

Studium únosnosti plátovaných laminátových spojů

Bc .Josef Pobořil

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. Josef POBOŘIL**
Osobní číslo: **T10742**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Studium únosnosti plátovaných laminátových spojů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše na dané téma
2. Experimentální příprava laminátových spojů
3. Naměření dat a vyhodnocení únosnosti (tah + ohyb) daných vzorků
4. Sestavení FEM modelu spoje
5. Srovnání experimentálních a modelových výsledků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

děkan




prof. Ing. Běrnika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit 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 :17.5.2012

.....


²¹⁾ 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:

(1) Vysoká škola nevydělečně 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) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení 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 rozmnoženiny.

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

²²⁾ 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 nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli 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).

²³⁾ 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. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(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 výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem únosnosti plátovaných laminátových spojů.

Teoretická část definuje laminát, popisuje jednotlivé části jako je výztuž, pojivo atd. Zde je také uvedena jejich výroba a mechanické chování laminátových struktur. Další část se pak zaměřuje na lepení.

Praktická část se skládá z přípravy zkušebních vzorků a jejich měření na přístroji Zwick 1965, na kterém byly provedeny statické tahové a ohybové zkoušky. Dále byl vymodelován FEM model lepeného spoje. Ze získaných dat došlo k vyhodnocení únosnosti a porovnání výsledků naměřených a vymodelovaných.

Klíčová slova: laminát, únosnost, lepení, lepené spoje

ABSTRACT

This master thesis studies of load capacity of tapered laminated plates.

The theoretical part defines laminate , describes the basic part as reinforcement, adhesive etc.. There are present their production and mechanical behavior of laminated structures. Another part is based on adhesive bonding.

The practical part consists preparation of test samples and measuring using in the Zwick 1965 device at which they were conducted static tensile and bending tests. It was also modeled FEM the model of the glued joint. The obtained data were evaluate to the load capacity and compared with the measured and the modeled results.

Keywords: laminate, load capacity, adhesive bonding, glued joints

Chtěl bych velice poděkovat za cenné rady a čas mojí vedoucí diplomové práce paní Doc. Ing. Libuše Sýkorové Ph.D. a panu Doc. Ing. Oldřichu Šubovi CSc. Dále paní Doc. Ing. Soně Rusňákové Ph.D. za pomoc při lepení vzorků, panu Ing. Milanu Žaludkovi Ph.D. za pomoc při provádění zkoušek, Ing. Jiřímu Šálkovi za pomoc v dílnách a v neposlední řadě mojí rodině za podporu během studia a mojí přítelkyni.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁL - LAMINÁT	12
1.1 SLOŽKY LAMINÁTU - VÝZTUŽE.....	13
1.1.1 Skleněná vlákna	13
1.1.2 Aromatické polyamidy (aramidy).....	13
1.1.3 Karbonová vlákna	14
1.1.4 Roving	15
1.1.5 Tkaniny	16
1.1.6 Rohože.....	17
1.1.7 Kombinované výztuže.....	17
1.2 SLOŽKY LAMINÁTU - POJIVO	18
1.2.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice	18
1.2.2 Vinylesterové pryskyřice	19
1.2.3 Epoxidové pryskyřice.....	19
1.2.4 Fenolické pryskyřice	20
1.3 SLOŽKY LAMINÁTU - PLNIVA	20
1.4 SLOŽKY LAMINÁTU - ADITIVA.....	20
1.5 SLOŽKY LAMINÁTU - PIGMENTY.....	21
1.6 VLASTNOSTI LAMINÁTŮ	21
1.7 VYUŽITÍ LAMINÁTŮ.....	22
2 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ	25
2.1 RUČNÍ KLADENÍ.....	26
2.2 LISOVÁNÍ ZA TEPLA A TLAKU	27
2.3 VYSOKOTLAKÉ VSTRÍKOVÁNÍ	28
2.4 TAŽENÍ (PULTRUZE)	29
2.5 NAVÍJENÍ.....	31
2.6 Odstředivé lití.....	32
3 MECHANIKA LAMINÁTŮ	33
3.1 TEORIE KOMPOZITŮ.....	33
3.2 ORTHOTROPNÍ VRSTVA	34
3.3 KONSTITUČNÍ ROVNICE LAMINY.....	37
4 LEPENÍ	40
4.1 ZÁKLADY TECHNOLOGIE LEPENÍ	40
4.2 TEORIE LEPENÍ	43
4.2.1 Molekulová teorie (adsorpční)	43
4.2.2 Elektrostatická teorie.....	44
4.2.3 Mechanická teorie	44
4.2.4 Difuzní teorie	44
4.2.5 Chemická teorie	44
5 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	46
II PRAKTICKÁ ČÁST	47

6	PŘÍPRAVA LEPENÝCH SPOJŮ	48
6.1	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	48
6.2	LEPENÍ VZORKŮ	49
7	MĚŘENÍ.....	52
8	ZKOUŠKA NA TAH.....	54
8.1	LAMINÁT – LAMINÁT.....	54
8.1.1	Lepidlo Colpoly BP 108.....	54
8.1.2	Lepidlo 3M schotch WELD 7260 B/A FC	55
8.2	LAMINÁT – HLINÍK	60
8.2.1	Lepidlo Colpoly BP 108.....	60
8.2.2	Lepidlo 3M Schotch weld 7260 B/A FC.....	61
8.3	LAMINÁT – NEREZ	63
8.3.1	Lepidlo Colpoly BP 108.....	64
8.4	LAMINÁT.....	70
9	ZKOUŠKA NA OHYB	73
9.1	LAMINÁT – LAMINÁT	73
9.1.1	Lepidlo Colpoly BP 108.....	73
9.1.2	Lepidlo 3M schotch WELD 7260 B/A FC	75
10	SESTAVENÍ FEM MODELU SPOJE	79
11	SROVNÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH A MODELOVÝCH VÝSLEDKŮ	83
	ZÁVĚR	84
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	85
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	87
	SEZNAM OBRÁZKŮ	88
	SEZNAM TABULEK.....	90
	SEZNAM PŘÍLOH.....	91

ÚVOD

V současné době mají projektanti, designéři, umělci a další profese k dispozici přes 15 tisíc různých materiálů nabízených ve stovkách modifikací. Typickou a pravděpodobně nejdynamičtěji se rozvíjející skupinou nových materiálů jsou polymery a kompozity na jejich bázi. Polymerní materiály, laické veřejnosti splývající pod jednotné označení pryskyřice a plasty či umělé hmoty, se v masové míře začaly využívat v 50. letech, kdy se rozvinula petrochemie a suroviny pro výrobu těchto materiálů byly vedlejšími produkty výroby benzínu a jiných pohonných hmot (hlavně ethylen, styren a propylén). Je však třeba říci, že samotná podstata polymerů (dlouhé relativně flexibilní uhlíkové či křemíkové páteřní řetězce) definuje hranice jejich použití v konstrukčních aplikacích především v důsledku limitující tuhosti, pevnosti a tepelné odolnosti.

Jestliže však do pryskyřice či plasty přidáme výztuž ve formě vláken, která mají vysokou tuhost, pevnost a teplotní stabilitu, získáme zcela novou, unikátní skupinu materiálů kombinujících synergicky mechanické vlastnosti výztuže se snadností zpracování polymerů. Tato skupina materiálů se nazývá vláknové polymerní kompozity či vláknové kompozity s polymerními matricemi. U těchto materiálů je pak často využíváno ke spojování technologie lepení. [1]

Lepidla a jejich použití je starší jako historie sama – pokud historií rozumíme období, o kterém se zachovaly jakékoliv písemné dokumenty. Lepení bylo známé dřív, než byl člověk schopný zaznamenávat historii, proto dokumenty o lepení nacházíme jen ve formě zachovaných výrobků. V kamenné době se používalo březové smoly k výrobě věder z březové kůry, k lepení hrotů, šípů a harpun apod. [11,12]

Vývoj moderních syntetických lepidel vyřešil řadu problémů souvisejících se zpracováním plastických hmot. Umožnil vrstvit (kašírovat) klasické materiály – dřevo, textil, kovy, beton a jiné látky – plastické fólie nebo lehčené hmoty. Díky tomu nabylo na významu i lepení jako nový, moderní způsob nerozebíratelného spojování pevných materiálů. Proti klasickým metodám, tj. nýtování, svařování, sešívání, stloukání nebo šroubování, poskytuje lepení zajímavé konstrukční možnosti a dovoluje získat spoje takových vlastností, kterých by nebylo možné dosáhnout běžnými metodami spojování. [13,14]

Diplomová práce se bude zabývat únosností v závislosti na délce přeplátování laminátových spojů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁL - LAMINÁT

Kompozitem je nazýván materiál, ve kterém jsou specifickým způsobem kombinovány dvě nebo více komponent o výrazně se lišících fyzikálních a chemických vlastnostech. Kompozity mohou být typu kov-kov, keramika-kov, keramika-polymer, keramika-keramika a polymer-polymer. Největšího průmyslového rozšíření dosáhly ve světě kompozity na bázi organických pryskyřic vyztužených různými typy keramických/anorganických vláken. Hlavním důvodem tohoto stavu je energetická nenáročnost jejich výroby ve srovnání s kovovými či keramickými kompozity a tradičními materiály (ocel, cement) a nízké teploty finálního zpracování (80-180° C). Nejvýznamnější předností kompozit s organickými matricemi je synergická kombinace snadné tvarovatelnosti nepevné pryskyřice s pevností a tuhostí vyztužujících vláken. Polymerní kompozity (FRC, GRP) nabízejí nízkou měrnou hmotnost, vysokou pevnost při statickém i dynamickém namáhání a vynikající odolnost vůči působení korozivních prostředí. Při použití skleněných či organických výztuží mají FRC i vynikající izolační vlastnosti (tepelné, elektrické) a prakticky nulový útlum elektromagnetického záření v širokém intervalu frekvencí od kHz až po GHz.

GRP mají ve srovnání s jednotlivými komponentami, tj. se skleněnými vlákny a pryskyřicí, podstatně odlišné unikátní vlastnosti. Nevyztužená pryskyřice má nízkou hustotu, je snadno zpracovatelná a má relativně dobrou stabilitu proti působení širokého spektra prostředí a chemikálií. Nevýhodami, které omezují či úplně vylučují jejich použití v konstrukčních aplikacích, je velmi nízký modul pružnosti (do 6 GPa), nízká pevnost (100 MPa), křehkost (hnací síla trhliny G_c v intervalu 0,1-0,6 kJ/m²) a relativně malá creepová odolnost. Skleněná vlákna mají sice požadovanou tuhost a pevnost, jsou však velmi křehká a náchylná k poškození v některých agresivních prostředích. Je navíc velmi obtížné udržet je v požadovaném prostorovém uspořádání, zvláště pokud působí tlakové složky napětí. Jestliže však vyrobíme kompozitní materiál tím, že prostorově vhodně umístíme skleněná, uhlíková či organická vlákna (výztuž) v pryskyřici, která se potom nazývá *pojivem* neboli *matricí*, dostaneme novou entitu s vlastnostmi nedosažitelnými jednotlivými komponentami samotnými. GRP jsou lehké, pevné, tuhé, houževnaté, mají vysokou odolnost proti creepu a jsou snadno vyrobitelné ve velmi komplikovaných tvarech. [1]

Hlavním technologickým strukturním parametrem řídícím vlastnosti výsledného kompozitu je tedy při daném typu vláken a pryskyřice obsah vláken. Tento obsah se z důvodu podstatně odlišných hustot matrice a výztuže vyjadřuje v objemových procentech (objem vláken/celkový objem kompozitu) $\times 100 \%$ nebo v objemovém zlomku (objem vláken/celkový objem kompozitu). Objemový zlomek jednosměrně orientovaných vláken v materiálech leží v oblasti 0,7-0,8.

Laminát je vrstvená hmota vzniklá spojením několika vrstev výztuže vhodnými pryskyřicemi. [4]

1.1 Složky laminátu - výztuže

Výztuž je nosným prvkem v laminátech a určuje jejich mechanické vlastnosti (pevnost, houževnatost, modul pružnosti, apod.). Jako výztuže jsou používány zpravidla vláknité materiály. [4]

Vláknová výztuž

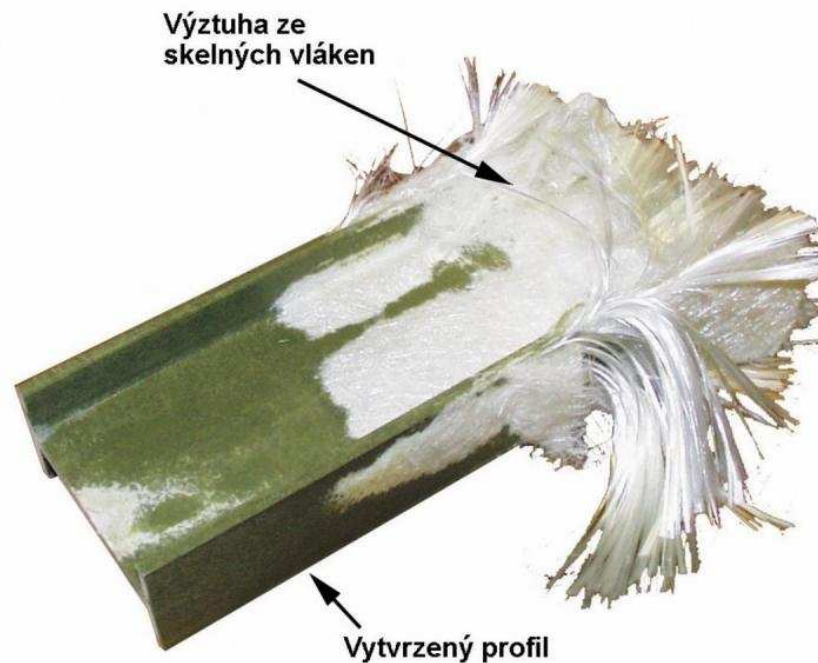
V posledních letech se výzkum a vývoj soustředil na vlákna – jejich působení, objemová množství, orientaci a nové typy. Výztuž je v kompozitu obvykle zastoupena 30–70 %. Nejběžněji používanými vlákny jsou skleněná, aramidová a karbonová.

1.1.1 Skleněná vlákna

se vyrábějí tažením z taveniny otvory v platině rychlostí 50–70 m/s. Průměr vláken je 5–25 mikrometrů. Vlákna jsou potažena lubrikační vrstvou, umožňující dobré propojení s pryskyřicí. Vlákna jsou splétána do prstenců a používána jako rovingy, tkaniny, krátké sekané sklo (3–6 mm) a krátká vlákna (do 1 mm).

1.1.2 Aromatické polyamidy (aramidy)

jsou dodávány na trh pod obchodními názvy např. Kevlar® nebo Twaron®. Mají nejlepší rázovou houževnatost, nejnižší hustotu, velmi dobré pevnostní parametry a tlumí vibrace. Jsou odolné vůči plameni, samozhášivé a netaví se. Vlákna jsou chemicky odolná a mají lepší dielektrické vlastnosti než vlákna skleněná.

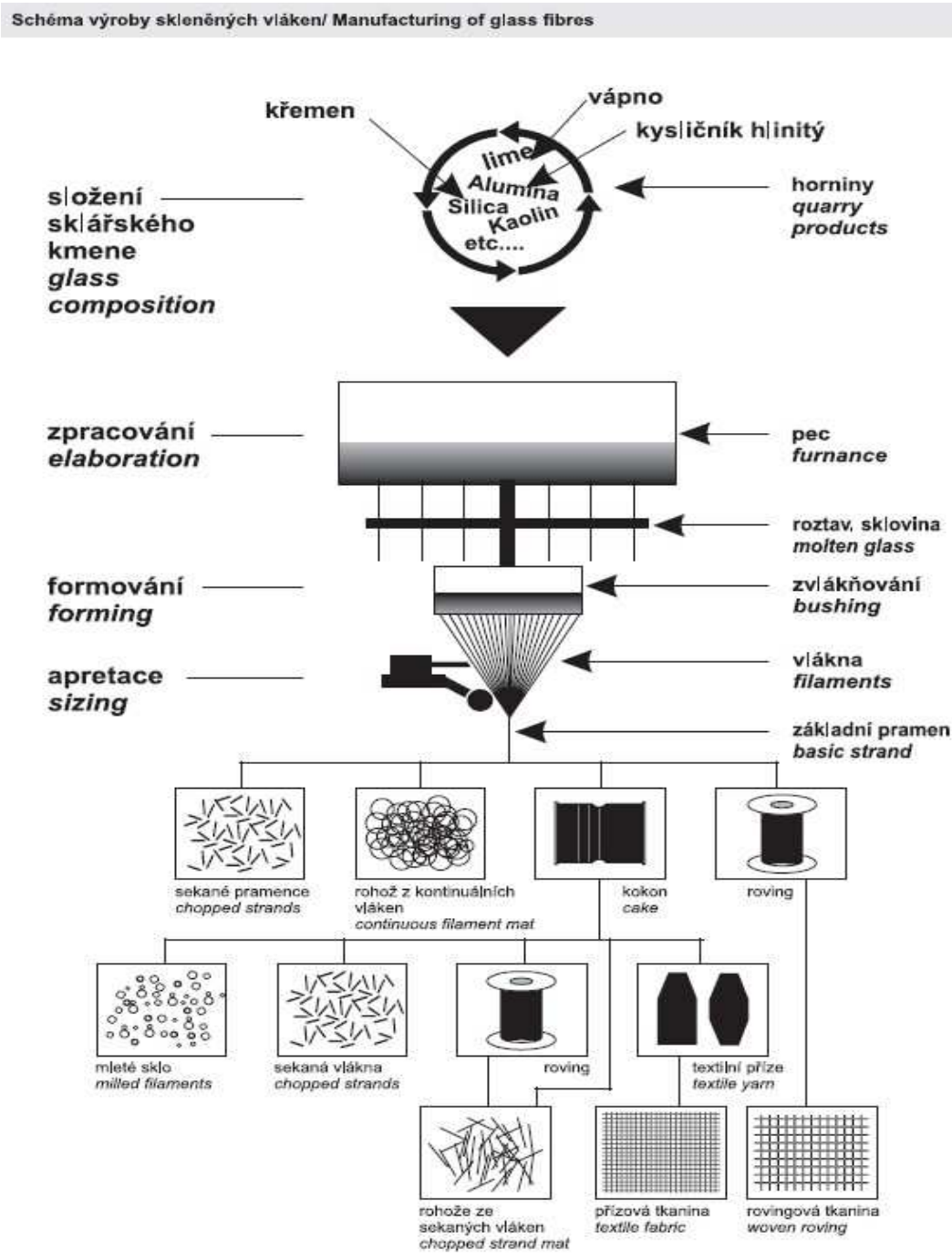


Obr. 1. Skleněná vlákna v laminátu [2]

1.1.3 Karbonová vlákna

Polotovarem pro výrobu karbonových vláken je PAN (polyakrilonitridové vlákno) nebo PITCH (vlákno vyrobené z ropných produktů). Postup výroby začíná pyrolýzou, prodloužením vlákna při asi 200 °C, a orientací molekul. Následuje stabilizace v oxidační atmosféře a teplotě 220–300 °C po dobu 10 hodin. Dalším zvyšováním teploty v inertní atmosféře roste modul pružnosti a pevnost vlákna, za teploty 1000–1500 °C dochází ke karbonizaci a při 2500–3000 °C vzniká grafitická mikrostruktura. Vlákna mají nízkou hmotnost, vysokou pevnost a tuhost. Nevýhodou je vysoká cena, křehkost vlákna a intenzivní oxidace už při 400 °C. Uhlíková vlákna jsou používána na primární konstrukce všech typů letadel. [2]

Pokud jsou na kompozitní výrobky kladeny požadavky týkající se namáhání ve více než jednom směru, jsou jako výztuže používána rouna, tkaniny, pleteniny, rohože aj. [4]



Obr. 2. Schéma výroby skleněných vláken [5]

Forma výztuží:

1.1.4 Roving

Vyrábí se jako tzv. přímý nebo skaný v druzení 18-60 konců (300-4800 tex *), pro technologii tažení (pultruze) rovněž jako smyčkový, který dodává profilům příčnou

pevnost. Dodává se na cívkách s vnitřním nebo vnějším odtahem. Speciálním typem je roving Spheretex Gun Core vylehčený expandovanými teroplastickými částicemi.

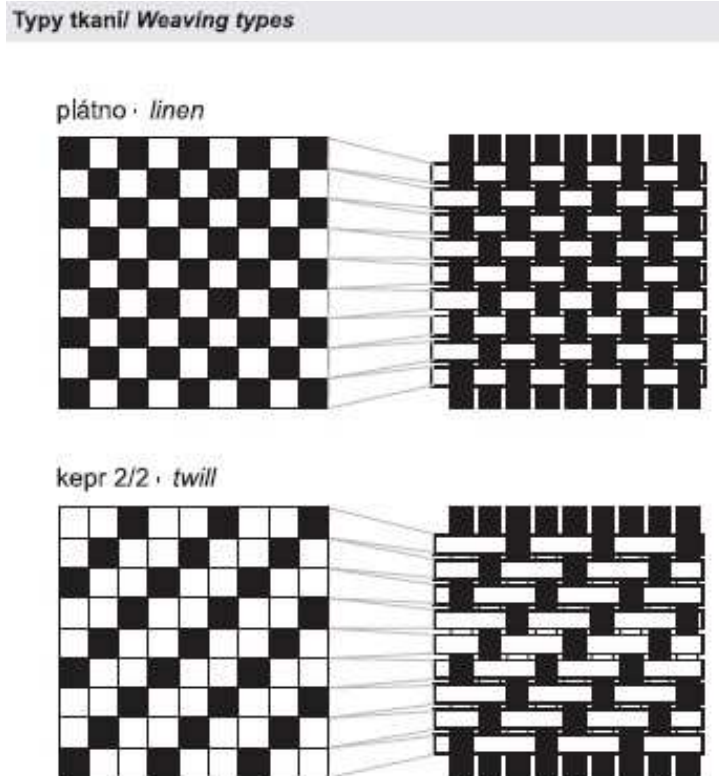
1.1.5 Tkaniny

Pramencové tkaniny se tkají s vazbou plátňovou, keprovou nebo atlasovou v různých gramážích od 280 do 1500 g/m².*) Číslo tex je jednotka charakterizující jemnost vlákna, je to váha 1 km vlákna v gramech. Jemné tkaniny, často vyráběné z příze, se vyrábějí v gramážích již od 17 g/m². [6]



Obr. 3. Typy tkaní [5]

Pro speciální aplikace se vyrábějí tkaniny hybridní, kde se v osnově nebo v útku kombinují vlákna skleněná s aramidovými nebo/a uhlíkovými. Pro vysoce pevnostně namáhané díly se vyrábějí tkaniny jednosměrné skelné, jednosměrné uhlíkové nebo vícesměrné (multiaxiální), které se nezískávají tkaním, ale ukládáním vláken v příslušných směrech za současného řídkého prošíání. [6]



Obr. 4. Typy tkaní [5]

1.1.6 Rohože

Vznikají ukládáním nepravidelně orientovaných 50 mm dlouhých vláken (sekaných pramenců) o různém texu, pojených emulzí nebo práškovým pojivem. Gramáž se pohybuje mezi 225 až 900 g/m². Emulzně pojené rohože jsou měkčí, lépe se tvarují, používají se pro tvarově složitější dílce.

Práškově pojené rohože jsou tužší, používají se na jednodušší velkoplošné dílce nebo ve spojení s izoftalovými polyestery nebo vinylestery na výrobky odolné působení vody a chemikálií. Speciálním typem jsou rohože z nekonečných vláken s náhodnou orientací (Unifilo), emulzně pojené, které si zachovávají stabilitu i při tlakovém prosycování pryskyřicí technologií RTM. Pro injekční technologie se užívají i rohože prošívané. [6]

1.1.7 Kombinované výztuže

Sešitím pramencových tkanin s rohožemi vznikají kombinované výztuže o celkové gramáži 600-1800 g/m², které snižují pracnost při technologii ručního kladení a uplatňují

se také při výrobě velkoplošných forem. Zvláštním případem jsou kombinované výztuže pro vakuoinjekční technologie, které jsou tvořeny sešitím pramencových rohoží s vnitřní řídkou rohoží ze syntetických, řidčeji i skleněných vláken (např. Combiflow, Rovicore) umožňující rychlý tok pryskyřice do celého objemu vsádky suché výztuže. [6]

1.2 Složky laminátu - Pojivo

Pojivy jsou pevně vázána jednotlivá vlákna a chrání je před mechanickým a chemickým poškozením. Nejčastěji se používají nenasycené polyestery (UP z anglického unsaturated polyesters), vinylestery (VE), epoxidy a fenolické pryskyřice pro kompozity s výrazně sníženou hořlavostí. Z celkového objemu pryskyřic, světově zpracovávaných při výrobě vláknových kompozit, připadá 75 % na nenasycené polyestery, 20 % tvoří vinylestery a 5 % tvoří speciální pryskyřice (fenolické, epoxidy, vysokoteplotní pryskyřice atd. [2]

Funkce

- a) udržet vlákna ve správných pozicích
- b) pomáhat distribuovat napětí
- c) chránit vlákna před poškozením abrazí
- d) kontrolovat elektrické a chemické vlastnosti [3]

1.2.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice

Pod pojmem nenasycené polyesterové pryskyřice (unsaturated polyesters = UP) je rozuměn roztok lineárních nenasycených polyesterů (obsahují reaktivní dvojnou C=C vazbu) v polymerace schopném rozpouštědle (nejčastěji ve styrenu). Krátké oligomerní řetězce UP (několik monomerních jednotek) jsou vzájemně síťovány styrenovými můstky. Síťovací radikálová reakce je iniciována pomocí volných peroxidových radikálů vzniklých termickým štěpením organických diperoxidů. Aby reakce probíhala s technologicky přijatelnou rychlostí, je nutno vytvrzování provádět za zvýšené teploty. Teplota vytvrzování je dána typem použitého iniciátoru, který se od sebe liší právě teplotou, při které je jejich rozpad maximální. [1]

1.2.2 Vinylesterové pryskyřice

Vinylestery jsou reaktoplasty velmi vhodné pro výrobu kompozit vyztužených skleněnými i uhlíkovými vlákny. Hodí se výborně pro náročné aplikace, zejména do agresivního chemického prostředí, a pro kompozity vystavené velkému mechanickému namáhání. Ve většině aplikací nevyžadujících speciální elektrické vlastnosti a dlouhodobé použití při vysokých teplotách je možno pomocí vinylesterů nahradit dražší a mnohými technologiemi hůře zpracovatelné epoxidové pryskyřice, které vyžadují delší dobu vytvrzování a vyšší teploty.

Během řady let používání prokázaly sklem vyztužené vinylesterové roury, nádrže, podzemní zásobníky a další výrobky vynikající trvanlivost v aplikacích v chemickém průmyslu, v těžbě a zpracování ropy nebo v průmyslu papírenském. Kompozity z vinylesterových pryskyřic se také osvědčily při konstrukcích sanitární techniky a domácích plaveckých bazénů. [4]

1.2.3 Epoxidové pryskyřice

Sloučeniny, které obsahují v molekule epoxidovou skupinu. Výsledkem velmi dobrých mechanických, elektrických vlastností a velké reaktivity jsou aplikace epoxidových pryskyřic v lepidlech, zalévacích a lisovacích hmotách, pojivech pro lamináty a v pryskyřicích pro lakování. Při vytvrzování se neodštěpují vedlejší produkty a dochází jen k malému celkovému polymeračnímu smrštění (okolo 2%). Tato vlastnost je velmi výhodná pro výrobky s požadovanou přesností rozměrů a pro výrobu kompozit, kde je v důsledku minimálního smrštění minimalizováno vnitřní pnutí i ve velkých dílcích. Epoxidová pryskyřice má v porovnání s již zmíněnými polyesterovými a vinylesterovými pryskyřicemi nejlepší přilnavost k povrchově neupravené skleněné výztuži. Vytvrzené epoxidové pryskyřice také vykazují nejlepší mechanické, a především elektrické vlastnosti. Mají dobré elektroizolační vlastnosti v široké oblasti teplot, cenná je i jejich značná odolnost vůči vodě, roztokům kyselin a některým rozpouštědlům.

1.2.4 Fenolické pryskyřice

Jsou reaktoplasty s vysokou tvrdostí, modulem pružnosti a malou houževnatostí, které vznikají nejčastěji jako reakční produkt reakce fenolu s formaldehydem. Název dvoustupňová pryskyřice je používán pro pryskyřice s molárním poměrem formaldehyd/fenol menším než 1 a za přítomnosti kyselého katalyzátoru. Jednostupňové pryskyřice jsou vyráběny reakcí formaldehydu s fenolem, přičemž molární poměr formaldehyd/fenol je větší než 1 a reakce je katalyzována alkalickým katalyzátorem.

Velké využití nachází tato pryskyřice při výrobě brzdových destiček a jiných frikčních součástí jako jsou například brusné kotouče, ve kterých je fenolická pryskyřice pojivem vlastních brusných částic. Použití fenolických matric při výrobě tažených kompozitních profilů vede k materiálům, které mají výrazně sníženou hořlavost.

Největší předností této pryskyřice je její vynikající termomechanická, povětrnostní a elektrická odolnost. Kontinuální použití fenolformaldehydu vyztuženého skleněnými vlákny při teplotě 260 °C po dobu 1 roku vedlo k poklesu jeho pevnosti pouze o 25 % ve srovnání s tepelně nenamáhaným kompozitem. Ani po mnoha letech nedochází při vnější expozici k výraznějšímu poklesu mechanických vlastností, i když dochází ke zhoršení povrchového lesku a kvality povrchu [4].

1.3 Složky laminátu - Plniva

Jedná se o malé, pevné částice inertních materiálů, které se přidávají do pojiva s cílem zvýšit pevnost, tvrdost, tvarovou stálost, zlepšit zpracovatelnost, snížit hořlavost a smršťení a většinou také pro zlevnění produktu. Nejužívanějšími plnivými jsou uhličitán vápenatý (křída), mastek, kaolin, křemenná moučka, hydroxid hlinitý (snížení hořlavosti), oxid hořečnatý, vločky kysličníku hlinitého (estetické efekty), kameninová drť atd. Plniva se přidávají podle typu a účelu použití v množství 30–400 hm. dílů na 100 hm. dílů matrice.

1.4 Složky laminátu - Aditiva

Jsou to takové látky, které přidáním jejich malého množství příznivě upravují některé vlastnosti pojiv, např. zlepšují smáčení vláken a plniv pryskyřicí, ulehčují odvodušnění pryskyřic a gelcoatů; antioxidanty a UV absorbéry zpomalují stárnutí a degradaci polymerů.

1.5 Složky laminátu - Pigmenty

Jsou užívány pro probarvení pryskyřic a zejména gelcoatů. Musí mít dostatečnou kryvost, aby požadovaného odstínu bylo dosaženo s minimálním přídavkem pigmentu, musí být dlouhodobě stabilní vůči UV záření a dalším povětrnostním vlivům, aby byla zaručena stálost odstínu. Z těchto hledisek jsou nejvhodnější anorganické pigmenty, většinou oxidy různých kovů. V poslední době se však v řadě případů přechází na pigmenty organické, aby se vyloučilo znečišťování životního prostředí toxickými těžkými kovy, jako jsou rtuť, olovo, chrom a molybden. Jako bílý pigment je téměř výlučně používána nezávadná titanová běloba. [2]

1.6 Vlastnosti laminátů

Vysoká pevnost

Pevnost tažených kompozitních profilů dosahuje v závislosti na složení (obsahu a struktuře skelných vláken) pevností konstrukčních ocelí. Poměr pevnosti k měrné hmotnosti je zhruba dvojnásobný u kompozitních profilů ve srovnání s konstrukční ocelí. Profily z vláknových kompozit byly úspěšně použity k vytvoření nosných konstrukcí vícepodlažních budov, pochůzkových můstků, zvýšených podlah a dalších konstrukcí pro náročné pevnostní aplikace.

Nízká hmotnost

Měrná hmotnost vláknového kompozitu je cca 4,5krát nižší než měrná hmotnost oceli a cca 1,5krát nižší než měrná hmotnost hliníku. Manipulace je snadná, bez potřeby těžkého zvedacího zařízení. Lze provést sestavení dílčích modulů konečné konstrukce mimo staveniště a dopravit je tam vcelku. [3]

Trvalá odolnost proti korozi

Kompozitní materiály jsou inertní vůči korozi atmosférické i korozi způsobené chemikáliemi, vodou, oleji, bakteriemi apod. Jejich povrch není třeba opatřovat žádnými ochrannými povlaky či nátěry.

Tepelné a požární vlastnosti

Kompozitní materiál je termoset. Zvýšení teploty nezpůsobuje tvárnost materiálu. Významnými vlastnostmi jsou nízká tepelná vodivost a rozměrová stálost. Typickou aplikací využívající tepelné vlastnosti je použití kompozitních profilů jako tepelných mostů v kovových konstrukcích.

Stupeň tepelné odolnosti a hořlavosti je dán typem použité pryskyřice. Základní typy je možné použít do teplot 150 °C, stupeň hořlavosti je stanoven B – nesnadno hořlavé. V případě použití speciálních pryskyřic je teplotní odolnost až 925 °C po dobu 60 min stupeň hořlavosti je stanoven A – nehořlavé. [3]

Elektrické vlastnosti

nevodivost, elektromagnetická transparentnost

Opracování, montáž

Kompozitní materiály je možné opracovávat – řezat, brousit, vrtat, frézovat, soustružit běžnými nástroji na kovy.

1.7 Využití laminátů

Nejmodernější polymerní kompozity se svým spektrem vlastností vyrovnají tradičním materiálům a v mnohých ohledech je dokonce předčí. Jsou použitelné i při výrobě nosných prvků konstrukcí, a tedy nejnadějnějšími kandidáty pro náhradu kovů a jiných tradičních materiálů v konstrukčních aplikacích. Pro ilustraci, spotřeba vláknových polymerních kompozit civilním sektorem byla jen v USA v roce 1995 celkem 1 405 000 tun, z toho aplikace v dopravě spotřebovaly 435 000 tun a 410 000 tun bylo použito ve stavebnictví. Největší jednorázovou stavební aplikací tažených vláknových profilů v Evropě bylo jejich použití při stavbě tunelu pod kanálem La Manche, kde bylo 3500 t tažených kompozitních profilů polyester/sklo použito k montáži kabelových tratí s vynikající odolností proti korozi a nehořlavostí. V ČR je odhadována spotřeba nejrůznějších typů dlouho vláknových kompozitů na 2–3 tisíce tun ročně, většinou ve formě ručně kladených laminátových polotovarů. V přepočtu na jednoho obyvatele je to tedy zhruba 15krát méně než v USA. Většina vláknových kompozit vyráběných v ČR je ve formě ručně kladených laminátů na bázi tkaných skleněných výztuží s polyesterovými pojivy, ale objevují se už i modernější technologie i suroviny. Výrobní základna je v ČR podobně jako v celé Evropě značně roztržštěná. Právě roztržštěnost výrobních kapacit, malá

informovanost technické veřejnosti, její větší konzervativnost a nedostatek technických norem pro konstruování s kompozity jsou hlavními důvody zaostávání Evropy za Japonskem a USA v této oblasti. [3]

Ukázky výrobku z laminátů



Obr. 5. Čistírna odpadních vod v Brně-Modřicích [2]



Obr. 6. Část karoserie tramvaje z laminátu [17]



Obr. 7. Bazén z laminátu [16]



Obr. 8. Laminátová loď [18]

2 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ

Jak vyplývá již z charakteru jednotlivých složek a základního rozdělení plastů, vzniká (až na výjimky) vláknový kompozit – laminát teprve při výrobě polotovaru resp. výrobku. Vzhledem k tomu je třeba posuzovat technologický postup při výrobě vyztužených plastů za velmi podstatný faktor, který v zásadě určuje jak jeho konečné vlastnosti, tak i ekonomiku výroby. Proto je třeba věnovat volbě technologie značnou pozornost.

Určující faktory pro volbu technologie

Výrobní technologie je dána především charakterem výrobku a její volba se řídí několika zásadními faktory:

- a) sériovost dílce
- b) velikost a členitost výrobku
- c) kvalita povrchu
- d) požadované vlastnosti, zejména pevnost a hmotnost
- e) limit nákladů

Obvykle je třeba volit určitý kompromis, aby bylo možno alespoň do jisté míry vyhovět všem požadavkům nebo se těm, které jsou nejdůležitější, co nejvíce přiblížit.

Sériovost je jedním ze základních faktorů ovlivňující volbu zpracování. Je zřejmé, že dílce v malých sériích není možno vyrábět strojními technologiemi, naopak velké série není ekonomické vyrábět ručním kladením.

Členitost a tvar výrobků:

Některé technologie připouštějí pouze určité tvary (např. navíjení), některé postupy lze aplikovat pouze na jednoduché tvary (strojní stříkání).

Kvalita povrchu:

Některými postupy lze získat pouze jednostranně kvalitní povrch od formy.

Požadavky na finální vlastnosti:

Většina mechanických vlastností závisí na obsahu a orientaci výztuže v kompozitu a i na typu použité pryskyřice. Tyto faktory jsou značně závislé na použité technologii.

Jednotlivé technologie výroby:

- Ruční kladení
- Stříkání
- Lisování za studena
- Lisování pomocí vakua
- Lisování v autoklávu

- Lisování za tepla a tlaku
- Vysokotlaké vstřikování
(RTM – resin transfer moulding)
- Vakuo-injekční technologie
(VARTM – vacuum assisted resin transfer moulding, RTM light))
- Vakuové prosyčování
(vacuum infusion, VIP- vacuum infusion process)
- Tažení (pultruze)
- Navíjení
- Odstředivé lití
- Odlévání

2.1 Ruční kladení

Nejstarší, nejjednodušší a dosud nejrozšířenější technologie, patří mezi tzv. otevřené technologie. Forma (negativní – matrice nebo pozitivní- patrice) se po naseparování obvykle nejprve opatří gelcoatem.

Gelcoat – speciálně formulovaná, většinou probarvená nevyztužená povrchová vrstva o tloušťce 0.3-1 mm se nanáší buď ručně, nebo stříkáním, a zajišťuje jednak estetickou stránku povrchu dílce a jednak tvoří ochranu vůči okolnímu prostředí (voda, povětrnost, chemická media).

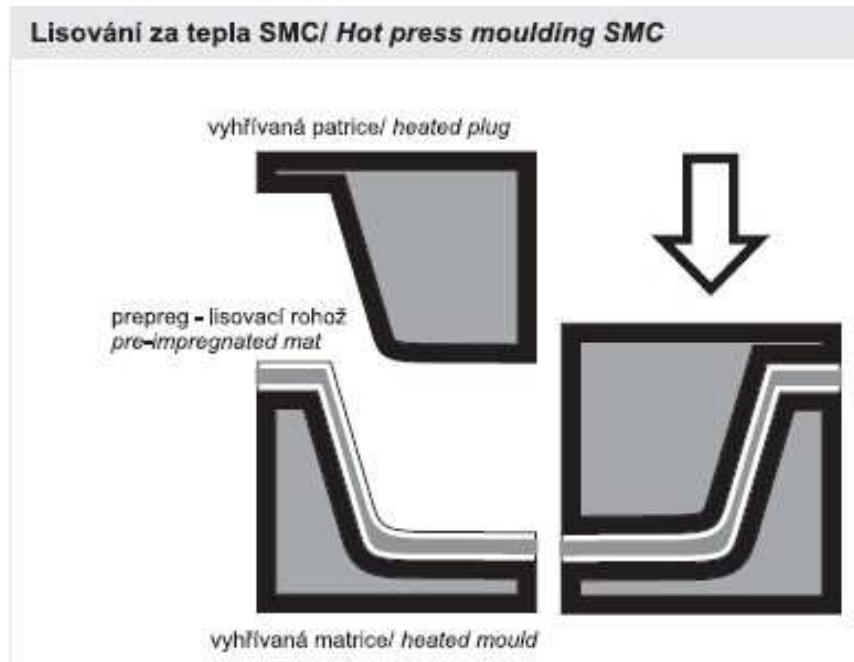
Po částečném vytvrzení gelcoatu (nesmí se již mazat, ale může ještě být lepkavý) se kladou jednotlivé vrstvy výztuže, které se prosycují iniciovanou pryskyřicí pomocí štětce nebo nanášecím válečkem, a pak se přebytečná pryskyřice a vzduchové bubliny vytlačují rýhovanými válečky.

Laminát vytvrzuje za normální teploty většinou bez aplikace tlaku, pouze v případech, kdy je třeba vytvořit sendvičovou konstrukci stěny zabudováním lehkých jádrových materiálů (pěny, voštiny apod.), se užívá přítlaku vakuem pod separační folií. Pro zvýšení teplotní odolnosti je někdy nutné dle doporučení výrobce pryskyřic provést vytvrzování při zvýšené teplotě při dodržení programu postupného zvyšování teploty. [5]

2.2 Lisování za tepla a tlaku

Provádí se za zvýšených teplot a tlaků ve dvou nebo vícedílných kovových formách, které musí mít leštěné nebo lépe tvrdě chromované pracovní povrchy. Formy se vyhřívají nejčastěji elektricky nebo topným médiem a jsou upevněny v hydraulických lisech schopných vyvodit tlaky 10-300 kg/cm². Výchozím materiálem jsou buď prepregy-tzv. lisovací rohože (SMC – sheet moulding compounds), lisovací těsta (DMC- dough moulding compounds) nebo lisovací směsi -premixy (BMC – bulk moulding compounds). [5]

Prepregy – lisovací rohože (SMC) jsou směsi sekaných, nejčastěji skleněných vláken, pojiva, většinou na bázi polyesterových nebo vinylesterových pryskyřic převedeného do částečně vytvrzeného stavu B, plniv, pigmentů a různých aditiv zlepšujících tokové vlastnosti, kvalitu povrchu a upravujících některé vlastnosti, např. snižují hořlavost nebo smrštění. Za zvýšené teploty a tlaku jsou prepregové přířezy schopny ve formě dalšího toku, materiál zcela zaplní dutinu formy a dalším působením tepla nastane kompletní vytvrzení.



Obr. 9. Lisování za tepla [6]

2.3 Vysokotlaké vstřikování

(RTM – resin transfer moulding)

Formy jsou robustní konstrukce, kovové nebo polymerbetonové, aby snesly vysoké vnitřní tlaky.

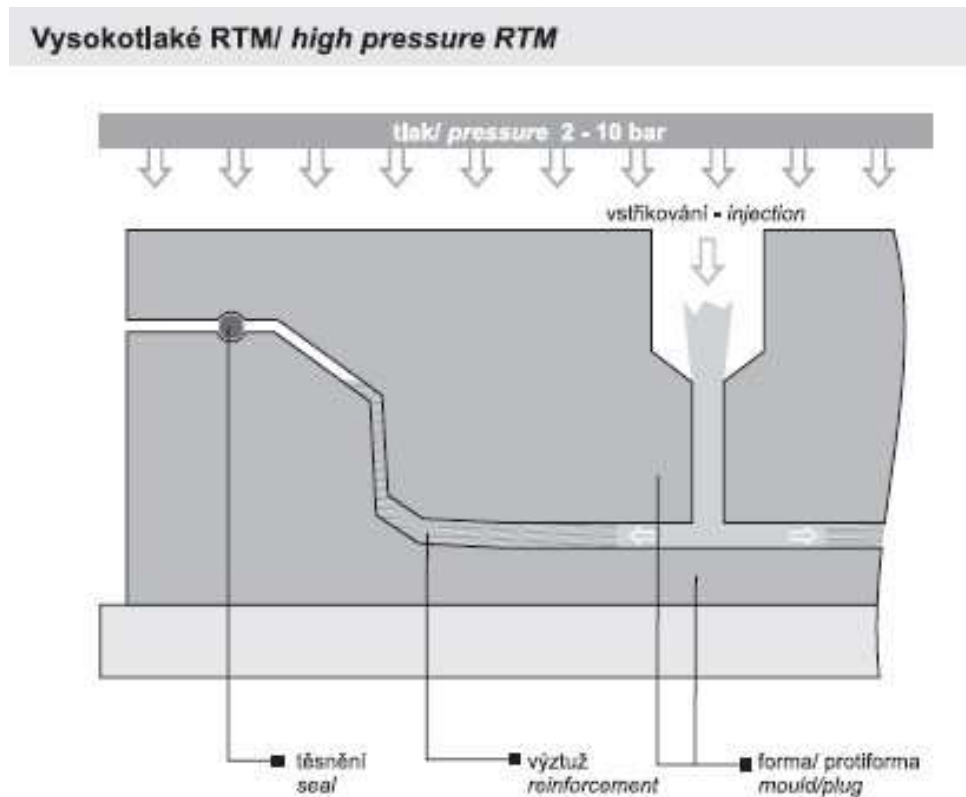
Do formy, opatřené gelcoatem, se vyskládá suchá výztuž dle konstrukčního návrhu, při velkosériové výrobě se vkládají tzv. předlisky z výztužného materiálu. Vyztužující materiál, ať už na bázi skleněných nebo jiných vláken, musí mít strukturu umožňující snadný tok pryskyřičného systému, aby se dosáhlo úplného prosycení v krátkém čase. [5]

Forma se poté uzavře vrchním dílem podobně tuhé konstrukce a zajistí rychloupínacím systémem.

Do vstřikovacího otvoru se umístí injektážní pistole, kterou se přivádí pojivo ze speciálního strojního zařízení – vysokotlaké pumpy se spřaženým regulovatelným směšováním iniciátoru.

Pojivo se vstřikuje tak dlouho, pokud nezačne vytékat z kontrolních otvorů na okrajích formy, což znamená, že výztuž je zcela prosycena v celém objemu dílce.

Pojivový systém je volen tak, aby vytvrzovací reakce s využitím exotermu proběhla v řádu 10-20 minut. [5]



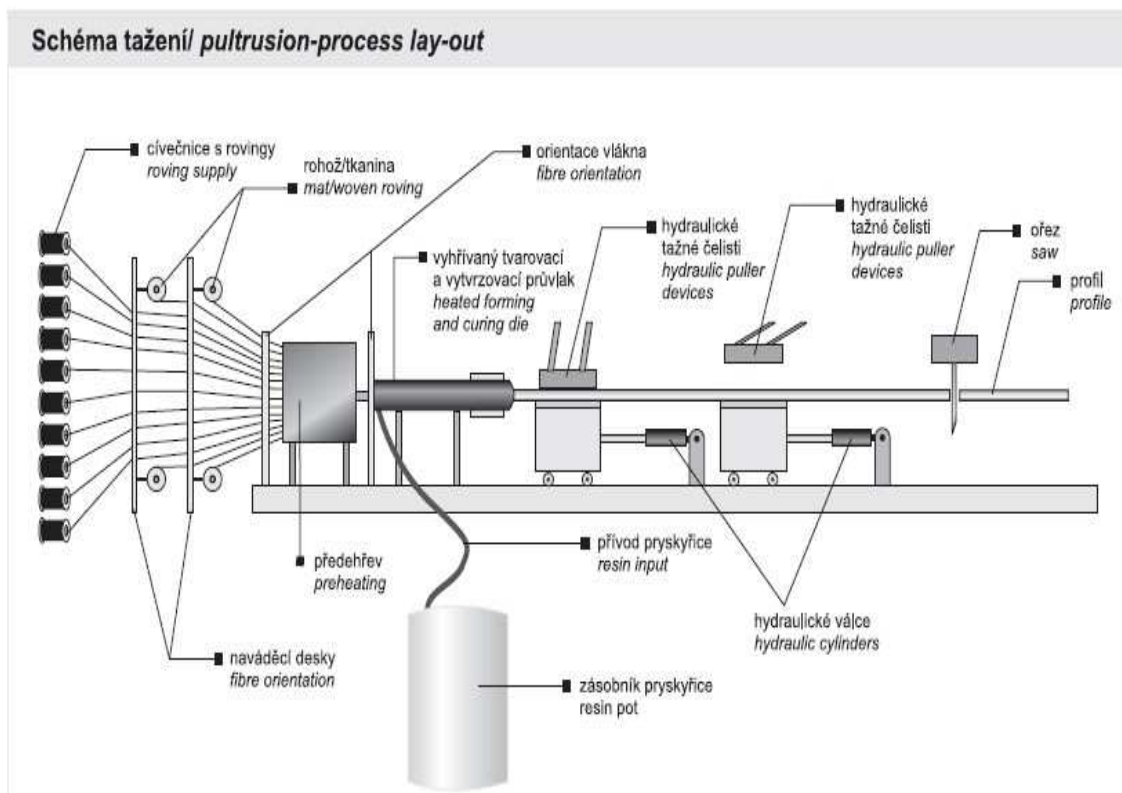
Obr. 10. Vysokotlaké RTM [6]

2.4 Tažení (pultruze)

Touto metodou lze vyrábět velmi efektivně kontinuálním způsobem různé plné, duté i tvarové profily s vysokým obsahem výztuže (až do 80%). Výztuž, nejčastěji skleněná, ale i uhlíková nebo i jiné pramence případně v kombinaci se stuhami z tkanin nebo rohoží pro získání příčného vyztužení, prochází lázní s iniciovanou pryskyřicí a po prosycení a odždímání přebytečné pryskyřice je vtahována do tvarovacích a vytvrzovacích průvlaků (forem), jejichž dutina odpovídá vnějšímu tvaru vyráběných profilů. Modifikací této technologie je tlakové prosycování suché výztuže až v počáteční sekci formy.

V průvlaku dochází buď působením sdíleného tepla (formy jsou vyhřívány elektricky nebo topným médiem) nebo vývojem tepla účinkem vysokofrekvenčního pole k vytvrzení. Kompozitní profil je odtahován regulovatelnou rychlostí hydraulickými čelistmi nebo pásovými elementy a dělen na požadovanou délku.

Variantou prosté pultruze je tzv. pulforming, kdy se během semikontinuálního procesu táhne prosycená výztuž, které je v následujícím kroku v dvoudílné vyhřívané formě udělen konečný tvar, např. listové eliptické pero-pružina s proměnným průřezem po délce. [5]



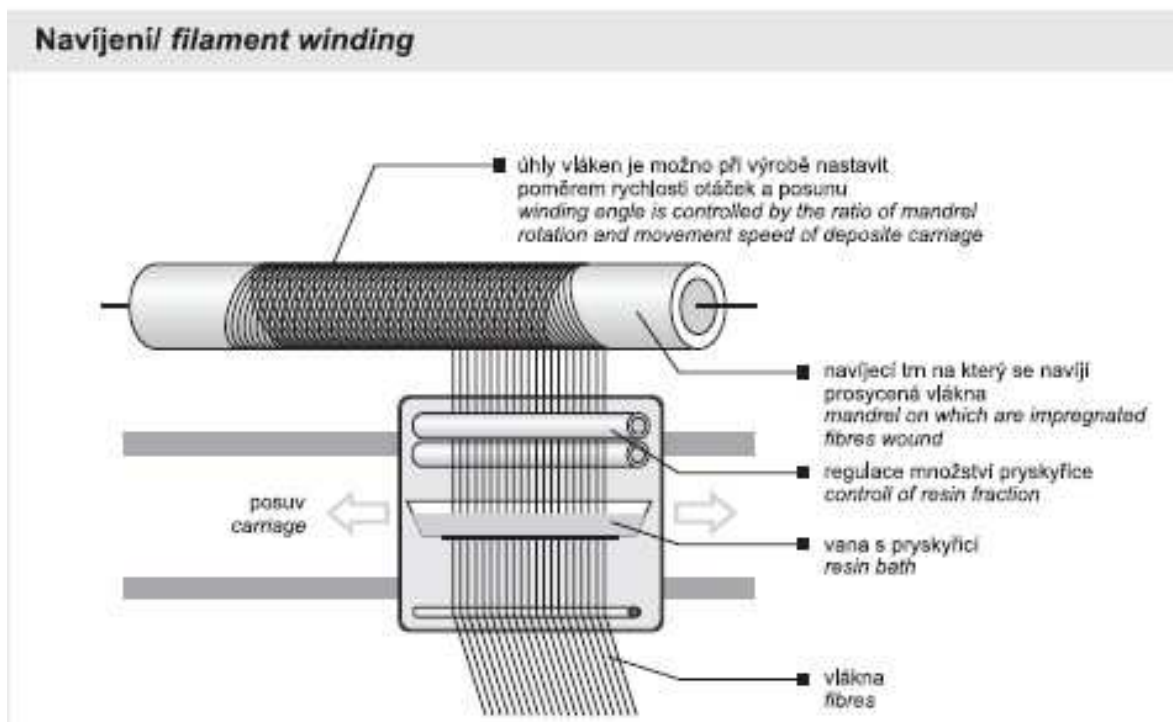
Obr. 11. Schéma tažení [6]

2.5 Navíjení

Tato technologie je založena na kontinuálním navíjení svazku vláken či jinak upravených výztuží na kruhovou, smrštitelnou formu. Vlákna jsou navíjena buď již navlhčena pryskyřicí, nebo se provlhcují až po navinutí. Požadovaných vlastností kompozitu se dosahuje přesným uspořádáním a orientací pramenců vláken a výztuží. Vytvrzení se provádí na jádře, které je potom z vytvrzeného výrobku vyňato.

Výhodou je použití nejlevnější formy výztuže - rovingu. Proces má poměrně velmi dobrou produktivitu a může být vysoce automatizovaný. Hodí se především pro výrobu potrubí, kolen, zásobníků paliv, velkých součástí s konkávním povrchem. Poskytuje výrobky s vynikajícími fyzikálními vlastnostmi. Neexistuje žádný limit pro délku vyráběných trubek, s výhodou se tohoto procesu používá pro výrobu tlakových nádob.

Nevýhodami je vysoká cena navíjecích strojů, nesnadné odstraňování vnitřních forem a poměrně nízká produktivita u výroby tlakových nádrží, kde je nutno používat některé speciální postupy [4]



Obr. 12. Navíjení [6]

2.6 Odstředivé lití

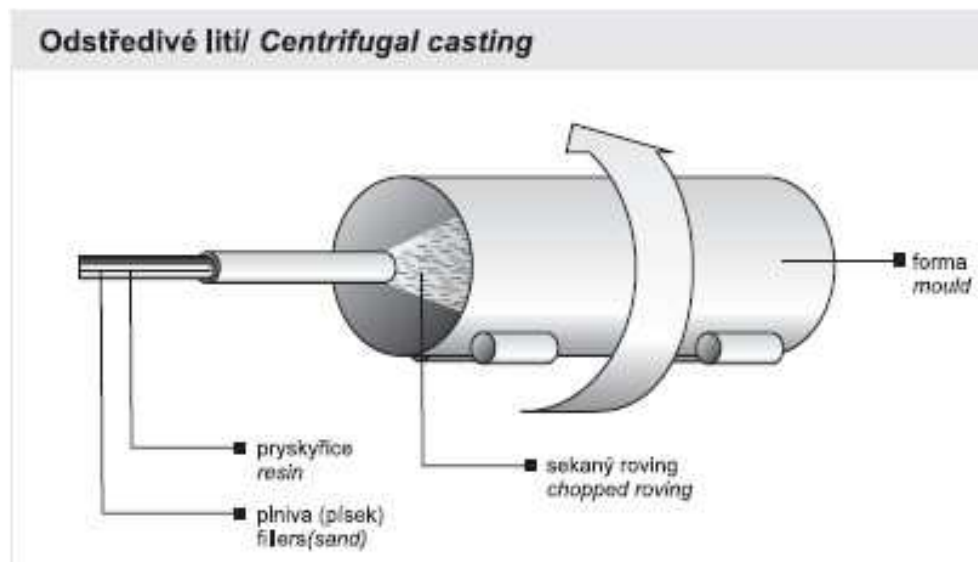
Dutá tělesa rotačního tvaru, zejména potrubí pro zásyp, se vyrábějí na strojním zařízení, které je kombinací strojního stříkání a odstředivého lití.

V duté rotující formě – trubce dané jmenovité světlosti se pohybuje v ose stříkací zařízení, které podle počítačem řízeného programu nanáší směs sekaných vláken, iniciované pryskyřice a různých plniv.

Nanesené vrstvy se postupně zhutňují působením odstředivé síly, vznikající rychlým otáčením formy.

Po vytvrzení lze hotové trubky díky smrštění kompozitu snadno vytáhnout z formy.

[5]



Obr. 13. Odstředivé lití [6]

3 MECHANIKA LAMINÁTŮ

3.1 Teorie kompozitů

Teorie kompozitů vytvořených z vrstev (laminátů) se dělí na:

- **Mikro-mechaniku**

Zabývá se výpočtem vlastností laminy (kompozitní vrstvy) z odpovídajících vlastností jednotlivých komponent a z informací o geometrii, orientaci, uspořádání, mezifázové adhezi a objemovém zlomku výztuže. Mikro-mechanické výpočty jsou nejdůležitější při odlaďování materiálových vlastností a dovolují vypočítat limitující faktory při zlepšování vlastností kompozit. Srovnání experimentálně zjištěných vlastností s teoretickými limitami umožňuje smysluplně zjistit, zda daný kompozit již dosáhl svého maxima užitných vlastností (blíží se horní limitě), nebo zda jeho potenciál ještě nebyl zcela využit (je od horní limity dostatečně vzdálen).

- **Mechaniku orthotropní vrstvy**

- **Makro-mechaniku laminátu**

umožňuje na základě znalostí vlastností jednotlivých vrstev (lamin) spočítat vlastnosti mnohovrstevnatého kompozitu - laminátu - z údajů o počtu, orientaci a uspořádání vrstev. Přitom je zanedbávána mikrostruktura kompozitu (heterogenita) a jednotlivé vrstvy jsou považovány za homogenní a ortotropní. Makro-mechanické výpočty se vždy vztahují ke konkrétnímu tvaru dílce či kompozitního profilu a převládajícímu způsobu jeho namáhání. Jsou proto základem konstrukce zákaznických kompozitních profilů. Makro-mechanické výpočty navíc umožňují eliminovat předem varianty nevhodné pro řešení konkrétního problému a navrhnout optimální počet vrstev a jejich orientaci vůči působícímu - zpravidla víceosému - namáhání.

Vrstva s jednosměrně orientovanými kontinuálními nebo krátkými vlákny (pravidelně a rovnoměrně rozmístěnými v matrici) představuje základní stavební jednotku vláknových kompozit - laminu. Vrstva je ortotropní a má tedy 3 vzájemně kolmé roviny symetrie, které se protínají v hlavních materiálových osách. Tato symetrie umožňuje charakterizovat laminu při vhodně orientovaném jednoosém vnějším namáhání pouze 4 nezávislými materiálovými konstantami, kterými jsou v případě elastické odezvy (malé deformace) modul pružnosti v tahu ve směru vláken E_x , modul pružnosti v tahu ve směru

kolmém na směr vláken E_y , smykový modul pružnosti v rovině xy (G_{xy}) a Poissonův poměr ν_{xy} (pro napětí působící ve směru vláken). [10,11]

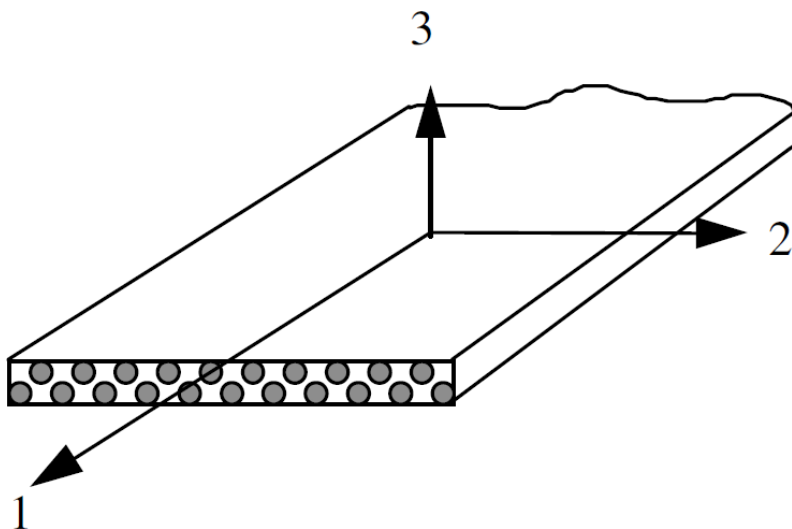
- **Teorii porušování laminátu**

Špičkové kompozity, které obsahují kontinuální vlákna a polymerní matrici, se většinou vyrábějí technologií postupného ukládání elementárních vrstev. Vzniká tak vrstevnatý výrobek - laminát, jehož tloušťka je oproti plošným rozměrům (šířce a délce) obvykle velmi malá (jedná se vlastně o laminátovou skořepinu).

Tuhost, pevnost, tepelná roztažnost a změny rozměrů způsobené vlhkostí absorbovanou matricí lze vypočítat na základě známých vlastností složek (tj. vláken a matrice) pomocí jednoduchých vztahů pouze tehdy, jsou-li vlákna jednosměrně uspořádaná a nezvlněná. Při výpočtu vlastností se samozřejmě předpokládá dokonalá soudržnost obou složek.

3.2 Orthotropní vrstva

Elementární vrstva s jednosměrným uspořádáním vláken, tzv. jednosměrně vyztužená tzv. orthotropní vrstva (OV, řecké orthos znamená rovný, přímý), je základní element laminátů určených pro nejvíce namáhané konstrukce (například primární konstrukce letadel).



Obr. 14. Jednosměrně uspořádaná vlákna v orthotropní vrstvě [10]

U kompozitu s jednosměrně orientovanými (nezvlněnými) vlákny je možné dosáhnout vysokého objemového podílu vláken v_f (0,6 až 0,8). Tloušťky orthotropních

vrstev u laminátů vyrobených z jednosměrných (UD) prepregů se pohybují mezi 0,1 až 0,14 mm.

Elastické vlastnosti orthotropní vrstvy jsou plně charakterizovány čtyřmi elastickými konstantami:

- moduly pružnosti E_1 a E_2
- Poissonovou konstantou (poměrem) ν_{12} (nebo ν_{21})
- modulem pružnosti ve smyku G_{12}

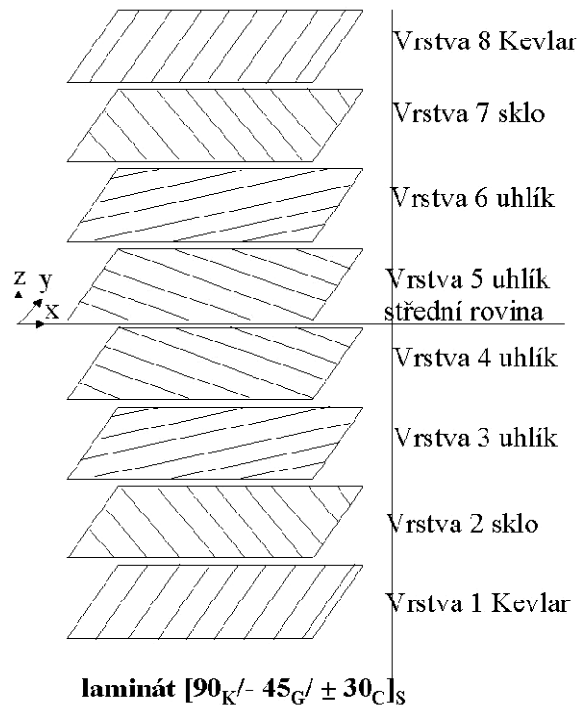
Ve směru 3 (kolmo k ploše vrstvy) jsou většinou předpokládány stejné hodnoty elastických konstant jako ve směru 2.

Vrstvu charakterizují také součinitelé tepelné roztažnosti vrstvy α_1 a α_2 . Rozdíly v jejich hodnotách (tj. anizotropie tepelné roztažnosti) způsobují u laminátu vnitřní pnutí mezi vrstvami. Podobně rozdílné hodnoty tepelné roztažnosti vláken α_f a matrice α_m vedou ke vzniku pnutí na mezifázovém rozhraní vlákna a matrice. Vliv objemových změn způsobených vlhkostí absorbovanou polymerní maticí se projevuje v hodnotách β_1 a β_2 součinitelů.

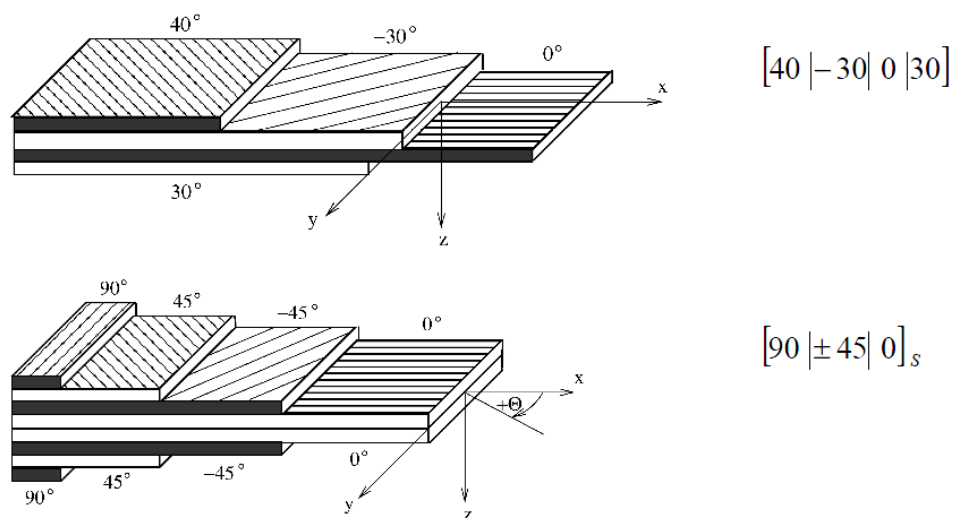
Při odvození jednoduchých vztahů mezi vlastnostmi složek a konstantami orthotropní vrstvy se zanedbává skutečná napjatost v mikroskopických objemech kompozitu. K výpočtu elastických charakteristik vrstvy je potom zapotřebí znát pouze elastické vlastnosti vláken a matrice a objemový podíl vláken v matici v_f (index f je převzat z anglického termínu pro vlákno - “fibre”, v americké angličtině “fiber”).

Vrstvení laminátu

Pro dosažení dobrých vlastností laminátu, vyrobeného z vrstev s jednosměrně orientovanými vlákny, je nutno jednosměrné vrstvy při kladení různě orientovat. Orientaci vrstev zapisujeme kódem, v němž úhel pootočení vláken vůči zvolenému hlavnímu směru laminátu je označen příslušným znaménkem a číslem udávajícím počet stupňů úhlu. Většinou jsou vyráběny lamináty symetrické vůči střední rovině. Symetrii zapisujeme pomocí indexu s . [10]



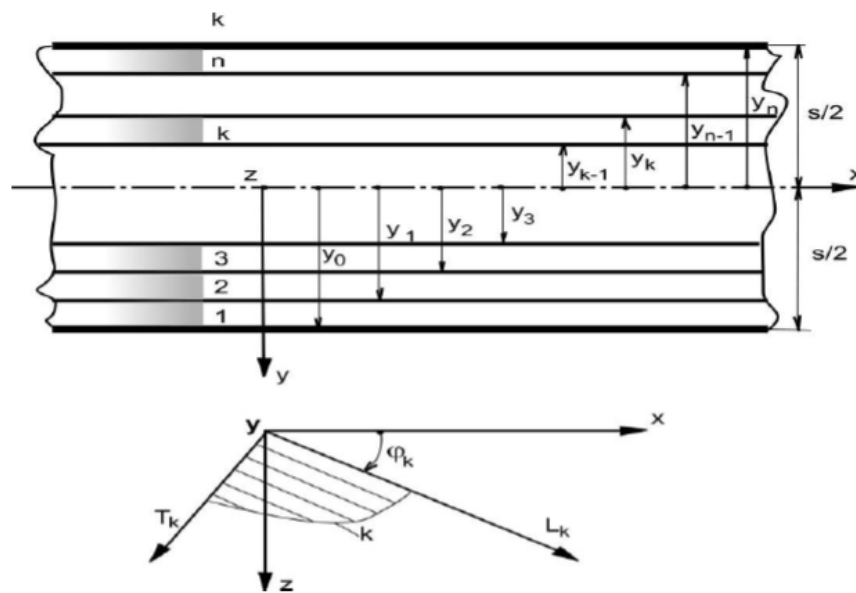
Obr. 15. Vrstvení laminátu [10]



Obr. 16. Ukázky laminátů [9]

Technická laminátová teorie je určitým zobecněním rovnic technické teorie mechanického chování izotropních desek a skořepin. Je tak založena na obdobných předpokladech. Předpokládá se opět rovinný stav napjatosti. Přijata je rovněž Kirchhoffova – Loveova hypotéza o zachování normál ke střešní ploše po deformaci.

Jednotlivé laminy jsou považovány za ortotropní a homogenní vrstvy. Spojení mezi laminami je považováno za ideálně tuhé, tzn., že posunutí jsou po tloušťce laminátu spojitá. [9]



Obr. 17. Laminát a jednotlivé laminy [9]

3.3 Konstituční rovnice laminy

Závislost složek napětí na složkách deformace k – té laminy v jejím přirozeném materiálovém souřadném systému lze psát jako:

$$(\sigma)^{LT} = [S^*]_k^{LT} (\varepsilon^*)^{LT} \quad (1)$$

Kde hodnoty napětí a deformací se vztahují k určitému místu o pořadnici y a kde matice tuhosti k -té laminy je

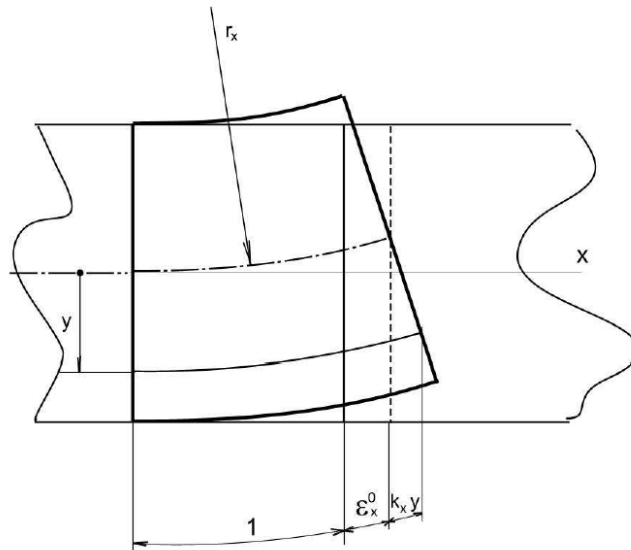
$$[S^*]_k^{LT} = \begin{bmatrix} E_L^{**} & \nu E_L^{**} & 0 \\ \nu E_L^{**} & E_T^{**} & 0 \\ 0 & 0 & 2G_{LT} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Pokud není orientace laminy vůči globálnímu souřadnému systému laminátového prvku roven 0° tj. materiálový souřadný systém k – té laminy je vůči globálnímu souřadnému systému pootočen, budou složky napětí v globálním souřadném systému xz a místě y . [9]

$$(\sigma)^{xz} = [S^*]_k^{xz} (\varepsilon^*)^{xz} \quad (3)$$

Matice tuhosti je dána

$$[S^*]_k^{xz} = [T]_\varphi [S^*]_k^{LT} [T]_\varphi^{-1} \quad (4)$$



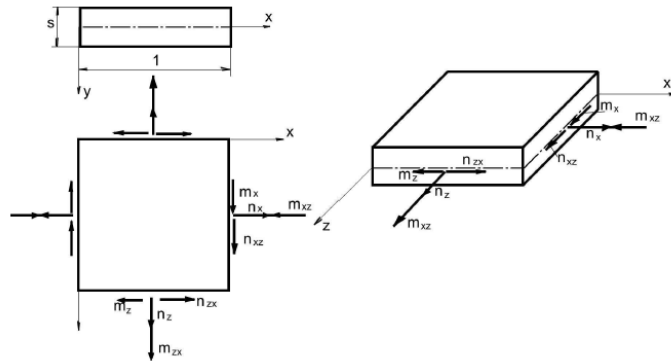
Obr. 18. Složky deformace ve směru globální osy x [9]

Na Obr.18. jsou znázorněny složky deformace ve směru globální osy x v místě vzdáleném od střednice stěny o y . Střední plocha xz je zvolena jako referenční tj. její deformace jsou považovány za membránovou část deformace stěny. K těmto deformacím se v obecném místě y přičítají deformace působené ohybově torzními přetvořeními laminátové stěny. Za předpokladu platnosti Kirchhoffovy-Loveovy hypotézy jsou závislosti těchto složek na pořadnici y dány lineárními vztahy. Pro deformaci v rovině rovnoběžné se střednicí, ve vzdálenosti y je tak [9]

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_{xz} = \gamma/2 \end{pmatrix}^* = \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_{xz}^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_x \\ k_z \\ k_{xz} \end{pmatrix} y \quad (5)$$

V symbolickém zápisu

$$(\varepsilon)^* = (\varepsilon^0) + (k)y \quad (6)$$



Obr. 19. Ekvivalentní systém jednotlivých sil a momentů [9]

$$\begin{pmatrix} n_x \\ n_z \\ n_{xz} \end{pmatrix} = \int_{(s)} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{pmatrix} dy \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_z \\ m_{xz} \end{pmatrix} = \int_{(s)} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{pmatrix} y dy \quad (6)$$

$$(n) = \sum_{k=1}^n \int_{y_{k-1}}^{y_k} (\sigma)_k dy \quad (7)$$

$$(m) = \sum_{k=1}^n \int_{y_{k-1}}^{y_k} (\sigma)_k y dy \quad (8)$$

$$(n) = [A](\varepsilon)^0 + [B](k) \quad (9)$$

$$(m) = [B](\varepsilon)^0 + [D](k) \quad (10)$$

4 LEPENÍ

4.1 Základy technologie lepení

V současnosti se technologie lepení stala jednou ze základních technologií spojování kovů, plastů i kombinovaných systémů materiálů téměř ve všech průmyslových odvětvích. Oproti ostatním technologiím není při technologii lepení téměř nikdy (mimo chemické účinky) ovlivněn základní materiál lepeného spoje (oproti, svarům, vrubům, obrábění apod.).

Důležité parametry technologie lepení jsou efektivnost a ekonomičnost.

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. [8]

Adheze

(přilnavost) je schopnost lepidla (adheziva) dostatečně přilnout k povrchu spojovaného materiálu neboli vzájemné přitahování těchto dvou povrchů adhezními silami. Adheze může vzniknout dvojnásobným způsobem, mechanickou vazbou nebo chemickou vazbou. Mechanická vazba se více uplatní u pórovitých materiálů, lepidlo zde zatéká do nerovností a po ztuhnutí vytvoří jakési ukotvení lepidla ve spojovaném materiálu. Chemická vazba se více uplatní u materiálů s jemným a hladkým povrchem, kde lepidlo přímo chemicky reaguje s povrchem adherentu. Dobře se tak lepí materiály, které mají reaktivní povrch. Jestliže lepidlo nemá schopnost navázat adhezní spojení mezi spojovaným materiálem a lepidlem, spoj se rozlepi na rozhraní lepidlo – lepený materiál a lepidlo je v tomto případě nepoužitelné. [7]

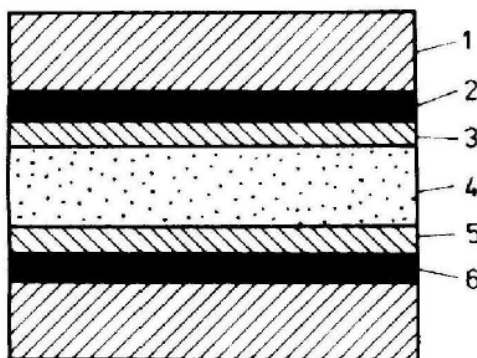
Koheze

tzv. vnitřní adheze, znamená soudržnost. Udává pevnost vlastního lepidla. Charakterizuje stav látky (lepidla), ve kterém drží její částice pohromadě působením mezimolekulárních a valenčních sil (van der Waalsovo přitahování).

Velikost koheze je dána tzv. kohezní energií, která je potřebná k odtržení jedné částičky lepidla od druhé.

Smáčivost

Dalším neméně důležitým faktorem při lepení je smáčivost. Smáčivost charakterizuje povrchové napětí lepidla. Má-li lepidlo smáčet povrch adherentu, musí být jeho hodnota povrchového napětí menší než hodnota povrchového napětí adherentu. Pokud má lepidlo vyšší hodnotu napětí, nedojde ke smočení a lepidlo se na adherentu neudrží a nevytvoří tak vhodné podmínky pro spojení. [7]



Obr. 20. Struktura lepeného spoje [7]

1. adherent
2. adhezní zóna
3. přechodová adhezní zóna
4. kohezní zóna
5. přechodová kohezní zóna
6. adhezní zóna

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.

Vlastní technologie lepení, postup:

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 (obr. 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.

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.

e) 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 adhezního spojení. (odpaření, vytvrzení, polymerace apod.) [8]

4.2 Teorie lepení

Teorie lepení (adhezní spojování dílů) se opírá o vztahy molekul a jejich vzájemného působení. Podle nejnovějších zjištění je sem třeba přiřadit i vztahy vyplývající z nadmolekulární struktury. S molekulovou strukturou souvisí adheze. Přitom se budou dále uplatňovat fyzikální síly, chemické vazby a mezimolekulární síly. V současné době se nejčastěji citují následující teorie adheze:

- molekulová teorie
- elektrostastická teorie
- mechanická teorie
- difúzní teorie
- chemická teorie

4.2.1 Molekulová teorie (adsorpční)

- dnes nejvíce přijímaná adsorpční teorie adheze vychází z analogie jevu smáčení, adsorpce a adheze. Základem adheze je vzájemné působení molekul adherendu a lepidla (adheziva), proto je nevyhnutelné, aby oba druhy molekul měly polární funkční skupiny schopné vzájemného působení. Proces vzniku adhezního spoje lze rozdělit na dvě stadia:

- a) transport molekul adheziva k povrchu adherendu;
- b) vzájemné působení mezimolekulárních sil (van der Waalsovy) po přiblížení molekul adheziva na vzdálenost menší než 0,5 nm. To trvá až do dosažení adsorpční rovnováhy. Za předpokladu dostatečného kontaktu (na molekulární

úrovni) adherendu a adheziva postačují van der Waalovy síly vzhledem ke své vysoké četnosti k dobré pevnosti adhezního spojení. Příčina malé pevnosti adhezního spoje je spatřována především v omezeném kontaktu adherendu a adheziva, a proto úzce souvisí s dokonalostí smáčení povrchu adherendu adhezivem. [8]

4.2.2 Elektrostatická teorie

- tato teorie předpokládá dvojitou vrstvu vytvořenou dotykem dvou rozličných substancí ve spoji jako základ pro vznik adheze. Podle toho je spoj kondenzátorem, kterého rozdílně nabitě desky se přitahují. Jakmile je oddělíme, vzniklý potenciálový rozdíl se musí vybit nebo vyžářit jako elektronová emise. Při podrobnějších studiích však nebyla prokázána korelace mezi velikostí povrchového elektrostatického náboje a pevností odpovídajících adhezních spojení. [8]

4.2.3 Mechanická teorie

- tato teorie vychází z představy, že po proniknutí kapalného adheziva do trhlin a kavit lepeného povrchu, dojde po zatuhnutí adheziva k jeho „zaklínění“ v povrchu adherendu. Mechanické teorie adheze jsou dnes užívány sporadicky jen ve specifických případech, jako je např. adheze pryžových směsí k textilním vláknům či výroba překlížek. [8]

4.2.4 Difuzní teorie

- podle této teorie pevnost spoje vzniká vzájemnou difuzí polymerů (nebo jiných materiálů) napříč rozhraním. Základem tohoto tvrzení je skutečnost, že některé látky (např. polymery) mohou navzájem difundovat, a průběh této difuze, který závisí především na čase, teplotě, viskozitě, kompatibilitě, adherendu a adheziva, relativní molekulové hmotnosti polymerů, ovlivňuje pevnost spoje. Tato teorie však nevysvětluje možnost spojení materiálů, které vzájemně nedifundují, ale úspěšně se lepí (např. kov-sklo). [8]

4.2.5 Chemická teorie

- pro získání pevného spoje, který nebude vykazovat adhezivní, ale kohezní lom, je podle této teorie potřebné, aby materiály, které se mají navzájem spojit, reagovaly vytvořením primárních chemických (kovalentních) vazeb napříč rozhraním. Takovéto vazby sice někdy vznikají, všeobecně však lepení probíhá v termodynamických

podmínkách, které vznik chemických vazeb neumožňují. Pokud by tyto vazby vznikly, nelze jednoznačně tvrdit, že zvyšují pevnost spoje, neboť snahy zavést do adheziv či adherendů reakce schopné funkční skupiny často nevedly ke zlepšení vlastností adhezního spoje. [8]

Rozdělení lepidel

V technické praxi se lepidla rozdělují podle několika hledisek. Nejobecnějším základem pro rozdělení lepidel je jejich chemické složení. Podle původu základní složky se dělí lepidla na přírodní a syntetická. Přírodní se dělí nejčastěji na organická (živ. nebo rostl. původ), (škrob, živ. klišy apod.) a anorganická (vodní sklo sádra cement...). Syntetická dále na lepidla na bázi reaktoplastů, termoplastická, elastomerová (kaučukovitá) a směsná.

Podle fyzikálního charakteru na lepidla pevná, polopevná a tekutá. Tekutá se dělí dále na roztoková, disperzní, pasty a pěny. Dále je možné u reaktivních lepidel využít pro rozdělení typ reakce, který je potřebný pro vytvrzení lepidla. [8]

5 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je sledovat únosnost laminátových lepených spojů v závislosti na vzdálenosti přeplátování, druhu lepidla a materiálu.

Budou slepeny vzorky laminát - laminát, laminát - hliník a laminát - nerezová ocel. U každého případu dojde k přeplátování ve vzdálenosti 10 mm a 40mm. Poté bude provedena zkouška tahem a ohybem, ze kterých budeme určovat únosnost. V závěru bude vytvořen model lepeného spoje v FEM programu a výsledky budou porovnány s naměřenými.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 PŘÍPRAVA LEPENÝCH SPOJŮ

6.1 Výroba zkušebních vzorků

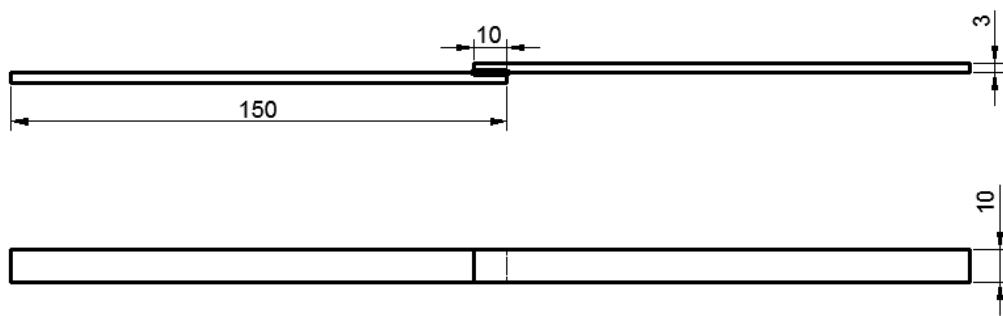
Jako zvolený materiál pro lepení byl zvolen sklolaminát, nerezová ocel a hliník.

Od externí firmy byly dodány laminátové desky, ze kterých se nařezaly v dílnách části pro lepení.

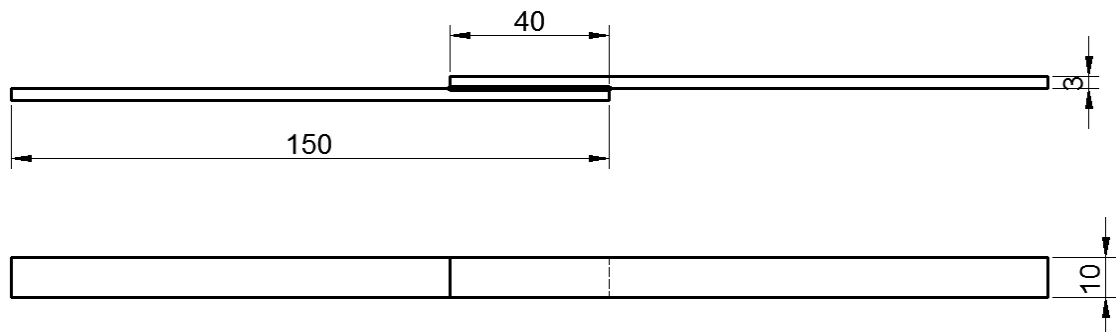
- Povrch částí byl obroušený brusným papírem (80) v celé šířce vzorku a délce nejméně 12 respektive 42 mm.
- Po obroušení se obroušená strana ponořila do acetonu.
- Po odmaštění v acetonu se vzorky nechali odvětrat.
- Dále byly nařezány části z nerezové oceli a hliníku
- Poté byly očištěny a obroušeny
- Nakonec byly stejně jako laminátové vzorky odmaštěny



Obr. 21. Broušení laminátových vzorků



Obr. 22. Tvar a rozměry vzorku s překrytím 10 mm



Obr. 23. Tvar a rozměry vzorku s překrytím 40 mm

6.2 Lepení vzorků

Budou slepeny vzorky:

- laminát – laminát
- laminát – hliník
- laminát – nerezová ocel

U vzorků byly zvoleny dva způsoby přeplátování:

- 10 mm
- 40 mm

Vzorky se budou lepit dvěma lepidly:

1. Lepící tmel se skleným vláknem Colpoly BP 108. K jeho vytvrzení byl použit Butanox 1,5 – 2 %.
2. Dvousložkové lepidlo 3 M Scotch – Weld 7260 B/A FC

Podrobnosti lepidel viz. technické listy v příloze.

Postup lepení u prvního lepidla:

V laboratořích byly obě složky naváženy, poté byly ručně promíchány a naneseny na obě lepené části.

Postup lepení u druhého lepidla:

U druhého lepidla byla použita vytláčovací pistole se dvěma písty a statický mixér pro lepší promíchání směsi.



Obr. 24. Vytlačovací pistole se statickým mixérem



Obr. 25. Lepené vzorky

Norma ČSN EN 1465 (stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených spojů) předepisuje:

- Zkušební zařízení
- Zkušební tělesa
- Kondicionování, zkušební prostředí
- Postup zkoušky
- Vyjádření výsledků
- Protokol o zkoušce

Doporučené přeplátování je $12,5 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$ délka vzorků $100 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$ a šířka $25 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$. Výsledky se vyjádří jako aritmetický průměr a variační koeficient síly při přetržení v newtonech nebo jako napětí při přetržení v megapascalch. V diplomové práci nebylo vzhledem jejímu zaměření postupováno dle normy.

7 MĚŘENÍ

Pevnost lepených spojů byla měřena na trhacím stroji Zwick 1456. Naměřené hodnoty byly poté vyhodnoceny softwarem TestExpert.

Zkušební vzorky byly nejdříve zatěžovány na trhacím stroji jednoosým tahem při teplotě okolí 23°C a dále byla provedena zkouška ohybem.

Z naměřených hodnot byl vypočítán aritmetický průměr, výběrová směrodatná odchylka, variační koeficient, nejistota měření typu A. Tyto hodnoty byly zapsány do tabulky a byly vytvořeny grafy.



Obr. 26. Trhací stroj Zwick 1456

tab. 1 Technické údaje stroje Zwick 1456

Maximální posuv příčnicku	800 mm/min
Snímače síly	2,5 a 20 kN
Teplotní komora	y80/+250 °C
TestExpert software	Tah/Ohyb/Tlak

$$\bar{x} = \frac{x_i}{n} \quad (11)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (13)$$

$$u_{ak} = \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot k \quad (14)$$

Bude měřeno pouze pět vzorků od každého přeplátování, proto nemůžeme provést test normality, a tudíž ani vypočítat konfidenční interval pro průměr. Protože počet měření je menší než deset používáme u nejistoty typu A korigovanou nejistotu vzorec 13. Koeficient k pro pět měření je 1,5[15].

8 ZKOUŠKA NA TAH

Jako první se přistoupilo ke zkoušce jednoosým tahem.

8.1 Laminát – laminát

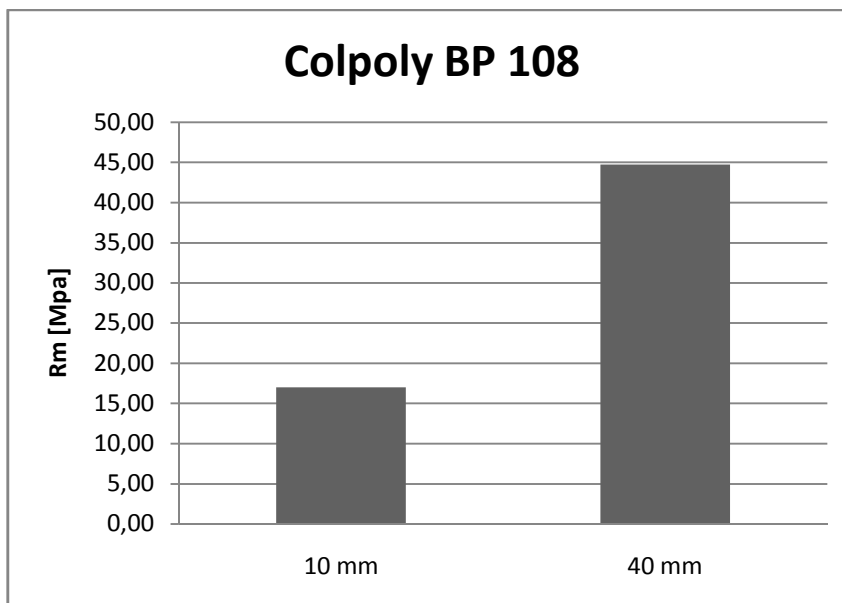
8.1.1 Lepidlo Colpoly BP 108

Tab. 2. Naměřené hodnoty při překrytí 10mm

překrytí 10mm			
č. měření	R_m	R_B	F_m
	[MPa]	[MPa]	[N]
1	21,14	21,14	704,54
2	13,47	13,47	448,85
3	22,57	22,57	752,18
4	12,41	12,06	413,67
5	15,43	15,22	514,16
x	17,00	16,89	566,68
s	4,59	4,69	152,86

Tab. 3. Naměřené hodnoty při překrytí 40mm

překrytí 40mm			
č. měření	R_m	R_B	F_m
	[MPa]	[MPa]	[N]
1	48,00	48,00	1599,77
2	43,81	41,15	1460,18
3	36,35	36,35	1211,60
4	46,82	46,04	1560,47
5	48,64	48,64	1621,05
x	44,72	44,04	1490,61
s	5,04	5,20	167,77



Obr. 27. Únosnost závislá na překrytí

Z grafu (Obr. 27) a tabulek (Tab. 2) a (Tab. 3) je únosnost lepeného spoje s překrytím 10 mm 38,01% únosnosti spoje s překrytím 40 mm.

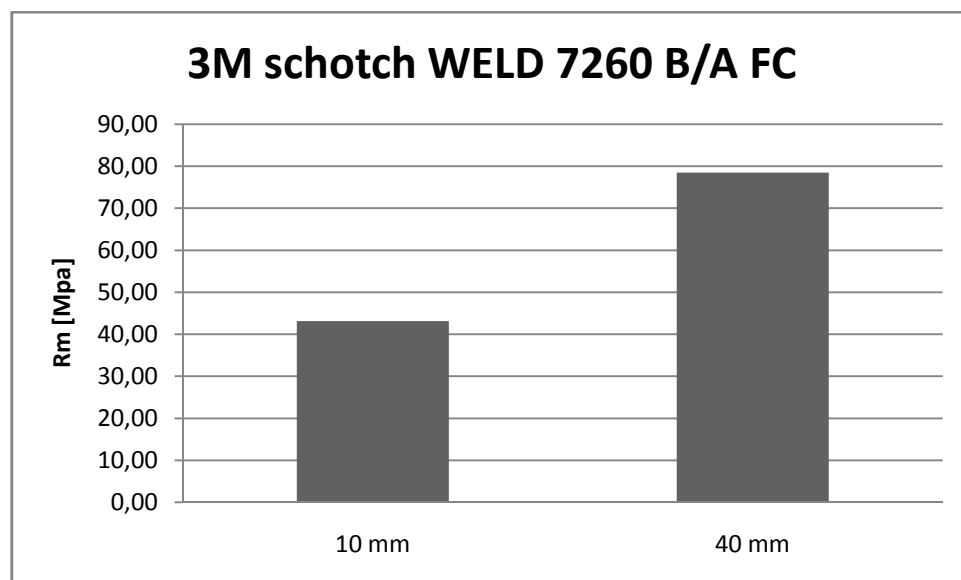
8.1.2 Lepidlo 3M schotch WELD 7260 B/A FC

Tab. 4. Naměřené hodnoty při překrytí 10mm

překrytí 10mm			
č. měření	R _m	R _B	F _m
	[MPa]	[MPa]	[N]
1	45,38	45,38	1497,59
2	48,13	48,13	1588,22
3	43,71	43,71	1442,43
4	39,23	37,9	1294,64
5	39,37	37,5	1299,31
x	43,16	42,52	1424,44
s	3,86	4,68	127,48

Tab. 5. Naměřené hodnoty při překrytí 40mm

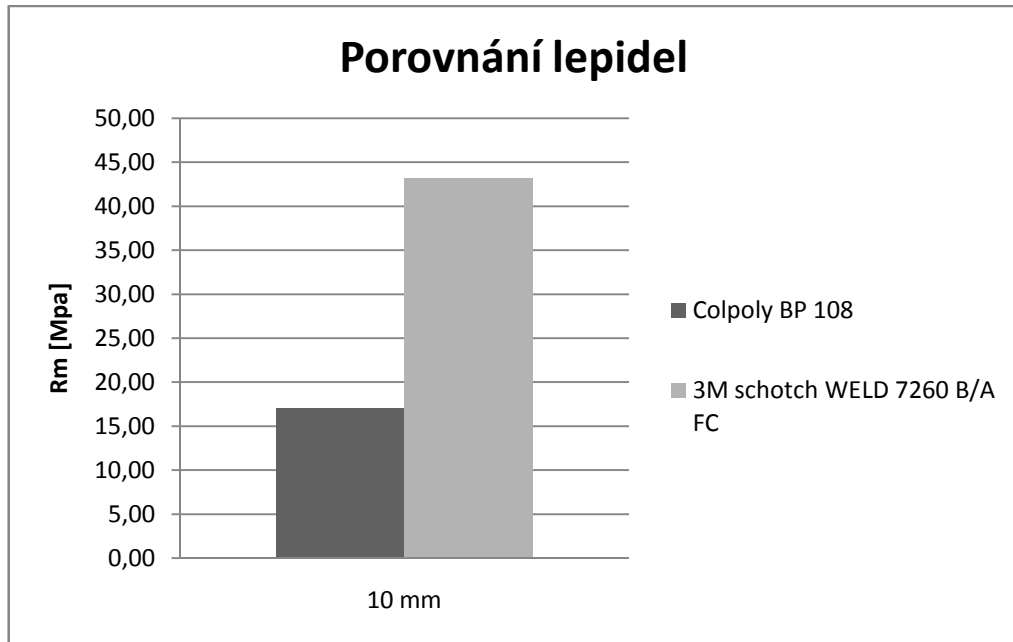
překrytí 40mm			
č. měření	R _m	R _B	F _m
	[MPa]	[MPa]	[N]
1	78,77	76,86	2599,26
2	73,3	73,19	2418,76
3	84,37	84,37	2784,09
4	75,52	71,05	2492,05
5	80,45	80,39	2654,91
x	78,48	77,17	2589,81
s	4,31	5,38	142,20



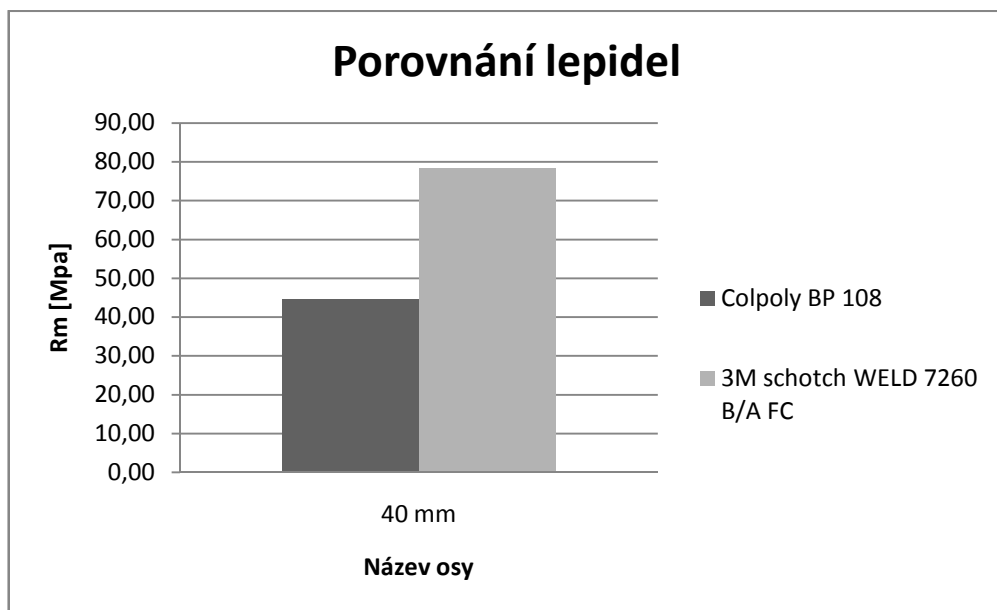
Obr. 28. Závislost únosnosti na překrytí

Z grafu (Obr. 28) a tabulek (Tab. 4) a (Tab. 3) je únosnost lepeného spoje s překrytím 10 mm 55% únosnosti spoje s překrytím 40 mm.

Plocha lepeného spoje se zvětšila o 300%, naproti tomu se u prvního lepidla únosnost zvýšila o 163% vzhledem k vzorkům 10 mm. U druhého pak pouze o 81,84%.

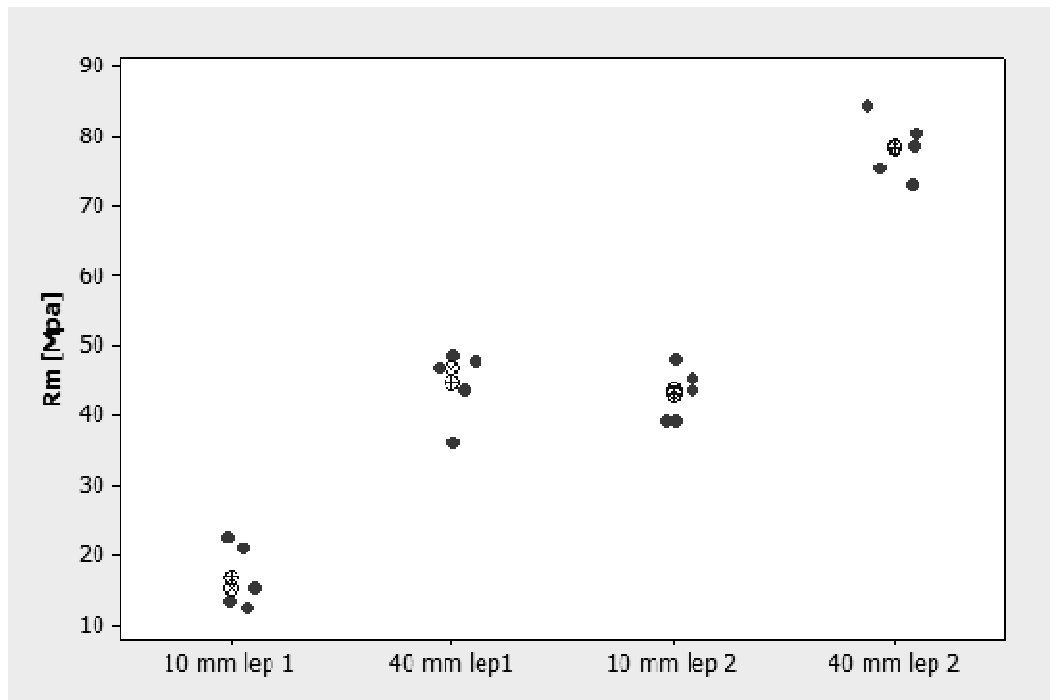


Obr. 29. Porovnání námi vybraných lepidel při překrytí 10mm

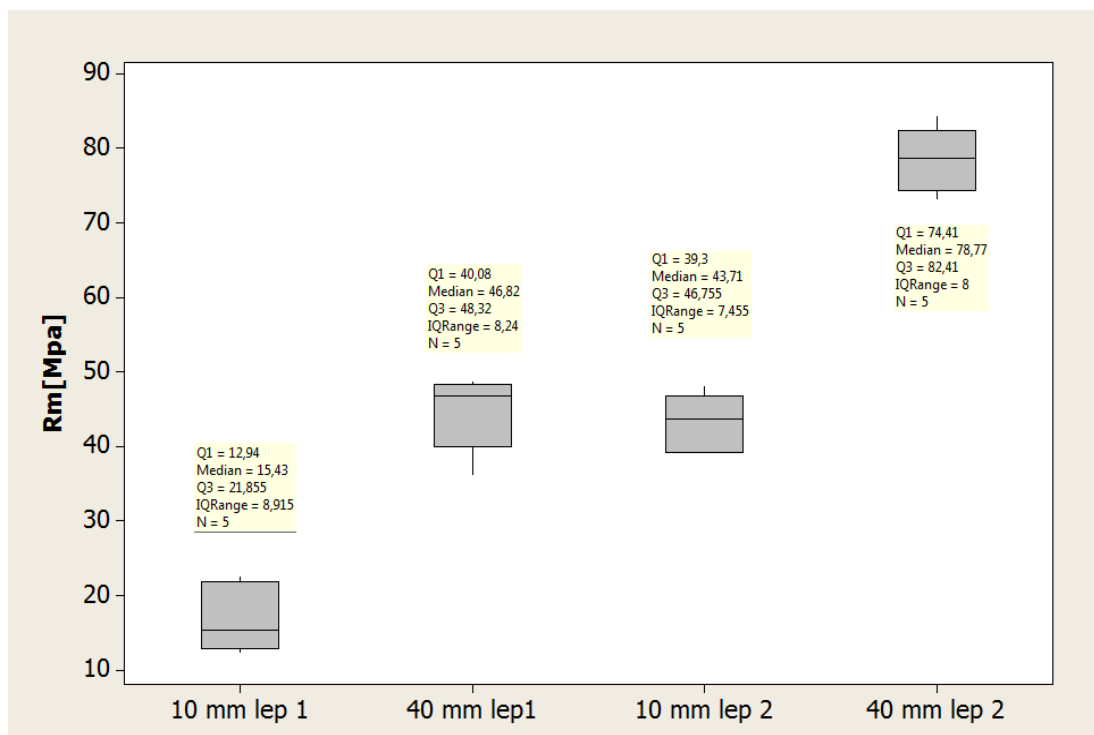


Obr. 30. Porovnání námi vybraných lepidel při překrytí 40mm

Na grafu (Obr. 29) vidíme porovnání lepidla Colpoly BP 108 a lepidla 3M Schotch weld 7260 B/A FC u vzorku s přelátováním 10mm. Z grafu plyne větší pevnost lepidla 3M Schotch weld 7260 B/A FC a to o 153,88% oproti Colpoly BP 108. Na grafu (Obr. 30) máme také srovnání lepidel, tentokrát ale u vzorků s překrytím 40mm. Lepidlo 3M Schotch weld 7260 B/A FC je opět pevnější, ale rozdíl je menší. Únosnost se zvýšila o 75,49%.



Obr. 31. Rozptyl hodnot



Obr. 32. Naměřené hodnoty v boxovém grafu

Tab. 6 Statistické hodnoty

Variable	N	Mean	SE Mean	StDev	CoefVar	Q1	Median	Q3	IQR
40 mm lep1	5	44,72	2,25	5,04	11,26	40,08	46,82	48,32	8,24
10 mm lep 1	5	17,00	2,05	4,59	26,98	12,94	15,43	21,86	8,92
40 mm lep 2	5	78,48	1,93	4,31	5,49	74,41	78,77	82,41	8,00
10 mm lep 2	5	43,16	1,73	3,86	8,95	39,30	43,71	46,76	7,46

Tabulka (Tab. 6) a obrázky (Obr. 31, Obr. 32) nám dávají představu o námi naměřených datech. Tabulka (Tab. 6) ukazuje aritmetický průměr, nejistota měření typu A, výběrovou směrodatnou odchylku, první kvartil, medián, druhý kvartil a mezikvartilové rozpětí. Můžeme si všimnout, že u druhého lepidla se můžeme více spolehnout na průměr oproti prvnímu lepidlu, protože variační koeficient je do 10%. U druhého lepidla u 40mm je variační koeficient 26,98%. Ke snížení této hodnoty by bylo potřeba změřit více vzorků, aby byl průměr průkaznější.



Obr. 33. Vzorky po porušení na trhače

Na obrázku (Obr. 33) vidíme porušené vzorky po zkoušce na tah. První dva zleva byly slepeny lepidlem Colpoly BP 108, další pak lepidlem 3M schotch weld 7260. Vzorky jsou porušené v laminátu v místě spoje. Pouze u lepidla Colpoly BP u přeplátování 10 mm, došlo k porušení přímo ve spoji a nebyl tak porušen základní materiál.

8.2 Laminát – hliník

8.2.1 Lepidlo Colpoly BP 108

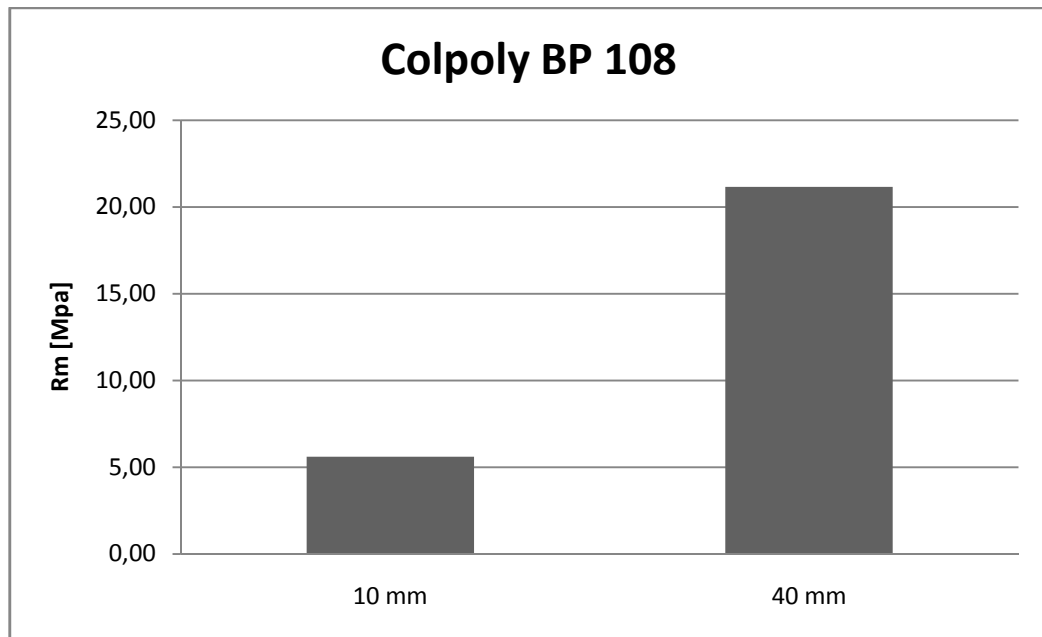
Laminát s hliníkem se lepil lepidlem Colpoly BP 108, rozměr laminátu byl zachován jako v předchozí části. Rozměr hliníkové plátu byl 150 x 10 x 1 mm.

Tab. 7. Naměřené hodnoty při překrytí 10mm

překrytí 10mm			
č. měření	R_m	R_B	F_m
	[MPa]	[MPa]	[N]
1	3,3	3,23	108,92
2	4,74	4,74	156,4
3	7,23	7,23	238,46
4	7,22	7,16	238,42
5	5,52	5,52	182,09
x	5,60	5,58	184,86
s	1,68	1,69	55,51

Tab. 8 Naměřené hodnoty při překrytí 40mm

překrytí 40mm			
č. měření	R_m	R_B	F_m
	[MPa]	[MPa]	[N]
1	22,93	22,93	756,74
2	14,24	14,24	469,88
3	20,9	20,9	689,81
4	24,38	24,38	776,67
5	23,38	23,38	771,67
x	21,17	21,17	692,95
s	4,07	4,07	129,47



Obr. 34. Porovnání lepidel při překrytí 10mm

Z grafu (Obr. 34) a tabulek (Tab. 7, Tab. 8) je únosnost lepeného spoje s překrytím 10 mm 26,47% únosnosti spoje s překrytím 40 mm.

8.2.2 Lepidlo 3M Schotch weld 7260 B/A FC

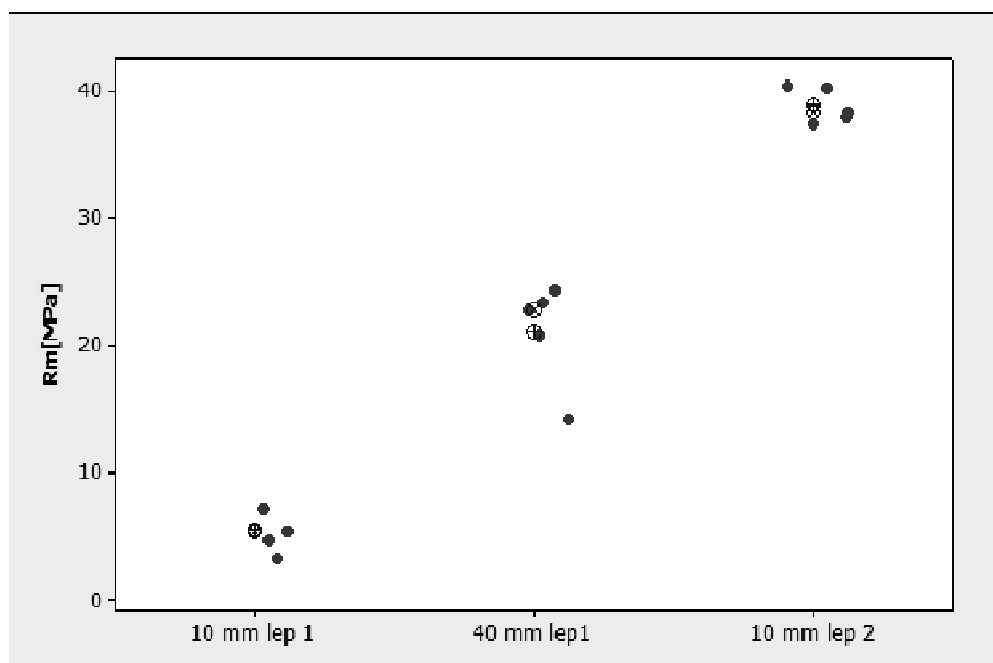
Tab. 9. Naměřené hodnoty pro překrytí 10 mm

překrytí 10mm			
č. měření	R _m	R _B	F _m
	[MPa]	[MPa]	[N]
1	40,37	31,14	1332,12
2	37,41	29,93	1234,50
3	40,29	32,80	1329,62
4	38,39	29,17	1266,77
5	37,98	28,20	1253,40
x	38,89	30,25	1283,28
s	1,36	1,79	44,94

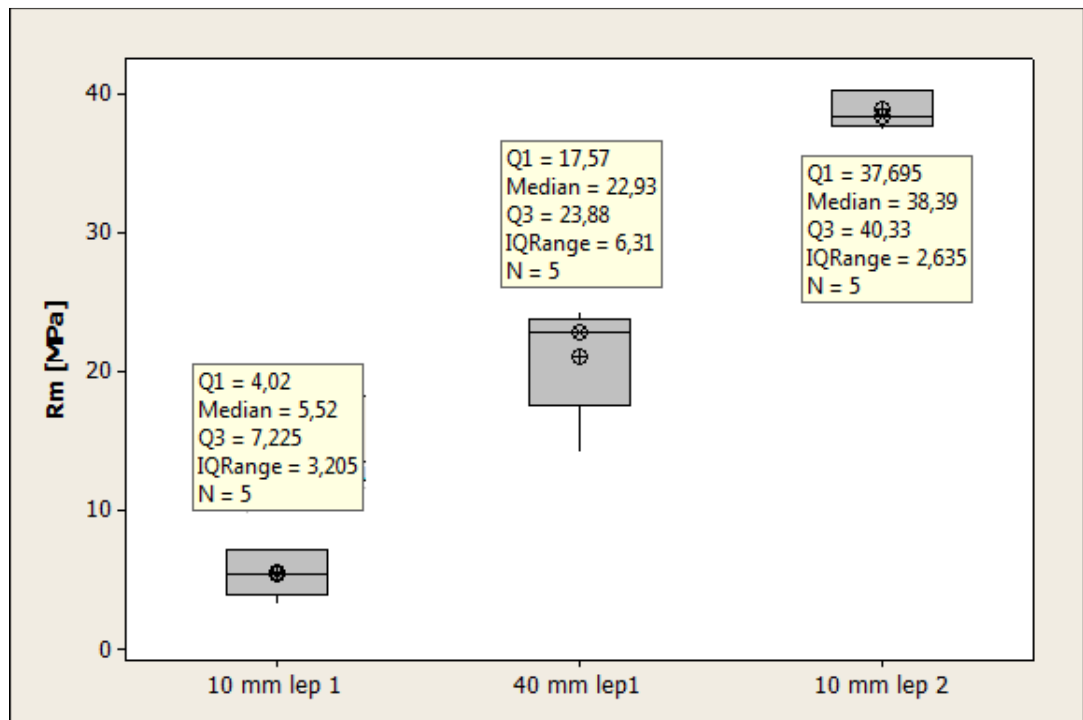
Na obrázku (*Obr. 35*) je porušený materiál po zkoušce na tah. První dva vzorky zleva jsou slepeny lepidlem Colpoly BP 108, další pak lepidlem 3M Scotch weld 7260. Vidíme, že vzorek je u prvních dvou vzorků zleva porušený ve spoji, aniž by porušil laminát. U posledního vzorku však došlo k porušení v hliníkovém plátku. Lepidlo má tedy větší únosnost než lepený materiál.



Obr. 35. Porušené vzorky po zkoušce na tah



Obr. 36. Rozptyl hodnot



Obr. 37. Boxový diagram

Tab. 10. Statistické hodnoty

Variable	Mean	SE Mean	StDev	Variance	CoefVar	Q1	Median	Q3
10 mm lep 1	5,602	0,752	1,682	2,829	30,03	4,020	5,520	7,225
40 mm lep1	21,17	1,82	4,07	16,60	19,25	17,57	22,93	23,88
10 mm lep 2	38,888	0,609	1,362	1,855	3,50	37,695	38,390	40,330

8.3 Laminát – nerez

Vzorky lepených spojů s laminátem byly provedeny na vzorku o rozměrech 150 x 10 x 3mm.

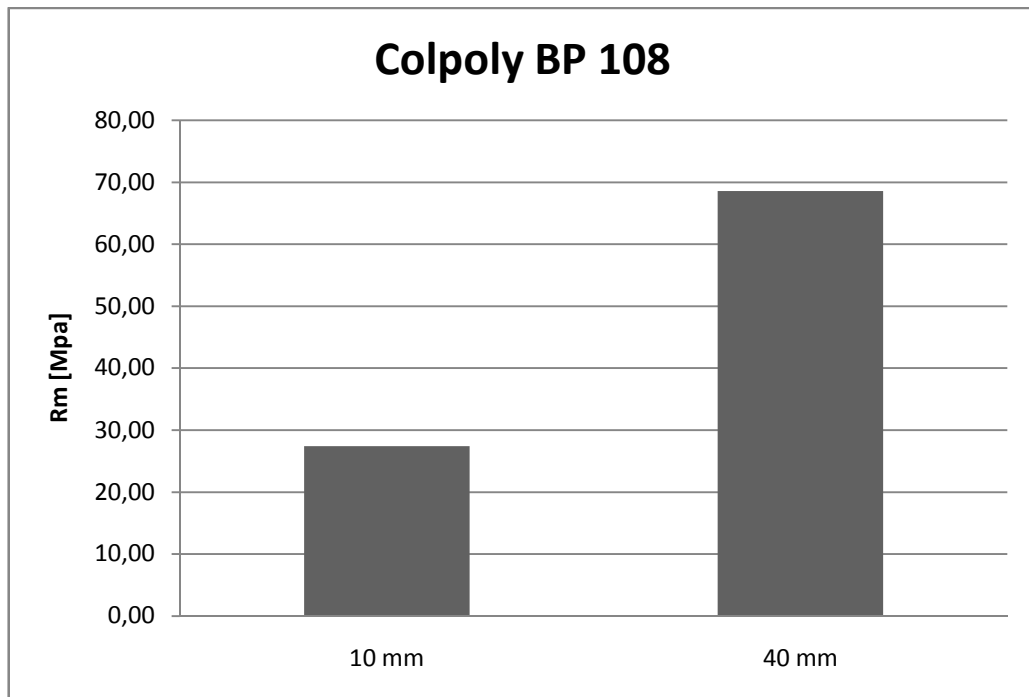
8.3.1 Lepidlo Colpoly BP 108

Tab. 11. Naměřené hodnoty při překrytí 10mm

překrytí 10mm			
č. měření	R _m	R _B	F _m
	[MPa]	[MPa]	[N]
1	33,69	33,69	1111,63
2	24,79	24,79	818,01
3	26,78	26,78	883,78
4	22,83	21,91	753,35
5	29,01	29,01	957,4
x	27,42	27,24	904,83
s	4,19	4,45	138,25

Tab. 12. Naměřené hodnoty při překrytí 40mm

překrytí 40mm			
č. měření	R _m	R _B	F _m
	[MPa]	[MPa]	[N]
1	64,92	64,92	2142,44
2	75,37	75,37	2487,32
3	71,54	71,54	2360,93
4	55,03	54,8	1816,1
5	76,03	76,03	2508,96
x	68,58	68,53	2263,15
s	8,77	8,85	289,25



Obr. 38. Závislost únosnosti na překrytí

Z grafu (Obr. 38) a tabulek (Tab. 11) a (Tab. 12) je únosnost lepeného spoje s překrytím 10 mm 39,98% únosnosti spoje s překrytím 40 mm.

Tab. 13 Naměřené hodnoty při překrytí 10mm

překrytí 10mm			
č. měření	R _m	R _B	F _m
	[MPa]	[MPa]	[N]
1	61,49	61,49	2029,21
2	74,82	74,82	2469,16
3	81,93	81,93	2703,82
4	73,03	73,01	2410,10
5	81,46	81,46	2688,29
x	74,55	74,54	2460,12
s	8,29	8,29	273,73

Tab. 14. Naměřené hodnoty při překrytí 40mm

překrytí 40mm			
č. měření	R _m	R _B	F _m
	[MPa]	[MPa]	[N]
1	108,29	107,87	3573,62
2	119,80	108,44	3953,52
3	106,20	94,48	3504,54
4	105,93	96,39	3495,65
5	108,20	93,48	3606,31
x	109,68	100,13	3626,73
s	5,76	7,40	188,51



Obr. 39. Závislost únosnosti na překrytí

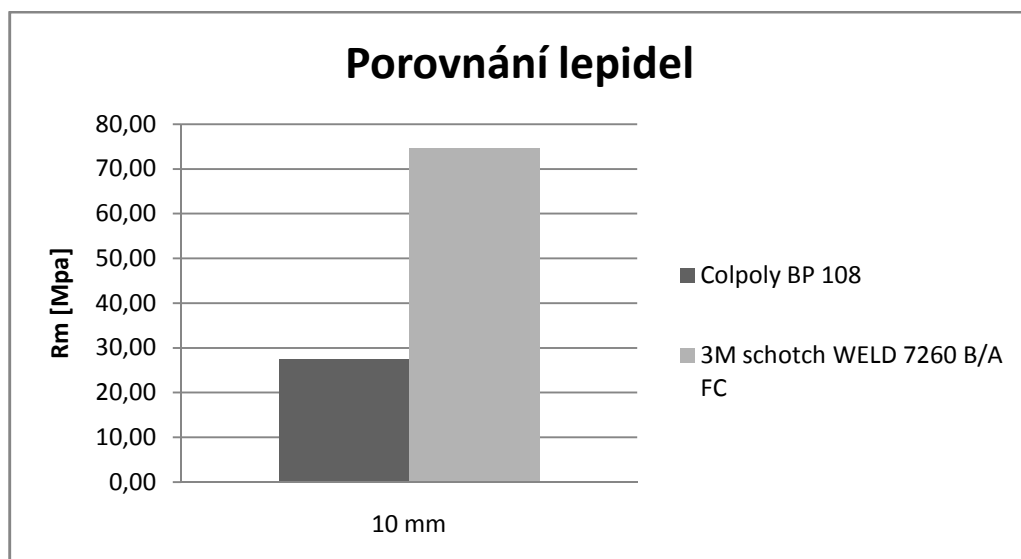
Z grafu (Obr. 39) a tabulek (Tab. 13) a (Tab. 14) je únosnost lepeného spoje s překrytím 10 mm 68 % únosnosti spoje s překrytím 40 mm.

U prvního lepidla se únosnost zvětšila o 150 % vzhledem ke vzorkům 10 mm. U druhého pak pouze o 47,12%.

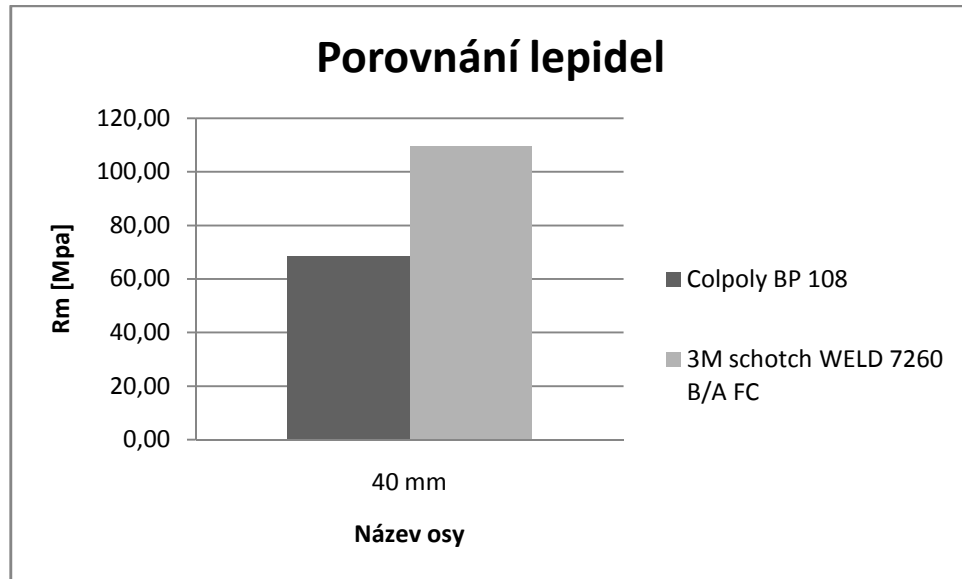


Obr. 40. Vzorok po měření

Na obrázku (Obr. 40) je porušený materiál po zkoušce na tah. První dva vzorky zleva jsou slepeny lepidlem Colpoly BP 108, další pak lepidlem 3M Scotch weld 7260 B/A FC. Vidíme, že u lepidla Colpoly BP 108 došlo porušení v samotném spoji zatímco u lepidla 3M Scotch weld v samotném laminátu.

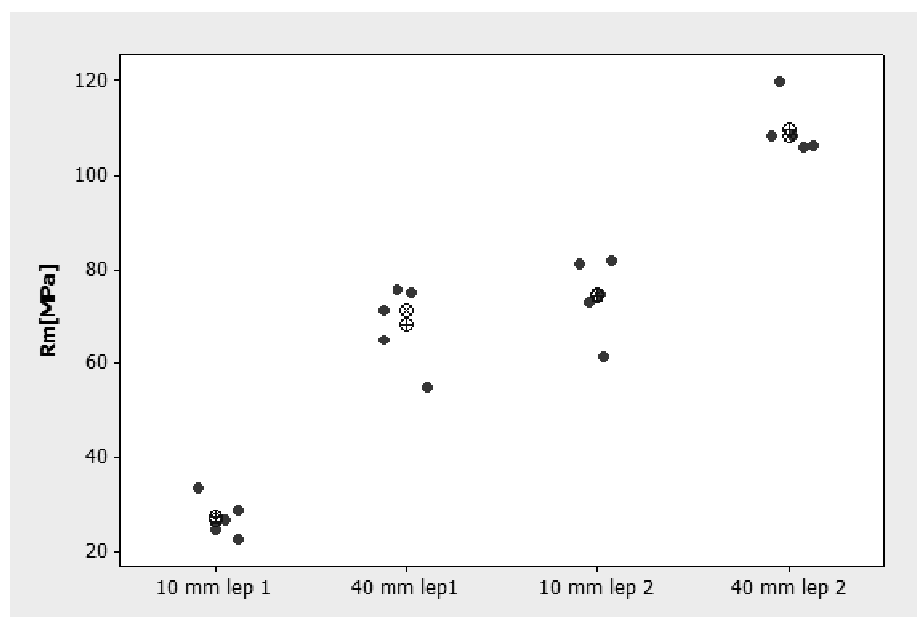


Obr. 41. Porovnání lepidel

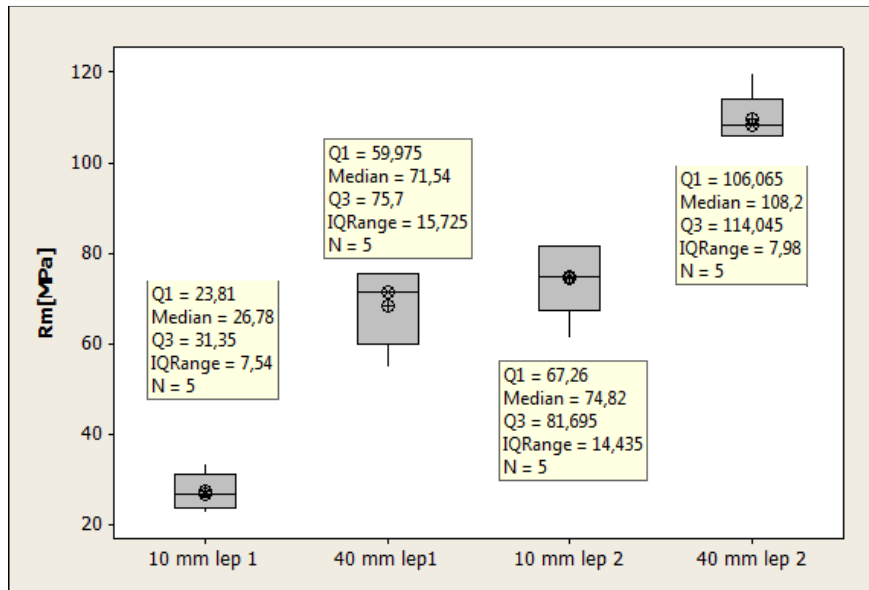


Obr. 42. Porovnání lepidel

Na grafu (Obr. 41) vidíme porovnání lepidla Colpoly BP 108 a lepidla 3M Schotch weld 7260 B/A FC u vzorku s přeplátováním 10mm. Z grafu opět plyne větší pevnost lepidla 3M Schotch weld 7260 B/A FC a to o 171 % oproti Colpoly BP 108. Na grafu Obr. 42) máme také srovnání lepidel, tentokrát ale u vzorků s překrytím 40mm. Lepidlo 3M Schotch weld 7260 B/A FC je pevnější, ale rozdíl je menší. Únosnost se zvýšila o 59,93%.



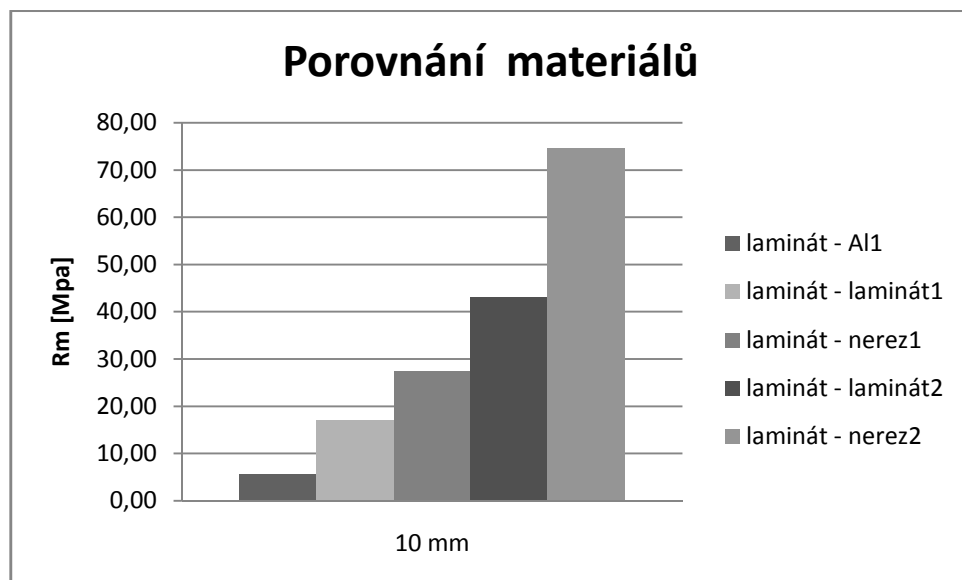
Obr. 43. Rozptyl hodnot



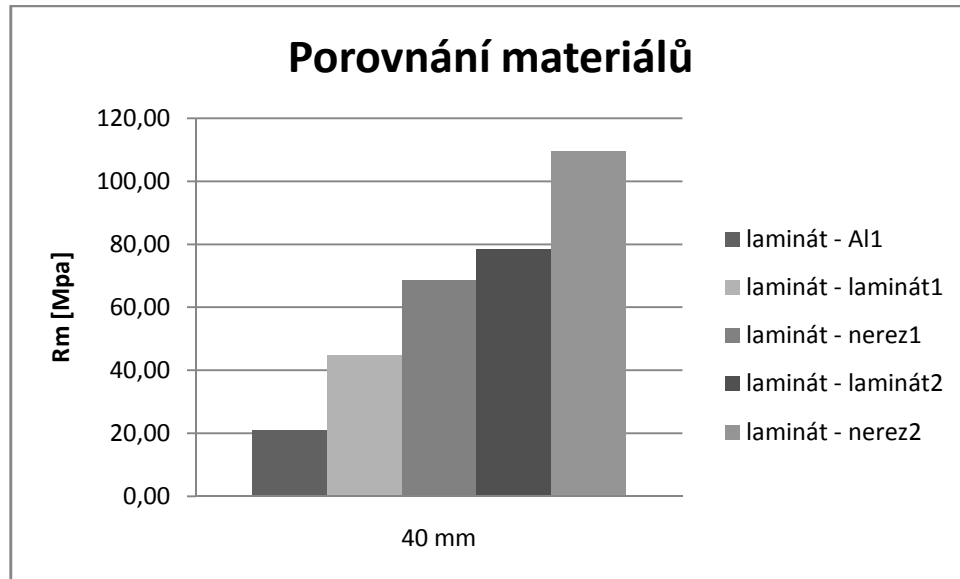
Obr. 44. Boxový diagram

Tab. 15. Statistické hodnoty

Variable	Mean	SE Mean	StDev	Variance	CoefVar	Q1	Median	Q3
10 mm lep 1	27,42	1,87	4,19	17,56	15,28	23,81	26,78	31,35
40 mm lep1	68,58	3,92	8,77	76,84	12,78	59,98	71,54	75,70
10 mm lep 2	74,55	3,71	8,29	68,79	11,13	67,26	74,82	81,70
40 mm lep 2	109,68	2,58	5,76	33,18	5,25	106,07	108,20	114,05



Obr. 45. Porovnání materiálů při překrytí 10mm



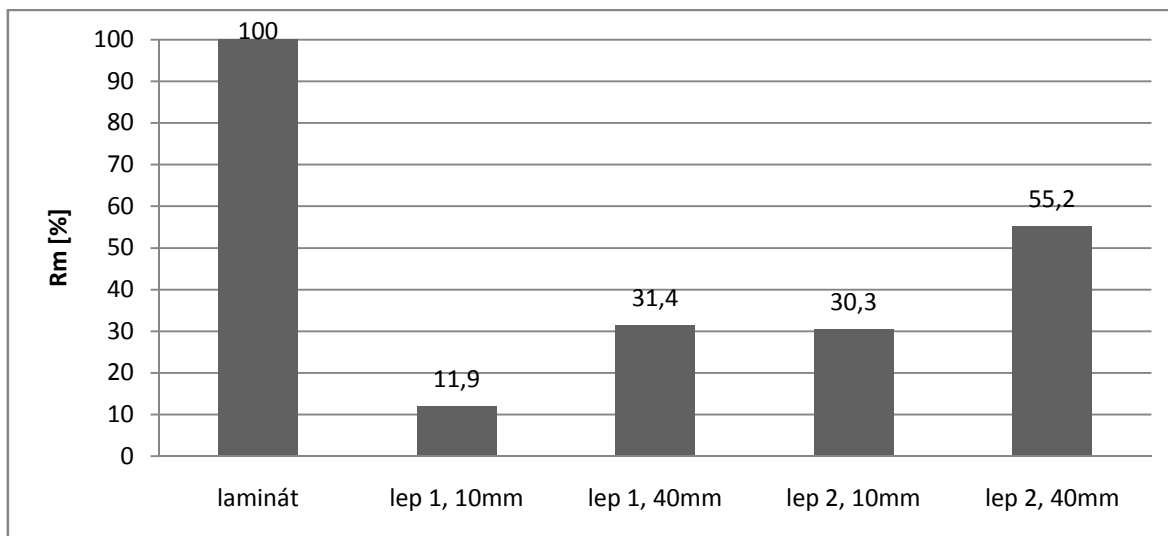
Obr. 46. Porovnání materiálů při překrytí 40mm

Na grafech (Obr. 45) a (Obr. 46) vidíme porovnání materiálů. Na obou mají nejhorší únosnost laminát s hliníkem, dále laminát- laminát, třetí je laminát nerez (vzorky slepené prvním lepidlem), poté laminát - laminát a laminát nerez slepené lepidlem 3M schotch weld.

8.4 Laminát

Tab. 16. Naměřené hodnoty pro samotný laminát

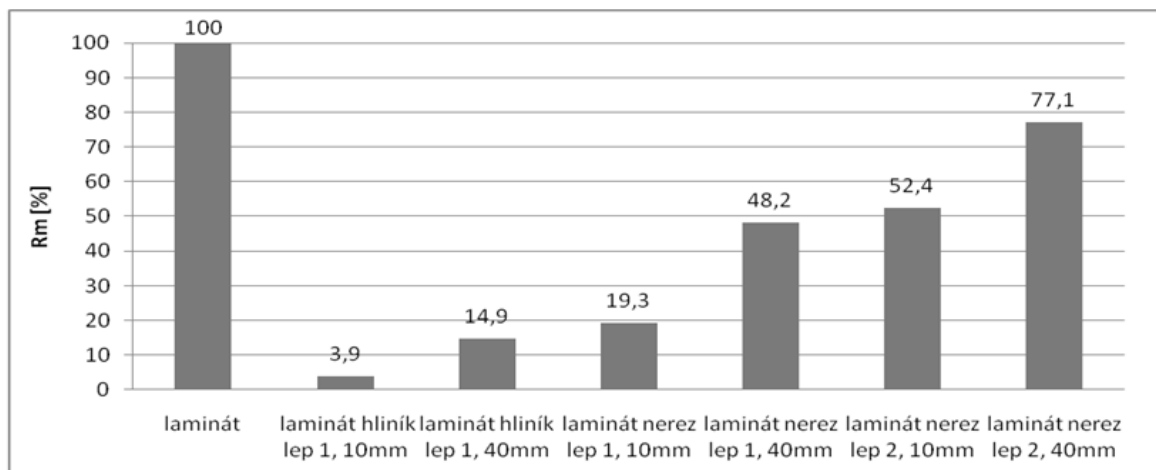
laminát			
č. měření	R _m	R _B	F _m
	[MPa]	[MPa]	[N]
1	120,33	120,33	3971,03
2	141,85	141,85	4681,11
3	159,54	159,54	5264,82
4	155,9	155,9	5144,72
5	133,86	132,57	4417,51
x	142,30	142,04	4695,84
s	16,10	16,27	531,10



Obr. 47. Relativní únosnost vzhledem k únosnosti laminátu

Na obrázku (Obr. 49) vidíme porušené vzorky samotného laminátu. Můžeme si všimnout, že ve většině případů se porušili u čelistí, což souvisí s nárůstem napětí právě v těchto místech. Díky hodnotám, které jsme získali, můžeme zjistit relativní nosnost laminátu.

Na obrázku (Obr. 47) můžeme vidět, že nejlepší poměr má lepidlo při přeplátování 40 mm, kde jeho měrná únosnost je na víc jak polovině únosnosti laminátu. Nejhorší si vedlo první lepidlo s přeplátováním 10mm, u něhož jsme přibližně na desetině únosnosti laminátu. U lepení laminátu s kovy (Obr. 48) dopadl nejlépe laminát s nerezovou ocelí při přeplátování 40 mm s lepidlem 3M schotch weld 77,1 %. Naprosto nejhorší skončil laminát hliník s přeplátováním 10mm, který má únosnost pouze 3,9%. Nejlépe dopadly u obou lepidel vzorky laminátu s nerezem.

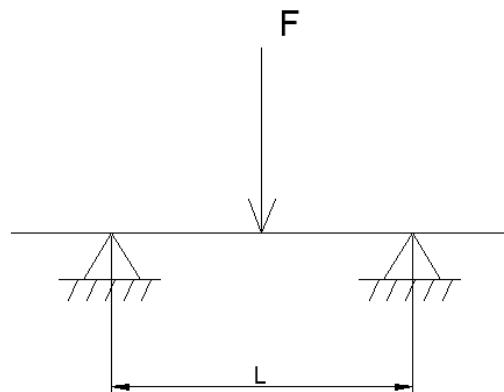


Obr. 48. Relativní únosnost vzhledem k únosnosti laminátu



Obr. 49. Porušené vzorky

9 ZKOUŠKA NA OHYB



Obr. 50. Schéma zkoušky na ohyb

Jako druhá byla provedena zkouška ohybem. Ta byla provedena opět na přístroji Zwick 1456. Hodnota L byla nastavena na 148 mm. Síla F působila uprostřed vzorku tedy v lepeném spoji.

9.1 Laminát – Laminát

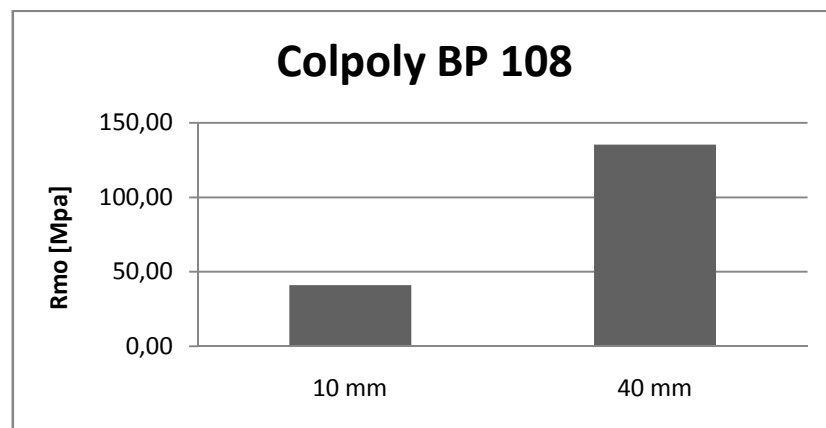
9.1.1 Lepidlo Colpoly BP 108

Tab. 17. Naměřené hodnoty při překrytí 10mm

překrytí 10mm			
č. měření	R_{mo}	$F - E_1$	$F - E_2$
	[MPa]	[N]	[N]
1	38,15	4,11	12,34
2	38,53	3,77	10,25
3	44,35	2,53	9,08
4	42,25	3,05	10,9
5	41,77	3,19	11,07
x	41,01	3,33	10,73
s	2,63	0,62	1,19

Tab. 18. Naměřené hodnoty při překrytí 40mm

překrytí 40mm			
č. měření	R_{mo}	F - E ₁	F - E ₂
	[MPa]	[N]	[N]
1	118,22	4,67	18,27
2	130,34	4,06	14,84
3	133,6	5,13	19,99
4	140,45	5,98	23,49
5	154,08	7,15	30,2
x	135,34	5,40	21,36
s	13,21	1,20	5,84



Obr. 51. Závislost únosnosti na překrytí

Z grafu (Obr. 51) a tabulek (Tab. 17, Tab. 18) je únosnost lepeného spoje s překrytím 10 mm 30% únosnosti spoje s překrytím 40 mm.

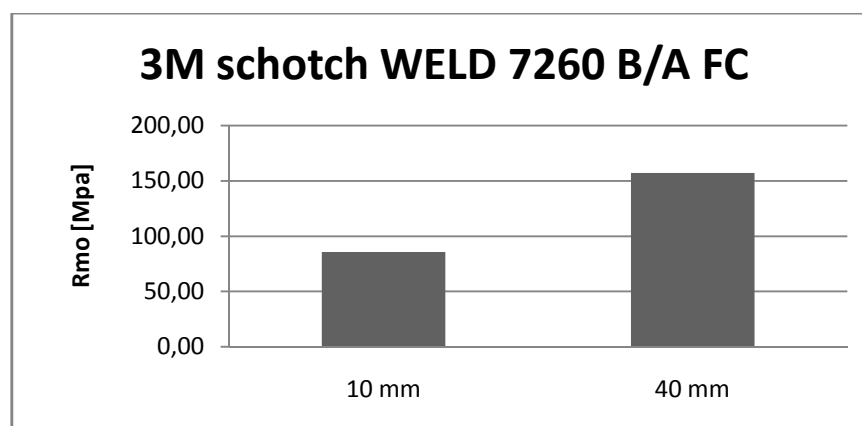
9.1.2 Lepidlo 3M schotch WELD 7260 B/A FC

Tab. 19. Naměřené hodnoty při překrytí 10mm

překrytí 10mm			
č. měření	R_{mo}	F - E ₁	F - E ₂
	[MPa]	[N]	[N]
1	96,71	2,92	10,66
2	62,12	3,81	14,07
3	88,46	2,64	9,4
4	89,93	2,97	11,39
5	91,47	2,74	10,05
x	85,74	3,02	11,11
s	13,56	0,46	1,81

Tab. 20. Naměřené hodnoty při překrytí 40mm

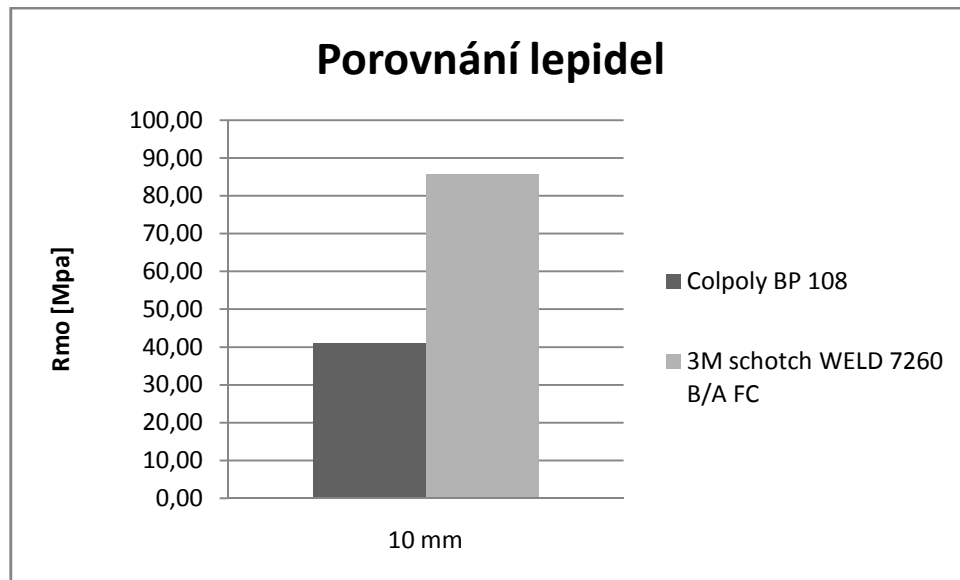
překrytí 40mm			
č. měření	R_{mo}	F - E ₁	F - E ₂
	[MPa]	[N]	[N]
1	131,71	5,27	23,09
2	151,98	0,88	16,55
3	178,88	5,4	23,38
4	174,9	4,9	20,76
5	148,06	4,67	20
x	157,11	4,22	20,76
s	19,65	1,89	2,77



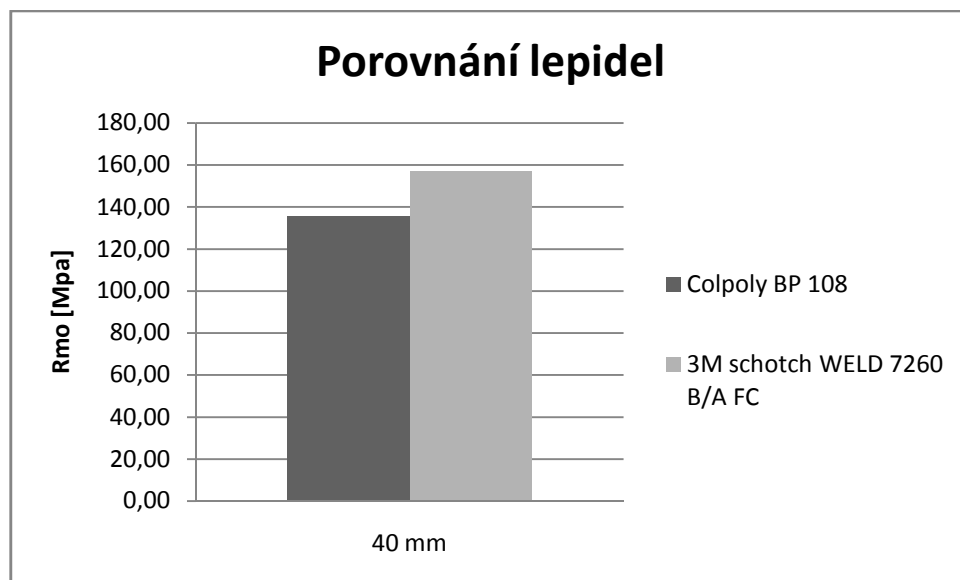
Obr. 52. Závislost únosnosti na překrytí

Z grafu (Obr. 52) a tabulek (Tab. 19, Tab. 18) je únosnost lepeného spoje s překrytím 10 mm 54,5% únosnosti spoje s překrytím 40 mm.

Vidíme, že u prvního lepidla se únosnost zvětšila o 230% vzhledem k vzorkům 10 mm. U druhého pak pouze o 83,24%.

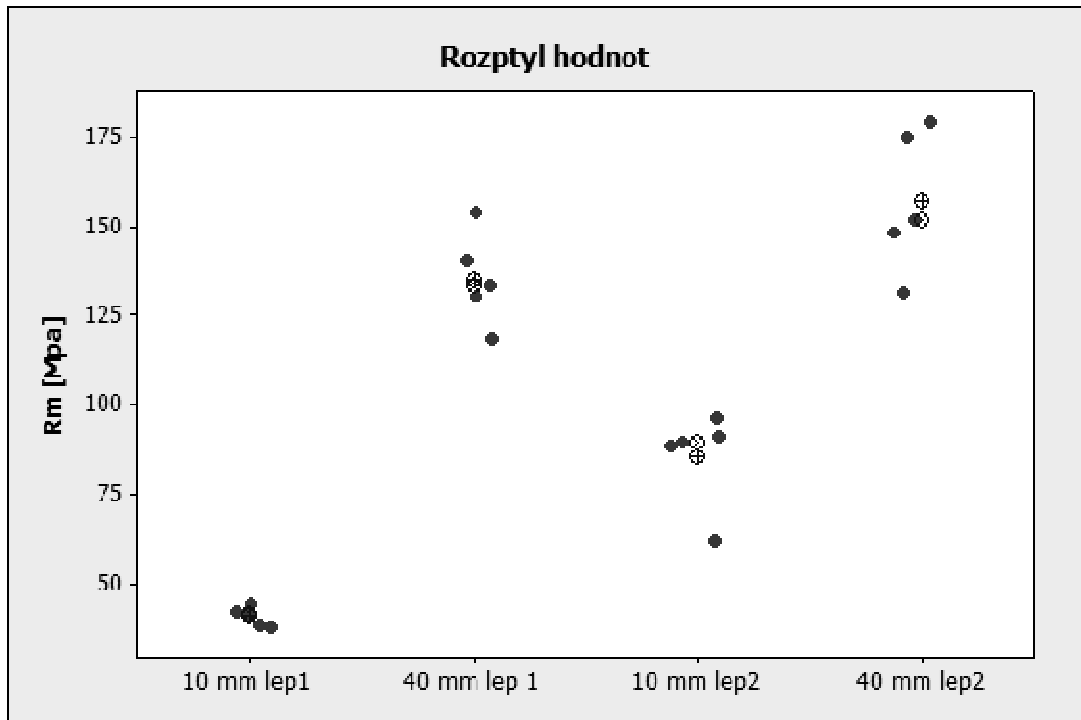


Obr. 53. Porovnání námi vybraných lepidel při překrytí 10 mm

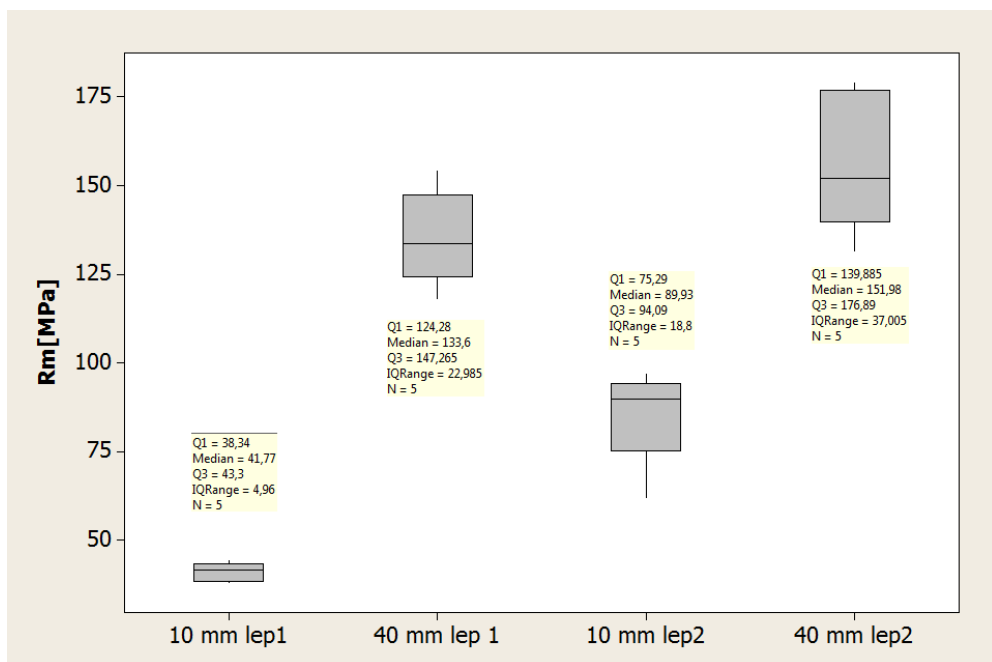


Obr. 54. Porovnání námi vybraných lepidel při překrytí 40 mm

Na grafech (Obr. 53, Obr. 54) můžeme vidět, že druhé lepidlo má lepší únosnost v překrytí 10 mm o 109% oproti prvnímu lepidlu v překrytí 40 mm, pak je rozdíl menší a to sice únosnost se zvýšila o 16,1%.



Obr. 55. Rozptyl hodnot



Obr. 56. Naměřené hodnoty v boxovém grafu

Tab. 21. Statistické hodnoty

Variable	N	Mean	SE Mean	StDev	CoefVar	Q1	Median	Q3	IQR
10 mm lep1	5	41,01	1,17	2,63	6,41	38,34	41,77	43,30	4,96
40 mm lep 1	5	135,34	5,91	13,21	9,76	124,28	133,60	147,27	22,98
10 mm lep2	5	85,74	6,07	13,56	15,82	75,29	89,93	94,09	18,80
40 mm lep2	5	157,11	8,79	19,65	12,50	139,89	151,98	176,89	37,01

Tabulka (Tab. 21) a obrázky (Obr. 55, Obr. 56) nám ukazují, jak vypadá rozptyl námi naměřených dat a jak vypadají jejich statistické hodnoty, v tabulce (Tab. 21) pak můžeme vidět, že hodnoty variačního koeficientu jsou u druhého lepidla nad 10% proto by bylo provést více měření.



Obr. 57. Porušené vzorky po zkoušce na ohyb

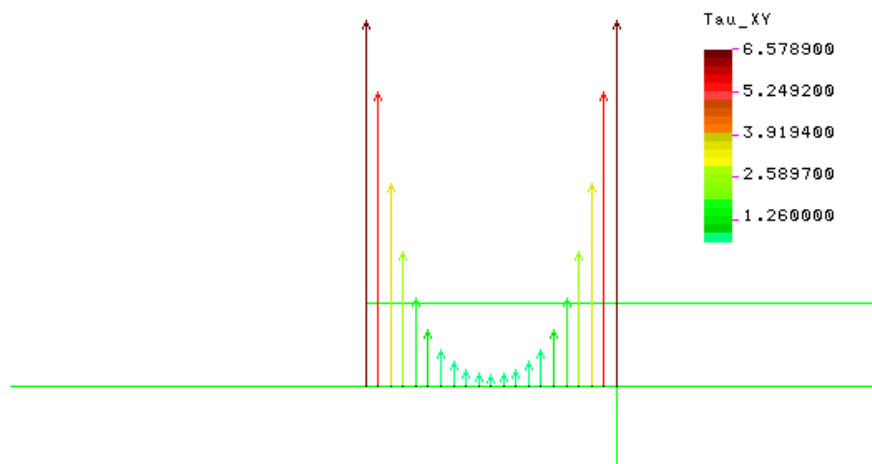
Na obrázku (Obr. 57) vidíme vzorky po zkoušce na ohyb. Porušení nastalo v laminátu.

10 SESTAVENÍ FEM MODELU SPOJE

Posledním krokem při diplomové práci bylo vytvoření dvou FEM modelů lepeného spoje v programu Cosmos. Stejně jako v experimentu je jeden s přeplátováním 10 mm a druhý model je přeplátovaný 40 mm.

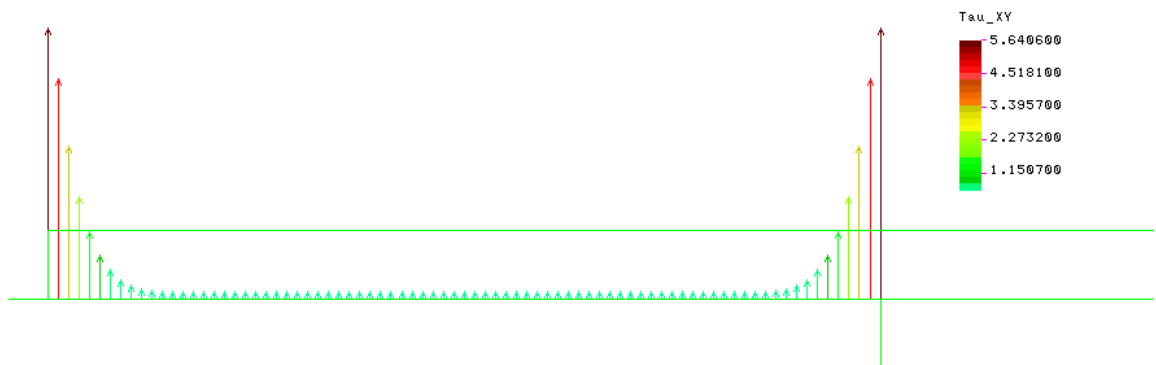
Na vytvořených modelech bylo zjištěno rozložení napětí na lepeném spoji. Naším cílem nebylo zjištění reálné únosnosti, ale porovnání změny napětí u modelu s menším přeplátováním oproti modelu s větším přeplátováním.

Jako první se nakreslily modely a zadaly se materiálové a geometrické podmínky, poté byly zatíženy nominálním tahovým napětím 10 MPa. Nakonec došlo k vykreslení a zjištění hodnot u napětí. Průběh smykového napětí můžeme vidět na obrázku (Obr. 58). Napět'ové špičky jsou na koncích lepených spojů. Takže čím se blížíme okraji, tím větší máme napětí.



Obr. 58. Zobrazení napětí τ_{xy}

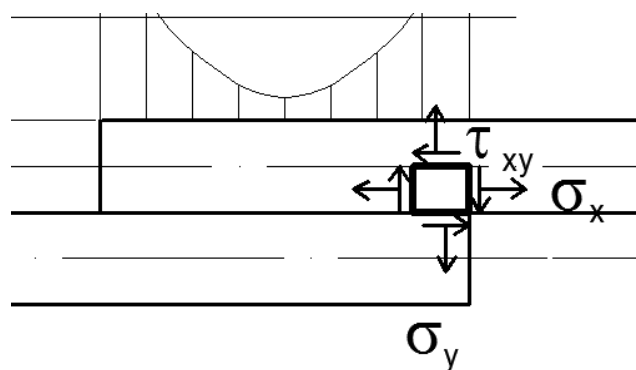
V tabulce (Tab. 22) jsou uvedené hodnoty těchto špiček. Pokud porovnáme % hodnoty, zjistíme, že napětí u přeplátování 40 mm jsou na hodnotě přes 80 % přeplátování 10 mm.

Obr. 59. Zobrazení napětí τ_{xy}

Tab. 22. Hodnoty získané programem cosmos

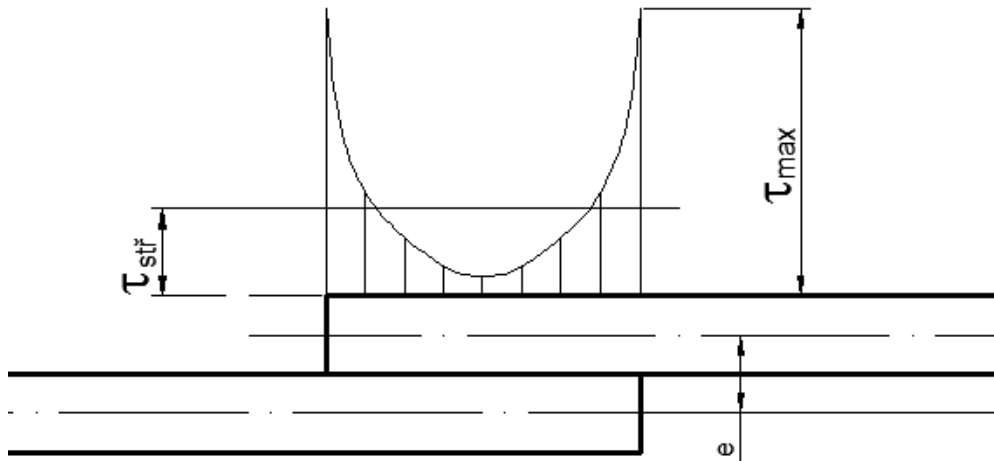
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	$\sigma_{\text{VON MISES}}$
přeplátování 10 mm	37,55	16,18	6,58	32,62
přeplátování 40 mm	32,33	13,42	5,64	28,13
% v porovnání 10 mm	86,10	82,94	85,74	86,24

U jednostranného přeplátování, které jsme použili, vzniká porušení lepeného spoje v napěťových špičkách a dochází zde k nepříznivému namáhání odlupováním. To způsobuje napětí σ_y (Obr. 60), které je vidět na elementu o velikosti dx .

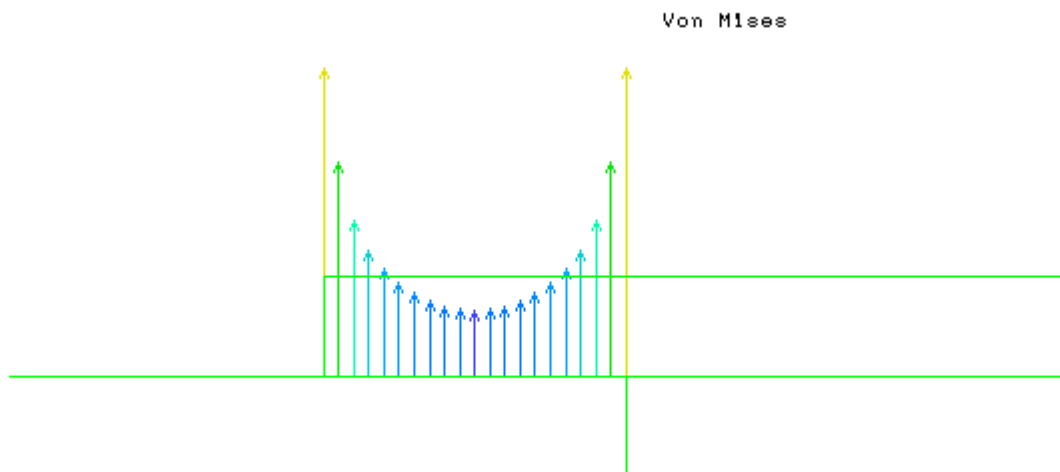


Obr. 60. Zobrazení elementu na lepeném spoji

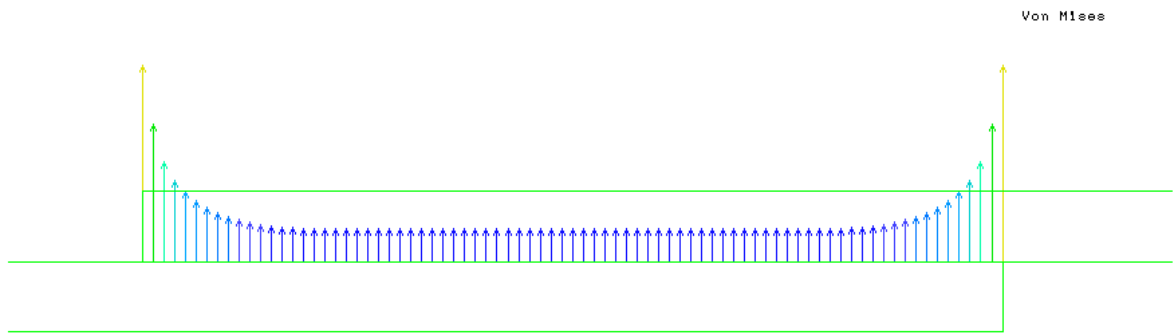
Díky excentricitě upnutí vzorku zde vzniká i ohybové napětí s ramenem e (Obr. 61), což je vzdálenost mezi střednicemi vzorků a ovlivňuje tak výsledky měření.



Obr. 61 .Zobrazení napětí na lepeném spoji



Obr. 62. Zobrazení Von mises



Obr. 63. Zobrazení Von mises

Dále si můžeme všimnout, že zatímco u přeplátování 10 mm je napětí tečné blíží se nule až téměř uprostřed, u přeplátování 40mm spoj nepřenáší tečná napětí po velké části své plochy.(*Obr. 58*), (*Obr. 59*)

11 SROVNÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH A MODELOVÝCH VÝSLEDKŮ

Diplomová práce řeší studium únosnosti laminátových lepených spojů v závislosti na délce přeplátování a to jak pro tah, tak pro ohyb. Ohyb je řešený pouze experimentem, zatímco pro tah byly vytvořeny modely v programu cosmos a daná problematika nasimulována. Reálné výsledky a výsledky získané modelováním tak můžeme porovnat s hodnotami naměřenými.

Lze konstatovat, že zvýšení respektive snížení únosnosti, jsou u reálných výsledků rozdílné oproti modelovaným. Zatímco hodnota únosnosti u modelových výsledků klesla přibližně o 14 % vzhledem k přeplátování 40 mm, tak hodnoty při reálném měření ukázaly, že únosnost klesala u tlaku v rozmezí o 32% až 74%. Nejvíce se k nasimulované změně únosnosti přiblížil vzorek laminátu s nerezem lepený lepidlem Schotch Weld 7260 B/A, kde únosnost poklesla o 32%. Nejméně pak u lepicího tmelu Colpoly BP 108 u vzorku laminátu s hliníkem. Tyto rozdílné hodnoty mohou být způsobeny více faktory. Jedním z nich může být ten, že u reálného měření vznikla deformace dílce díky excentricitě upnutí vzorku do čelistí a tím byl vzorek namáhán i na ohyb. Dalším prvkem, který ovlivňuje výsledky, je předpoklad malých deformací u modelu, což ale neodpovídá měření, při kterém docházelo k porušení vzorku. Spojení mezi prvky bylo vytvořeno jako pevné. Při dalším modelování by bylo vhodnější přidat mezi vzorky třetí vrstvu, která by modelovala samotné lepidlo.

Tab. 23. % porovnání pro tlak

	lep1	lep2	lep1	lep1	lep2
	lam- lam	lam -lam	lam -al	lam -nerez	lam - nerez
přeplátování 40 mm Rm [MPa]	44,72	78,48	21,17	68,58	109,68
přeplátování 10 mm Rm [MPa]	17,00	43,16	5,60	27,42	74,55
% v porovnání k 10 mm	38,02	55,00	26,47	39,98	67,96

Tab. 24. % porovnání pro ohyb

	lep1	lep2
	lam- lam	lam -lam
přeplátování 40 mm Rm [MPa]	135,34	157,11
přeplátování 10 mm Rm [MPa]	41,01	85,74
% v porovnání k 10 mm	30,30	54,57

ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce byla vypracována literární rešerše. Ta se zabývá pojmem laminát, složkami laminátu jako jsou výztuže, pojivo apod. Poté pojednává o samotné výrobě a mechanice laminátu. Další část se pak zaměřuje na lepení.

Diplomová práce se zabývá problematikou únosnosti laminátových lepených spojů v závislosti na délce přeplátování, druhu lepidla a spojovaného materiálu. Náplní experimentální části je příprava lepených spojů pro vlastní experiment a měření únosnosti v tahu a ohybu přístrojem Zwick 1465. Pro porovnání experimentálních dat a vykreslení průběhu napětí byl vytvořen FEM model spoje namáhaného tahem v programu Cosmos. K naměřeným výsledkům byly spočítány statistické hodnoty v programu minitab.

Při tahové zkoušce se nepodařilo potvrdit předpoklad pravidelné závislosti změny únosnosti na délce přeplátování. Naměřený rozdíl únosnosti závisel na lepeném materiálu i lepidle. Z výsledku experimentu je možno konstatovat, že u vzorků, kde došlo k porušení v samotném spoji, byly hodnoty změny únosnosti větší. Naopak tam, kde porušení nastalo, v laminátu byla velikost změny únosnosti menší a více se podobala namodelované. Shoda simulovaných a naměřených dat nenastala při žádné kombinaci. Dle modelových hodnot by výsledky pro přeplátování o délce 10 mm měl být na 86% únosnosti vzorku přeplátovaného 40 mm. Nejblíže byl k tomuto poměru laminát s nerezem slepeným lepidlem 3M Schotch weld 7260 B/A FC kde u přeplátování 10 mm byla únosnost na 68% vzhledem k přeplátování 40mm.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1.vyd. Brno : VUT, 2003. 193 s. ISBN 8021424435.
- [2] VEJRAŽKOVÁ, Ivana. Plasty pro stavebnictví a architekturu: Polymerní vláknové kompozity. In: *Happy materials* [online]. c2009 [cit. 2012-01-29]. Dostupné z: http://www.happymaterials.com/imgs/articles/153-7_7_vlUoknitUn_kompozity.pdf
- [3] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň : Západočeská univerzita, 2004. 154 s. ISBN 80-7043-273-X.
- [4] HARANGOZÓOVÁ, Simona. *Studium a optimalizace mechanického chování laminátových krytů nádrží* [online]. [s.l.], 2006. 87 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati, Technologická fakulta.
- [5] Technologie jejich popis a schémata. *Havel composites* [online]. 30.12.2005 [cit. 2012-01-29]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [6] Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů. *Havel composites* [online]. 14.12.2005 [cit. 2012-01-29]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com>
- [7] KLUSÁČEK, Lukáš. *Lepení kovů*. 2010. Bakalářská. Univerzita Tomáše Bati, Technologická fakulta.
- [8] Technologie lepení v automobilovém průmyslu. In: *Katedra strojírenské technologie, FS, TU v Liberci* [online]. 2011 [cit. 2012-01-29]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/lepeni.pdf
- [9] ŠUBA, Oldřich. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická, 2011. 110 s. ISBN 978-80-7454-015-8.
- [10] Lamináty. In: *KOMPOZITY - Doc. Zdenek Korinek* [online]. 2005 [cit. 2012-01-29]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/laminaty.pdf>
- [11] KOVAČIČ, Ľudomír. L.KOVAČIČ. *Lepenie kovov a plastov*. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1980, 398 s.
- [12] PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980, 788 s.

- [13] OSTEN, Miloš. *Lepení plastických hmot*. 2., opr. vyd. Praha : SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1974. 150 s.
- [14] OSTEN, Miloš. *Práce s lepidly a tmely*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1975, 290 s
- [15] Vyjadřování nejistot měření při kalibracích. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://micki.hofyland.cz/vut/bmva/nejistota.pdf>.
- [16] Bazény sklolaminátové. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.rentmil.cz/bazeny_sklolaminat.aspx
- [17] Savea, s.r.o.: lamináty, kovovýroba, karoserie a nástavby, montáže. XXC. *Savea* [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.savea.cz/karoserie.html>
- [18] Sea Star: laminátové lodě. XXC. *Savea* [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.czmarine.cz/sea-star-laminatove-lode.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

\bar{x}	Aritmetický průměr.
N,n	Počet měření
s	Výběrová směrodatná odchylka
mean	Aritmetický průměr
SE mean	Nejistota měření typu A
StDev	Výběrová směrodatná odchylka
v	Variační koeficient
u_{al}	Korigovaná nejistota měření typu A
k	Koeficient pro počet měření menší než 10 u korigované nejistoty
R_m	Mez pevnosti
F_m	Síla na mezi pevnosti
Coef Var	Variační koeficient
Q_1	První kvartil
Q_3	Třetí kvartil
IQR	Mezikvartilové rozpětí
Lep1	Lepidlo Colpoly BP 108
Lep2	Lepidlo 3M Schotch weld 7260 B/A FC
FEM	Metoda konečných prvků
σ_x	Normálové napětí ve směru x
σ_y	Normálové rozpětí ve směru y
τ_{xy}	Tečné napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Skleněná vlákna v laminátu [2]</i>	14
<i>Obr. 2. Schéma výroby skleněných vláken [5]</i>	15
<i>Obr. 3. Typy tkaní [5]</i>	16
<i>Obr. 4. Typy tkaní [5]</i>	17
<i>Obr. 5. Čistírna odpadních vod v Brně-Modřicích [2]</i>	23
<i>Obr. 6. Část karoserie tramvaje z laminátu [17]</i>	23
<i>Obr. 7. Bazén z laminátu [16]</i>	24
<i>Obr. 8. Laminátová loď [18]</i>	24
<i>Obr. 9. Lisování za tepla [6]</i>	28
<i>Obr. 10. Vysokotlaké RTM [6]</i>	29
<i>Obr. 11. Schéma tažení [6]</i>	30
<i>Obr. 12. Navíjení [6]</i>	31
<i>Obr. 13. Odstředivé lití [6]</i>	32
<i>Obr. 14. Jednosměrně uspořádaná vlákna v orthotropní vrstvě [10]</i>	34
<i>Obr. 15. Vrstvení laminátu [10]</i>	36
<i>Obr. 16. Ukázky laminátů [9]</i>	36
<i>Obr. 17. Laminát a jednotlivé laminy [9]</i>	37
<i>Obr. 18. Složky deformace ve směru globální osy x [9]</i>	38
<i>Obr. 19. Ekvivalentní systém jednotlivých sil a momentů [9]</i>	39
<i>Obr. 20. Struktura lepeného spoje [7]</i>	41
<i>Obr. 21. Broušení laminátových vzorků</i>	48
<i>Obr. 22. Tvar a rozměry vzorku s překrytím 10 mm</i>	49
<i>Obr. 23. Tvar a rozměry vzorku s překrytím 40 mm</i>	49
<i>Obr. 24. Vytlačovací pistole se statickým mixérem</i>	50
<i>Obr. 25. Lepené vzorky</i>	51
<i>Obr. 26. Trhací stroj Zwick 1456</i>	52
<i>Obr. 27. Únosnost závislá na překrytí</i>	55
<i>Obr. 28. Závislost únosnosti na překrytí</i>	56
<i>Obr. 29. Porovnání námi vybraných lepidel při překrytí 10mm</i>	57
<i>Obr. 30. Porovnání námi vybraných lepidel při překrytí 40mm</i>	57
<i>Obr. 31. Rozptyl hodnot</i>	58
<i>Obr. 32. Naměřené hodnoty v boxovém grafu</i>	58

<i>Obr. 33. Vzorky po porušení na trhačce</i>	59
<i>Obr. 34. Porovnání lepidel při překrytí 10mm</i>	61
<i>Obr. 35. Porušené vzorky po zkoušce na tah</i>	62
<i>Obr. 36. Rozptyl hodnot</i>	62
<i>Obr. 37. Boxový diagram</i>	63
<i>Obr. 38. Závislost únosnosti na překrytí</i>	65
<i>Obr. 39. Závislost únosnosti na překrytí</i>	66
<i>Obr. 40. Vzorky po měření</i>	67
<i>Obr. 41. Porovnání lepidel</i>	67
<i>Obr. 42. Porovnání lepidel</i>	68
<i>Obr. 43. Rozptyl hodnot</i>	68
<i>Obr. 44. Boxový diagram</i>	69
<i>Obr. 45. Porovnání materiálů při překrytí 10mm</i>	69
<i>Obr. 46. Porovnání materiálů při překrytí 40mm</i>	70
<i>Obr. 47. Relativní únosnost vzhledem k únosnosti laminátu</i>	71
<i>Obr. 48. Relativní únosnost vzhledem k únosnosti laminátu</i>	72
<i>Obr. 49. Porušené vzorky</i>	72
<i>Obr. 50. Schéma zkoušky na ohyb</i>	73
<i>Obr. 51. Závislost únosnosti na překrytí</i>	74
<i>Obr. 52. Závislost únosnosti na překrytí</i>	75
<i>Obr. 53. Porovnání námi vybraných lepidel při překrytí 10 mm</i>	76
<i>Obr. 54. Porovnání námi vybraných lepidel při překrytí 40 mm</i>	76
<i>Obr. 55. Rozptyl hodnot</i>	77
<i>Obr. 56. Naměřené hodnoty v boxovém grafu</i>	77
<i>Obr. 57. Porušené vzorky po zkoušce na ohyb</i>	78
<i>Obr. 58. Zobrazení napětí τ_{xy}</i>	79
<i>Obr. 59. Zobrazení napětí τ_{xy}</i>	80
<i>Obr. 60. Zobrazení elementu na lepeném spoji</i>	80
<i>Obr. 61. Zobrazení napětí na lepeném spoji</i>	81
<i>Obr. 62. Zobrazení Von mises</i>	81
<i>Obr. 63. Zobrazení Von mises</i>	82

SEZNAM TABULEK

<i>tab. 1 Technické údaje stroje Zwick 1456.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 2. Naměřené hodnoty při překrytí 10mm.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 3. Naměřené hodnoty při překrytí 40mm.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 4. Naměřené hodnoty při překrytí 10mm.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 5. Naměřené hodnoty při překrytí 40mm.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 6 Statistické hodnoty.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 7. Naměřené hodnoty při překrytí 10mm.....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 8 Naměřené hodnoty při překrytí 40mm.....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 9. Naměřené hodnoty pro překrytí 10 mm.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 10. Statistické hodnoty.....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 11. Naměřené hodnoty při překrytí 10mm.....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 12. Naměřené hodnoty při překrytí 40mm.....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 13 Naměřené hodnoty při překrytí 10mm.....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 14. Naměřené hodnoty při překrytí 40mm.....</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 15. Statistické hodnoty.....</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 16. Naměřené hodnoty pro samotný laminát.....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 17. Naměřené hodnoty při překrytí 10mm.....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 18. Naměřené hodnoty při překrytí 40mm.....</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 19. Naměřené hodnoty při překrytí 10mm.....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 20. Naměřené hodnoty při překrytí 40mm.....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 21. Statistické hodnoty.....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 22. Hodnoty získané programem cosmos.....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 23. % porovnání pro tlak.....</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 24. % porovnání pro ohyb.....</i>	<i>83</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Technický list k lepidlu Colpoly BP 108

Technický list k lepidlu 3M Scotch weld 7260 B/A FC

Naměřené hodnoty