# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

# FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

# LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# HYBRIDNÍ LEPENÉ SPOJE KOVOVÝCH A KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

HYBRIDE ADHESIVE BONDED JOINTS OF METALS AND COMPOSITE MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE AUTHOR Bc. Václav Jetela

VEDOUCÍ PRÁCE SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Klement, CSc.

**BRNO 2016** 



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	Bc. Václav Jetela
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba letadel
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Klement, CSc.
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

#### Hybridní lepené spoje kovových a kompozitních materiálů

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na současných konstrukcích dopravních letadel se rozšiřuje podíl kompozitních materiálů a častým problémem je vzájemné spojení s ostaními kovovými částmi. Lepení je přirozený způsob spojování kompozitních materiálů i kovových materiálů samostatně. Pro hybridní spoje existuje nedostatek konkrétních dat, která by umožňovala tyto spoje konstrukčně i technologicky optimalizovat z hlediska statické i únavové pevnosti.

#### Cíle diplomové práce:

Cílem práce je získání poznatků o vlivu konstrukčních, technologických a provozních faktorů na pevnost a životnost lepených spojů kovových a kompozitních materiálů. Jde hlavně o ověření vlivu parametrů přeplátování, tuhosti adherendů, přípravy povrchu a stárnutí v daném prostředí na smykovou pevnost spoje.

#### Seznam literatury:

Peterka, J. (1980): Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství, SNTL, Praha.

Lieng-Huang L. (1991): Adhesive Bonding, Plenum Press, New York.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D. ředitel ústavu doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

### Abstrakt

První část práce s názvem "Hybridní lepené spoje kovových a kompozitních materiálů" obsahuje popis povrchových úprav adherendů. Rovněž je uveden aktuální ucelený přehled lepidel používaných pro spojování kompozitních a kovových adherendů.

Druhá část práce je zaměřena na zkoušky smykové pevnosti hybridních spojů. Byl zkoumán vliv tloušťky adherendu, délky přeplátování a vliv přípravy povrchu na smykovou pevnost spoje.

Naměřené závislosti jsou ověřeny FE analýzami s dostatečnou přesností. Poznatky a závěry uvedené v práci je možné využít pro optimální návrh hybridního spoje duralu a kompozitu.

#### Klíčová slova

Hybridní lepený spoj, Vlákno-kovové lamináty, CARE, Laminátová výztuha, MKP, Hybridní konstrukce

### ABSTRACT

The first part of the diploma thesis with name "Hybrid adhesive bonded joints of metals and composite materials" comprise surface pretreatment review. There is also mentioned current review of adhesives for composite and aluminium adherends.

The second part of the thesis is dedicated to lap hybrid joint shear strength tests. The effects of adherend thickness, overlap lenght and surface pretreatment on shear strength were investigated.

Measured parameters of hybrid joints are proved with a FE analysis with enough accuracy. Conclusions could be used for optimum design of hybrid joint with aluminium and composite adherends.

#### **K**eywords

Hybrid adhesive joint, Fiber metal laminates, CARE, Laminate stiffener, FEA, Hybrid structure

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

JETELA, V. *Hybridní lepené spoje kovových a kompozitních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 78 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Klement, CSc.

# ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana doc. Ing. Josefa Klementa, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. 5. 2016

.....

Jméno a přímení

# Poděkování

Nejprve bych rád poděkoval mému vedoucímu práce doc. Ing. Josefu Klementovi, CSc. za ochotu, čas, příkladné vedení a podnětné rady během konzultací a při experimentech. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Mališovi za obětavou pomoc při FE analýzách a celé své rodině za podporu během studia.

# OBSAH

Ú	vod			9
1	Тес	orie a	adheze a koheze	11
2	Ροι	užíva	ná lepidla v letectví	15
3	Sm	ykov	á pevnost lepeného spoje	16
	3.1	Roz	ložení smykového napětí v lepeném spoji [3]	16
	3.2	Kon	strukční vlivy na smykovou pevnost [3]	17
	3.3	Závi	islost smykové pevnosti spoje na faktoru JF [3]	19
4	Zkc	oušer	ní lepených spojů	20
	4.1	Zko	uška smykové pevnosti [3]	20
	4.2	Zko	uška pevnosti v odlupování [3]	20
	4.3	Zko	uška únavové pevnosti [3]	23
	4.4	Poč	ty vzorků [3]	23
5	Ρον	/rcho	ové úpravy adherendů	24
	5.1	Hlin	níkové slitiny	24
	5.2	Oce	li	27
	5.2	.1	Oceli nízkouhlíkové	27
	5.2	.2	Oceli korozivzdorné	27
	5.3	Vlák	knem vyztužené lamináty	27
6	Zkc	oušky	v smykové pevnosti	29
	6.1	CAR	RE materiály vyráběné autoklávovou metodou	29
	6.1	.1	Blok zkoušek skladby CARE 6/5	32
	6.1	.2	Blok zkoušek skladby CARE 3/2	37
	6.1	.3	Blok zkoušek hybridních vzorků 1/2	40
	6.2	Hyb	pridní vzorky vyráběné metodou ruční laminace	44
	6.2	.1	Blok zkoušek hybridních vzorků 2/1 - Sklo	46
	6.2	.2	Blok zkoušek hybridních vzorků 2/1 - Uhlík	50
7	FE a	analý	ŹΥ	54
	7.1	Síť .		54
	7.1	.1	CARE 6/5 jednosměrná orientace	55
	7.1	.2	CARE 6/5 křížová orientace	56
	7.1	.3	CARE 3/2 jednosměrná orientace	57
	7.1	.4	CARE 3/2 křížová orientace	58
	7.1	.5	Hybridní vzorky 1/2 jednosměrná orientace	59

7.2	Okr	ajové podmínky	.60	
7.3	Mat	teriálové modely a vlastnosti elementů	.61	
7.4	Výp	počet a zpracování výsledků	.63	
7.5	Výs	ledky analýz	.64	
7.5	.1	CARE 6/5	.64	
7.5	.2	CARE 3/2	.65	
7.5	.3	Hybridní vzorky 1/2	.66	
7.6	Vliv	v konečnosti vzorku	.67	
7.7	Záv	ěr	.67	
Závěr			.69	
Seznam použitých zkratek a symbolů73				
Seznam obrázků74				
Seznam	tabu	ılek	.77	
Seznam	přílo	bh	.78	

# Úvod

Samostatný vývoj kovových a kompozitních materiálů dal vzniknout myšlence tyto rozdílné materiály spojovat do tzv. hybridních konstrukcí, s kterými se dnes můžeme setkat v různých aplikacích.

Nejtypičtějším představitelem hybridní konstrukce jsou vlákno-kovové lamináty (FML – "Fiber Metal Laminates"), složené z několika kompozitních vrstev a tenkých kovových plechů nebo fólií. Vlákno-kovové lamináty kombinují vlastnosti kovů, kompozitních materiálů a vyrovnávají některé jejich nedostatky. Zejména jsou odolné proti únavě, mají vysokou pevnost a odolávají rázům. Rovněž dobře odolávají zvýšeným teplotám, vlhkosti a korozi [1]. V leteckých aplikacích je možné se s nimi setkat například u potahových panelů trupu [2], náběžných hran ocasních ploch [2] a dveří nákladového prostoru [3].

Prvky hybridních konstrukcí se v určité míře vyskytují i u čistě kompozitních konstrukcí, kde pro zavádění osamělých sil do konstrukce se laminát lokálně vyztužuje zalaminováním kovových vložek. Příkladem je zalaminování duralového plechu (Obr. 1) pod zadním závěsem stabilizátoru na trupu VUT001 Marabu (Obr. 2). Početní síla na jeden závěs byla 29 604 N.



Obr. 1 Zalaminovaná duralová vložka



Obr. 2 Zadní závěs stabilizátoru letounu VUT001 Marabu

Další skupinu hybridních konstrukcí tvoří zejména součásti lepené z kovových a kompozitních částí v jeden funkční celek. Příkladem tohoto typu konstrukce může být kompozitní pylon pro uchycení lodního šroubu k duralové části trupu lodi [4], spojení kompozitní karoserie vlaku s ocelovým podvozkovým rámem [5] nebo hybridní karoserie automobilu Audi R8 (Obr. 3) [6].



Obr. 3 Karoserie automobilu Audi R8: kompozitní díly označeny šedou barvou [6]

V hybridních konstrukcích jsou kritickým místem z hlediska návrhu a přenosu zatížení nejen spoje, ale i rozhraní kovu a kompozitu. Oba dva případy jsou předmětem zkoumání této diplomové práce.

## **1 TEORIE ADHEZE A KOHEZE**

Koheze (soudržnost) lepeného spoje je dána mezimolekulárními silami působícími mezi molekulami lepidla a samostaného adherendu. Na kohezní pevnost mají významný vliv mezimolekulární interakce [7]:

#### Přitažlivá síla mezi dvěma molekulami dle Lennarda a Jonese

- závislá na vzdálenosti a potenciální energii interagujících částic

#### lontová vazba

- vytvořená elektrostatickým přitahováním pozitivních a negativních iontů

#### Kovalentní vazba

- závislá na společném sdílení elektronového páru

#### Kovová vazba

- charakterizovaná elektronovým mrakem

#### Vodíkový můstek

 vznikající mezi atomy vodíku které jsou kovalentně vázány na lehké atomy s velkou elektronegativitou

#### Dipól-dipól

- z důvodu iontové povahy kovalentní vazby, charakterizovaná dipólovým momentem

#### Disperzní síla

 působící mezi dvěma interagujícími molekulami z důvodu vzniku indukovaného dipólového momentu na jedné z nich

#### Slabá vazby se sdílenými elektrony

- charakterizovaná působením mezi Lewisovou kyselinou a Lewisovou zásadou

Energie iontové, kovalentní a kovové vazby jsou vyšší než energie ostatních vazeb a proto se tyto vazby výrazně podílí na kohezní pevnosti [7]. Mechanické vlastnosti, které vychází z interakcí popsaných výše jsou popisovány materiálovými charakteristikami. Mezi materiálové charakteristiky adherendu a lepidla patří zejména napětí na mezi pevnosti, napětí na mezi kluzu, napětí při přetržení a jim odpovídající poměrná prodloužení. Další významnou materiálovou charakteristikou je modul pružnosti, jehož stanovení zejména u některých polymerních materiálů může být obtížné. Z deformačního chování adherendu a lepidla je dále možné stanovit prodloužení a Poissonovu konstantu.

Předchozí výčet je pouze nastíněním rozsáhlé problematiky chemických vazeb, které se věnuje značné množství prací a proto nebude tato problematika v diplomové práci dále rozebírána.

Adheze (přilnavost) je závislá na fyzickém stavu, resp. typu polymeru (lepidla) a adherendu [8]. Existuje mnoho teorií popisující adhezi dvou materiálů z nichž nejpoužívanější je adsorbční teorie z důvodu nízké závislosti na typu polymerního lepidla a adherendu [9].

Rozlišujeme dva základní mechanismy adsorbce kapalné fáze na tuhé fázi:

- Chemisorpce
- Fyzikální adsorbce

Chemisorpce je charakterizována vznikem chemických vazeb mezi kapalnou a tuhou fází [10]. Porovnáním pevnosti chemických vazeb s ostatními mezimolekulárními vazbami bylo zjištěno, že rozhodující vliv na celkovou velikost adhezivní síly mají chemické vazby. Chemisorpce nastává např. u termosetových lepidel (pozn. epoxidové pryskyřice) zejména v počáteční fázi - před vytvrzováním, tedy před vznikem trojrozměrné polymerní sítě. V počátečním stavu má lepidlo dostatek reaktivních skupin pro vytvrzení i pro vytvoření chemických vazeb mezi adherendem a lepidlem. Při vytvrzování dochází k postupnému snižování počtu reaktivních skupin, které by vedly k vytvoření chemických vazeb. Jinak řečeno, pravděpodobnost vzniku chemisorpce se snižuje s rostoucím stupněm vytvrzení lepeného spoje [7].

Fyzikální adsorpce je obecně charakterizována působením Van Der Waalsových sil mezi povrchem pevné látky a molekulami kapalné látky [10]. Van Der Waalsovy síly jsou závislé především na smáčivosti kapaliny vzhledem k adherendu [8].

Částečná smáčivost kapalin (kladný úhel smáčení) je charakterizována vytvořením kapky na povrchu adherendu a popsána termodynamickou prací, která je závislá na velikosti povrchových napětí kapaliny, adherendu a fázového rozhraní. Velikost kapky kapaliny má zanedbatelný vliv na smáčivost. V případě že je kapka dostatečně malá, je možné zanedbat rozdíl hydrostatických tlaků na povrchu kapky a v blízkosti rozhraní kapalina – adherend, větší vliv na smáčivost adherendu má rozdíl tlaku mezi kapalinou a okolním plynem (tzv. Laplaceův tlak). Nezanedbatelný vliv na smáčení adherendu má rovněž schopnost kapaliny se rozprostřít a vytvořit smáčivý film na povrchu adherendu (tzv. Rozprostírací koeficient). Jestliže je tloušťka filmu menší než vzdálenost na kterou působí Van Der Waalsovy síly, bude výsledná tloušťka filmu větší (vliv tzv. rozpojovacího tlaku) [8].

Dokonale smáčivé kapaliny zpravidla nezaujímají na povrchu adherendu kulovitý tvar kapky. Tvar kapek dokonale smáčivých kapalin je závislý na čase. Kapalina se postupně rozprostírá pod vrcholem kapky a vytváří dva regiony které se liší původem vzniku. Nejprvné vzniká adiabatický region jehož velikost je závislá na výšce kapky. Jakmile se rozprostírání kapaliny zastaví, vzniká druhý (difuzní) region [8]. Celková práce adheze se skládá z práce sil chemických vazeb (chemisorpce) a Van der Waalsových sil (fyzikální adsorpce).

Množství adsorbovaného polymeru Γ v blízkosti rozhraní polymeru a adherendu je možné určit součtem objemových zlomků adsorbovaných vrstev [8]:

$$\Gamma = \sum_{z=1}^{M} \phi(z) \tag{1}$$

Kde souřadnice z je vzdáleností od rozhraní a M je počet adsorbovaných vrstev rovnoběžných k rozhraní.

Tloušťka adsorbované vrstvy je definována odmocninou průměru čtverců [8]:

$$\delta_{RMS} = \left(\frac{\sum_{z=1}^{M} \phi(z) z^2}{\Gamma}\right)^{1/2}$$
(2)

Adsorbovaná vrstva polymeru se skládá z řetězců molekul vázaných k substrátu ve formách znázorněných na obrázku (Obr. 4).



Obr. 4 Řetězce polymeru vázané k substrátu [11]

Dle lit. [8] je adsorbovaná vrstva tvořena zejména volnými konci řetězců (tails). Dále literatura uvádí, že přítomnost volných konců řetězců pravděpodobně vede k dosažení určitého stupně adheze.

Na základě vlivu povrchového napětí na adsorbci je možné vyslovit tyto závěry [8]:

 K adsorpci dochází v případě že povrchové napětí polymeru je menší než povrchové napětí rozpouštědla přitomného v roztoku polymeru

- K adsorpci dochází v případě že povrchové napětí roztoku polymeru nejprve strmě klesá a následně klesá úměrně objemovému podílu roztoku polymeru.
- Adsorbovaný polymer způsobuje zápornou změnu entropie, protože polymer adsorbovaný se může vyskytovat v méně konfiguracích než polymer neadsorbovaný
- Fyzikální adsorpce je umožněna vznikem chemických vazeb na rozhraní polymeru a adherendu.

Adsorpce je považována za jeden z nejvýznamějších mechanismů popisující adhezi, zatímco smáčivost a difuze jsou chápány jako prostředky kterými je adsorpce polymeru na rozhraní významně ovlivněna. Difuzí a smáčivostí je dosaženo dostatečně velké kontaktní plochy mezi adherendem a polymerem. Na kontaktní ploše následně dochází k chemisorpci nebo fyzikální adsorpci [8].

14

# 2 POUŽÍVANÁ LEPIDLA V LETECTVÍ

Lit. [12] uvádí lepení jako alternativu ke standartnímu nýtování pro vytvoření spoje mezi dvěma kovými díly. Lepení bylo v minulosti využíváno pro spojování podélných výztuh k potahu křídel i trupu a u sendvičových konstrukcí pro lepení voštin k potahu.

Nejvíce používané lepidlo pro lepení hlavních částí konstrukce na imidové bázi Hexcel Redux 775 disponovalo vysokými mechanickými vlastnostmi i po mnoha letech provozu letounů (DeHavilland Comet, Fokker 50, Vickers Viscount). Jedná se o jedno z prvních lepidel které se začalo používat v době, kdy epoxidové pryskyřice a lepidla byly stále ještě vyvíjeny. Z následně používaných epoxidových lepidel je možné jmenovat: Cytec FM1000 (Boeing 737), Cytec FM73 (Airbus A300), 3M AF163 (Airbus A310), Hexcel Redux 308A (Jetstream 31).

Podle lit. [13] bylo zjištěno, že pro spojování kovových a kompozitních materiálů jsou nejvhodnější lepidla na akrylové, kyanoakrylátové, epoxidové a imidové bázi. Z těchto skupin byly vybrány konkrétní lepidla s ohledem na typické použití. Lepidla která nebyla dohledatelná v katalozích a příručkách jednotlivých firem, byla vyřazena.

V tabulce (viz Příloha) jsou uvedena lepidla vhodná pro spojování kovových a kompozitních materiálů, pouze některá z nich jsou přímo výrobcem doporučována pro hybridní spoje, jedná se zejména o lepidla epoxidová od výrobců Cytec a 3M. Akrylová lepidla jsou méně vhodná pro letecké aplikace, jejich pevnost výrazně klesá s rostoucí teplotou [14]. Nejvyšších mechanických vlastností dosahují epoxidová lepidla, oproti akrylovým lepidlům lépe odolávají zvýšeným teplotám. Pro aplikace s výrazně vyšší provozní teplotou (nad 120°C) jsou vhodnější lepidla na imidové bázi. V tabulce je rovněž uvedeno jedno lepidlo na kyano-esterové bázi s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi i při vysokých teplotách.

Pokud není uvedeno jinak, jsou hodnoty smykového napětí pro jednoduše přeplátovaný spoj. Většina výrobců lepidel uvádí pro naměřené hodnoty smykového napětí použitý vytvrzovací cyklus, povrchovou úpravu povrchů i typové provedení lepidla (jednosložkové, dvousložkové, fóliové) a druh nosiče. V případě, že vytvrzovací cyklus byl složen z několika fází (vytvrzení v autoklávu), bylo do tabulky zaznamenáno: "stupňovitý vytvrzovací cyklus". Konkrétní popis těchto složitějších vytvrzovacích cyklů je možné dohledat v příručkách k jednotlivým lepidlům. Jestliže není u daného lepidla uveden teplotní rozsah použití, byla zaznamenána maximální doporučená provozní teplota. Lepidla určená pro letecké aplikace jsou označena (\*).

# **3** SMYKOVÁ PEVNOST LEPENÉHO SPOJE

#### 3.1 ROZLOŽENÍ SMYKOVÉHO NAPĚTÍ V LEPENÉM SPOJI [7]

Na schématu (Obr. 5) je zobrazen průběh napětí v lepeném spoji. Napětí v jednoduše přeplátovaném spoji je rozděleno nerovnoměrně, to je způsobeno zejména:

- Smrštěním lepeného spoje po vytvrzení
- Nerovnoměrnou deformací adherendů (Obr. 6)
- Nesymetrickým namáháním lepeného spoje



Obr. 5 Rozložení napětí v jednoduše přeplátovaném lepeném spoji [7]



Obr. 6 Rozložení deformace jednoduše přeplátovaného lepeného spoje [7]

#### 3.2 KONSTRUKČNÍ VLIVY NA SMYKOVOU PEVNOST [7]

#### Tloušťka vrstvy lepidla

Z výsledků zkoušek v minulosti vyplývá, že u dobře provedených spojů převažují kohezní poruchy nad adhezivními [7]. Adhezivní síly převyšují síly kohezní v blízkosti mezifázového rozhraní (lepidlo-adherend), přítomnost mezifázového rozhraní má vyztužující vliv a může tedy významně přispět k celkové pevnosti spoje. Tento vliv se uplatňuje zejména u spojů s menší vzdáleností adherendů. Spoje s menší tloušťkou lepidla jsou také méně náchylné na vznik vad při lepení a rovněž smrštění tenší vrstvy lepidla po vytvrzení je menší, což může v konečném důsledku vést k navýšení celkové pevnosti spoje. Pro každé lepidlo je stanovena optimální tloušťka, která je závislá na množství nanášeného lepidla a vytvrzovacích podmínkách.

#### Tloušťka adherendů

Při konstantním zatížení je adherend s větší tloušťkou méně deformován než adherend s menší tloušťkou. Z důvodu menších deformací adherendu s větší tloušťkou je napětí v lepidle menší (Obr. 7), lepidlo je méně deformováno a poškození spoje nastane při vyšším zatížení.



Obr. 7 Vliv rozdílné tloušťky adherendu:  $t_1 < t_2$ 

#### Tuhost adherendů

Vliv rozdílné tuhosti je velmi podobný vlivu tloušťky adherendů. Adherend s vyšším modulem pružnosti (Obr. 8) vykazuje menší deformaci a tudíž k poruše spoje dojde při vyšších hodnotách napětí.



Obr. 8 Vliv rozdílné tuhosti adherendu:  $E_1 > E_2$ 

#### Délka přeplátování

S rostoucí délkou přeplátování dochází ke změně rozložení napětí ve vrstvě lepidla a spoj vykazuje nižší odolnost při smykovém zatížení (Obr. 9). Velikost přeplátování je zpravidla volena tak, aby celková pevnost spoje byla rovna pevnosti adherendů. Optimální délka přeplátování je dána vztahem:

$$l_{opt} = \frac{R_{p0.2} \cdot s}{1.5 \cdot \tau_s} \tag{3}$$

kde:

- $R_{p0.2}$  Smluvní mez kluzu adherendu
- s Tloušťka vrstvy lepidla
- $\tau_s$  Smyková pevnost lepeného spoje

Obr. 9 Vliv příliš velkého přeplátování [7]

#### 3.3 ZÁVISLOST SMYKOVÉ PEVNOSTI SPOJE NA FAKTORU JF [7]

Faktor JF vyjadřuje kritérium podobnosti pro hodnocení lepených spojů. Zahrnuje dva základní parametry lepeného spoje, tloušťku adherendu a délku přeplátování při předpokládané průměrné tloušťce vrstvy lepidla 0.2 mm. Tato hodnota tloušťky je v praxi velmi častá a blíží se optimální tloušťce lepidla.

$$JF = \frac{\sqrt{s_a}}{l_u} \tag{4}$$

kde:

*s*<sub>a</sub> Tloušťka vrstvy lepidla

*l*<sub>u</sub> Délka přeplátování

Vliv tloušťky adherendu a délky přeplátování na smykovou pevnost spoje je schématicky znázorněn v grafu (Obr. 10). Jak bylo výše zmíněno v kapitole týkající se vlivu délky přeplátování, při větších délkách přeplátování dochází k poškození podstatně dříve (nižší hodnoty středního smykového napětí).



Obr. 10 Závislost středního napětí ve spoji při poruše na poměru tloušťky a délky přeplátování [15]

# 4 ZKOUŠENÍ LEPENÝCH SPOJŮ

#### 4.1 ZKOUŠKA SMYKOVÉ PEVNOSTI [7]

Podstatou zkoušky je namáhání zkušebního spoje statickým tahem (Obr. 11) ve směru podélné osy až do porušení spoje. Smyková pevnost spoje je udávána v MPa.



Obr. 11 Zkouška smykové pevnosti – rozměry vzorku a způsob zatížení [7]

Rozměry zkušebního vzorku v milimetrech dle ČSN 66 8510:

$$a = 103,4 \pm 0,1$$
  
 $b = 25,4 \pm 0,1$ 

 $l=12,5\pm0,5$ 

 $t=1,6\pm0,1$ 

Velký vliv na smykovou pevnost spoje má tvar zakončení lepeného spoje [16]. Vyplnění koutu lepidlem způsobuje nárust smykové pevnosti spoje. V normě jsou rozměry zakončení jednoznačně definovány.

### 4.2 ZKOUŠKA PEVNOSTI V ODLUPOVÁNÍ [7]

Zkoušený spoj je namáhán statickým tahem působícím ve směru kolmém na lepenou plochu (Obr. 12). Výsledkem zkoušky jsou hodnoty odlupovacího napětí v MPa.



Obr. 12 Zkouška pevnosti v odlupování dle Wintera – rozměry vzorku a způsob zatížení [7]

Rozměry zkušebního vzorku v milimetrech dle ČSN 66 8516:

- $b = 30^{+0}_{-0,3}$
- c = 150
- h = 75
- t = 1,5 + 0,05

Podstatný vliv na pevnost spoje v odlupování má množství lepidla v místě, kde odlupování při zkoušce iniciuje. Velikost výplně může mít až 50 % vliv na pevnost v odlupování [16].

V zahraniční literatuře [15] je doporučována pro zjištění pevnosti lepeného spoje při odlupovaní zkouška přes válečky (Obr. 13). Výhodou zkoušky přes válečky je, že v průběhu odlupování se charakter zatížení nemění.



Obr. 13 Zkouška pevnosti v odlupování přes válečky – způsob zatížení [15]

Zkoušky smykové pevnosti a pevnosti v odlupování probíhají při teplotě a vlhkosti prostředí zkušební laboratoře nebo při upravených podmínkách prostředí simulující atmosferické vlivy. Tyto zkoušky jsou často nazývány jako zkoušky tzv. urychleného stárnutí.

#### 4.3 ZKOUŠKA ÚNAVOVÉ PEVNOSTI [7]

Jedná se o stanovení hodnoty maximálního smykového napětí při mijivém cyklickém zatěžování. Požadavkem je, aby se žádný vzorek ze série neporušil po  $2 \cdot 10^7$  cyklech. Zkouška probíhá dle schématu na obrázku (Obr. 7), kde zatěžující síla F je funkcí času. Popis zkoušky a rozměrů vzorku je obsažen v normě ČSN 66 8513.

### **4.4 POČTY VZORKŮ [7]**

Podle důležitosti se zkoušky lepených spojů dělí do čtyř skupin (Tab. 1)

Zkoušky pro určení základníc	h zaručených pevnostních hodnot pro konstr.				
účely					
Počet vzorků:	min. 150 ks z 5 sérií				
Způsob vyhodnocení:	statisticky				
Zkoušky na ověření pevnosti k	konst. uzlů a dílů				
Počet vzorků:	min. 20 ks ze 3 sérií				
Způsob vyhodnocení:	statisticky				
Laboratorní zkoušky na zjištěr	ní vlivů jednotlivých faktorů, funkčních závislostí				
apod.					
Počet vzorků:	min. 20 ks z 1 série				
Způsob vyhodnocení:	statisticky				
Informativní zkoušky udávající představu o zkoumané závislosti					
Počet vzorků:	min. 5 ks z jedné série				
Způsob vyhodnocení:	bez použití statistiky				

Tab. 1 Potřebné počty vzorků a způsob vyhodnocení zkoušek lepených spojů

# **5 POVRCHOVÉ ÚPRAVY ADHERENDŮ**

#### 5.1 HLINÍKOVÉ SLITINY

#### Odmaštění [7]

Primární úpravou celého povrchu lepeného dílu z hliníkové slitiny je řádné odmaštění v parách rozpouštědla nebo odmaštění v alkalické lázni.

Pro odmašťování v parách rozpouštědla je doporučován zejména aceton, který má největší odmašťovací účinek. V případě alkalického odmašťování jsou adherendy odmašťovány ponorem do lázně o vyšší teplotě. Lázně obsahují zejména alkalické soli, mýdla, povrchově aktivní látky a detergenty. Po alkalickém odmašťování se doporučuje oplach (nebo ponor) demineralizovanou vodou [7].

V případě nedostupnosti systému pro odmaštění v parách je možné adherendy odmastit ponorem do lázně rozpouštědla. Při tomto způsobu odmaštění se používají dvě lázně, z nichž jedna slouží pro odstranění mastnoty a druhá pro finální oplach. Čistota lázně musí být kontrolována a v případě silné kontaminace musí být náplň lázně okamžitě vyměněna [15].

Mechanické zvýšení drsnosti povrchu není doporučováno z důvodu vysoké tvárnosti hliníkových slitin [15] a nižší reprodukovatelnosti metody.

#### Moření v kyselině chromsírové – piklování [15]

Mořením je možné dosahánout nestabilní vrstvu oxidů vhodné pro lepení (Obr. 14). Povrch adherendu je nejprve řádně odmaštěn. Následně jsou adherendy vloženy do lázně o teplotě (60 až 65) °C a složení:

- koncentrovaná kyselina sírová 0,75 l
- dichroman sodný 1,5 l
- voda 6.5 l

Po uplynutí času jsou adherendy vyjmuty z mořící lázně a ponořeny do lázně s vlažnou vodou. Poté následuje oplach studenou vodou. Mořené a opláchnuté adherendy jsou nakonec sušeny v bezprašném prostředí o maximální teplotě 45 °C. Piklování probíhá zpravidla v olovem vyložených vanách [7]. V průběhu moření je nutná kontrola složení a objemu lázně. Po piklování je doporučováno okamžitě přistoupit k lepení a nebo k dalším povrchovým úpravám zajišťující stabilnější vrstvu oxidů [15].



Obr. 14 Schéma vrstvy oxidů na adherendu po moření [8]

#### Anodická oxidace v kyselině chromové [15]

Anodickou oxidací získáme stabilnější vrstvu oxidů o větší tloušťce (Obr. 15). Adherendy jsou nejprve piklovány nebo alespoň alkalicky odmaštěny. Následně jsou připojeny na anodu a ponořeny do lázně o teplotě 40 °C a složení:

-	oxid chromový	0,5 l
-	voda	10 I

Napětí v lázni se postupně zvyšuje na hodnotu 40 V po dobu 10 minut. Následuje výdrž na tomto dosaženém napětí po dobu 20 minut. Poté se napětí zvyšuje na hodnotu 50 V po dobu 5 minut a na této hodnotě napětí se setrvá po dobu 5 minut. Po uplynutí času jsou adherendy vyjmuty z anodizační lázně a ponořeny do lázně s vlažnou vodou. Následně jsou adherendy opláchnuty studenou vodou. Anodizované adherendy mohou být nakonec sušeny proudem vzduchu o maximální teplotě 45 °C. Po anodizaci je doporučováno okamžitě přistoupit k lepení.



Obr. 15 Schéma vrstvy oxidů na adherendu po anodické oxidaci v kyselině chromové [8]

#### Anodická oxidace v kyselině fosforečné [15]

Anodickou oxidací v kyselině fosforečné je možné dosáhnout řidší a zároveň tenší oxidické vrstvy na povrchu adherendu (Obr. 16). Adherendy jsou nejprve piklovány nebo alespoň

alkalicky odmaštěny. Následně jsou připojeny na anodu a ponořeny do lázně o teplotě 25 °C a složení:

-	kyselina fosforečná	11
-	voda	16,6 l

Napětí v lázni se postupně zvyšuje na hodnotu (10 až 15) V. Následuje výdrž na tomto dosaženém napětí po dobu (20 až 25) minut. Adherendy jsou poté vyjmuty z anodizační lázně a ponořeny do lázně s vlažnou vodou. Následuje oplach adherendů studenou vodou. Nakonec mohou být adherendy sušeny proudem vzduchu o maximální teplotě 45 °C.



Obr. 16 Schéma vrstvy oxidů na adherendu po anodické oxidaci v kyselině fosforečné [8]

Anodická oxidace v kyselině sírové není doporučována, nezaručuje stejně vysoké pevnostní hodnoty spoje jako anodická oxidace v kyselině chromové a fosforečné. Anodická oxidace výrazně prodlužuje čas přípravy povrchu pro lepení, nicméně je doporučována pro velmi namáhané spoje [8]. Kompletní schéma přípravy povrchu adherendu z hliníkové slitiny je znázorněno na obrázku (Obr. 17).

Sloučeniny chromu (vyskytující se v mořících a anodizačních lázních, vodě po oplachu) jsou silně toxické a karcinogenní. V současné době se hledá vhodná náhrada těchto sloučenin resp. hledají se takové postupy přípravy povrchu, které by zajišťovaly stejně kvalitní povrch vhodný pro lepení. Jednou z metod je moření v kyselinně vinné a sírové (metoda TSA) [17].



Obr. 17 Blokové schéma kompletní přípravy porchu hliníkového adherendu před lepením

#### **5.2 O**CELI

#### 5.2.1 OCELI NÍZKOUHLÍKOVÉ

#### Příprava povrchu [8] [15]

Pro nízkouhlíkové oceli je obecně doporučováno mechanické zdrsnění povrchu, konkrétně otryskání litinovými broky. Chemické odmaštění nízkouhlíkových ocelí prováděné v rozpouštědlech nebo kyselině fosforečné nezaručuje dobrou přípravu povrchu pro lepení a nezaručuje tedy vysokou pevnost lepeného spoje.

#### 5.2.2 OCELI KOROZIVZDORNÉ

#### Příprava povrchu [15]

Pro korozivzdorné oceli je doporučováno kyselé nebo alkalické odmaštění s následným mechanickým zdrsněním povrchu nebo leptáním. Mechanické zdrsnění je prováděno litinovými broky nebo skleněnými kuličkami. Chemické leptání je možné v síranových, chloridových nebo fosforových lázních o teplotě maximálně 65 °C po dobu (5 až 30) minut. Po odmaštění a oplachu na povrchu zustává residuum, které je možné odstranit piklováním (postup popsán výše).

Literatura [8] udává, že pro korozivdorné oceli se běžně používají leptací lázně složené z kyseliny dusičné a fluorovodíkové. Dále literatura uvádí, že spoje leteckých součástí z korozivzdorné oceli, které byly před lepením chemicky leptány některým ze zmíněných postupů, vykazují dobrou statickou a únavovou pevnost.

#### 5.3 VLÁKNEM VYZTUŽENÉ LAMINÁTY

#### Příprava povrchu [15]

Z hlediska přípravy povrchu pro lepení je vhodné do skladby jednotlivých kompozitních a technologických vrstev zařadit strhávací fólii na stranu adherendu, která má být lepena. Po odstranění strhávací fólie je povrch laminátu čistý a vhodný pro okamžité lepení (Obr. 18).

Pro dosažení optimální pevnosti lepeného spoje je doporučováno lamináty vysoušet za účelem odstranění atmosferické vlhkosti. Vysoušení musí probíhat za teploty, která se negativně neprojeví na vlastnostech hotového laminátu. Jestliže vrstva laminátu určená pro následné lepení obsahuje větší množstí pryskyřice může být pevnost lepeného spoje snížena. V tomto případě je doporučováno zvýšit drsnost povrchu ručně nebo otryskáním. Nicméně všechny tyto mechanické metody zdrsnění povrchu mohou vést k poškození jednotlivých vláken nebo celé vrstvy laminátu.

Příprava povrchu popsána výše je vhodná pro kompozitní adherendy vyráběné wet lay-up, RTM nebo prepregovou technologií.



Obr. 18 Využtí strhávací fólie před lepením [15]

# 6 ZKOUŠKY SMYKOVÉ PEVNOSTI

Vzorky zkoušené v kapitolách 6.1.1 a 6.1.2 patří do kategorie vlákno-kovových laminátů. Jsou složeny z vrstev slitiny duralu a uhlíku, v zahraniční literature jsou označovány výrazem "CARE" (CArbon REinforced aluminium). Kromě kombinace uhlíku s duralovou slitinou existují i jiné kombinace, z nichž nejznámější jsou: "GLARE" (GLass REinforced aluminium) - kombinace slitiny duralu se skleněnými vlákny, a "ARALL" (Aramid Reinfroced Aluminium Laminate) - kombinace slitiny duralu s aramidovými vlákny. Hybridní vzorky z kapitoly 6.1.3 patří do kategorie duralových vložek, které lokálně vyztužují kompozitní konstrukci. Hybridní vzorky obsahovaly kompozitní vrstvy z uhlíkových vláken.

Všechny vzorky z kapitoly 6.1 použité pro smykové zkoušky byly vyrobeny v minulosti pro materiálové zkoušky zkoušky základních mechanických vlastností. Důvodem pro zkoušky smykové pevnosti vzorků z kapitoly 6.1 bylo ověření tvaru závislosti smykové pevnosti na poměru tloušťky adherendu a délky přeplátování.

Dále byly zkoušeny hybridní vzorky s kompozitními vrstvami ze skleněných (kapitola 6.2.1) a uhlíkových (kapitola 6.2.2) vláken. Důvodem pro zkoušky smykové pevnosti hybridních vzorků z kapitoly 6.2 bylo ověření vlivu přípravy povrchu kovových adherendů na smykovou pevnost hybridního spoje.

Norma pro zkoušky smykové pevnosti udává velikost a tvar zakončení lepeného spoje (viz kap. 4.1). Aby byly výsledky ze smykových zkoušek jednotlivých skupin vzorků mezi sebou vzájemně porovnatelné, nejsou zakončení adherendu vyplněna lepidlem a je zde ostrý přechod. Skladba skupiny vzorků je označována dvěma čísly oddělenými lomítkem x/y, kde x značí počet duralových vrstev a y počet kompozitních vrstev ve vzorku.

### 6.1 CARE MATERIÁLY VYRÁBĚNÉ AUTOKLÁVOVOU METODOU

#### Popis výroby vzorků skladby 6/5 a 3/2

Vzorky vyříznuté z panelu pro první blok zkoušek byly složeny z šesti vrstev slitiny hliníku 2024 T3 (povrch piklován) o tloušťce 0.4 mm a pěti vrstev uhlíkového prepregu Hexcel Composites C-EP I-150/42 tloušťky 0.15 mm (označení skladby: 6/5).

Vzorky vyříznuté z panelu pro druhý blok zkoušek byly složeny ze tří vrstev slitiny hliníku 2024 T3 (povrch piklován) o tloušťce 0.4 mm a dvou vrstev uhlíkového prepregu Hexcel Composites C-EP I-150/42 tloušťky 0.15 mm (označení skladby: 3/2).

Jednotlivé vrstvy materiálu byly slepeny pouze matricí, kterou tvořila epoxidová pryskyřice vytvrzující při teplotě 120 °C po dobu 25 minut v autoklávu. Pro výrobu kompozitních vrstev byly použity vždy dvě vrstvy prepregu, výsledná tloušťka jedné kompozitní vrstvy byla přibližně 0.3 mm [18].

V obou blocích zkoušek skladby CARE 6/5 a CARE 3/2 byly zkoušeny vzorky s kompozitními vrstvami jednosměrně orientovanými (podélné uspořádání) i vzorky s kompozitními vrstvami dvousměrně orientovanými (křížové uspořádání).

#### Popis výroby vzorků skladby 1/2

Vzorky vyříznuté z panelu pro třetí blok zkoušek byly složeny ze dvou vrstev prepregu Hexcel Composites C-EP I-150/42 tloušťky 0.15 mm a jedné vrstvy slitiny hliníku 2024 T3 o tloušťce 0.75 mm (označení skladby 1/2). Každá kompozitní vrstva obsahovala čtyři vrstvy prepregu, celková tloušťka kompozitní vrstvy se pohybovala okolo 0.685 mm [19].

Všechny duralové plechy (skupinu vzorků 5, 6, 7) byly odmaštěny tamponováním acetonem a broušeny kotouči Scotch Brite<sup>™</sup> (3M) střední drsnosti ve dvou kolmých směrech. Brusné kotouče Scotch-Brite<sup>™</sup> jsou vyrobeny z tuhého netkaného nylonového rouna impregnovaného pryskyřicí a minerály. Povrch byl dále čištěn isoprophyl alkoholem. Po očištění byl nanesen primer PFL-120 (jednosložkový pryskyřičný roztok) [20].

- Duralová vrstva pro skupinu vzorků 5 byla lepena ke kompozitním vrstvám pouze matricí prepregu. Vytvrzení (společné) probíhalo po dobu 25 minut při tlaku 0.1 MPa a teplotě 120 °C.
- Duralová vrstva pro skupinu vzorků 6 byla lepena ke kompozitním vrstvám fóliovým lepidlem KFL-120. Vytvrzení (společné) probíhalo při tlaku 0.1 MPa. Tlak působil od cca 80 °C při ohřevu do cca 60 °C při ochlazování.
- Pro výrobu vzorků skupiny 7 se nejprve vyrobila kompozitová deska ze čtyř vrstev prepregu. Deska vytvrzovala při teplotě 120 °C a tlaku 0.1 MPa, poté byla očištěna tamponováním acetonem, smirkována (drsnost 220) a opět tamponována acetonem. Nakonec se kompozitová deska lepila při pokojové teplotě k duralové vrstvě dvousložkovým lepidlem PL-20 při vytvrzovacím tlaku 0.05 MPa působícím po dobu 48 hodin.

Do všech vzorků byly udělány ruční pilou zářezy, které zajistily požadovanou délku přeplátování (Obr. 19).



Obr. 19 Zkoušené vzorky skladby 6/5

Mechanické vlastnosti jednotlivých komponent zkoušeného materiálu byly zaznamenány do následujících tabulek (Tab. 2, Tab. 3):

			Modul	Tažnost	
	Tahová	Smyková	pružnosti v		Měrná
	pevnost	pevnost	tahu		hmotnost
	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[kg.m⁻³]
Hliníková slitina	440	360	72.5	11	2800
Prepreg	1900	-	120	1.6	1570

Tab. 2 Mechanické vlastnosti komponent CARE materiálu [18]

	Rozsah teplot	Smyková	Vytvrzovací	Vytvrzovací	Doba
	použití	pevnost	tlak	teplota	vytvrzování
	[°C]	[MPa]	[MPa]	[°C]	[hod.]
KFL-120	-75°C až +100°C	36-41	0.05 - 0.1	120°C až 125°C	1
PL-20	-75°C až +60°C	34-41	0.05	20°C	48

Tab. 3 Mechanické a technologické vlastnosti lepidel pro výrobu vzorků skladby 1/2 [19]

#### 6.1.1 BLOK ZKOUŠEK SKLADBY CARE 6/5

označení									
vzorku	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
b [mm]	10.16	10.135	10.83	10.3	10.8	12.8	11.24	10.74	18.5
L [mm]	28.75	19.145	10.3	29.6	19.165	10.35	12.15	12.14	19.5
t [mm]	1.86	1.86	1.86	1.85	1.85	1.84	1.83	1.83	1.86

Střední hodnoty rozměrů vzorků byly následující:

Tab. 4 Základní rozměry vzorků skladby CARE 6/5 – podélná orientace kompozitních vrstev

označení								
vzorku	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
b [mm]	10.52	10.34	10.57	11.09	10.35	10.4	10.4	10.3
L [mm]	29.255	15.115	10.065	20.15	20.355	30.365	14.79	9.93
t [mm]	1.85	1.85	1.82	1.84	1.76	1.82	1.84	1.86

Tab. 5 Základní rozměry vzorků skladby CARE 6/5 – křížová orientace kompozitních vrstev



Obr. 20 Schéma zkoušeného vzorku skladby 6/5: 1 – Hliníková slitina, 2 – Prepreg

#### Naměřené hodnoty

Tabulky (Tab. 6, Tab. 7) obsahují naměřené hodnoty sil při kterých došlo k porušení zkoušených vzorků. Na základě známých rozměrů vzorků byly stanoveny smykové plochy a dopočítáno smykové napětí ve spoji při přetržení.

Vzorek č.	Smyková	Síla při	Napětí při
	piocha	pretrzeni	pretrzeni
	S [mm²]	F <sub>frac</sub> [N]	τ <sub>frac</sub> [MPa]
1.1	292.1	2900	9.7
1.2	194.0	3200	16.1
1.3	111.5	2230	22.4
1.4	304.9	2480	8.1
1.5	207.0	2520	12.2
1.6	132.5	2560	19.3
1.7	136.6	2400	17.6
1.8	130.4	2350	18.0
1.9	360.8	5100	14.1

Tab. 6 Smyková pevnost vzorků CARE 6/5 – podélná orientace kompozitních vrstev

Vzorek	Smyková	Síla při	Napětí při
č.	plocha	přetržení	přetržení
	S [mm²]	F <sub>frac</sub> [N]	$\tau_{frac}$ [MPa]
2.1	307.8	2250	7.3
2.2	156.3	1620	10.4
2.3	106.4	1780	16.7
2.4	223.5	1850	8.3
2.5	210.7	1450	6.9
2.6	315.8	2110	6.7
2.7	153.8	1550	10.1
2.8	102.3	1720	16.8

Tab. 7 Smyková pevnost vzorků CARE 6/5 – křížová orientace kompozitních vrstev

Snímky vzorků skladby CARE 6/5 s podélnou orientací kompozitních vrstev (Obr. 21, Obr. 22) obsahují vyfotografováné smykové plochy jednotlivých vzorků po zkoušce. Na protilehlých smykových plochách vzorků již částečně prosvítá adherend. Povrch adherendu zaujímá na smykové ploše velmi malou plochu oproti ploše tvořené kompozitní vrstvou. Je možné prohlásit, že porucha obou vzorků má výrazně kohezní charakter. Jinými slovy, oba vzorky se porušily zejména ve vrstvě kompozitu. Charakter lomové plochy vzorku s větší šířkou 1.9 (Obr. 23) odpovídá lomovým plochám vzorků 1.1 – 1.8.



Obr. 21 Vzorky 1.1 – 1.3





Obr. 23 Vzorek 1.9

Obr. 22 Vzorky 1.4 – 1.8

Některé vzorky skladby CARE 6/5 s křížovou orientací kompozitních vrstev (Obr. 24, Obr. 25) vykazují ve srovnání se vzorky s podélnou orientací kompozitních vrstev rozdíly v podobě lomových ploch. Ve vzorcích 2.1, 2.4 a 2.5 se lom šířil mezi kompozitní příčně orientovanou vrstvou a adherendem v první části. V druhé části se lom šířil uprostřed podélné kompozitní vrstvy. Ostatní vzorky zpravidla praskaly uprostřed podélně orientované kompozitní vrstvy.



Obr. 24 Vzorky 2.1 – 2.4



Obr. 25 Vzorky 2.5 – 2.8
## Výsledky

Body grafu (Obr. 26) jsou proloženy logaritmickými křivkami. Vzorky 1.1 – 1.3 skladby 6/5 vykazují rozdíly v hodnotách smykové pevnosti ve srovnání se vzorky 1.4 – 1.9. To může být způsobeno tím, že vzorky 1.4 – 1.9 byly vyříznuty z druhého panelu, který pravděpodobně vytvrzoval při rozdílné teplotě než panel první. Zkoušením vzorku 1.9 s větší šířkou bylo ověřováno, jestli naměřená hodnota smykové pevnosti nebude mít vliv na trend závislosti smykové pevnosti spoje na poměru tloušťky adherendů a délky přeplátování. Z grafu je patrné, že zvětšená šířka vzorku nemá na trend závislosti vliv. Vzorek s větší šířkou 1.9 je v grafu označen kontrastní zelenou barvou.

Vzorky skupiny 2 s křížovým uspořádáním kompozitních vrstev vykazují nižší smykovou pevnost pravděpodobně z důvodu poklesu modulu pružnosti. FE analýzy korelují s naměřenými hodnotami smykové pevnosti pro obě skupiny vzorků (1 a 2)<sup>1</sup>.





<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Popis FE analýz viz kap. 7

Na fotografiích (Obr. 27) je zobrazen vzorek skladby CARE 6/5 upnutý v čelistech trhacího stroje před zkouškou a po zkoušce (přetržení vzorku).



Obr. 27 Vzorek č. 1.1: Vlevo – před zkouškou, Vpravo – porušený vzorek po zkoušce

# 6.1.2 BLOK ZKOUŠEK SKLADBY CARE 3/2

Střední hodnoty rozměrů vzorků byly následující:

označení					označení				
vzorku	3.1	3.2	3.3	3.4	vzorku	4.1	4.2	4.3	4.4
b [mm]	10.35	10.25	10.34	10.11	b [mm]	10.95	10.96	10.54	10.12
L [mm]	30	20.55	15.36	9.1	L [mm]	30	20.59	15.5	10.45
t [mm]	0.715	0.725	0.715	0.72	t [mm]	0.71	0.71	0.71	0.71

Tab. 8 Základní rozměry vzorků skladby CARE 3/2 - podélná orientace kompozitních vrstev CARE 3/2 - křížová orientace kompozitních

Tab. 9 Základní rozměry vzorků skladby vrstev



Obr. 28 Schéma zkoušeného vzorku skladby 3/2: 1 – Hliníková slitina, 2 – Prepreg

### Naměřené hodnoty

Tabulka (Tab. 10) obsahuje naměřené hodnoty sil při kterých došlo k porušení zkoušených vzorků. Na základě známých rozměrů vzorků byly stanoveny smykové plochy a dopočítáno smykové napětí ve spoji při přetržení.

Vzorek	Smyková	Síla při	Napětí při
č.	plocha	přetržení	přetržení
	S [mm <sup>2</sup> ]	$F_{frac}$ [N]	τ <sub>frac</sub> [MPa]
3.1	310.5	3530	11.4
3.2	210.6	1750	8.3
3.3	158.8	1540	9.7
3.4	92.0	1060	11.5
4.1	328.5	2450	7.5
4.2	225.7	2170	9.6
4.3	163.4	1430	8.8
4.4	105.8	1250	11.8

Tab. 10 Smyková pevnost vzorků CARE 3/2

Vzorky skladby CARE 3/2 s podélně orientovanými kompozitními vrstvami (Obr. 29) mají stejný charakter lomových jako vzorky s křížově orientovanými kompozitními vrstvami (Obr. 30). Pouze malé množství vláken prepregu zůstalo přilepeno k duralové vrstvě. Porušení obou skupin vzorků je smíšené, převládá spíše adhezivní charakter. Stejné nebo velmi podobné lomové ploch mohou souviset s velmi malými rozdíly smykové pevnosti skupin vzorků 3 a 4.



Obr. 29 Vzorky skupiny 3



Obr. 30 Vzorky skupiny 4

## Výsledky

Skladba 3/2 obsahuje méně duralových i kompozitních vrstev, celkový modul pružnosti nosného průřezu vzorku je nižší než v případě skladby 6/5, což se projevilo v nižších hodnotách smykové pevnosti skladby 3/2 (Obr. 31). Nízký modul pružnosti pravděpodobně způsobil i nízké rozdíly ve smykové pevnosti vzorků skladby 3/2 s podélnými kompozitními vrstvami ve srovnání se vzorky skladby 3/2 s křížově uspořádánými kompozitními vrstvami. Koeficient determinace je v případě závislosti popisující smykovou pevnost vzorků s kompozitními vrstvami jednosměrně orientovanými velmi nízký, smyková pevnost pravděpodobně nebude závislá na poměru tloušťky adherendu a délky přeplátování, tento závěr by bylo možné potvrdit dalšími zkouškami. FE analýzy korelují s naměřenými hodnotami smykové pevnosti pro obě skupiny vzorků (3 a 4)<sup>2</sup>.



Obr. 31 CARE 3/2: Graf závislosti smykové pevnosti spoje na poměru tloušťky adherendů a délky přeplátování

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Popis FE analýz viz kap. 7

# 6.1.3 BLOK ZKOUŠEK HYBRIDNÍCH VZORKŮ 1/2

bez lepidla (společné vytvrzení)					
označení vzorku	5.1	5.2	5.3	5.4	
b [mm]	10.13	9.9	10.27	10.24	
L [mm]	29.99	20.11	15.02	9.65	
t [mm]	0.685	0.685	0.685	0.685	
s lepidlem KFL	120 (sp	olečné	vytvrze	ení)	
označení vzorku	6.1	6.2	6.3	6.4	
b [mm]	10.25	10.06	10.6	9.63	
L [mm]	30.14	19.9	15.06	10.67	
t [mm]	0.685	0.685	0.685	0.685	
s lepidlem PL2	20 (lepe	no po v	vytvrze	ní)	
označení vzorku	7.1	7.2	7.3	7.4	
b [mm]	10.82	10.28	10.75	10.93	
L [mm]	30.12	19.79	14.71	9.94	
t [mm]	0.685	0.685	0.685	0.685	

Střední hodnoty rozměrů vzorků byly následující:

Tab. 11 Základní rozměry hybridních vzorků skladby 1/2



Obr. 32 Schéma zkoušeného hybridního vzorku skladby 1/2: 1 – Hliníková slitina, 2 – Prepreg

# Naměřené hodnoty

Tabulka (Tab. 12) obsahuje naměřené hodnoty sil při kterých došlo k porušení zkoušených vzorků. Na základě známých rozměrů vzorků byly stanoveny smykové plochy a dopočítáno smykové napětí ve spoji při přetržení.

Vzorok č	Smyková	Síla při	Napětí při
vzorek c.	plocha	přetržení	přetržení
	S [mm²]	$F_{frac}$ [N]	τ <sub>frac</sub> [MPa]
5.1	303.8	1600.0	5.3
5.2	199.1	1230.0	6.2
5.3	154.3	920.0	6.0
5.4	98.8	720.0	7.3
6.1	308.9	7550.0	24.4
6.2	200.2	5260.0	26.3
6.3	159.6	3850.0	24.1
6.4	102.8	2550.0	24.8
7.1	325.9	1450.0	4.4
7.2	203.4	1030.0	5.1
7.3	158.1	870.0	5.5
7.4	108.6	750.0	6.9

Tab. 12 Smyková	pevnost	hybridních	vzorků	1/2
-----------------	---------	------------	--------	-----



Obr. 33 Vzorky skupiny 5





Obr. 34 Vzorky skupiny 6

Obr. 35 Vzorky skupiny 7

Lomové plochy vzorků skupiny 5 lepené matricí prepregu (Obr. 33) jsou shodné s lomovýmí plochami vzorků skladby skupiny 3 a 4 (Obr. 29, Obr. 30), převládá adhezivní charakter porušení.

Na lomových plochách vzorků skupiny 6 lepených fóliovým lepidlem KFL-120 (Obr. 35) je patrné, že vzorky byly porušeny mezi vrstvami vnější podélné kompozitní vrstvy. Šedý povrch smykových ploch nasvědčuje tomu, že lepidlo infiltrovalo kompozitní vrstvy. Dobré infiltrace kompozitních vrstev lepidlem lze dosáhnout pouze společným vytvrzením lepidla, kompozitních a duralových vrstev.

Na lepidle vzorků skupiny 7 (Obr. 35) je patrný otisk povrchu kompozitního adherendu. Kompozitní vrstvy adherendu vykazují nulovou přilnavost k lepidlu PL20. Adheze lepidla by mohla být zlepšena tepelnou úpravou povrchu kompozitu (žíhání plamenem).

## Výsledky

Body v grafu (Obr. 36) jsou proloženy logaritmickými křivkami a polynomy. Nejnižší smykové pevnosti dosáhly vzorky skupiny 7, lepené dvousložkovým lepidlem PL20. Vyšší smykové pevnosti dosáhly vzorky skupiny 5, které byly lepeny pouze matricí prepregu a vytvrzovaly společně.

Optimální smykové pevnosti dosáhly vzorky skupiny 6, které vytvrzovaly společně s fóliovým lepidlem KFL120. Je třeba zdůraznit, že v případě hybridních vzorků skladby 1/2 se povrch duralových plechů připravoval mechanicky. Chemická příprava povrchu (např.: piklování nebo anodická oxidace) vzorků skupiny 5 a 6 by mohla posunout křivky ve směru svislé osy, k vyšším hodnotám smykové pevnosti. Koeficient determinace je v případě závislosti popisující smykovou pevnost vzorků s lepidlem KFL-120 velmi nízký, smyková pevnost pravděpodobně nebude závislá na poměru tloušťky adherendu a délky přeplátování

FE analýzou byl potvrzen trend závislosti smykové pevnosti spoje na poměru tloušťky adherendů a délky přeplátování u vzorků bez lepidla<sup>3</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Popis FE analýz viz kap. 7



Obr. 36 Hybridní vzorky skladby 1/2: Graf závislosti smykové pevnosti spoje na poměru tloušťky adherendů a délky přeplátování

43

# 6.2 HYBRIDNÍ VZORKY VYRÁBĚNÉ METODOU RUČNÍ LAMINACE

#### Popis vzorku

Nejprve byly z polotovaru vyříznuty plechy ze slitiny hliníku 2024 T3 o velikosti (100 x 100) mm a tloušťce 2 mm.

Všechny duralové plechy slitiny 2024 T3 byly odmaštěny v lázni acetonu a dále alkalicky čištěny na odstranění povrchových oxidů v 10 % roztoku NaOH při teplotě 60 °C po dobu 5 minut. Následovalo odstranění černého residua na povrchu plechů tzv. světlením v 30 % roztoku HNO<sub>3</sub>. Poté byly plechy vysoušeny teplým vzduchem o maximální teplotě 50 °C. Tento postup byl konečný pro vzorky skupiny 1 a 11.

Plechy skupiny 2 a 12 byly po výše popsané úpravě jednostranně broušeny ve dvou směrech kotouči střední hrubosti Scotch-Brite™ od výrobce 3M.

Plechy skupiny 3 a 13 byly po výše popsané úpravě tryskány korundem. Vzorky byly nejprve tryskány z jedné strany, což vedlo k deformaci plechů (průhyb plechu). Protože by laminování deformovaných plechů zavedlo do vzorku přídavná napětí, bylo nutné plechy otryskat i z druhé strany.

Duralové plechy skupiny 4, 14 a 15 byly piklovány v lázni složené z 95,5 g dvouchromanu draselného; 178 ml kyseliny sírové a vody doplněné do objemu 1 l. Při teplotě 60 °C po dobu 30 minut.

- Duralové plechy skupiny 1, 2, 3, 4 byly laminovány se skelnou tkaninou AEROGLASS 163 g·m<sup>-2</sup> s keprovou vazbou vláken.
- Duralové plechy skupiny 11, 12, 13, 14 byly laminovány s uhlíkovou tkaninou KC 160 g·m<sup>-2</sup> s plátnovou vazbou vláken.

Na prosycení tkanin byla použita pryskyřce L 285 s tužidlem 285. Přičemž hmotností poměr pryskyřice k tužidlu byl 100 : 40.

Pro vzorek 15 byla vyrobená zvlášť uhlíková deska ze dvou vrstev uhlíkové tkaniny KC a pryskyřice L 285. Uhlíková deska byla následně slepena s piklovanými plechy epoxidovým rychletvrdnoucím lepidlem Ceys Epoxi.

Vzorky 1-4, 11-14 a samostatná uhlíková deska pro výrobu vzorku 15 vytvrzovaly 24 hodin ve vakuu. Vzorek 15 vytvrzoval po lepení 4 x 24 hodin. Tloušťka vrstvy lepidla vzorků skupiny 15 byla 0.2 mm.



Obr. 37 Schéma zkoušeného hybridního vzorku skladby 2/1: 1 – Hliníková slitina, 2 – Kompozit

Mechanické vlastnosti jednotlivých komponent zkoušeného materiálu byly zaznamenány do následujících tabulek (Tab. 13, Tab. 14, Tab. 15):

	Tahová pevnost	Smyková pevnost	Modul pružnosti v tahu	Tažnost	Měrná hmotnost
	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[kg·m⁻³]
Hliníková slitina	440	360	72.5	11	2800

Tab. 13 Vlastnosti duralové vrstvy hybridního vzorku skladby 2/1 [18]

	Barva Gardner	Hodnota epoxidu	Ekvivalent epoxidu	Viskozita 25°C	Měrná hmotnost 25°C	Aminové číslo
_	[-]	[-]	[-]	[mPas]	[kg·m⁻³]	[mg KOH]
Pryskyřice L285	max 3	0.59-0.65	165-170	600-900	1180-1230	-
Tužidlo 285	max 3	-	-	50-100	940-970	480-550

Tab. 14 Vlastnosti kompozitu hybridního vzorku skladby 2/1 [21]

	Doba	Doba			
	zpracovatelnosti	vytvrzování	Rozsah teplot	Smyková	Doba do dosažení
	25°C	23°C	použití	pevnost	maximální pevnosti
	[min]	[min]	[°C]	[MPa]	[h]
Ceys Epoxi	5	60	-60°C až +65°C	32	72

Tab. 15 Vlastnosti lepidla hybridního vzorku skladby 2/1 [22]

# 6.2.1 BLOK ZKOUŠEK HYBRIDNÍCH VZORKŮ 2/1 - SKLO

	Alkalické čiš	tění			
označení	1 1	1 0	1 0		
vzorku	1.1	1.2	1.5		
b [mm]	23	23.8	22.4		
L [mm]	10.42	15.09	30.5		
t [mm]	4.1	4.1	4.1		
	Scotch Bri	te			
označení	2 1	2.2	<b>n</b> 0		
vzorku	2.1	2.2	2.5		
b [mm]	24.2	24.7	27.7		
L [mm]	10.15	15.1	30.24		
t [mm]	4.1	4.1	4.1		
	Tryskáni	í			
označení	2 1	2.2	2.2		
vzorku	5.1	5.2	5.5		
b [mm]	24.5	24.6	24.8		
L [mm]	10.5	15.27	30.32		
t [mm]	4.18	4.18	4.18		
Piklování					
označení	1 1	1 2	1 2		
vzorku	4.1	4.2	4.5		
b [mm]	24.5	24	24		
L [mm]	10.99	15.27	30.89		
t [mm]	4.18	4.18	4.18		

Střední hodnoty rozměrů vzorků byly následující:

Tab. 16 Základní rozměry vzorků

Narozdíl od vzorků vyráběných autoklávovou technologií, bylo nutné pro skupinu vzorků vyráběnou metodou ruční laminace nařezat vzorky s větší šířkou (více než 20 mm) proto, aby byl eliminován případný negativní vliv posunu tkaniny při ruční laminaci. Vzorky s menší šířkou

než 20mm by mohly vykazovat velký rozptyl v hodnotách smykové pevnosti z důvodu přítomnosti rozdílného počtu vláken ve spoji vzorku.

#### Naměřené hodnoty

Tabulka (Tab. 17) obsahuje naměřené hodnoty sil při kterých došlo k porušení zkoušených vzorků. Na základě známých rozměrů vzorků byly stanoveny smykové plochy a dopočítáno smykové napětí ve spoji při přetržení.

Vzorek č	Smyková nlocha	Síla při	Napětí při
VZOTER C.	Sillykova piocila	přetržení	přetržení
	S [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>frac</sub> [N]	τ <sub>frac</sub> [MPa]
1.1	239.7	830	3.5
1.2	359.1	1110	3.1
1.3	683.2	1050	1.5
2.1	245.6	710	2.9
2.2	373.0	890	2.4
2.3	837.6	950	1.1
3.1	257.3	2010	7.8
3.2	375.6	2160	5.8
3.3	751.9	2540	3.4
4.1	269.3	4140	15.4
4.2	366.5	5840	15.9
4.3	741.4	10910	14.7

Tab. 17 Smyková pevnost vzorků

Obrázky (Obr. 38, Obr. 39, Obr. 40) obsahují vyfotografováné smykové plochy jednotlivých vzorků po zkoušce. V místech, kde se kompozit neoddělil od kovu jsou oblasti lomových ploch tmavší. Vzorky skupin 1, 2 a 3 jsou porušeny na rozhraní kovu a kompozitu, na povrchu kovu nejsou patrné zbytky pryskyřice, jedná se o adhezivní porušení.

Piklované vzorky skupiny 4 (Obr. 41) vykazují dobrou adhezivní pevnost, což se projevilo porušením v kompozitní vrstvě.



Obr. 38 Vzorky skupiny 1 – Alkalické čištění



Obr. 39 Vzorky skupiny 2 – Scotch Brite



Obr. 40 Vzorky skupiny 3 - Tryskání



Obr. 41 Vzorky skupiny 4 - Piklování

# Výsledky

Následující graf (Obr. 42) obsahuje závislost smykové pevnosti spoje na tloušťce adherendu a délky přeplátování. Body jsou proloženy logaritmickými a kvadratickými křivkami.

Na základě vykreslených křivek je možné prohlásit, že nejlepší úpravou povrchu pro dosažení optimální smykové pevnosti spoje je piklování. Celkově nejnižší hodnoty smykové pevnosti vykazují vzorky broušené kotoučem Scotch Brite.

Všechny vzorky vyráběné metodou ruční laminace vykazují nižší pevnost ve srovnání se vzorky vyráběnými autoklávovou technologií. To může být způsobeno zejména použitou pryskyřicí pro ruční laminaci, která má nižší hustotu z důvodu dokonalého prosycení tkaniny.



Obr. 42 Hybridní vzorky skladby 2/1 - Sklo: Graf závislosti smykové pevnosti spoje na poměru tloušťky adherendů a délky přeplátování

# 6.2.2 BLOK ZKOUŠEK HYBRIDNÍCH VZORKŮ 2/1 - UHLÍK

Alkalické čištění					
označení vzorku	11.1	11.2	11.3		
b [mm]	24.1	24	22.8		
L [mm]	11.23	15.5	30.6		
t [mm]	4.25	4.25	4.25		
	Scotch Brite	9			
označení vzorku	12.1	12.2	12.3		
b [mm]			26		
L [mm]	delaminace	delaminace	30.5		
t [mm]			4.26		
	Tryskání				
označení vzorku	13.1	13.2	13.3		
b [mm]	23	24.3	24.5		
L [mm]	9.6	15.3	29.5		
t [mm]	4.25	4.25	4.25		
	Piklování				
označení vzorku	14.1	14.2	14.3		
b [mm]	24.1	24	24.8		
L [mm]	10.5	15.85	30.45		
t [mm]	4.25	4.25	4.25		
Piklování + lepidlo Ceys					
označení vzorku	15.1	15.2	15.3		
b [mm]	25.1	25.4	24.4		
L [mm]	8.4	14.9	31.3		
t [mm]	4.7	4.7	4.7		

Střední hodnoty rozměrů vzorků byly následující:

Tab. 18 Základní rozměry vzorků

Při řezání vzorků skupiny 12 došlo k delaminaci. Charakter tohoto porušení předznamenal, že smyková pevnost vzorků skupiny 12 nebude vysoká.

#### Naměřené hodnoty

Tabulka (Tab. 19) obsahuje naměřené hodnoty sil při kterých došlo k porušení zkoušených vzorků. Na základě známých rozměrů vzorků byly stanoveny smykové plochy a dopočítáno smykové napětí ve spoji při přetržení.

Vzorok č	Smyková	Síla při	Napětí při
VZOTEK C.	plocha	přetržení	přetržení
	S [mm²]	F <sub>frac</sub> [N]	τ <sub>frac</sub> [MPa]
11.1	270.6	540	2.0
11.2	372.0	740	2.0
11.3	697.7	820	1.2
12.1	-	-	delaminace
12.2	-	-	delaminace
12.3	793.0	1050	1.3
13.1	220.8	1860	8.4
13.2	371.8	1950	5.2
13.3	722.8	2750	3.8
14.1	253.1	2490	9.8
14.2	380.4	3040	8.0
14.3	755.2	2900	3.8
15.1	210.8	5700	27.0
15.2	378.5	5080	13.4
15.3	763.7	6600	8.6

Tab. 19 Smyková pevnost vzorků

Na kovových plochách je možné vidět pravidelné stopy pryskyřice (Obr. 43, Obr. 44, Obr. 45, Obr. 46). Kompozitní vrstva dokonale nepřilnula ke kovu, pravděpodobně z důvodu nedostatečného prosycení uhlíkové tkaniny. Z důvodu nedostatečného prosycení tkaniny nedosáhly ani piklované vzorky (Obr. 46) optimální smykové pevnosti ve srovnání se vzorky skupiny 4 z prvního bloku zkoušek vzorků vyráběných metodou ruční laminace. Vzorky skupiny 12 (Obr. 44) se porušily při řezání, proto byl vyzkoušen pouze jediný vzorek.



Obr. 43 Vzorky skupiny 11 – Alkalické čištění



Obr. 44 Vzorky skupiny 12 – Scotch Brite



Obr. 45 Vzorky skupiny 13 - Tryskání



Obr. 46 Vzorky skupiny 14 - Piklování

První a poslední vzorek skupiny 15 (Obr. 47) se poškodili ve vrstvách lepidla, přičemž došlo zároveň k utržení kompozitní vrstvy, na snímku jsou patrná potrhaná vlákna. Druhý vzorek se poškodil ve vrstvě lepidla, porušení má kohezní charakter.



Obr. 47 Vzorky skupiny 15 - Piklování

## Výsledky

Graf (Obr. 48) obsahuje závislost smykové pevnosti spoje na tloušťce adherendu a délky přeplátování. Body jsou proloženy logaritmickými a kvadratickými křivkami.

Jelikož většina vzorků broušených kotouči Scotch Brite se delaminovala už při řezání a nebylo tak možné vykreslit křivku závislosti smykové pevnosti spoje na poměru tloušťky adherendů a délky přeplátování, vychází nejhůře z hlediska smykové pevnosti vzorky alkalicky čištěné. Nízké rozdíly ve smykové pevnosti vykazují vzorky tryskané a piklované.

Nejvyšší pevnosti v daném bloku zkoušek dosáhly vzorky lepené epoxidovým lepidlem s povrchovou úpravou duralového plechu piklováním. V případě nedokonalé výroby kompozitní desky metodou ruční laminace umožňuje aplikace lepidla dosáhnout vyšších hodnot smykové pevnosti. Při optimální přípravě povrchu adherendů má lepidlo vyztužující charakter.





# 7 FE ANALÝZY

Pro zjištění rozložení smykového napětí ve spoji byly pro většinu vzorků sestaveny výpočtové modely v preprocesoru Patran, následný výpočet probíhal v programu Nastran. Konečnoprvkové výpočty pro jednotlivé spoje byly řešeny jako 2D úlohy. Řešením úloh na 2D úrovni bylo dosaženo relativně krátkých dob přípravy modelů a výpočtových časů. Aby bylo možné vyloučit vliv konečnosti modelu, resp. vzorku, byly sestaveny dvě ověřující 3D úlohy.

# 7.1 Síť

Pro 2D analýzy byly použity elementy "CQUAD4". Vzorky byly roztříděny do skupin dle geometrie. Velikost elementů po délce přeplátování byla zvolena jako konstantní z důvodu jednoduchého vyhodnocování výsledků analýzy. Tento způsob je vhodný pro stanovení smykového napětí po délce přeplátování, není však vhodný pro případné vyhodnocování napětí v místech vzniku singularit (oblasti s teoreticky nekonečnou hodnotou napětí). Oblast mezi zářezem a koncem vzorku nebyla předmětem analýzy, velikost elementů v těchto místech byla volena náhodně. V oblasti spoje byly modelovány i samostatné vrstvy pryskyřice. Rozměry použité sítě pro první přiblížení sítě byly zaznamenány do (Tab. 20).

	Šířka	Výška	Počet elementů
	b <sub>e</sub> [mm]	h <sub>e</sub> [mm]	po výšce [-]
	v oblast	i spoje	
Dural	0.5	0.2	2
Kompozit	0.5	0.3	1
Kompozit (smyk)	0.5	0.1	1
Pryskyřice	0.5	0.1	1

Tab. 20 Rozměry výpočtové sítě vzorků v prvním přiblížení

Síť v oblasti spoje byla příliš hrubá. Vzhledem k rozdílné geometrii vzorku (tloušťka pryskyřice) v místě smykového namáhání bylo první analýzou ověřeno, že dosažené výsledky s hrubou sítí nejsou reprezentativní.

Síť byla modifikována a její finální rozměry pro každou skupinu vzorků jsou uvedeny v této kapitole. Dle článku [23] byla zvolena tloušťka pryskyřice 0.01 mm (Obr. 49). Volbou třech elementů po tloušťce vrstvy pryskyřice byl minimalizován vliv singularit. Elementy a uzly byly v každé síti přečíslovány za účelem zkrácení výpočtového času.



Obr. 49 SEM snímek společně vytvrzené duralové vrstvy s uhlíkovým prepregem [23]

# 7.1.1 CARE 6/5 JEDNOSMĚRNÁ ORIENTACE

Na následujících schématech (Obr. 50, Obr. 51) jsou znázorněny detaily výpočtové sítě. Protože kompozitní vrstvy mají shodnou orientaci, byl použit pouze jeden element po výšce v kompozitních vrstvách v oblasti mimo spoj.



Obr. 50 Přechodová oblast v místě zářezu



Obr. 51 Detail kompozitní vrstvy a vrstev pryskyřice

V oblasti spoje, kde dochází ke smykovému namáhání kompozitní vrstvy (uprostřed výšky vzorku), byla síť zjemněna (Obr. 51). V této oblasti bylo následně vyhodnocováno smykové napětí po délce přeplátování. Rozměry výpočtové sítě jsou uvedeny v Tab. 21.

	Šířka	Výška	Počet elementů		
	b <sub>e</sub> [mm]	h <sub>e</sub> [mm]	po výšce [-]		
	mimo	spoj			
Dural	0.294	0.2	2		
Kompozit	0.294	0.3	1		
	v oblast	i spoje			
Dural	0.05	0.2	2		
Kompozit	0.05	0.3	1		
Kompozit (smyk)	0.05	0.07	4		
Prysykřice	0.05	0.033	3		
v přechodové oblasti					
Dural	0.1875	0.2	2		
Kompozit	0.1875	0.3	1		

Tab. 21 Rozměry výpočtové sítě vzorků sítě vzorků CARE 6/5 jednosměrná orientace

#### 7.1.2 CARE 6/5 KŘÍŽOVÁ ORIENTACE

Protože kompozitní vrstvy mají rozdílnou orientaci, byly použity dva elementy po výšce kompozitní vrstvy v oblasti mimo spoj, což je patrné na schématu (Obr. 52).







Obr. 53 Detail kompozitních vrstev a vrstev pryskyřice

V oblasti spoje, kde jsou kompozitní vrstvy smykově namáhány (Obr. 53), byla vymodelována samostatná vrstva s podélnou orientací a samostatná vrstva s příčnou orientací. Mezi tyto vrstvy byla vložena vrstva pryskyřice. V této oblasti bylo následně vyhodnocováno smykové napětí po délce přeplátování. Rozměry výpočtové sítě jsou uvedeny v Tab. 22.

	Šířka	Výška	Počet elementů		
	b <sub>e</sub> [mm]	h <sub>e</sub> [mm]	po výšce [-]		
	mimo s	рој			
Dural	0.294	0.2	2		
Kompozit	0.294	0.15	2		
v oblasti spoje					
Dural	0.05	0.2	2		
Kompozit	0.05	0.15	2		
Kompozit (smyk)	0.05	0.045	3		
Pryskyřice	0.05	0.033	3		
v přechodové oblasti					
Dural	0.1875	0.2	2		
Kompozit	0.1875	0.3	1		

Tab. 22 Rozměry výpočtové sítě vzorků CARE 6/5 křížová orientace

## 7.1.3 CARE 3/2 JEDNOSMĚRNÁ ORIENTACE

Síť je v případě skladby 3/2 složitější, v oblasti mimo spoj byly modelovány samostané vrsvy pryskyřice, aby zůstala zachována výška duralových vrstev. Síť byla zjemněna v oblasti zářezů, kde se nachází jedna duralová a jedna kompozitní vrstva, z důvodu předpokládaného většího stupně deformace (Obr. 54).



Obr. 54 Přechodová oblast v místě zářezu



Obr. 55 Detail vrstev pryskyřice a duralové vrstvy

Vrstva duralu v místě spoje je od kompozitních vrstev oddělena zvlášť vymodelovanou vrstvou pryskyřice (Obr. 55). Napětí bylo vyhodnocováno uprostřed této duralové vrstvy. Rozměry výpočtové sítě jsou uvedeny v Tab. 23.

	Šířka	Výška	Počet elementů		
	b <sub>e</sub> [mm]	h <sub>e</sub> [mm]	po výšce [-]		
	mimo	o spoj			
Dural	0.294	0.2	2		
Kompozit	0.294	0.28	1		
Pryskyřice	0.294	0.0033	3		
	v oblas	ti spoje			
Dural	0.05	0.2	2		
Dural (smyk)	0.05	0.05	8		
Kompozit	0.05	0.28	2		
Pryskyřice	0.05	0.0033	3		
v přechodové oblasti					
Dural	0.1875	0.2	2		
Kompozit	0.1875	0.28	1		
Pryskyřice	0.1875	0.0033	3		

Tab. 23 Rozměry výpočtové sítě vzorků CARE 3/2 jednosměrná orientace

## 7.1.4 CARE 3/2 KŘÍŽOVÁ ORIENTACE

V oblasti mimo spoj byly modelovány samostané vrsvy pryskyřice i mezi jednotlivými kompozitními vrstvami (Obr. 56) z důvodů zachování stejné tloušťky duralových vrstev a rozdílné orientace kompozitních vrstev.



Obr. 56 Přechodová oblast v místě zářezu



Obr. 57 Detail vrstev pryskyřice a duralové vrstvy

Vrstva duralu v místě spoje, je stejně jako v předchozím případě, oddělena od kompozitních vrstev zvlášť vymodelovanou vrstvou pryskyřice (Obr. 57). Napětí bylo vyhodnocováno uprostřed duralové vrstvy. Rozměry výpočtové sítě jsou uvedeny v Tab. 24.

	Šířka	Výška	Počet elementů		
	b <sub>e</sub> [mm]	h <sub>e</sub> [mm]	po výšce [-]		
	mimo	o spoj			
Dural	0.294	0.2	2		
Kompozit	0.294	0.135	1		
Pryskyřice	0.294	0.0033	3		
	v oblas	ti spoje			
Dural	0.05	0.2	2		
Dural (smyk)	0.05	0.05	8		
Kompozit	0.05	0.135	1		
Pryskyřice	0.05	0.0033	3		
v přechodové oblasti					
Dural	0.1875	0.2	2		
Kompozit	0.1875	0.135	1		
Pryskyřice	0.1875	0.0033	3		

Tab. 24 Rozměry výpočtové sítě vzorků CARE 3/2 křížová orientace

## 7.1.5 Hybridní vzorky 1/2 jednosměrná orientace

Síť v případě hybrdních vzorků skladby 1/2 byla výrazně zjednodušena, nicméně byly znovu modelovány samostatné vrstvy pryskyřice (Obr. 58, Obr. 59).





Obr. 58 Přechodová oblast v místě zářezu



Napětí bylo vyhodnocováno uprostřed duralové vrstvy (Obr. 59). Rozměry výpočtové sítě jsou uvedeny v Tab. 25.

	Šířka	Výška	Počet elementů
	b <sub>e</sub> [mm]	h <sub>e</sub> [mm]	po výšce [-]
	mimo	o spoj	
Dural	0.2	0.1875	4
Kompozit	0.2	0.12	6
Pryskyřice	0.2	0.0033	3
	v oblas	ti spoje	
Dural (smyk)	0.05	0.05	15
Kompozit	0.05	0.12	6
Pryskyřice	0.05	0.0033	3
	v přechod	ové oblast	i
Kompozit	0.05	0.12	6

Tab. 25 Rozměry výpočtové sítě hybridních vzorků skladby 1/2 jednosměrné orientace

# 7.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Všechny okrajové podmínky byly vztaženy k uzlům (typ vazby: "Nodal"). Na následujícím schéma (Obr. 60) je zobrazena vnější geometrie vzorku. Délka volných konců a zářezů byla pro všechny vzorky stejná. Vzorek byl vetknut na levé straně, kde byl zakázán posuv ve všech třech souřadných osách *X*, *Y* a *Z*. Sevření vzorku kleštinami trhacího stroje bylo simulováno vazbou aplikovanou na délce 5 mm na obou koncích vzorku. V oblasti kleštin byl zakázán posuv v ose *Y* a rotace okolo osy *Z*.

Na pravé straně vzorku bylo aplikováno zatížení ve směru osy X. Ve schématu (Obr. 60) je pro názornost uvedeno zatížení F <1, 0, 0>, ve skutečnosti byla hodnota "1" vždy nahrazena silou naměřenou při zkoušce pro daný vzorek. Protože se jedná o 2D úlohu, byla hodnota síly zmenšena měřítkem s ohledem na šířku vzorku a počet uzlů po výšce vzorku. Celému vzorku byl zakázán posuv v ose Z z důvodu zachování rovinnosti úlohy.



Obr. 60 Vnější geometrie vzorku: aplikace okrajových podmínek

## 7.3 MATERIÁLOVÉ MODELY A VLASTNOSTI ELEMENTŮ

Pro dural byl použit izotropní materiálový model s konstantami: E = 72000 MPa,  $\mu$  = 0.3. Z důvodu velkého přetvoření při zatížení do zlomu vzorku, byla pryskyřice popsána nelineárním elasto-plastickým materiálovým modelem (Obr. 61).

Input Options	_ = ×
Constitutive Model:	Elastoplastic 💌
Nonlinear Data Input	Stress/Strain Curve
Yield Function:	Von Mises 🔻
Hardening Rule:	Isotropic 💌
Strain Rate Method:	None 🔻
Property Name	Value
Stress/Strain Curve =	resin a
Current Constitutive Models	51 51
Linear Elastic - [] - [Activ Elastoplastic - [Stress/Stra	e] in Curve, Von Mises, Isotropic, None, ] - [Active]
4	
	Show Material Stiffness
	Show Material Compliance
	Cancel

Obr. 61 Definice elasto-plastického materiálového modelu pryskyřice

Závilost napětí na deformaci, která byla zahrnuta do výpočtu, je uvedena v grafu (Obr. 62). Podrobná data k pryskyřici použité v prepregu nebyla výrobcem uvedena. Při stanovování závislosti napětí na deformaci a materiálových konstant se vycházelo z podkladů [8] [24] [25]. Pro pryskyřici byly použity následující materiálové konstanty: E = 1600 MPa,  $\mu$  = 0.35.



Obr. 62 Materiálový model pryskyřice

Kompozitní vrsty byly popsány 2D ortotropním modelem (Tab. 26). Modul pružnosti a Poissonova konstanta byly zjištěny z katalogu výrobce [26], pro moduly pružnosti ve smyku byly použity typické hodnoty.

E <sub>11</sub>	110000	MPa
E <sub>22</sub>	9000	MPa
μ	0.25	-
G <sub>12</sub>	5000	MPa
G <sub>23</sub>	4500	MPa
<b>G</b> <sub>13</sub>	4500	MPa

Tab. 26 Materiálové konstanty kompozitní vrstvy

Dále byly definovány vlastnosti pro jednotlivé skupiny elementů. Elementům reprezentující vrstvy duralu, pryskyřice a kompozitu byly přiřazeny vlastnosti tenké skořepiny o tloušťce 1 mm ve směru osy *Z*. Vlastnosti duralu a pryskyřice byly považovány za homogenní (Obr. 63). V případě definice vlastností kompozitních vrstvev, bylo nutné definovat vlastnosti laminátu (Obr. 64).

Options:		
Thin 🔻		
Homogeneous		
Standard Formulation	-	1

Obr. 63 Definice vlastností duralu a pryskyřice

Options:		
Thin 🔻		
Laminate 🔻		
Standard Formulation	•	ą

Obr. 64 Definice vlastností kompozitu

Elementům reprezentujícím kompozitní vrstvu s orientací vláken ve směru zatížení bylo definováno ve vlastnostech natočení 0° (Obr. 65). Elementům reprezentující kompozitní vrstvu s orientací vláken kolmo na směr zatížení bylo definováno ve vlastnostech natočení 90° (Obr. 66).

	Material Name	Thickness	Orientation	Global Ply ID
1	uhlik	1.000000E+0	0.000000E+0	1

Obr. 65 Parametry vrstvy orientované ve směru zatížení

	Material Name	Thickness	Orientation	Global Ply ID
1	uhlik	1.000000E+0	9.00000E+1	1

Obr. 66 Parametry vrstvy orientované kolmo na směr zatížení

# 7.4 VÝPOČET A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Kromě navýšení počtu kroků výpočtu (Obr. 67) na hodnotu 20, nebyly původní parametry výpočtu pro danou úlohu měněny. Vzhledem k tomu, že byl použit nelineární materiálový model pro pryskyřici, bylo nutné jednotlivé úlohy počítat řešičem "SOL 106".

20
omatic 💌
5
25

Obr. 67 Definování počtu kroků výpočtu

Po vypočtení úlohy v programu Nastran, byly výsledky zobrazeny v programu Patran. Nejprve byla zkontrolována celková deformace vzorku (Obr. 68).



Obr. 68 Deformace vzorku CARE 6/5 o délce přeplátování 10mm zatíženého silou 2230N - model scale

V případě korektní deformace, bylo vykresleno smykové napětí ve vzorku τ<sub>xy</sub> (Obr. 69). Následně byly označeny jednotlivé uzly (příp. elementy) po délce přeplátování uprostřed spoje a vypočtené napětí v těchto entitách bylo uloženo do reportu. Napětí z reportů byla vložena do tabulkového procesoru Excel, kde byly sestaveny grafy závislosti smykové pevnosti na délce přeplátování a vypočteny střední hodnoty smykové pevnosti spojů.



Obr. 69 Smykové napětí  $\tau_{xy}$  ve vzorku CARE 6/5 o délce přeplátování 10 mm zatíženého silou 2230N

# 7.5 VÝSLEDKY ANALÝZ

# 7.5.1 CARE 6/5

Následující kapitola obsahuje grafy porovnávající průběhy smykových napětí ve spoji vzorků s jednosměrnou (označení: // ) a křížovou orientací vláken (označení: + ). Všechny vzorky skladby 6/5 s jednosměrnou orientací vykazují vyšší hodnoty smykového napětí ve spoji po délce přeplátování ve srovnání se vzorky s křížovou orientací (Obr. 70, Obr. 71, Obr. 72).



Obr. 70 Přeplátování l = 10 mm

Obr. 71 Přeplátování l = 20 mm



Obr. 72 Přeplátování l = 30 mm

# 7.5.2 CARE 3/2

Hodnoty smykového napětí ve spoji vzorku skladby 3/2 pro délku přeplátování 15 mm (Obr. 73) jsou přibližně rovcenné. V případě délky přeplátování 20 mm jsou smyková napětí ve spoji vzorku s křížovou orientací vláken vyšší než smyková napětí ve spoji vzorku s jednosměrnou orientací vláken (Obr. 74). Smyková napětí ve spoji vzorku s křížovou orientací a délkou přeplátování 30 mm jsou nižší než smyková napětí ve spoji vzorku s jednosměrnou orientací vláken (podobnost s všemi vzorky skladby 6/5) (Obr. 75).



Obr. 73 Přeplátování l = 15mm

Obr. 74 Přeplátování l = 20mm



Obr. 75 Přeplátování l = 30mm

## 7.5.3 HYBRIDNÍ VZORKY 1/2

Pro úplnost jsou v této podkapitole uvedeny i výsledky analýzy pro skladbu Hybridmí vzorky skladby 1/2 bez lepidla (Obr. 76, Obr. 77, Obr. 78, Obr. 79).





Obr. 79 Přeplátování l = 30mm

# 7.6 VLIV KONEČNOSTI VZORKU

Vliv konečnosti vzorku byl zkoumán na 3D modelech skladby CARE 6/5 s délkou přeplátování 10 mm a 20 mm. Rozměry elementů a vnější geometrie vzorku v rovině XY byly shodné s ekvivalentní úlohou ve 2D. Vysunutím elementů ve směru osy *Z* do vzdálenosti šířky vzorku byla vytvořena trojrozměrná síť složená z elementů "CHEXA". Vlastnosti elementů bylo nutné definovat pro trojrozměrný případ úlohy. Materiálové modely a okrajové podmínky byly ekvivaletní 2D úlohám. Úlohy byly počítány řešičem "SOL400".

Bylo ověřeno, že smykové napětí po šíři vzorku se výrazně nemění (Obr. 80), 2D úlohy je možné pro dané případy považovat za dostatečně přesné.



Obr. 80 Smyková plocha vrstvy pryskyřice vzorku skladby CARE 6/5 s délkou přeplátování 10mm

# 7.7 ZÁVĚR

Existuje mnoho publikovaných článků popisující rozdílné přístupy v modelování a vyhodnocování napětí v lepeném spoji. Pro všechny úlohy popsané v této diplomové práci byla napětí vyhodnocována uprostřed výšky spoje, jedná se o tzv. průměrná napětí [25]. Jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly, použitý přístup není vhodný pro vyhodnocování napětí v oblasti singularit, které mohou mít nezanedbatelný vliv v případě detailního ověřování zkoušek nebo návrhu konstrukce. Koncetrace napětí v těchto místech vznikají z důvodu náhlé změny materiálových charakteristik elementů [25]. Pro vyhodnocování napětí v oblasti singularit je možné použít přístup pomocí faktoru intenzity napětí popsaný v literatuře [25].

Výrobci prepregů zpravidla neuvádějí materiálové charakteristiky samostatné pryskyřice. Případné navýšení přesnosti výpočtu je možné pouze na základě znalosti materiálových konstant použité pryskyřice. Hybridní vzorky skladby 1/2 s lepidlem nebyly modelovány, protože materiálové charakteristiky lepidel nebyly známy.

Dále je nutné zmínit, že FE analýzy nedokážou zohlednit přípravu povrchu adherendů, která má podstatný vliv na smykovou pevnost spoje.

# ZÁVĚR

Experimentální část práce poskytuje přehled o dosahovaných hodnotách smykové pevnosti v hybridních spojích. Zkouškami bylo prokázáno, že lepidlo může mít vyztužující vliv (kapitola 6.1.3). Při stejné úpravě povrchu duralového adherendu se dosahovalo vyšších pevnostních hodnot než v případě vzorků bez lepidla. Z výsledků zkoušek (hybridní vzorky skladby 2/1 vyráběné metodou ruční laminace) vyplývá, že nejlepší povrchovou úpravou pro povrch duralového adherendu v hybridním spoji je chemická úprava piklováním.

Výsledky FE analýz korespondují s naměřenými hodnotami smykové pevnosti ve spoji. V případě jednosměrně orientovaných vzorků jsou rozložení smykových napětí po délce přeplátování symetrická (kapitola 7.5). Ukazuje se, že vytvořené FE analýzy jsou pro potvrzení trendů závislostí smykové pevnosti na poměru tloušťky adherendu a délky přeplátování dostačující.

Nedostatečně prosycená tkanina vede ke značnému poklesu pevnosti spoje, jak bylo prezentováno v kapitole 6.2. V případě výroby hybridního spoje metodou ruční laminace, je nutné důsledně kontrolovat prosycení tkaniny. Prosycení uhlíkové tkaniny se vizuálně hůře kontroluje ve srovnání s prosycením skleněné tkaniny. Výsledky zkoušek se potvrdilo, že vrstva lepidla umožňuje eliminovat negativní vliv technologických vad vzniklých při prosycování tkaniny.

FE analýzy pokrývají pouze vzorky spojované matricí prepregu bez aplikace lepidla. Pro analýzy vzorků s lepidly by bylo nutné provést rozsáhlé zkoušky za účelem zjištění materiálových charakteristik lepidla. FE analýza vzorků vyráběných metodou ruční laminace by byla proveditelná pouze po rozsáhlých materiálových zkouškách kompozitních vrstev. Předmětem práce bylo vyzkoušet co nejvíce kombinací geometrií vzorku (tloušťka, délka přeplátování) a různé povrchové úpravy. Rozsáhlé materiálové zkoušky by se negativně projevily na rozsahu diplomové práce.

Diplomová práce je výhradně zaměřena na spojování kompozitů s duralovou slitinou. Nejen v letectví je možné nalézt více příkladů dané kombinace. Existují však i hybridní konstrukce kompozitu s titanovou slitinou nebo ocelí. I když se jedná o méně časté kombinace, bylo by vhodné je pro porovnání vyzkoušet a analyzovat. Vzorky pro zkoušky smykové pevnosti musely být řezány velmi opatrně tak, aby nedošlo k ovlivnění matrice vznikajícím teplem a aby nenastala delaminace mezi kovovými a kompozitními vrstvami. Vzhledem k časové náročnosti přípravy vzorků, neproběhly zkoušky únavové pevnosti. Rovněž nebyly vzorky zkoušeny na smykovou pevnost při zvýšené a snížené teplotě okolí. Zmiňované neproběhlé zkoušky je možné doporučit pro případné navázání na diplomovou práci.

# POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- SINMAZÇELIK, Tamer, Egemen AVCU, Mustafa Özgür BORA a Onur ÇOBAN. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. Materials & Design [online]. 2011, 32(7), 3671-3685 [cit. 2016-05-18]. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.03.011. ISSN 02613069. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306911001671
- [2] A380, world's largest commercial aircraft, successfully takes to the skies. In: Airbus [online]. 2005 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.airbus.com/presscentre/pressreleases/press-releasedetail/detail/a380-worlds-largest-commercial-aircraft-successfully-takes-to-theskies/
- [3] VLOT, Ad a Jan W. GUNNINK. Fibre Metal Laminates an Introduction. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. ISBN 978-940-1009-959.
- CACCESE, Vincent, Jean-Paul KABCHE, Keith A. BERUBE a Michael J. BOONE. [4] Structural response of a hybrid composite/aluminum strut assembly. Composite [online]. 2007, 159-171 [cit. 2016-05-18]. DOI: Structures 80(2), 10.1016/j.compstruct.2006.04.075. ISSN 02638223. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822306002029
- [5] A hybrid composite carbody for korean tilting train. JEC Magazine [online]. 2008,
  (40) [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <u>http://www.jeccomposites.com/news/jeccomposites-magazine-digital-release</u>
- [6] New Audi Space Frame with high proportions of aluminum and CFRP. In: Audi Technology Portal [online]. Audi, 2015 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <u>http://www.audi-technology-portal.de/en/body/aluminium-bodies/new-audi-space-frame-with-high-proportions-of-aluminum-and-cfrp</u>
- [7] PETERKA, J. Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství. Praha: SNTL, 1980, 792 s.
- [8] LEE, Lieng-Huang. Adhesive bonding. New York: Plenum Press, 1991. ISBN 03-064-3471-7.
- LEE, Lieng-Huang. Adhesion of high polymers. I. Influence of diffusion, adsorption, and physical state on polymer adhesion. In: Journal of Polymer Science Part A-2: Polymer Physics. 5(4), s. 751-760. DOI: 10.1002/pol.1967.160050410. ISSN 04492978. Dostupné také z: <a href="http://doi.wiley.com/10.1002/pol.1967.160050410">http://doi.wiley.com/10.1002/pol.1967.160050410</a>.

- [10] Co je co v povrchové a koloidní chemii: výkladový slovník [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005 [cit. 2016-01-26]. Dostupné z: <u>http://147.33.74.135/knihy/uid\_es-001/index.html</u>
- [11] GURUMOORTHY, Anand V. P. a Kishwar Hayat KHAN. Polymers at interfaces: biological and non-biological applications. Recent Research in Science and Technology. 2011, 3(2), 7. ISSN 2076-5061.
- [12] HIGGINS, A. Adhesive bonding of aircraft structures. International Journal of Adhesion and Adhesives [online]. 2000, 20(5), 367-376 [cit. 2016-01-26]. DOI: 10.1016/S0143-7496(00)00006-3. ISSN 01437496. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143749600000063
- [13] HUSSEY, Bob. Structural Adhesives: Directory and Databook. London: Chapman & Hall, 1996, 416 s. ISBN 0-412-71470-1.
- [14] LOCTITE AA330: Technical Data Sheet [online]. 2014 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: http://tds.henkel.com/tds5/docs/AA%20330-EN.PDF
- [15] REDUX BONDING TECHNOLOGY [online]. 2003 [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Adhesive Bonding Technology.pdf
- [16] BROUGHTON, Bill a Mike GOWER. Measurement Good Practice Guide No. 47: Preparation and Testing of Adhesive Joints [online]. Teddington, 2001 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <u>http://www.adhesivestoolkit.com/Docu-Data/NPLDocuments/P%20A%20J/Good%20Practice%20Guides/NPL%20MGPG%</u> 20No%2047%20Adhesive%20Joint%20Testing.pdf
- [17] MUBAROK, Mohammad Zaki, WAHAB, SUTARNO a Soleh WAHYUDI. Effects of Anodizing Parameters in Tartaric-Sulphuric Acid on Coating Thickness and Corrosion Resistance of Al 2024 T3 Alloy. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering [online]. 2015, 03(03), 154-163 [cit. 2016-02-05]. DOI: 10.4236/jmmce.2015.33018. ISSN 2327-4077. Dostupné z: http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/ jmmce.2015.33018
- [18] KLEMENT, J. Manufacture and Basic Properties of Fibre Metal Laminate Composed of Carbon Prepreg and Aluminium Alloy. In: Czech Aerospace Proceedings. Praha: Association of Aerospace Manufacturers of the Czech Republic, 2002, s. 36-38. ISSN 1211-877X.
- [19] KUNZ, Karel. Technologie vyztužování a oprav konstrukcí ze slitin hliníku s využitím kompozitních materiálů uhlík/epoxy: zkrácená verze PhD Thesis. V Brně: Vysoké učení technické, 2002. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. ISBN 80-214-2169-X.
- [20] TECHNICKÝ LIST: Letoxit<sup>®</sup> PFL 120. Kunovice, 2011. Dostupné také z: http://www.5m.cz/userfiles/file/Lepidla%20CZ/TL%20PFL%20120%20CZ.pdf
- [21] Laminační pryskyřice L285 Tužidla 285, 286, 287. Přáslavice. Dostupné také z: <u>http://www.havel-</u> composites.com/proddocs/TL%20L%20285%20MGS%20a%20tuz%20CZ.pdf
- [22] EPOXICEYS RYCHLE TVRDNOUCÍ 30 ml. Ceys [online]. Barcelona [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <u>http://www.ceys.cz/epoxidova/epoxy3.htm</u>
- PARK, Sang Wook, Hak Sung KIM a Dai Gil LEE. Optimum design of the co-cured [23] double lap joint composed of aluminum and carbon epoxy composite. Composite Structures [online]. 2006, 75(1-4), 289-297 [cit. 2016-05-15]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.04.031. ISSN Dostupné 02638223. z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822306001462
- [24] GILAT, Amos, Robert K. GOLDBERG a Gary D. ROBERTS. Strain Rate Sensitivity of Epoxy Resin in Tensile and Shear Loading [online]. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2005, 40 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <u>http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20050179433.pdf</u>
- [25] DOOR, Daniel a Marcus GLEICH. Stress analysis of structural bonded joints. Delft: DUP Science, 2002. ISBN 90-407-2285-4.
- [26] Hexcel [online]. Stamford, 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Г	[-]	Množství adsorbovaného polymeru
φ	[-]	Objemový zlomek adsorbované vrstvy
$\delta_{\rm RMS}$	[-]	Tloušťka adsorbované vrstvy
Ε	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
t	[mm]	Tloušťka adherendu
е	[mm]	Deformace lepidla
<i>Rp</i> <sub>0.2</sub>	[MPa]	Smluvní mez kluzu
<b>s, s</b> a	[mm]	Tloušťka vrstvy lepidla
τ <sub>s</sub> , τ <sub>frac</sub>	[MPa]	Smyková pevnost spoje
I, I <sub>u</sub>	[mm]	Délka přeplátování
а	[mm]	Délka vzorku
b	[mm]	Šířka vzorku
С	[mm]	Vzdálenost konců vzorku pro odlupovací zkoušky
h	[mm]	Výška vzorku pro odlupovací zkoušky
R	[mm]	Poloměr zaoblení vzorku pro odlupovací zkoušky
be	[mm]	Šířka elementu
he	[mm]	Výška elementu
μ	[-]	Poissonova konstanta
G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
τ <sub>xy</sub>	[MPa]	Smykové napětí
//	[-]	Jednosměrná orientace vláken
+	[-]	Křížová orientace vláken

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Zalaminovaná duralová vložka	9
Obr. 2 Zadní závěs stabilizátoru letounu VUT001 Marabu	9
Obr. 3 Karoserie automobilu Audi R8: kompozitní díly označeny šedou barvou [24]	. 10
Obr. 4 Řetězce polymeru vázané k substrátu [4]	.13
Obr. 5 Rozložení napětí v jednoduše přeplátovaném lepeném spoji [3]	.16
Obr. 6 Rozložení deformace jednoduše přeplátovaného lepeného spoje [3]	.16
Obr. 7 Vliv rozdílné tloušťky adherendu: t <sub>1</sub> < t <sub>2</sub>	.17
Obr. 8 Vliv rozdílné tuhosti adherendu: E <sub>1</sub> > E <sub>2</sub>	.18
Obr. 9 Vliv příliš velkého přeplátování [3]	. 18
Obr. 10 Závislost středního napětí ve spoji při poruše na poměru tloušťky a délky přeplátov	ání
[9]	.19
Obr. 11 Zkouška smykové pevnosti – rozměry vzorku a způsob zatížení [3]	.20
Obr. 12 Zkouška pevnosti v odlupování dle Wintera – rozměry vzorku a způsob zatížení [3]	21
Obr. 13 Zkouška pevnosti v odlupování přes válečky – způsob zatížení [9]	.22
Obr. 14 Schéma vrstvy oxidů na adherendu po moření [1]	.25
Obr. 15 Schéma vrstvy oxidů na adherendu po anodické oxidaci v kyselině chromové [1]	.25
Obr. 16 Schéma vrstvy oxidů na adherendu po anodické oxidaci v kyselině fosforečné [1]	.26
Obr. 17 Blokové schéma kompletní přípravy porchu hliníkového adherendu před lepením	.26
Obr. 18 Využtí strhávací fólie před lepením [9]	.28
Obr. 19 Zkoušené vzorky skladby 6/5	.30
Obr. 20 Schéma zkoušeného vzorku skladby 6/5: 1 – Hliníková slitina, 2 – Prepreg	.32
Obr. 21 Vzorky 1.1 – 1.3	.34
Obr. 22 Vzorky 1.4 – 1.8	.34
Obr. 23 Vzorek 1.9	.34
Obr. 24 Vzorky 2.1 – 2.4	.35
Obr. 25 Vzorky 2.5 – 2.8	.35
Obr. 26 CARE: 6/5: Graf závislosti smykové pevnosti spoje na poměru tloušťky adherend	ů a
délky přeplátování skladby	.36
Obr. 27 Vzorek č. 1: Vlevo – před zkouškou, Vpravo – porušený vzorek po zkoušce	.37
Obr. 28 Schéma zkoušeného vzorku skladby 3/2: 1 – Hliníková slitina, 2 – Prepreg	.37
Obr. 29 Vzorky skupiny 3	.38
Obr. 30 Vzorky skupiny 4	.38
Obr. 31 CARE 3/2: Graf závislosti smykové pevnosti spoje na poměru tloušťky adherendu	ůа
délky přeplátování	.39
Obr. 32 Schéma zkoušeného hybridního vzorku skladby 1/2: 1 – Hliníková slitina, 2 – Prepl	reg
	.40
Obr. 33 Vzorky skupiny 5	.41
Obr. 34 Vzorky skupiny 6	.41
Obr. 35 Vzorky skupiny 7	.41
Obr. 36 Hybridní vzorky skladby 1/2: Graf závislosti smykové pevnosti spoje na pomě	ěru
tloušťky adherendů a délky přeplátování	.43
Obr. 37 Schéma zkoušeného hybridního vzorku skladby 2/1: 1 – Hliníková slitina, 2 – Kompo	ozit
	.45
Obr. 38 Vzorky skupiny 1 – Alkalické čištění	.48

Obr. 39 Vzorky skupiny 2 – Scotch Brite	48
Obr. 40 Vzorky skupiny 3 - Tryskání	48
Obr. 41 Vzorky skupiny 4 - Piklování	48
Obr. 42 Hybridní vzorky skladby 2/1 - Sklo: Graf závislosti smykové pevnosti spoje na pom	ıěru
tloušťky adherendů a délky přeplátování	49
Obr. 43 Vzorky skupiny 11 – Alkalické čištění	52
Obr. 44 Vzorky skupiny 12 – Scotch Brite	52
Obr. 45 Vzorky skupiny 13 - Tryskání	52
Obr. 46 Vzorky skupiny 14 - Piklování	52
Obr. 47 Vzorky skupiny 15 - Piklování	52
Obr. 48 Hybridní vzorky skladby 2/1 - Uhlík: Graf závislosti smykové pevnosti spoje na pom	ıěru
tloušťky adherendů a délky přeplátování	53
Obr. 49 SEM snímek společně vytvrzené duralové vrstvy s uhlíkovým prepregem [18]	55
Obr. 50 Přechodová oblast v místě zářezu	55
Obr. 51 Detail kompozitní vrstvy a vrstev pryskyřice	55
Obr. 52 Přechodová oblast v místě zářezu	56
Obr. 53 Detail kompozitních vrstev a vrstev pryskyřice	56
Obr. 54 Přechodová oblast v místě zářezu	57
Obr. 55 Detail vrstev pryskyřice a duralové vrstvy	57
Obr. 56 Přechodová oblast v místě zářezu	58
Obr. 57 Detail vrstev pryskyřice a duralové vrstvy	58
Obr. 58 Přechodová oblast v místě zářezu	59
Obr. 59 Detail vrstev pryskyřice a duralové vrstvy	59
Obr. 60 Vnější geometrie vzorku: aplikace okrajových podmínek	60
Obr. 61 Definice elasto-plastického materiálového modelu pryskyřice	61
Obr. 62 Materiálový model pryskyřice	61
Obr. 63 Definice vlastností duralu a pryskyřice	62
Obr. 64 Definice vlastnosti kompozitu	62
Obr. 65 Parametry vrstvy orientované ve směru zatížení	62
Obr. 66 Parametry vrstvy orientovane kolmo na smer zatizeni	63
Obr. 67 Definování počtu kroků výpočtu	63
Obr. 68 Deformace vzorku CARE 6/5 o dělce přeplátování 10mm zatíženého silou 2230	)N -
model scale	63
Obr. 69 Smykove napeti $\tau_{xy}$ ve vzorku CARE 6/5 o delce preplatovani 10mm zatizeneho s	llou
2230N	64
Obr. 70 Preplatovani I = 10mm	64
Obr. 71 Preplatovani I = 20mm	64
Obr. 72 Preplatovani I = 30mm	65
Obr. 73 Preplatovani I = 15mm	65
Obr. 74 Preplatovani I = 20mm	65
Ubr. 75 Preplatovani I = 30mm	66
Ubr. 76 Preplatovani I = 10mm	66
Obr. 77 Preplatovani I = 15mm	66
Ubr. 78 Preplatovani I = 20mm	66
Obr. 79 Preplatovani I = 30mm	66

Obr.	80	Smyková	plocha	vrstvy	pryskyřice	vzorku	skladby	CARE	6/5	s délkou	přeplátování
10m	m										67

## **SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Potřebné počty vzorků a způsob vyhodnocení zkoušek lepených spojů
Tab. 2 Mechanické vlastnosti komponent CARE materiálu [11]
Tab. 3 Mechanické a technologické vlastnosti lepidel pro výrobu vzorků [13]
Tab. 4 Základní rozměry vzorků skladby CARE 6/5 – podélná orientace kompozitních vrstev32
Tab. 5 Základní rozměry vzorků skladby CARE 6/5 – křížová orientace kompozitních vrstev. 32
Tab. 6 Smyková pevnost vzorků CARE 6/5 – podélná orientace kompozitních vrstev
Tab. 7 Smyková pevnost vzorků CARE 6/5 – křížová orientace kompozitních vrstev
Tab. 8 Základní rozměry vzorků skladby CARE 3/2 - podélná orientace kompozitních vrstev 37
Tab. 9 Základní rozměry vzorků skladby CARE 3/2 - křížová orientace kompozitních vrstev37
Tab. 10 Smyková pevnost vzorků CARE 3/2
Tab. 11 Základní rozměry hybridních vzorků skladby 1/240
Tab. 12 Smyková pevnost hybridních vzorků 1/241
Tab. 13 Vlastnosti duralové vrstvy hybridního vzorku skladby 2/1 [11]45
Tab. 14 Vlastnosti kompozitu hybridního vzorku skladby 2/1 [14]45
Tab. 15 Vlastnosti lepidla hybridního vzorku skladby 2/1 [15]46
Tab. 16 Základní rozměry vzorků46
Tab. 17 Smyková pevnost vzorků47
Tab. 18 Základní rozměry vzorků50
Tab. 19 Smyková pevnost vzorků51
Tab. 20 Rozměry výpočtové sítě vzorků v prvním přiblížení
Tab. 21 Rozměry výpočtové sítě vzorků sítě vzorků CARE 6/5 jednosměrná orientace56
Tab. 22 Rozměry výpočtové sítě vzorků CARE 6/5 křížová orientace57
Tab. 23 Rozměry výpočtové sítě vzorků CARE 3/2 jednosměrná orientace
Tab. 24 Rozměry výpočtové sítě vzorků CARE 3/2 křížová orientace
Tab. 25 Rozměry výpočtové sítě hybridních vzorků skladby 1/2 jednosměrné orientace60
Tab. 26 Materiálové konstanty kompozitní vrstvy62

## SEZNAM PŘÍLOH

- P1 Používaná lepidla v letectví smyková pevnost lepidel, část. I
- P1 Používaná lepidla v letectví smyková pevnost lepidel, část. II
- P2 Používaná lepidla v letectví teplotní a materiálové určení lepidel, část. I
- P2 Používaná lepidla v letectví teplotní a materiálové určení lepidel, část. II

				Smyková pevr	nost			Wetersondaní	
	Výrobce	Тур	RT	Zvýšená		Mat.	Úprava povrchu	A ) (V) 2 0V 8111	Forma lepidla
			τ [MPa]	τ [MPa]	Τ [°C]			[teplota / čas]	
<u>ې</u>	Loctite	Multibond 330	15-30	ī	1	nízkouhl. ocel	otryskáno	22°C/24h	jednosložkové
٢٥٨	Plexus ITW	MA 300	25	T	-	ocel	-	23°C/15min	dvousložkové
КВҮ	Plexus ITW	MA 310	14	ı		ocel		23°C/35min	dvousložkové
IA	Plexus ITW	MA 320	10.2	1	1	ocel		23°C/30min	dvousložkové
-ON ÀVOTÀ	Loctite	Prism 401	12	·		alu		22°C/24h	jednosložkové
АҮА АКВҮЬ	Loctite	Prism 406	11	ı	I	alu	leptáno	22°C/24h	jednosložkové
-ON ÀVO?	Cutor	EM JEEE	18.6	20.6	232	2024 ТЗ	piklováno	stupňovité	fóliové
KYA KYA	cyted		22	24	121	GF+BMI	ı	stupňovité	fóliové
	Araldito	130 A/B	24			alu	otryskáno	40°C/16h	dvousložkové
	שומותב		35	ī		CFRP	zdrsněno a odmaštěno	40°C/16h	dvousložkové
	3M	Scoth-Weld 7236 B/A	42	25	80	2024 T3	piklováno	65°C/2h	dvousložkové
	3M	Scoth-Weld AF 163-2	35.8	22	80	2024 T3	CAA	121°C/60min	fóliové
	3M	Scoth-Weld AF 563	42.3	11	149	2024 T3	piklováno + PAA	121°C/90min	fóliové s tkaninou
	3M	Scotch-Weld EC-2615 B/A	37.9 - 40	19.3	71	2024 T3	piklováno	27°C/7dní	dvousložkové
	3M	Scotch-Weld EC-2815 B/A	34.5	13.1	82	2024 T3	piklováno + PAA	RT/16h + 82°C/1h	dvousložkové
	3M	Scotch-Weld EC-3333 B/A	37.9	13.7	71	2024 T3	piklováno	26°C/7dní	dvousložkové
	3M	Scotch-Weld EC-3448	37.9	32.4	82	2024 T3		121°C/60min	jednosložkové pastové
	3M	Scotch-Weld EC-3984	34.5	9.7	149	alu	piklováno	121°C/60min	jednosložkové
ý	3М	Scotch-Weld AE SES	40	30	136	2024 T3	piklováno + PAA		fóliové s tkaninou
γΛO	INIC		36	20	136	CFRP			-
aix	Cytec	FM 73M	46	30	82	2024 T3	piklováno	120°C/30min	fóliové s tkaninou
EbO	Cytec	FM 94	43	31	82	5052		120°C/60min	fóliové s tkaninou
I	Cytec	FM 300M	29.8	15.9	150	2024 T3	piklováno	175°C/60min	fóliové s tkaninou
	Cytec	Metlbond 1515-1	34	13.4	130	prepreg	strhávací fólie + zdrsněno	stupňovité	fóliové s tkaninou
	Loctite	EA 9313	31	6.9	71	2024 T3	PAA	25°C/5dní	dvousložkové
	l octite	E A 0460	24.1	6.7	82	alu	leptáno	25°C/3dny	dvousložkové
	FOCULE		13.8	I	ı	CFRP		25°C/3dny	dvousložkové
	Loctite	Ablestik 2332-17	20	12	120	alu	-	120°C/60min	jednosložkové
	Hardman	Epoweld 13230	19.3	6.6	82	2024 T3	piklováno	25°C/7dní	dvousložkové
	Hardman	Epoweld 20214	-	-	-	alu		-	-
	Hexcel	Redux 312	37 - 43	17 - 30	100	2024 T3	piklováno	120°C/30min	fóliové bez nosiče
	Hexcel	Redux 319	42 - 45	22 - 26	150	2024 T3	piklováno	175°C/60min	fóliové bez nosiče
	Hexcel	Redux 340U	31	18	150	2024 T3	piklováno	175°C/60min	fóliové bez nosiče

-			1	r	1	r	r	r	r ,						
	Forma lepidla		fóliové s bavlněnou tkaninou	fóliové s polyesterovou tkaninou	fóliové bez nosiče	dvousložkové tekuté	fóliové s nosičem	fóliové	fóliové	fóliové					
	Vytvrzování	[teplota / čas]	120°C/60min	175°C/60min	120°C/30min	120°C/60min	stupňovité	stupňovité	stupňovité	stupňovité	stupňovité	stupňovité	177°C/1h + 246°C/2h	177°C/1h + 246°C/2h	177°C/1h + 246°C/2h
	Úprava povrchu		piklováno	piklováno	-		PAA	strhávací fólie	otryskáno	otryskáno	piklováno	strhávací fólie	piklováno	-	-
	Mat.		2024 T3	2024 T3	ı	,	2024 T3	CFRP+BMI	CFRP	Ti-6AI-4V	2024 T3	kompozit	2024 T3	GFRP	CF+PI
evnost	ná	τ [°C]	80	150	100	60	205	205	260	360	232	232	288	288	288
Smuková n	Zvýše	τ [MPa]	24	20	25 - 35	5 - 10	27.6	26.9	17.9	9.7	11.7	10.9	13.1	12.4	17.2
	RT	τ [MPa]	83	37	36 - 41	34 - 40	25.7	19.3	24.3	20.8	2.02	17.1	13.8	12.4	13.1
	Тур		Redux 609	Redux 641	KFL 120	PL 20			FM 57	FM 680-1				EA 9673	
	Výrobce		Hexcel	Hexcel	5M	5M	Lover	пехсег	Cytec	Cytec	0.400 (	ראופר		Loctite	
			٩/	NO0	IXO	Eb				À.	DOV	IMI			

	Výrobce	Тур	Provozní teplota	Určeno pro adherendy
			T [°C]	
Ŕ	Loctite	Multibond 330	80	kovové a nekovové materiály, GRP
ΓΟ	Plexus ITW	MA 300	<-55, +121>	hliník, FRP, vinyl esterové pryskyřice
KRΥ	Plexus ITW	MA 310	<-55, +121>	kovové materiály, FRP, epoxidové a vinyl esterové pryskyřice
A	Plexus ITW	MA 320	<-55, +121>	kovové materiály, FRP, vinyl esterové pryskyřice
.NO- ÁTOVÁ	Loctite	Prism 401	<-50, +80>	hliník, kompozity
күа АККҮL	Loctite	Prism 406	<-50, +80>	hliník, kompozity
KYANO- ESTEROVÁ	Cytec	FM 2555	<-55, +232>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
	Araldite	420 A/B	-	hliník, vláknové kompozity*
A ESTEROV	3M	Scoth-Weld 7236 B/A	<-55, +80>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
	3M	Scoth-Weld AF 163-2	<-55, +80>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
	3M	Scoth-Weld AF 563	<-55, +149>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
	3M	Scotch-Weld EC-2615 B/A	-	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
	3M	Scotch-Weld EC-2815 B/A	-	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
	3M	Scotch-Weld EC-3333 B/A	-	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
	3M	Scotch-Weld EC-3448	<-55, +107>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
	3M	Scotch-Weld EC-3984	<-55, +149>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
λÝ	3M	Scotch-Weld AF 555	-	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
DQI	Cytec	FM 73M	<-55, +82>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
ЪÔ	Cytec	FM 94	<-55, +104>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
ш	Cytec	FM 300M	<-55, +150>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
	Cytec	Metlbond 1515-1	<-54, +160>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
	Loctite	EA 9313	<-55, +49>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
	Loctite	EA 9460	<-53, +80>	hliník, kompozity s termosetovou matricí
	Loctite	Ablestik 2332-17	140	hliník, FRP
	Hardman	Epoweld 13230	<-55, +80>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
	Hardman	Epoweld 20214	-	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*
	Hexcel	Redux 312	-	hliník, kompozity
	Hexcel	Redux 319	<-55, +150>	hliník, kompozity
	Hexcel	Redux 340U	180	hliník, kompozity

	Výrobce	Түр	Provozní teplota T [°C]	Určeno pro adherendy	
/Á	Hexcel	Redux 609	<-55, +80>	hliník, kompozity	
Q	Hexcel	Redux 641	<-55, +150>	hliník, kompozity	
OXI	5M	KFL 120	<-75, +100>	hliník*	
EP	5M	PL 20	<-75, +80>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*	
	Hexcel	Redux HP655	240	kovové materiály, kompozity	
	Cytec	FM 57	288	kovové materiály, kompozity*	
Á	Cytec	FM 680-1	<-55, +371>	kovové materiály, kompozity s polyimidovou matricí*	
VODIMI	Cytec	Metlbond 2550G	<-55, +232>	hliník, kompozity, kombinace hliníku a kompozitu*	
	Loctite	EA 9673	288	hliník, kompozity*	