

Návrh a testování lepených spojů u modulu tramvaje

Bc.Zdeněk Očadlík

Diplomová práce
2012

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk OČADLÍK**
Osobní číslo: **T10746**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**

Téma práce: **Návrh a testování lepených spojů u modulu tramvaje**

Zásady pro vypracování:

1. Kompozitní materiály, problematika jejich spojování.
2. Lepené spoje.
3. Návrh lepených spojů u konkrétní aplikace a jejich zdůvodnění.
4. Testování navržených lepených spojů dle vybraných norem.
5. Diskuse dosažených výsledků a závěr.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

13. března 2012

Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2012

Ve Zlíně dne 28. března 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Očadlík Zdeněk

Obor: Řízení jakosti

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby⁽¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3⁽²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60⁽³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60⁽³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 6.května 2012



⁽¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací

⁽²⁾ Vysoká škola nejvýšeálně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) *Diplomová, diplomová, bakalářská a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být (též nejméně při pracovních úlohách před konáním obhajoby zveřejněny k nahlédnutí veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnožování.*

(3) *Plácí, že odevzdaním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

¹⁾ zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3;

(3) *Do práva autorského také nezahrnuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li materiál za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 školní dílo.

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 4). Dopírá-li autor takového díla užití svolení bez výslovného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení zpublikovaného projevu jeho vůle a souhlasu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nezměněno.*

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělků jim dosažených v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložil, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíží k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá testováním lepených spojů. Teoretická část se zaměřuje na základy lepení a vlivy ovlivňující lepené spoje, zkoušení lepených spojů a kompozity a jejich využití. Praktická část se skládá z přípravy zkušebních vzorků a z měření smykové pevnosti lepených spojů na trhacím stroji Zwick 1456. Lepily se kombinace materiálů kompozit - kompozit, kompozit - hliníkový plech a kompozit - nerezový plech. Jako lepidla byla použita Weld On SG 300, Sikaflex 552 a Sikaflex 553 2K.

Klíčová slova: Lepení, lepené spoje, pevnost

ABSTRACT

This thesis focuses on the testing of bonded joints. The theoretical part focuses on the basic of sticking and influences affecting the joints, testing adhesive joints and composites and their use. The practical part consists of preparation of test samples and measuring the shearing strength of bonded joints on tension testing machine Zwick 1456. Combination of the following materials were tested: composite - composite, composite - aluminium plate and composite - stainless steel sheet. As adhesives were used Weld On SG 300, Sikaflex 552 and Sikaflex 553 2K.

Keywords: Adhesive bonding, glued joints, strength

Rád bych poděkoval vedoucí práce, paní doc. Ing. Soni Rusnákové, PhD., za pomoc, cenné rady, vynaložený čas a ochotu, které mi pomohli při zpracování mé diplomové práce.

Dále chci poděkovat firmě Form s.r.o. Střelná, která mi poskytla zázemí a materiály potřebné k výrobě vzorků a v neposlední řadě velké díky patří mé ženě a rodině při podpoře během celého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 LEPENÍ	13
1.1 VÝHODY A NEVÝHODY LEPENÍ	13
1.2 ZÁKLADY TECHNOLOGIE LEPENÍ.....	14
1.2.1 Vlastní technologie lepení	15
1.3 PRÁCE S LEPIDLY.....	16
1.4 STRUKTURA LEPENÉHO SPOJE.....	17
1.5 PORUCHY LEPENÝCH SPOJŮ	18
1.6 ZPŮSOBY VYTVRZOVÁNÍ LEPENÝCH SPOJŮ	19
1.6.1 Lepidla vytvrzovaná anaerobní reakcí.....	19
1.6.2 Lepidla vytvrzovaná ultrafialovým zářením.....	21
1.6.3 Lepidla vytvrzovaná aniontovou reakcí (kyanoakryláty)	22
1.6.4 Lepidla vytvrzovaná aktivátory	23
1.6.5 Lepidla vytvrzovaná okolní vlhkostí	24
1.6.6 Lepidla vytvrzovaná teplem	25
1.6.7 Lepidla vytvrzovaná vsáknutím a odpařením rozpouštědel	26
2 ZKOUŠKY LEPENÝCH SPOJŮ	28
2.1 ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK	28
2.1.1 Destruktivní zkoušky.....	28
2.1.2 Nedestruktivní zkoušky	30
2.2 ZÁKLADNÍ MECHANICKÉ ZKOUŠKY	30
2.2.1 Zkušební zařízení	31
2.2.2 Smyková pevnost	32
2.2.3 Pevnost v odlupování podle Wintera	32
2.2.4 Smluvní diagram napětí – deformace.....	33
2.2.5 Aritmetický průměr	35
2.2.6 Směrodatná odchylka	35
3 KOMPOZITY A JEJICH POUŽITÍ V PRŮMYSLU	36
3.1 DEFINICE A ZÁKLADNÍ PŘEHLED KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	36
3.2 VLÁKNOVÉ KOMPOZITY	39
3.2.1 Druhy vláken	39
3.2.2 Orientace vláken.....	40
3.2.3 Produkty z vláken.....	40
3.3 VÝROBA KOMPOZITŮ.....	41
3.4 POUŽITÍ KOMPOZITŮ V DOPRAVNÍM PRŮMYSLU	41
3.5 POUŽITÍ LEPENÝCH SPOJŮ V DOPRAVNÍM PRŮMYSLU.....	43
II PRAKTICKÁ ČÁST	45

4	CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	46
5	POŽADAVKY NA LEPENÉ SPOJE V DOPRAVNÍM PRŮMYSLU	47
5.1.1	Pevnostní požadavky modulu.....	47
5.1.2	Parametry procesu lepení modulu	47
5.2	VÝROBA KOMPOZITOVÝCH VZORKŮ	49
5.3	POUŽITÉ TKANINY A PRYSKYŘICE	50
5.3.1	Chopped Strand Mats M123	50
5.3.2	Norpol NGA HX3	50
5.3.3	Norpol 850-M850.....	50
5.4	POUŽITÁ LEPIDLA, ČISTÍCÍ PROSTŘEDKY A PRIMERY	50
5.4.1	Weld On SG300	50
5.4.2	Sikaflex 553 2K.....	50
5.4.3	Sikaflex 552	51
5.4.4	Sika Cleaner 205	51
5.4.5	Sika Primer 206 G+P	51
5.5	NEREZOVÝ PLECH.....	51
5.6	HLINÍKOVÝ PLECH	52
6	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A PŘÍSTROJE PRO LABORATORNÍ ZKOUŠKY	53
6.1	ZKOUŠKA SMYKOVÉ PEVNOSTI	54
6.1.1	Kompozit – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo A	55
6.1.2	Kompozit – kompozit (rubová strana), lepidlo A	55
6.1.3	Hliníkový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo A.....	56
6.1.4	Nerezový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo A	56
6.1.5	Hliníkový plech – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo A	57
6.1.6	Nerezový plech – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo A	57
6.1.7	Kompozit – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo B	58
6.1.8	Kompozit – kompozit (rubová strana), lepidlo B.....	58
6.1.9	Hliníkový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo B.....	59
6.1.10	Nerezový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo B.....	59
6.1.11	Hliníkový plech – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo B.....	60
6.1.12	Nerezový plech – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo B	60
6.1.13	Kompozit – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo C	61
6.1.14	Kompozit – kompozit (rubová strana), lepidlo C.....	61
6.1.15	Hliníkový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo C.....	62
6.1.16	Nerezový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo C.....	62
6.1.17	Hliníkový plech – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo C.....	63
6.1.18	Nerezový plech – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo C	63
6.1.19	Porovnání lepidel použitých při smykové zkoušce	64
6.2	ZKOUŠKA V ODLUPOVÁNÍ.....	65
6.2.1	Kompozit – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo A	66
6.2.2	Kompozit – kompozit (rubová strana), lepidlo A	66
6.2.3	Hliníkový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo A.....	67
6.2.4	Nerezový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo A	67
6.2.5	Kompozit – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo C	68

6.2.6	Kompozit – kompozit (rubová strana), lepidlo C.....	68
6.2.7	Hliníkový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo C.....	69
6.2.8	Nerezový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo C.....	70
6.2.9	Porovnání lepidel použitých při zkoušce v odlupování	70
7	DISKUSE VÝSLEDKŮ	72
7.1	SMYKOVÁ ZKOUŠKA.....	72
7.1.1	Lepidlo A.....	72
7.1.2	Lepidlo B.....	72
7.1.3	Lepidlo C.....	73
7.2	ZKOUŠKA V ODLUPOVÁNÍ.....	73
7.2.1	Lepidlo A.....	73
7.2.2	Lepidlo C.....	74
	ZÁVĚR	75
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ	79
	SEZNAM TABULEK.....	81
	SEZNAM PŘÍLOH.....	83

ÚVOD

Lepení je všeobecně považováno za moderní technologii, i když ve skutečnosti je velmi staré. Příklady lepení lze nalézt již v době kamenné, kdy pračlověk objevil lepivost některých látek, a to pravděpodobně náhodou. Jedním z prvních příkladů lepení mohly být např. vlasy spleené krví nebo hmyz přilepený zasychající smolou. Archeologicky je lepení doloženo z Babylónu, kde byly nalezeny sošky s očima zalepenýma do hlavy.

Prakticky až do 2. světové války mohly být lepeny pouze materiály schopné vsáknout lepidlo (např. dřevo, kůže, textil, papír apod.). Lepení bylo využíváno především ve spotřebním průmyslu. Mezníkem v technologii lepení bylo její využití při výrobě letadel. V současnosti se lepení nachází a využívá prakticky ve všech odvětvích hospodářství - v kosmické a letecké technice, automobilovém průmyslu, při stavbě lodí, vagónů, obráběcích strojů, ve stavebnictví, v měřicí a regulační technice a dokonce i ve zdravotnictví.

Pro úspěšné použití lepidel v praxi jsou důležité pokud možno podrobné znalosti technologie lepení a technologických vlastností používaných lepidel. Příčinou selhání lepeného spoje není v mnoha případech nízká pevnost lepidla, ale nedostatečná příprava lepených povrchů, použití nevhodného druhu lepidla či nevhodná konstrukce lepeného spoje. [1]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LEPENÍ

1.1 Výhody a nevýhody lepení

Stejně jako jiné technologie, vyznačuje se lepení nejen mnoha výhodami, ale i některými zápornými a limitujícími činiteli. Při rozhodování o typu lepeného spoje je třeba kromě ekonomického hlediska zvážit technické přednosti, ale i nedostatky technologie lepení ve srovnání s tradičními způsoby spojování (např. svařováním, pájením, šroubováním, nýtováním). Lepení je třeba považovat za doplněk výše uvedených klasických metod spojování, nikoliv za jejich náhradu.

Výhody lepení lze shrnout do těchto bodů:

- lepení umožňuje spojování stejných (např. kombinace ocel - ocel, dural - dural, pryž - pryž, sklo - sklo aj.) nebo různých (např. kombinace ocel - dural, ocel - pryž, ocel - sklo, dural - pryž, pryž - sklo aj.) materiálů bez ohledu na jejich tloušťku,
- aplikací lepidel není narušena celistvost, profil ani estetický vzhled lepeného souboru,
- lepení umožňuje připravit spoje vodotěsné, plynotěsné, spoje s dobrou elektrickou, tepelnou a zvukovou izolací, příp. s dobrou elektrickou vodivostí,
- lepený spoj tlumí vibrace v konstrukci a zvyšuje tuhost i vzpěrovou pevnost souboru,
- aplikací lepení lze uspořit náklady na výrobu lícovaných spojů,
- lepený spoj zabraňuje vzniku elektrolytické koroze kovových adherendů,
- lepením se prakticky nezvyšuje hmotnost lepeného souboru, což je jedním z předpokladů miniaturizace,
- lepené spoje mohou být průhledné, v případě požadavku i barevně přizpůsobené,
- lepením lze dosáhnout vysoké pevnosti spojů, zejména při namáhání ve smyku a rázu atd.

Nevýhody lepení lze shrnout do těchto bodů:

- lepení klade vysoké požadavky na rovinnost a čistotu povrchu lepených dílů,
- u adherendů se špatnými adhezními vlastnostmi jsou nutné speciální úpravy povrchu (např. použití aktivátorů),

- u některých lepidel je třeba použít vytvrzovací přípravky, příp. připravit směs několika složek (tzv. vícesložková lepidla),
- konstrukčně použitelné lepené spoje jsou nerozebíratelné,
- většina lepených spojů je citlivá na namáhání v odlupování,
- životnost některých typů lepidel je časově omezená,
- maximální pevnosti spoje je dosaženo až po určité době (a to i pro „vteřinová“ lepidla!),
- lepené spoje mají omezenou odolnost proti vyšším teplotám,
- termoplastická lepidla jsou citlivá vůči dlouhodobému statickému namáhání, které způsobuje tečení polymerních složek lepidla,
- lepení v průmyslovém měřítku je náročnější na vybavení pracoviště (jsou potřeba nanášecí zařízení, lisy, přípravky apod.) atd. [1]

1.2 Základy technologie lepení

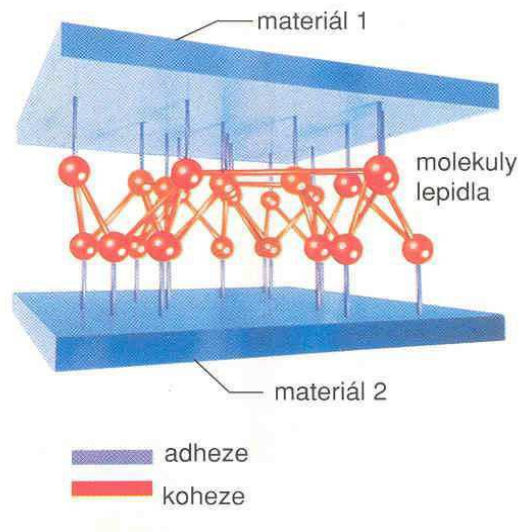
Základní úlohou konstruktéra v oblasti technologie lepení je volba vhodného typu lepidla pro spojení daného materiálu nebo naopak pro určitý typ lepidla nalézt vhodný druh aplikace. Ve většině případů se jedná o úlohu obecnou, kdy je nutné nalézt vhodné lepidlo současně s vhodnou aplikací (zejména typ a úprava lepeného podkladu). Současně s tímto je nutné nalézt, resp. zohlednit všechny další aspekty této technologie (úprava povrchů, procesy aplikace, způsob nanášení, chování lepidla během procesu lepení apod.).

Celková pevnost lepeného spoje je závislá především na dvou nejdůležitějších činitelích: *adhezi a kohezi*.

Adheze: (přilnavost). Vzájemné přitahování dvou povrchů adhezními silami. Adheze souvisí s molekulovou strukturou lepidla. Je to výsledkem působení fyzikálních sil, mezimolekulárních a chemických vazeb.

Koheze: (někdy též vnitřní adheze) je tzv. soudržnost. Charakterizuje stav látky (lepidla), ve kterém drží její částice působením mezimolekulárních a valenčních sil pohromadě. Velikost koheze udává tzv. kohezní energie, což je velikost energie potřebná k odtržení jedné částičky od ostatních.

Podmínkami pro vytvoření kvalitního lepeného spoje se všemi jeho kladnými vlastnostmi jsou především vhodná konstrukce spoje, vhodná kombinace lepený materiál – použité lepidlo a dodržení technologického postupu výroby lepeného spoje. [2]



Obr. 1 Adheze a koheze v lepeném spoji [7]

1.2.1 Vlastní technologie lepení

Vlastní postup výroby lepeného spoje má čtyři základní fáze, jimiž jsou:

- a) Příprava spojovaného materiálu (adherendu) na lepení
- b) Příprava lepidla
- c) Nanášení lepidla
- d) Montáž spoje

a) Příprava spojovaného materiálu (adherendu) na lepení

Rozhodující je smáčivost adherendu lepidlem. Cílem všech úprav slepovaných povrchů je maximálně zvýšit smáčivost povrchu lepidlem. Mezi základní úpravy povrchů před lepením patří fyzikální (broušení, tryskání, kartáčování apod.) a chemické (odmašťování v lázních, tampónem, moření, fosfatizace apod.) metody.

b) Příprava lepidla

Způsob přípravy lepidla závisí na čtyřech základních faktorech:

- *Druhu lepidla* - chem. struktura, počet složek apod.

- *Stavu lepidla po uskladnění* – doba životnosti
- *Způsobu nanášení* – velikost a tvar lepených součástí (povrchů)
- *Způsobu vytvrzování* – teplota a tlak vytvrzování, zplodiny apod.

c) Nanášení lepidla

Nanášení lepidla je určitá mezifáze, která odděluje přípravné operace od vlastního vytvoření lepeného spoje. Cílem nanášení lepidla je vytvoření souvislé a rovnoměrné vrstvy lepidla určité tloušťky. Ve většině případů se lepidlo nanáší na obě lepené půlky.

d) Montáž spoje, vytvoření pevného spoje

Lepené díly se pomocí vhodných přípravků zafixují pod předepsaným tlakem k sobě a vytvoří se fyzikální a chemické podmínky pro vznik pevných vazeb, dokud nedojde k vytvoření adhezivního spojení (odpaření, vytvrzení, polymerace apod.). [2]

1.3 Práce s lepidly

Pro pevnost lepeného spoje je důležitá adheze lepidla k lepenému materiálu a soudržnost filmu lepidla po ztuhnutí nebo vytvrzení.

Pro vznik soudržného spoje je nezbytné, aby:

- lepidlo smáčelo stykové plochy
- byly vytvořeny podmínky pro vznik stejnoměrného filmu lepidla ve spoji
- film ve spoji ztuhnul a vázal povrchy obou dílů

Podle způsobu tuhnutí se lepidla dělí na:

- tuhnoucí v důsledku vsáknutí a odtékání rozpouštědel
- reaktivní
- tavná
- stále lepivá

Výběr lepidla:

- dle složení obou lepených dílů – druh lepidla z hlediska adheze

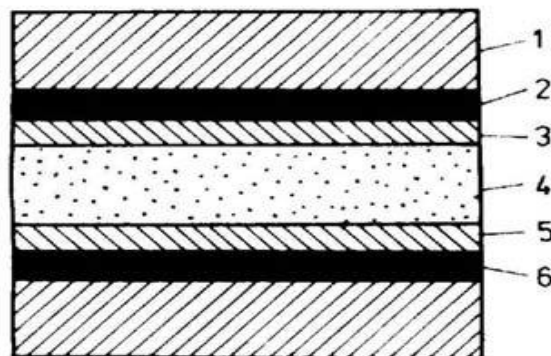
- dle struktury a propustnosti plynů – druh lepidla z hlediska jeho složení a způsobu tuhnutí ve spoji
- užité vlastnosti objektu po slepení – druh lepidla a technologie lepení

Podmínky lepení:

- čistota povrchu – nezbytná pro dobré smáčení povrchu lepidlem, postup čištění se volí podle druhu materiálu
- hladkost povrchu – přiměřené zdrsnění lepeného povrchu zvětší jeho plochu, která je ve styku s lepidlem a zlepší tak pevnost výsledného spoje
- pórovitost a nasákavost – zvětší plochu, která je ve styku s lepidlem a zlepší tak pevnost výsledného spoje, ale také se lepidlo rychleji vsakuje a může vzniknout nesoudržný spoj. Rychlost vsakování závisí na viskozitě lepidla – u pórovitých materiálů je třeba dbát na správnou viskozitu a dostatečný nános lepidla. [3]

1.4 Struktura lepeného spoje

Z hlediska vnitřní struktury lze každý konstrukčně pevný a dostatečně odolný lepený spoj dvou základních materiálů považovat za komplex tří hlavních vrstev a dvou mikrovrstev. [4]



Obr. 2 Schema lepeného spoje [4]

(1 - adherend (základní materiál), 2 - adhezní zóna, 3 - přechodová kohezní zóna, 4 - kohezní zóna, 5 - přechodová kohezní zóna, 6 - adhezní zóna)

1.5 Poruchy lepených spojů

Technologie lepení jakožto i ostatní mají své výhody, které zde již byly uvedeny a také své nevýhody. Zvláště pro lepení je nutné, chceme-li dosáhnout těch nejlepších výsledků dodržování přesných instrukcí dle návodů, předpisů a ostatní dokumentace dodávané výrobcem. Jako základní bych uvedl následující poruchy, které jsou příčinou mnohých nekvalitních spojů.

- při lepení nedošlo k potřebnému vytvrzení
- nebyla dodržena předepsaná vrstva lepidla
- nedošlo k přilnutí lepidla
- špatně zvolený lepicí systém

Všechny výše uvedené příčiny mají za následek buď částečné, nebo úplné porušení lepeného spoje. Mluvíme-li o poruchách lepených spojů, tak tyto se mohou odehrávat buďto v oblasti adheze, kdy hovoříme o adhezním lomu, anebo v oblasti koheze, který nazýváme kohezním lomem.

Adhezní lom

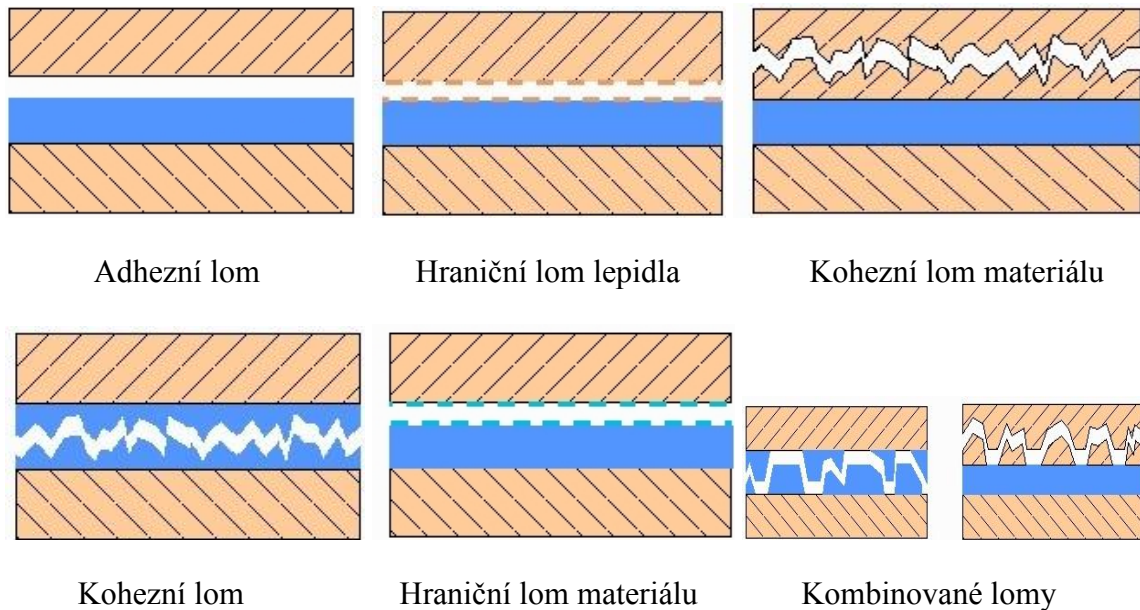
Čistý adhezní lom se pozná tak, že na spojovaném materiálu jsou buď ještě prokazatelné zbytky lepidla anebo, že lepidlo bylo od spojovaného materiálu úplně odděleno. Podrobné výzkumy v této oblasti dokázali, že při adhezním lomu se na povrchu spojovaných součástí vyskytují vrstvičky polymerů.

Kohezní lom

Ve spojitosti s touto poruchou hovoříme o křehkém, nebo houževnatém lomu.

Příčinou křehkého kohezního lomu může být vzrůstající rychlost zatěžování.

Náchylnost ke křehkému lomu je ovlivněna snižující se teplotou a je funkcí elastického modulu. Houževnatý lom je ovlivněn tvary polymerů a zejména změkčením vnitřní a vnější lepené vrstvy. [5]



Obr. 3 Poruchy lepených spojů [5]

1.6 Způsoby vytvrzování lepených spojů

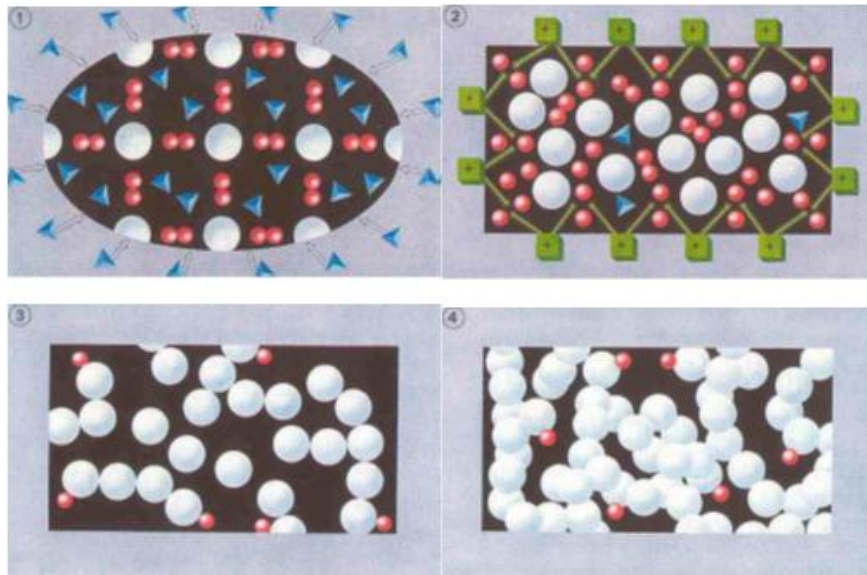
Lepidla jsou z velké části reaktivní polymery, které se mění z kapalné fáze na pevnou (vytvrzování). K této přeměně dochází různými chemickými polymeračními reakcemi. Dle způsobu vytvrzování dělíme lepidla do několika skupin.

- lepidla vytvrzovaná anaerobní reakcí
- lepidla vytvrzovaná ultrafialovým zářením
- lepidla vytvrzovaná aniontovou reakcí (kyanoakryláty)
- lepidla vytvrzovaná aktivátory
- lepidla vytvrzovaná okolní vlhkostí
- lepidla vytvrzovaná teplem
- lepidla vytvrzovaná vsáknutím a odpařením rozpouštědel. [7]

1.6.1 Lepidla vytvrzovaná anaerobní reakcí

Jsou to jednosložková lepidla, u kterých dochází k vytvrzení za normálních teplot (cca 22 °C) a za nepřístupu atmosférického kyslíku. K vytvrzení aplikovaného lepidla dochází poté, co lepené materiály spojíme k sobě a tím zamezíme přístupu kyslíku. Do té doby je vytvr-

zovací složka pasivní. Vytvrzování anaerobních lepidel probíhá rychle, především dojde-li ke styku s kovy. [7]



Obr. 4 Vytvrzovací proces [7]

1-lepidlo v kapalném stavu za přístupu kyslíku, 2-změna peroxidů na volné radikály, které reagují s ionty kovů bez přístupu kyslíku, 3-vytváření polymerních řetězců, 4-lepidlo ve vytvrzeném stavu (struktura s křížově propletenými polymerními řetězci)

●● = peroxidy, ▲ = kyslík, ● = volné radikály, ● = monomery,
■ = ionty kovů

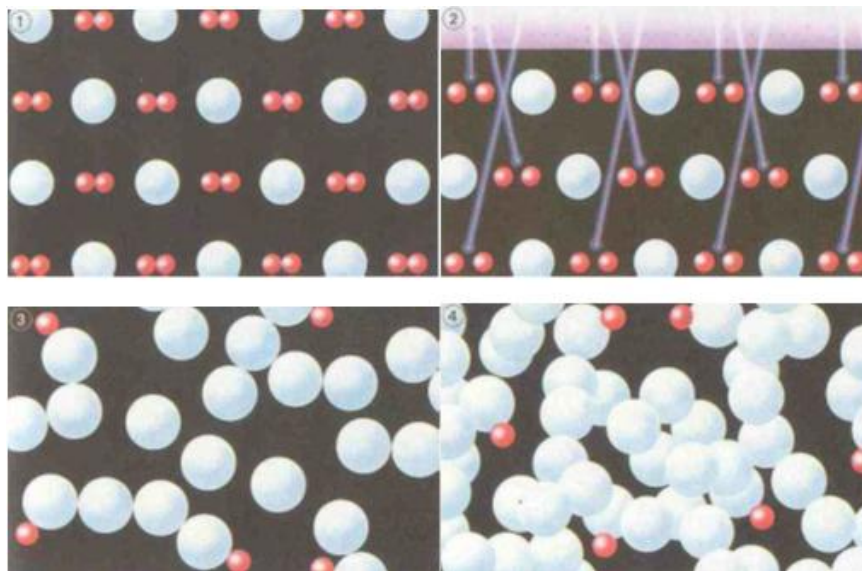
Vlastnosti lepidel vytvrzené anaerobní reakcí:

- vysoká pevnost ve smyku
- tepelná odolnost od -55 do +230 °C
- krátká doba vytvrzování
- snadné dávkování (jednosložková lepidla)
- dobrá odolnost proti vibracím
- dobrá odolnost proti dynamickému namáhání

Lepidla vytvrzená anaerobní reakcí se v převážné části používají na lepení a těsnění kovů (např. zajištění a utěsnění závitů, utěsnění přírub, lepení válcových dílů). [7]




1.6.2 Lepidla vytvrzovaná ultrafialovým zářením

Intenzita a vlnová délka ultrafialového záření mají zásadní vliv na dobu vytvrzení této skupiny lepidel. Aby nastala polymerace ultrafialovým zářením, musí se zajistit shoda mezi lepidlem a správnou expozicí ozáření. Při štěpení fotoaktivátorů zářením, vznikají volné radikály.



Obr. 5 Vytvrzovací proces [7]

1-lepidlo v kapalném stavu, fotoaktivátory a monomery spolu nereagují, 2-fotoaktivátory se mění na volné radikály pod ultrafialovým zářením, 3-růst neregulárních řetězců, 4-lepidlo ve vytvrzeném stavu (zesíťované polymerní řetězce)

 = fotoaktivátory,  = volné radikály,  = monomery

Vlastnosti lepidel vytvrzovaných ultrafialovým zářením:

- vysoká pevnost
- schopnost lepit velké spáry
- krátká doba vytvrzení na manipulační pevnost

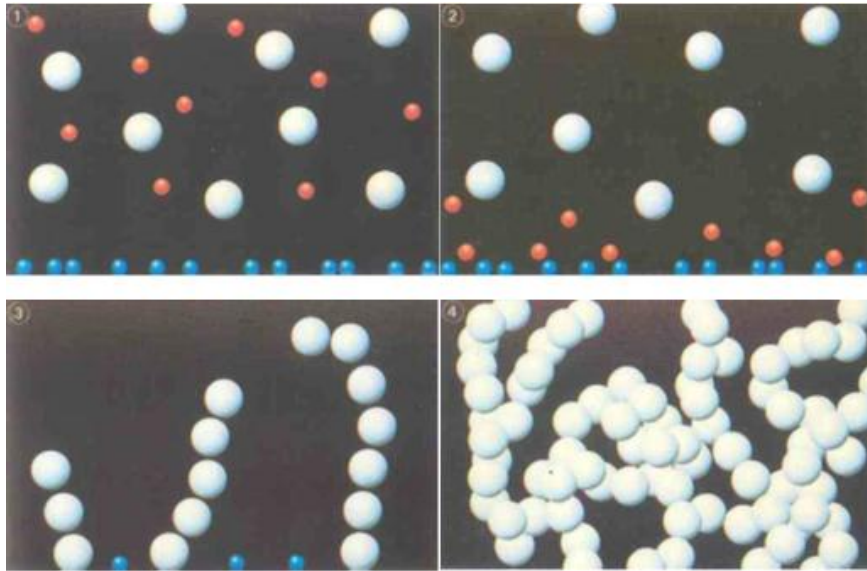
- dobrá až velmi dobrá chemická odolnost
- snadné dávkování (jednosložková lepidla)

Lepidla vytvrzovaná ultrafialovým zářením se používají např. k lepení skla na sklo, skla na kov a průhledných plastů, k lepení a těsnění pro vysoké pracovní teploty a k lepení kovových a plastových dílů s rychlým fixováním a vytvrzením přetoku. [7]

1.6.3 Lepidla vytvrzovaná aniontovou reakcí (kyanoakryláty)

K vytvrzení postačuje okolní vlhkost vzduchu a vlhkost na povrchu lepeného materiálu. Vytvrzení proběhne během krátké doby (řádově v sekundách). Polymerace nastává od povrchu k povrchu, protože vlhkost na povrchu adherendu neutralizuje stabilizátor v lepidle. Nejkratší doba vytvrzení na manipulační pevnost nastává při nulové tloušťce filmu lepidla. Vlhkost vhodná pro dosažení kvalitních spoje je v rozmezí 40-60% při pokojové teplotě. Nižší vlhkost vede k prodloužení vytvrzování, vyšší naopak vytvrzování zrychluje, ale může dojít ke zhoršení pevnosti spoje. Vzduch o vlhkosti pod 40% pevnost lepeného spoje nezhoršuje, ale prodlužuje dobu vytvrzení a tím i výrobu. Vliv na dobu vytvrzení má i kyselost ($\text{pH} < 7$) a zásaditost.

Lepidla vytvrzovaná aniontovou reakcí nanášíme pouze na jeden povrch. Nej kvalitnější spoj dostaneme, když se nanese pouze tolik lepidla, kolik je ho potřeba pro vyplnění spojovací spáry.



Obr. 6 Vytvrzovací proces [7]

1-lepidlo v kapalném stavu, kyselý stabilizátor zabraňuje reakci molekul lepidla, 2-povrchová vlhkost neutralizuje stabilizátor, 3-začátek polymerace, 4-lepidlo ve vytvrzeném stavu (propletené polymerní řetězce)

● = kyselý stabilizátor, ● = povrchová vlhkost, ● = monomery

Vlastnosti lepidel vytvrzovaných aniontovou reakcí:

- velmi vysoká pevnost ve smyku a v tahu
- velmi krátká doba vytvrzení (řádově v sekundách)
- téměř univerzální lepidlo
- dobrá odolnost proti stárnutí

Lepidla vytvrzovaná aniontovou reakcí se používají především pro lepení kovů s plasty, kovů s kovy nebo jinými materiály a obtížně lepitelných plastů. [7]

1.6.4 Lepidla vytvrzovaná aktivátory

K vytvrzení těchto lepidel dochází vždy po smíchání lepidla a aktivátoru. Vytvrzování probíhá za pokojové teploty. Ke smíchání lepidla a aktivátoru může dojít dvěma způsoby. Prvním způsobem je, že se nanese lepidlo i aktivátor na oba povrchy lepených materiálů

tak, aby se nesmíchaly. Ke smíchání dojde až po spojení adherendů a začíná vytvrzování. Druhým způsobem je smíchání lepidla a aktivátoru před nanesením na lepený povrch. Volba způsobu smíchání závisí na typu lepidla.

Pokud nelze použít kapalný aktivátor, lze použít lepidla s aktivátorem, který má stejnou konzistenci jako lepidlo. Jedná se o dvousložková lepidla. Lepidlo a aktivátor se nanášejí odděleně pruh vedle pruhu, nebo pruh na pruh. K vytvrzování dochází po spojení obou lepených povrchů, kdy se obě složky navzájem smíchají. Je-li doba zpracovatelnosti smíchaného lepidla delší jak 5 minut, mohou se obě složky smíchat před nanesením. Výhodou je dokonalejší promíchání směsi.

Vlastnosti lepidel vytvrzovaných aktivátory:

- velmi vysoká pevnost ve smyku a v tahu
- dobrá rázová odolnost (houževnatost)
- rozsah provozních teplot od -55 do +120 °C
- téměř univerzální lepidlo
- dobrá schopnost vyplnit spáru (obzvláště předem smíchané směsi)

Lepidla vytvrzovaná aktivátory se používají především pro konstrukční lepení. [7]

1.6.5 Lepidla vytvrzovaná okolní vlhkostí

Tato skupina lepidel se vytvrzuje vlivem reakce s okolní vlhkostí. Tato lepidla se dělí do dvou základních skupin:

- silikony
- polyuretany

Silikony reagují za pokojové teploty s okolní vlhkostí. Oproti aniontové reakci u kyanoakrylátů, kde vlhkost neutralizuje stabilizátor v lepidle, silikony využívají přímo vody k polymernímu zesítní. Proto musí vlhkost vniknout až do místa, kde má dojít k vytvrzení. V okamžiku, kdy při reakci vnikne molekula vody mezi zesítněné molekuly silikonu, začne se uvolňovat vedlejší produkt. Uvolněný vedlejší produkt může být v závislosti na chemii vytvrzování kyselý (kyselina octová), neutrální (oxin nebo alkohol) nebo zásaditý (amin).

Vlastnosti silikonových lepidel:

- tepelná odolnost vyšší než 230 °C
- pružnost, houževnatost, vysoké prodloužení
- nízký až střední modul
- těsnění různých médií
- vynikající vyplnění spáry

Silikony se používají např. pro těsnění ploch v automobilovém průmyslu, těsnění pro vysokoteplotní aplikace a lepení a těsnění zvláště malých částí.

Polyuretany se vytvrzují stejně jako silikony v závislosti na relativní vlhkosti okolí. Vytvrzování nastává reakcí vody s chemickou přísadou, která obsahuje izokyanátové skupiny. Stejně jako u silikonů musí voda vniknout mezi molekuly lepidla, aby nastala polymerace. Oproti vytvrzování silikonů, nedochází u vytvrzování polyuretanů ke vzniku vedlejšího produktu.

Vlastnosti polyuretanových lepidel:

- vynikající houževnatost
- pružnost, vysoké prodloužení
- vynikající vyplnění spáry
- po vytvrzení lze polyuretany natírat
- vynikající chemická odolnost [7]

1.6.6 Lepidla vytvrzovaná teplem

Mezi tuto skupinu lepidel patří především jednosložková lepidla, která vytvrzují za zvýšených teplot. Většinou se jedná o epoxidová lepidla, která se vytvrzují za teplot přesahujících 100 °C.

Teplota vytvrzování je závislá na druhu lepidla. Lze říci, že čím je teplota vytvrzování vyšší, tím proběhne vytvrzení rychleji. Každý typ lepidla má určitou minimální teplotu, kdy dochází k aktivaci tvrdidla a začíná polymerace. Mezi lepidla vytvrzovaná teplem patří např. epoxidy a metakryláty. Vlastnosti lepidel závisí na jejich chemickém složení.

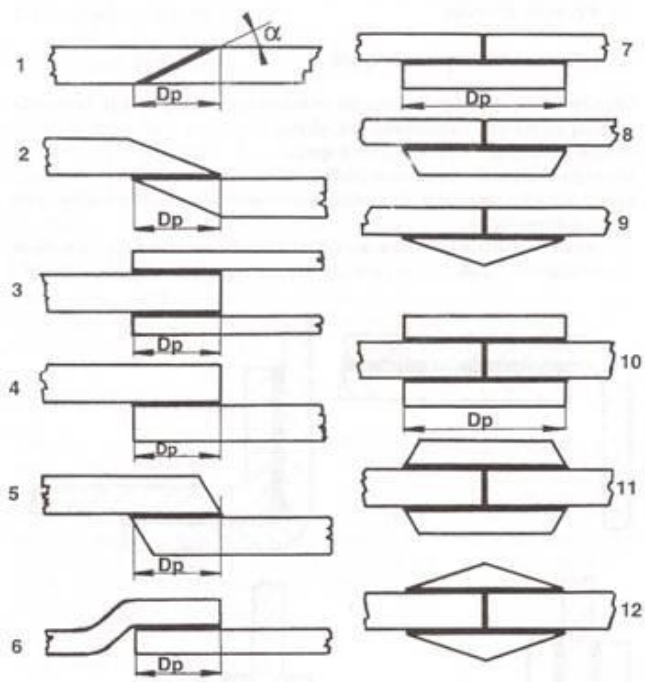
Vlastnosti lepidel vytvrzovaných teplem:

- střední až vysoká pevnost
- dobrá přilnavost k mnoha materiálům
- dobrá schopnost vyplňovat spáru
- dobrá až velmi dobrá odolnost proti prostředí

Lepidla vytvrzovaná teplem se používají především pro spojování kovů, např. pro těsnění a zajišťování závitů. [7]

1.6.7 Lepidla vytvrzovaná vsáknutím a odpařením rozpouštědel

V těchto lepidlech je obsaženo 20 – 60 % filmotvorných látek, které jsou rozpuštěné nebo dispergované ve vodě (nazývaná jako roztoková lepidla disperzní), anebo rozpuštěné v organických rozpouštědlech (nazývaná jako rozpouštědlová lepidla roztoková). Aplikovat tato lepidla lze pouze, pokud je jeden z adherendů rozpustný pro plyny. Rozpouštědlová lepidla se nanášejí na obě lepené plochy, nejprve na plochu méně porézní. Tuhnutím těchto lepidel se struktura filmotvorné látky zpravidla nemění. Při vysychání se objem naneseného lepidla zmenšuje. Hlavním znakem rozpouštědlových lepidel je špatné vyplňování lepené spáry. Proto musí lepené plochy dobře přiléhat. [7]



Obr. 7 Přehled možností plochých spojů [3]

(1 – spoj tupý, zkosený, 2 a 5 – spoj jednoduše přeplátovaný, zkosený, 3 – spoj dvojitě přeplátovaný, 4 – spoj jednoduše přeplátovaný, 6 – spoj lemový, jednoduše)

2 ZKOUŠKY LEPENÝCH SPOJŮ

Pro stanovení vlastností lepeného spoje, jako jsou pevnost a mechanické vlastnosti provádíme zkoušky lepených spojů. Tyto vlastnosti závisí od konstrukce a tvaru spoje, a od materiálů, z kterých se spoj skládá.

2.1 Rozdělení zkoušek

Zkoušky rozdělujeme na dvě základní skupiny:

- destruktivní
- nedestruktivní

2.1.1 Destruktivní zkoušky

-rozdělujeme je dále podle charakteru odtrhávání jednotlivých složek na:

Metody nerovnoměrného odtrhnutí

- zkoušky spojů tuhých materiálů
- zkoušky spojů, kde alespoň jeden adherend je ohybný resp. pružný

Metody rovnoměrného odtrhnutí

-používají se zejména při zkoušení kombinovaných systémů

- zkoušky systému guma – kov
- zkoušky systému plast – kov
- zkoušky jiných kombinací adherendů

Metody s využitím namáhání ve smyku

-tyto zkoušky se využívají zejména při zkoušení pevnosti tuhých spojů spojených přeplátováním, často se využívá i pro spojení pružných materiálů. Smykové napětí působí v rovině spoje a vzniká při smykovém namáhání (tahem, tlakem nebo krutem v rovině spojovaných dílů, při kterém nevznikají kolmá napětí).

Mezi destruktivní zkoušky patří i únavové zkoušky a zkoušky studeného toku. Můžeme sem zahrnout nejen zkoušky mechanických vlastností, ale i zkoušky tepelné odolnosti a

životnosti.

Metody nerovnoměrného odtrhnutí

- destrukční síla působí vždy blíž k některému okraji spoje a může svírat úhel do 180°.

Trhlina ve spoji zpravidla postupuje od některého okraje, až se odtrhne po celé ploše.

Je-li jeden nebo oba dva adherendy pružné, mluvíme o zkouškách odlupování. Při těchto zkouškách je důležitý úhel, který svírá směr odtrhávání s původní rovinou spoje. Čím větší úhel bude působící síla svírat s rovinou spoje, tím menší bude pevnost spoje.

Metody rovnoměrného odtrhnutí

- na rozdíl od metody nerovnoměrného odtrhnutí se u této metody měří velikost síly potřebná na odtrhnutí spoje po celé dotykové ploše současně. Rozdíl je i ve směru působící síly, kde zde působí na rovinu plochy kolmo. Pevnost spoje je pak dána velikostí působící síly na jednotku plochy v MPa.

Metody s využitím namáhání ve smyku

- tyto metody jsou nejvíce rozšířené a jsou především určeny pro spoje tuhých substrátů.

Síla zde působí v rovině spoje – tahem, tlakem nebo krutem. U jednoduše přeplátovaných spojů se tato zkouška nedoporučuje používat u pružných materiálů (kov-plast, kov-guma), a to proto, že v důsledku deformace adherendu dochází postupně k nárůstu podílu odlupovacích napětí. Vzniku odlupovacích napětí se zabráňuje vhodnou konstrukcí spoje nebo rotačními způsoby zkoušení pevnosti ve smyku, které nejlépe odstraňují možnost vzniku odlupovacích napětí.

Únavové zkoušky

- k destruktivním zkouškám patří i únavové (dynamické) zkoušky, které se používají pro náročné aplikace. U této zkoušky namáháme spoj opakovaným zatížením se stanovenou frekvencí a amplitudou. Směr napětí může být v rovině spoje i kolmo na rovinu spoje. Zkoušky se provádí za určité teploty a výsledky udávají čas resp. počet cyklů do zničení spoje za daných podmínek.

Zkoušky odolnosti lepených spojů

- stanovení životnosti lepených spojů pro různá prostředí a jejich použití je pro průmysl důležité. Pro hodnocení kvality spoje se používají např. zkoušky pod vlivem vlhkosti, při zvýšené teplotě, při ponoření do kapalin atd. Jsou to vlastně zkoušky mechanických vlastností uvedených výše kombinované s náročnými zkušebními podmínkami. Zkouška se tedy vykonává během nebo po vystavení spoje vlhkosti, zvýšené teplotě, chemickým látkám apod.

2.1.2 Nedestruktivní zkoušky

Metody nedestruktivních zkoušek jsou založeny na použití akustických a ultrazvukových zařízeních, elektronové mikroskopie, laserů a dalších zařízeních, zkoumajících vlastnosti materiálů, rovnoměrnosti tloušťky lepidla a celistvosti materiálů. Nestanovuje se tedy jen pevnost, ale i vlastnosti konstrukce spoje. Pevnost spoje je pak stanovena jednotlivými vztahy mezi pevností a vlastnostmi spoje například určitá tloušťka lepidla vykazuje určitou pevnost, než jiná tloušťka lepidla.

Druhy zkoušky:

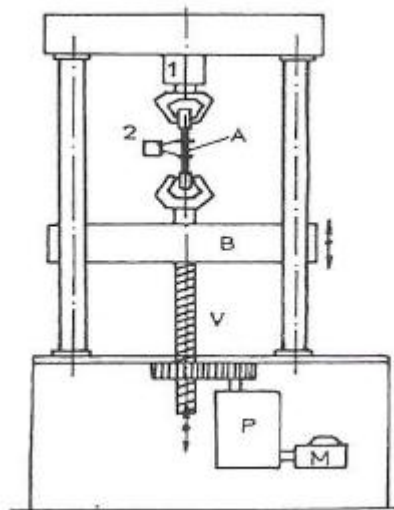
- zjišťování dokonalosti odmaštění povrchu
- měření změn tepelné vodivosti a tepelné kapacity
- měření průniku radioaktivního záření
- měření přenosu zvukových nebo ultrazvukových vln. [8]

2.2 Základní mechanické zkoušky

Z hlediska mechanických vlastností se v normách uvádí napěťové a deformační charakteristiky, obvykle i houževnatost a tvrdost. Hlavním požadavkem na zkoušky k určení těchto mechanických charakteristik je jednoduchost a dostupnost provedení, reprodukovatelnost výsledků a nízké provozní náklady (jednoduchá zkušební tělesa). Jedná se o zkoušku tahem, zkoušku vrubové houževnatosti a zkoušku tvrdosti.

2.2.1 Zkušební zařízení

Základnímu vybavení laboratoře patří univerzální zkušební stroj, na kterém se tyto zkoušky provádějí. Stroj je tvořen pevným rámem, v jehož horní části je umístěn dynamometr 1- zařízení pro měření síly. Zkušební těleso A je jedním koncem uchyceno k dynamometru a druhým koncem k pohyblivému příčnicku B. Příčnick je uváděn do pohybu motorem M, přes vřeteno V a převodovou skříň P. Při pohybu příčnicku dochází k postupnému zatěžování a deformaci zkušebního tělesa. Deformace tělesa je registrována průtahoměrem 2. Vhodnou úpravou zkušebního tělesa a průtahoměru se na tomto přístroji provádí i ostatní mechanické zkoušky.

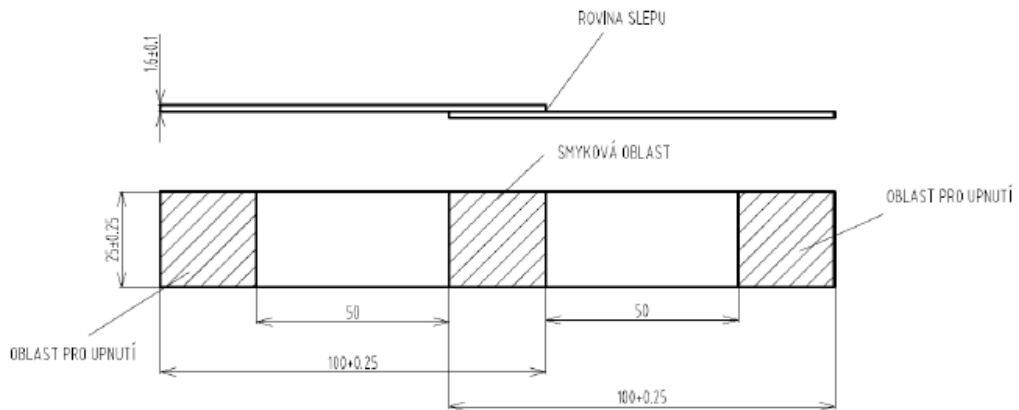


Obr. 8 Schéma univerzálního zkušebního stroje [8]

Pohon zkušebních strojů může být mechanický nebo hydraulický (stroje pro zatížení větší než 200 kN). Mechanické stroje byly původně vybaveny dynamometry, které měřily sílu na principu mechanické váhy. U hydraulických strojů se síla snímala z hydrostatického tlaku oleje v pracovním válci.

2.2.2 Smyková pevnost

Podstata zkoušky spočívá ve stanovení smykového namáhání jednoduchého přeplátovaného spoje mezi tuhými adherendy, na které působí zatěžující tahová síla. Vyhodnocuje se síla potřebná k přetržení tohoto přeplátovaného spoje, popřípadě napětí.



Obr. 9 Zkušební vzorek [9]

Zkušební těleso je upnuto v čelistech, které jsou umístěny symetricky. Působící síla je v rovině lepeného spoje. Zkouška probíhá tak, že se při konstantní rychlosti zatěžuje zkušební těleso až do okamžiku, kdy dojde k porušení a jeho přetržení. Nejvyšší síla se zaznamená a uvede se jako síla potřebná k porušení příslušného tělesa. Smyková pevnost se udává v MPa. [9]

2.2.3 Pevnost v odlupování podle Wintera

Podstatou zkoušky je namáhání zkušebního spoje odlupováním statickým tlakem ve směru kolmém na lepenou plochu. Pevností v odlupování se rozumí síla v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ šířky vzorku, potřebná k oddělení dvou slepených ploch. Pevnost v odlupování podle Wintera při určité teplotě je dána dvěma hodnotami. [10]

$$\sigma_{WA} = F_a/b \quad (1)$$

$$\sigma_{WS} = F_s/b \quad (2)$$

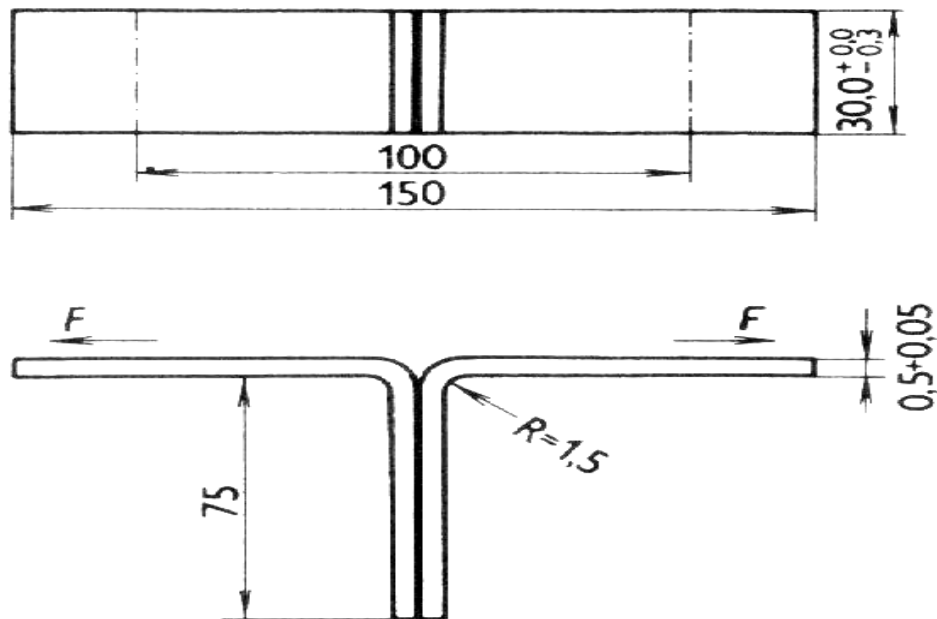
kde σ_{WA} počáteční (absolutní) pevnost v odlupování v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ šířky vzorku

F_a maximální síla v N

b šířka lepeného spoje

σ_{WS} střední pevnost v odlupování v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ šířky vzorku

F_s průměrná síla v N (dána průměrnou výškou diagramu)



Obr. 10 Pevnost v odlupování podle Wintera [10]

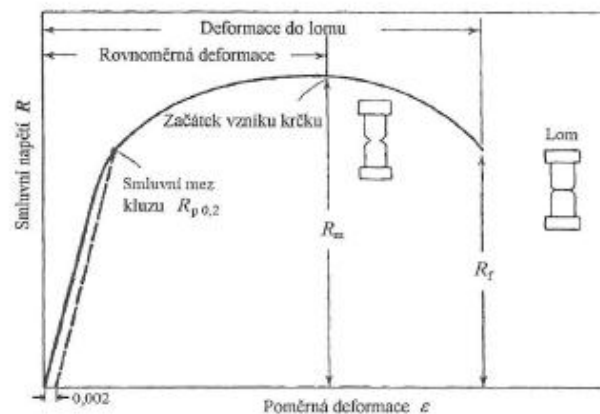
2.2.4 Smluvní diagram napětí – deformace

Závislost síla-prodloužení, získané na zkušebních tělesech různých velikostí, zhotovených z jednoho materiálu, je možné přepočítat na jedinou závislost smluvní napětí - poměrná deformace podle vztahů:

$$\text{smluvní napětí} \quad \sigma = F/S_0 \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

$$\text{poměrná deformace} \quad \varepsilon = (L-L_0)/L_0, \quad \varepsilon = [(L-L_0)/L_0] \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

kde S_0 je původní průřez tělesa, L_0 je původní měrná délka zkušebního tělesa, výraz $(L-L_0)$ vyjadřuje přírůstek délky tělesa.



Obr. 11 Smluvní diagram napětí – deformace [8]

Počáteční úsek diagramu je přímkový a odpovídá elastické deformaci. V případě, že prodloužení je snímáno snímačem umístěným na zkušební tělese, pak tato přímka je přímo popsána Hookeovým zákonem $\sigma = E \cdot \varepsilon$, kde E je modul pružnosti v tahu materiálu zkušební tyče. Pro spolehlivý výpočet modulu pružnosti E je nutné, aby zvětšení snímače bylo (500 – 1000) násobné. Je-li prodloužení zkušební tělesa odvozeno pouze z posuvu příčnicku zkušebního stroje, potom sklon počátečního úseku tahového diagramu zahrnuje vedle elastické deformace zkušební tělesa i elastické deformace zkušebního stroje. Elastická deformace zkušebního stroje je řádově větší, proto nelze modul E vyhodnotit.

V další části diagramu napětí-deformace dochází k odklonu od přímkové závislosti (v důsledku vzniku plastické deformace), přírůstek napětí v závislosti na deformaci postupně klesá až na nulovou hodnotu. Až do tohoto okamžiku se měrná část zkušební tyče deformuje rovnoměrně (dochází k rovnoměrnému zužování průřezu). Další deformace je provázena poklesem napětí a vznikem krčku na měrné části tyče. V praxi se na základě průběhu závislosti smluvní napětí - poměrná deformace vyhodnocují dvě napěťové materiálové charakteristiky, smluvní mez pevnosti a mez kluzu. [11]

2.2.5 Aritmetický průměr

Jeho hodnotu získáme ze vztahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

kde: x_i ...jednotlivé hodnoty proměnné

n ...rozsah výběrového souboru (počet hodnot proměnné)

2.2.6 Směrodatná odchylka

Je definovaná jako kladná odmocnina výběrového rozptylu.

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

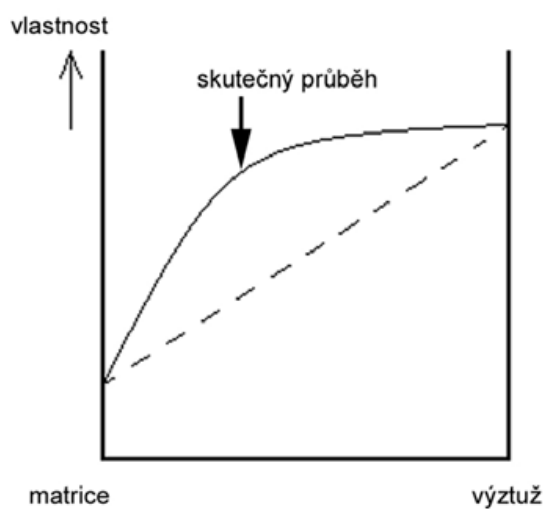
3 KOMPOZITY A JEJICH POUŽITÍ V PRŮMYSLU

3.1 Definice a základní přehled kompozitních materiálů

Pod pojmem **kompozitní materiály** rozumíme heterogenní materiály složené ze dvou nebo více fází, které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Obvykle je jedna fáze v kompozitu spojitá - takovou fázi nazýváme **matrice**. Fází, která je nespojitá, nazýváme **výztuž**. V porovnání s matricí má výztuž obvykle výrazně vyšší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd.) a hlavním cílem vyztužení je tedy zlepšení uvedených vlastností. Pro kompozitní materiály je dále charakteristické, že se vyrábějí mechanickým mísením jednotlivých složek. Tím se liší např. od slitin, které jsou rovněž heterogenní. U slitin však jednotlivé fáze vznikají fázovými přeměnami např. při tuhnutí a jsou tedy blízko termodynamické rovnováhy.

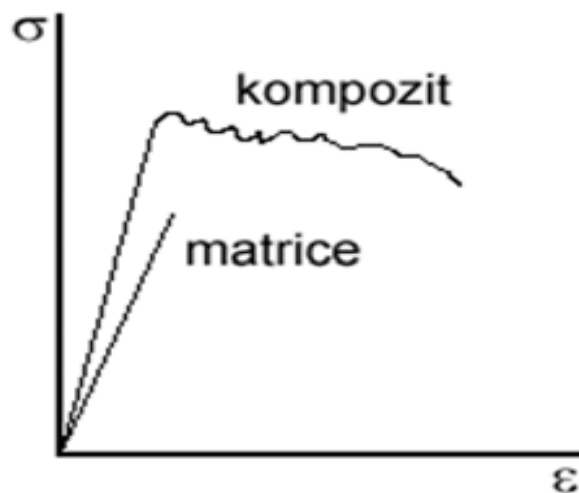
Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů jsou funkcí řady parametrů, z nichž nejdůležitější jsou následující:

- mechanické vlastnosti matrice a výztuže
- délka vláken výztuže
- soudržnost matrice a výztuže
- objemový podíl a uspořádání výztuže

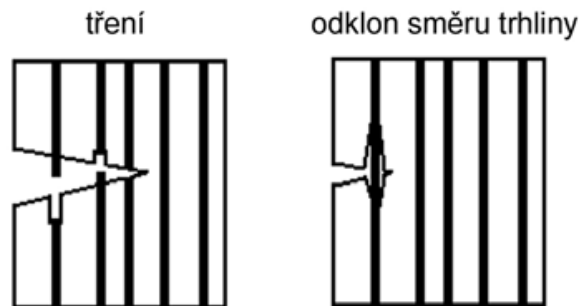


Obr. 12 Sinergické chování složek kompozitu [4]

Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou vyšší než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností. Typickým příkladem synergického chování je kompozit složený z keramické matrice vyztužené keramickými vlákny. I když jsou jak matrice, tak vlákna samostatně velmi křehké, výsledný kompozit je charakteristický určitou mírou houževnatosti, tzn. odolnosti proti náhlému křehkému porušení. Pro ilustraci jsou porovnány tahové diagramy křehké matrice a stejné matrice vyztužené křehkými vlákny. Uvedené chování kompozitu je způsobeno tím, že šířící se lomová trhlina je brzděna na rozhraní matrice a vláken. Dochází zde k odklánění směru šíření trhliny a také k intenzivnímu tření mezi matricí a vytahujícími se vlákny. Kvalita rozhraní mezi matricí a výtuhou má tedy zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu.



Obr. 13 Porovnání tahových diagramů křehké matrice a kompozitu složeného z této matrice a křehkých keramických vláken [4]



Obr. 14 Jevy na rozhraní matice a výztuhy [12]

Optimalizace vlastností, využití předností jednotlivých základních materiálů:

kovy: pevnost a houževnatost

keramika: pevnost a žáruvzdornost

polymery (plasty): houževnatost, korozivzdornost

Podle geometrického tvaru výztuže dělíme kompozity následujícím způsobem:

Částicové:

jeden rozměr útvarů výztuže nepřesahuje výrazně rozměry ostatní. Vyztužující částice pak mohou mít tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý i nepravidelný.

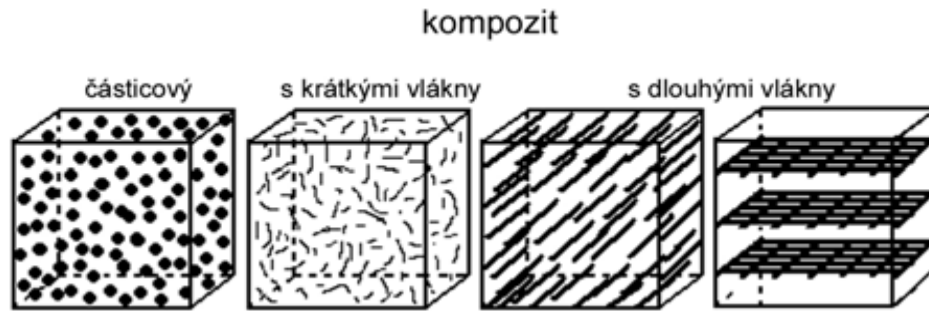
Vláknové:

výztuž je v jednom směru výrazně rozměrnější

s krátkými vlákny - délka vláken výrazně menší v porovnání s velikostí daného výrobku

s dlouhými vlákny - délka vláken srovnatelná s velikostí daného výrobku

Různá uspořádání kontinuálních vláken, např. v jednom směru nebo vzájemně spletena do rohoží (laminát).



Obr. 15 Rozdělení kompozitních materiálů [4]

Podle povahy matrice dělíme kompozity do těchto skupin:

- s kovovou maticí (metal matrix composites - MMCs)
- s polymerní maticí (polymer matrix composites - PMCs)
- s keramickou maticí (ceramic matrix composites - CMCs). [4]

3.2 Vláknové kompozity

Vlákno je délkový útvar, jehož délka mnohonásobně převyšuje ostatní rozměry, především pak průměr. K vyztužování kompozitních materiálů se nabízí široká škála vláken, kterou současný výzkum kompozitních materiálů neustále rozšiřuje. Největší pozornost je soustředěna na kombinaci tuhých a pevných vláken s plastovou maticí.

Vzniklý materiál disponuje vysokou tuhostí, pevností a houževnatostí spolu se zachováním nízké hmotnosti materiálu. [12]

3.2.1 Druhy vláken

Vlákna používané v kompozitech jsou:

- přírodní vlákna
- skleněná vlákna
- uhlíková, grafitová vlákna
- aramidová, silikonová vlákna

- keramická vlákna
- kovová vlákna. [12]

3.2.2 Orientace vláken

Délka a způsob uložení vláken má rozhodující vliv na vlastnosti kompozitního materiálu. Například anizotropie materiálu bude nejvýraznější při *jednosměrném uložení dlouhých vláken*. V případě *dvouosého uspořádání* bude anizotropie nižší. Naopak izotropní systém získáme při *nahodilé volbě uspořádání vláken*, a to za předpokladu přibližně stejného počtu vláken ve všech směrech. [12]

3.2.3 Produkty z vláken

V závislosti na metodě výroby kompozitního materiálu mohou být vlákna zformována do různých polotovarů. Primárně se vlákna druží do pramenů, které jsou výchozím bodem při následném zpracování na polotovary.

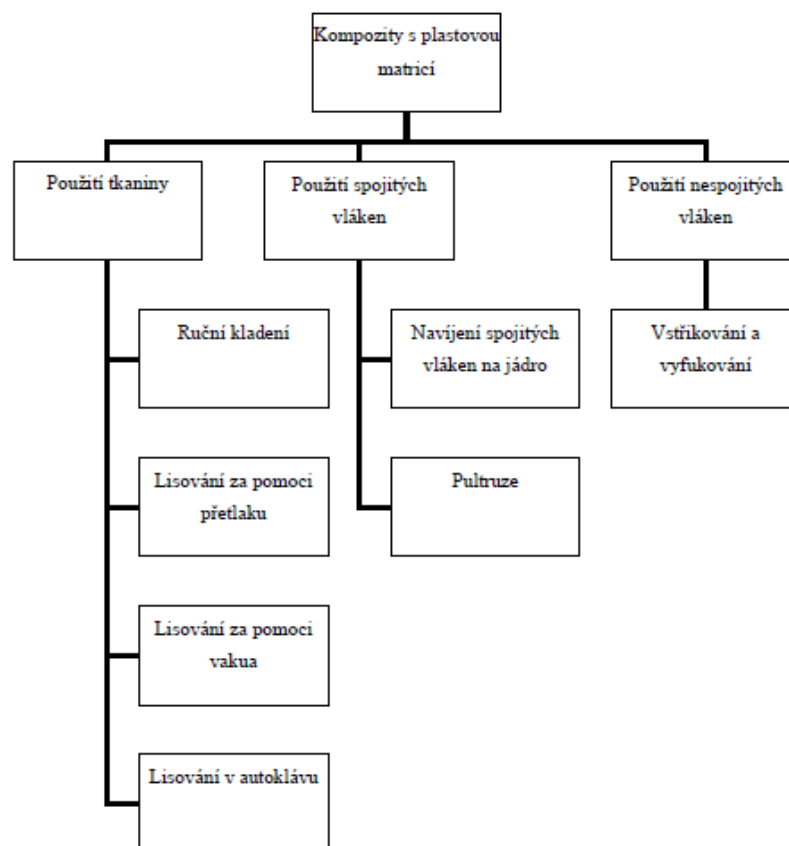
- *sekané prameny* – lisovací a vstřikovací směsi
- *mletá vlákna* – křehká vlákna, např. skleněná
- *rovingy* - metoda stříkání, pultruze či navíjení
- *prameny bez zákrutů*
- *příze*
- *pramencové tkaniny* – tkaniny vyrobené z pramenů
- *rovingové tkaniny* – tkaniny vyrobené z rovingových pramenů, využití při laminování, pultruzi, navíjení a při výrobě prepregů
- *tkaniny z příze*
- *rohože* – sekaná vlákna spojená polymerními lepidly
- *prepregy* – paralelně uspořádané rovingy, tkanina nebo rohož s polymerní matricí (reaktoplasty, termoplasty). [12]

3.3 Výroba kompozitů

Výroba kompozitů je velice rozsáhlou oblastí. Základní dělení všech technologií je možné provést podle formy. Je to jednak otevřená (jednodílná), jednak uzavřená forma.

Typ formy rozhoduje o odpařování reaktivního ředidla pryskyřice levných UP („Unsaturated Polyester“) a VE („Vinyl Ester“) pryskyřic. [22]

Nejznámější a nepoužívanější metody výroby kompozitů s polymerní matricí uvádí následující schéma. [12]



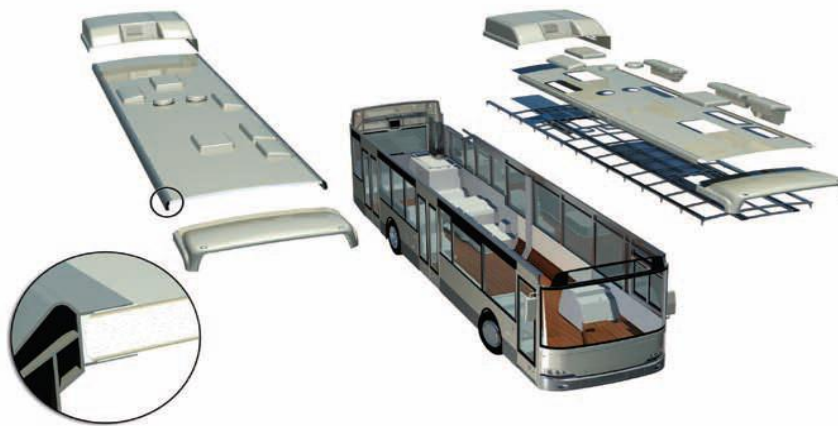
Obr. 16 Kompozity s plastovou matricí [12]

3.4 Použití kompozitů v dopravním průmyslu

Kompozitní materiály se používají téměř všude kolem nás. Uplatňují se např. ve sportu (hokejky, golfové hole, tenisové rakety, lyže, kola, rybářské pruty), v pozemní (části automobilů a autobusů), železniční (části vlaků), lodní i letecké dopravě (vrtule, lopatky turbín) a v kosmonautice (části raket a anténa Hubblova teleskopu). Příklady použití jsou uvedeny na následujících obrázcích.



Obr. 17 Použití kompozitů ve sportu [13]



Obr. 18 Použití kompozitů v pozemní dopravě [13]



Obr. 19 Použití kompozitů v železniční a lodní dopravě [13]



Obr. 20 Použití kompozitů v kosmonautice a letectví [13]

3.5 Použití lepených spojů v dopravním průmyslu

Díky inovacím v lepidlech jsou „lepená auta“ bezpečnější a úspornější než jejich předchůdci. Lepidla převzaly mnohé z funkcí tradičního svařování v automobilovém průmyslu. Moderní lepidla umožnila automobilové technice snížení bodového svařování o 50%. Dnes se asi 9% celkové roční výroby lepidel na celém světě používá v automobilovém průmyslu.

Dnes vůz obsahuje až 18kg lepidel, a to z dobrého důvodu, protože crash testy prokázaly, že „lepená auta“ jsou dělány lépe než „svařované konstrukce“. Důležitým faktorem je, že lepidla nemají vliv na základní materiály použité při montáži, zatímco jiné mechanické upevňovací techniky včetně svařování a nýtování mohou mít vliv na pevnost materiálu při montáži.

Automobiloví inženýři zjistili, že se energie nárazu přemění na deformační energii, čímž se stává neškodnou. V případě nehody se lepidla chovají jako „nárazník“ a „pád“ odolného lepidla může přispět k zajištění maximální ochrany cestujících.

Nicméně, zvýšená bezpečnost není jediným přínosem lepidel ve výrobě vozidel. Když jsou například přivařeny dveře, jsou pak pracně upravovány s cílem zajistit dobrý povrch. Lepené dveře už není nutné dále upravovat, což vede k nižším nákladům na výrobu.

Čelní sklo musí vydržet silné namáhání a vysoký výkon lepidla, aby nejen stále perfektně drželo na svém místě v rámu, ale také přispívá k tuhosti karoserie. V případě havárie čelní sklo podporuje airbag a významně přispívá k bezpečnosti cestujících. Tato lepidla zaručují dokonalé „držení“ ve všech extrémních povětrnostních podmínkách – vítr, déšť nebo krupobití, prudké letní teploty nebo krutý mráz v zimě. Přímou lepená přední a zadní skla dodají nižší odpor vzduchu a také poskytují další bonus v podobě snížené spotřeby paliva.

U moderních vozů výrobci používají řadu materiálů, včetně plechu, skla, gumy a plastů. Lepidla jsou ideálním řešením pro malé a střední podniky pro lepení těchto kompozitních materiálů.

Použití lepidel není omezeno pouze na automobilovou výrobu, ale je široce používáno v jiných vozidlech. Například typický železniční vůz postavený v letech 1981 až 1993 používal 10kg lepidla. Dnes některé moderní používají až 500kg lepidla, což je nárůst o 5000%! Zatímco moderní letadla jako je Airbus a Boeing pomocí lepidel spojují až 50% sestavy. [14]



Obr. 21 Lepený nárazník tramvaje [13]



Obr. 22 Lepení čelního skla [15]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo vypracovat literární studii na kompozity, problematiku jejich spojování a porovnání pevnosti lepených spojů. Byly použity kompozity, hliníkový a nerezový plech a tři druhy lepidel. Pevnost lepených spojů byla testována zkouškou pevnosti ve smyku a na pevnost lepeného spoje v odlupování na trhacím stroji Zwick 1456.

Zásady pro vypracování diplomové práce byly následující:

1. Kompozitní materiály, problematika jejich spojování.
2. Lepené spoje.
3. Návrh lepených spojů u konkrétní aplikace a jejich zdůvodnění.
4. Testování navržených lepených spojů dle vybraných norem.
5. Diskuse dosažených výsledků.

5 POŽADAVKY NA LEPENÉ SPOJE V DOPRAVNÍM PRŮMYSLU

Zadavatel požadoval, aby modul tramvaje odpovídal těmto požadavkům:

5.1.1 Pevnostní požadavky modulu

- čelní modul je samonosný
- musí řidiči poskytnout ochranu srovnatelnou s vozidly s čelními moduly tvořenými ocelovou oplechovanou kostrou nebo ocelovou kostrou obloženou laminátovými díly
- sloupky musí bez trvalých deformací odolat zatížení silou 40kN, působící podélně nebo příčně ve výšce 1000mm nad temenem koleje a zatížení silou 78kN, působící podélně nebo příčně v horní rovině spodku skříně
- čelní modul musí odolat síle, vzniklé jako důsledek zvedání vozu za střed spodní části čela o síle 40kN

5.1.2 Parametry procesu lepení modulu

Pro vhodný výběr lepidel se vycházelo ze skutečností:

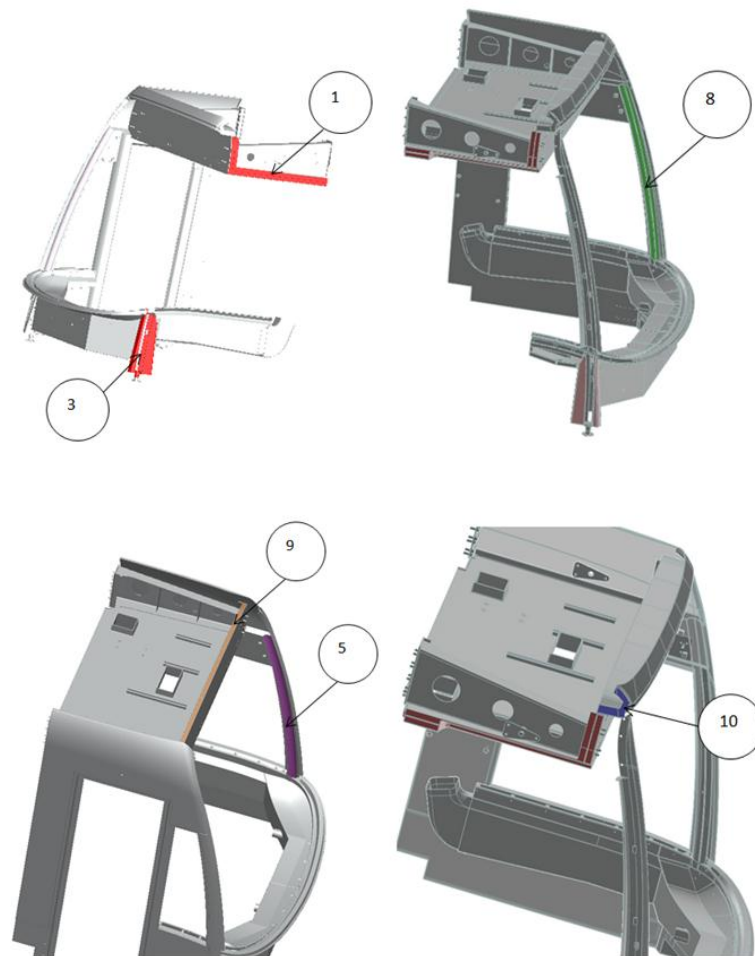
- bude se jednat o malosériovou výrobu
- z velikosti lepených součástí
- velikosti lepených ploch a spár
- materiál lepených součástí (kompozit, nerezový plech)
- doba pro zhotovení spoje (15 – 30minut)
- doba vytvrzení lepidla (omezený manipulační prostor)
- pevnostní požadavky na spoj

Na základě těchto požadavků byly vybrány tři typy lepidel s dobrými mechanickými vlastnostmi. Jedná se o metakrylátové konstrukční lepidlo Weld On SG 300 a polyuretanová lepidla s dobrou tažností Sikaflex 553 2K a Sikaflex 552.

Na (Obr. 23) jsou zobrazeny detaily lepených spojů. Čelní modul vozu je spojen pružným lepidlem po obvodu dílů. Pružný spoj pomáhá přenášet silové účinky v místě sloupků ve vodorovné rovině.

Pevnostní spoje jsou provedeny mezi bočním panelem a střechou, bočním panelem a střešníkem a bočním panelem a konzolou.

Sekundární typy spojů jsou provedeny pružným lepidlem mezi konzolou a obkladem sloupku a mezi střechou a horním spoilerem, jak uvádí (Tab. 1).



Obr. 23 Detaily lepených spojů na modulu tramvaje

V následující tabulce jsou shrnuty typy spojů u daného modulu tramvaje. S ohledem na typ spoje je popsáno i místo vzájemného spojení dílů a spotřeba lepidla na daný spoj.

Tab .1 Tabulka lepených spojů

Spoj	Konstrukce	Plocha spoje [cm ²]	Spára [mm]	Spoj	Typ spoje	Lepidlo	Spotřeba [l]	Aplikace	Otevřený čas [min]
1	Boční panel (3)/střecha (2)	1614	6	laminát	pevnostní	Weld On	0,97	apl. pistole	5-40
2	Boční panel (4)/střecha (2)	1614	6	laminát	pevnostní	Weld On	0,97	apl. pistole	5-40
3	Boční panel (3)/konzola čelníku (1)	548	3	laminát	pevnostní	Sikaflex	0,16	apl. pistole	15-30
4	Boční panel (4)/konzola čelníku (1)	548	3	laminát	pevnostní	Sikaflex	0,16	apl. pistole	15-30
5	Boční panel (3)/konzola (5)	2083	5	laminát	pevnostní	Sikaflex	1,04	apl. pistole	15-30
6	Boční panel (4)/konzola (6)	2083	5	laminát	pevnostní	Sikaflex	1,04	apl. pistole	15-30
7	konzola (5)/ Obklad sloupku	1334	5	laminát	sekundární	Weld On	0,67	apl. pistole	5-40
8	konzola (5)/ Obklad sloupku	1334	5	laminát	sekundární	Weld On	0,67	apl. pistole	5-40
9	střecha (2)/ horní spoiler	681	3	laminát	pevnostní	Weld On	0,20	apl. pistole	5-40
10	Boční panel (3)/ horní spoiler	121	3	laminát	pevnostní	Weld On	0,04	apl. pistole	5-40

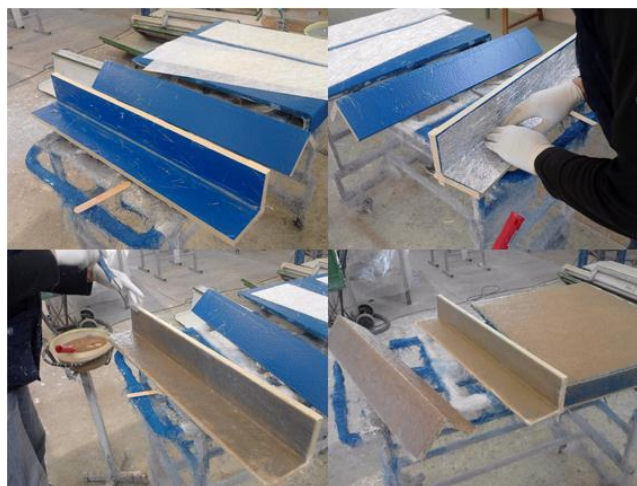
5.2 Výroba kompozitových vzorků

Zkušební vzorky byly vyrobeny ve výrobní hale firmy Form s.r.o.

Před slepením byly všechny vzorky obroušeny brusným papírem zrnitosti 80, očištěny Sika Cleanerem 205 a byl nanesen Sika Primer 206 G+P. Lepidla se nanášela aplikační pistolí.

Tab. 2 Složení kompozitu pro výrobu vzorků [16]

Gelcoat	Rohož vrstva / gramáž	Rohož vrstva / gramáž	Pryskyřice
Norpol NGA HX3	1x300g/m ²	3x450g/m ²	Norpol 850-M850



Obr. 24 Výroba zkušebních vzorků

5.3 Použité tkaniny a pryskyřice

5.3.1 Chopped Strand Mats M123

Chopped Strand Mats M123 je rohož vyrobená ze skleněných vláken střední délky. Je vyrobena z E-skla a má dobré elektrické a mechanické vlastnosti. Byla použita gramáž 300g/m² i 450g/m². Technický list viz. příloha.

5.3.2 Norpol NGA HX3

Norpol NGA HX3 je gelcoat s retardérem hoření na bázi polyesterové pryskyřice. Doporučená tloušťka mokrého filmu je 0,55 – 0,85mm. Hustota je 1,3 – 1,5g/cm³. Čas zgelovatění je 10 – 25minut. Technický list viz. příloha.

5.3.3 Norpol 850-M850

Norpol 850-M850 je polyesterová pryskyřice pro ruční laminaci a stříkání. Obsahuje retardéry hoření. Bod vzplanutí je 34 °C a čas zgelovatění je 40 – 50minut. Pevnost v tahu je 55MPa. Technický list viz. příloha.

5.4 Použitá lepidla, čisticí prostředky a primery

5.4.1 Weld On SG300

Weld On SG300 je dvoukomponentní metakrylátové lepidlo černé nebo bílé barvy pro lepení kovů, kompozitů a plastů. Má podobnou chemickou strukturu jako polyestery. Proto je všeobecně vhodný pro lepení polyesterů. Volné radikály lepidla reagují se zbytkovým množstvím volných radikálů polyesteru. Praktické zkušenosti s tímto lepidlem potvrzují téměř většinou kohezní poruchy adherendů. Pevnost v tahu 14 – 15MPa. Aplikační čas 5 – 40minut. Pracovní teplota -40 až +82 °C. Lepidlo se nanáší pistolí. Technický list viz. příloha.

5.4.2 Sikaflex 553 2K

Sikaflex 553 2K je dvoukomponentní polyuretanové montážní lepidlo a tmel bílé barvy. Vyznačuje se velmi dobrou tažností. Vhodné pro dynamicky zatěžované konstrukční a montážní spoje. Má dobrou zabíhavost do spár. Vytvrzuje se vzdušnou vlhkostí v trvalý

elastomer. Pevnost v tahu cca 2,6MPa. Aplikační čas 15 – 30minut. Pracovní teplota -45 až +90 °C. Lepidlo se nanáší pistolí. Technický list viz. příloha.

5.4.3 Sikaflex 552

Sikaflex 552 je konstrukční polyuretanové lepidlo bílé nebo černé barvy. Vhodné pro strukturální spoje namáhané dynamickým zatížením. Vytvrzuje se vzdušnou vlhkostí v trvalý elastomer. Pevnost v tahu je cca 2MPa. Aplikační čas do 40minut. Pracovní teplota -40 až +90 °C. Lepidlo se nanáší pistolí. Technický list viz. příloha.

5.4.4 Sika Cleaner 205

Sika Cleaner 205 je prostředek na bázi alkoholu, který se používá pro čištění a aktivaci lepených ploch adherendu před lepením nebo tmelením jednokomponentními polyuretanovými lepidly Sikaflex. Aplikuje se na neporézní materiály, jako jsou kovy, plasty, lakované povrchy atd. Technický list viz. příloha.

5.4.5 Sika Primer 206 G+P

Sika Primer 206 G+P je základový roztok s černými pigmenty, který vytvrzuje reakcí se vzdušnou vlhkostí. Tento prostředek se používá pro přípravu povrchu k lepení skel a některých kovů a plastů před aplikací polyuretanových lepidel. Technický list viz. příloha.

5.5 Nerezový plech

Pro potřebu zkoušek byl použit nerezový plech materiálové třídy 1.4301, šířky 30mm a tloušťky 3mm. Tento materiál byl dodán výrobcem, protože z něj vyrábí konstrukce vozidel.

Vlastnosti nerezového plechu jsou uvedeny v (Tab. 3). Rozměry vzorků byly použity podle potřebných norem pro smykovou pevnost a pevnost v odlupování podle Wintera. [16]

Tab. 3 Vlastnosti nerezového plechu [16]

Označení materiálu dle DIN	ČSN	Chemické složení v %										Mechanické vlastnosti	
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Mez 0,2% (MPa)	Pevnost v tahu (MPa)	
1.4301	17240	0,1	1	2	0,05	0,03	15-20	0	8-19	4	230-260	540-750	

5.6 Hliníkový plech

Pro potřebu zkoušek byla použita hliníková slitina EN AW 6060 T6. Rozměry vzorků byly použity podle potřebných norem pro smykovou pevnost a pevnost v odlupování podle Wintera. [16]

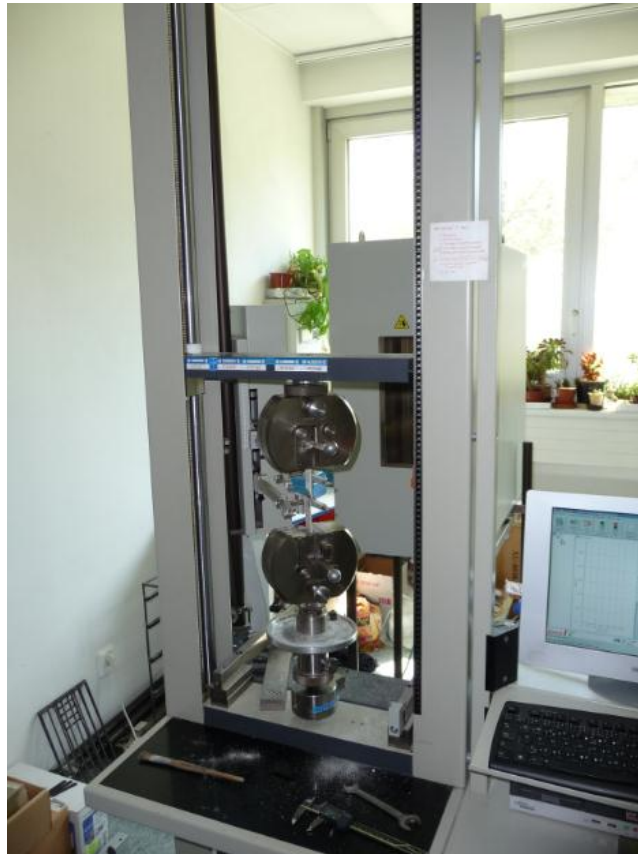
Tab. 4 Vlastnosti hliníkové slitiny EN AW 6060 T6 [16]

Slitina	Stav	Pevnost v tahu Rm (MPa)	Mez kluzu 0,2% Rp (MPa)	Tvrdość podle Brinela
EN AW 6060	T6	190	150	60

6 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A PŘÍSTROJE PRO LABORATORNÍ ZKOUŠKY

Pro měření mechanických vlastností byly použity tyto zařízení a přístroje:

- univerzální zkušební stroj ZWICK 1465 s připojeným extenzometrem
- posuvné digitální měřidlo Mitutoyo



Obr. 25 Univerzální zkušební stroj ZWICK 1465

Tab. 5 Technické údaje zkušebního stroje

Maximální posuv příčnicku	800mm/min
Snímače síly	2,5 až 20kN
Teplotní komora	-80/+250 °C
TestExpert software	Tah/Ohyb/Tlak

Při provádění zkoušek byla v laboratoři teplota 22 °C.

6.1 Zkouška smykové pevnosti

Pro tuto zkoušku byla použita tyto lepidla:

- Weld On (A)
- Sikaflex 553 2K (B)
- Sikaflex 552 (C)

Vzorky byly rozděleny do 6 skupin podle vzájemného spojení:

- 1 - kompozit (gelcoatová strana) – kompozit (gelcoatová strana)
- 2 - kompozit (rubová strana) – kompozit (rubová strana)
- 3 - hliníkový plech – kompozit (rubová strana)
- 4 - nerezový plech – kompozit (rubová strana)
- 5 - hliníkový plech – kompozit (gelcoatová strana)
- 6 - nerezový plech – kompozit (gelcoatová á strana)

Každá skupina se skládala z 5 kusů vzorků.



Obr. 26 Ukázka nalepených vzorků

6.1.1 Kompozit – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo A



Obr. 27 Vzorek 1A po zkoušce

Tab. 6 Hodnoty vzorků 1A

						series #1	$\bar{\sigma}_m$	E-Modul	Rm	ϵ
č.vzorku	1	2	3	4	5	n = 5	MPa	MPa	N	mm
$\bar{\sigma}_m$ (MPa)	28,72	18,99	20,23	20,94	17,91	\bar{x}	21,36	2302,53	2146,14	0,81
E (MPa)	2538,84	1875	2065,61	2667,8	2365,41	s	4,28	328,68	432,58	0,16
Rm (N)	2892,35	1912,4	2037,09	2092,36	1796,5	v	20,03	14,27	20,16	19,2

6.1.2 Kompozit – kompozit (rubová strana), lepidlo A



Obr. 28 Vzorek 2A po zkoušce

Tab. 7 Hodnoty vzorků 2A

						series #2	$\bar{\sigma}_m$	E-Modul	Rm	ϵ
č.vzorku	1	2	3	4	5	n = 5	MPa	MPa	N	mm
$\bar{\sigma}_m$ (MPa)	28,27	29,38	30,89	25,43	28,38	\bar{x}	28,47	2625,95	2802,16	0,94
E (MPa)	3093	2625,62	2054,52	2167,11	3189,5	s	2	517,88	203,46	0,17
Rm (N)	2836,23	2902,55	3016,49	2473,53	2781,98	v	7,02	19,72	7,26	18,45

6.1.3 Hliníkový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo A



Obr. 29 Vzorek 3A po zkoušce

Tab. 8 Hodnoty vzorků 3A

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #3	Rm	E-Modul	Rm	ε
Rm (MPa)	46,02	43,29	43,73	46,89	46,21	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	6972,31	6362,76	5377,79	5433,57	5480,48	\bar{x}	45,23	5925,38	3778,43	0,59
Rm (N)	3976,23	3545,93	3624	3931,12	3814,88	s	1,61	711,87	188,19	0,04
						v	3,56	12,01	4,98	6,65

6.1.4 Nerezový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo A



Obr. 30 Vzorek 4A po zkoušce

Tab. 9 Hodnoty vzorků 4A

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #4	Rm	E-Modul	Rm	ε
Rm (MPa)	50,45	54,43	51,7	47,94	54,12	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	4610,12	6230,99	5903,57	5430,35	6548,31	\bar{x}	51,73	5744,67	4328,6	0,77
Rm (N)	4230,13	4441,51	4218,6	4111,21	4641,55	s	2,69	757,23	211,98	0,1
						v	5,21	13,18	4,9	12,78

6.1.5 Hliníkový plech – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo A



Obr. 31 Vzorek 5A po zkoušce

Tab. 10 Hodnoty vzorků 5A

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #5	Rm	E-Modul	Rm	ε
Rm (MPa)	42,71	41,75	49,11	44,64	40,42	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	5509,36	8805,64	7659,06	7983,68	4783,07	\bar{x}	43,73	6948,16	3607,65	0,46
Rm (N)	3416,78	3473,94	4085,88	3685,45	3376,17	s	3,38	1716,52	292,68	0,06
						v	7,72	24,7	8,11	14,13

6.1.6 Nerezový plech – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo A



Obr. 32 Vzorek 6A po zkoušce

Tab. 11 Hodnoty vzorků 6A

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #6	Rm	E-Modul	Rm	ε
Rm (MPa)	52,52	54,9	41,61	57,66	59,27	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	8072,52	6966,56	9344,24	8513,61	6768,43	\bar{x}	53,19	7933,07	4362,07	0,57
Rm (N)	4386,44	4585,52	3408,92	4650,1	4779,35	s	6,97	1076,84	551,38	0,08
						v	13,1	13,57	12,64	14,07

6.1.7 Kompozit – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo B

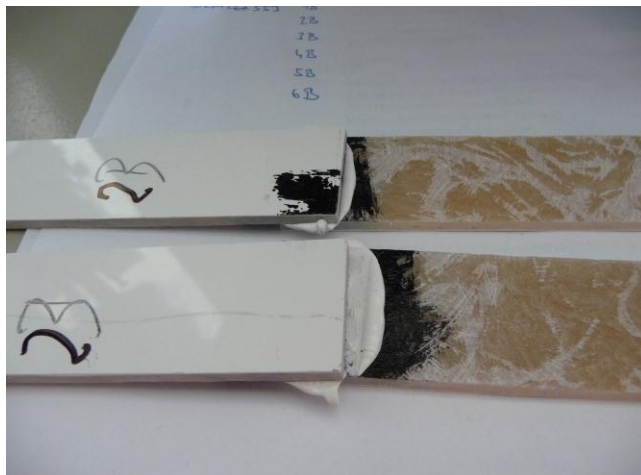


Obr. 33 Vzorek 1B po zkoušce

Tab. 12 Hodnoty vzorků 1B

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #7	$\bar{\sigma}_m$	E-Modul	Rm	ϵ
$\bar{\sigma}_m$ (MPa)	4,67	5,93	5,26	4,95	4,69	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	106,92	128,2	88,13	183,86	164,37	\bar{x}	5,1	134,3	420,11	4,14
Rm (N)	382,54	493,02	437,92	404	383,06	s	0,52	39,62	46,57	0,4
						v	10,19	29,5	11,09	9,64

6.1.8 Kompozit – kompozit (rubová strana), lepidlo B



Obr. 34 Vzorek 2B po zkoušce

Tab. 13 Hodnoty vzorků 2B

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #8	$\bar{\sigma}_m$	E-Modul	Rm	ϵ
$\bar{\sigma}_m$ (MPa)	4,56	4,82	5,58	5,78	5,06	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	161,62	146,58	151,1	170,86	152,07	\bar{x}	5,16	156,45	431,71	3,82
Rm (N)	389,99	411,59	477,02	463,94	416,01	s	0,51	9,74	37,02	0,47
						v	9,89	6,23	8,58	12,34

6.1.9 Hliníkový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo B



Obr. 35 Vzorek 3B po zkoušce

Tab. 14 Hodnoty vzorků 3B

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #9	Rm	E-Modul	Rm	ε
Rm (MPa)	4,79	6,2	5,39	6,7	5,78	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	153,74	124,45	208,35	166,67	140,4	\bar{x}	5,77	158,72	475,89	3,68
Rm (N)	393,73	510,28	453,43	548,73	473,28	s	0,74	31,86	58,63	0,55
						v	12,74	20,07	12,32	14,9

6.1.10 Nerezový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo B



Obr. 36 Vzorek 4B po zkoušce

Tab. 15 Hodnoty vzorků 4B

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #10	Rm	E-Modul	Rm	ε
Rm (MPa)	5,63	6,09	5,67	5,56	4,49	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	168,02	206,91	198,39	225,41	250,7	\bar{x}	5,49	209,89	455,15	3,24
Rm (N)	460,85	510,25	490,24	448,28	366,13	s	0,6	30,83	55,39	0,3
						v	10,85	14,69	12,17	9,39

6.1.11 Hliníkový plech – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo B



Obr. 37 Vzorek 5B po zkoušce

Tab. 16 Hodnoty vzorků 5B

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #11	Rm	E-Modul	Rm	ε
Rm (MPa)	6,69	5,96	6,12	6,5	8,37	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	162,3	154,96	149,74	161,82	174,03	\bar{x}	6,73	160,57	564,63	3,34
Rm (N)	558,66	509,19	493,19	557,32	704,8	s	0,97	9,14	83,54	0,37
						v	14,35	5,69	14,8	10,94

6.1.12 Nerezový plech – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo B

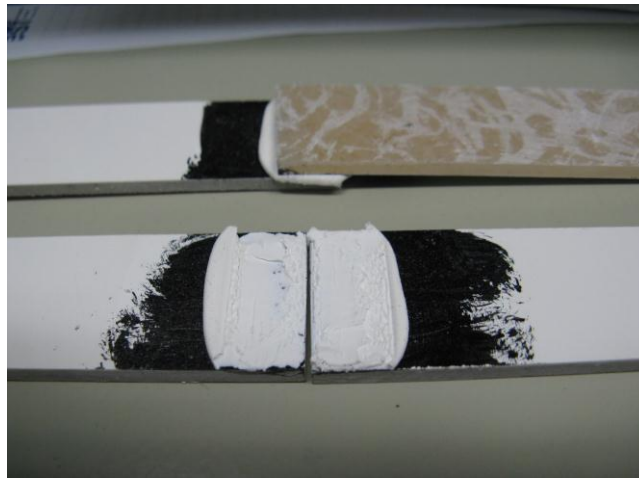


Obr. 38 Vzorek 6B po zkoušce

Tab. 17 Hodnoty vzorků 6B

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #12	Rm	E-Modul	Rm	ε
Rm (MPa)	5,65	5,79	6,33	5,88	6,39	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	204,8	214,44	153,83	138,3	161,75	\bar{x}	6,01	174,63	517,24	3,22
Rm (N)	486,46	498,2	544,86	506,51	550,18	s	0,33	33,22	28,6	0,43
						v	5,53	19,02	5,53	13,35

6.1.13 Kompozit – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo C



Obr. 39 Vzorek 1C po zkoušce

Tab. 18 Hodnoty vzorků 1C

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #15	$\bar{\sigma}_m$	E-Modul	Rm	ϵ
$\bar{\sigma}_m$ (MPa)	7,51	8,78	8,51	8,85	8,62	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	195,86	241,41	243,78	220,42	245,03	\bar{x}	8,45	229,3	724,92	6,42
Rm (N)	732,69	730,52	707,9	736,26	717,24	s	0,55	21,22	11,93	0,3
						v	6,45	9,25	1,65	4,71

6.1.14 Kompozit – kompozit (rubová strana), lepidlo C



Obr. 40 Vzorek 2C po zkoušce

Tab. 19 Hodnoty vzorků 2C

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #16	$\bar{\sigma}_m$	E-Modul	Rm	ϵ
$\bar{\sigma}_m$ (MPa)	8,74	6,76	7,87	8,91	7,7	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	283,57	183,03	127,6	217,82	180,12	\bar{x}	8	198,43	665,21	7,21
Rm (N)	727,3	562,09	654,68	741,72	640,26	s	0,87	57,48	72,59	1,46
						v	10,91	28,97	10,91	20,27

6.1.15 Hliníkový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo C



Obr. 41 Vzorek 3C po zkoušce

Tab. 20 Hodnoty vzorků 3C

						series #17	Rm	E-Modul	Rm	ε
č.vzorku	1	2	3	4	5	n = 5	MPa	MPa	N	mm
Rm (MPa)	8,72	7,87	9,31	8,74	9,12	\bar{x}	8,75	297,85	728,24	5,69
E (MPa)	252,67	266,13	251,76	274,35	444,33	s	0,55	82,43	45,91	0,49
Rm (N)	725,79	655,06	774,37	727,09	758,92	v	6,3	27,68	6,3	8,56

6.1.16 Nerezový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo C

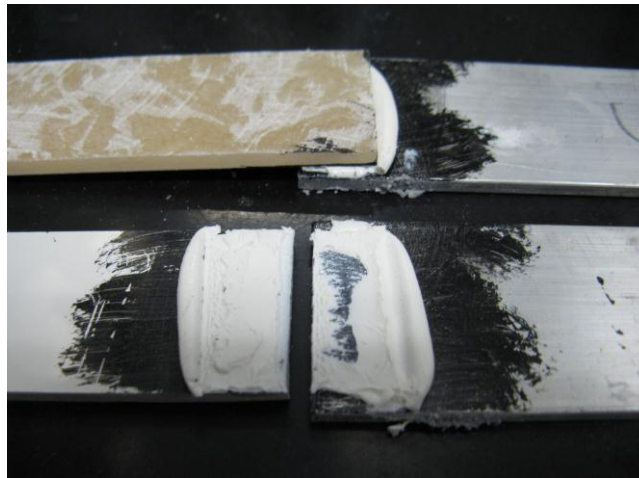


Obr. 42 Vzorek 4C po zkoušce

Tab. 21 Hodnoty vzorků 4C

						series #18	Rm	E-Modul	Rm	ε
č.vzorku	1	2	3	4	5	n = 5	MPa	MPa	N	mm
Rm (MPa)	10,09	9,58	8,88	9,01	9,95	\bar{x}	9,5	292,15	790,51	4,83
E (MPa)	297,26	297,22	249,65	274,58	342,03	s	0,54	34,11	45,3	0,44
Rm (N)	839,15	797,09	738,73	749,34	828,23	v	5,73	11,68	5,73	9,21

6.1.17 Hliníkový plech – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo C

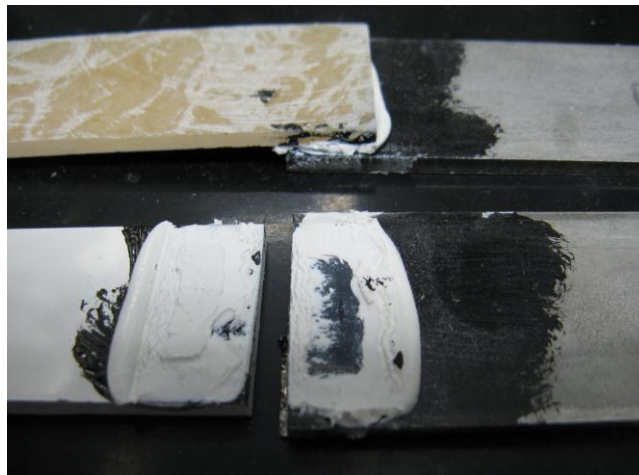


Obr. 43 Vzorek 5C po zkoušce

Tab. 22 Hodnoty vzorků 5C

						series #19	Rm	E-Modul	Rm	ε
č.vzorku	1	2	3	4	5	n = 5	MPa	MPa	N	mm
Rm (MPa)	7,93	8,58	8	8,7	8,18	\bar{x}	8,28	263,59	688,76	5,68
E (MPa)	216,96	280,01	249	270,36	301,63	s	0,34	32,21	28,66	0,5
Rm (N)	660,01	714,08	665,4	723,52	680,78	v	4,16	12,22	4,16	8,74

6.1.18 Nerezový plech – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo C

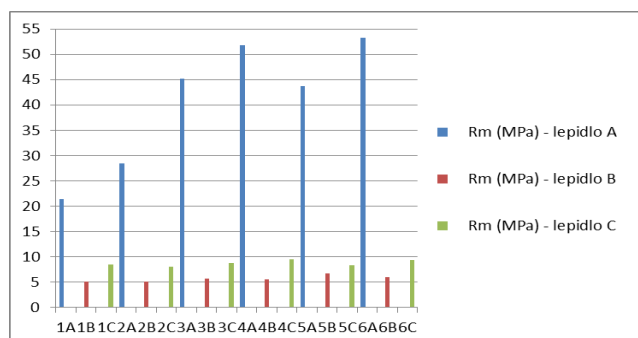


Obr. 44 Vzorek 6C po zkoušce

Tab. 23 Hodnoty vzorků 6C

						series #20	Rm	E-Modul	Rm	ε
č.vzorku	1	2	3	4	5	n = 5	MPa	MPa	N	mm
Rm (MPa)	8,98	10,03	9,37	9,12	9,07	\bar{x}	9,32	309,77	775,04	4,66
E (MPa)	268,5	345,84	290,31	310,59	333,6	s	0,43	31,43	35,55	0,49
Rm (N)	747,42	834,86	779,83	758,44	754,66	v	4,59	10,15	4,59	10,54

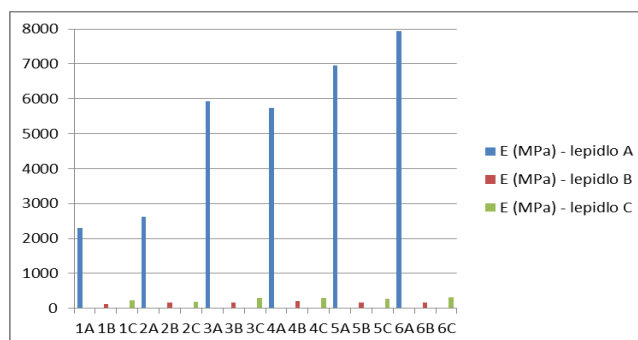
6.1.19 Porovnání lepidel použitých při smykové zkoušce



Obr. 45 Porovnání hodnot $R_m(\text{MPa})$ lepidel A, B, C

Tab. 24 Naměřené hodnoty $R_m(\text{MPa})$ lepidel A, B, C

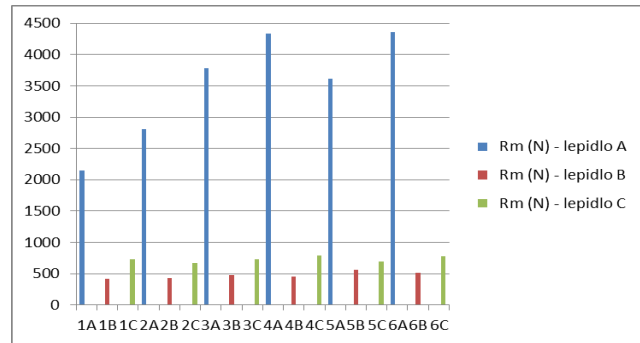
série č.	1	2	3	4	5	6
Rm (MPa) - lepidlo A	21,36	28,47	45,23	51,73	43,73	53,19
Rm (MPa) - lepidlo B	5,1	5,16	5,77	5,49	6,73	6,01
Rm (MPa) - lepidlo C	8,45	8	8,75	9,5	8,28	9,32



Obr. 46 Porovnání hodnot $E(\text{MPa})$ lepidel A, B, C

Tab. 25 Naměřené hodnoty $E(\text{MPa})$ lepidel A, B, C

série č.	1	2	3	4	5	6
E (MPa) - lepidlo A	2302,53	2625,95	5925,38	5744,67	6948,16	7933,07
E (MPa) - lepidlo B	134,3	156,45	158,72	209,89	160,57	174,63
E (MPa) - lepidlo C	229,3	198,43	297,85	292,15	263,59	309,77

Obr. 47 Porovnání hodnot $Rm(N)$ lepidel A, B, CTab. 26 Naměřené hodnoty $Rm(N)$ lepidel A, B, C

série č.	1	2	3	4	5	6
Rm (N) - lepidlo A	2146,14	2802,16	3778,43	4328,6	3607,65	4362,07
Rm (N) - lepidlo B	420,11	431,71	475,89	455,15	564,63	517,24
Rm (N) - lepidlo C	724,92	665,21	728,24	790,51	688,76	775,04

6.2 Zkouška v odlupování

Pro tuto zkoušku byla použita tyto lepidla:

- Weld On (A)
- Sikaflex 552 (C)

Vzorky byly rozděleny do 4 skupin podle vzájemného spojení:

- 1 - kompozit (gelcoatová strana) – kompozit (gelcoatová strana)
- 2 - kompozit (rubová strana) – kompozit (rubová strana)
- 3 - hliníkový plech – kompozit (rubová strana)
- 4 - nerezový plech – kompozit (rubová strana)

Každá skupina se skládala z 5 kusů vzorků.

6.2.1 Kompozit – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo A



Obr. 48 Vzorek 1A po zkoušce

Tab. 27 Hodnoty vzorků 1A

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #1	$\bar{\sigma}_m$	E-Modul	Rm	ϵ
$\bar{\sigma}_m$ (MPa)	198,2	211,13	204,37	186,25	177,55	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	54100,03	59625,82	59883,29	43643,19	45477,08	\bar{x}	195,5	52545,88	2228,7	0,77
Rm (N)	2259,44	2406,88	2329,78	2123,26	2024,11	s	13,58	7674,7	154,83	0,83
						v	6,95	14,61	6,95	108,87

6.2.2 Kompozit – kompozit (rubová strana), lepidlo A



Obr. 49 Vzorek 2A po zkoušce

Tab. 28 Hodnoty vzorků 2A

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #2	$\bar{\sigma}_m$	E-Modul	Rm	ϵ
$\bar{\sigma}_m$ (MPa)	116,16	89,57	127,22	75,24	134,96	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	9023,45	10675,16	14532,67	8013,15	11376,8	\bar{x}	108,63	10724,25	10724,25	2,03
Rm (N)	1324,21	1021,09	1450,34	857,75	1538,53	s	25,37	2508,74	2508,74	1,25
						v	23,35	23,39	23,39	61,36

6.2.3 Hliníkový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo A



Obr. 50 Vzorek 3A po zkoušce

Tab. 29 Hodnoty vzorků 3A

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #3	Rm	E-Modul	Rm	ε
Rm (MPa)	138,57	144,87	123,67	170,25	160,43	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	25301,18	22473,55	29030,71	27729,82	34012,96	\bar{x}	147,56	27709,64	1682,13	0,55
Rm (N)	1579,69	1651,47	1409,83	1940,8	1828,85	s	18,3	4321,31	208,58	0,2
						v	12,4	15,59	12,4	35,84

6.2.4 Nerezový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo A

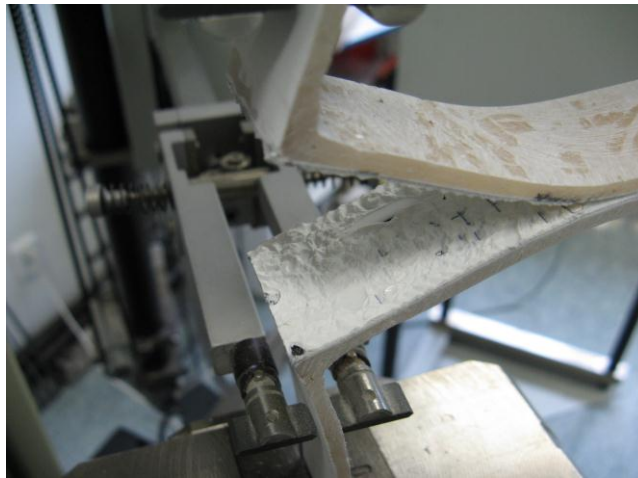


Obr. 51 Vzorek 4A po zkoušce

Tab. 30 Hodnoty vzorků 4A

č.vzorku	1	2	3	4	5	series #4	Rm	E-Modul	Rm	ε
Rm (MPa)	164,89	164,54	178,97	141,76	122,28	n = 5	MPa	MPa	N	mm
E (MPa)	19648,92	20815,81	34568,55	39034,35	33083,96	\bar{x}	154,49	29430,32	1761,15	0,81
Rm (N)	1879,73	1875,81	2040,25	1616,01	1393,97	s	22,41	8687,25	255,44	0,54
						v	14,5	29,52	14,5	66,36

6.2.5 Kompozit – kompozit (gelcoatová strana), lepidlo C



Obr. 52 Vzorek 1C po zkoušce

Tab. 31 Hodnoty vzorků 1C

						series #21	$\bar{\sigma}_m$	E-Modul	Rm	ϵ
č.vzorku	1	2	3	4	5	n = 5	MPa	MPa	N	mm
$\bar{\sigma}_m$ (MPa)	9,32	9,44	8,1	9,38	9,52	\bar{x}	9,15	882,36	878,67	21,41
E (MPa)	1085,06	937,48	593,6	878,94	916,74	s	0,59	179,37	56,78	9,25
Rm (N)	894,25	906,61	777,97	900,3	914,24	v	6,46	20,33	6,46	43,18

6.2.6 Kompozit – kompozit (rubová strana), lepidlo C



Obr. 53 Vzorek 2C po zkoušce

Tab. 32 Hodnoty vzorků 2C

						series #22	$\bar{\sigma}_m$	E-Modul	Rm	ϵ
č.vzorku	1	2	3	4	5	n = 5	MPa	MPa	N	mm
$\bar{\sigma}_m$ (MPa)	6,06	7,49	5,49	6,98	6,97	\bar{x}	6,6	444,36	633,19	35,17
E (MPa)	459,85	490,73	339,04	360,12	572,04	s	0,81	96,02	77,39	9,8
Rm (N)	581,42	718,82	526,82	669,64	669,27	v	12,22	21,61	12,22	27,85

U všech vzorků série nastal kohezní lom, pouze u 3. vzorku nastal lom adhezní (Obr.54). S největší pravděpodobností se jedná o vadu kompozitu, která mohla být způsobena vzduchovou bublinou mezi vrstvami rohoží.



Obr. 54 3.vzorek série 2C po zkoušce

6.2.7 Hliníkový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo C



Obr. 55 Vzorek 3C po zkoušce

Tab. 33 Hodnoty vzorků 3C

						series #23	Rm	E-Modul	Rm
č.vzorku	1	2	3	4	5	n = 5	MPa	MPa	N
Rm (MPa)	8,74	8,99	9,03	7,72	8,56	\bar{x}	8,61	749,88	826,12
E (MPa)	689,49	621,36	860,75	777,7	800,12	s	0,53	94,54	51,03
Rm (N)	838,63	862,6	866,48	740,78	822,12	v	6,18	12,61	6,18

6.2.8 Nerezový plech – kompozit (rubová strana), lepidlo C

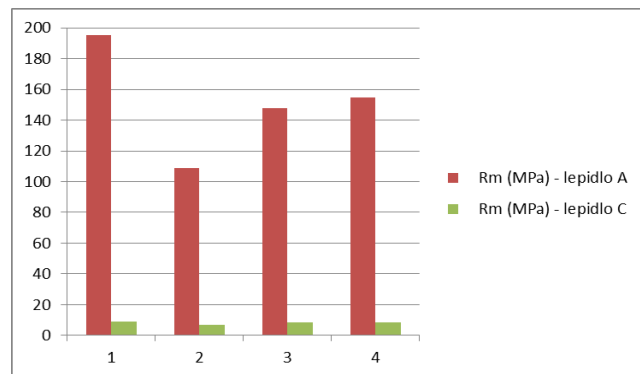


Obr. 56 Vzorek 4C po zkoušce

Tab. 34 Hodnoty vzorků 4C

	1	2	3	4	5	series #24 n = 5	Rm MPa	E-Modul MPa	Rm N
č.vzorku	1	2	3	4	5	n = 5	8,25	617,16	791,62
Rm (MPa)	9	8,15	7,95	8,39	7,73	\bar{x}	8,25	617,16	791,62
E (MPa)	719,62	453,19	813,49	658,31	441,21	s	0,49	164,76	46,69
Rm (N)	863,97	782,15	763,61	805,81	742,53	v	5,9	26,7	5,9

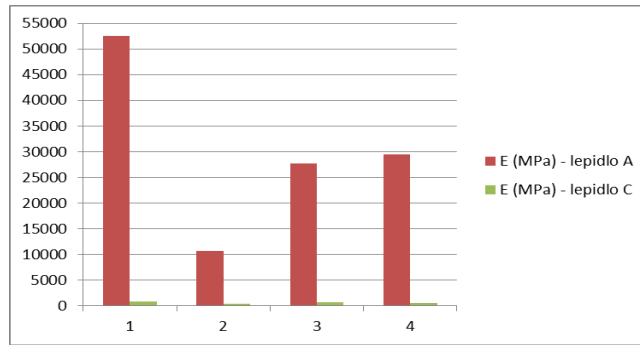
6.2.9 Porovnání lepidel použitých při zkoušce v odlupování



Obr. 57 Porovnání hodnot Rm (MPa) lepidel A, C

Tab. 35 Naměřené hodnoty Rm (MPa) lepidel A, C

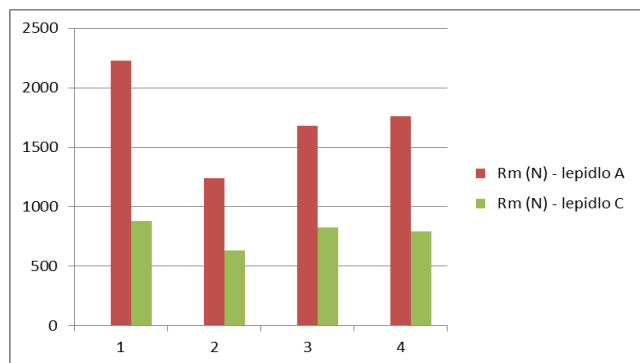
série č.	1	2	3	4
Rm (MPa) - lepidlo A	195,5	108,63	147,56	154,49
Rm (MPa) - lepidlo C	9,15	6,6	8,61	8,25



Obr. 58 Porovnání hodnot E (MPa) lepidel A, C

Tab. 36 Naměřené hodnoty E (MPa) lepidel A, C

série č.	1	2	3	4
E (MPa) - lepidlo A	52545,88	10724,25	27709,64	29430,32
E (MPa) - lepidlo C	882,36	444,36	749,88	617,16



Obr. 59 Porovnání hodnot R_m (N) lepidel A, C

Tab. 37 Naměřené hodnoty R_m (N) lepidel A, C

série č.	1	2	3	4
Rm (N) - lepidlo A	2228,7	1238,38	1682,13	1761,15
Rm (N) - lepidlo C	878,67	633,19	826,12	791,62

7 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Ke zkouškám smykové pevnosti a pevnosti v odlupování byly na základě požadavků vybrány tři druhy lepidel. Jsou to tyto: Weld On GS 300 (lepidlo A), Sikaflex 553 2K (lepidlo B) a Sikaflex 552 (lepidlo C). Při zkouškách nás zajímaly hodnoty smykového napětí R_m (MPa), modulu pružnosti E (MPa) a síly R_m (N), při které se poruší lepený spoj.

7.1 Smyková zkouška

U lepidla A při všech zkouškách vznikla kohezní porucha spoje. Je to dáno tím, že lepidlo je metakrylátové a nevytváří pružný lepený spoj. Zatímco u lepidel B a C při všech zkouškách vznikly poruchy adhezní a to proto, že lepidla jsou polyuretanové a jejich spoj je pružný.

7.1.1 Lepidlo A

Při porovnání hodnot smykového napětí byla nejlepší kombinace materiálů 6A - nerezový plech-kompozit (gelcoatová strana) s hodnotou 53,19 MPa, která je o 249% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 1A - kompozit-kompozit (gelcoatová strana).

Při porovnání hodnot modulu pružnosti byla nejlepší kombinace materiálů 5A - hliníkový plech-kompozit (gelcoatová strana) s hodnotou 7933,07 MPa, která je o 345% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 1A.

Při porovnání hodnot síly potřebné k porušení spoje byla nejlepší kombinace materiálů 6A s hodnotou 4362,07 N, která je o 203% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 1A.

7.1.2 Lepidlo B

Při porovnání hodnot smykového napětí byla nejlepší kombinace materiálů 5B - nerezový plech-kompozit (gelcoatová strana) s hodnotou 6,73 MPa, která je o 132% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 1B - kompozit-kompozit (gelcoatová strana).

Při porovnání hodnot modulu pružnosti byla nejlepší kombinace materiálů 4B - nerezový plech-kompozit (rubová strana) s hodnotou 209,89 MPa, která je o 156% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 1B.

Při porovnání hodnot síly potřebné k porušení spoje byla nejlepší kombinace materiálů 6B - kompozit-kompozit (rubová strana) s hodnotou 564,63 N, která je o 134% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 1B.

7.1.3 Lepidlo C

Při porovnání hodnot smykového napětí byla nejlepší kombinace materiálů 4C - nerezový plech-kompozit (rubová strana) s hodnotou 9,5 MPa, která je o 119% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 2C - kompozit-kompozit (rubová strana).

Při porovnání hodnot modulu pružnosti byla nejlepší kombinace materiálů 6C - nerezový plech-kompozit (gelcoatová strana) s hodnotou 309,77 MPa, která je o 156% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 2C.

Při porovnání hodnot síly potřebné k porušení spoje byla nejlepší kombinace materiálů 4C s hodnotou 790,51 N, která je o 119% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 2C.

7.2 Zkouška v odlupování

Při zkoušce v odlupování se zkoušela pouze lepidla A a C. U lepidla A při všech zkouškách vznikla kohezní porucha spoje. Zatímco u lepidla C, kromě vzorku č.3, série č.22 (Obr.54), při všech zkouškách vznikly poruchy adhezní. Tato výjimka mohla vzniknout nedostatečným prosycením laminátové rohože (např. vzduchová bublina), což mohla zapříčinit separace jednotlivých vrstev lamin mezi sebou.

7.2.1 Lepidlo A

Při porovnání hodnot smykového napětí byla nejlepší kombinace materiálů 1A - kompozit-kompozit (gelcoatová strana) s hodnotou 195,5 MPa, která je o 180% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 2A - kompozit-kompozit (rubová strana).

Při porovnání hodnot modulu pružnosti byla nejlepší kombinace materiálů 1A s hodnotou 52545,88 MPa, která je o 490% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 2A.

Při porovnání hodnot síly potřebné k porušení spoje byla nejlepší kombinace materiálů 1A s hodnotou 2228,7 N, která je o 180% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 2A.

7.2.2 Lepidlo C

Při porovnání hodnot smykového napětí byla nejlepší kombinace materiálů 1C – kompozit-kompozit (gelcoatová strana) s hodnotou 9,15 MPa, která je o 139% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 2C – kompozit-kompozit (rubová strana).

Při porovnání hodnot modulu pružnosti byla nejlepší kombinace materiálů 1C s hodnotou 882,36 MPa, která je o 199% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 2C.

Při porovnání hodnot síly potřebné k porušení spoje byla nejlepší kombinace materiálů 1C s hodnotou 878,67 N, která je o 139% vyšší než nejnižší hodnota kombinace 2C.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá testováním lepených spojů. Součástí praktické části je volba vhodných typů lepidel podle požadavků zadavatele, výroba a příprava zkušebních vzorků a následné testování na smykovou pevnost a zkoušku v odlupování.

Zkoušky lepených spojů v kombinaci s hliníkovým plechem byly provedeny pouze pro porovnání s nerezovým plechem. Při výrobě modulu tramvaje výrobce používá pouze nerezový plech.

Při testování lepených spojů na smyk bez ohledu na typ lepidla pro nejvyšší smykovou pevnost nejlépe vyhovuje lepidlo A (Weld On GS 300) v kombinaci 6A – nerezový plech-kompozit (gelcoatová strana), pro nejvyšší modul pružnosti nejlépe vyhovuje lepidlo A v kombinaci 6A a pro nejvyšší sílu potřebnou k porušení spoje vyhovuje opět lepidlo A taktéž v kombinaci 6A.

Nejnižší smykovou pevnost mělo lepidlo B (Sikaflex 553 2K) v kombinaci 1B – kompozit-kompozit (gelcoatová strana), nejnižší modul pružnosti mělo opět lepidlo B v kombinaci 1B a nejnižší sílu potřebnou k porušení spoje mělo znovu lepidlo B a zase v kombinaci 1B.

Při testování lepených spojů na odlupování bez ohledu na typ lepidla pro nejvyšší smykovou pevnost nejlépe vyhovuje lepidlo A v kombinaci 1A – kompozit-kompozit (gelcoatová strana), pro nejvyšší modul pružnosti nejlépe vyhovuje lepidlo A v kombinaci 1A a pro nejvyšší sílu potřebnou k porušení spoje vyhovuje opět lepidlo A a znovu v kombinaci 1A.

Nejnižší smykovou pevnost mělo lepidlo C (Sikaflex 552) v kombinaci 2C – kompozit-kompozit (rubová strana), nejnižší modul pružnosti mělo lepidlo C v kombinaci 2C a nejnižší sílu potřebnou k porušení spoje mělo opět lepidlo C a znovu v kombinaci 2C.

Podle výsledků měření jednoznačně pro pevnostní spoje vyhovuje lepidlo A. pro sekundární pružné spoje vyhovuje lepidlo B.

Doporučuji pokračovat v dané problematice v únavových zkouškách a odolnosti lepených spojů (např. při cyklickém namáhání). Otestovat dané lepidla při zvýšené teplotě a při simulovaných klimatických podmínkách (např. solná lázeň). Dále by bylo vhodné odzkoušet lepidlo B v odlupování, aby porovnání mnou otestovaných vzorků mělo větší vypovídající hodnotu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Technologické vlastnosti sekundových lepidel* [online]. [cit. 2011-12-30]. Dostupný z WWW: <josef.posta.sweb.cz/KONF/Brozek.doc>
- [2] *Technologie lepení v automobilovém průmyslu* [online]. [cit. 2011-12-30]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/lepeni.pdf>
- [3] *Práce s lepidly* [online]. [cit. 2011-12-30]. Dostupný z WWW: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_prace_s_lepidly/>
- [4] Definice a základní rozdělení kompozitů [online]. [cit. 2011-12-30]. Dostupný z WWW: <<http://delta.fme.vutbr.cz/mikrotechnika/kompozityA4.pdf>>
- [5] *Lepidla – tmely* [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.oblibene.cz/lepidla/4852/lepeni-lepenie/>>
- [6] TESÁŘ, P.: *Technologie výroby dveří kolejových vozidel pomocí nových lepicích systémů*. Bakalářská práce, VUT Brno, 2009.
- [7] TRHOŇ, V. *Vliv povrchu na pevnost lepeného spoje*. Diplomová práce, VUT Brno, 2011
- [8] KOVAČIČ, L. *Lepenie kovov a plastov*. 2.vyd. Bratislava: ALFA, 1984, 400 s.
- [9] ČSN EN 1465. *Lepidla – stanovení smykové pevnosti v tahu tuhých adherendů na přeplátovaných tělesech*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 7s.
- [10] PETERKA, J. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1980, 792 s.
- [11] PTÁČEK, L a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2001, 505 s. ISBN 80-7204-193-2
- [12] ŠAFARÍKOVÁ, A.: *Výzkum trhu kompozitních materiálů v ČR*. Bakalářská práce, Liberec, 2010 [online]. [cit. 2011-12-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.kht.tul.cz/items/ABP/2010/%C5%A0afa%C5%99%C3%ADkov%C3%A1%20%20V%C3%BDzkum%20trhu%20kompozitn%C3%ADch%20materi%C3%A1l%C5%AF%20v%20%C4%8CR.pdf>>

- [13] *Studijní materiály* – doc. Rusnáková
- [14] *Adhesive in the automotive industry* [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupný z WWW:< <http://www.wolfgroupweb.com/mastersclub/en/Innovation/127-Adhesives-in-the-automotive-industry>>
- [15] *Terostat 8597 HMLC – lepení čelního skla* [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupný z WWW:< http://www.loctite.cz/cps/rde/xchg/henkel_czc/hs.xsl/rally-dakar-7590.htm>
- [16] *Materiály firmy FORM s.r.o.*
- [17] MACHEK, V. SODOMKA, J. *Nauka o materiálu*. 1.vyd. Praha: ČVUT, 2008,86 s. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [18] BAREŠ, R. *Kompozitní materiály*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [19] OSTEN, M. *Práce s lepidly a tmely*. 3.přepřac. vyd. Praha: SNTL, 1986, 288 s.
- [20] EHRENSTEIN, W. G. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [21] MLEZIVA, J. ŠŇUPÁREK, J. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepřac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-85920-72-7.
- [22] *Kompozity* [online]. [cit. 2011-12-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/>>
- [23] *Ruční kladení* [online]. [cit. 2012-01-08]. Dostupný z WWW:< <http://www.gurit.com/files/documents/guide-to-compositesv4pdf.pdf>>
- [24] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [25] *Všeobecný a základní popis materiálů použitých při výrobě kompozitů* [online]. [cit. 2012-01-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.havelcomposites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

b	Šířka lepeného spoje
ČSN	Česká technická norma
E	Modul pružnosti
F_a	Maximální síla
F_s	Průměrná síla
L_0	Původní délka zkušebního tělesa
n	Počet hodnot proměnné
R_m	Maximální síla
s	Směrodatná odchylka
S_0	Původní průřez tělesa
X_i	Jednotlivé hodnoty proměnné
\bar{x}	Aritmetický průměr
σ_m	Mez pevnosti
ε	Poměrné prodloužení
v	Variační koeficient

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Adheze a koheze v lepeném spoji [7]</i>	15
<i>Obr. 2 Schema lepeného spoje [4]</i>	17
<i>Obr. 3 Poruchy lepených spojů [5]</i>	19
<i>Obr. 4 Vytvrzovací proces [7]</i>	20
<i>Obr. 5 Vytvrzovací proces [7]</i>	21
<i>Obr. 6 Vytvrzovací proces [7]</i>	23
<i>Obr. 7 Přehled možností plochých spojů [3]</i>	27
<i>Obr. 8 Schéma univerzálního zkušebního stroje [8]</i>	31
<i>Obr. 9 Zkušební vzorek [9]</i>	32
<i>Obr. 10 Pevnost v odlupování podle Wintera [10]</i>	33
<i>Obr. 11 Smluvní diagram napětí – deformace [8]</i>	34
<i>Obr. 12 Sinergické chování složek kompozitu [4]</i>	36
<i>Obr. 13 Porovnání tahových diagramů křehké matrice a kompozitu složeného z této matrice a křehkých keramických vláken [4]</i>	37
<i>Obr. 14 Jevy na rozhraní matice a výztuhy [12]</i>	38
<i>Obr. 15 Rozdělení kompozitních materiálů [4]</i>	39
<i>Obr. 16 Kompozity s plastovou maticí [12]</i>	41
<i>Obr. 17 Použití kompozitů ve sportu [13]</i>	42
<i>Obr. 18 Použití kompozitů v pozemní dopravě [13]</i>	42
<i>Obr. 19 Použití kompozitů v železniční a lodní dopravě [13]</i>	42
<i>Obr. 20 Použití kompozitů v kosmonautice a letectví [13]</i>	43
<i>Obr. 21 Lepený nárazník tramvaje [13]</i>	44
<i>Obr. 22 Lepení čelního skla [15]</i>	44
<i>Obr. 23 Detaily lepených spojů na modulu tramvaje</i>	48
<i>Obr. 24 Výroba zkušebních vzorků</i>	49
<i>Obr. 25 Univerzální zkušební stroj ZWICK 1465</i>	53
<i>Obr. 26 Ukázka nalepených vzorků</i>	54
<i>Obr. 27 Vzorek 1A po zkoušce</i>	55
<i>Obr. 28 Vzorek 2A po zkoušce</i>	55
<i>Obr. 29 Vzorek 3A po zkoušce</i>	56
<i>Obr. 30 Vzorek 4A po zkoušce</i>	56

<i>Obr. 31 Vzorek 5A po zkoušce</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 32 Vzorek 6A po zkoušce</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 33 Vzorek 1B po zkoušce</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 34 Vzorek 2B po zkoušce</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 35 Vzorek 3B po zkoušce</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 36 Vzorek 4B po zkoušce</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 37 Vzorek 5B po zkoušce</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 38 Vzorek 6B po zkoušce</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 39 Vzorek 1C po zkoušce</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 40 Vzorek 2C po zkoušce</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 41 Vzorek 3C po zkoušce</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 42 Vzorek 4C po zkoušce</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 43 Vzorek 5C po zkoušce</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 44 Vzorek 6C po zkoušce</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 45 Porovnání hodnot R_m(MPa) lepidel A,B, C</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 46 Porovnání hodnot E(MPa) lepidel A, B,C</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 47 Porovnání hodnot R_m(N) lepidel A, B, C</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 48 Vzorek 1A po zkoušce</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 49 Vzorek 2A po zkoušce</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 50 Vzorek 3A po zkoušce</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 51 Vzorek 4A po zkoušce</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 52 Vzorek 1C po zkoušce</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 53 Vzorek 2C po zkoušce</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 54 3.vzorek série 2C po zkoušce</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 55 Vzorek 3C po zkoušce</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 56 Vzorek 4C po zkoušce</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 57 Porovnání hodnot R_m (MPa) lepidel A, C</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 58 Porovnání hodnot E (MPa) lepidel A, C</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 59 Porovnání hodnot R_m (N) lepidel A, C</i>	<i>71</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab.1 Tabulka lepených spojů</i>	48
<i>Tab. 2 Složení kompozitu pro výrobu vzorků [16]</i>	49
<i>Tab. 3 Vlastnosti nerezového plechu [16]</i>	52
<i>Tab. 4 Vlastnosti hliníkové slitiny EN AW 6060 T6 [16]</i>	52
<i>Tab. 5 Technické údaje zkušebního stroje</i>	53
<i>Tab. 6 Hodnoty vzorků 1A</i>	55
<i>Tab. 7 Hodnoty vzorků 2A</i>	55
<i>Tab. 8 Hodnoty vzorků 3A</i>	56
<i>Tab. 9 Hodnoty vzorků 4A</i>	56
<i>Tab. 10 Hodnoty vzorků 5A</i>	57
<i>Tab. 11 Hodnoty vzorků 6A</i>	57
<i>Tab. 12 Hodnoty vzorků 1B</i>	58
<i>Tab. 13 Hodnoty vzorků 2B</i>	58
<i>Tab. 14 Hodnoty vzorků 3B</i>	59
<i>Tab. 15 Hodnoty vzorků 4B</i>	59
<i>Tab. 16 Hodnoty vzorků 5B</i>	60
<i>Tab. 17 Hodnoty vzorků 6B</i>	60
<i>Tab. 18 Hodnoty vzorků 1C</i>	61
<i>Tab. 19 Hodnoty vzorků 2C</i>	61
<i>Tab. 20 Hodnoty vzorků 3C</i>	62
<i>Tab. 21 Hodnoty vzorků 4C</i>	62
<i>Tab. 22 Hodnoty vzorků 5C</i>	63
<i>Tab. 23 Hodnoty vzorků 6C</i>	63
<i>Tab. 24 Naměřené hodnoty $R_m(\text{MPa})$ lepidel A, B, C</i>	64
<i>Tab. 25 Naměřené hodnoty $E(\text{MPa})$ lepidel A, B, C</i>	64
<i>Tab. 26 Naměřené hodnoty $R_m(N)$ lepidel A, B, C</i>	65
<i>Tab. 27 Hodnoty vzorků 1A</i>	66
<i>Tab. 28 Hodnoty vzorků 2A</i>	66
<i>Tab. 29 Hodnoty vzorků 3A</i>	67
<i>Tab. 30 Hodnoty vzorků 4A</i>	67
<i>Tab. 31 Hodnoty vzorků 1C</i>	68

<i>Tab. 32</i> Hodnoty vzorků 2C	68
<i>Tab. 33</i> Hodnoty vzorků 3C	69
<i>Tab. 34</i> Hodnoty vzorků 4C	70
<i>Tab. 35</i> Naměřené hodnoty R_m (MPa) lepidel A, C	70
<i>Tab. 36</i> Naměřené hodnoty E (MPa) lepidel A, C	71
<i>Tab. 37</i> Naměřené hodnoty R_m (N) lepidel A, C	71

SEZNAM PŘÍLOH

PI CD ROM