen pro méně zatížené spoje a to pouze při použití povrchové úpravy piklováním.

6.4.4 Vliv umělého stárnutí po dlouhodobém působení kapaliny

Jsou porovnávány vzorky 1, 2, 3, 4, 5, 7 a 8 zkoušené za normálních podmínek a vzorky 1V, 2V, 3V, 4V, 5V, 7V a 8V, které byly vystaveny vlivu umělého stárnutí (voda/70⁰C/72hod.). Tato zkouška zjišťovala odolnost spoje obou použitých materiálů vůči kombinovanému působení vody a zvýšené teploty po dobu 3 dnů, což simuluje stárnutí materiálů a degradaci jejich vlastností při působení vlivů prostředí, ve kterém se v praxi mohou nacházet (vlhkost, teplo). Porovnání výsledků zkoušky je uvedeno v tabulce 8.

Tab.8. Vyhodnocení zkoušek vlivu umělého stárnutí

porovnáváné skup. vzorků	rozdíl v dosažené ILSS		rozdíl v dosaženém průhybu	
	[MPa]	[%]	[mm]	[%]
1 – 1V	– 27,9	– 36	– 0,333	– 44
2 – 2V	– 17,0	– 28	– 0,108	– 23
3 – 3V	+ 9,8	+ 13	+ 0,832	+ 87
4 – 4V	– 32,4	– 42	– 0,348	– 37
5 – 5V	– 8,4	– 12	+ 0,017	+ 2
7 – 7V	– 31,6	– 41	– 0,347	– 47
8 – 8V	– 19,0	– 30	– 0,150	– 30

poznámky k tab.8.:

- znaménko mínus znamená pokles dané hodnoty po umělém stárnutí
- u vzorků 3-3V se jedná o minimální zaručené hodnoty, protože vzorky byly v okamžiku ukončení zkoušky bez viditelné poruchy

Lze konstatovat, že umělé stárnutí v horké vodě má negativní vliv na vlastnosti téměř všech typů spojů kompozit-dural, s výjimkou vzorků 3V (piklování + KFL-120) a částečně i 5V (piklování + PL-20). Tato degradace vlastností je zapříčiněna zvýšeným působením elektrochemické reakce na rozhraní obou použitých materiálů. U vzorků 3V je poněkud překvapivý výsledek (min. nárůst ILSS o 13% a průhybu dokonce o 87%) možné vysvětlit kombinací kvalitní povrchové úpravy (piklování), změkčení epoxidového lepidla KFL-120 ve vlhkém prostředí a jeho dobrého izolačního působení na rozhraní obou materiálů. Obdobně, ale v menším měřítku, to platí i pro vzorky 5V, které také zahrnují kombinaci kvalitní povrchové úpravy a epoxidového lepidla.

Pokud jde o rozdíly v typu lomu před a po umělém stárnutí byly zjištěny prakticky pouze u vzorků 4V (aceton + KFL-120). Zatímco u vzorků 4 došlo

k delaminaci v kompozitu, u vzorků 4V již došlo k delaminaci na rozhraní kompozit-dural. To však odpovídá typu lomu ostatních vzorků po umělém stárnutí, takže vzorky 4V se pouze „snížily“ na úroveň ostatních vzorků. Částečné zhoršení typu lomu je možné najít i u vzorků 1V (piklování + spol. vytvrzení při tlaku 0,1 MPa) a 7V (piklování + spol. vytvrzení při tlaku 0,3 MPa), kde došlo ke změně převážně adhezního na čistě adhezní lom a u vzorků 5V (piklování + PL-20), kde došlo ke změně ze smíšeného na adhezní typ lomu. Všechny vzorky se tak po umělém stárnutí porušily stejně – téměř u všech došlo k delaminaci na rozhraní kompozit-dural.

Jak je vidět z výše uvedených výsledků, velkou roli při volbě metody vyztužení pomocí kompozitů bude hrát i umístění výztuhy na konstrukci a intenzita jejího vystavení nepříznivým vlivům počasí. V praxi je však kompozitová výztuha (stejně jako klasická kovová „záplata“) opatřena ochranným nátěrem, který brání přístupu vlhkosti do oblasti spoje. Ať již bude výztuha umístěna uvnitř konstrukce nebo na nějakém exponovaném místě na povrchu, bude třeba ji v rámci pravidelných prohlídek vždy důkladně kontrolovat.

6.4.5 Vliv cyklického teplotního zatěžování

Zkoušky cyklického teplotního zatěžování mohou velmi dobře napodobit nízkocyklovou únavu při střídání teplot působících na konstrukci letadel. Letecká technika je v provozu vystavena vlivům působení různých teplot a je známo, že materiály vystavené opakovanému teplotnímu zatížení se mohou porušit dříve než ty, které tomuto vlivu vystaveny nebyly. U každého kovového dílu, který bude vystaven přímému účinku slunce, se musí počítat s výrazným zahřátím jeho povrchu. Maximální teploty v letním období snadno dosáhnou na kovových konstrukcích 80⁰C i více. V tomto případě hraje velkou roli i barva nátěru. Rozdíl teplot v létě mezi sluncem rozpáleným povrchem a teplotou i v malé letové výšce pak může být klidně i 50⁰C. Časté střídání teplot může mít nepříznivý vliv i na mechanické vlastnosti spoje kompozit-dural. U spojů kombinovaných z různých materiálů se totiž mohou projevit jejich rozdílné termofyzikální vlastnosti, jako například odlišná lineární teplotní roztažnost. Podrobnější údaje o chování materiálu kompozit-dural za těchto podmínek také nejsou dostupné. Účelem bylo zjistit změny v mechanických vlastnostech, určit jejich závažnost a získat tak další údaje o chování těchto materiálů.

Jsou porovnávány vzorky 1, 3 a 5 zkušební za normálních podmínek a vzorky 1C, 3C a 5C, které byly vystaveny vlivu cyklického teplotního zatěžování s parametry: $T_{\text{MIN}} = 50^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{MAX}} = 100^{\circ}\text{C}$, 4500 cyklů.

Vyhodnocením dosažených hodnot ILSS, odpovídajících průhybů v okamžiku poruchy a typů lomu nebyly zjištěny takové rozdíly, které by vybočovaly z možné statistické chyby (rozdíly v dosažených hodnotách ILSS i odpovídajících průhybů se pohybují v intervalu $\pm 0,5\%$). Lze tedy konstatovat, že cyklické teplotní

zatěžování nemá při zvolených parametrech na vlastnosti spoje kompozit-dural žádný vliv.

Nabízí se tedy otázka, zda vůbec má dlouhodobé střídání teplot vliv na vlastnosti spoje kompozit-dural. Zvětšení rozsahu teplot, jeho posun k vyšším hodnotám nebo zvýšení počtu cyklů by určitě negativně ovlivnilo vlastnosti tohoto spoje, avšak zároveň s tím by zmizelo i logické odůvodnění zvolených parametrů. Rozdíl mezi minimální a maximální teplotou i počet cyklů, který odpovídá přibližně 25-ti letům intenzivního provozu, byl vybrán, aby co nejvíce odpovídal praxi. Navíc horní teplota intervalu již i tak překročila maximální provozní teplotu použitého kompozitu 80⁰C. U dvousložkového lepidla PL-20 je maximální teplota použití dokonce jen 60⁰C, i když v obou případech se jedná o maximální trvalou provozní teplotu. Vlastnosti spoje kompozit-dural by také mohla ovlivnit kombinace cyklického teplotního zatěžování a některého dalšího vlivu prostředí (vlhkosti, slaného prostředí, apod.).

7 ZÁVĚR

V průběhu zkoušek byly vyzkoušeny čtyři druhy povrchové úpravy duralu (očištění acetonem, piklování, broušení brusným kotoučem Scotch Brite a očištění kyselým čistícím prostředkem Xintox), tři druhy jeho spojení s kompozitem (společné vytvrzení bez použití lepidla, společné vytvrzení s fóliovým lepidlem KFL-120 a lepení za studena dvousložkovým lepidlem PL-20) a dvě hodnoty vytvrzovacího tlaku (0,1 a 0,3 MPa). Vzorky byly také podrobeny podmínkám umělého stárnutí i střídavému působení vysokých teplot.

Jako nejkvalitnější povrchová úprava se ukázalo tradiční piklování v kyselině chromsírové. Naopak jako nejhorší vychází očištění kyselým přípravkem Xintox a v některých případech i očištění acetonem. Velkou předností těchto dvou postupů je především jejich jednoduchost a nízké náklady, jsou však vhodné jen pro méně zatížené spoje. Při použití dvousložkového lepidla PL-20 se ukázala nezbytnou povrchová úprava piklováním (při použití acetonu nebo přípravku Xintox nebylo u zkoušek ILSS dosaženo ani minimální manipulační pevnosti). Nejvyrovnanějších výsledků bylo dosaženo u vzorků společně vytvrzovaných s využitím fóliového lepidla KFL-120, kde prakticky nezáleželo na použité povrchové úpravě (rozdíl v dosažených hodnotách smykových pevností i ILSS byl přibližně do 10 %). Při určitém zjednodušení se o nich dá konstatovat, že nejsou na druhu povrchové úpravy závislé.

Pokud jde o metody spojení kompozitu a duralu jednalo se o společné vytvrzování kompozitových prepregů na duralu (bez použití lepidla), o lepení předem vyrobených kompozitových výztuh dvousložkovým lepidlem PL-20 za studena a o kombinaci společného vytvrzování a lepení – tj. o použití fóliového lepidla KFL-120. Nejkvalitnější metodou spojení se jednoznačně ukázalo společné vytvrzení s použitím fóliového lepidla KFL-120. Je to dáno nejvyššími hodnotami smykových pevností, ILSS i odpovídajícího průhybu, ale i vzhledem lomových

ploch (nejlepší nebo alespoň stejný v rámci hodnocených skupin), resp. typem lomu (ten nastal prakticky vždy v kompozitu). Naopak jako nejhorší vychází lepení za studena dvousložkovým lepidlem PL-20 (vzorky očištěné acetonem, resp. prostředkem Xintox neměly dokonce ani minimální manipulační pevnost). Tento postup je vhodný jen pro méně zatížené spoje a to pouze při použití povrchové úpravy piklováním. Obecně však každá z metod prokazuje v určitých případech svoje přednosti. Lepení za studena má nespornou výhodu v tom, že probíhá za teploty okolí a tedy i v absenci teplotního pnutí ve vyztuženém dílu a při použití ještě kvalitnějších lepidel by zajisté dokázala konkurovat i zbylým dvěma postupům. Ty zatím převyšují lepení za studena po stránce pevnostní, zvláště při nepříznivém působení vlivů prostředí. Ruční laminování metodou mokrého kladení nebylo zkoušeno, i když se v oblasti oprav hojně využívá. Důvodem byla snaha upřednostnit využívání kompozitových prepregů, především jako záruku stabilních a kvalitních vlastností.

Po vyhodnocení výsledků zkoušek na určení vlivu velikosti vytvrzovacího tlaku lze konstatovat, že pokud se tento tlak pohybuje v rámci výrobcem doporučeného rozmezí, nemá jeho velikost vliv na hodnotu ILSS, velikost průhybu v okamžiku poruchy ani charakter lomu. Vzhledem k tomuto zjištění je možné považovat vakuovou metodu k dosažení vytvrzovacího tlaku za dostatečnou a rovnocennou k ostatním metodám jako je lis s pryžovou membránou nebo použití autoklávu. V průběhu práce byly vyzkoušeny všechny tři výše uvedené postupy, i když pro výrobu vzorků byl nakonec použit lis s pryžovou membránou. Důvodem byla hlavně velikost vyráběných panelů (které se později nařezaly na jednotlivé vzorky), která umožňovala použití tohoto postupu. Vakuová metoda najde své uplatnění hlavně při vyztužování přímo na konstrukci bez nutnosti její demontáže (včetně případů kdy tuto demontáž nelze vůbec provést).

Toto jsou dílčí závěry, ale konečné výsledky jednotlivých skupin vzorků je nutné posuzovat globálně jako společný výsledek kombinace jednotlivých vlivů. Ve skutečnosti občas více záleželo na konkrétní kombinaci metody spojení a povrchové úpravy. Mezi nejkvalitnější postupy tak patří:

- všechny postupy využívající společné vytvrzení s použitím fóliového lepidla KFL-120 s libovolnou povrchovou úpravou duralu:
 - odmaštění tamponováním acetonem + piklování + nanesení primeru PFL-120 (vzorky 3) nebo
 - odmaštění tamponováním acetonem (vzorky 4) nebo
 - odmaštění tamponováním acetonem + broušení brusným kotoučem Scotch Brite + očištění čistým Isoprophyl alkoholem + nanesení primeru PFL-120 (vzorky 11) nebo
 - odmaštění tamponováním acetonem + tamponování kyselým čistícím prostředkem Xintox + nanesení primeru PFL-120 (vzorky 12)
- společné vytvrzení bez lepidla s povrchovou úpravou duralu:

- odmaštění tamponováním acetonem + piklování + nanesení primeru PFL-120 (vzorky 1, resp. 7) nebo
- odmaštění tamponováním acetonem + broušení brusným kotoučem Scotch Brite + očištění čistým Isoprophyll alkoholem + nanesení primeru PFL-120 (vzorky 9)
- lepení za studena dvousložkovým lepidlem PL-20 s povrchovou úpravou duralu:
 - odmaštění tamponováním acetonem + piklování + nanesení primeru PFL-120 (vzorky 5)

Pokud jde o vlivy prostředí byly vzorky podrobeny umělému stárnutí i střídavému působení vysokých teplot. Bylo zjištěno, že umělé stárnutí má u většiny zkoušených vzorků negativní vliv na jejich vlastnosti (ILSS, velikost průhybu v okamžiku poruchy, charakter lomu). To je s největší pravděpodobností zapříčiněno zvýšeným působením elektrochemické reakce na rozhraní obou použitých materiálů, umístěných ve vodě za současného působení vysoké teploty. Řešením by bylo vložení vrstvy prepregu se skleněnými vlákny mezi uhlíkový kompozit a duralový povrch nebo využití různých ochranných nátěrových systémů. U vzorků vystavených cyklickému teplotnímu zatěžování naopak nebyly zjištěny takové rozdíly, které by vybočovaly z možné statistické chyby.

Všechny cíle, které byly vytyčeny na počátku práce byly splněny. Podařilo se shromáždit dostatečné množství poznatků a údajů z teoretické oblasti i z praxe a provést všechny zamýšlené zkoušky. Konečným shrnutím všech provedených závěrů lze dospět k následujícímu zhodnocení.

Spojením obou použitých materiálů - uhlíkového kompozitu a hliníkové slitiny - lze využít jejich předností a dosáhnout velmi dobrých výsledků. Jednotlivé prvky rozličných konstrukcí ze slitin hliníku je tak možné vyztužit nebo opravit za pomoci uhlíkového kompozitu všude tam, kde to bude výhodné. Ať již z pevnostního, aerodynamického, ekonomického nebo jiného důvodu.

Metody povrchových úprav zahrnovaly jednoduché postupy vhodné i na úpravu přímo na rozměrných konstrukcích včetně nových prostředků i klasické metody známé již desítky let. Byly to „mokré“ postupy založené na aplikaci různých kapalin i mechanická úprava povrchu broušením. Žádná z metod neměla jen přednosti, většinou byly dobré mechanické hodnoty vykoupeny složitostí, cenou nebo použitím neekologických chemických látek.

Podobné to bylo i u porovnávaných metod spojení uhlíkového kompozitu a hliníkové slitiny. Výborné mechanické vlastnosti společného vytvrzování, ať již s fóliovým lepidlem nebo bez něj, jsou částečně znehodnocovány faktem, že u velkých konstrukcí je složitější takto vytvrzovat „in situ“. Zjištění, že pro kvalitní vytvrzení stačí i vakuování, tuto nevýhodu částečně zmírňuje. Naopak relativně bezproblémové lepení za studena dávalo obvykle nižší mechanické hodnoty.

Příklady použití kompozitů pro vyztužování nebo opravy různých částí konstrukcí civilních i vojenských letounů uvedené v literatuře dávají jasný signál o správnosti myšlenky kombinace dvou tak rozdílných materiálů. Pro větší rozšíření této nové technologie je však třeba posoudit ještě mnoho věcí a provést řadu dalších náročných zkoušek, jako například dlouhodobé zkoušky při různých podmínkách prostředí, únavové zkoušky, zkoušky vzorků s vruby nebo otvory, aplikace kompozitových prepregů přes hlavy nýtů a v rozích s malým poloměrem, na skutečných konstrukcích, apod.

Zjištěné výsledky kombinace kompozitního materiálu a hliníkové slitiny však dávají dobrý předpoklad k využití a rozšíření této technologie pro letecké konstrukce i pro další aplikace u nás.

Tato práce vznikla za podpory grantu GAČR č.101/97/0308 „Technologie a vlastnosti kompozitních materiálů pro aplikace v letectví a ortopedické protetice“.

8 SUMMARY

The aim of the dissertation work is to study the bimaterial consisting of C/epoxy composite and aluminium alloy. In this case the composite is used for reinforcing or repairs of aluminium structures. This combination offers high strength and stiffness as well as weight and cost reduction. It is useful to use it not only for stiffness raising but also for underdesigned and corroded parts, fatigue cracks stoppers to reduce deflection or eliminate flutter, improve damage tolerance etc. (Tab.1.).

8.1 Present state in the field of aluminium alloy surface pretreatments

Achievement of the best quality surface is first and very important point of durable bonding. Amount of aluminium alloy surface pretreatments exist in present time. The purpose of any particular surface pretreatment can be summarized as follows:

- to remove any weak boundary layer on the alloy surface
- to protect the alloy surface prior to the following operation (prepregs application, adhesive bonding)
- to provide maximal mutual affinity between the composite (adhesive, primer) and alloy surface
- to obtain both sufficient initial joint strength and subsequent service life

At this moment the standard surface pretreatment for aluminium alloys consists of solvent clean, alkaline clean, sulphuric acid-dichromat etch, chromic acid anodize (CAA) and primer application (Fig.1.). Water rinse is placed between each step. Solvent clean with an organic solvent has to remove oil and paint residues and degrease the surface. Alkaline cleaning cleans the surface thoroughly. Sulphuric acid-dichromat etch (pickling) removes the old oxide layer with unsuitable

properties (thick and weak oxides, corrosion products, etc.) whereas CAA is applied to produce a new stable oxide layer. In the USA the phosphoric acid anodize (PAA) is often used instead of CAA process. Chemical etching can be replaced by mechanical abrasive methods e.g. sandpaper grinding, Scotch Brite method (using special abrasive flap brushes) [24], grit blasting or SACO process (on similar principle). As a tank anodizing process cannot be performed on a large aircraft structure, some alternatives have been developed including PACS process. This new method produces a phosphoric anodize layer on a structure without removing it from the aircraft. For in-field bonding is also benefit to apply conversion coating in the gel form.

8.2 Present state of the reinforcement techniques

Composite patches formed from a cloth and resin are widely used in a wet lay-up repairs. But they are unsuitable for high loaded parts due to lower properties and reproducibility. This is the reason for another techniques like cocuring with (or without) film adhesive or adhesive bonding of cured composite patch at room-temperature (RT). Cocuring methods had a disadvantage of thermal residual stress occurring on bondline area when patch cools from curing to room temperature.

For curing is possible to choose from several devices, e.g. vacuum bags, various pressure facilities both with internal or external heating, autoclave etc.

8.3 Thesis objectives

The goal of the disertation work can be summarized as follows:

- to obtain detailed knowledge about present state in the field of aluminium alloy surface pretreatment, reinforcing and curing methods and on the practice application of composites for reinforcing and repairs of aluminium structures
- determination of appropriate aluminium alloy surface pretreatment in relation to the reinforcing and repairs of large structures
- determination of appropriate bonding methods of C/epoxy composite and aluminium alloy
- determination of appropriate reinforcing methods
- determination of influence of the cure pressure
- determination of influence of the hot/wet ageing
- determination of influence of the thermal-cyclic test

The testing of mechanical properties included single lap shear tests and interlaminar shear strength tests (short beam tests) according to European standards EN 1465 [42] and EN 2563 [46].

8.4 Main results

Properties of selected unidirectional carbon fibre/epoxy prepreg Strafil C-EPI-150/42 are given in Tab.3. Used aluminium alloy sheets AlCu4Mg1 had a thickness 1,1mm (for EN 1465 tests) or 0,75mm (for EN 2563 tests). Schematic drawing of the single lap shear test specimen is shown in Fig.2. ILSS specimen with dimensions 20×10mm consist of the 0,75mm aluminium alloy and 4×UD prepreg. Properties of both used epoxy adhesives - film adhesive KFL-120 and two-component adhesive for bonding at room temperature - are given in Tab.4. Description of specimens is given in Tab.2. and obtained results in Tab.5. (standard conditions), Tab.6. and Tab.8. (after hot/wet ageing) and Tab.7 (after thermal-cyclic tests). Conditions hot/wet ageing were: 70⁰C/water/72hrs. whereas thermal-cyclic test: T_{MIN} = 50⁰C, T_{MAX} = 100⁰C, 4500 cycles.

Compared aluminium alloy surface pretreatments were as follow: acetone cleaning (specimens 2, 4, 6, 8), acetone cleaning + pickling + primer PFL-120 [33] (spec. 1, 3, 5, 7), acetone cleaning + Scotch Brite brushing (hand drill with rotating SB brush) [32] + Isopropyl alcohol cleaning + primer PFL-120 (spec. 9, 11, 13), acetone cleaning + Xintox cleaning (special acid cleaning fluid) [41] + primer PFL-120 (spec. 10, 12, 14). Influence of the surface pretreatment type is well apparent from Fig.4., Fig.5. and Fig.6. It is evident that pickling is the best method whereas Xintox cleaning is the worst.

Influence of the cure pressure (0,1MPa - spec. 1, 2 versus 0,3MPa - spec. 7, 8) is not significant in case when the pressure is inside of the recommended range of prepreg manufacturer.

Compared bonding methods of C/epoxy composite and aluminium alloy were as follow: cocuring without an adhesive (spec. 1, 2, 7, 8, 9, 10), cocuring with film adhesive KFL-120 (spec. 3, 4, 11, 12), RT adhesive bonding of cured composite patch with two-component adhesive PL-20 (spec. 5, 6, 13, 14). The best bonding method is positively cocuring with adhesive KFL-120, irrespective of surface pretreatment method, whereas adhesive bonding with adhesive PL-20 is the worst.

Negative influence of the hot/wet ageing (spec. 1V ÷ 8V versus spec. 1 ÷ 8) is very significant in almost all cases (Tab.8.). Average decrease of ILSS varies approximately between 30 and 40%. Increase of ILSS in case of spec. 3V is at least 13%, because this test had to be interrupted for achievement of limit deflection without any damage of the noticed specimen. This very interesting result can be explained by adhesive and composite matrix plastication in wet conditions.

There was determined no influence of the thermal-cyclic tests on ILSS (spec. 1C, 3C, 5C versus spec. 1, 3, 5).

8.5 Conclusion

The all objectives of the work were successfully carried out. Obtained results give a good opportunity to understand the behaviour of the bimaterial, that consist of C/epoxy composite and aluminium alloy.

9 LITERATURA

- [1] Aakkula J. J., Saarela O., *Crack growth in aluminium plates repaired with composite reinforcements*, 18th symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, Melbourne 3÷5.5.1995, Engineering Material Advisory Services Ltd. London 1995, s.703÷716
- [2] Agarwal B. D., Broutman L. J., *Vláknové kompozity*, SNTL Praha 1987, s.296
- [3] Anonym, *Adhesive Bonded Aerospace Structures Standardized Repair Handbook*, Boeing Commercial Airplane Company - Seattle, Washington 1977
- [4] Anonym, *Installation of Composite Doubler on L-1011 Aircraft in Delta Airlines Fleet*, FAA - Airport & Aircraft Safety R&D, New Jersey 1997, s.23÷24
- [5] Anonym, *Nové technologické směry ve stavbě letadel*, Sborník přednášek z konference, Uherské Hradiště 2÷3.10.1963, s.172
- [6] Anonym, *Research in Materials Science and Technology*, Annual Report 1998, Delft University Press, Delft 1998, ISBN 90-407-1907-1, s.189÷199
- [7] Baker A. A., *Fatigue Studies related to Certification of Composite Crack Patching for Primary Metallic Aircraft Structure*, FAA-NASA Symposium on the Continued Airworthiness of Aircraft Structures, Atlanta 28÷30.8.1997, s.313
- [8] Baker A. A., *Repair Techniques for Composite Structures, Composite Materials in Aircraft Structures*, Longman Scientific & Technical, Harlow 1990, ISBN 0-582-01712-2. s.207÷227
- [9] Bareš R. A., *Kompozitní materiály*, SNTL Praha 1988, s.328
- [10] Clarke M., *Trans. Inst. Metal Finishing*, 1982, s.60÷67
- [11] Duong C., Yu J., *Analysis of Composite Repair*, FAA-NASA Symposium on the Continued Airworthiness of Aircraft Structures, Atlanta 28÷30.8.1997, s.17÷24
- [12] Fidranský J., *Aplikace kompozitových oprav kovových leteckých konstrukcí*, nepublikováno 1997
- [13] Guemes J. A., Farrow I., Klement J., Juračka J., *Navrhování konstrukcí z kompozitních materiálů*, ICV Tempus, VUT FS Brno 20÷23.10.1997, s.202
- [14] Chester R. J., Walker K. F., Chalkley P. D., *Adhesively bonded repairs to primary aircraft structure*, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol.19, č.1, 1999, Elsevier Scientific Ltd., Exeter, ISSN 0143-7496, s.1÷8
- [15] Klement J., *Technologie kompozitních materiálů*, Dílčí studie, LÚ FSI VUT v Brně 1998, s.20
- [16] Klement J., Kunz K., *Application of C/epoxy Prepregs for Increasing the Construction Stiffness*, 3rd Seminar on RRDPAE'98, Varšava 23÷24.12.1998, ISSN 1425-2104, 2.díl - s.47÷50
- [17] Knock K. K., *Structural Repair Bonding*, Boeing Document, 1980, no. D6-48758
- [18] Krüger G., Schlett V., Hennemann O. D., *Trocken-chemischen Vorbehandlung von Metallen und Nichtmetallen Adhäsion*, Vol.6, 1992, s.30÷32
- [19] Li Z., Lee R., Chen M., Tong P., *Mechanical Behavior of Composite Member Reinforced Concrete Columns*, 5th International Conference on Composites

- Engineering, International Community for Composites Engineering & Collage of Engineering University of New Orleans, Las Vegas 5÷11.7.1999, s.551
- [20] Mattousch A., *Structural Application of Stacked GLARE - Design, Production and Testing of the CN-235 Forward Attachment Fitting Lug*, Master Thesis Report, TU Delft 1992, s.108
- [21] Menon S., Cercone L., Policelli F., *Composite Adherent in Joining Concrete Structures*, 5th International Conference on Composites Engineering, International Community for Composites Engineering & Collage of Engineering University of New Orleans, Las Vegas 5÷11.7.1999, s.615÷616
- [22] Middleton D. H., *Composite Materials in Aircraft Structures*, Longman Scientific & Technical, Harlow 1990, ISBN 0-582-01712-2, s.394
- [23] Ong C. L., Shen S. B., *The reinforcing effect of composite patch repairs on metallic aircraft structures*, International Journal of Adhesion and Adhesives, vol.12, č.1, 1992, ISSN 0143-7496, s.19÷26
- [24] Oosting R., *Toward a New Durable and Environmentally Compliant Adhesive Bonding Process for Aluminium Alloys*, Delft University Press, Delft 1995, ISBN 90-407-1170-4, s.273
- [25] Peterka J., *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*, SNTL Praha 1980, s.792
- [26] Průcha J., Horádek K., Kalous J., *Výroba a opravy draků letadel*, SNTL Praha 1988, s.152
- [27] Solomon J. S., Baun W. L., *Surface Characterisation of Contamination on Adhesive Bonding Materials*, Surface Contaminations: Genesis, Detection and Control, Plenum Press, New York 1979
- [28] Tanner W. G., *Appl. Polymer Symposia*, č.19,1,1972
- [29] Vaňková M., Souček J., *Konstrukční fóliové lepidlo - Systém Letoxit*, Zpravodaj VZLÚ č.1 1989, s.31÷37
- [30] Vermeeren C. A. J. R., *The Application of Carbon Fibres in ARALL Laminates*, Report LR-658, TU Delft 1991
- [31] Vogelesang L. B., Vlot A., *Development of Metal Laminates for advanced Aerospace Structures*, TU Delft, Faculty of Aerospace Engineering, Delft
- [32] 3 M Česko, spol. s r.o., *Katalog brusných materiálů*, Katalog 3 M Česko, spol. s r.o., Praha, s.12
- [33] 5 M s.r.o., *Letoxit Adhesive System*, Prospekt 5 M s.r.o., Uherské Hradiště, s.1
- [34] Carbocom Company, www.carb.com, [www stránky Carbocom Company](http://www.strankyCarbocomCompany), 2002
- [35] Ciba Composites, *Redux® Bonding Technology*, Publ. No. RGU 201a, Duxford 1993, s.24
- [36] Ciba Composites, *Redux® Adhesive Selector Guide*, Publ. No. RTU 215b, Duxford 1995, s.2
- [37] CST-Composite Structures Technology, www.cstsales.com/PrePreg-Carbon.html, [www stránky CST-Composite Structures Technology](http://www.strankyCST-CompositeStructuresTechnology), Mountain Valley, California 2002

- [38] Hexcel Composites, *Strafil® C-EPI-150/42 Epoxid Matrix Datenblatt*, Hexcel Composites, Danutec AG, 1997, s.4÷5
- [39] Mavom, *Technische Beschreibung Mavom*, 1992
- [40] PG Gerasis, *Katalog výrobků R+G pro rok 1996÷1997*, PG Gerasis, Jeseník 1996, s.15
- [41] Xintex CR s.r.o., *Kyselý čisticí prostředek Xintox*, Prospekt Xintex CR s.r.o., Praha, s.1
- [42] Norma ČSN EN 1465, *Lepidla - Stanovení smykové pevnosti v tahu tuhých adherendů na přeplátovaných tělesech*, 1997
- [43] Norma ČSN EN 2101, *Anodická oxidace hliníku a tvářených slitin hliníku v kyselině chromové - Letectví a kosmonautika*, 1995
- [44] Norma ČSN EN 2561, *Zkouška tahem rovnoběžně se směrem vláken - Letectví a kosmonautika - Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny - Jednosměrné kompozity*, 1998
- [45] Norma ČSN EN 2562, *Zkouška ohybem ve směru vláken - Letectví a kosmonautika - Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny - Jednosměrné kompozity*, 1999
- [46] Norma ČSN EN 2563, *Stanovení smykové pevnosti mezi vrstvami - Letectví a kosmonautika - Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny - Jednosměrné kompozity*, 1999
- [47] Norma ČSN EN 10002-1, *Kovové materiály - Zkouška tahem - Část 1: Zkouška tahem za okolní teploty*, 1994

10 AUTOROVO CV

Jméno

Karel Kunz

Osobní data

Datum a místo narození: 10.5.1973 v Brně

Stav: svobodný

Státní příslušnost: Česká republika

Národnost: česká

Vzdělání

1996-1999 postgraduální doktorandské studium - FSI VUT v Brně

Specializace: Konstruktivní a procesní inženýrství

Datum rigorózní zkoušky: 17.5.2000

1991-1996 magisterské studium - FSI VUT v Brně

Specializace: Stavba letadel

Téma diplomové práce: Návrh podvozku s pryžovým tlumičem pro letoun VLA

Datum státní zkoušky: 11.6.1996

Jazykové znalosti

Anglicky

Vědecko-výzkumná a pedagogická činnost

podílel se na grantu GAČR č.101/97/0308 „Technologie a vlastnosti kompozitních materiálů pro aplikace v letectví a ortopedické protetice“

v letech 1997÷99 zajišťoval v rámci postgraduálního studia na LÚ výuku 1×2 hod. týdně ve cvičeních z předmětu „Technologie výroby letadel“ pro 4.ročník specializace stavba letadel a částečně i provoz letadel