

# **Studie adheze lepeného spoje dřevo kompozit**

Bc. Radek Soukup

---

Diplomová práce  
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2014/2015

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek Soukup**  
Osobní číslo: **T13632**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Studie adheze lepeného spoje dřevo kompozit**

Zásady pro vypracování:

1. I. Teoretická část
2. Literární rešerše na dané téma.
3. Hybridní kompozitní materiály.
4. Adheze a její význam v kompozitních systémech.
5. II. Experimentální část
6. Návrh materiálového složení dřevo - kompozitního systému.
7. Experimentální příprava navržených systémů.
8. Experimentální měření mechanických vlastností a adheze dle doporučení vedoucího práce.
9. Vyhodnocení naměřených výsledků.
10. Diskuze dosažených výsledků a formulace závěru.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Kolařík, J. Vysokomodulová polymerní vlákna a vláknové kompozity. ACADEMIA, Praha, 1984.
2. Ehrenstein, Gottfried W.: . Polymerní kompozitní materiály. Scientia, 2009.
3. Havalda, A. Kompozitné materiály. Bratislava: SVŠT v Bratislave, 1989.
4. Černý, M. Vláknové kompozity. Praha, Čvut, 2001.
5. Táborský, L., Šebo, P. Konštrukčné materiály se spevnenými vláknami, . Bratislava, Alfa, 1982.

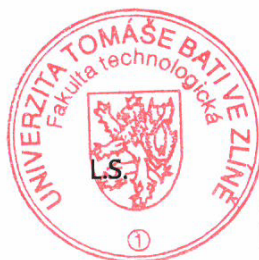
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **30. ledna 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2015**

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



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

Příjmení a jméno: SOUKUP RADEK.....

Obor: PI.....

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 1.5.2015.....



<sup>1)</sup> 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.

<sup>2)</sup> 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 vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> 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). Odpírá-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 přihlíží k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Moje diplomová práce se zabývá studiem adheze lepeného spoje dřevo kompozit s použitím epoxidové a polyesterové pryskyřice. Cílem práce je vybrat vhodnou skladbu kompozitu a sledovat mechanické vlastnosti jednotlivých skladeb kompozitu se zaměřením na adhezi dýha - matrice – skelná tkanina.

Teoretická část této práce je věnována obecné charakteristice kompozitu a dřevokompozitu se zaměřením na zkoušky adheze. Praktická část je rozdělena do čtyř částí, odvíjejících se od jednotlivých mechanických druhů zkoušek.

V závěrečné části jsou výsledky shrnuty a diskutovány s ohledem na možné změny.

Klíčová slova: Kompozit, Tkanina, Pryskyřice, Adheze, Skelné vlákna

## **ABSTRACT**

My diploma thesis studies adhesion of glued joint timber – composite while using epoxy and polyester resin. The objective of this thesis is to choose suitable architecture of composite and to observe mechanical properties of individual composite structures with focus on adhesion veneer – resin – glass fabric.

Theoretical part of my thesis is dedicated to general characteristic of composite and wood-composite with focus on adhesion examinations. Practical part is divided to four parts, depending on particular mechanical types of examinations.

In final part the results of are summed up and discussed with regard to possible changes.

Keywords: Composite, Fabric, Resin, Adhesion, Glass fibers

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucí práce, doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D., za odborné vedení, přínosné a užitečné rady při vypracování diplomové práce, obětavý a ochotný přístup. Rád bych také poděkoval Ing. Milanu Žaludkovi Ph.D. a Ing. Ladislavu Fojtlovi za jejich čas a odborné rady při testování v univerzitní laboratoři.

Motto:

*„Klasickým způsobem.“*

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



# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 KOMPOZITY</b> .....	<b>13</b>
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY .....	13
1.2 VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA.....	14
1.2.1 Kovové vlákna .....	15
1.2.2 Skelná vlákna .....	15
1.2.3 Uhlíkové vlákna .....	16
1.2.4 Přírodní vlákna .....	17
1.2.5 Rozdělení vláknových výztuží .....	17
1.3 MATRICE - POJIVO .....	18
1.3.1 Reaktivní pryskyřice .....	19
1.3.2 Termoplasty.....	20
<b>2 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE</b> .....	<b>21</b>
2.1 VNĚJŠÍ VRSTVA SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE .....	22
2.2 JÁDRA .....	23
<b>3 DŘEVOKOMPOZIT</b> .....	<b>27</b>
3.1 DŘEVOTŘÍSKOVÉ DESKY .....	28
3.2 DŘEVOVLÁKNITÉ DESKY .....	28
3.3 DESKY S MINERÁLNÍMI POJIVY .....	29
3.4 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE S DŘEVĚNÝM JÁDREM .....	29
3.4.1 Překližkové materiály.....	29
3.4.2 Jádrové desky .....	29
3.4.3 Složené kombinované materiály .....	30
<b>4 ADHEZE</b> .....	<b>31</b>
4.1 ADHEZE V KOMPOZITECH.....	31
4.2 DRUHY ADHEZE.....	32
4.2.1 Mechanická adheze .....	33
4.2.2 Fyzikální adheze.....	33
4.2.3 Chemická adheze .....	35
4.3 MĚŘENÍ ADHEZE V KOMPOZITECH.....	36
4.3.1 Přímé měření adheze .....	36
4.3.2 Nepřímé měření adheze v kompozitech .....	38
4.3.3 Měření přímo na kompozitech .....	39
<b>5 LISOVÁNÍ KOMPOZITŮ</b> .....	<b>45</b>
5.1 LISOVÁNÍ POMOCÍ VAKUOVANÉHO VAKU .....	45
5.2 LISOVÁNÍ POMOCÍ TLAKOVÉHO VAKU .....	45
5.3 LISOVÁNÍ V AUTOKÁVU .....	46
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>47</b>
<b>6 POPIS A CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI</b> .....	<b>48</b>
<b>7 POPIS PROBLÉMU A POUŽITÉ MATERIÁLY</b> .....	<b>49</b>

7.1	VLASTNOSTI SKELNÉ TKANINY.....	50
7.2	VLASTNOSTI PRYSKYŘIC .....	51
7.3	POMOCNÉ NÁSTROJE A PŘÍPRAVKY .....	51
<b>8</b>	<b>VÝROBA VZORKŮ A POPIS ZKUŠEBNÍCH STROJŮ .....</b>	<b>53</b>
8.1	PŘÍPRAVA FORMY.....	53
8.2	PŘÍPRAVA DŘEVĚNÉ DÝHY .....	53
8.3	PŘÍPRAVA SKELNÉ TKANINY.....	54
8.4	PŘÍPRAVA MATRICE.....	54
8.5	KLADENÍ VRSTEV KOMPOZITU.....	54
8.6	VÝROBA KOMPOZITU POMOCÍ VAKUOVÉHO LISOVÁNÍ.....	56
8.7	ÚPRAVA KOMPOZITU NA VZORKY .....	56
8.8	MĚŘÍCÍ STROJE .....	57
8.8.1	Univerzální zkušební stroj Zwick 1456 .....	57
<b>9</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>58</b>
9.1	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ DLE ČSN EN ISO 178.....	58
9.2	STANOVENÍ ZDÁNlivÉ MEZILAMINÁRNÍ PEVNOSTI METODOU KRÁTKÉHO NOSNÍKU DLE ČSN EN ISO 14130 .....	66
9.3	STANOVENÍ ODRHOVÉ PEVNOSTI DLE ASTM C297/C297M – 04 (FLATWISE TEST).....	73
9.4	STANOVENÍ PEVNOSTI VE SMYKU MEZI VRSTVAMI VYZTUŽENÝCH PLASTŮ DLE ČSN 64 0662.....	81
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>88</b>
	<b>SEZNAM POŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>90</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>93</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>94</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>97</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>98</b>

## ÚVOD

Moje diplomová práce se zabývá studiem adheze lepeného spoje daného kompozitu. Zaměřím se na kompozitní materiál na bázi dřeva, který je vyztužen skelnou tkaninou a matricí. Konkrétně se zaměřím na polyesterovou a epoxidovou pryskyřici. Tyto pryskyřice byly zvoleny z toho důvodu, že jsou snadno dostupné na našem trhu.

Toto téma bylo iniciováno firmou WOODEXPERT s.r.o., která se zabývá výzkumem a vývojem nových materiálů na bázi dřeva. Jelikož dřevo je ekologickým a kreativním materiálem budoucnosti, který je dnes odborníky pokládán za jednu z nejperspektivnějších surovin a nosný materiál budoucnosti jsem se rozhodl využít nabídky této spolupráce.

Dřevo se dříve využívalo pouze ve formě latí nebo trámů. V poslední době se hojně začalo využívat dřevo jako kompozitu buď ve formě slepované dýhy, nebo jako jádra v sendvičových konstrukcích. Velkou předností dřeva je nekorozivost, odolnost proti opotřebení, minimální tepelná vodivost, dobré elektroizolační vlastnosti a v neposlední řadě i ekonomičnost a dostupnost.

Cílem diplomové práce je zjistit, jaký vliv má změna pryskyřice na adhezi v dřevokompozitních materiálech. Dále budu zkoumat pevnost lepeného spoje dřevokompozit a určit vhodnou skladbu. Pro naplnění stanovených cílů jsem zvolil vhodné zkušební metody, které byly dány platnými technickými normami. První z nich je ČSN EN ISO 178, druhou v pořadí je ČSN EN ISO 14130, třetí použitou normou je ASTM C297/C297M – 04 a poslední normou je ČSN 64 0662.

Teoretická část se věnuje obecnému popisu kompozitních materiálů se zaměřením na vyztuže ze skelných tkanin, jejich vlastnosti a způsob výroby. Následně se zaměřím na polyesterové a epoxidové matrice a druhy jejich adhezí. V závěru teoretické části se budu věnovat normalizovaným zkušebním metodám dle platných českých a evropských norem.

Praktická část je věnována interpretaci a vyhodnocení výsledků, které byly získány danými zkušebními metodami. Výsledky vyhodnotím pomocí tabulek a grafů, ve kterých budou přehledně znázorněny výsledky zkoušek jednotlivých materiálů.

V závěru vyhodnotím, která pryskyřice je pro dřevo kompozit nejvhodnější a navrhu vhodnou skladbu.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 KOMPOZITY

Kompozity jsou sdružené materiály vytvořené fyzikálním spojením různých jednoduchých materiálů. Častokrát je třeba totiž zohlednit požadavky navzájem velmi protichůdné a nesplnitelné vlastnostmi jednoho homogenního materiálu. Volba použitých materiálů je proto vždy kompromisem, který vychází vždy ze splnění prvořadých požadavků na splnění výsledných vlastností (nebo několika prvořadých vlastností) součásti. Nesplnění ostatních vlastností se řeší například snížením životnosti součásti, zvětšením kritických průřezů, změnou technologie výroby apod.

Kompozity nejsou univerzální materiály. Vždy jsou navrhovány pro konkrétní použití s cílem maximálního využití jejich hmoty. Široké uplatnění našly kompozity hlavně v leteckém průmyslu a ve velké míře i při stavbě dopravních prostředků. Využívá se jich zejména díky jejich vysoké pevnosti a tuhosti, dobré odolnosti vůči mrazům a taky výhodné mezi únavy. Proto jsou kompozity využívány především na výrobu rotujících součástí, jako jsou vrtule, lopatky kompresorů a turbín, stejně tak se jich využívá i na výrobu nosníků, výztuží křídel a podvozků. Zejména v leteckém průmyslu se staly kompozity nedílnou součástí procesu výroby. Zatímco v sedmdesátých letech byl podíl kompozitu v Airbusu pouze 5%, tak v Airbusu 380 v roce 2005 byl tento podíl už 22% a v Boeingu 787 by měl podíl kompozitu činit až 60%. Pro další zvyšování podílu kompozitu ve výrobě je důležitým faktorem hospodárná a cenově výhodná výroba. (Ehrestein, 2009)

### 1.1 Základní pojmy

Ještě dříve, než se zaměřím na stavbu kompozitu, jsou níže uvedeny významy slovních pojmů užívaných v oblasti kompozitu.

<i>anizotropie</i>	- závislost vlastnosti materiálu na směru
<i>izotropní</i>	- mající směrově nezávislé vlastnosti
<i>matrice-pojivo</i>	- materiál pro ukládání vyztužujících vláken (nejčastěji plast), jehož úkolem je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil a ochrana vláken
<i>ortropie</i>	- druh anizotropie vyznačující se třemi navzájem kolmými rovinami symetrie
<i>pramen</i>	- vzniká spojením cca 200 elementárních vláken bez kroucení

<i>prepreg</i>	- částečně vytvrzena lisovací hmota (polotovar)
<i>příze</i>	- kroucená nebo nekroucená vlákna určená k textilnímu zpracování
<i>rohož</i>	- plošná výztuž skládající se z nekonečných nebo sekaných, nahodile orientovaných pramenců vláken spojených pojivem
<i>roving (pramenec)</i>	- vzniká sdružením určitého počtu základních pramenů bez jejich zkrucování
<i>tkanina</i>	- skládá se ze vzájemně se křížících, propletených systémů vláken, plošná dobře zpracovatelná výztuž
<i>vlákno elementární</i>	- nekonečné skelné vlákno
<i>vlákno sekané</i>	- vlákno určité délky
<i>vrstva</i>	- stavební prvek laminátu
<i>vrstva jednosměrná</i>	- vrstva nebo laminát s jednosměrně orientovanými vlákny

(Ehrenstein, 2009)

Vzhledem k tomu že rozmanitost kompozitních materiálů je velká, tak se tyto materiály rozdělují podle tří kritérií, které se v praxi vzájemně kombinují. Jedná se o matrici, disperzi dle tvaru a disperzi dle fáze. Matrice je spojitá složka, která určuje tvar a rozměr kompozitu. Matrice může být polymerní, kovová či keramická. Disperzi tvoří fáze pevná, kapalná a plynná. Tvar disperze se z velké části podílí na anizotropii vlastností a dělí se na částicové (destičky, kuličky), vláknové (spojitá, dlouhá nebo krátká vlákna) nebo deskové tvary. (Daďourek, 2007)

## 1.2 Vyztužující vlákna

Materiály ve formě vláken se cíleně jako konstrukční prvky takřka nepoužívají. Zajímavou skupinou materiálů se stávají teprve až v kompaktní formě, jako je tomu v kompozitních materiálech. (Ehrenstein, 2009)

Kompozity vyztužené vlákny jsou většinou usměrněné, a proto se vyznačují významnou anizotropní vlastností. Z hlediska komplexních optimálních vlastností musí být kompozity vyztužené vlákny s vysokou pevností s vysokým modulem pružnosti, dostatečnou délkou a relativně malým průměrem. Zatím neexistují takové vlákna, které by splnily všechny tyto požadavky. Hlavní využití mají dlouhá vlákna, u kterých  $L/D > 10$  a  $D \leq 1$  mm a to pro

orientované uložení do kompozitu nebo pro zpracování dalších výztužných polotovarů ve formě pramenců, rohoží, tkanin apod. Krátké vlákna se používají jako objemové plnivo kompozitu. Kromě sekaných, nebo drcených odpadů dlouhých vláken jsou používány i keramické a kovové monokrystaly (whiskery) s průměrem asi 1  $\mu\text{m}$  a délkou 2 až 4 mm. (Ehrenstein, 2009)

Výztužné vlákna kompozitních materiálů můžeme rozdělit do následujících skupin:

1. Kovové vlákna
2. Skelné vlákna
3. Uhlíkové vlákna
4. Keramické vlákna
5. Polymerní vlákna
6. Whiskery

(Ehrenstein, 2009)

### **1.2.1 Kovové vlákna**

Kovové vlákna jsou výhodné z hlediska ekonomického a to i přesto, že mají vysokou hustotu. Ocelové vlákna se získávají především válcováním a taháním. Wolframové vlákna je možné připravit výhradně technologiemi práškové metalurgie, kdy se práškové kovy izostaticky lisují, spékají ve vodíkové atmosféře a tváří při teplotách 900 až 1000 °C na konečný rozměr (0,02 - 1 mm). Kovové vlákna se v kompozitních materiálech používají jen zřídka. (Skočovský et al., 2000)

### **1.2.2 Skelná vlákna**

Textilní skleněná vlákna je společný název pro tenká vlákna ( $\phi$  3,5 až 24  $\mu\text{m}$ ) s pravidelným kruhovým průřezem, tažená z roztavené skloviny při teplotě asi 1400 °C a používaná pro textilní účely. Tyto vlákna mají poměrně nízkou hmotnost a tepelnou vodivost avšak vysokou chemickou a tepelnou stabilitu a dostatečnou pevnost v tahu (3100 – 6000 MPa). Proto představují ekonomicky výhodnou vyztužující složku, která je typická pro zpevňování matric s polymerů. (Skočovský et al., 2000)

Složení skelného vlákna závisí na způsobu jeho přípravy a podmínkách přípravy. V technické praxi používáme různé druhy skla, které se od sebe liší chemickým složením a vlastnostmi. (Skočovský et al., 2000)

1. A sklo – obyčejné sklo, které se používá na okna, láhve atd.
2. C sklo – má vyšší chemickou odolnost než E sklo
3. E sklo – je nejčastěji používané a má vysoký elektrický odpor
4. M sklo – obsahuje 8% BeO a má nejvyšší modul pružnosti z dané skupiny skelných vláken
5. Křemenné sklo - je velmi čistý SiO<sub>2</sub> ve skelném stavu

(Skočovský et al., 2000)

Tab. 1: Vlastnosti vybraných druhů skelných vláken (Skočovský et al., 2000)

Druh vlákna	E [GPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	P [kg.m <sup>-3</sup> ]	T <sub>max</sub> [°C]	C [KJ/Kg]
A sklo	71	3100	2560	530	-
C sklo	70	3150	2490	750	0,79
E sklo	73,5	3500	2540	845	0,8
S sklo	86,8	4900	2490	970	0,74
Křemenné sklo	74	6000	2210	1667	4,42

Velkou nevýhodou skelných vláken je jejich malá odolnost vůči vícenásobnému ohybu a otěru, která se však se však zvyšuje jejich infiltrací různými látkami až o 80 - 100 %. Při pokojové teplotě se skelná vlákna chovají jako ideálně pružné tělesa, avšak se zvyšující se teplotou jejich modul pružnosti výrazně klesá. Výjimku tvoří křemenné vlákna, u kterých se modul pružnosti lineárně zvyšuje s rostoucí teplotou. (Skočovský et al., 2000)

### 1.2.3 Uhlíkové vlákna

Uhlíková vlákna (CF - Carbon Fiber) jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Výchozí organické suroviny ve vláknitém tvaru jsou nejprve karbonizovány. Přitom se odštěpí téměř všechny prvky až na uhlík. Se stoupající teplotou, a tím se zvyšující grafitizací, se zlepšují mechanické vlastnosti. Při teplotě 1800 °C je tvorba grafitové struktury ukončena, i když vzdálenost vrstev ve vláknech zůstává vždy větší než u vrstev v čistém grafitu. (Skočovský et al., 2000)

Výchozí surovinu pro výrobu uhlíkových vláken jsou tři materiály:

- Celulóza – vyrobená vlákna však mají méně dokonalou strukturu, používají se především jako izolační materiál pro vysoké teploty
- Polyakrylonitril (PAN) – tyto vlákna jsou považována za standartní vlákna



- Smola – ze smoly se nákladným způsobem připravují vlákna, jejichž konečná cena je vzhledem k nízké ceně výchozí suroviny příznivá. Tyto vlákna mají velmi vysokou hodnotu E-modulu a velice dobré tepelné a elektrické vlastnosti. Jejich pevnost v tahu je porovnání se standartními vlákny podstatně nižší, protože vazby mezi jednotlivými grafitovými rovinami jsou nižší. Na trhu mají pouze malý podíl.

(Skočovský et al., 2000)

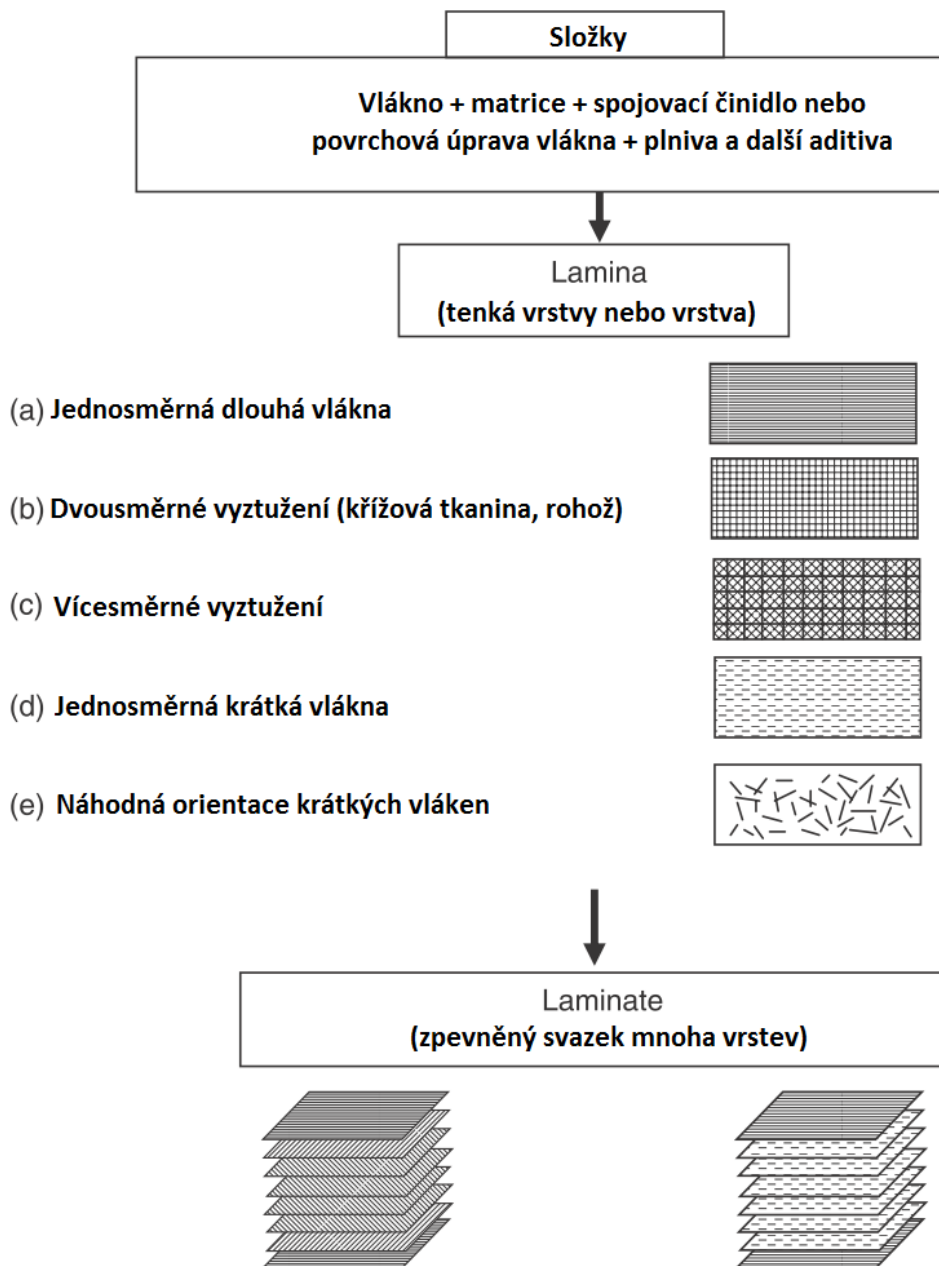
Silný nárůst využití hmot tvrzených uhlíkovými vlákny se v nejbližší době očekává v segmentu lehkých staveb, v automobilovém a leteckém průmyslu. Na konstrukci nově vyvíjených velkých dopravních letadel by se měly tyto materiály v budoucnu podílet až 60 %. Roční nárůst poptávky po těchto materiálech by měl činit nejméně 13 %. Jestliže v roce 2011 činila spotřeba uhlíkových vláken 37000t, v roce 2020 by měla dosáhnout zhruba 130 000 t. Z 130 000 t plastů s uhlíkovými vlákny, které se podle prognózy spotřebují v roce 2020, se zhruba 42 % využije na výrobu zařízení pro větrnou energetiku, 7 % v leteckém průmyslu a 6 % při výrobě automobilů. (Business media CZ, 2013)

#### 1.2.4 Přírodní vlákna

Pro vyztužování plastů jsou ze všech přírodních vláken vhodná pouze vlákna rostlinná, která mají jako základ celulózu. Mezi ně patří len, konopí, juta a bavlna. Jejich výhodou je odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách. Pozoruhodné jsou i pevnosti v tahu. Vzhledem k nízké měrné hmotnosti jsou tato přírodní rostlinná vlákna zajímavou surovinou pro lehké konstrukce. Největší přednosti jsou nízká hustota a ekologická likvidace odpadu. (Skočovský et al., 2000)

#### 1.2.5 Rozdělení vláknových výztuží

Na níže uvedeném obrázku je zobrazeno rozdělení vláknových výztuží ve struktuře kompozitu.



Obr. 1: Vláknové vyztuže-rozdělení (Mallick, 2007)

### 1.3 Matrice - pojivo

Pod pojmem matrice rozumíme materiál, kterým je prosycen systém vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Vzniklá surovina se označuje jako kompozit. (Ehrenstein, 2009)

Úkolem matrice je:

- přenos namáhání na vlákna
- převedení namáhání z vlákna na vlákno

- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku
- ochrana vlákna před vlivy okolí

(Ehrenstein, 2009)

Zásadním hlediskem pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice – vlákno. Pro dosažení lepší fyzikální a případně i chemické vazby mezi vláknem a matricí se nanese na vlákno apretace vhodná pro určitý druh matrice. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno smočila úplně a bez bublin. (Ehrenstein, 2009)

U polymerních kompozitů lze matrice dělit na termosety (reaktoplasty) a termoplasty.

### 1.3.1 Reaktivní pryskyřice

Jedná se o nejčastěji používanou skupinu termosetů při výrobě kompozitu. Jsou to kapalné nebo tavitelné pryskyřice, které buď samostatně, nebo za pomoci tvrdidel vytvrzují polyadici nebo polymeraci bez odštěpení těkavých složek. (Ehrenstein, 2009)

Mezi nejpoužívanější typy reaktivních pryskyřic patří:

- Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP - R)
- Vinylesterové pryskyřice (VE - R)
- Fenakrylátové pryskyřice (PFA - R)
- Epoxidové pryskyřice (EP - R)
- Fenolitické pryskyřice
- Metakrylátové pryskyřice (MA - R)
- Izokyanátové pryskyřice

(Ehrenstein, 2009)

**Tvrdidla** jsou sloučeniny, které katalyticky iniciují polymeraci pryskyřic MA - R, UP - R, VE - R nebo FA - R, případně ovlivňují vytvrzování v průběhu polyadice epoxidových nebo izokyanátových pryskyřic. (Ehrenstein, 2009)

**Urychlovače** jsou látky, které přidány v malém množství urychlují síťovací reakci. (Ehrenstein, 2009)

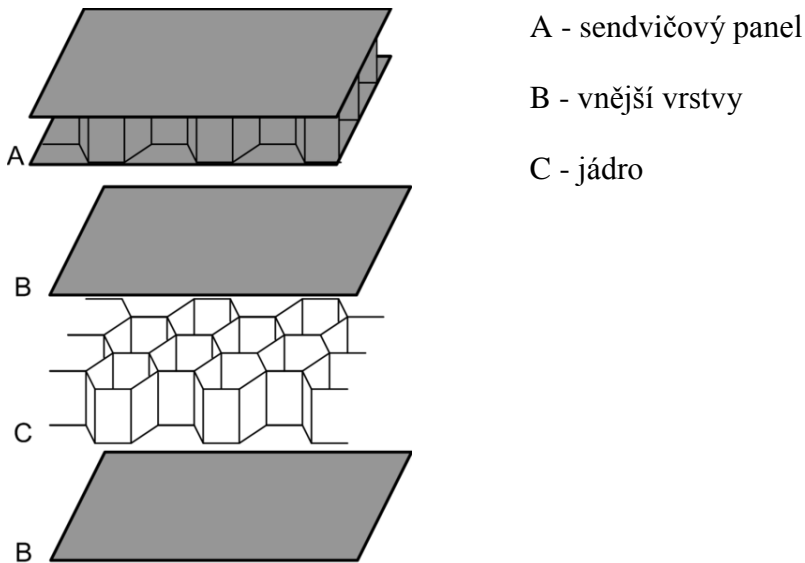
### 1.3.2 Termoplasty

Termoplasty jsou na rozdíl od reaktoplastů za pokojové teploty pevné látky a teprve po zahřátí na teplotu většinou nad 200°C jsou dostatečně tekuté. Použití rozpouštědel pro snížení viskozity termoplastů je problematické, protože i po odstranění rozpouštědla zůstává u termoplastů snížená odolnost proti korozi při napětí. (Ehrenstein, 2009)

Zatímco se vyztužené termoplasty mohou zpracovávat a tvarovat pouze po zahřátí nad teplotu roztavení, převládá u reaktivních pryskyřic proces chemického vytvrzování, spojeného s vývojem reakčního tepla. Vlastnosti matrice musí vyhovovat kritériím tvarovatelnosti a chemického vytvrzování. Protože zpracování termoplastů se provádí lisostřikem za zvýšené teploty, je nutné tento proces ukončit chlazením. (Ehrenstein, 2009)

## 2 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

Sendvičové konstrukce řadíme k vrstevnatým konstrukcím. Vznikají ze tří materiálových vrstev. Dvě z nich jsou tenké vnější vrstvy, které obklopují třetí vrstvu jádro z obou stran. Jádro se vyznačuje nízkou hmotností, tato vlastnost představuje hlavní výhodu sendvičového materiálu.

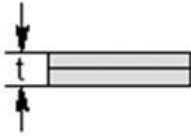
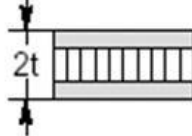
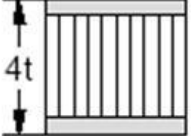


Obr. 2: Konstrukce sendvičového kompozitu

(Hexcel, 1999)

Struktura sendviče je tvořena ze dvou tuhých a pevných potahů, které přenášejí tahové a tlakové namáhání a z jádra o relativně nízké hustotě, které přenáší smykové síly vznikající mezi potahy. (MM Spektrum, 2001)

Sendvičové konstrukce se uplatňují převážně v leteckém a dopravním průmyslu, kde se využívá jejich hlavních předností, jako je vysoká ohybová pevnost a tuhost při zachování nízké hmotnosti. Sendviče ovšem nalézají uplatnění i v ostatních průmyslových odvětvích. Ohybová pevnost a tuhost nejsou jejich jedinými výhodami. K dalším výhodám patří odolnost proti rázům, schopnost tlumení a izolace. (MM Spektrum, 2001)

	Celistvý materiál	Síla jádra $t$	Síla jádra $3t$
tuhost	 1.0	 7.0	 37.0
pevnost v ohybu	1.0	3.5	9.2
hmotnost	1.0	1.03	1.06

Obr. 3: Vlastnosti sendvičových konstrukcí (Hexcel, 1999)

Na obrázku 3 je znázorněno porovnání celistvého materiálu a sendvičové struktury s jádrem. Z výsledků měření lze vidět, že při použití sendvičového materiálu a vhodnou volbou tloušťky jádra můžeme docílit značné zvýšení pevnosti v ohybu a tuhosti, při zachování nízké hmotnosti. Z tabulky vyplývá, že při zachování stejné hmotnosti můžeme pevnost v ohybu zvýšit až 9krát a tuhost až 37krát. (Hasala, 2012)

## 2.1 Vnější vrstva sendvičové konstrukce

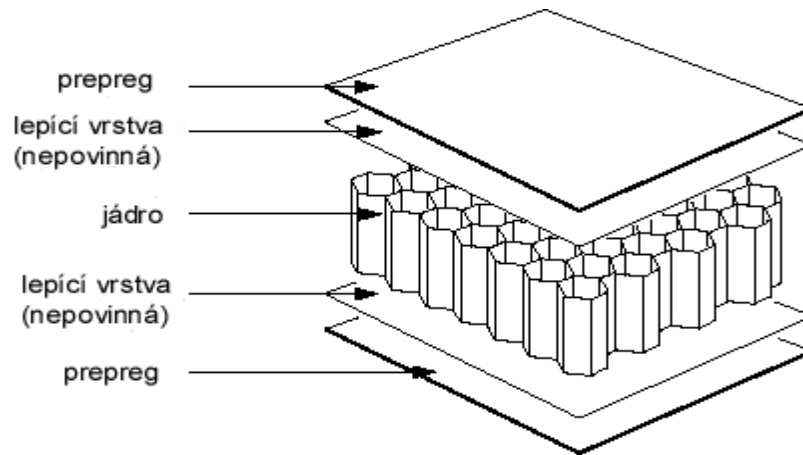
Pro krycí vrstvy sendvičových konstrukcí se používají relativně tenké a pevné materiály. Tyto materiály musí zároveň splňovat požadavky na výrobu a funkční požadavky týkající se chemické odolnosti a odolnosti proti povětrnostním podmínkám, jakožto i odolnost proti ohni a korozi. Mezi vnější vrstvou a jádrem musí být zajištěna co nejdokonalejší adheze, aby se zabránilo odtržení jádra od vnější vrstvy. (Hasala, 2012)

Nejčastěji používané krycí vrstvy jsou:

**Ocelové a hliníkové plechy** - obvykle se používají za studena válcované plechy s ochranou proti korozi. Tloušťka plechu je obvykle 0,7-1,2 mm. (Davies, 2001)

**Prepregy** - jedná se o tkaninu, která je už od výrobce nasycená pryskyřicí. Samolepící prepreg už nevyžaduje žádnou lepicí vrstvu. K výhodám prepregu patří zejména vysoká tuhost, nízká hmotnost, trvanlivost, volnost při návrhu a díky tomu, že již nemusíme nanášet žádnou vrstvu lepidla tak dochází ke snížení nákladů na výrobu. Tato technologie se řadí do kategorie suché (čisté) technologie. Jedná se o kontrolovaný proces, který se nej-

častěji zpracovává technologií vakuového lisování. Touto technologií získáváme lepší kvalitativní a mechanické vlastnosti výrobku. Tato metoda je vhodná pro velkoformátové výrobky. (Hasala, 2012)



Obr. 4: Sendvičová konstrukce s prepregovou vnější vrstvou (Hexcel, 1999)

## Lamináty

Nejvíce používanými lamináty jsou skleněné nebo uhlíkové vlákna. Na vnější vrstvu (např. laminát z uhlíkových vláken) se nanese pryskyřice, na kterou se přitlačí jádro sendviče. Poté co se pryskyřice rozpustí, následuje napojení horní vnější vrstvy. Aby bylo dosaženo ideálního spojení jednotlivých vrstev, prochází kompozit zatížením autokávem nebo hydraulickým lisem. (Hasala, 2012)

## 2.2 Jádra

Jádra jako výplňový materiál pro sendvičové materiály musí mít vhodné vlastnosti s ohledem na mechanickou pevnost a tuhost. S přihlédnutím ke způsobu využití také na hořlavost, teplotní vodivost. (Hasala, 2012)

Hlavní požadavky pro materiál jádra jsou:

- nízká hustota
- vysoká smyková pevnost a tuhost
- dobrá pevnost v tlaku
- odolnost proti vysokým teplotám, absorbování vody
- izolační a tlumící schopnosti

## Balsa

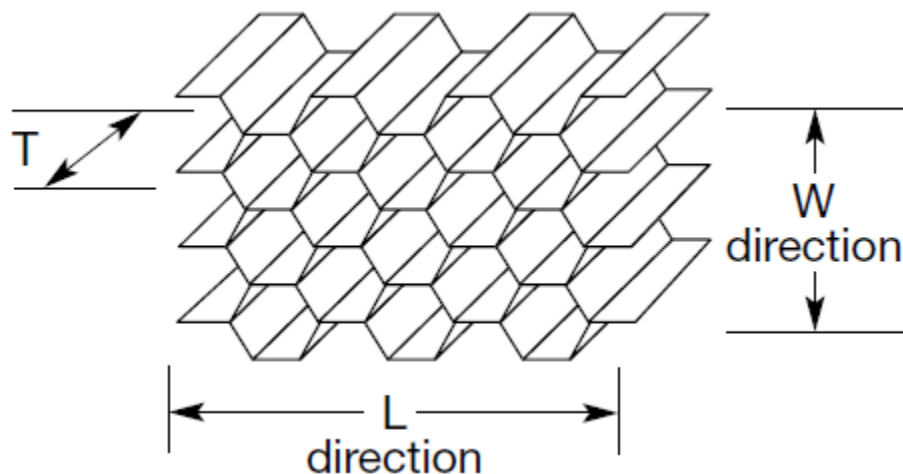
Balsa je přírodní produkt, který se získává z rychle rostoucího stromu v Jižní Americe, 95 % celosvětové produkce pochází z Ekvádoru. Struktura dřeva se vyznačuje velkými buňkami, které jsou vyplněny vodou. Po vysušení buňky obsahují vlákna celulózy v ligninové matici. Tento přírodní kompozit má po vysušení hustotu 40 až 340 kg/m<sup>3</sup> (obvykle 160 kg/m<sup>3</sup>). Balsové dřevo nehoří, spíše pomalu doutná. Oproti polymerním pěnám neměkne teplem a má menší tepelnou vodivost. V porovnání s voštinami má balsa uzavřené buňky. (Kořínek, [b. r.]

## Voštiny

Voština má nejčastější tvar buněk hexagonální (šestiúhelník), který je podobný buňkám včelích pláství. Je to jeden z nejefektivnějších tvarů v přírodě. Voština je vyráběna v mnoha geometrických konfiguracích. Volba tvaru závisí na způsobu namáhání sendviče a způsobu zpracování. Také jsou dostupné v různých materiálových variantách, jako je lepenkový papír, hliník, ocel, titan, aramidové, skelné nebo uhlíkové vlákno v kombinaci určitým typem matrice. (Cripps, ©1998)

Typy voštin:

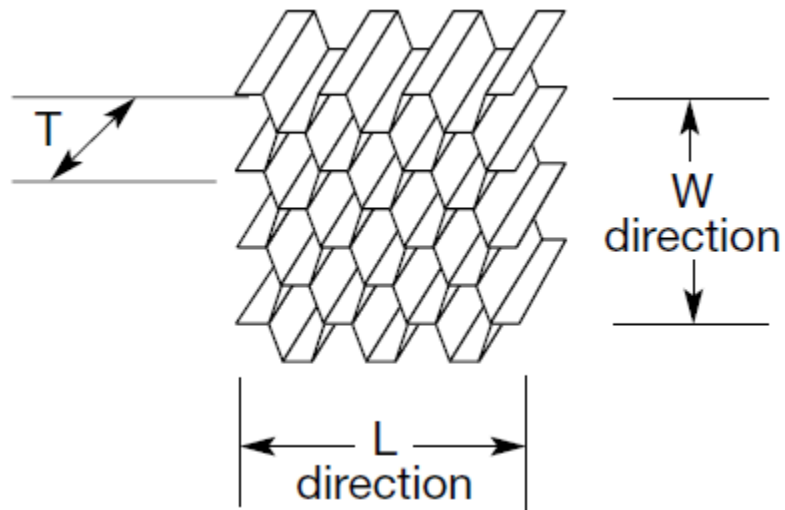
- **Šestihhranná voština**



Obr. 5: Šestihhranná voština (Hexcel, 1999)

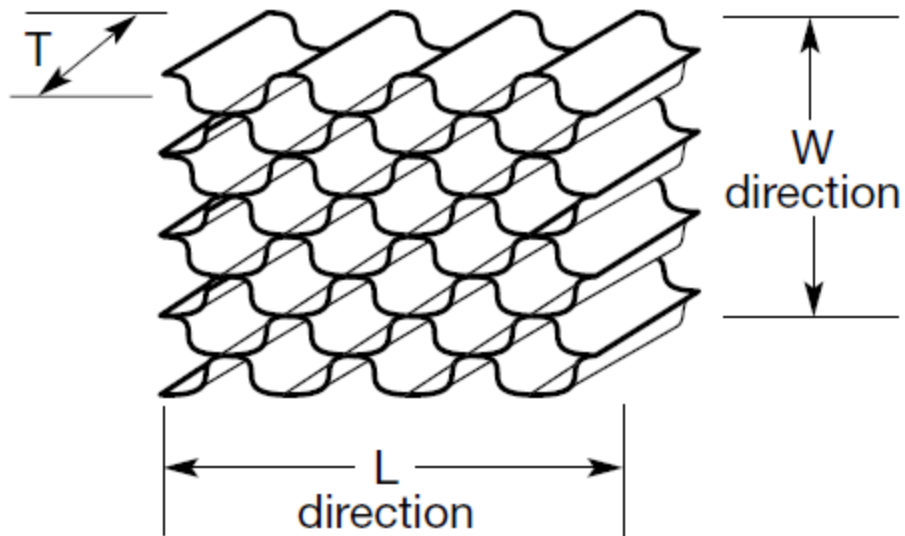


- X-Core



Obr. 6: Voština X-Core (Hexcel, 1999)

- Flex-Core



Obr. 7: Voština Flex-Core (Hexcel, 1999)

### Pěnové materiály

Pěny jsou jedny z nejběžnějších forem materiálu jádra. Polotovár je formou pěnových bloků. Vyrábějí se z mnoha druhů polymerů. Mohou se vyskytovat ve formě kovů, nejčastěji jako hliníkové pěny. (Cripps, ©1998)

Typy polymerních pěn:

- Polyvinylchlorid – PVC
- Polyuretan – PUR
- Polystyren – PS
- Polypropylen – PP
- Felolická pěna

(Cripps, ©1998)

Hustota pěn se pohybuje kolem 30 až 300 kg/m<sup>3</sup>. Se stoupající hustotou rostou i mechanické vlastnosti, např. pevnost jádra ve smyku. (MM Spektrum, 2001)

### **Dřevo - překližka**

Dřevo je jeden z nejstarších materiálů, který se používá pro jádra sendvičových kompozitů. Jeho největší předností je hlavně nízká cena. Tento materiál je ovšem docela těžký, má malou pevnost a je citlivý na vlhkost. Tato vlhkost následně může způsobovat vzhledové defekty na vnější vrstvě kompozitu. Použitím kvalitních lepidel se dají tyto defekty částečně eliminovat. (Dad'ourek, 2007)

### **Korek**

Surový korek se získává loupáním kůry (borky) korkového dubu. Korkový dub se nejvíce pěstuje v Portugalsku.

Korek má rozmanité použití díky tomu, že dobře tepelně izoluje, odolává poměrně vysokým teplotám (asi do 120 °C), je pružný a lehký. Hustota korku se pohybuje kolem 480 až 520 kg/m<sup>3</sup>. (Šedivý, 2013)

### 3 DŘEVOKOMPOZIT

Jedná se vlastně o zvláštní typ sendvičové konstrukce, jejíž jádro je vyrobené z materiálu na bázi dřeva. Patří mezi ne i materiály aglomerované. (Hrázský a Král, 2007)

Pod pojmem aglomerované materiály rozumíme výrobky z dřevin, nebo jiných celulózo- vých částic, které získáváme z rostlinných materiálů a poté je přeměníme na plošné či tvarové výrobky. (Hrázský a Král, 2007)

Aglomerované materiály překonávají do značné míry nevýhody dřeva, jako například heterogenitu, rozměrovou nestálost, anizotropii a zároveň uchovávají většinu vlastností dřeva. Aglomerované materiály (třískové vláknité desky) mají celou řadu předností:

- Velkoplošnost
- Izotropní a heterogenní strukturu bez přírodních vad
- Široký sortiment (hustota, pevnost, tloušťka, různé povrchové úpravy)
- Dobré mechanické vlastnosti vzhledem ke své tloušťce
- Nízkou tepelnou vodivost
- Dobré akustické vlastnosti
- Možnost lepení a spojování
- Nízké nároky na kvalitu vstupní suroviny

(Hrázský a Král, 2007)

Příčinou prudkého rozvoje těchto materiálů je fakt, že tento materiál nachází uplatnění nejen při výrobě nábytku, ale i ve stavebnictví, zejména v dřevostavbách všech typů. Z počátku byl k dispozici pouze jeden typ univerzálních desek. V současnosti se konstrukce a vlastnosti desek řídí účelem jejího použití. (Hrázský a Král, 2007)

Technologické vlastnosti třískových a vláknitých desek jsou rozhodující pro jejich použití. Závisí na typu desky, ale zejména na její struktuře, na surovině použité k její výrobě, na tvaru a vlastnostech elementárních částic, na typu a množství pojiva, na lisovacích podmínkách a na způsobu jejich dokončení. (Hrázský a Král, 2007)

Aglomerované materiály rozdělujeme na:

- Dřevotřískové desky
- Dřevovláknité desky
- Desky s minerálními pojivy

- Speciální dřevokompozitní materiály

(Hrázský a Král, 2007)

### 3.1 Dřevotřískové desky

Jedná se o plošný útvar z malých částic dřeva, nebo jiného lignocelulózového materiálu, které jsou spojeny organickým pojivem pomocí tepla, tlaku, vlhkosti, katalyzátoru atd.

Třískové desky se dělí podle polohy třísek v desce na plošně lisované a pěchované. Plošně lisované desky lze dále dělit podle struktury na jednovrstvé, dvojevrstvé, třívrstvé (dvě povrchové a jedna střední vrstva), vícevrstvé, graduované (s postupným přechodem od nejmenějších třísek na povrchu k hrubším třískám ve středu desky) a na desky z orientovaných třísek. (Eisner, Havlíček a Osten, 1983)

Podle použitého lepidla, struktury povrchu a účelu použití se desky též rozlišují na:

- Určené do suchého prostředí
- Odolné vůči vyšší relativní vlhkosti vzduchu
- Odolné vůči vysoké vlhkosti vzduchu, částečně odolné povětrnostním podmínkám
- Odolné vůči vlhkosti a chráněné proti biologickým činitelům, popřípadě i se sníženou hořlavostí

(Eisner, Havlíček a Osten, 1983)

### 3.2 Dřevovláknité desky

Jedná se o plošný útvar vyrobený z vláken dřeva nebo jiného lignocelulosového materiálu, jehož soudržnost je dána uspořádáním vláken a jejich adhezních vlastnostech. Během výroby lze přidávat pojiva a jiné materiály pro zvýšení pevnosti, odolnosti vůči vlhkosti, ohni hmyzu a hnilobě, nebo pro zdokonalení jiných vlastností výrobků. (Eisner, Havlíček a Osten, 1983)

Tato definice se vztahuje spíše pro mokrý způsob. Suchý výrobní proces je blízký spíše výrobě třískových desek. (Eisner, Havlíček a Osten, 1983)

### 3.3 Desky s minerálními pojivy

Základní surovinou pro výrobu těchto desek jsou třísky, dřevní vlákna, kůra, papír, sádra, a cement. Produktem potom jsou kůrové desky, pazdeřové desky, sádrovláknité desky, sádrotřískové desky, cementovláknité desky, cementotřískové desky. (Richter, 2011)

Novým trendem jsou termoplastické vláknité materiály na bázi lignocelu, fasalu, fasalexu a fibrexu. (Richter, 2011)

### 3.4 Sendvičové konstrukce s dřevěným jádrem

Vrstvený kompozit vzniká spojením dvou nebo více materiálů za účelem vzniku nového materiálu. Spojení bývá provedeno lepenou formou. Na plášť se používají materiály na bázi dřeva, ale možno použít lamináty, hliníkové a plastové materiály. Složené kompozitní materiály na bázi dřeva jsou vrstvené kompozitní materiály, které vznikají kombinací různých výrobních technologií a materiálů. (Hrázský a Král, 2007)

#### 3.4.1 Překližkové materiály

Jedná se o vrstvené materiály, které se vyrábí slepením dýhových listů na sebe. Tyto materiály nazýváme překližky. Překližky jsou vyráběny z dýh jehličnatých nebo listnatých dřevin, které jsou následně slepeny lepidlem. Rozeznáváme překližky truhlářské, obalové, stavební a voděvzdorné. Jsou vyráběny v různých tloušťkách jako surové nebo s povrchovou úpravou. (Drápela, 1980)

#### 3.4.2 Jádrové desky

##### Laťkovky a dýhovky

Laťkovky a dýhovky jsou překližované materiály vyrobené oboustranným překlížením středu jednou nebo více vrstvami dýh. Střed desky je ze smrkového řeziva. Překližovaná dýha je ze smrkového, topolového nebo bukového dřeva. (Hrázský a Král, 2007)

### **Třívrstvé masivní desky**

Třívrstvé masivní desky (biodesky) jsou dřevěné konstrukční desky vyrobené oboustranným překlížením středu. Na výrobu středu jsou namísto tenkých dýh použity tenké lamely. (Hrázský a Král, 2007)

### **3.4.3 Složené kombinované materiály**

#### **Deska Kerrotex**

Jedná se o pětivrstvou desku, která se skládá se třískového středu oboustranně opláštěného dvěma navzájem příčnými dýhami. (Richter, 2011)

#### **Deska Neocor**

Jedná se o třívrstvou překlížovanou desku. Středová vrstva z třískové hmoty, která je oboustranně opláštěná loupanou dýhou. (Richter, 2011)

#### **Voštinové desky**

Konstrukce těchto desek je založena na voštinovém středu, na jehož okrajích je nalepena povrchová vrstva z masivního řeziva. Plášť tvoří DTD, MFD nebo OSB deska. (Richter, 2011)

#### **Likusové desky**

Konstrukce těchto desek se skládá z dutého středu, který je vyplněn speciálně upravenými kukuřičnými klásky a na okrajích je nalepena povrchová vrstva z masivního řeziva. Shora je překryt tvrdou vláknitou deskou nebo dýhou. (Richter, 2011)

## 4 ADHEZE

K vyvolání vzájemné přitažlivosti mezi dvěma tuhými materiály bez použití lepidel bychom museli zaručit to, že spojované plochy by se musely k sobě přiblížit na molekulární vzdálenost. Tento požadavek je v podstatě nesplnitelný, protože povrch kontaktních ploch by musel být absolutně rovný, absolutně souběžný a bez jakýchkoliv nečistot. (Osten, 1996)

### 4.1 Adheze v kompozitech

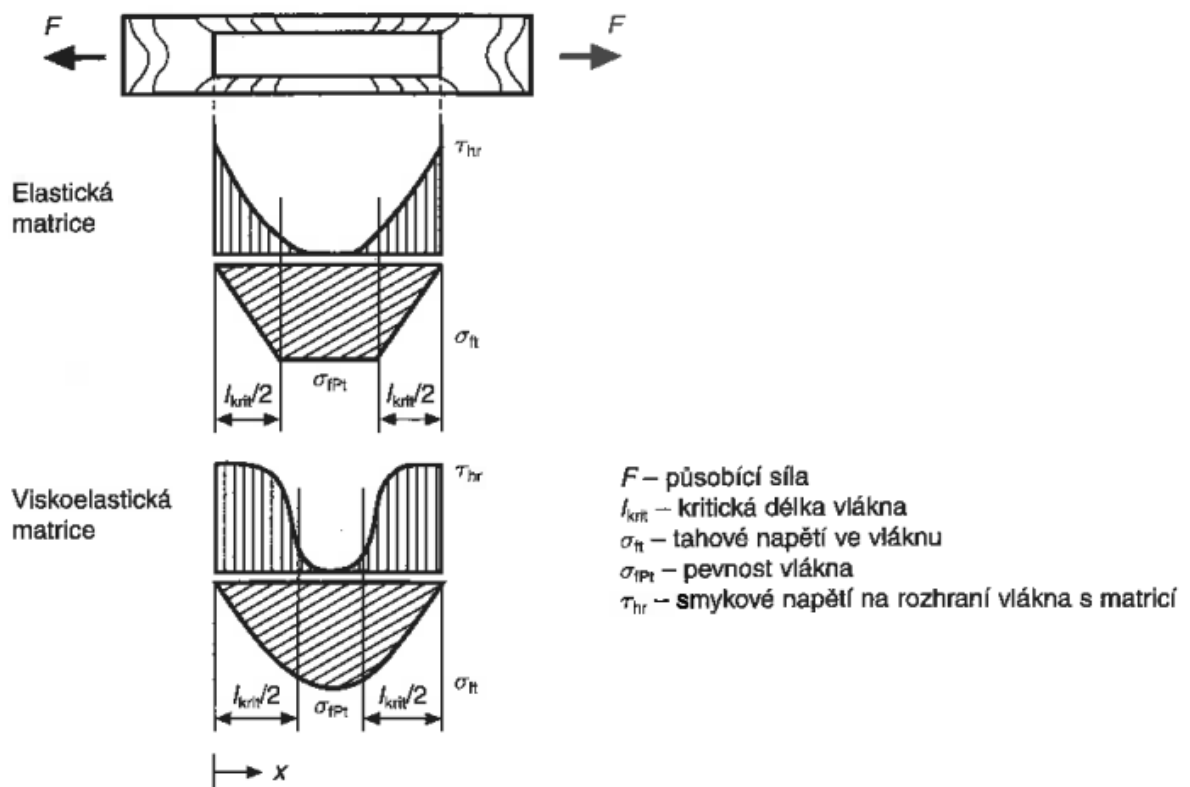
Důvod proč je nutné se zaměřit na adhezi v kompozitech je to, že se přímo podílí na mechanických vlastnostech výsledného kompozitu. V adhezi je však skryt celý soubor mechanismů, jako jsou absorpce a smáčení, elektrostatická interakce, reakční vazby, kovalentní vázání povrchu matrice s vlákny a nezávazné interakce. Důležitou roli hraje i morfologie vláken a vzájemné rozptýlení disperze v matrici. Jednotlivé vrstvy vrstevnaté stěny mají odlišné hodnoty mechanických charakteristik, ale mají i velmi rozdílné hodnoty teplotní roztažnosti. S měnící se teplotou si jednotlivé vrstvy zabraňují vzniku svých vlastních teplotních dilatací. Pokud je adheze slabá a jednotlivé vrstvy mohou volně dilatovat, tak v tu chvíli ztrácí kompozit svou funkci. To znamená, že s největší pravděpodobností došlo k delaminaci vrstev a ztrátě stability kompozitní stěny. Kvalitní spojení na rozhraní matrice-vlákno je tedy bezpodmínečně nutné. (Šuba, 2011)

Z výše uvedených důvodů vytvořil A. Puck pevnostní kritéria zaměřená na vyztužující účinky. Cílem vyztužení je nárůst pevnosti a tuhosti, kterého se docílí právě umístěním výtuzže do matrice. To platí pouze při dodržení následujících tří podmínek:

- Vyztužující vlákna musí být pevnější jak matrice
- Matrice se nesmí dříve porušit než vlákno
- Vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice

(Ehrenstein, 2009)

Na níže uvedeném obrázku je znázorněn přenos sil přes rozhraní matrice-vlákno. Je zde vidět důležitost adhezních sil na rozhraní vrstev v kompozitu. Z průběhu napětí je zřetelný rozdíl při použití matric různé elasticity.



Obr. 8: Přenos zatížení z matrice do vlákna (Dad'ourek, 2007)

## 4.2 Druhy adheze

Adheze je obecně rozdělena podle základních mechanismů na:

- Mechanickou
- Fyzikální
- Chemickou
- Elektrostatickou
- Difuzní

V kompozitních systémech se nejvíc vyskytují tři druhy adheze, a to mechanická, fyzikální a chemická.



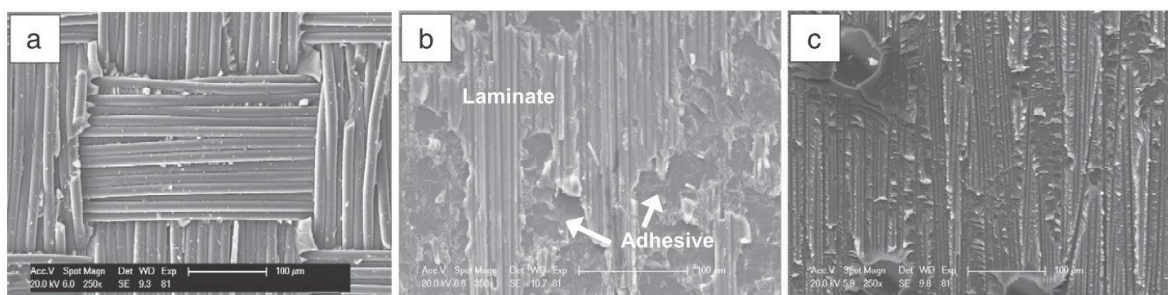
#### 4.2.1 Mechanická adheze

Žádné těleso není absolutně rovné, a tedy i hraniční plochy mezi vláknem a matricí nejsou nikdy dokonale rovné a vždy na nich budou různé výstupky a prohlubně. Na níže uvedeném obrázku jsou znázorněny styčné plochy. (Chung, 2010)



Obr. 9: Znázornění styčných ploch rozhraní vlákno-matrice (Chung, 2010)

Při smykovém zatížení se musí všechny vzájemně zaklíněné plochy bránit rozdílným pohybům matrice a vlákna, aby nedošlo k jejich utržení. Velikost zaklínění roste s drsností povrchu a s kvalitou jejich vzájemné adheze. Dále se na rozhraní vyskytují třecí síly. Tyto síly mohou být dost významné, protože rozdílné tuhosti jednotlivých složek následně vyvolávají velké tahové síly. Pokud se u těchto tahových sil objevují tendence vzniku mikro dutin, tak v kvalitní matrici jim bude bránit atmosférický tlak. K tomu abychom mohli posoudit schopnost zaklínění částic disperze, lze uvažovat koeficient podílu povrchu disperze a její obálky. Na následujícím obrázku můžeme při detailním zvětšení pozorovat, jaký má vliv na výsledný povrch odtrhová folie (Obr. 10 - a), opískování (Obr. 10 - b) a úprava vláken plazmatem (Obr. 10 - c). (Šiška, 2014)

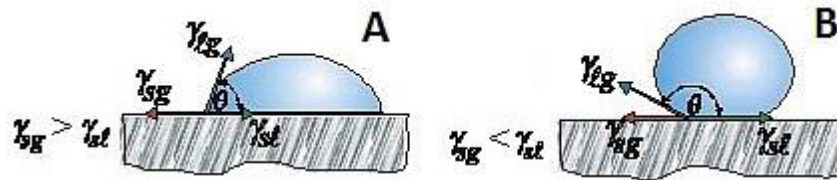


Obr. 10: Detailní pohled na struktury uhlíkových vláken (Šiška, 2014)

#### 4.2.2 Fyzikální adheze

Tento druh adheze souvisí s Van der Waalsovou silou mezi rozhraním a disperzí. Tyto síly působící až do vzdálenosti 0,5 nm a mají teoretickou přitažlivost až 7 GPa. Pokud dosáh-

neme horních hodnot pevnosti, tak lze tuto vazbu považovat za dostatečně pevnou a tudíž vhodnou pro rozhraní kompozitních systémů. Tato vazba přímo souvisí se smáčivostí matrice k disperzi. Na níže uvedeném obrázku je znázorněno základní schéma smáčivosti.

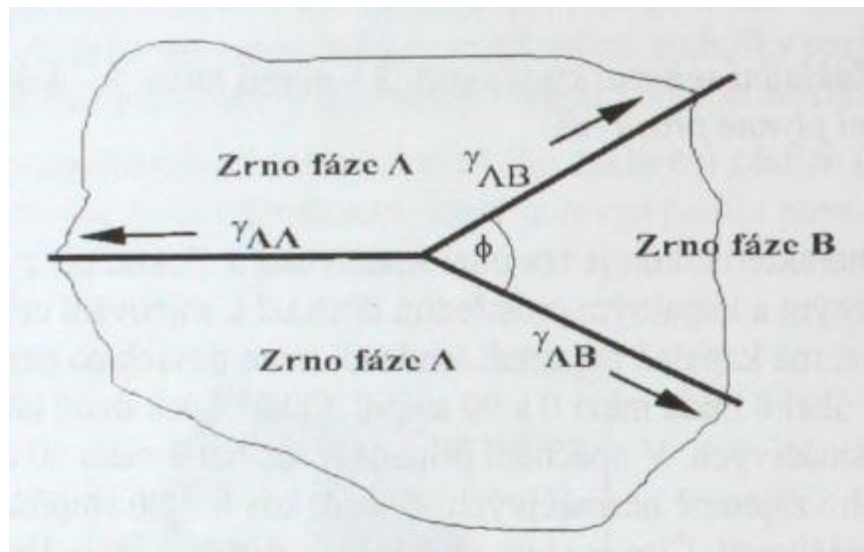


Obr. 11: Kapka smáčivé a nescháčivé kapaliny na pevném povrchu

(Daďourek, 2007)

Úhel smáčivosti jednotlivých kapalin charakterizuje to, jak se kapka kapaliny rozestírá na pevném povrchu. S klesající hodnotou úhlu (menší jak  $90^\circ$ ) se hovoří o vzájemně smáčivých látkách. Pokud kapalina vytvoří souvislou tenkou vrstvu na pevném podkladu, tak hovoříme o ideální smáčivosti. Opakem je potom dokonalá nescháčivost, kdy kapalina vytvoří na pevném povrchu tvar kuličky, která se povrchu dotýká pouze v jednom bodě. Tento stav platí pouze za předpokladu, že se jedná o ideálně hladké rozhraní. Nerovnosti na povrchu totiž mění úhel smáčivosti. Aby se přiblížil stav k realitě, tak se zavádí faktor drsnosti. Ten je dán poměrem plochy skutečného povrchu k ploše ideálně hladkého povrchu. Z toho vyplývá, že u smáčivých látek se adheze s drsností zlepšuje a naopak. (Daďourek, 2007)

Při zaměření na tento stav uvnitř kompozitu lze zpozorovat, že při tuhnutí matrice již nehraje roli plynná fáze. Rovnováha napětí probíhá pouze mezi matricí a vlákny do ní vloženými. Lze si všimnout, že pokud je úhel smáčivosti pod hodnotou  $120^\circ$ , má fáze tendenci zaplňovat póry. Pokud ale tento úhel překročí, má matrice naopak snahu zvětšovat póry na rozhraních. Tento jev je znázorněn na následujícím obrázku. (Daďourek, 2007)



Obr. 12: Rovnováha povrchových napětí uvnitř 2 fází kompozitů (Daďourek, 2007)

Smáčivost matrice a vláken je jedním z hlavních předpokladů pro vyrobení kvalitního kompozitu. Proto je nutné vzájemně porovnávat smáčivost jednotlivých složek kompozitu. V krajním případě lze smáčivost vylepšit impregnací vláken. (Šiška, 2014)

U kompozitních materiálů se nejvíce používají vlákna a ty mají obecně velmi malou adhezi k matrici. Proto se u skelných i uhlíkových vláken již ve výrobě upravuje povrchová vrstva tak, aby se zvýšila jejich smáčivost. (Šiška, 2014)

V níže uvedené tabulce jsou uvedeny hodnoty povrchových napětí běžných kapalin a kritických povrchových napětí u pevných látek za normálních podmínek.

Tab. 2: Hodnoty povrchového napětí běžných kapalin a látek (Daďourek, 2007)

Kapalina	Láh	Olej	Glycerin	Voda	Rtuť
Povrchové napětí $\gamma$ (N/m)	20	33	64	74	480
Látka	Plast	Sklo	Keramika	Kov	Org. látka
Kritické povrchové napětí $\gamma_k$ (N/m)	20-30	80-100	100-1000	400-2000	500-5000

#### 4.2.3 Chemická adheze

Chemická adheze vznikající reakcí matrice a disperze může být v kompozitu velmi pozitivním jevem. Tyto vazební síly, které působí do vzdálenosti 0,3 nm, mohou dosáhnout

teoretické pevnosti až 70 GPa. Lze je uplatnit za předpokladu, že se matrice s disperzí vzájemně prolínají. Na jejich rozhraní se přitom vytvoří vrstva maziva, jejichž adheze je velmi vysoká. Dalším předpokladem je, že se na jejich rozhraní vytvoří, z chemické sloučeniny vzniklé z reakce, matrice a disperze. I přes dobré vlastnosti této mezivrstvy existují i záporné vlivy, které nepříznivě ovlivňují strukturu kompozitu. Tímto vlivem může být stav, kdy difuze mezivrstvy způsobí křehkost s malou pevností a právě v této vrstvě se začne šířit porucha. Další jev, který může nastat, je poškození vnější plochy vlákna, u kterého dojde k snížení pevnosti. Proti tomuto jevu se vláknové kompozity určené do vysokých teplot opatřují difuzní bariérou. (Šiška, 2014)

### 4.3 Měření adheze v kompozitech

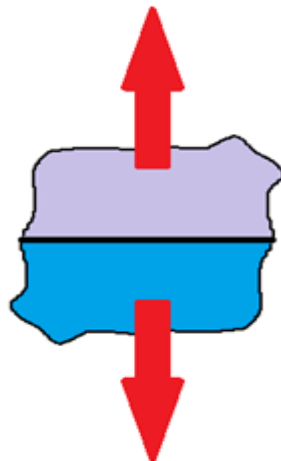
Z uvedených předchozích druhů adhezí lze vysledovat závislost kvality finálního kompozitu na kvalitě adheze vytvořené mechanizmy při výrobě. Spojitost těchto adhezních sil k jednotlivým složkám kompozitu je ale velmi náročná. Jestliže chceme stanovit vlastnosti rozhraní, musíme určit kritické tečné i normálové napětí v rozhraní, ve kterém dojde k poruše. To je ovšem velmi složité na změření i následné vyhodnocení. K bližšímu stanovení adheze v kompozitech se rozdělují měřící metody na:

- Přímé měření adheze
- Nepřímé měření adheze
- Měření adheze přímo na kompozitech

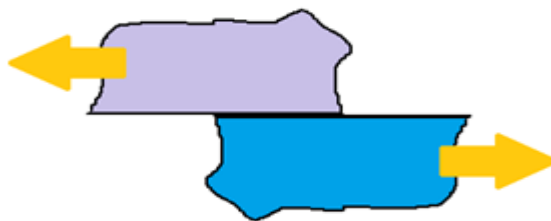
(Fracture and damage of composites, 2006)

#### 4.3.1 Přímé měření adheze

Ke změření adhezního napětí pomocí statických zatěžovacích zkoušek, je nutné vyrobit rovinné rozhraní a to rozhraní zatěžovat tahem v příčné rovině pro stanovení normálového napětí (obr. 13) a v rovině podélné pro stanovení smykového napětí (obr. 14). Tečné adhezní napětí lze taky měřit pomocí trojbodového ohybu (obr. 15), kde se smykové napětí vytvoří v neutrální rovině ohybu. Pokud dojde k překročení kritické hodnoty smykového napětí kompozitu, tak dojde k jeho porušení, tzv. delaminaci. (Fracture and damage of composites, 2006)



Obr. 13: Zkouška adheze tahem (Šiška, 2014)



Obr. 14: Zkouška adheze smykem (Šiška, 2014)



Obr. 15: Zkouška adheze tříbodovým ohybem (Kejdana, 2010)

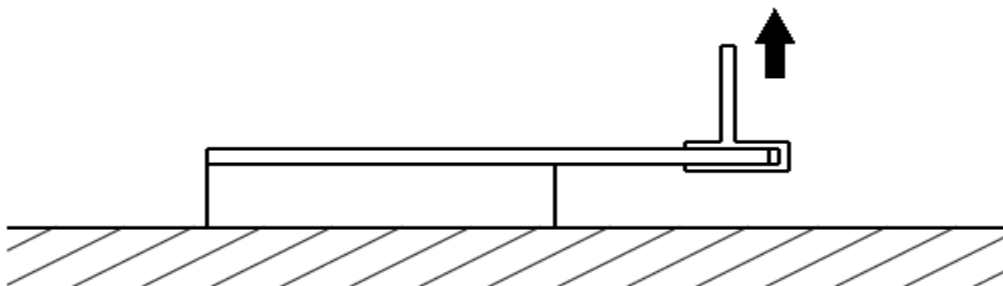
### 4.3.2 Nepřímé měření adheze v kompozitech

U těchto měření se nestanovuje přímá hodnota adheze, ale pouze se pomocí srovnávacích metod vyhodnocuje kvalita adheze v rozhraní. Tyto zkoušky jsou však příliš nepřesné a u vyhodnocování jejich výsledků musíme být obezřetní. Pro ilustraci jsou znázorněny z velkého množství metod pouze dvě. (Daďourek, 2007)

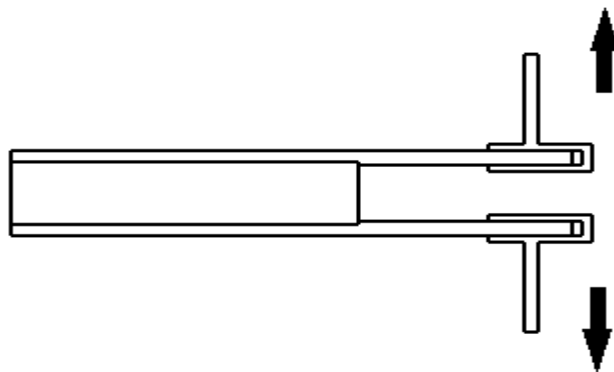
#### Peel test

Jedná se o metodu měření síly odlupu. Při této zkoušce je důležité dodržet konstantní poměr ohybu v celém průběhu měření. Při měření tuhých vzorků se používá kloubových systémů. U měření měkkých vzorků se používá speciálních přípravků. Velikost síly, která je potřebná pro odloupení je pak měřítkem adheze. (Daďourek, 2007)

Tato zkouška se provádí dvěma způsoby. Prvním způsobem je tzv. single cantilever beam test (obr. 16), při kterém dochází k odlupování jedné přesahující vrstvy. Druhým způsobem je tzv. double cantilever beam (obr. 17) u kterého jsou odlupovány obě vrstvy souběžně.



Obr. 16: Schematické zobrazení SCB peel testu (Gajdůšek, 2014)



Obr. 17: Schematické zobrazení DCB peel testu (Gajdůšek, 2014)

### Scratch test

Při tomto měření se využívá geometrie Rockwellova hrotu, pomocí něhož je vytvořen vryp v matrici. Test končí v tu chvíli, kdy hrot, na něj působí síla, utrhne celou vrstvu od podložky. Toto měření je nevhodné pro příliš měkké matrice. (Daďourek, 2007)

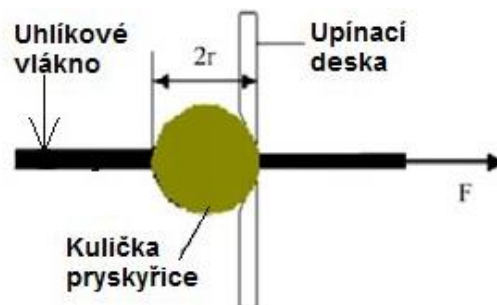
### 4.3.3 Měření přímo na kompozitech

U těchto druhů měření dochází k vyvozování tahových napětí, jejichž hodnoty vypovídají o velikosti adheze v kompozitech. Přímé určení těchto napětí je možné jen při velkém zjednodušení. (Daďourek, 2007)

Jednou z těchto zkoušek jsou tzv. Pull-out testy, při kterých dochází k vytrhnutí vlákna z polymerní matrice. U tohoto způsobu zkoušky hledáme buď kritickou délku vlákna (obr. 16), nebo se zaměřujeme na stanovení soudržnosti vlákno - matrice (obr. 17). Důležitým měřítkem pro tento typ zkoušek je charakter porušení vláken. (Fracture and damage of composites, 2006)



Obr. 18: Vytrhávací zkouška 1 (Daďourek, 2007)



Obr. 19: Vytrhávací zkouška 2 (Daďourek, 2007)

Dalšími měřicími metodami adheze přímo na kompozitech jsou experimentální měření. Tyto měření jsou realizována v praktické části této diplomové práce. Tyto zkoušky měření adheze jsou prováděny přímo na kompozitech a jsou zařazeny do mezinárodních norem ISO, nebo pod Český normalizační institut ČSN. Zkoušky, které budu rozebírat detailněji jsou tyto: tahová zkouška na  $\pm 45^\circ$  laminátech pro stanovení smykové pevnosti v rovině, stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami, stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky a stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku. Všechny tyto normy můžeme provádět na trhacím stroji odpovídajícím normě ISO 5893. (Český normalizační ústav, 1999)

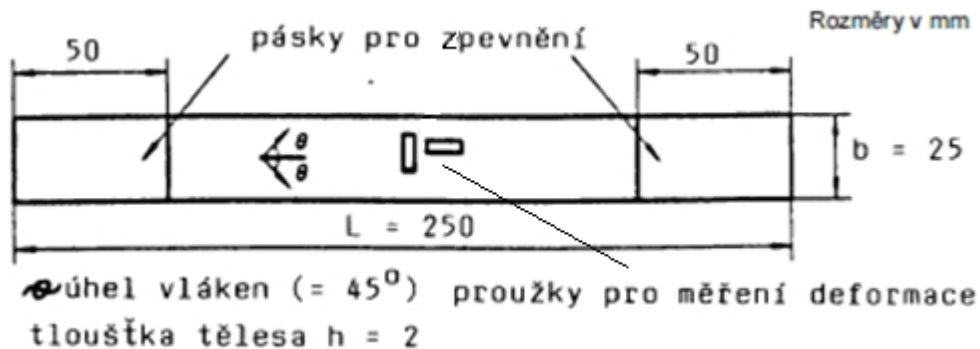
### **Tahová zkouška na $\pm 45^\circ$ laminátech pro stanovení smykové pevnosti v rovině – ČSN EN ISO 14 129**

Tato norma předepisuje postup pro stanovení křivky smykového napětí, smykového modulu a smykové pevnosti v rovině tahovou zkouškou  $45^\circ$  vlákny vyztužených plastových kompozitů. Tato metoda je vhodná pro lamináty s reaktoplastovou a termoplastovou maticí, připravené ze stejných vrstev tkanin včetně stejnoměrných tkanin s vlákny orientovanými pod úhlem  $\pm 45^\circ$  k ose tělesa, kde struktura laminátu je symetrická a vyvážená vzhledem ke středové rovině tělesa. Tato metoda není vhodná pro hrubé tkaniny. Zjistilo se, že zkouška je citlivá k počtu a rozdělení vrstev, proto by výsledky měly být porovnávány pouze u vzorků se stejným počtem a řádným rozdělení vrstev. (Český normalizační ústav, 1999)

Zkušební těleso má tvar pásku s pravoúhlým průřezem, které má vlákna orientované pod úhlem  $\pm 45^\circ$  k ose tělesa je namáháno tahem. Pro stanovení smykového modulu se měří formace rovnoběžně a příčně k ose tělesa. Zkouška se ukončí při hodnotě smykové deformace  $\gamma_{12} = 0,05$ , pokud nedojde dříve k porušení tělesa (kromě předčasného porušení těsně u čelisti nebo v čelistech). Touto metodou lze dobře stanovit křivku smykového napětí v nelineární oblasti, ale konečné hodnoty napětí a deformace takto získané by však měly být posuzovány s opatrností. Výsledné hodnoty konečného napětí a deformace jsou tedy nižší než hodnoty získané vhodnějšími metodami jako např. torzní zkouškou na tělesech ve svaru trubek. (Český normalizační ústav, 1999)

Zkušební těleso u této zkoušky má šířku  $25 \pm 0,5$  mm a délku 250 mm. Pokud není předepsáno jinak, tloušťka musí být  $2 \pm 0,2$  mm. Podélné strany jednotlivých těles musí být rovnoběžné s přesností na 0,2 mm. (Český normalizační ústav, 1999)



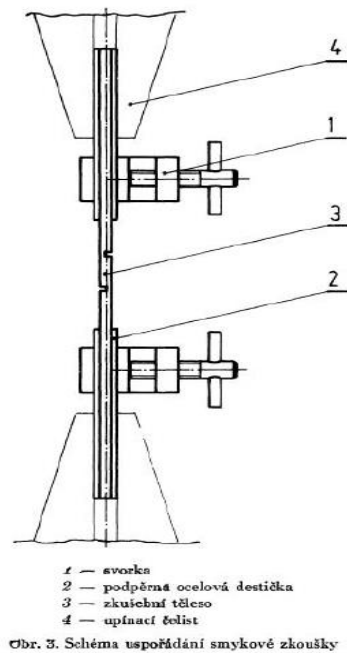


Obr. 20: Zkušební těleso pro ČSN EN ISO 1429 (Český normalizační ústav, 1999)

### Stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů ČSN 64 0662

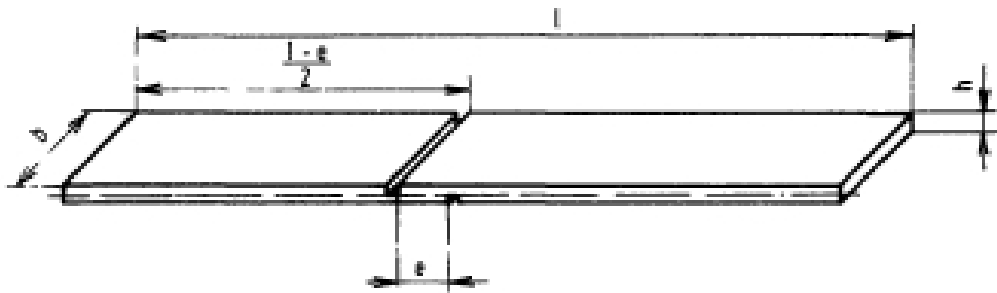
Tato norma slouží ke stanovení pevnosti ve smyku vyztužených plastů a je použitelná pro všechny typy laminátů s rovinnými rovnoběžně uspořádanými vrstvami výztuže. Pevnost ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů je důležitá pro kontrolu kvality vyráběného materiálu a při předvídání pevnosti materiálu při zvýšených teplotách. Zkušební těleso je opatřené výřezy a je zatěžováno tahovou silou, dokud nedojde ke smykovému porušení mezi vrstvami výztuže. Hodnota zatížení při smykovém porušení tělesa se odečte a použije k výpočtu pevnosti ve smyku mezi vrstvami. Tuto zkoušku lze provádět buď metodou A, nebo metodou B. (Český normalizační ústav, 1999)

**Metoda A** - používá se při zkoušení podpěrných ocelových destiček vkládaných mezi čelisti trhacího stroje a zkušební těleso. Podpěrné destičky se rovnoměrně utáhnou pomocí dvou malých svorek tvaru C umístěných od sebe ve vzdálenosti 65 mm. Zkušební těleso je s podpěrnými destičkami namáháno až do smykového porušení. Použití podpěrných destiček zabrání porušení zkušebních těles odlupem v průběhu zkoušky. (Český normalizační ústav, 1973)



Obr. 21 Schéma uspořádání smykové zkoušky (Český normalizační ústav, 1973)

**Metoda B** - při této metodě se zkušební těleso vkládá přímo do čelistí trhacího stroje bez použití podpěrných ocelových destiček. Při zkoušce proto dojde kromě smykového porušení taky k určitému podílu odlupování ve vazbě mezi vrstvami. (Český normalizační ústav, 1973)

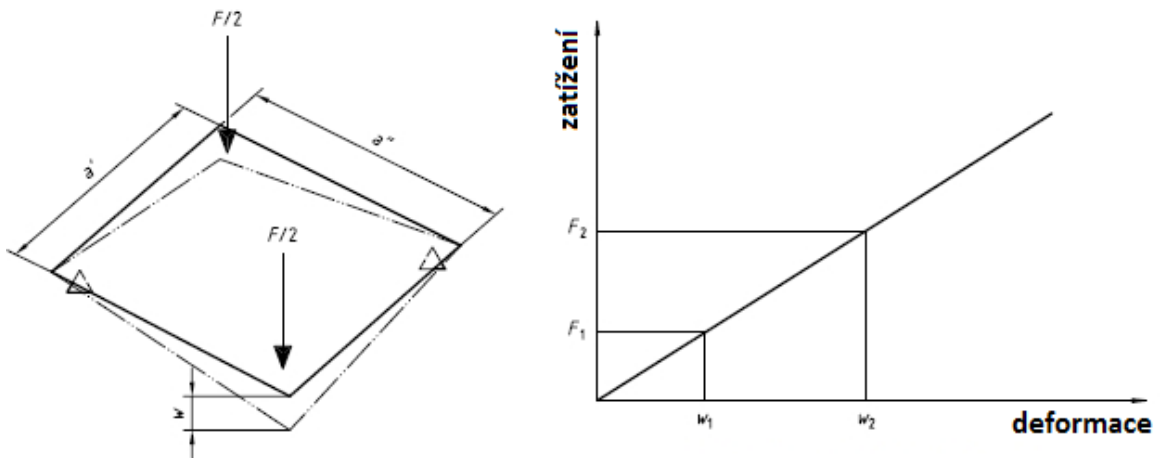


Obr. 22: Zkušební těleso pro ČSN 64 0662 (Český normalizační ústav, 1973)

### Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky ČSN EN ISO 15310

Při měření podle této normy nedochází k poškození zkušebního tělesa. Těleso má tvar čtvercové desky dlouhé 150 mm a tlusté 2 mm (dlouhá jednosměrná vlákna), nebo tlusté 4 mm pro ostatní druhy výztuží. Zkušební těleso je lineárně zatěžováno do své poloviny tloušťky ve dvou krajních protilehlých bodech radiální silou. Na zbylých dvou krajních protilehlých bodech je

podepřeno. Z lineární charakteristiky, kterou získáme, stanovíme smykový modul pružnosti v GPa. (Český normalizační ústav, 2006)



Obr. 23: Znárodnění průběhu zkoušky ČSN EN ISO 15310

(Český normalizační ústav, 2006)

### Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku dle ČSN EN ISO 14130

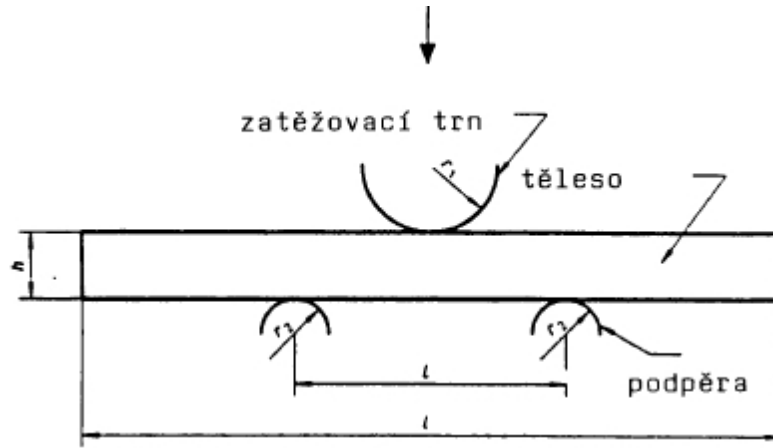
Tato norma předepisuje postup pro stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti a je vhodná pro vlákny vyztužené plastové kompozity s matricí z reaktoplastů nebo termoplastů za předpokladu, že dojde k mezilaminárnímu smykovému porušení. Tato metoda není vhodná pro stanovení konstrukčních parametrů, ale může být použita pro předběžný výběr materiálu nebo pro kontrolu kvality. (Český normalizační ústav, 1999)

Těleso, které má tvar pravoúhlého hranolu, je ohybově zatíženo jako jednoduchý nosník tak, aby došlo k mezilaminárnímu porušení. Těleso leží na dvou podpěrách a je zatěžováno trnem umístěným uprostřed mezi podpěrami. (Český normalizační ústav, 1999)

Zkušební těleso má tvar pravoúhlého hranolu tloušťky  $2\pm 0,2$  mm, délky  $20\pm 1$  mm a šířky  $10\pm 0,2$  mm. Pokud není možné používat normalizované zkušební těleso, musí se dodržovat následující pravidla:

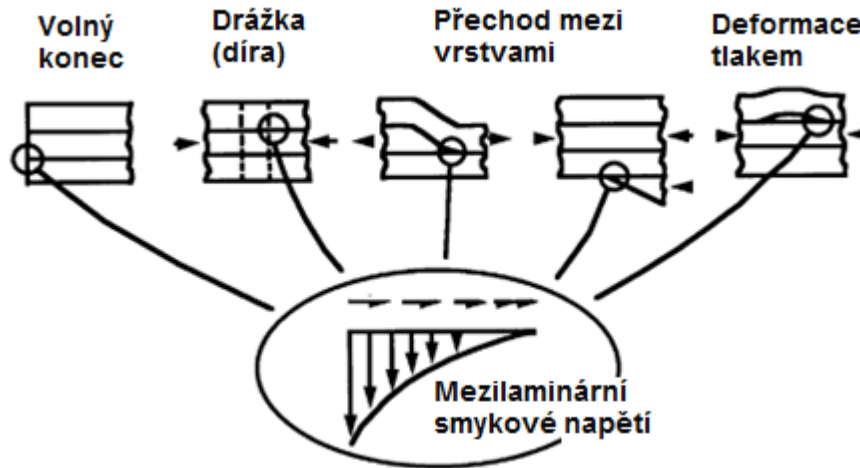
- Délka a tloušťka zkušební tělesa musí být ve stejném poměru jako u normalizovaného tělesa:  $l=10.h$
- Šířka musí být zvolena tak, aby její poměr k tloušťce byl stejný jako u normalizovaného tělesa  $b=5.h$

Zkušební tělesa musí být plochá a nezkroucená a její povrch nesmí mít defekty. Tloušťka se po celé délce musí pohybovat v rozsahu  $\pm 5\%$  průměrné tloušťky. (Český normalizační ústav, 1999)



Obr. 24: Znáornění průběhu zkoušky ČSN EN ISO 14 130 (Český normalizační ústav, 1999)

Na poslední obrázku této kapitoly jsou znázorněna místa vzniku napěťových špiček mezi-laminárního smykového napětí. Při navrhování výroby se musí tyto místa zohlednit.



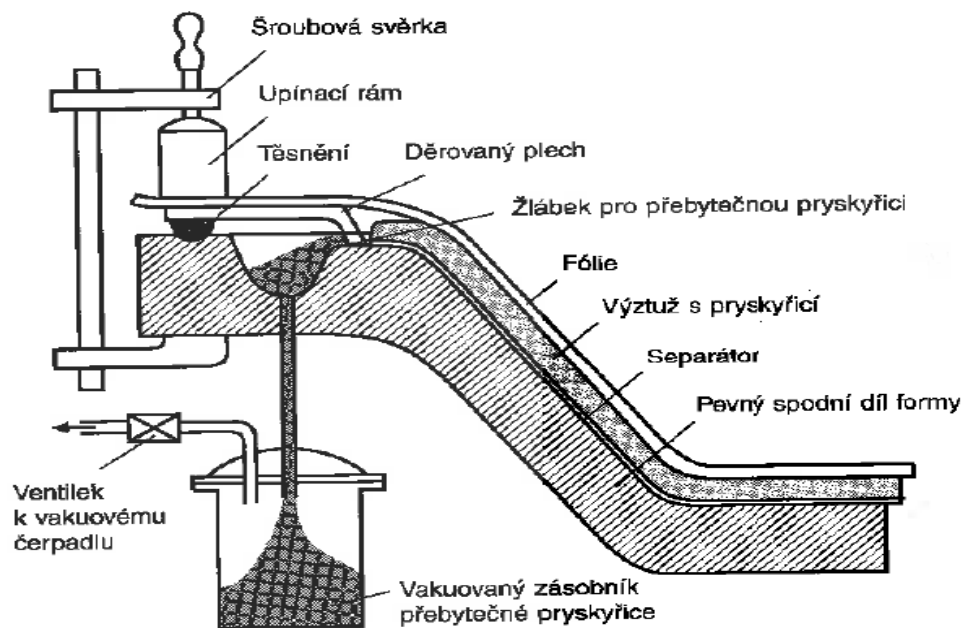
Obr. 25: Místa vzniku napěťových špiček (Boukharouba, Elboudjaini a Pluvinage, 2009)

## 5 LISOVÁNÍ KOMPOZITŮ

Pro dosažení kvalitních výlisků bylo vyvinuto několik technologických postupů, které využívají nízkého tlaku. Dělí se na technologie používající lisování pomocí vakuovaného vaku, vakuované dvoudílné pevné formy, tlakového vaku, lisování v autokávu a celou řadu technologií využívajících injektážní proscycování výztuže. (Ehrenstein, 2009)

### 5.1 Lisování pomocí vakuovaného vaku

Používá se jednodílná forma podobně jako u ručního kladení nebo stříkání. Následně se laminát přikryje porézní separační folií, na kterou se položí hrubá odsávací tkanina a forma se utěsní pomocí těsnění a folie. Připojením formy k čerpadlu se celá forma vakuuje. Díky vakuu se laminát zbaví vzduchových bublin. Přebytečná pryskyřice se poté odvede s odsávací tkaniny i ze žlábků, který je umístěn na obvodu formy. Pomocí této metody je možné vyrábět výlisky s oboustranně hladkým povrchem. (Ehrenstein, 2009)

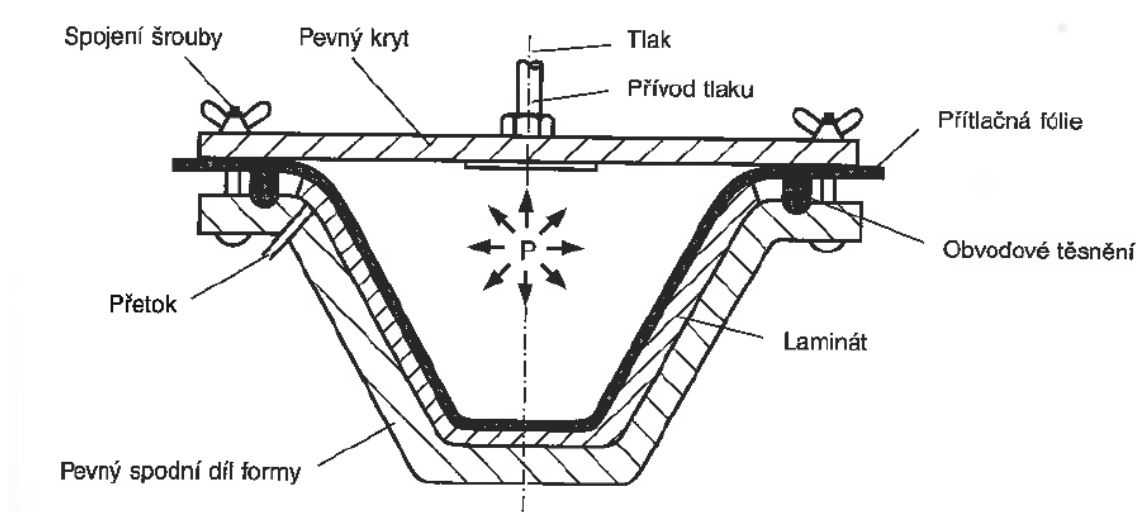


Obr. 26: Vakuová technologie používající jednodílnou formu (Ehrenstein, 2009)

### 5.2 Lisování pomocí tlakového vaku

Je to v podstatě obrácená varianta předchozí technologie. Při této technologii musí být negativní forma uzavřena krytem tak, aby bylo možno ve formě dosáhnout rovnoměrného přetlaku (až 8 barů). Vysokým rozdílem tlaků se dosáhne ještě lepšího zhutnění

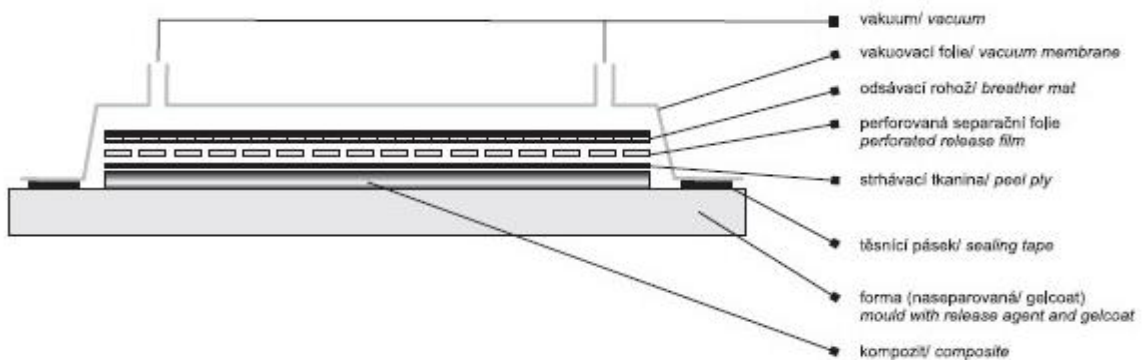
laminátu, forma však s porovnáním s předchozí technologií musí být podstatně stabilnější. (Ehrenstein, 2009)



Obr. 27: Lisování pomocí tlakového vaku v jednodílné formě (Ehrenstein, 2009)

### 5.3 Lisování v autokávu

Jedná se v podstatě o spojení lisování vakuového a tlakového. Autokáv je vyhřívaná tlaková nádoba, u níž přesné a reprodukovatelné řízení teplotních, tlakových a vakuovacích cyklů umožňuje stabilizaci a vytvrzení kompozitních materiálů. Tato technologie vyžaduje vysoké základní investice a dovoluje pouze malosériovou výrobu. Umožňuje ale výrobu vysoce kvalitních výlisků za reprodukovatelných výrobních podmínek. (Ehrenstein, 2009)



Obr. 28: Lisování v autokávu (Havel – composites, [b.r.])

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 POPIS A CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části diplomové práce je sledovat adhezi mezi vrstvami dřevokompozitu vyztuženého skelnými vlákny a epoxidovou nebo polyesterovou matricí.

K porovnání byly použity 2 druhy pryskyřic (polyesterová a epoxidová), z nichž byly vyrobeny vzorky pro všechny druhy zkoušek. Jednotlivé vzorky se lišily druhem použité pryskyřice, orientací dýhy (podélná orientace, příčná orientace), počtem a umístěním skelné tkaniny.

### Stanovené cíle:

- Návrh a výroba zkušebních vzorků
- Experimentální stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku dle ČSN EN ISO 14130
- Experimentální měření ohybových vlastností dle ČSN EN ISO 178
- Stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů ČSN 64 0662
- Stanovení odtrhové pevnosti dle ASTM C297/C297M – 04 (Flatwise test)
- Vyhodnocení výsledků
- Diskuze



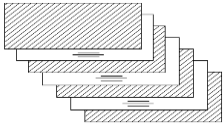
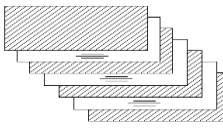
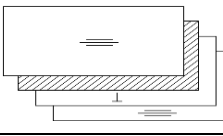
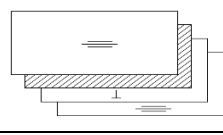
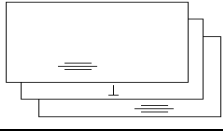
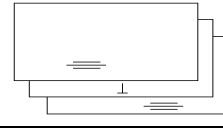
## 7 POPIS PROBLÉMU A POUŽITÉ MATERIÁLY




Společností WOODEXPERT s.r.o. byla dodána dýha ze smrkového dřeva o tloušťce 2 mm, kterou jsem prokládal skelnou tkaninou. Jako pojivo jsem použil polyesterovou a epoxidovou pryskyřici. S ohledem na spotřebu tkaniny byly vybrány jen určité zkušební metody. Je potřeba zjistit, jak se budou měnit vlastnosti dřevokompozitu při změně použité matrice při různých skladbách. Vzhledem k tomu, že kompozitní materiály jsou zajímavé svou anizotropií, zaměřuje se tato práce na adhezi, která se velkou mírou projevuje při tahovém a smykovém namáhání kompozitu a dalších podobných zkouškách.

Vliv tohoto spojení tkanina - matrice - dýha je taky do jisté míry dán technologií výroby, jakou je výsledný kompozit vyrobený. Pro tvorbu vzorků jsem zvolil metodu ručního laminování, po které následovalo zalisování pomocí vakuové pumpy. Nevýhodou této metody je nerovnoměrná vrstva matrice a špatné prosycení tkaniny. Výhodou je nenáročnost výroby a nízká cena.

Pro experiment byly použity následující skladby:

Tab. 3 Použité skladby kompozitu

	Druh matrice	Počet vrstev dýhy	Počet vrstev tkaniny	Skladba
Vzorek č. 1	Epoxidová	3	4	
Vzorek č. 2	Polyesterová	3	4	
Vzorek č. 3	Polyesterová	3	1	
Vzorek č. 4	Epoxidová	3	1	
Vzorek č. 5	Epoxidová	3	0	
Vzorek č. 6	Polyesterová	3	0	

	- Skelná tkanina
	- Dýha orientovaná podélně
	- Dýha orientovaná příčně

Ve výše uvedené tabulce jsou graficky znázorněny skladby jednotlivých zkušebních vzorků. Vzorky číslo 1 a 2 byly vyrobeny ze tří vrstev dýhy, kdy všechny vrstvy byly orientované stejným směrem. Každá z těchto vrstev byla proložena skelnou tkaninou a tato tkanina byla umístěna i na vrchní a spodní straně v kompozitu. Rozdíl mezi těmito vzorky byl pouze v použité pryskyřici. U prvního vzorku byla použita epoxidová pryskyřice a u druhého polyesterová.

Vzorky číslo 3 a 4 byly vyrobeny ze tří vrstev dýhy, kdy orientace vláken střední dýhy byla pootočena o 90° oproti zbylým dvěma vrstvám. Mezi první a druhou dýhu byla vložena skelná tkanina. Na spojení vrstev u vzorku číslo 3 byla použita polyesterová pryskyřice a u vzorku číslo 4 pryskyřice epoxidová.

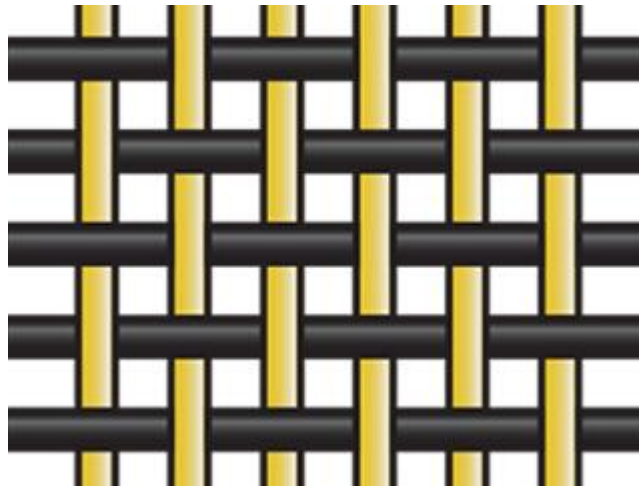
Vzorky 5 a 6 byly vyrobeny ze tří vrstev dřevěné dýhy, orientace vláken střední dýhy byla pootočena o 90° oproti zbylým dvěma vrstvám. U těchto vzorků nebyla použita ani jedna vrstva skelné tkaniny. U vzorku číslo 5 byly dýhy spojeny epoxidovou pryskyřicí a u vzorku 6 polyesterovou.

## 7.1 Vlastnosti skelné tkaniny

Skelné tkaniny jsou základním materiálem pro výrobu kompozitu. Kompozity vyrobené z tkané textilie mají oproti laminátům z netkaných textilií lepší fyzikálně mechanické vlastnosti.

Pro výrobu vzorků byla použita skelná tkanina s měrnou hmotností 200 g/m<sup>2</sup>, vazbou plátno.

Viz technický list v příloze P II.



Obr. 29: Schéma vazby plátno (Unique, 2015)

## 7.2 Vlastnosti pryskyřic

Pro výrobu zkušebních vzorků byly použity dva druhy pryskyřic. Oba jsou dostupné na našem trhu a lze je bez problémů zakoupit. Nebyly použity žádné speciální systémy upravené na míru pro použití na dřevo. Obě pryskyřice jsou vhodné pro použití při pokojové teplotě a za této teploty i vytvrzují. Jedná se o dvojsložkový systém a tudíž má každá pryskyřice svoje tužidlo, které bylo dodáno současně s pryskyřicí. Pro polyesterovou pryskyřici Exolit AP 740 bylo použito tužidlo Butanox v poměru 100:2. Doba vytvrzení u této pryskyřice byla cca 20 minut. Pro epoxidovou pryskyřici L285 bylo použito tužidlo 285 MGS v poměru 100:40. Pryskyřice i tužidlo byly od firmy Havel Composites. Doba vytvrzení epoxidové pryskyřice je 1 den.

Další vlastnosti použitých pryskyřic jsou uvedeny v technických listech v příloze P I.

## 7.3 Pomocné nástroje a přípravky

K výrobě vzorků byly použity následující pomůcky:

- Antistatická utěrka
- Forma (kompozitová nebo laminovaná dřevotříska)
- Metr
- Nádobka na pryskyřici (HDPE)
- Ostré nůžky (dělení tkaniny)

- 
- Zalamovací nůž (dělení překližky)
  - Papírové ubrousky (čištění formy a rukou)
  - Pěnový váleček
  - Rukavice
  - Voskový separátor (MOULD RELEASE PASTE WAX M 700/C-WAX)
  - Fixa (popis vzorků)
  - Plastová stěrka (čištění formy)
  - Váhy s rozlišením  $\pm 1$  g
  - Odmašťovadlo (technický benzín)

## 8 VÝROBA VZORKŮ A POPIS ZKUŠEBNÍCH STROJŮ

### 8.1 Příprava formy

Nejdříve je nutné pečlivá příprava formy, ve které se budou vyrábět zkušební vzorky. K dispozici jsem měl formu kompozitovou a formu vyrobenou z laminované dřevotřísky. Abych zajistil snadné odformování kompozitu, bylo zapotřebí důkladného očištění a naseparování formy následujícím způsobem.

- očištění nečistot z předešlého výrobku
- nanesení voskového separátoru (MOULD RELEASE PASTE WAX M 700/C-WAX)
- vyschnutí separátoru
- vyleštění povrchu pomocí papírových ubrousků
- tento postup opakujeme dle doporučení výrobce 3krát

Na takto připravenou formu se může začít laminovat.

### 8.2 Příprava dřevěné dýhy

Dýhy byly dodány firmou WOODEXPERT s.r.o. v různých formátech. Rozměry dýh jsem volil s ohledem na rozměr formy. Zvolil jsem počet vrstev dýhy v kompozitu a vybrali vzorky, které měly co nejmenší počet viditelných vad na povrchu (suky, praskliny atd.). Tloušťka dýhy byla asi 2 mm a bylo nutné s ní pracovat s co největší opatrností, aby při manipulaci nebo řezání nedošlo k jejímu prasknutí či jinému poškození.



Obr. 30: Struktura povrchu dýhy

### 8.3 Příprava skelné tkaniny

Rozměry tkanin jsem zvolil dle rozměrů formy a dřevěných dýh. Rozměr tkaniny byl vždy o něco větší, než byl rozměr dýhy. S tkaninou je nutné zacházet s opatrností, aby nedošlo k poškození nebo posunutí vazby tkaniny. Podle počtu vrstev skelného vlákna v daném dřevokompozitu jsem vytvořil nářezový plán tak, aby bylo co nejméně odpadu.

### 8.4 Příprava matrice

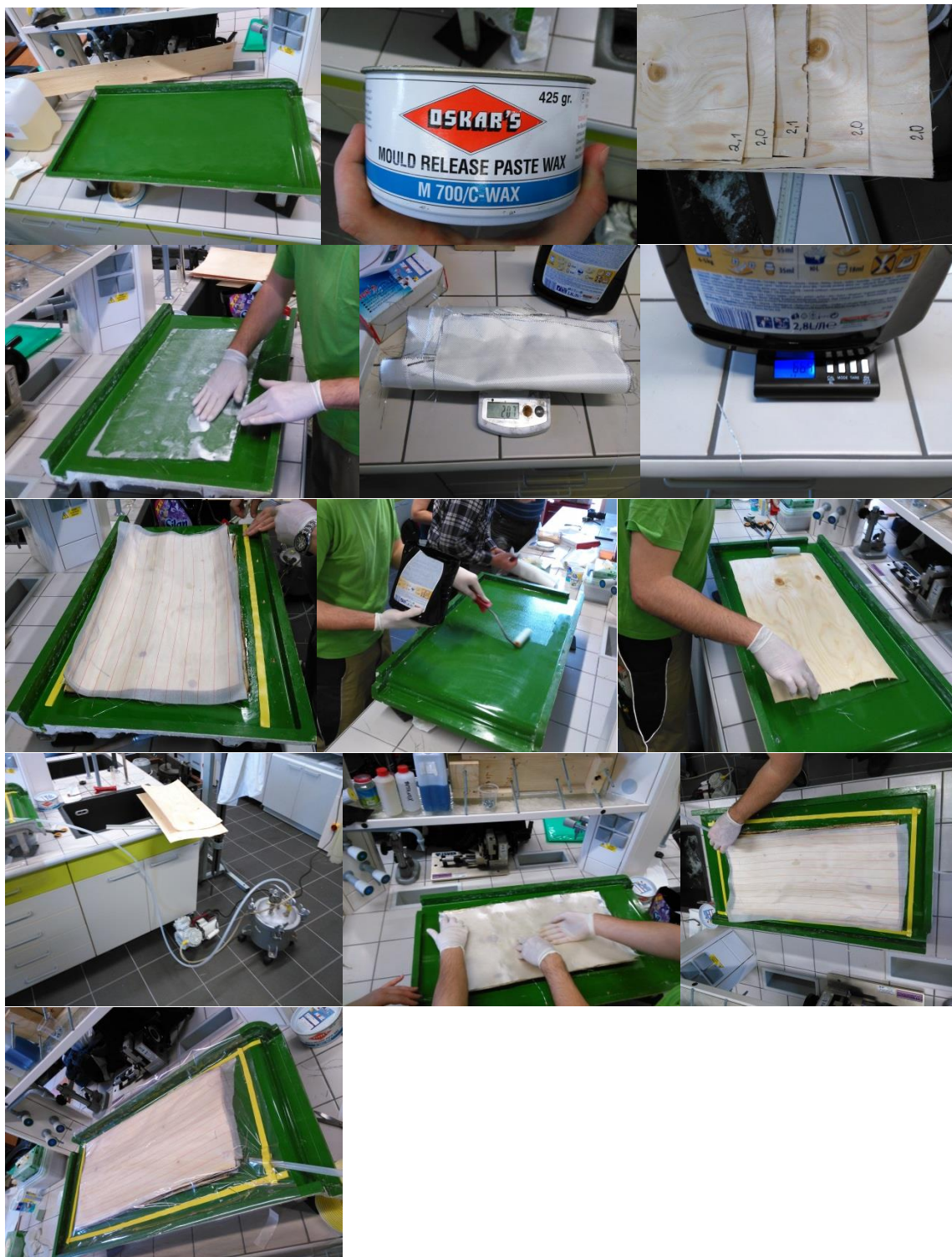
Při výrobě zkušebních vzorků jsem používal epoxidovou a polyesterovou pryskyřici, které jsou běžně k zakoupení. Před samotným mícháním pryskyřice s tužidlem je třeba zjistit hmotnost tkaniny a podle rozměrů, tvaru a použitých materiálů zvolit správný přírůstek směsi. Hmotnost pryskyřice se volil v poměru 1:1 s hmotností tkaniny. Přírůstek směsi jsem zvolil 50 %, protože materiál, kterým jsem prokládal skelnou tkaninu (dřevěná dýha), byl značně nasákavý. Poté jsem danou pryskyřici smíchal s tužidlem v poměru, které bylo doporučeno výrobcem pryskyřice. Systém je potřeba dobře rozmíchat a sledovat dobu zpracovatelnosti, kterou stanovuje výrobce laminačního systému. Během této doby je nutné zvládnout zaformovat vyráběný kompozit.

### 8.5 Klazení vrstev kompozitu

Na naseparovanou formu se molitanovým válečkem nanese rovnoměrná vrstva pryskyřice. Na tuto vrstvu se položí tkanina, kterou je nutné řádně prosytit pryskyřicí. Na tkaninu se položí dřevěná dýha, na které je oboustranně nanesena pryskyřice. Na tuto dýhu se opět položí tkanina. Tento postup se několikrát opakuje, dokud nedosáhneme požadovaného počtu vrstev materiálů. Takto vyrobený kompozit jsem musel z důvodu nerovností dřevěné dýhy zalisovat pomocí vakuové infuze, aby došlo k dokonalému spojení vrstev kompozitu. Takto vyrobený materiál se nechá vytvrdit a následně se odformuje.

U jednotlivých vzorků se klazení mírně lišilo z důvodu odlišného uspořádání vrstev kompozitu.

Na následujících obrázcích je postupně znázorněn celý výrobní postup od separování formy až do zalisování zkušebního materiálu.

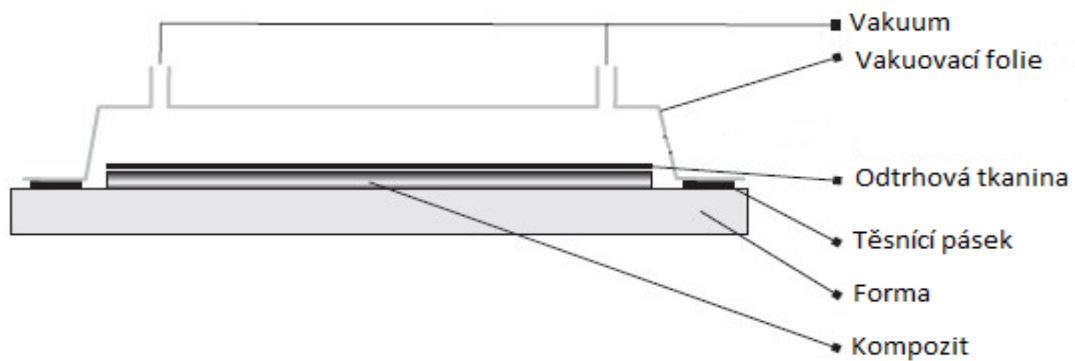


Obr. 31: Postup výroby zkušebních vzorků

### 8.6 Výroba kompozitu pomocí vakuového lisování

Po dosažení požadovaného počtu vrstev bylo nutné materiál zalisovat pomocí vakuového lisování.

Na vrchní vrstvu je nutné umístit odtrhovou tkaninu, která složí ke snadnějšímu odformování. Na obvod formy se nalepí těsnící páska, která zajišťuje těsnost mezi formou, vakuovací fólií a hadicí od vakuovací pumpy. Po dosažení času vytvrzení dané pryskyřice je možné materiál odformovat.

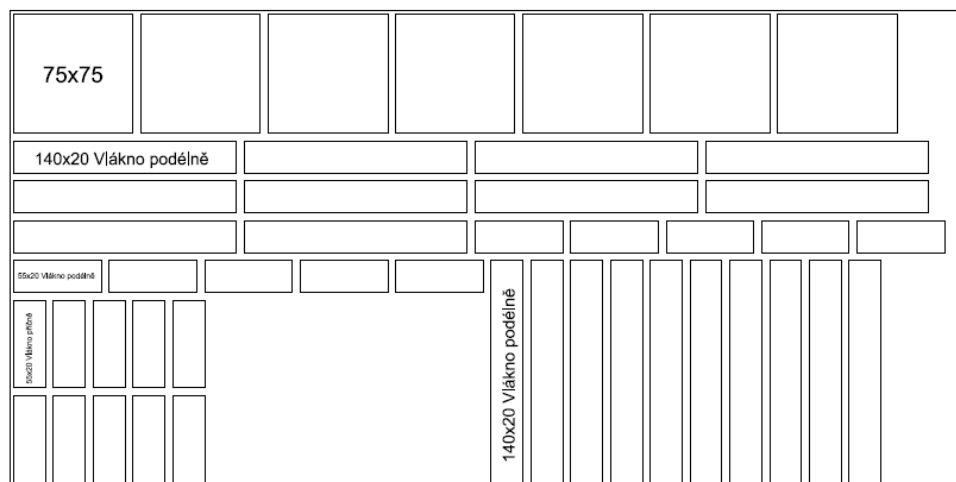


Obr. 32: Princip vakuového lisování (Havel – composites, [b.r.]

### 8.7 Úprava kompozitu na vzorky

Po vytvrzení a odformování vzorků se tyto vzorky naměřily a nařezaly na formátovací pile na rozměry, které byly dány jednotlivými měřicími metodami.

Na následujícím obrázku je znázorněn nářezový plán zkušebních vzorků.



Obr. 33: Příklad nářezového plánu



## 8.8 Měřicí stroje

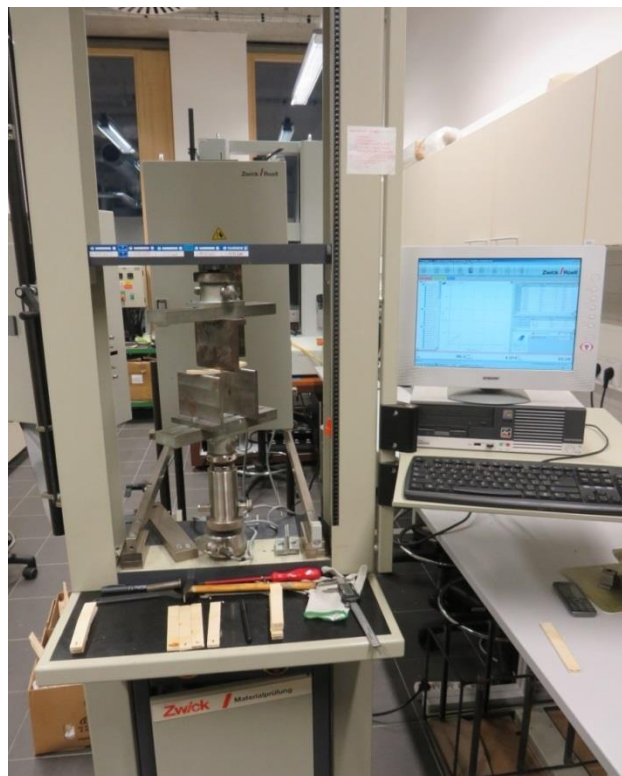
K experimentům, které jsou uvedeny v diplomové práci, byly využity zkušební stroje v laboratořích FT UTB ve Zlíně.

### 8.8.1 Univerzální zkušební stroj Zwick 1456

Na zkušebním stroji Zwick 1456 byly realizovány všechny zkoušky. Dle dané zkušební metody se měnily vstupní parametry.

Tab. 4: Technická specifikace stroje Zwick 1456

<b>Maximální zkušební síla</b>	20 kN
<b>Strojová výška</b>	1284 mm
<b>Celková výška</b>	2012 mm
<b>Celková šířka</b>	630 mm
<b>Šířka pracovního prostoru</b>	420 mm
<b>Hmotnost</b>	150 kg



Obr. 34: Univerzální zkušební stroj Zwick 1456

## 9 VÝSLEDKY A DISKUZE

Při výrobě vzorků byla snaha o dosažení co možná nejvíce skladeb kompozitů, které bylo možné vyrobit v podmínkách, které umožňovaly laboratoře FT UTB ve Zlíně. Z jednoho materiálu byly při výrobě zkušebních vzorků vyrobeny dva různé materiály tak, že se změnila orientace řezání. To znamená, že jednou byly vlákna orientované v podélném směru a jednou ve směru příčném.

U všech výsledků bylo nejprve provedeno jejich zhodnocení, vyloučení extrémních hodnot a následně vytvořeny tabulky a grafy. Normy určují jako hlavní ukazatel pro porovnání jednotlivých souborů měření aritmetický průměr a jeho směrodatnou odchylku.

### 9.1 Experimentální měření ohybových vlastností dle ČSN EN ISO 178

Norma definuje metodu pro stanovení chování tuhých a polotuhých plastů při namáhání ohybem ve třibodovém uspořádání pro různá zkušební tělesa. Stanovuje se pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu a různé závislosti mezi napětím a deformací. Metoda je vhodná pro materiály vykazující lineární závislost napětí na deformaci. Norma obsahuje metodu korekce výsledků na zakřivení počáteční části křivky a na poddajnost zkušebního stroje. (Český normalizační ústav, 1999)

Zkouška dává konstrukční podklady pro kompozity, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb. V průběhu zkoušky se zaznamenává síla (napětí) působící na těleso a velikost odpovídajícího průhybu zkušebního tělesa.

Při ohybové zkoušce se jedná o namáhání tlakem a tahem současně – v horních vrstvách je tahové, směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové.

Napětí v ohybu se vypočítá dle daného vzorce.

$$\delta_o = \frac{M_o}{W_o} \quad (1)$$

$\delta_o$  - Napětí v ohybu

$M_o$  - Ohybový moment

$W_o$  - Modul průřezu

Zkušební tělesa pro tuto zkoušku měly tvar pravoúhlého hranolu tloušťky  $6,5 \pm 0,2$  mm, délky  $140 \pm 1$  mm a šířky  $20 \pm 0,2$  mm.

Při experimentu bylo měřeno vždy minimálně 10 vzorků od každého materiálu a následně byly vyřazeny vychýlené hodnoty. Touto metodou byly zkoušeny všechny vyrobené materiály. V následujících tabulkách a grafech jsou shrnuty všechny naměřená výsledky, díky kterým bude možno vyhodnotit materiály, které mají nejlepší ohybové vlastnosti.

Tab. 5: Modul pružnosti v ohybu - E [MPa] v podélném směru

Číslo vzorku	E [MPa]	s
1 - Podélně	11671,67	1335,55
2 - Podélně	10550,00	269,26
3 - Podélně	5721,88	665,37
4 - Podélně	5592,86	221,79
5 - Podélně	6373,33	941,43
6 - Podélně	6192,86	667,16

Tab. 6: Modul pružnosti v ohybu - E [MPa] v příčném směru

Číslo vzorku	E [MPa]	s
1 - Příčně	2630,0	214,0
2 - Příčně	1714,0	76,6
3 - Příčně	771,3	96,1
4 - Příčně	800,7	152,2
5 - Příčně	764,4	40,3
6 - Příčně	881,8	137,6

Tab. 7: Mez pevnosti -  $\delta_p$  [MPa] v podélném směru

Číslo vzorku	$\delta_p$ [MPa]	s
1 - Podélně	111,00	5,80
2 - Podélně	118,67	6,75
3 - Podélně	63,64	7,58
4 - Podélně	68,47	6,42
5 - Podélně	80,23	6,79
6 - Podélně	68,94	7,91

Tab. 8: Mez pevnosti -  $\delta_p$  [MPa] v příčném směru

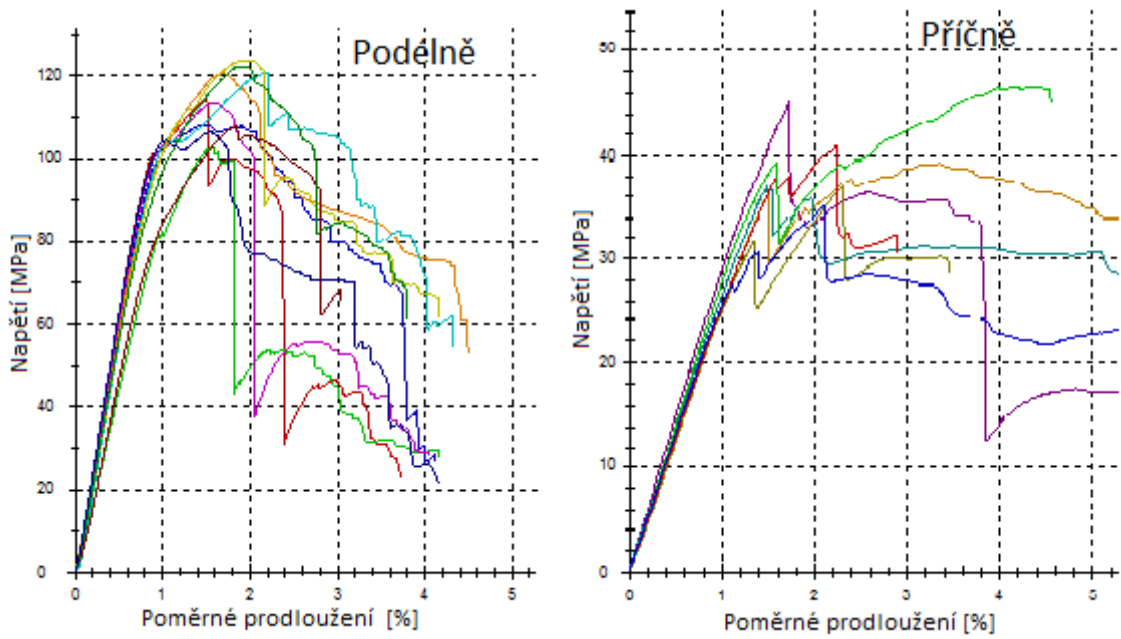
Číslo vzorku	$\delta_p$ [MPa]	s
1 - Příčně	39,15	3,80
2 - Příčně	26,46	1,29
3 - Příčně	19,49	1,51
4 - Příčně	23,37	3,55
5 - Příčně	16,14	2,67
6 - Příčně	21,52	4,71

Tab. 9: Poměrné prodloužení - dL [%] v podélném směru

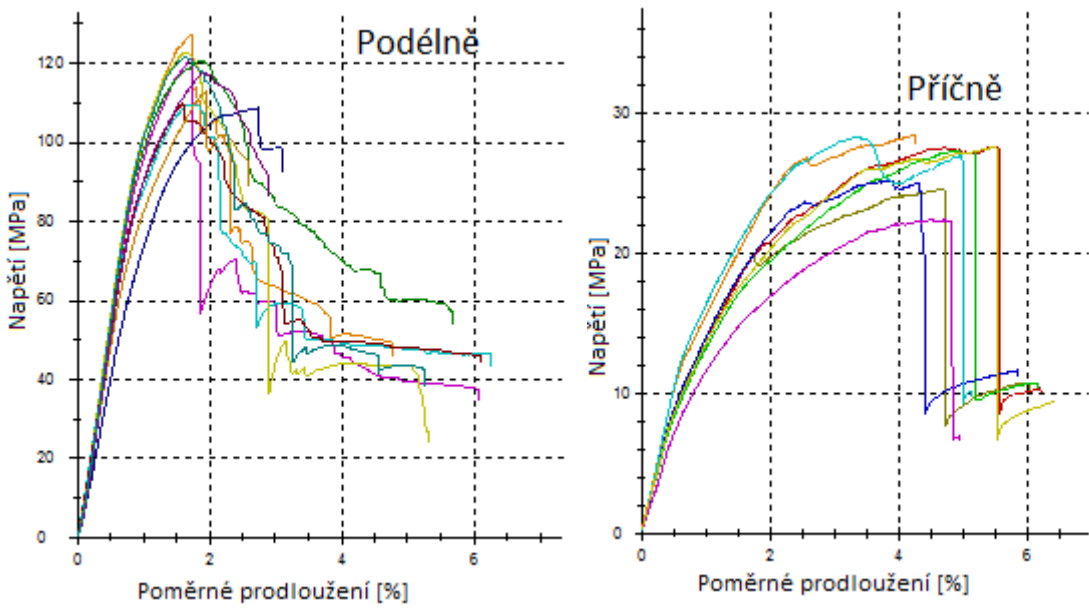
Číslo vzorku	dL [%]	s
1 - Podélně	1,57	0,07
2 - Podélně	1,67	0,07
3 - Podélně	1,59	0,20
4 - Podélně	1,66	0,27
5 - Podélně	1,83	0,55
6 - Podélně	1,43	0,13

Tab. 10: Poměrné prodloužení - dL [%] v příčném směru

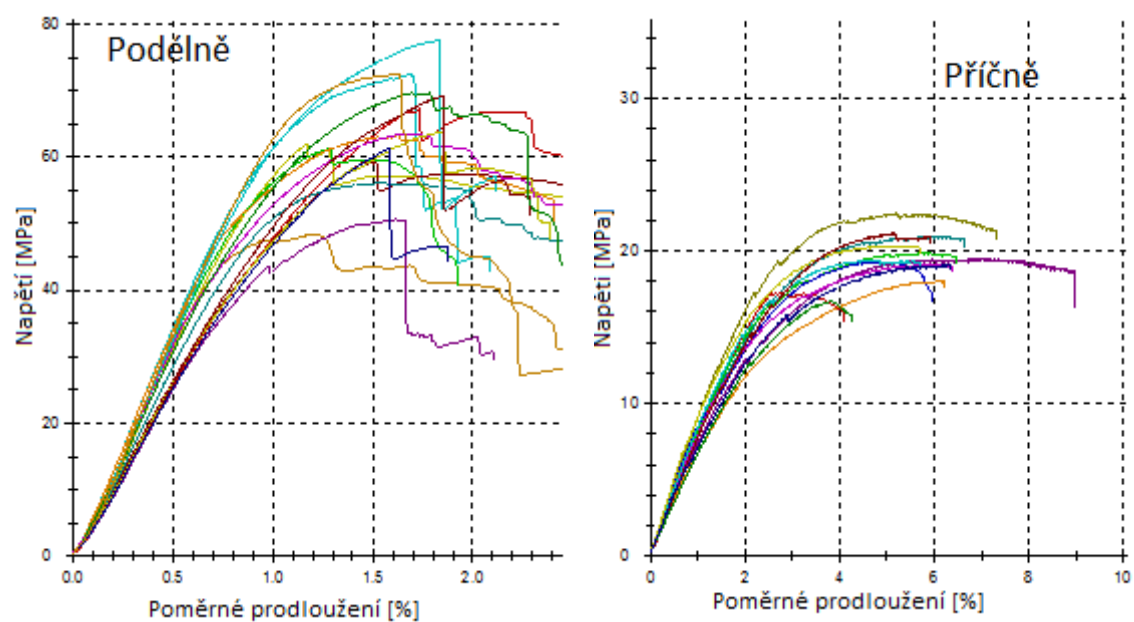
Číslo vzorku	dL [%]	s
1 - Příčně	2,15	0,70
2 - Příčně	4,86	0,63
3 - Příčně	5,32	1,01
4 - Příčně	5,37	1,21
5 - Příčně	3,04	0,77
6 - Příčně	3,74	1,32



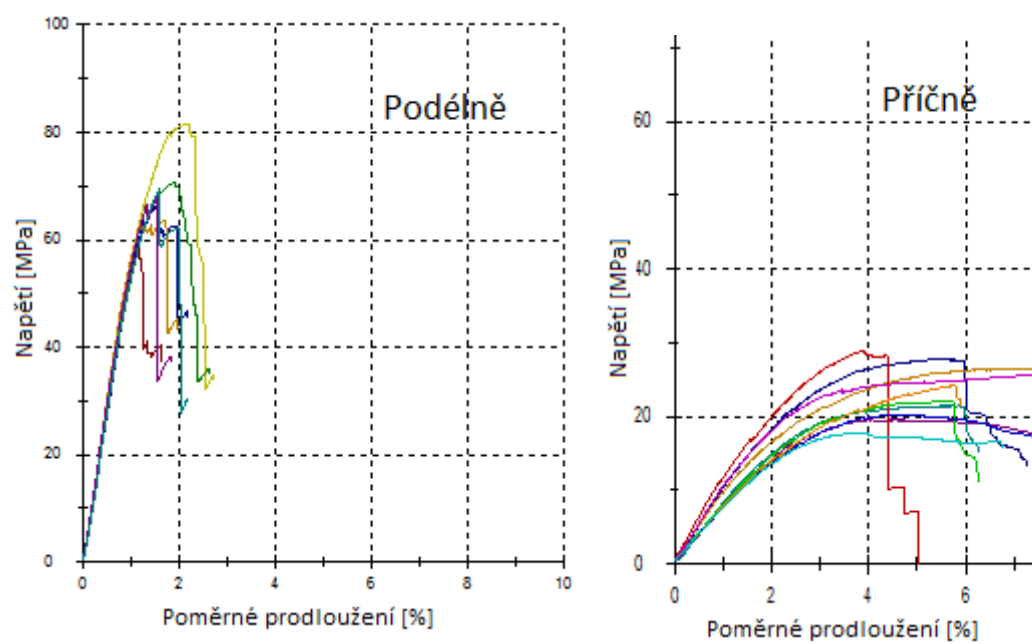
Obr. 35: Grafické průběhy napětí ohybové zkoušky vzorku č. 1



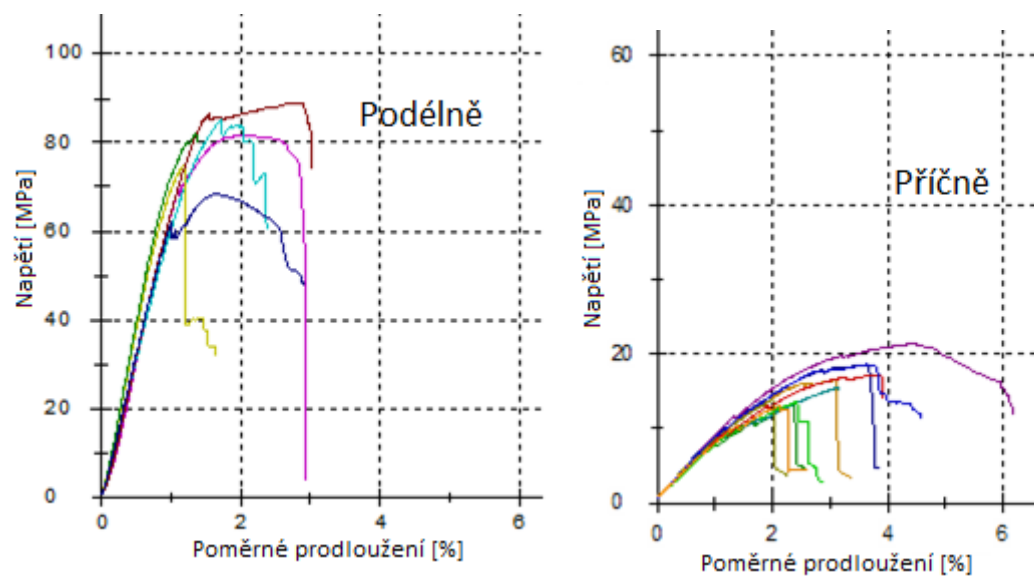
Obr. 36: Grafické průběhy napětí ohybové zkoušky vzorku č. 2



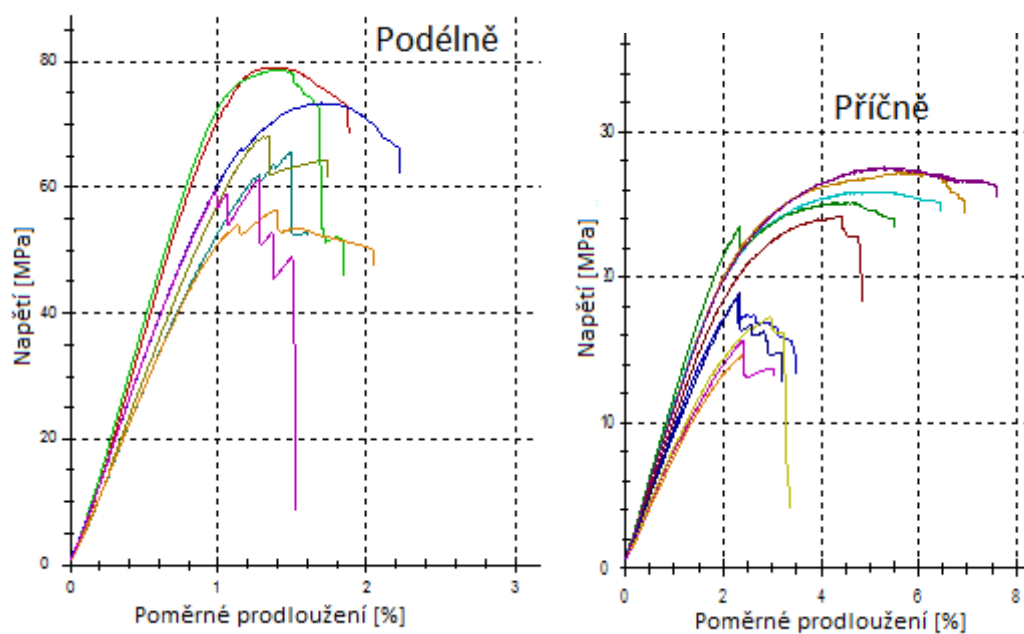
Obr. 37: Grafické průběhy napětí ohybové zkoušky vzorku č. 3



Obr. 38: Grafické průběhy napětí ohybové zkoušky vzorku č. 4



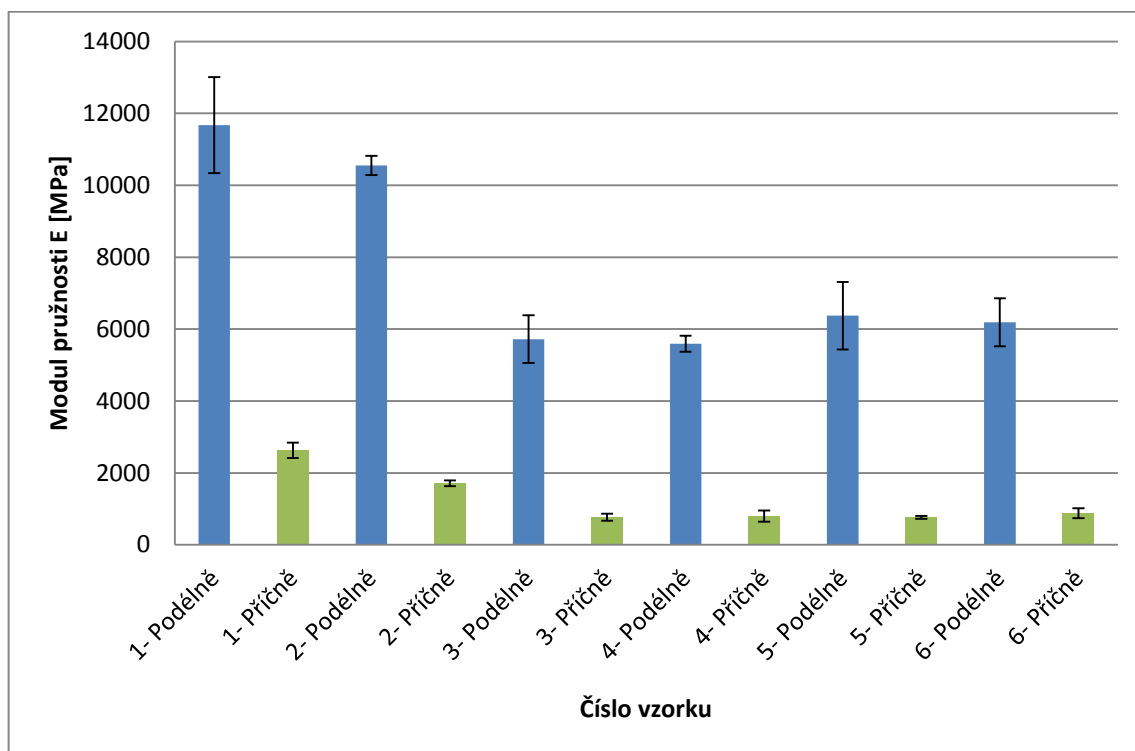
Obr. 39: Grafické průběhy napětí ohybové zkoušky vzorku č. 5



Obr. 40: Grafické průběhy napětí ohybové zkoušky vzorku č. 6

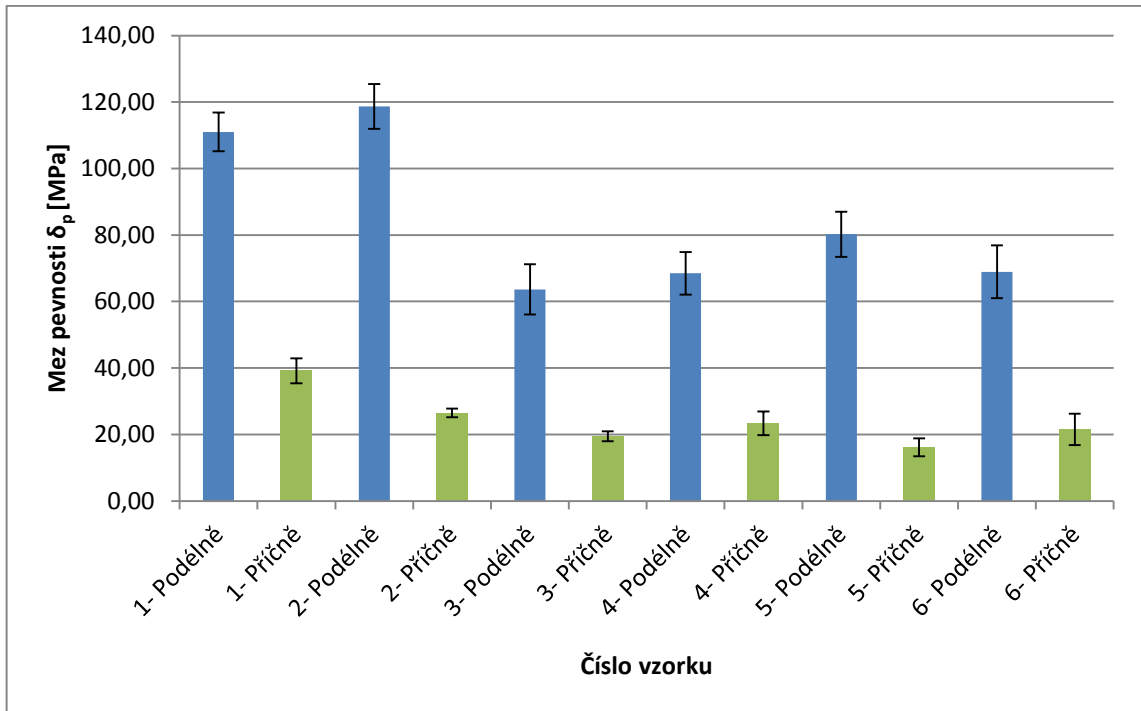


Obr. 41: Způsoby porušení vzorků při ohybové zkoušce

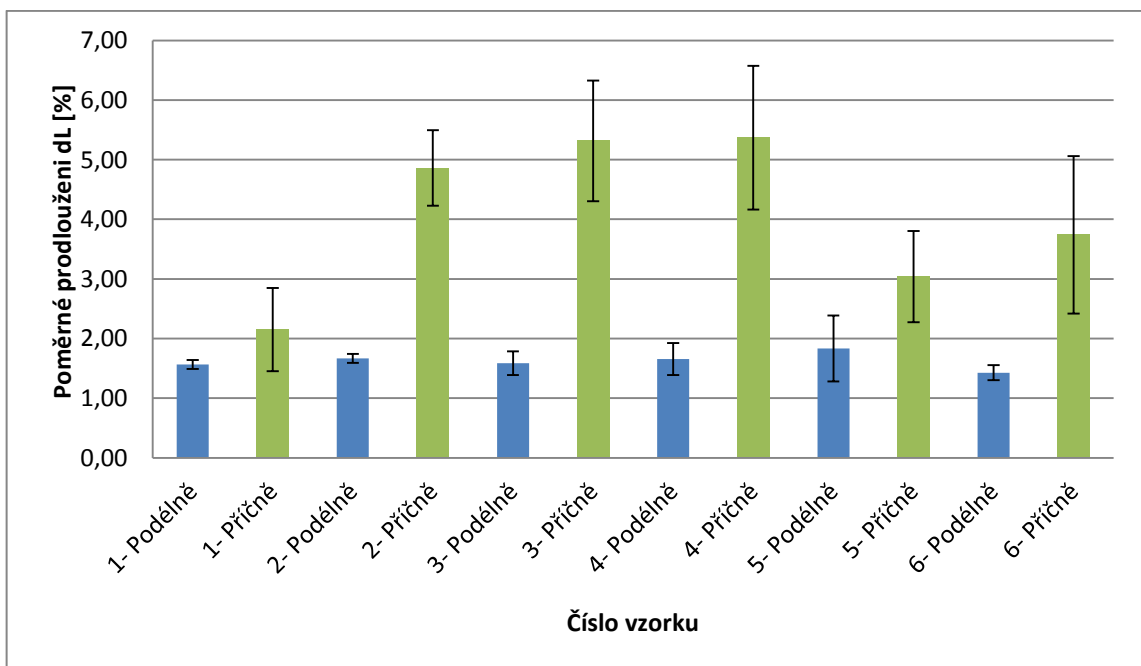


Obr. 42: Porovnání modulu pružnosti v ohybu daných struktur





Obr. 43: Porovnání meze pevnosti daných struktur



Obr. 44: Porovnání poměrného prodloužení daných struktur

**Shrnutí zkoušky:** Hlavním cílem této zkoušky bylo stanovení modulu pružnosti v ohybu jednotlivých struktur zkoušených materiálů. Modul pružnosti v ohybu je dán závislostí

mezi ohybovým napětím a deformací. Z výsledků lze vypožorovat, že daný materiál má velmi odlišné vlastnosti v podélném směru jak ve směru příčném. Je to dáno orientací vláken dřevěné dýhy.

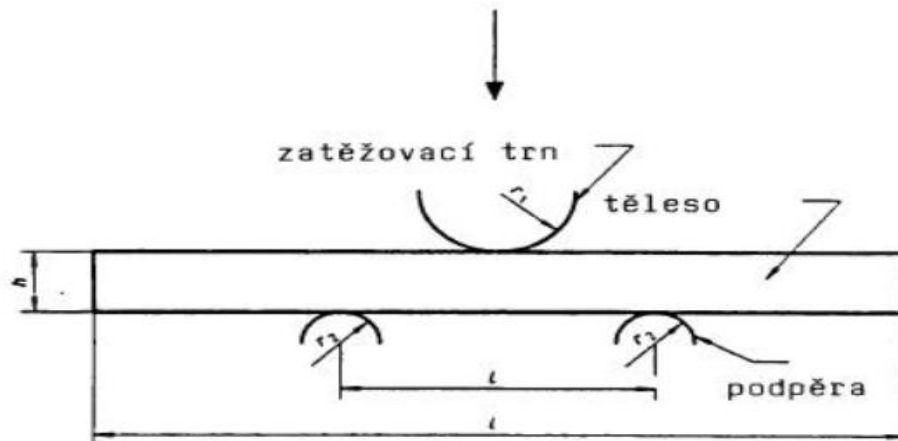
Nejvyšších hodnot modulu pružnosti a meze pevnosti dosahovaly vzorky číslo 1 a 2, které byly vyrobeny ze tří vrstev dýhy a čtyř vrstev skelné tkaniny. Vzorek číslo 1 byl spojený pomocí epoxidové pryskyřice a vzorek číslo 2 pomocí polyesterové pryskyřice. Třetí nejvyšší hodnoty dosahovaly vzorky číslo 5, které byly vyrobeny pouze ze tří vrstev dřevěné dýhy spojených pomocí epoxidové pryskyřice, vrchní a spodní dýha byly orientované podélně, dýha umístěna ve střední vrstvě byla orientována v příčném směru. Zajímavým jevem je, že zkušební vzorky, které byly proloženy jednou vrstvou tkaniny, dosáhly horších vlastností než vzorek, který byl složen pouze ze tří vrstev dýhy spojených epoxidovou pryskyřicí. Mohlo to být způsobeno špatným zalaminováním vzorku.

## 9.2 Stanovení zdánlivé mezilaminární pevnosti metodou krátkého nosníku dle ČSN EN ISO 14130

Tato norma předepisuje postup pro stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti a je vhodná pro vlákny vyztužené plastové kompozity s matricí z reaktoplastů nebo termoplastů za předpokladu, že dojde k mezilaminárnímu smykovému porušení. Tato metoda není vhodná pro stanovení konstrukčních parametrů, ale může být použita pro předběžný výběr materiálu nebo pro kontrolu kvality. (Český normalizační ústav, 1999)

Těleso, které má tvar pravoúhlého hranolu, je ohybově zatíženo jako jednoduchý nosník tak, aby došlo k mezilaminárnímu porušení. Těleso leží na dvou podpěrách a je zatěžováno trnem umístěným uprostřed mezi podpěrami. (Český normalizační ústav, 1999)

Zkušební tělesa pro tuto zkoušku měly tvar pravoúhlého hranolu tloušťky  $6,5 \pm 0,2$  mm, délky  $55 \pm 1$  mm a šířky  $20 \pm 0,2$  mm. Při experimentu bylo měřeno vždy minimálně 10 vzorků od každého materiálu a následně byly vyřazeny vychýlené hodnoty. Touto metodou byly zkoušeny všechny vyrobené materiály. V následujících tabulkách a grafech jsou shrnuty všechny naměřená výsledky, díky kterým bude možno vyhodnotit materiály, které mají nejvyšší mezilaminární pevnost.



Obr. 45: Schéma zkoušky ČSN EN ISO 14130 (Český normalizační ústav, 1999)

Zdánlivá mezilaminární pevnost, vyjádřená v MPa je dána vztahem:

$$\tau = \frac{\frac{3}{4} F}{b \cdot h} \quad (2)$$

F - Zatížení při porušení

b - Šířka zkušební vzorku

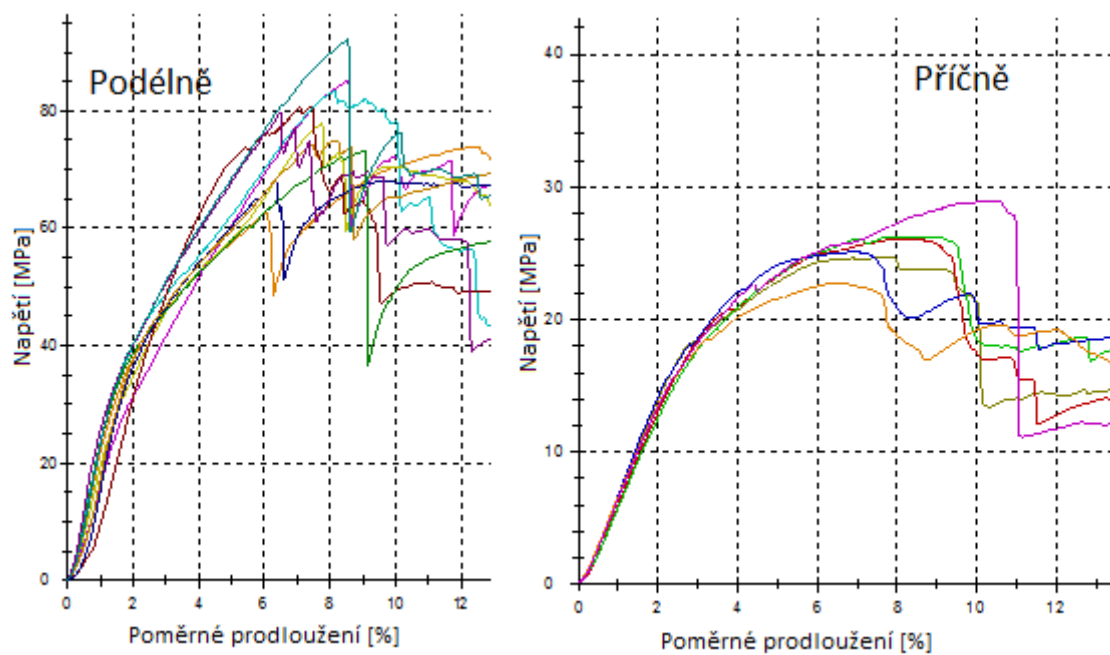
h - Výška zkušební vzorku

Tab. 11: Zdánlivá mezilaminární pevnost -  $\tau$  [MPa] v podélném směru

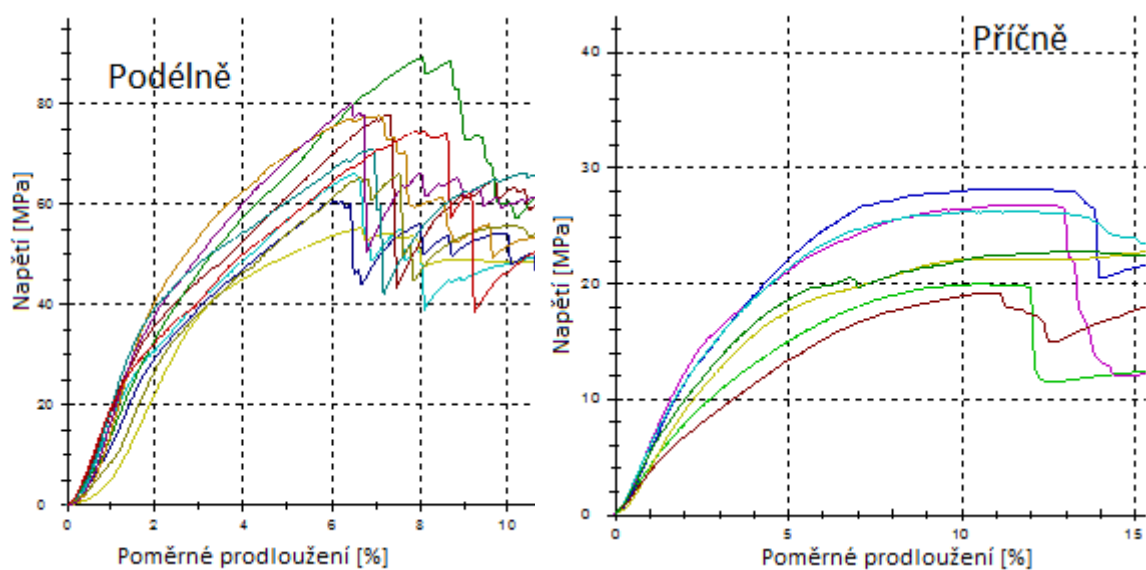
Číslo vzorku	$\tau$ [MPa]	s
1 - Podélně	78,97	6,55
2 - Podélně	71,81	9,54
3 - Podélně	47,38	8,06
4 - Podélně	125,40	9,38
5 - Podélně	145,20	21,62
6 - Podélně	120,67	9,53

Tab. 12: Zdánlivá mezilaminární pevnost -  $\tau$  [MPa] v příčném směru

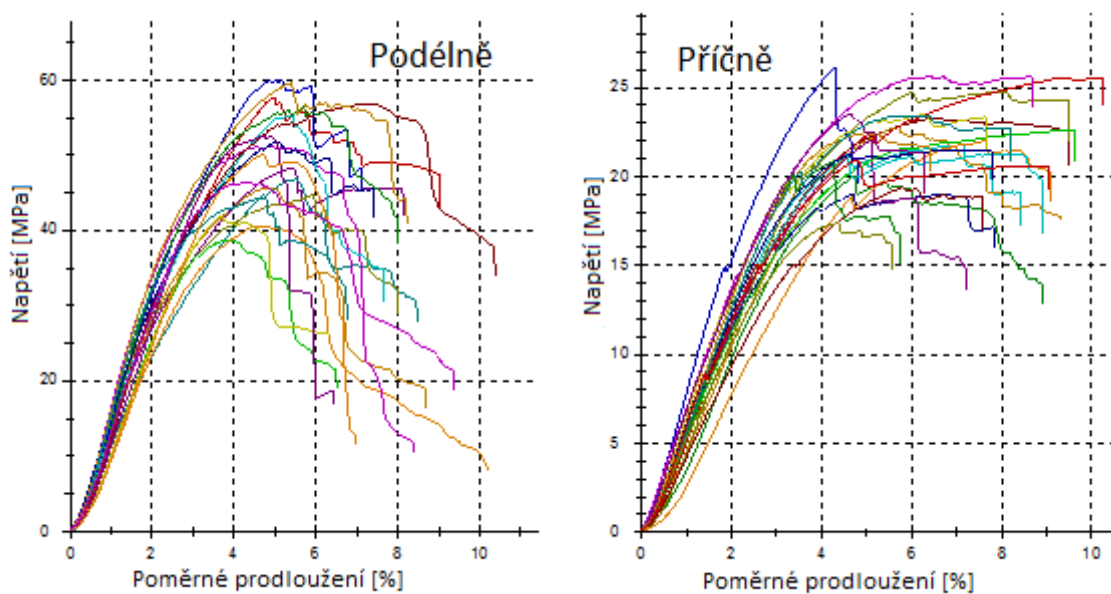
Číslo vzorku	$\tau$ [MPa]	s
1 - Příčné	25,62	1,87
2 - Příčné	23,21	4,14
3 - Příčné	22,41	2,13
4 - Příčné	63,28	14,84
5 - Příčné	45,25	10,17
6 - Příčné	53,42	9,17



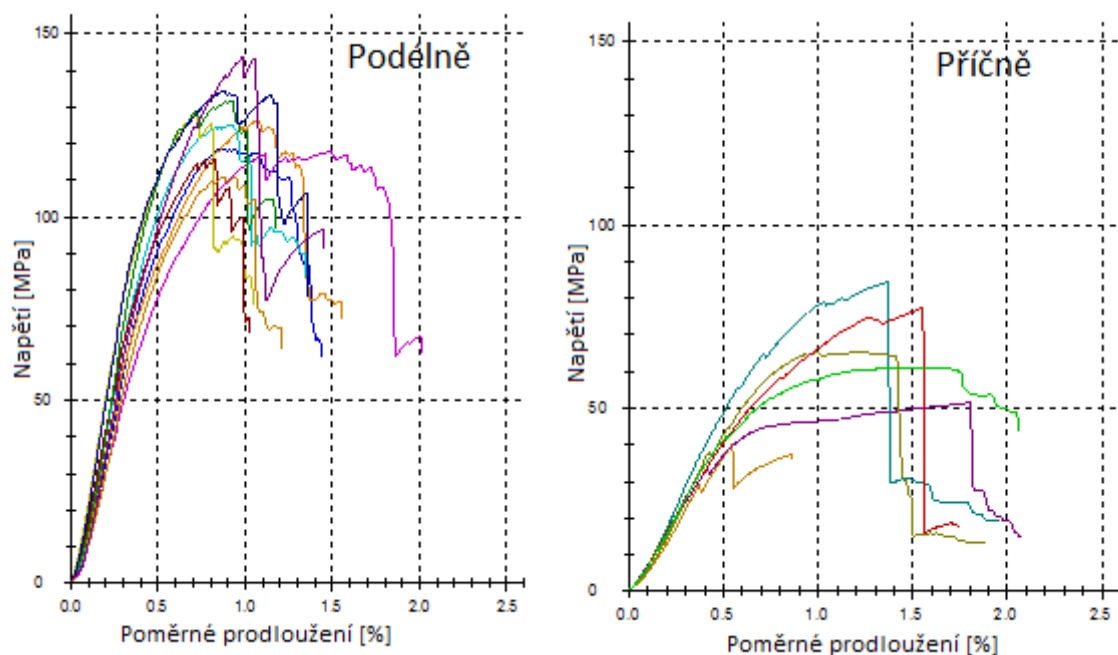
Obr. 46: Grafické průběhy mezilaminární pevnosti vzorku č. 1



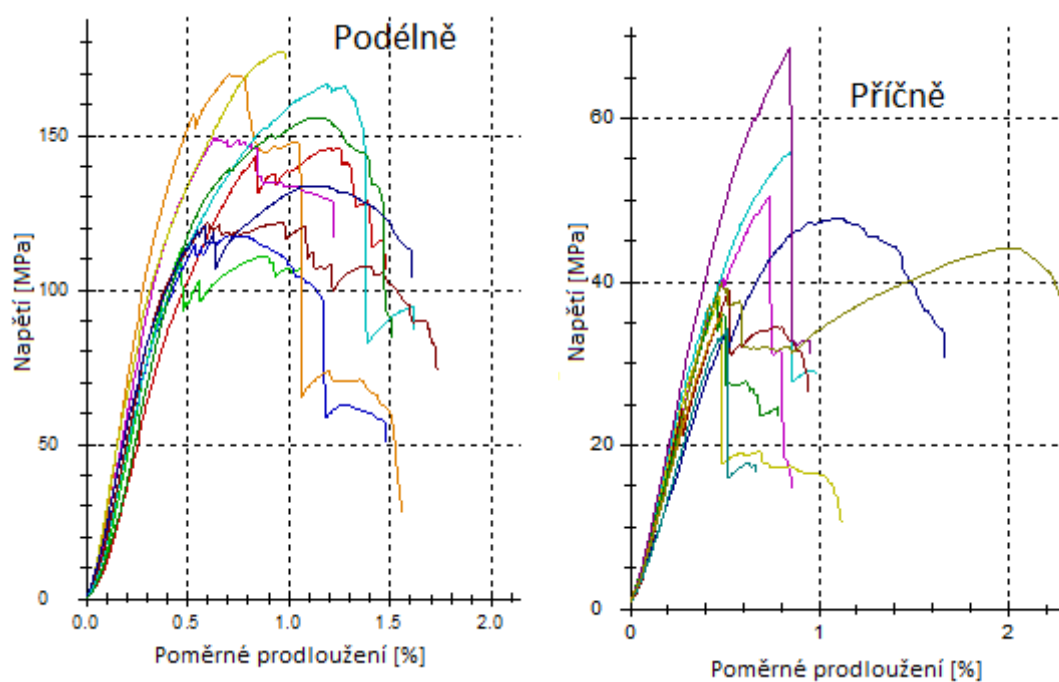
Obr. 47: Grafické průběhy mezilaminární pevnosti vzorku č. 2



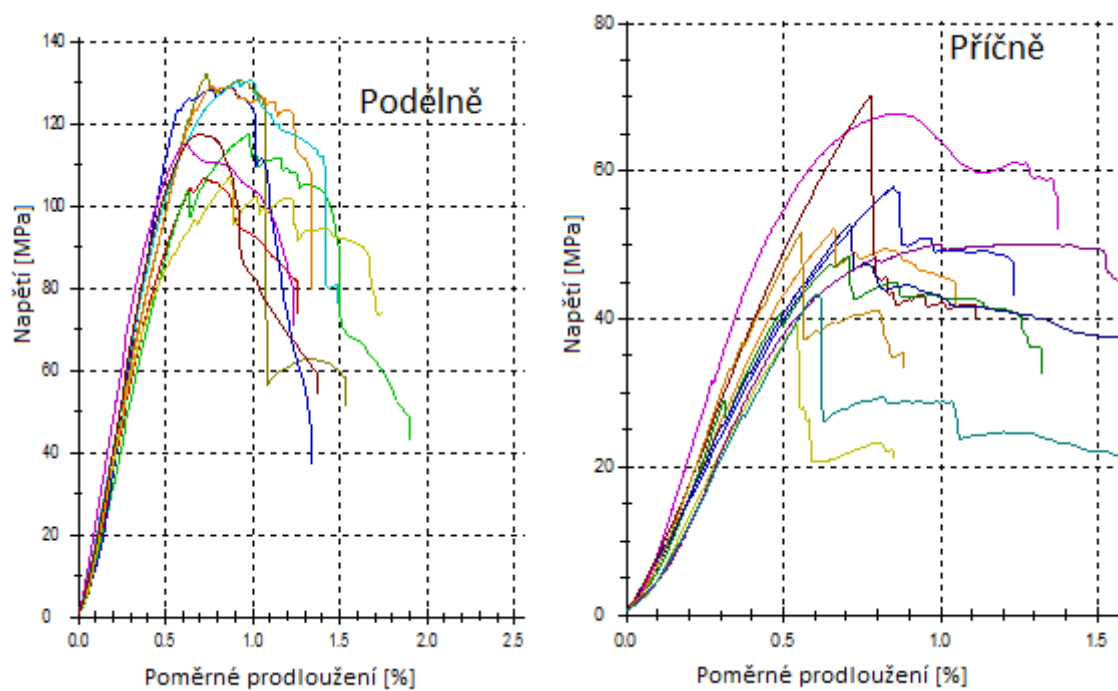
Obr. 48: Grafické průběhy mezilaminární pevnosti vzorku č. 3



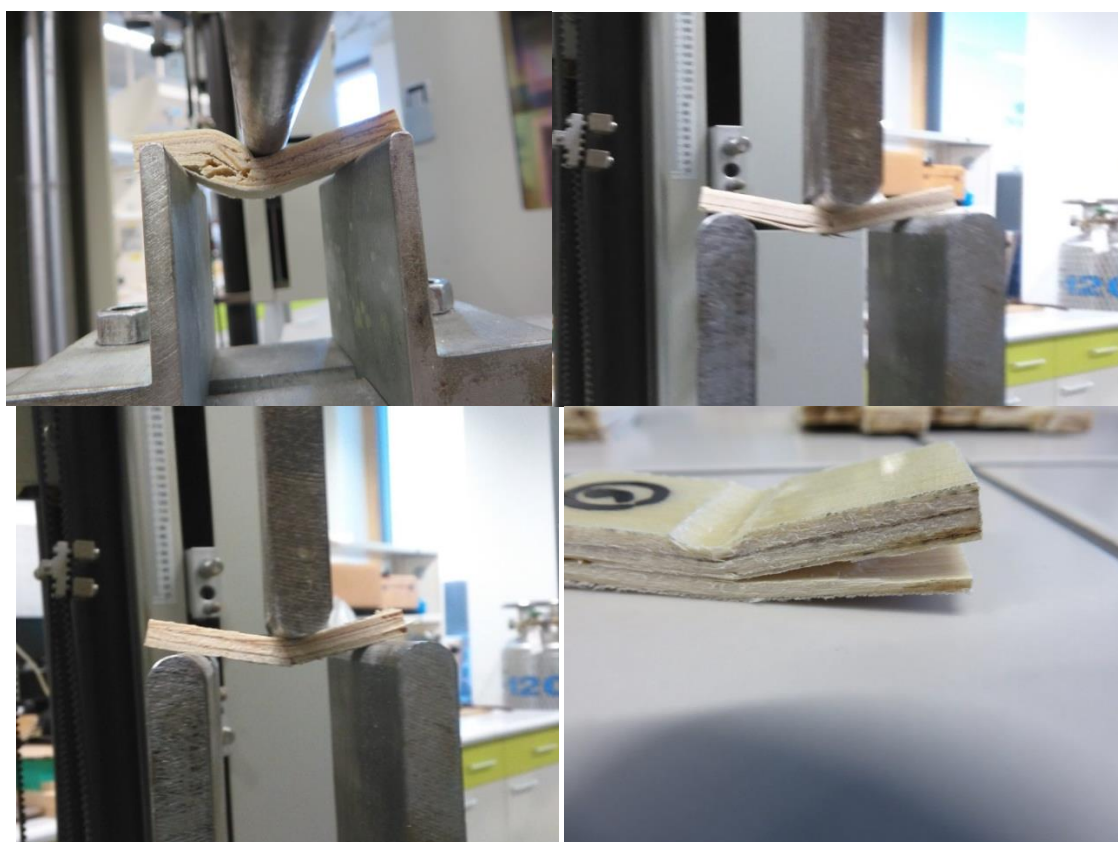
Obr. 49: Grafické průběhy mezilaminární pevnosti vzorku č. 4



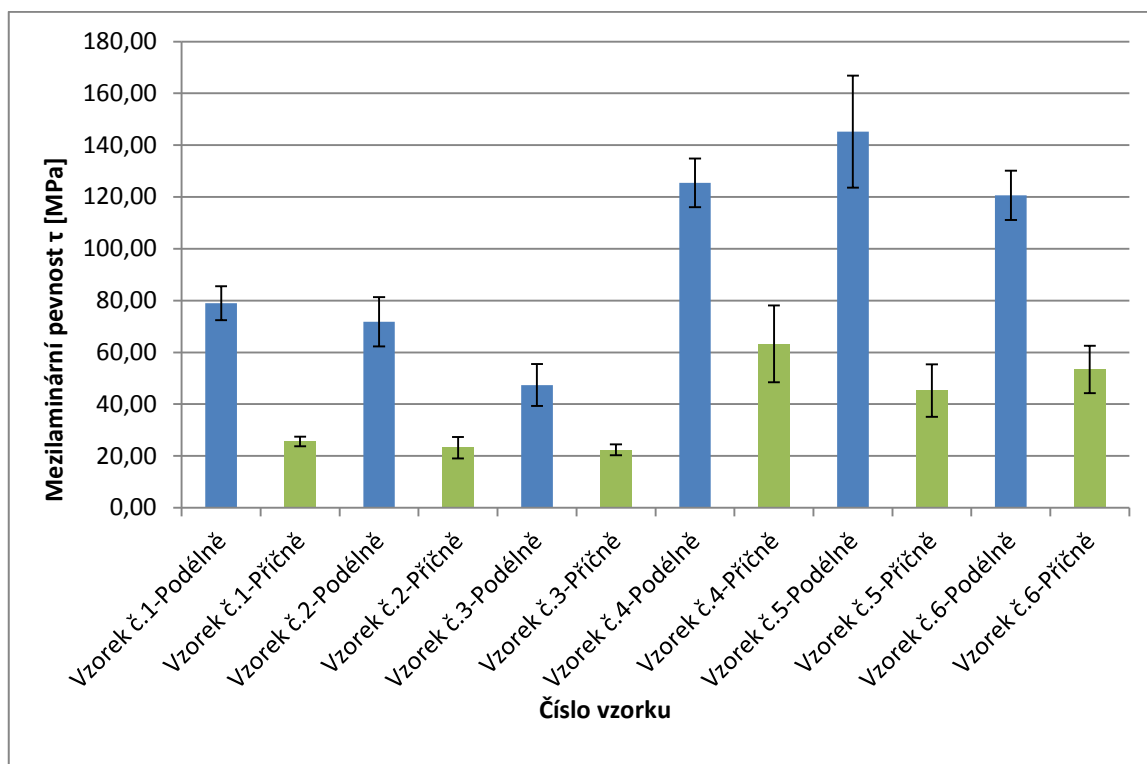
Obr. 50: Grafické průběhy mezilaminární pevnosti vzorku č. 5



Obr. 51: Grafické průběhy mezilaminární pevnosti vzorku č. 6



Obr. 52: Způsoby porušení vzorků při zkoušce mezilaminární pevnosti



Obr. 53: Porovnání zdánlivé mezilaminární pevnosti

**Shrnutí zkoušky:**

Hlavním cílem této zkoušky bylo stanovení zdánlivé mezilaminární pevnosti pomocí metody krátkého nosníku dle ČSN EN ISO 14130. Mezilaminární pevnosti je dána adhezí jednotlivých vrstev mezi sebou. Z výsledků lze vypožorovat, že vyšší pevnosti dosahovaly materiály s podélnou orientací vláken.

Nejvyšších hodnot mezilaminární pevnosti dosáhl vzorek číslo 5, který byl vyroben pouze ze tří vrstev dýhy, kdy prostřední vrstva byla orientovaná příčně a zbylé vrstvy byly orientované podélně. Jednotlivé vrstvy byly spojeny epoxidovou pryskyřicí. Druhé nejvyšší hodnoty dosáhl vzorek číslo 4 vyrobený ze tří vrstev dýhy a jedné vrstvy skelné tkaniny a jednotlivé vrstvy byly spojeny epoxidovou pryskyřicí. Takřka stejných hodnot dosahoval vzorek číslo 6, který neobsahoval žádnou vrstvu tkaniny, jeho vrstvy byly spojeny polyesterovou pryskyřicí. U těchto vzorků nedocházelo k porušení smykovým namáháním, jak uvádí norma, ale docházelo k porušení ohybem nebo tahem, což je nepřípustné a zkoušku z tohoto důvodu nelze vyhodnotit a nelze brát výsledky za věrohodné. K porušením smykem mezi jednotlivými vrstvami docházelo pouze u vzorku číslo 1 a 2. Vyšší mezilaminární pevnosti dosáhl vzorek číslo 1, který byl vyroben ze tří vrstev dýhy a čtyř vrstev skelné tkaniny. Jednotlivé vrstvy byly spojeny epoxidovou pryskyřicí.





Obr. 54: Příjatečný typ mezilaminárního smykového porušení



Obr. 55: Nepříjatečné typy mezilaminárního smykového porušení

### 9.3 Stanovení odtrhové pevnosti dle ASTM C297/C297M – 04 (Flatwise test)

Tato zkouška vyžaduje, aby dvě vrstvy lícujícího materiálu se stejnou povrchovou úpravou byly spojeny s jádrem pomocí dohodnutého lepidla. Zkušební vzorek je následně zatížen tahovým zatížením, které způsobí porušení ve stříhové části, která se nachází v jádru.

Zvláštní pozornost je nutné věnovat při výběru vhodných lepidel pro zkoušení. Aby došlo při zkoušce k porušení vzorků, je nutné, aby adhezní vlastnosti lepidla byly lepší jak vlastnosti zkoušeného materiálu. Předběžně se musí stanovit vhodnost lepidel pro účel jejich použití. Použité lepidlo nesmí v době jeho vytvrzování vyvolat na zkušebním vzorku žádnou, nebo jen nepatrnou viditelnou změnu.

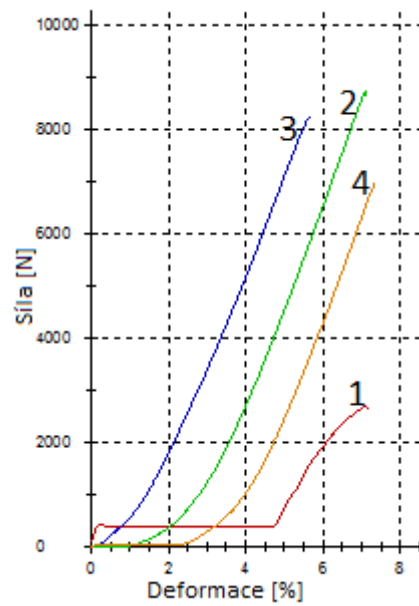
Ve většině případů jsou vhodná lepidla na bázi kyanakrylátů, bezrozpuštědlových dvou-složkových epoxidů a polyesterové s peroxidovým katalyzátorem.

Zkušební tělesa pro tuto zkoušku měly tvar pravoúhlého hranolu tloušťky  $6,5 \pm 0,2$  mm, délky  $75 \pm 0,5$  mm a šířky  $75 \pm 0,5$  mm. Zkouška byla prováděna vždy na 5 zkušebních tělískách, kromě vzorku 5. Tam byla zkouška prováděna pouze na 4 zkušebních tělískách. V následujících tabulkách a grafech jsou shrnuty všechny naměřené výsledky, díky kterým bude možno vyhodnotit materiály, které mají nejvyšší odtrhovou pevnost.

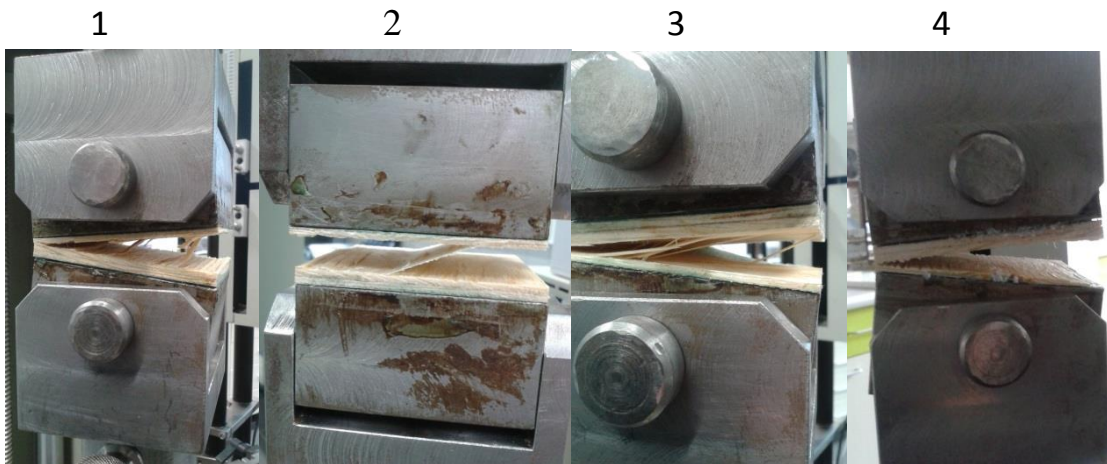
Na lepení vzorků číslo 1 a 2, u kterých horní vrstvu tvořila tkanina, bylo použito lepidla PLEXUS MA422, které je vhodné především k lepení plastů. Jelikož u ostatních vzorků tvořila horní vrstvu dřevěná dýha, byl jsem nucen nalézt lepidlo, které je vhodné ke spojení kov – dřevo. K tomuto spojení bylo vybráno univerzální lepidlo FERMACELL. Vlastnosti použitých lepidel jsou uvedeny v technických listech v příloze P III.



Obr. 56: Zkušební zařízení pro odtrhovou zkoušku

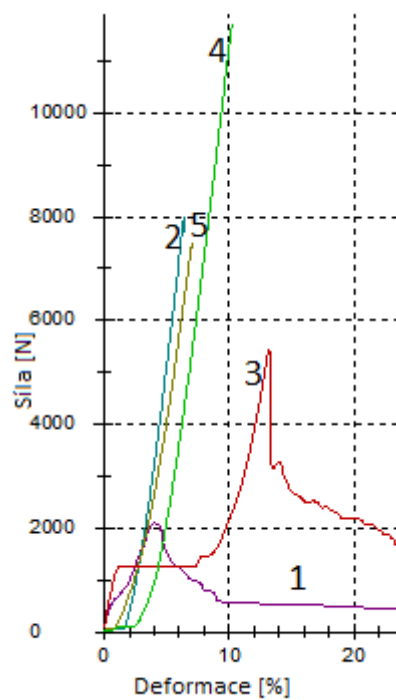


Obr. 57: Grafické průběhy odtrhové pevnosti vzorku č. 1

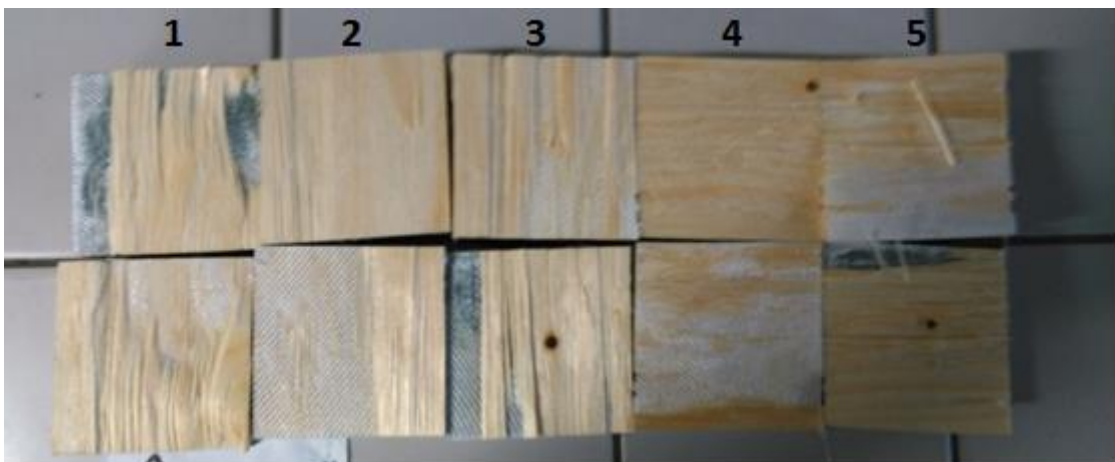


Obr. 58: Detaily porušení vzorku č. 1

Při zkoušce odtrhové pevnosti vzorku číslo 1, který byl vyroben ze tří vrstev dýhy a čtyř vrstev skelné tkaniny spojených epoxidovou pryskyřicí, dosáhl nejvyšší odtrhové pevnosti zkušební vzorek 2, který dosáhl pevnosti 8 740 N a k porušení došlo ve spojení dýha - skelná tkanina. Druhý nejvyšší pevnosti 8 270 N dosáhl vzorek 3, který byl porušen jak ve spojení dýha – skelná tkanina, tak i v samotné dýze.

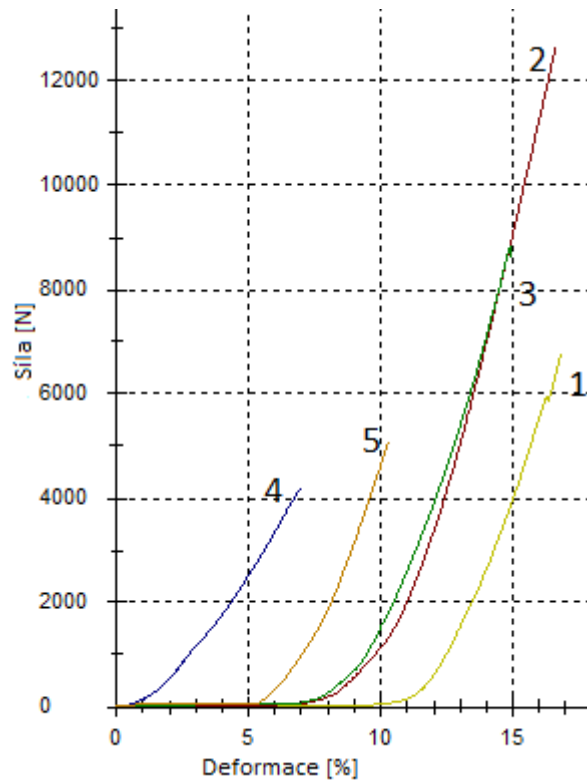


Obr. 59: Grafické průběhy odtrhové pevnosti vzorku č. 2



Obr. 60: Detaily porušení vzorku č. 2

Při zkoušce odtrhové pevnosti vzorku číslo 2, který byl vyroben ze tří vrstev dýhy a čtyř vrstev skelné tkaniny spojených polyesterovou pryskyřicí, dosáhl nejvyšší odtrhové pevnosti zkušební vzorek 4, který dosáhl pevnosti 11 700 N a k porušení došlo ve spojení dýha – skelná tkanina. Druhé nejvyšší pevnosti 8 010 N dosáhl vzorek 2, který byl porušen jak ve spojení dýha – skelná tkanina, tak i v samotné dýze.

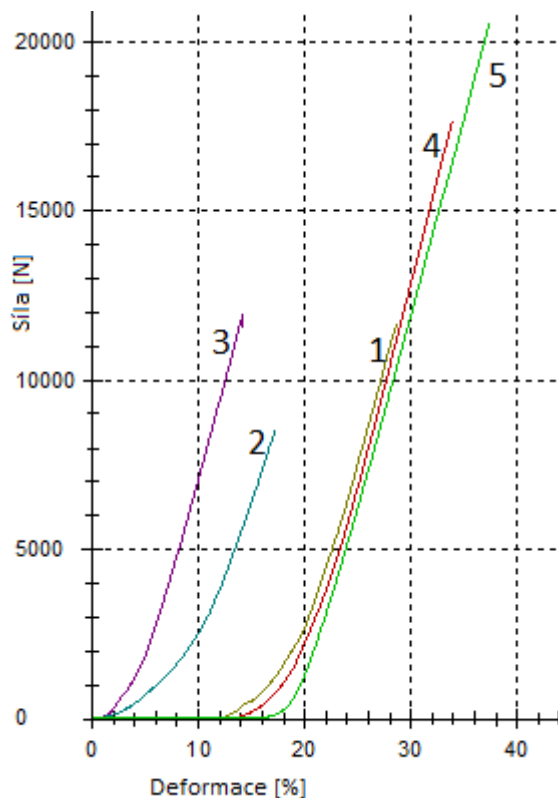


Obr. 61: Grafické průběhy odtrhové pevnosti vzorku č. 3

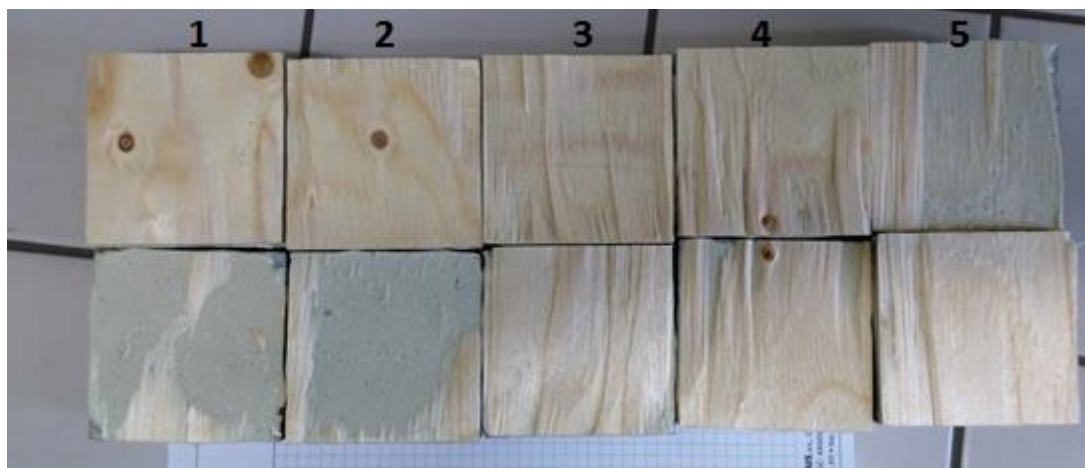


Obr. 62: Detaily porušení vzorku č. 3

Při zkoušce odtrhové pevnosti vzorku číslo 3, který byl vyroben ze tří vrstev dýhy, jedné vrstvy skelné tkaniny spojených polyesterovou pryskyřicí, dosáhlo nejvyšší odtrhové pevnosti zkušební vzorek 2, který dosáhl pevnosti 12 700 N a k porušení došlo ve spojení dýha - dýha. V lepeném spoji dýha – skelná tkanina k porušení nedošlo ani v jednom z případů.

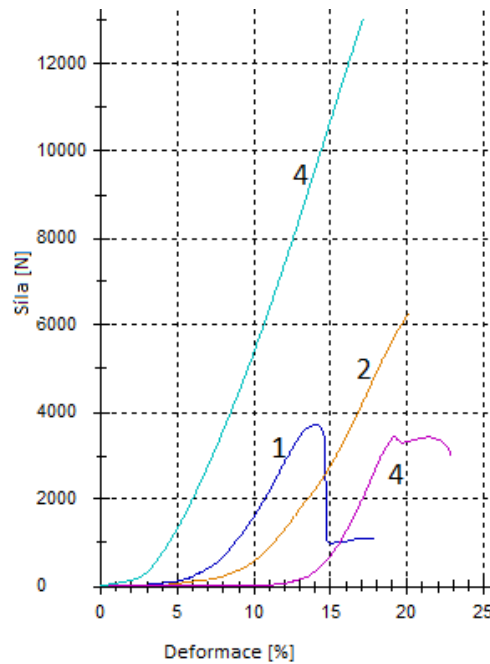


Obr. 63: Grafické průběhy odtrhové pevnosti vzorku č. 4



Obr. 64: Detaily porušení vzorku č. 4

Při zkoušce odtrhové pevnosti vzorku číslo 4, který byl vyroben ze tří vrstev dýhy, jedné vrstvy skelné tkaniny spojených epoxidovou pryskyřicí, dosáhlo nejvyšší odtrhové pevnosti zkušební vzorek 5, který dosáhl pevnosti 18 550 N a k porušení došlo ve spojení dýha - dýha. Druhé nejvyšší pevnosti 13 612 N dosáhl vzorek 4, který byl z větší části porušen v dýze. Zbylé vzorky nemohly být vyhodnoceny, protože došlo k porušení buď ve spojení lepidlo - dýha, nebo přímo v dýze. V lepeném spoji dýha – skelná tkanina k porušení nedošlo ani v jednom z případů.

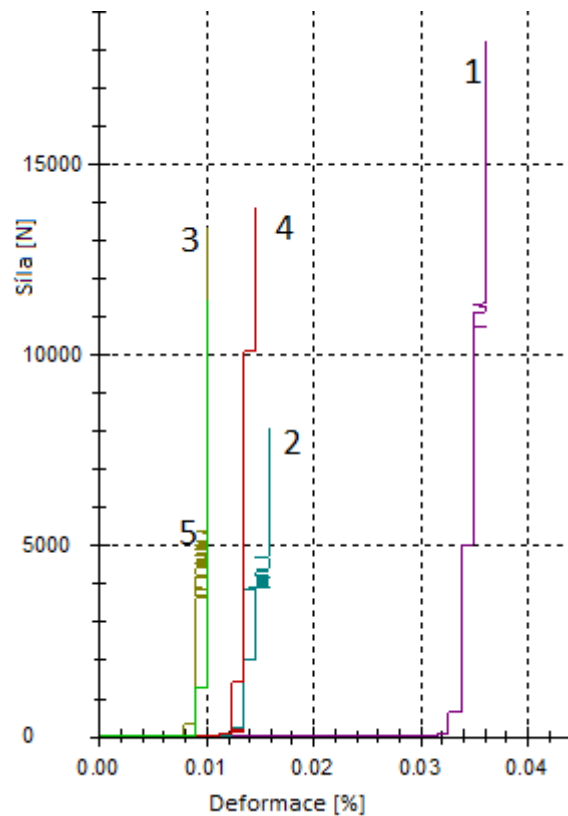


Obr. 65: Grafické průběhy odtrhové pevnosti vzorku č. 5



Obr. 66: Detaily porušení vzorku č. 5

Při zkoušce odtrhové pevnosti vzorku 5, který byl vyroben ze tří vrstev dýhy, kdy prostřední vrstva byla orientovaná příčně a zbylé vrstvy byly orientované podélně. Jednotlivé vrstvy byly spojeny epoxidovou pryskyřicí. Nejvyšší odtrhová pevnost byla naměřena u vzorku 4, který dosáhl pevnosti 13 000 N. K porušení tohoto vzorku nedošlo v celé ploše ve spojení dýha – dýha, ale pouze v polovině této plochy. Zbylá část vzorku byla porušena ve spojení dýha – lepidlo. Druhé nejvyšší pevnosti 6 260 N dosáhl vzorek 2, který byl porušen pouze v dýze. Tato hodnota by se dala považovat za pevnost dýhy. Zbylé vzorky nemohly být vyhodnoceny, protože došlo k porušení ve spojení lepidlo - dýha.



Obr. 67: Grafické průběhy odtrhové pevnosti vzorku č. 6



Obr. 68: Detaily porušení vzorku č. 6

Při zkoušce odtrhové pevnosti vzorku 6, který byl vyroben ze tří vrstev dýhy, kdy prostřední vrstva byla orientovaná příčně a zbylé vrstvy byly orientované podélně. Jednotlivé vrstvy byly spojeny polyesterovou pryskyřicí. Nejvyšší odtrhové pevnosti 18 200 N dosáhl vzorek 1, který byl porušen ve spojení dýha - dýha. Druhé nejvyšší pevnosti 13 900 N dosáhl vzorek 4, který se porušil taky ve spojení dýha - dýha, ale z části mezi první a druhou vrstvou a z části mezi druhou a třetí vrstvou. Při vykreslování grafu na zkušební stroji

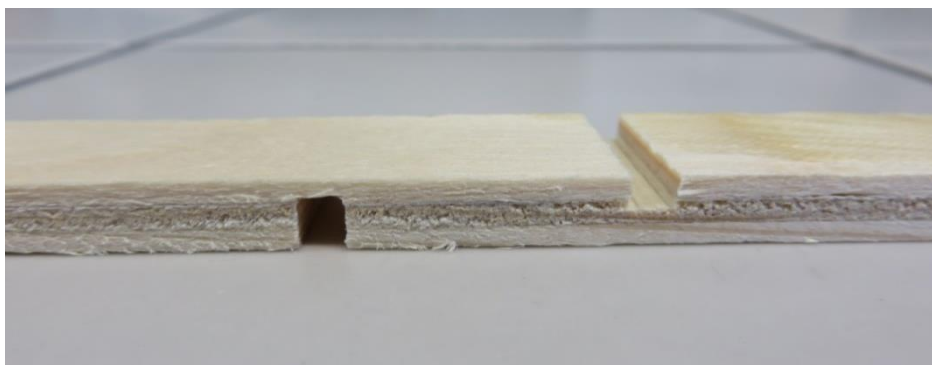


Zwick 1456 došlo k softwarové chybě, a na osu x nebyla vynesena deformace. Jelikož jsem vyhodnocoval pouze odtrhovou pevnost, tak tím nebyly nijak ovlivněny výsledky.

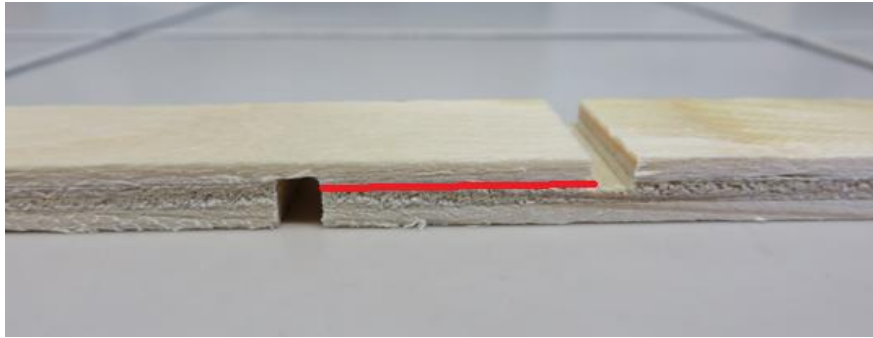
#### 9.4 Stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů dle ČSN 64 0662

Tato norma slouží ke stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami a je použitelná pro všechny typy laminátů s rovinnými rovnoběžně uspořádanými vrstvami výztuže. Pevnost ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů je důležitá pro kontrolu kvality vyráběného materiálu a při předvídání pevnosti materiálu při zvýšených teplotách. Zkušební těleso je opatřené výřezy a je zatěžováno tahovou silou, dokud nedojde ke smykovému porušení mezi vrstvami výztuže. Hodnota zatížení při smykovém porušení tělesa se odečte a použije k výpočtu pevnosti ve smyku mezi vrstvami. (Český normalizační ústav, 1999)

Zkušební tělesa pro tuto zkoušku měly tvar pravoúhlého hranolu tloušťky  $6,5 \pm 0,2$  mm, délky  $140 \pm 1$  mm a šířky  $20 \pm 0,2$  mm, které byly opatřeny dvěma rovnoběžnými zářezy, kolmými k podélné ose, na opačných stranách zkušebního vzorku. Zářezy musí procházet přes celou šířku tělesa a jejich hloubka musí dosahovat do poloviny zkušebního tělesa zvětšené o tloušťku jedné vrstvy. Vzdálenost mezi zářezy musí být  $12,5 \pm 0,1$  mm. Zkouška byla prováděna vždy na 10 zkušebních tělískách.



Obr. 69: Zkušební vzorek pro zkoušku



Obr. 70: Předpokládané místo porušení vzorku

Pevnost ve smyku mezi vrstvami  $\tau_{ps}$  je dána vztahem:

$$\tau_{ps} = \frac{P}{b \cdot e} \text{ [N/cm}^2\text{]} \quad (3)$$

P - Největší zatížení dosažené při zkoušce v N

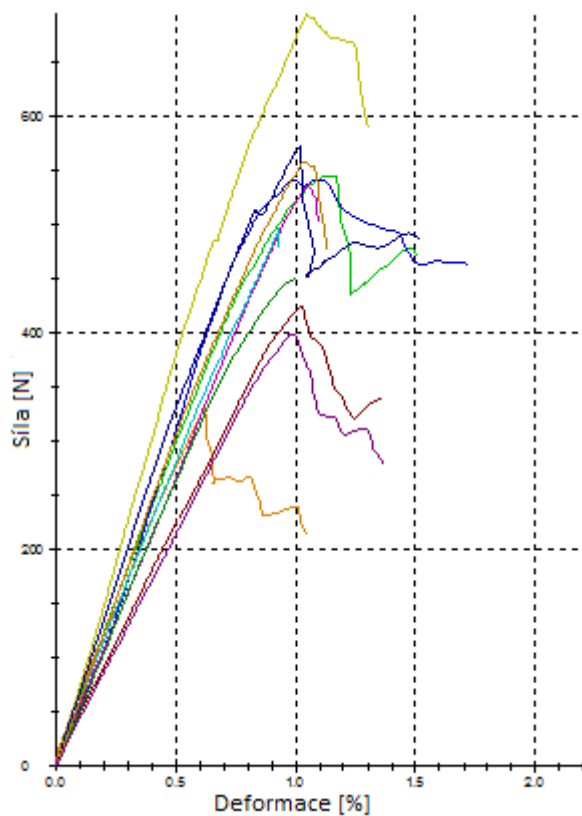
b - Šířka zkušebního vzorku v cm

e - Vzdálenost mezi zářezy na zkušebním tělese v cm

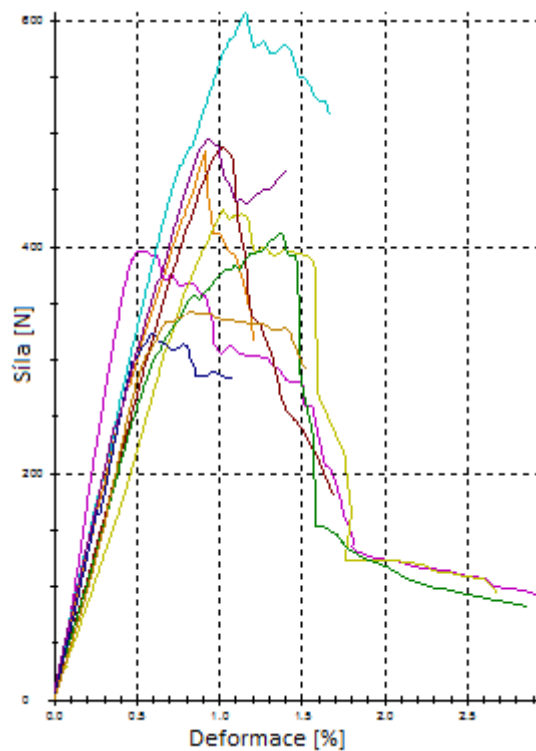
Tato zkouška byla provedena pouze u vzorků uvedených v tabulce níže, protože zkušební tělesa vzorků číslo 1 a 2 byly všechny použity na ohybovou zkoušku. U zkušebních těles, které měly orientaci vláken dýhy v příčném směru, se zkouška rovněž neprováděla.

Tab. 13: Pevnost ve smyku  $\tau_{ps}$  [MPa]

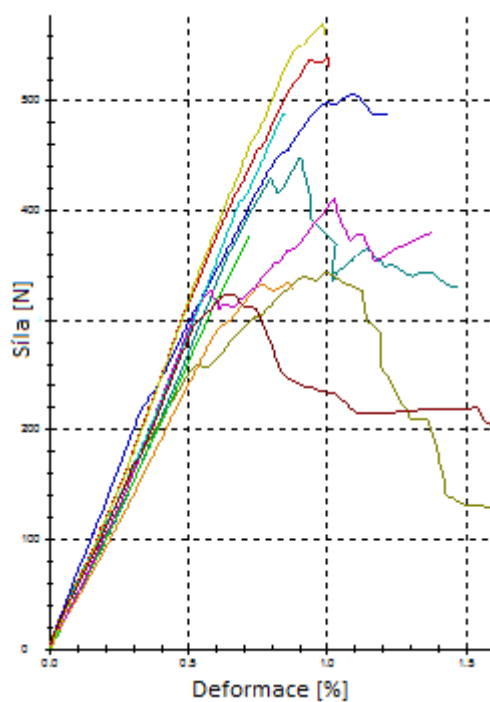
Číslo vzorku	$\tau_{ps}$ [Mpa]	s
<b>1 - Podélně</b>	-	-
<b>2 - Podélně</b>	-	-
<b>3 - Podélně</b>	505,0	94,4
<b>4 - Podélně</b>	442,2	82,4
<b>5 - Podélně</b>	434,7	84,9
<b>6 - Podélně</b>	463,0	86,8



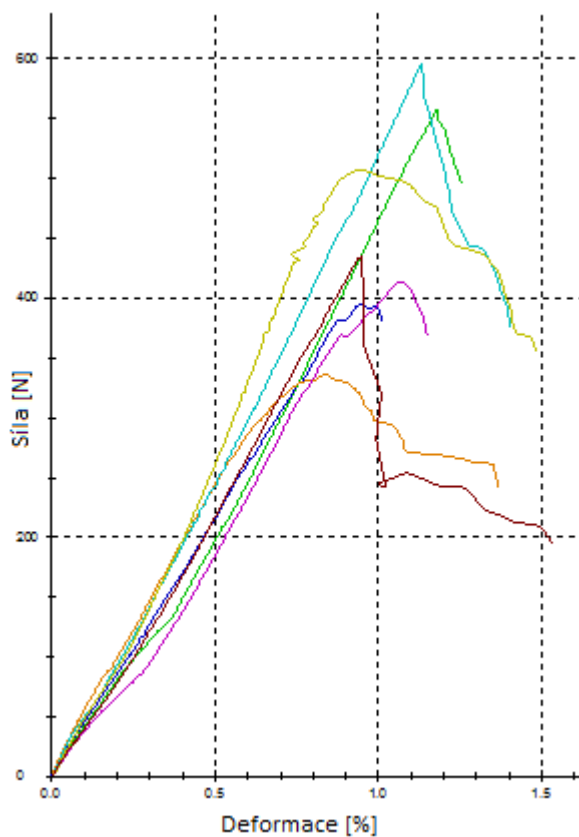
Obr. 71: Grafické průběhy smykové pevnosti vzorku č. 3



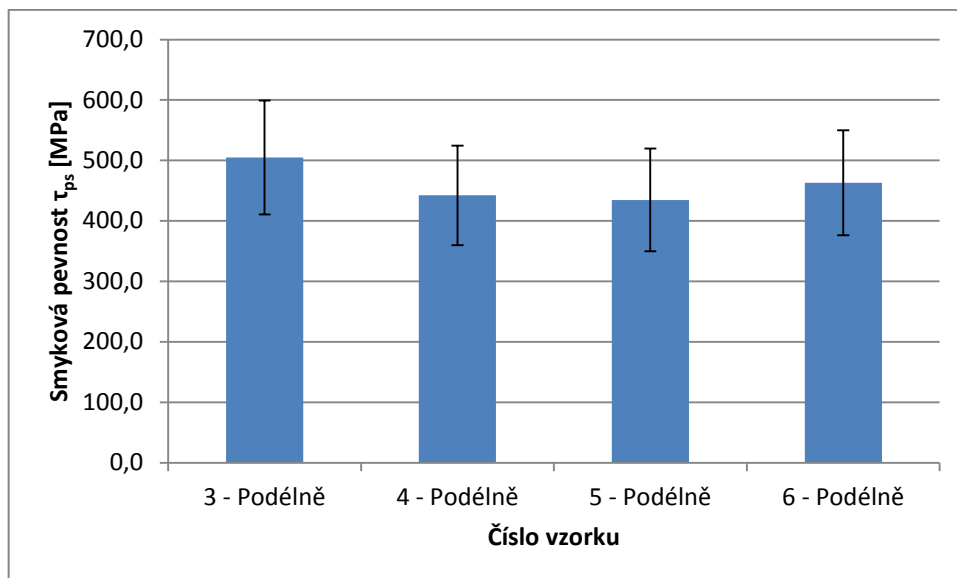
Obr. 72: Grafické průběhy smykové pevnosti vzorku č. 4



Obr. 73: Grafické průběhy smykové pevnosti vzorku č. 5



Obr. 74: Grafické průběhy smykové pevnosti vzorku č. 6



Obr. 75: Porovnání smykové pevnosti



Obr. 76: Detaily správného porušení vzorků



Obr. 77: Detaily nesprávného porušení vzorku

#### **Shrnutí zkoušky:**

Hlavním cílem této zkoušky bylo stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami dle ČSN 64 0662, která je dána poměrem síly potřebné k oddělení vrstev, šířky vzorků a vzdálenosti zářezů.

Měřením však bylo zjištěno, že pevnost ve smyku mezi vrstvami je vyšší než pevnost dřevěné dýhy a ve většině případů k porušování nedocházelo mezi vrstvami, ale přímo v dýze. V případě, kdy došlo k porušení v lepeném spoji, se domnívám, že byl materiál v tomto místě špatně zalaminován. Nejvyšší dosažené zatížení, u kterého docházelo k porušení

vzorků, se u všech vzorků pohybovalo od 433 N do 505 N. Tato hodnota se dá považovat za pevnost dýhy.

## ZÁVĚR

Jak bylo uvedeno v úvodu, téma mé diplomové práce bylo iniciováno firmou WOODEXPERT s.r.o., která se zabývá inovacemi v oblasti výroby dřeva.

Při výrobě zkušebních vzorků byla použita smrková dýha o tloušťce 2 mm, která se vyztužovala skelnou tkaninou s vazbou plátno a měrnou hmotností  $200 \text{ g/m}^2$ . K zalaminování jednotlivých vrstev jsem použil epoxidovou a polyesterovou matrici.

V první části testů jsem zjišťoval ohybové vlastnosti zkoušených materiálů dle ČSN EN ISO 178. Nejvyšší hodnoty modulu pružnosti v ohybu dosáhly zkušební vzorky číslo 1 a 2, které byly vyrobeny ze tří vrstev dýhy a čtyř vrstev tkaniny a orientace vláken dýhy byla v podélném směru. Vyšší hodnoty modulu pružnosti  $11\,671 \text{ MPa}$  dosáhl vzorek číslo 1, který měl epoxidovou matrici. Zkušební vzorek číslo 2 s polyesterovou matricí měl modul pružnosti  $10\,550 \text{ MPa}$ . Při této zkoušce jsem dále vyhodnocoval mez pevnosti, která byla vyšší u vzorku číslo 2, který dosáhl meze pevnosti  $118 \text{ MPa}$ . Ve srovnání s druhým vzorkem, měl vzorek číslo 1 mez pevnosti o  $7 \text{ MPa}$  nižší. V obou případech se jednalo o podélnou orientaci vláken dýhy.

Ve druhé části testů jsem zkoumal mezilaminární pevnost metodou krátkého nosníku dle ČSN EN ISO 14130. Při této metodě musí dojít k mezilaminárnímu smykovému porušení. Pokud při zkoušce dojde k jinému porušení, nemůžeme výsledky brát v potaz. K mezilaminárnímu porušení došlo jen u vzorků číslo 1 a 2, kdy vyšší hodnoty smykové pevnosti dosáhl vzorek číslo 1 vyrobený ze tří vrstev dýhy, čtyř vrstev skelné tkaniny spojených epoxidovou matricí. Ostatní vzorky nemohly být vyhodnoceny z důvodu jiného porušení, než nám uváděla norma.

Třetí část je věnována zkoumání odtrhové pevnosti ASTM C297/C297M – 04. Tato metoda je označována anglickým názvem Flatiwise test. Při této metodě je zkušební vzorek zatížen tahem, který způsobí porušení ve stříhové části zkušebního vzorku, která se nachází v jádru. Nejvyšší odtrhová pevnost  $18\,550 \text{ N}$  byla naměřena u vzorku číslo 4, který byl vyroben z epoxidové matrice. U vzorků, kde byla použita polyesterová matrice, dosáhl nejvyšší odtrhové pevnosti  $18\,200 \text{ N}$  vzorek číslo 6. Při zkoušce bylo patrné, že pokud byl materiál dobře zalaminován, tak k porušení docházelo vždy dříve ve spojení dýha – dýha, než ve spojení dýha – skelná tkanina. U vzorku 1 a 2, kde byla každá vrstva proložena skelnou tkaninou, docházelo k porušení buď v dýze, nebo ve spojení



dýha – skelná tkanina, u kterého se domnívám, že tkanina nebyla dostatečně prosycena pryskyřicí.

Poslední část je věnována stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami dle ČSN 64 0662. Při této metodě je těleso zatěžováno tahem, dokud nedojde ke smykovému porušení mezi vrstvami. Při měření bylo zjištěno, že smyková pevnost mezi vrstvami je vyšší než pevnost dýhy a k porušení tudíž docházelo v dýze. U vzorků, které se porušily v lepeném spoji bylo patrné, že místo porušení bylo nedostatečně prosyceno pryskyřicí. Nejvyšší dosažené zatížení, u kterého docházelo k porušení vzorků, se u všech vzorků pohybovalo od 433 N do 505 N. Tato hodnota se dá považovat za pevnost dýhy.

Po shrnutí všech naměřených výsledků lze říci, že vzorky s epoxidovou matricí dosahovaly lepších mechanických vlastností. Při zkoušce odtrhové pevnosti jsem vyzoroval, že se zkušební vzorky porušovaly dříve ve spojení, ve kterém nebyla použita skelná tkanina. Většina vzorků se porušovala přímo v dýze, nebo v místě, kde byl dřevokompozit nedostatečně zalaminován. Stejný problém nastal u zkoušek mezilaminární pevnosti a smykové pevnosti mezi vrstvami.

Pro případné využití tohoto materiálu v praxi bych navrhoval použít jiný druh dřevěné dýhy, která by měla vyšší pevnost a obsahovala menší množství defektů, jako např. praskliny a suky. Dále by bylo vhodné se zamyslet nad metodu laminování. Použitá metoda ručního laminování, je sice jednoduchá a levná na výrobu, ale je nutné při ní dbát na to, aby byly jednotlivé vrstvy kvalitně zalaminovány a tkanina byla dobře prosycena. Pokud tomu tak není, kompozit ztrácí své mechanické vlastnosti. Dále bych ještě navrhoval zkusit vyrobit vzorky se skladbou dých  $\pm 45^\circ$ , protože se domnívám, že by tento materiál měl mít rovnoměrnější mechanické vlastnosti jak v podélném, tak i příčném směru.

Získané výsledky jsou významné pro firmu WOODEXPERT s.r.o., která plánuje do budoucna využít dřevokompozit v praxi.

**SEZNAM POŽITÝCH ZDROJŮ**

BOUKHAROUBA, Taoufik, Mimoun ELBOUJDAINI a Guy PLUVINAGE, 2009. *Damage and fracture mechanics: failure analysis of engineering materials and structures*. Dordrecht, The Netherlands: Springer Verlag, xxv. ISBN 9789048126699.

BUSINESS MEDIA CZ, 2013. *Technický portál* [online]. Praha, [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/trh-umelych-hmot-tvrzenych-uhlikovymi-vlakny-vyrazne-posili\\_22850.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/trh-umelych-hmot-tvrzenych-uhlikovymi-vlakny-vyrazne-posili_22850.html)

CRIPPS, David, ©1998. *Composite Materials Handbook* [online]. [cit. 2014-10-19]. Dostupné z: <http://www.bolton.ac.uk/CODATE/SPHandbook.pdf>

ČSN 64 0662. *Stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů*. Praha: Český normalizační ústav, 1973.

ČSN EN ISO 14 129. *Vlákny vyztužené plastové kompozity: Tahová zkouška na  $\pm 45^\circ$  laminátech pro stanovení křivky smykového napětí/deformace, smykového modulu a smykové pevnosti v rovině*. Praha: Český normalizační ústav, 1999.

ČSN EN ISO 14 130. *Vlákny vyztužené plastové kompozity: Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku*. Praha: Český normalizační ústav, 1999.

ČSN EN ISO 15 310. *Vlákny vyztužené plastové kompozity: Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky*. Praha: Český normalizační ústav, 2006.

DAŘOUREK, Karel, 2007. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití: Druhy a jejich využití*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-279-1.

DAVIES, J., 2001. *Lightweight sandwich construction*. Malden, MA: Blackwell Science, xiv, ISBN 06-320-4027-0.

DRÁPELA, Jindřich, 1980. *Výroba nábytku technologie*. 1. vyd. Praha: SNTL.

EHRENSTEIN, Gottfried W, 2009. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Scientia. ISBN 978-80-86960-29-6.

EISNER, Karel, Vladimír HAVLÍČEK a Miloš OSTEN. *Dřevo a plasty*. Praha: SNTL, 1983.

*Fracture and damage of composites*, 2006. Editor M Guagliano, M Alibadi. Southampton: WIT Press. ISBN 18-531-2669-1.

GAJDŮŠEK, Ondřej. *Návrh konstrukce upínacího přípravku pro testy lepivosti*. Zlín, 2014. Bakalářská. UTB ve Zlíně

HASALA, Lukáš, 2012. *Návrh a testování sendvičových kompozitních materiálů pro dopravní komplikace* [online]. Zlín [cit. 2014-11-07].

Dostupné z: <http://dspace.k.utb.cz/handle/10563/22040>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati.

*Havel - composites: Technologie výroby kompozitů* [online], [b.r.]. [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>

HEXCEL, 1999. *Honeycomb Attributes and Properties* [online]. [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: [http://www.hexcel.com/Resources/dataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb\\_Attributes\\_and\\_Properties.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/dataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf)

HEXCEL, 2003. *Adhesive bonding technology* [online]. [cit. 2015-01-27]. Dostupné z: [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Adhesive\\_Bonding\\_Technology.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Adhesive_Bonding_Technology.pdf)

HRÁZSKÝ, Jaroslav a Pavel KRÁL, 2007. *Kompozitní materiály na bázi dřeva*. 1. vyd. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 978-80-7375-034-3.

CHUNG, Deborah D. L., 2010. *Composite Materials: Science and Applications*. 2nd ed. London: Springer. ISBN 978-1-84882-830-8.

KEJDANA, Aleš, 2010. *Změna mechanických vlastností kovaného profilu* [online]. [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: <http://www.knife.cz/Knifecz/Publikace/tabid/59/ctl/Details/mid/386/ItemID/334/Default.aspx>

KOŘÍNEK, Zdeněk, [b. r.]. *Vlákna* [online]. [cit. 2014-11-20].

Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>

MALLICK, P.K., 2007. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press. ISBN 08-493-4205-8.

MM SPEKTRUM, 2001. *Sendvičové konstrukce*. *MM Spektrum* [online]. č. 1 [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>

OSTEN, Miloš, 1996. *Práce s lepidly a tmely*. 3. vyd. Editor Josef Mleziva. Praha: Grada. ISBN 80-716-9338-3.

RICHTER, Jiří, 2011. *Nové typy lehkých kompozitních materiálů na bázi dřeva*. Brno. Bakalářská práce. Mendelova univerzita.

SKOČOVSKÝ, Petr et al., 2000. *Konštrukční materiály*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině. ISBN 80-7100-608-4.

ŠEDIVÝ, Petr, 2013. *Korek jako výplňový materiál v kompozitních sendvičových konstrukcích* [online]. Zlín [cit. 2014-10-05].

Dostupné z: <http://dspace.k.utb.cz/handle/10563/24543>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati.

ŠÍŠKA, Miroslav, 2014. *Studium adheze uhlíkových kompozitů z tkaniny KONKARBON*. Zlín. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati.

ŠUBA, Oldřich, 2011. *Mechanika polymerů a kompozitů*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. ISBN 978-80-7454-015-8.

UNIQUE [online]. 2015 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: [http://unique.cz/public/test/wp-content/uploads/2015/03/vazba\\_platnova.jpg](http://unique.cz/public/test/wp-content/uploads/2015/03/vazba_platnova.jpg)

ZENKERT, D. *Nordic Industrial Fund: The Handbook of Sandwich Construction*. Worchestershire; EMAS Publishing, 1997. ISBN 0-947817-96-4.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ČSN	Česká technická norma
EN	Evropské normy
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci
ASTM	Americká technická norma
$\tau_{ps}$	Pevnost ve smyku
$\delta_p$	Mez pevnosti
E	Modul pružnosti
$\tau$	Zdánlivá mezilaminární pevnost

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1: Vláknové výztuže-rozdělení .....	18
Obr. 2: Konstrukce sendvičového kompozitu.....	21
Obr. 3: Vlastnosti sendvičových konstrukcí .....	22
Obr. 4: Sendvičová konstrukce s prepregovou vnější vrstvou.....	23
Obr. 5: Šestihranná voština .....	24
Obr. 6: Voština X-Core.....	25
Obr. 7: Voština Flex-Core .....	25
Obr. 8: Přenos zatížení z matrice do vlákna .....	32
Obr. 9: Znárodnění styčných ploch rozhraní vlákno-matrice .....	33
Obr. 10: Detailní pohled na struktury uhlíkových vláken .....	33
Obr. 11: Kapka smáčivé a nsmáčivé kapaliny na pevném povrchu.....	34
Obr. 12: Rovnováha povrchových napětí uvnitř 2 fází kompozitů.....	35
Obr. 13: Zkouška adheze tahem .....	37
Obr. 14: Zkouška adheze smykem.....	37
Obr. 15: Zkouška adheze třibodovým ohybem.....	37
Obr. 16: Schematické zobrazení SCB peel testu .....	38
Obr. 17: Schematické zobrazení DCB peel testu.....	38
Obr. 18: Vytrhávací zkouška 1 .....	39
Obr. 19: Vytrhávací zkouška 2 .....	39
Obr. 20: Zkušební těleso pro ČSN EN ISO 1429 .....	41
Obr. 21 Schéma uspořádání smykové zkoušky .....	42
Obr. 22: Zkušební těleso pro ČSN 64 0662.....	42
Obr. 23: Znárodnění průběhu zkoušky ČSN EN ISO 15310.....	43
Obr. 24: Znárodnění průběhu zkoušky ČSN EN ISO 14 130.....	44
Obr. 25: Místa vzniku napět'ových špiček.....	44
Obr. 26: Vakuová technologie používající jednodílnou formu .....	45
Obr. 27: Lisování pomocí tlakového vaku v jednodílné formě .....	46
Obr. 28: Lisování v autokávu .....	46
Obr. 29: Schéma vazby plátno .....	51
Obr. 30: Struktura povrchu dýhy .....	53
Obr. 31: Postup výroby zkušebních vzorků.....	55
Obr. 32: Princip vakuového lisování .....	56

Obr. 33: Příklad nářezového plánu .....	56
Obr. 34: Univerzální zkušební stroj Zwick 1456.....	57
Obr. 35: Grafické průběhy napětí ohybové zkoušky vzorku č. 1 .....	61
Obr. 36: Grafické průběhy napětí ohybové zkoušky vzorku č. 2 .....	61
Obr. 37: Grafické průběhy napětí ohybové zkoušky vzorku č. 3 .....	62
Obr. 38: Grafické průběhy napětí ohybové zkoušky vzorku č. 4 .....	62
Obr. 39: Grafické průběhy napětí ohybové zkoušky vzorku č. 5 .....	63
Obr. 40: Grafické průběhy napětí ohybové zkoušky vzorku č. 6 .....	63
Obr. 41: Způsoby porušení vzorků při ohybové zkoušce .....	64
Obr. 42: Porovnání modulu pružnosti v ohybu daných struktur.....	64
Obr. 43: Porovnání meze pevnosti daných struktur .....	65
Obr. 44: Porovnání poměrného prodloužení daných struktur.....	65
Obr. 45: Schéma zkoušky ČSN EN ISO 14130.....	67
Obr. 46: Grafické průběhy mezilaminární pevnosti vzorku č. 1 .....	68
Obr. 47: Grafické průběhy mezilaminární pevnosti vzorku č. 2 .....	69
Obr. 48: Grafické průběhy mezilaminární pevnosti vzorku č. 3 .....	69
Obr. 49: Grafické průběhy mezilaminární pevnosti vzorku č. 4 .....	70
Obr. 50: Grafické průběhy mezilaminární pevnosti vzorku č. 5 .....	70
Obr. 51: Grafické průběhy mezilaminární pevnosti vzorku č. 6 .....	71
Obr. 52: Způsoby porušení vzorků při zkoušce mezilaminární pevnosti .....	71
Obr. 53: Porovnání zdánlivé mezilaminární pevnosti .....	72
Obr. 54: Přijatelný typ mezilaminárního smykového porušení .....	73
Obr. 55: Nepřijatelné typy mezilaminárního smykového porušení .....	73
Obr. 56: Zkušební zařízení pro odtrhovou zkoušku .....	74
Obr. 57: Grafické průběhy odtrhové pevnosti vzorku č. 1 .....	75
Obr. 58: Detaily porušení vzorku č. 1.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
Obr. 59: Grafické průběhy odtrhové pevnosti vzorku č. 2 .....	76
Obr. 60: Detaily porušení vzorku č. 2.....	76
Obr. 61: Grafické průběhy odtrhové pevnosti vzorku č. 3 .....	77
Obr. 62: Detaily porušení vzorku č. 3.....	77
Obr. 63: Grafické průběhy odtrhové pevnosti vzorku č. 4 .....	78
Obr. 64: Detaily porušení vzorku č. 4.....	78
Obr. 65: Grafické průběhy odtrhové pevnosti vzorku č. 5 .....	79

---

Obr. 66: Detaily porušení vzorku č. 5.....	79
Obr. 67: Grafické průběhy odtrhové pevnosti vzorku č. 6 .....	80
Obr. 68: Detaily porušení vzorku č. 6.....	80
Obr. 69: Zkušební vzorek pro zkoušku.....	81
Obr. 70: Předpokládané místo porušení vzorku.....	82
Obr. 71: Grafické průběhy smykové pevnosti vzorku č. 3 .....	83
Obr. 72: Grafické průběhy smykové pevnosti vzorku č. 4 .....	83
Obr. 73: Grafické průběhy smykové pevnosti vzorku č. 5 .....	84
Obr. 74: Grafické průběhy smykové pevnosti vzorku č. 6 .....	84
Obr. 75: Porovnání smykové pevnosti.....	85
Obr. 76: Detaily správného porušení vzorků .....	85
Obr. 77: Detaily nesprávného porušení vzorku .....	86



**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1: Vlastnosti vybraných druhů skelných vláken.....	16
Tab. 2: Hodnoty povrchového napětí běžných kapalin a látek.....	35
Tab. 3 Použité skladby kompozitu.....	49
Tab. 4: Technická specifikace stroje Zwick 1456 .....	57
Tab. 5: Modul pružnosti v ohybu - E [MPa] v podélném směru .....	59
Tab. 6: Modul pružnosti v ohybu - E [MPa] v příčném směru.....	59
Tab. 7: Mez pevnosti - F [MPa] v podélném směru .....	59
Tab. 8: Mez pevnosti - F [MPa] v příčném směru.....	60
Tab. 9: Poměrné prodloužení - dL [%] v podélném směru .....	60
Tab. 10: Poměrné prodloužení - dL [%] v příčném směru .....	60
Tab. 11: Zdánlivá mezilaminární pevnost - $\tau$ [MPa] v podélném směru.....	67
Tab. 12: Zdánlivá mezilaminární pevnost - $\tau$ [MPa] v příčném směru .....	68
Tab. 13: Pevnost ve smyku $\tau_{ps}$ [MPa] .....	82

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Technické listy použitých pryskyřic

Příloha P II: Technický list použité tkaniny

Příloha P III: Technické listy použitých lepidel

# PŘÍLOHA P I: TECHNICKÉ LISTY POUŽITÝCH PRYSKYŘIC



## Havel L285

### Laminating resin L 285 Hardener 500

#### Characteristics

<b>Approval:</b>	--
<b>Application:</b>	Production of composite structures Boat and shipbuilding Sports equipment Model airplanes Moulds and tools
<b>Operational temperature:</b>	-60°C → +50 - 60°C (-75°F → +120 - 140°F) without heat treatment
<b>Processing:</b>	At temperatures between 10°C and 40°C (50-105°F) All usual processing methods
<b>Special properties:</b>	Extremely good physiological compatibility Good mechanical properties Very short curing times even at low temperatures
<b>Special modifications:</b>	L 285 T: Thixotropic L 285 W: White

#### Processing details

#### Caractéristiques de mise en œuvre

	Laminating resin L 285 Résine L 285	Hardener 500 Durcisseur 500
Average EP -Value Valeur moyenne EP	0,63	-
Average amine equivalent Equivalent moyen d'amine	-	62

#### Mechanical data of un-reinforced resin

#### Données mécaniques de la masse de résine non renforcée

	Units	Value
Density Densité	lbs/gal g/cm <sup>3</sup>	9,8 - 10 1,18 - 1,20
Flexural strength Résistance à la flexion	psi x 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>	17 - 20 120 - 140
Modulus of elasticity Module d'élasticité en flexion	psi x 10 <sup>3</sup> kN/mm <sup>2</sup>	4,8 - 5,1 3,3 - 3,5
Tensile strength Résistance à la traction	psi x 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>	10 - 11,5 70 - 80
Compressive strength Résistance à la pression (Dureté)	psi x 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>	18 - 20 120 - 140
Elongation Allongement	%	5 - 6,5
Impact strength Résistance aux chocs	Nmm/mm <sup>2</sup>	40 - 50
Shore hardness Dureté / Shore	D	86 - 90
Water absorption % Absorption d'eau %	24 h 23°C (75°F) 7 d / 23°C (75°F)	0,10 - 0,20 0,20 - 0,50
Fatigue strength under reversed bending stresses acc. to DLR Brunswick. Tenue à la flexion alternée selon DLR Braunschweig	10% 90%	exp. 2 X 10 <sup>4</sup> exp. 2 X 10 <sup>4</sup>
<b>Curing:</b> <b>Durcissement:</b>	<b>24 h at 23°C (75°F)</b> <b>24 h à 23°C</b>	<b>+ 15 h at 60°C (140°F)</b> <b>+ 15 h à 60°C.</b>
<b>Representative data according to WL 5.3203 Parts 1 and 2 of the German Aviation Materials Manual.</b>	<b>Données représentatives établies d'après les réglementations WL 5.3203 parts 1 et 2 prises du manuel sur les matières de l'aviation allemande</b>	

#### Application

Low-viscosity laminating resin system not containing solvents or fillers, intended for processing and curing at room temperature. Suitable for production of parts with glass, carbon and aramide fiber reinforcements featuring high static and dynamic loadability.  
The pot life is approx. 10 - 15 min. Laminating resin L 285 combined with hardener 500 is distinguished by very short curing times even at low temperatures (good curing is assured at temperatures starting at +10 °C). Non-tacky, high-gloss surfaces are obtained even with unfavorable curing conditions, such as lower temperatures or high relative humidity.

The mixing viscosities have been adjusted such that the resin will not run out of wide-meshed fabrics on vertical surfaces.

Thanks to their excellent adhesive properties, this system can also be used as adhesives for wood, metal, glass, concrete and numerous plastics. The thixotropic modification (e.g. laminating resin L 285 T) is to be preferred for thicker adhesive joints and vertical surfaces. Fillers (e.g. metal powder, talcum, cotton flakes, etc.) may be admixed to obtain special system properties. Due to the elongation of 4-7%, which is advantageous for use as a laminating resin, the shear strength and peel resistance are somewhat lower than those of our special adhesive resins:  
**Adhesive resin L 135 / K2 and Adhesive resin A 10 / A 20.**

As a general rule applicable to all adhesives, thorough preparation of the intended adhesion surface is a fundamental prerequisite for good adhesion. Parting agent residue and contamination, such as dust, grease or water residue, will prevent effective bonding.

#### Storage

The resins and hardeners can be stored for at least 12 months in their carefully sealed original containers. The resins and hardeners may crystallize at temperatures below +15°C (60°F). The crystallization is visible as a clouding or solidification of the contents of the container. Before processing, the crystallization must be removed by warming up. Slow warming up to approx. 50 - 60°C (120-140°F) in a water bath or oven and stirring or shaking will clarify the contents of the container without any loss of quality. Use only completely transparent products. Before warming up, open containers slightly to permit equalization of pressure. Caution during warm-up! Do not warm up over an open flame! While stirring up use safety equipment (gloves, eyeglasses, respirator).

#### Specifications

Laminating resin L 285 Résine L 285		
Density Densité	lbs/gal / 77°F g/cm <sup>3</sup> / 25°C	9,85 - 10,26 1,18 - 1,23
Viscosity Viscosité	cps / 77°F mPas / 25°C	600 - 900
Epoxide equivalent Equivalent époxy	-	165 - 170
Epoxide value Valeur EP	-	0,59 - 0,65
Colour Coloration selon	Gardner	max 3

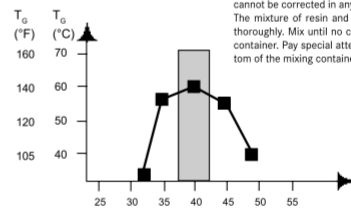
Hardener 500 Durcisseur 500		
Density Densité	lbs/gal / 77°F g/cm <sup>3</sup> / 25°C	8,34 - 8,84 1,00 - 1,06
Viscosity Viscosité	cps / 77°F mPas / 25°C	200 - 350
Amine value Indice d'amine	mg KOH / g	350 - 400
Colour Coloration selon	Gardner	max 5

Laminating resin L 285 - Hardener 500 Résine L 285 - Durcisseur 500	
Max T <sub>g</sub> for curing at 18°C (65°F) Max T <sub>g</sub> à 18°C durcissement	100 - 110°F 40 - 45°C
Max T <sub>g</sub> for curing at 25°C (80°F) Max T <sub>g</sub> à 25°C durcissement	120 - 150°F 50 - 60°C
Max T <sub>g</sub> for heat treatment at 50°C (120°F) Max T <sub>g</sub> à 50°C traitement thermique	140 - 150°F 60 - 65°C

#### Mixture ratio

Resin L 285 : Hardener 500 Résine L 285 : Durcisseur 500	
Parts by weight Parts de poids	100 : 40 +/-2
Parts by volume Parts de volume	100 : 50 +/-2

#### Mixing ratio <--> glass transition temperature

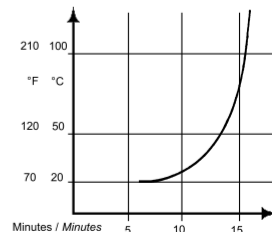


--- Parts by weight of hardener 500 to 100 parts by weight of laminating resin L 285  
Curing: 14 days at 25°C (80°F)

#### Temperature rise

Quantity: 100 g / 20°C (70°F)

The optimal processing temperature is in the range between 20 and 25°C (70-80°F). Higher processing temperatures are possible, but will shorten pot life. A rise in temperature of 10 °C (20°F) will have the pot life. Water (for example very high humidity or contained in fillers) causes an acceleration of the resin/hardener reaction. Different temperatures and humidities during processing have no significant effect on the strength of the cured product. Do not mix large quantities, especially from this highly reactive system. The heat flow from the mixing container is very low, so the contents will be warmed up very fast because of the reaction heat (exothermic resin-hardener reaction). This can cause temperatures >200°C (400°F) which may cause smoke intensive burning of the resin-hardener mixture.



#### Gel time

Film thickness  
1 mm  
at different temperatures

70 - 80°F 20 - 25°C	app. 45 - 60 min. env. 45 - 60 min.
105-115°F 40 - 45°C	app. 20 - 30 min. env. 20 - 30 min.

## Vinalkyd 550 PE-TALV-LE-B



### Nenasycená polyesterová pryskyřice

<b>Popis:</b>	Tixotropní, předrychlená, ortoftalová, středně reaktivní nenasycená polyesterová pryskyřice s nízkou viskozitou
<b>Použití:</b>	<p>Používá se k produkci laminátových předmětů užívaných pro stavbu lodí, domácnost, stavebnictví a průmyslové účely. Vytvrzení se provádí přidáním 2% MEKP-50 (Butanox M-50). Vyztužení je docíleno přidáním skelné výztuže do hmotnostního obsahu až 60% v několika vrstvách.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Může být aplikován po gelcoatu G-2</li> <li>• Smí být zbarven organickými i anorganickými pigmenty</li> <li>• Velmi dobře smáčí skelnou výztuž</li> <li>• Nestéká při aplikaci na svislé povrchy</li> <li>• Na poslední vrstvu smí být aplikován topcoat.</li> </ul>
<b>Klasifikace:</b>	Spňuje požadavky legislativy EU

### Charakteristika

Vlastnost	NORMA
<b>Vzhled</b> (vizuální)	Modře zbarvená tixotropní tekutina
<b>Netěkavý obsah, 125°C/1h:</b> (ISO 2535)	56 ± 1%
<b>Želatinační čas 20°C:</b> (BNS EN ISO 3251)	15-25 min
<b>Viskozita (Brookfield 23°C) (vřeteno 2, rychlost 12 ot/min)</b>	800-1.000mPa.s
<b>Tixotropie index (vřeteno 3, rychlost.5/50 ot/min) (ASTM D 2196-05 (B))</b>	min 2,4

## Ostatní data

<b>Hustota při 20°C:</b> (BNS EN ISO 2811-1)	1,1 g/cm <sup>3</sup>
<b>Číslo kyselosti:</b> (BNS EN ISO 3682)	max 26 mgKOH/g
<b>Bod vzplanutí:</b> (BNS EN ISO 1523)	34°C

## Fyzikálně – mechanické vlastnosti

<b>Vytvrzovací systém</b>	+ 2% MEKP
<b>Vytvrzovací podmínky:</b>	24 hod v běžné teplotě okolí dotvrzení 16 hod při 40°C
<b>Pevnost v tahu:</b> (BNS EN ISO 527-1,2)	min. 65 MPa
<b>Pevnost v ohybu</b> (BNS EN ISO 178)	min. 125 MPa
<b>Tvrdość při 25°C</b> (ASTM D 2583)	min. 50
<b>HDT základní pryskyřice</b>	80°C

**Aplikace:** Nenasycená polyesterová pryskyřice Vinalkyd 550 PE-TALV-LE-B vytvrzuje následujícím vytvrzovacím systémem:  
Do 1000g pryskyřice přidejte 20g MEKP (Butano M-50), směs musí být dobře promíchána (homogenní) a poté použita.  
Zpracovatelnost směsi je od 15 do 25 minut, záleží na teplotě pryskyřice. Doba želatinace se zkracuje se zvyšující se teplotou nad 23°C. Nižší teplota čas želatinace prodlužuje.

**Balení:**

- Kovová kónická dóza 22l s polyetylenou vložkou o čisté hmotnosti 20kg
- Pozinkovaný barel 200l o čisté hmotnosti 200kg
- Cisterna z nerezové oceli nebo hliníku

**Skladování:** Zabalená nenasyčená polyesterová pryskyřice je skladována v uzavřené, suché a ohnivzdorné skladovací ploše, chráněné proti přímému slunečnímu záření, při teplotě do 25°C.  
Skladovací trvanlivost – 3 měsíce od data výroby

**Bezpečnostní informace, ekologie:** viz Bezpečnostní list

---

Účelem tohoto technického popisu je informovat klienta o kvalitě našeho produktu. Zdejší údaje jsou založené na našich stávajících znalostech. Vyzýváme naše klienty před započetím prací, aby prověřili kvalitu našich produktů nebo jejich přizpůsobivost bázi a udělali si zkušební aplikaci. Naši klienti se před započetím prací musí ujistit, že stávající technický popis nebyl změněn nebo nahrazen novým vydáním.

**Orgachim®**

Rousse, 21 "Treti mart", blvd., tel. 082 / 886 303; fax 082 / 886 257  
[www.orgachim.bg](http://www.orgachim.bg)



## PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST POUŽITÉ TKANINY



### GLASS FILAMENT FABRICS for PLASTICS REINFORCEMENT PRODUCT SPECIFICATION

		Specification	
Style Number	92112	MIL-Y-1140H	
US Style		MIL-C-9084	
WLB No.		DIN 65066	
British Standard		BS 3396	
Finish/Designation		FK800	
	Unit	Tolerance Specification	
Weave pattern	Plain	DIN ISO 9354	
Area weight	g / m <sup>2</sup> 200,0	± 5%	DIN EN 12127
Yarn	tex	DIN EN 12654	
warp yarn	EC9-136		
weft yarn	EC9-136		
Fibre count	1 / cm	DIN EN 1049	
warp ends	8,0	± 5%	
weft picks	6,5	± 5%	
<b>Temperature resistance 1)</b>			
Continuous load	°C 260		
Short time resistance	°C 600		
Moisture content	% < 0,2	± 1%	DIN EN 3616
Finish content	% 0,08 - 0,28	± 5%	DIN ISO 1887
			DIN EN 60
Thickness (approx. dry)	mm 0,20	± 5%	DIN ISO 4603/E
in laminate (43% Vol.)	mm 0,18	± 5%	

All statements herein are expressions of opinion which we believe to be accurate and reliable, but are presented without guarantee or responsibility on our part. Statements concerning possible use of our products are not intended as recommendations for their use in the infringement of any patent. No patent warranty of any kind, express or implied, is made or intended.

# PŘÍLOHA P III: TECHNIKÉ LISTY POUŽITÝCH LEPIDEL

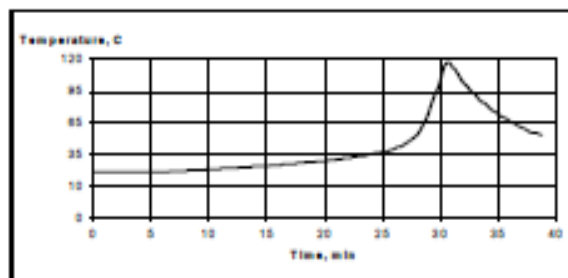
**ITW PLEXUS**

TECHNICAL DATA SHEET

## PLEXUS MA422

**Description** Plexus™ MA422 is a two-part methacrylate adhesive designed for structural bonding of thermoplastic, metal, and composite assemblies. Combined at a 10:1 ratio, it has a working time of 17 to 24 minutes and achieves 75% of ultimate strength in 35 to 40 minutes. Plexus MA422 is finding wide usage for composites bonding applications in the transportation and marine industries, because it requires virtually no surface preparation. In addition, this product provides a unique combination of excellent fatigue endurance, outstanding impact resistance, and superior toughness. Plexus MA422 is available in blue and is supplied in ready to use cartridges, 20 litre pails or 200 litre drums to be dispensed as a non-sagging gel.

<b>Characteristics</b>	<b>Room Temperature Cure</b>		
	• Working Time <sup>2</sup>	17 – 24 minutes	
	• Fixture Time <sup>3</sup>	35 – 40 minutes	
	• Operating Temperature	-55°C – 120°C	
	• Gap Filling <sup>7</sup>	1mm to 10mm	
	• Mixed Density	0.96 g/cc	
	• Flash Point	10°C	
<b>Chemical Resistance<sup>4</sup></b>	<b>Excellent resistance to:</b>	<b>Susceptible to:</b>	
	• Hydrocarbons	• Polar Solvents	
	• Acids and Bases (3-10 pH)	• Strong Acids and Bases	
	• Salt Solutions		
<b>Physical Properties (uncured) – Room Temperature</b>	<b>Viscosity, cP</b>	<b>Adhesive</b>	<b>Activator</b>
	Colour	100,000 – 125,000	40,000 – 60,000
	Density, g/cc	Off-White	Blue
	Mix Ratio by Volume	0.96	1.06
	Mix Ratio by Weight	10	1
	Mixer Recommendation:	9	1
		Cartridge (380ml):	MC10:24
		Bulk:	Refer to ITW Plexus <sup>9</sup>
<b>Mechanical Properties (Cured)</b>	<b>Tensile (ASTM D638)</b>		
<b>Room Temperature</b>	• Strength, MPa	13.7 – 17.2	
	• Modulus, MPa	482.7 – 620.6	
	• Strain to Failure (%)	75 – 100	
<b>Recommended for:</b>	• ABS	• PVC	• Styrenics
	• Acrylics	• Polyesters	• Urethanes (general)
	• FRP	(including DCPD modified)	• Vinyl Esters
	• Gelcoats <sup>8</sup>		
<b>Lap Shear (ASTM D1002)</b>	<b>Cohesive Strength MPa</b>	10.3 – 12.4	



Typical Exotherm Curve for MA422 at 23°C (10 grams)<sup>5</sup>



## Spárovací lepidlo FERMACELL *greenline*

### Pro sádrovláknité desky FERMACELL

#### Použití

Ke spojení na tupo sražených sádrovláknitých desek FERMACELL u stěn a stropů moreovaných na stavbě. Nevhodné pro následné vyplnění/lepení spár.

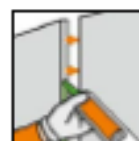
#### Vlastnosti

- **Bez nutnosti označení**, odzkoušeno Eco-Institutem Kolín
- **Jednoduchá zpracovatelnost**
  - lepi a spáruje v jednom pracovním kroku
  - optimální zpracování na stěnách a nad hlavou
- **Speciální špička**, pro správné množství lepidla přesně do středu hrany desky
- **Vysoká pevnost spáry**
  - při správném zpracování nedochází k praskání spár
  - vysoká pevnost desky i u nepodložených vodorovných spár
- **Jednoduché čištění** materiálu, nářadí, atd.

#### Zpracování

Spárovací lepidlo FERMACELL *greenline* se nanáší pomocí přiložené špičky ve formě ploché housenky do středu hrany desky. Následně se namontuje druhá deska těsně k první desce a připevní se. Maximální šířka lepené spáry 1mm. Při teplotě vzduchu 15° až 25°C je lepidlo vytvrdlé za cca. 18 až 36 hodin. Následně se vytvrdlé lepidlo odstraní např. škrabkou na lepidlo FERMACELL. Následuje přemolení spár a upevňovacích prostředků spárovacím tmelem, jemným finálním tmelem nebo sádrovou šetrkou FERMACELL. Teplota při zpracování lepidla nesmí být nižší než +15 °C. Teplota materiálu a ovzduší nesmí být nižší než +5 °C. Další informace viz **návod** na zpracování.

310-ml kartuše se vede podél hrany desky. Speciální špička slouží k přesnému dávkování množství lepidla na desky tloušťky 10 a 12,5 mm. U desek tl. 15 a 18 mm je nutno špičku přitisknout. Podle toho se zvyšuje i spotřeba lepidla.



#### Charakteristiky materiálu

Spotřeba	cca. 20 ml/běžný metr spáry (tl.= 10/12,5 mm)
Teplota materiálu a mraznosti	+ 5 °C
Teplota lepení	+15 °C
Doba schnutí	18 až 36 hodin při 15° až 25°C
Skladování	9 měsíců v chladu, chráněně před mrazem*

\*Vzhledně ke zpracování tmelem při vstupu a ukládání nákladů spárovacího lepidla FERMACELL *greenline*



#### Obchodní údaje

Číslo výrobku	79224
EAN	4007548014397
Číslo celního tarfu	35069100
Množství paleta	48 kartonů po 25 kartuších
Množství kartuše	310 ml

Stan 4/2010. Technické změny vyhrazeny. Vydávejte si nejnovější vydání brožury.

#### Technické informace FERMACELL

Pondělí až pátek od 9.00 do 16.00

Konzultace projektu: telefon: +420 606 657 523

Konzultace montáž: Čechy + 420 602 453 927, Morava a Slezsko + 420 721 448 666, Slovensko + 420 721 448 666

Informační materiály FERMACELL: telefon: +420 296 386 330, fax: +420 296 386 333, e-mail: fermacell-cz@xella.com