

# Studium bimodularity laminátových struktur

Bc. Marek Brhel

---

Diplomová práce  
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

*„Všem, kteří nad plasty ohrnují nos, by chtěli polymerní fyzikální chemici, vzkázat, že tyto materiály jsou koneckonců jen směsí více či méně zdařilých makromolekul – stejně jako my všichni – a samy o sobě za nic nemůžou.“*

*(citace neznámých polymerních fyzikálních chemiků)*

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2007/2008

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek BRHEL**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Studium bimodularity laminátových struktur**

Zásady pro vypracování:

- a) literární studie na dané téma
- b) připravit zkoušky v ohybu, tahu a tlaku vzorků laminátových stěn dané struktury a vyšetřit mechanické charakteristiky laminátové stěny
- c) navrhnout strukturní modely mechanického chování laminátové struktury
- d) získané výsledky vyhodnotit a stanovit doporučení pro praxi

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

ŠUBA, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001, skripta

JANČÁŘ, J.: Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů, Brno: VUT, 2003

PTÁČEK, L. a kolektiv: Nauka o materiálu II, Brno: CERM, 2002

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **19. února 2008**

Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2008**

Ve Zlíně dne 29. ledna 2008



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce popisuje mechanické charakteristiky skelných laminátových stěn dané struktury. Provedení tahové, tlakové a ohybové zkoušky proběhne na zařízení Zwick 145 665.

Dále budou navrhnuty strukturní modely mechanického chování laminátové struktury. Následně dané výsledky budou analyzovány a ověřena bimodulární teorie pro daný laminát.

V závěru práce jsou získané výsledky vyhodnoceny a stanoveno doporučení pro praxi.

Klíčová slova: laminát, bimodularita, mechanické zkoušky

## **ABSTRACT**

This Master thesis describes mechanical characteristics glass laminated sides laid structures. Fulfilment tension, compressive and flexural examination will slip on machinery Zwick 145 665.

Further will suggested structural model mechanical behavior laminated structures. Subsequently given to results will analysis and verified bimodular theory for given to laminated structures.

In the end work are gained results evaluation and defined recommendation for working experience.

Keywords: laminated plastic, bimodular, mechanical test

Chci velice poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Oldřichu Šubovi CSc. za odborné rady a připomínky. Dále poděkování také patří Ing. Jiřímu Šálkovi za pomoc při přípravě vzorků, Ing. Milanu Žaludkovi Ph.D. za rady a pomoc při trhání vzorků a malé poděkování také patří studentovy Bc. Josefu Beníčkovy.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....

Podpis diplomanta

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 LAMINÁT</b> .....	<b>13</b>
1.1 CHARAKTERISTIKA LAMINÁTU .....	13
1.2 VÝZTUŽ LAMINÁTU .....	14
1.2.1 Skleněné výztuže.....	16
1.3 POJIVO LAMINÁTU .....	20
1.3.1 Polyesterové pryskyřice.....	21
1.4 POVRCHOVÁ ÚPRAVA .....	22
1.4.1 Gel - coat .....	23
1.5 VÝROBA LAMINÁTŮ .....	24
1.5.1 Ruční kladení .....	24
1.5.2 Zautomatizování procesu laminování .....	26
1.5.2.1 Poloautomatizovaný proces laminování .....	26
1.5.2.2 Automatizovaný proces laminování .....	27
1.5.2.3 Kontinuální proces laminování.....	27
1.6 OBLASTI VYUŽITÍ LAMINÁTOVÝCH STRUKTUR.....	28
<b>2 MECHANICKÁ LAMINÁTŮ</b> .....	<b>32</b>
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY .....	32
2.2 ANIZOTROPIE LAMINÁTŮ .....	32
2.3 ROVNICE ELASTICITY PRO ANIZOTROPNÍ MATERIÁLY .....	35
2.4 KONSTITUČNÍ ROVNICE ANIZOTROPNÍCH MATERIÁLŮ .....	39
2.5 TYPY LAMINÁTOVÝCH STRUKTUR .....	42
2.6 ZÁPIS (KÓDOVÁNÍ) ORIENTACE LAMINÁTŮ .....	44
<b>3 BIMODULARITA</b> .....	<b>46</b>
3.1 ÚVOD .....	46
3.2 MECHANISMY PRO BIMODULÁRNÍ CHOVÁNÍ .....	47
3.3 MODUL PRUŽNOSTI V OHYBU BIMODULÁRNÍHO MATERIÁLU .....	47
<b>4 ZKOUŠENÍ VÝROBKŮ Z LAMINÁTŮ</b> .....	<b>49</b>
4.1 ÚVOD .....	49
4.2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY LAMINÁTŮ .....	49
4.3 TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	50
4.3.1 Mechanismus porušování laminátu při tahové zkoušce.....	51

4.4	TLAKOVÁ ZKOUŠKA .....	51
4.5	MEZILAMINÁRNÍ SMYKOVÁ NAPĚTÍ.....	52
4.6	OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	53
4.7	ZPŮSOBY PORUŠENÍ LAMINÁTŮ .....	54
<b>5</b>	<b>STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>56</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>ZAŘÍZENÍ A VZORKY PRO EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY.....</b>	<b>58</b>
7.1	STRUKTURA LAMINÁTOVÝCH STĚN .....	58
7.1.1	Struktura S-4 .....	59
7.1.2	Struktura S-8 .....	59
7.2	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ.....	60
<b>8</b>	<b>ZKOUŠKA TAHEM.....</b>	<b>62</b>
8.1	NASTAVENÉ HODNOTY PRO ZKOUŠKU TAHEM .....	62
8.2	ZKOUŠKA TAHEM PŘI TEPLITĚ +20°C .....	63
8.2.1	Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S-4.....	64
8.2.2	Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S-8.....	64
8.2.3	Shrnutí výsledků tahových zkoušek .....	65
8.3	ZKOUŠKA TAHEM V TEPLITNÍ KOMOŘE PŘI TEPLITĚ –30°C.....	66
8.3.1	Výsledky tahových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě –30°C .....	68
8.3.2	Výsledky tahových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě –30°C .....	68
8.3.3	Shrnutí výsledků tahových zkoušek v teplotní komoře při teplotě –30°C .....	69
8.4	ZKOUŠKA TAHEM V TEPLITNÍ KOMOŘE PŘI TEPLITĚ +60°C.....	70
8.4.1	Výsledky tahových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě +60°C .....	70
8.4.2	Výsledky tahových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě +60°C .....	71
8.4.3	Shrnutí výsledků tahových zkoušek v teplotní komoře při teplotě +60°C .....	71
8.5	ZKOUŠKA TAHEM V TEPLITNÍ KOMOŘE PŘI TEPLITĚ +100°C.....	71
8.5.1	Výsledky tahových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě +100°C .....	72
8.5.2	Výsledky tahových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě +100°C .....	73
8.5.3	Shrnutí výsledků tahových zkoušek v teplotní komoře při teplotě +100°C .....	73
8.6	DISKUZE VÝSLEDKŮ TAHOVÝCH ZKOUŠEK .....	73
8.6.1	Diskuze výsledků tahových zkoušek – modul pružnosti.....	74
8.6.2	Diskuze výsledků tahových zkoušek – mez pevnosti .....	75



<b>9</b>	<b>ZKOUŠKA TLAKEM .....</b>	<b>77</b>
9.1	NASTAVENÉ HODNOTY PRO ZKOUŠKU TLAKEM .....	79
9.2	ZKOUŠKA TLAKEM PŘI TEPLITĚ +20°C .....	79
9.2.1	Výsledky tlakových zkoušek pro strukturu S-4.....	79
9.2.2	Výsledky tlakových zkoušek pro strukturu S-8.....	80
9.2.3	Shrnutí výsledků tlakových zkoušek.....	80
9.3	ZKOUŠKA TLAKEM V TEPLITNÍ KOMOŘE PŘI TEPLITĚ +60°C.....	81
9.3.1	Výsledky tlakových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě +60°C .....	82
9.3.2	Výsledky tlakových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě +60°C .....	83
9.3.3	Shrnutí výsledků tlakových zkoušek v teplotní komoře při teplotě +60°C .....	83
9.4	ZKOUŠKA TLAKEM V TEPLITNÍ KOMOŘE PŘI TEPLITĚ +100°C.....	84
9.4.1	Výsledky tlakových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě +100°C .....	85
9.4.2	Výsledky tlakových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě +100°C .....	86
9.4.3	Shrnutí výsledků tlakových zkoušek v teplotní komoře při teplotě +100°C .....	86
9.5	DISKUZE VÝSLEDKŮ TLAKOVÝCH ZKOUŠEK .....	87
9.5.1	Diskuze výsledků tlakových zkoušek – modul pružnosti .....	88
9.5.2	Diskuze výsledků tlakových zkoušek – mez pevnosti .....	89
<b>10</b>	<b>ZKOUŠKA OHYBEM.....</b>	<b>91</b>
10.1	NASTAVENÉ HODNOTY PRO ZKOUŠKU OHYBEM.....	91
10.2	ZKOUŠKA OHYBEM PŘI TEPLITĚ 20°C.....	92
10.2.1	Výsledky ohybových zkoušek pro vzdálenost podpěr 64 mm .....	93
10.2.1.1	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S-4 .....	93
10.2.1.2	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S-8 .....	93
10.2.2	Výsledky ohybových zkoušek pro vzdálenost podpěr 200 mm .....	94
10.2.2.1	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S-4 .....	94
10.2.2.2	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S-8 .....	94
10.2.3	Shrnutí výsledků ohybových zkoušek.....	95
10.2.4	Diskuze výsledků ohybových zkoušek při teplotě 20°C – vliv vzdálenosti podpěr $L_p$ .....	96
10.3	ZKOUŠKA OHYBEM V TEPLITNÍ KOMOŘE PŘI TEPLITĚ –30°C.....	98
10.3.1	Výsledky ohybových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě –30°C .....	98
10.3.2	Výsledky ohybových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě –30°C .....	99
10.3.3	Shrnutí výsledků ohybových zkoušek v teplotní komoře při teplotě –30°C .....	100
10.4	ZKOUŠKA OHYBEM V TEPLITNÍ KOMOŘE PŘI TEPLITĚ +60°C.....	102
10.4.1	Výsledky ohybových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě +60°C .....	102

10.4.2	Výsledky ohybových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě +60°C .....	103
10.4.3	Shrnutí výsledků ohybových zkoušek v teplotní komoře při teplotě +60°C .....	103
10.5	ZKOUŠKA OHYBEM V TEPLITNÍ KOMOŘE PŘI TEPLITĚ +100°C .....	104
10.5.1	Výsledky ohybových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě +100°C .....	105
10.5.2	Výsledky ohybových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě +100°C .....	105
10.5.3	Shrnutí výsledků ohybových zkoušek v teplotní komoře při teplotě +100°C .....	106
10.6	DISKUZE VÝSLEDKŮ OHYBOVÝCH ZKOUŠEK.....	107
10.6.1	Diskuze výsledků ohybových zkoušek – modul pružnosti.....	108
10.6.2	Diskuze výsledků ohybových zkoušek – mez pevnosti .....	109
<b>11</b>	<b>STUDIUM BIMODULARITY.....</b>	<b>111</b>
11.1	POMĚR MODULŮ PRUŽNOSTI V TLAKU A TAHU.....	111
11.2	NÁVRH STRUKTURNÍHO MODELU MECHANICKÉHO CHOVÁNÍ LAMINÁTU .....	112
11.2.1	Modul pružnosti v ohybu - analyticky vypočten pro S-4 .....	113
11.2.2	Modul pružnosti v ohybu - analyticky vypočten pro S-8 .....	113
11.3	MODEL SKOŘEPINOVÉHO KRYTU .....	115
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>118</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>119</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>121</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>124</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>127</b>

## ÚVOD

Nejen objevování nových, ale také vylepšování již známých materiálů je předmětem úsilí, které lidskou společnost provází po celou dobu její existence. Tuto linii lze velmi dobře sledovat u tradičních materiálů, jakými jsou železné a neželezné kovy, keramika anebo kůže a přírodní vlákna jako zástupce obnovitelných zdrojů. Polymerní materiály, které za sebou mají sotva stoletou historii touto cestou zlepšování vlastností teprve krácejí.

Plasty samotné byly v důsledku svých omezených mechanických vlastností dosud použitelné pouze tam, kde netvořily nosnou část konstrukce. Lamináty se svým spektrem vlastností vyrovnají tradičním konstrukčním materiálům, a jsou tedy použitelné i při výrobě nosných prvků konstrukcí a proto jsou tedy nejnadějnějšími kandidáty pro náhradu kovů a jiných tradičních materiálů v konstrukčních aplikacích i ve speciálním stavebnictví. Největšího rozšíření v této oblasti dosáhly lamináty, ve kterých jsou pojivem organické polymery a vyztuženi jsou různé typy anorganických či organických vláken.

Pryskyřice užívané v laminátech se začaly vyrábět před druhou světovou válkou v USA, ale první dílčí chemické reakce, jichž se dnes při jejich výrobě využívá, byly známy už v polovině devatenáctého století. K intenzivnímu výzkumu vlastností laminátů došlo za druhé sv. války v USA a ve Velké Británii. Vedla k tomu snaha nahrazovat nedostatek kovů, potřebných pro vojenské účely, jinými materiály. Postupem času se lamináty staly z pouhé náhražky kovů samostatným konstrukčním materiálem vynikajících vlastností.

Skutečností, která vedla k obrovskému rozvoji laminátů v posledních dvaceti letech a která je odlišuje od tradičních materiálů, je i to, že lamináty jsou obvykle vyráběny v jednom kroku zároveň s konečným tvarem dílce či výrobku. To znamená, že jsou do značné míry šity na míru konečné aplikaci, a to nejen svou strukturou a vlastnostmi, ale i výrobní technologií. Nejvýznamnější předností laminátů je kombinace snadné tvarovatelnosti málo pevného polymeru s pevností a tuhostí vyztužujících vláken.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

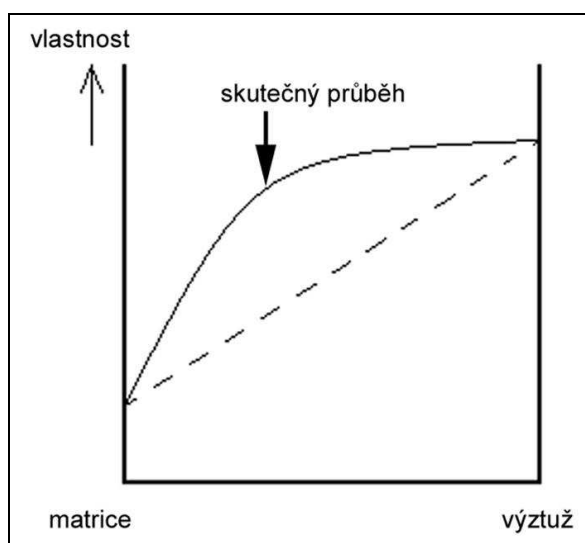
# 1 LAMINÁT

## 1.1 Charakteristika laminátu

Laminát je vrstvená hmota vzniklá spojením několika vrstev - lamin - výztuže impregnovaných vhodnými pryskyřicemi. Ačkoliv vlivem zvýšené teploty částečně měknou, jsou lamináty zařazovány mezi termosetové kompozitní materiály složené ze dvou fází:

- výztuže (vlákna - nespojitá fáze)
- pojivo (matrice - spojitá fáze)

Kombinací dvou nebo více materiálů (fází) s rozdílnými vlastnostmi lze získat materiály nové, jejichž výsledné vlastnosti jsou lepší, než by odpovídalo pouhému součtu vlastností jednotlivých složek (synergický efekt) [1].



Obr. 1. Synergické chování složek kompozitu

Laminátové výrobky mají oproti klasickým výrobkům ze železa či jiných kovů několik výhod, pro které je jejich použití preferováno.

- Malá měrná hmotnost
- Velká mechanická pevnost v širokém rozmezí teplot
- Poměrně jednoduchá a rychlá výroba kusových výrobků
- Dobré tepelné a zvukově izolační vlastnosti

- Dobrá odolnost proti vlivům povětrnosti
- Velká rázová pevnost a pružnost
- Snadná oprava poškozených dílů
- Možnost vhodnou volbou základních surovin měnit výsledné vlastnosti výrobků
- Dobrá chemická odolnost proti širokému spektru agresivních medií

## 1.2 Výztuž laminátu

Výztuž – vlákna - *nespojité fáze* je nosným prvkem v laminátech a určuje jejich mechanické vlastnosti (pevnost, houževnatost, modul pružnosti apod.). Jako výztuže jsou používány zpravidla vláknité materiály. Nejčastěji se používají výztuže ze skleněných vláken. Pro výrobky, na které jsou kladeny speciální požadavky, mohou být používána vlákna kevlarová případně uhlíková a jiná [2].

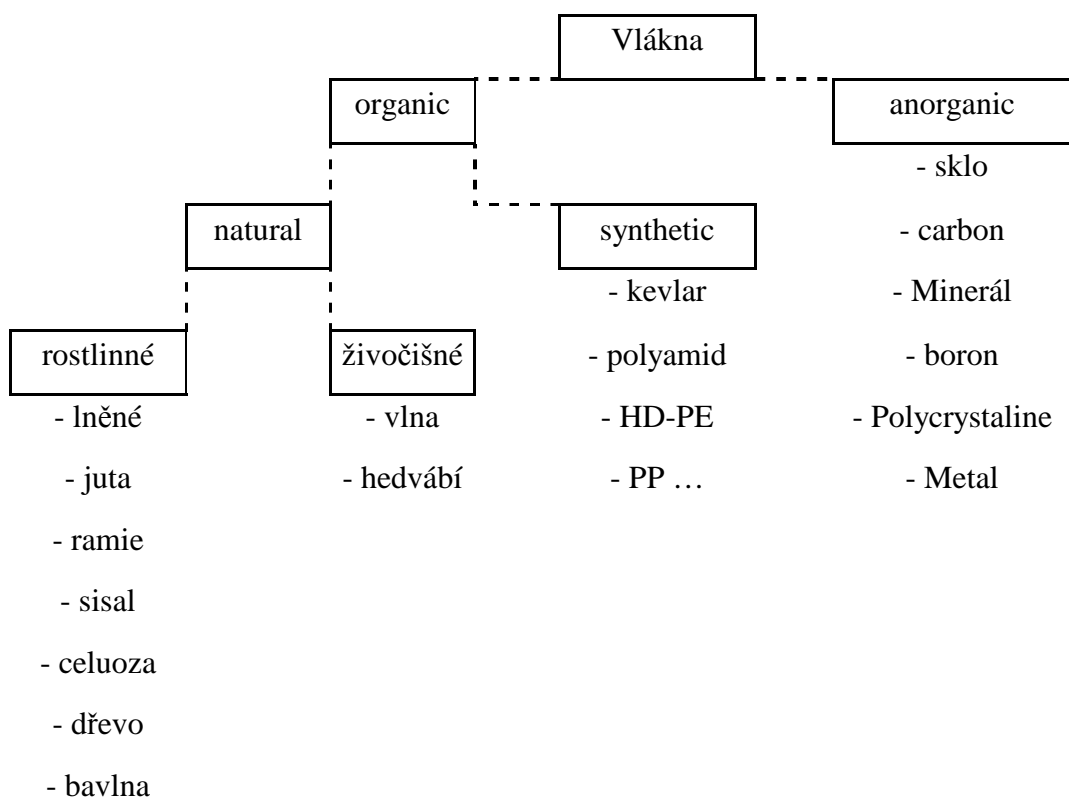
Existují tři široce používané druhy vláken:

- a) skleněná
- b) aramidová (známá pod obchodním označením kevlar)
- c) uhlíková



Obr. 2. Aramidové, uhlíkové a skleněné vlákno

Dále se používají vlákna: keramická, kovová, přírodní [3].



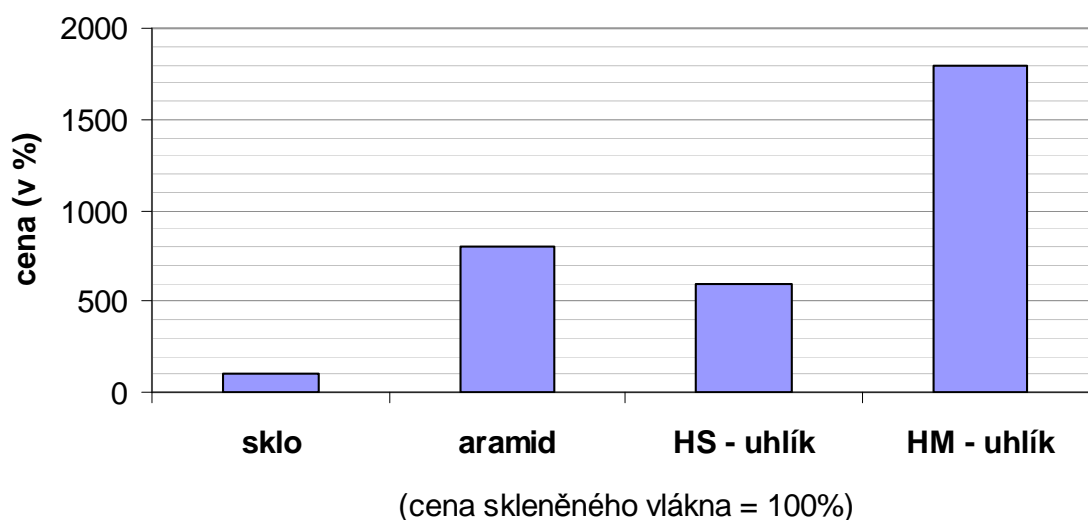
Obr. 3. Schématické dělení nejčastěji využívaných vláken [4]

Tab. 1. Volba vlákna dle konstrukčních požadavků [5]

Konstrukční požadavky	Volba vlákna
Pevnost	Uhlík
Tuhost	Uhlík
Houževnatost	Aramid
Krip	Uhlík
Únava	Uhlík
Nízká cena	E - sklo
Prostupnost světla	E - sklo
Korozivzdornost	R - sklo
Radioprůzračnost	D - sklo
Nejvýznamnější mechanické vlastnosti	E - sklo

Tab. 2. Vlastnosti vybraných výztuží – vláken [3]

Typ vlákna	Sklo	Aramid	HS - uhlík	HM - uhlík
Modul pružnosti v podélném směru (MPa)	74 000	130 000	230 000	390 000
Modul pružnosti v příčném směru (MPa)	74 000	5400	15 000	6000
Modul pružnosti ve smyku (MPa)	30 000	12 000	50 000	20 000
Pevnost v tahu (MPa)	2100	3000	5000	3800
Hustota ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2500	1500	1600	1700



Obr. 4. Graf porovnání cen vláken [3]

Pevnost vlákna je vždy významně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě.

Příčinou je:

- malý příčný průřez vláken, v tenkých vláknech jsou minimalizovány rozměry vrozených vad materiálu a také nebezpečnost povrchových vad je při malých příčných rozměrech menší (menší průměr = menší povrch), existující vady jsou mikroskopické a orientovány v podélném směru vlákna.
- přednostní nasměrování pevných kovalentních meziatomových vazeb v podélném směru vlákna.

### 1.2.1 Skleněné výztuže

Jako vyztužující materiály jsou používána nejčastěji skleněná vlákna (z cenových důvodů) cca 80%. Pro běžné výrobky jsou to vlákna z E skla (tzv. sklo Eutal - bezalkalické, hlinito-



boritokřemičité sklo), pro výrobky používané v prostředí s korozním namáháním se používá materiály z chemicky odolného C nebo ECR skla.

Výztuže jsou používány v těchto základních formách:

**Roving - skleněný pramenec** - nekonečná skleněná vlákna malého průřezu sdružená do svazků pro další zpracování. Může být používán například pro:

- technologii strojního navíjení - takto se vyrábějí laminátové trouby
- technologii stříkání - nanášení pomocí zařízení, které současně stříká pryskyřici a seká roving na krátká vlákna
- výrobu dalších výztuží, které jsou popsány dále.



*Obr. 5. Sklená příže - roving*

**Závojevé rohože** (někdy nazývané také povrchové) - velmi tenké plošné materiály tvořené krátkými neuspořádanými vlákny. Plošná hmotnost bývá okolo  $30 \text{ g/m}^2$ . Závojevé rohože se používají na povrchu laminátu pro vyztužení vrstev čisté pryskyřice. Zpravidla bývají z chemicky odolného materiálu (ECR nebo C skla nebo PESL či PAC).

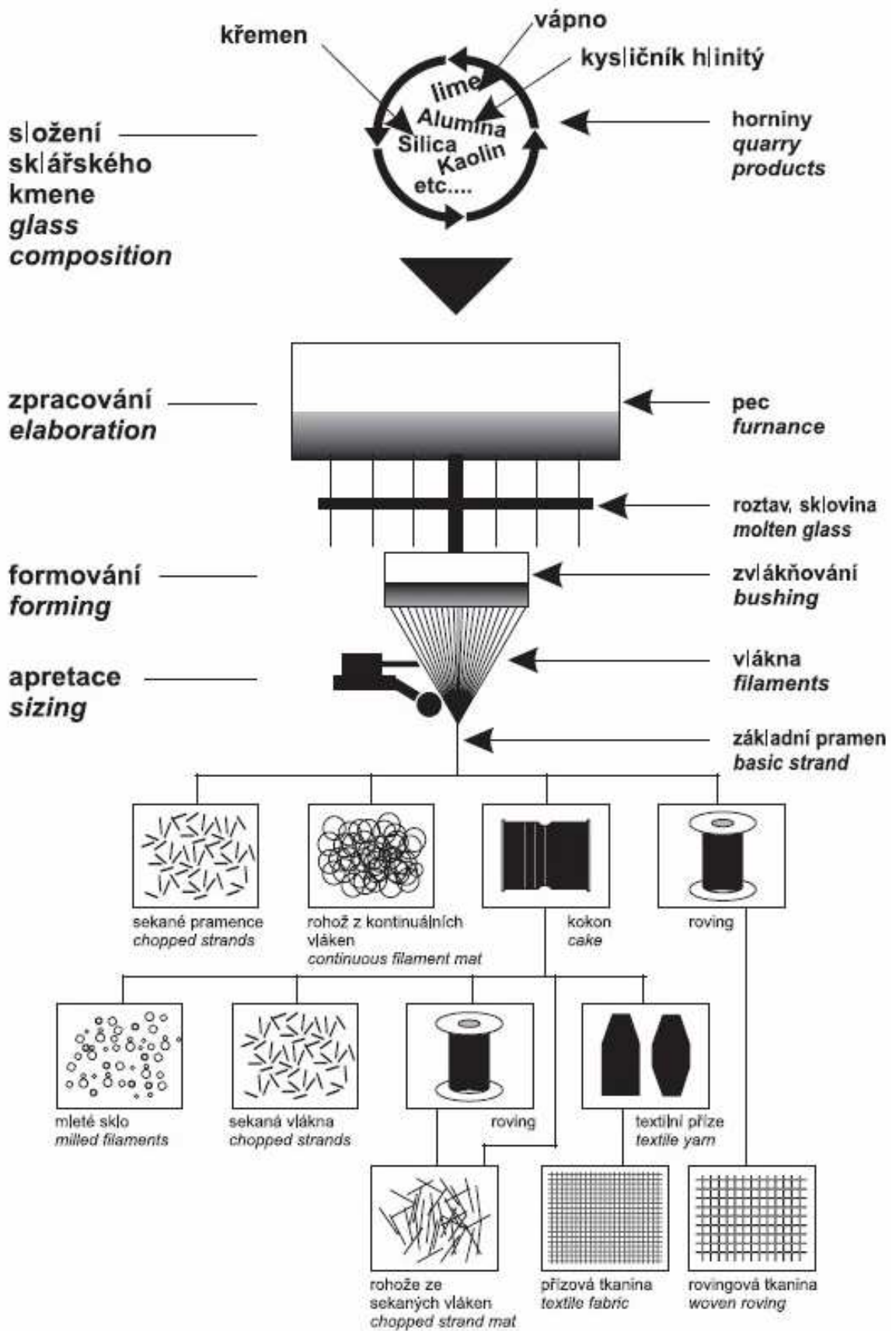
**Rohože** - plošné materiály tvořené krátkými neuspořádanými vlákny. Plošná hmotnost bývá větší než u závojeových rohoží - běžně se používají rohože o plošné hmotnosti okolo  $300 \text{ g/m}^2$ . Vyrábějí se z různých druhů skel. Advantex - chemicky odolné sklo v současné době nahrazuje "ECR" sklo.

**Tkaniny** - plošné materiály tkané z nekonečných vláken, dodávají výrobkům dobré mechanické vlastnosti. Tkaniny se tkají s vazbou *plátnovou*, *keprovou* nebo *atlasovou* v různých gramážích od 280 do 1500 g/m<sup>2</sup>. Spolu s rohožemi je to nejčastěji používaný druh výztuže pro nejrozšířenější metodu výroby laminátů - ruční kladení. Obvykle se používají tkaniny z "E" skla s různou lubrikací (vhodnou pro použité matrice). V případech zvýšeného chemického nebo tepelného namáhání výrobků může být požadováno použití tkanin ze skla Advantex nebo ECR.



Obr. 6. Typy tkaní

**Prepregy** - předimpregnované výztuže. Výztuže předem napuštěné pryskyřicí, která polymeruje působením tlaku a tepla při výrobním procesu lisování [1, 2].



Obr. 7. Schéma výroby skleněných vláken

### 1.3 Pojivo laminátu

*Pojivo - matrice - spojitá fáze* je polymerní materiál, kterým se impregnuje výztuž. Pojivo rozvádí mechanické namáhání rovnoměrně na všechna vlákna výztuže a chrání je před mechanickým nebo chemickým poškozením, tj. dodává laminátu odolnost proti chemickým, povětrnostním a jiným vlivům. Jako pojivo se nejčastěji používají nenasycené polyesterové pryskyřice, pak tyto kompozity nazýváme polyesterové skelné lamináty.

Pokud od kompozitů požadujeme, aby měly speciální vlastnosti pro různé oblasti použití (např. chemickou odolnost proti velmi agresivním médiím), používáme jako matici jiné typy pryskyřic [2].

Hlavní funkce matrice jsou:

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

Čtyři hlavní typy polymerních pryskyřic používaných pro výrobu laminátů:

- **epoxidové (EP)** - nejlepší mechanické vlastnosti s dostatečnou chemickou i teplotní odolností
- **polyesterové (UP)** - pro nenáročné aplikace (nenasycené polyesterové)
- **fenolové** - mají vynikající odolnost ohni a vykazují při hoření nízký vývin toxických zplodin a kouře
- **polyamidové**

Tab. 3. Volba matrice dle konstrukčních požadavků [5]

Konstrukční požadavky	Volba matrice
Ohnivzdornost	Fenolické
Korozivzdornost	Bismaleid
Teplotní odolnost	Fenol, polyimid
Prostup světla	Polyester
Nízká cena	Polyester
Houževnatost	Epoxid, termoplast
Nejvýznamnější mechanické vlastnosti	Epoxid

Tab. 4. Vlastnosti vybraných pojiv – matrice [3]

Druh pryskyřice	Epoxidové	Polyesterové	Fenolové	Polyamidové
Modul pružnosti (MPa)	4500	4000	3000	4000-19 000
Poissonova konstanta ( - )	0,4	0,4	0,4	0,35
Modulu pružnosti ve smyku (MPa)	1600	1400	1100	1100
Pevnost v tahu (MPa)	130	80	70	70
Hustota (kg·m <sup>-3</sup> )	1200	1200	1300	1400
Maximální teplota (°C)	90 - 200	60 - 100	120 - 200	250 - 300

### 1.3.1 Polyesterové pryskyřice

Nejčastěji je používáno polyesterových pryskyřic. Podle své chemické struktury se dělí na *orto*ftalové, *izo*ftalové a *tere*ftalové typy, v tomto pořadí obecně stoupají jejich mechanické vlastnosti, teplotní a chemická odolnost. Ještě lepších vlastností lze dosáhnout použitím *vinylesterových* pryskyřic s teplotní odolností až do 160°C a dlouhodobou chemickou odolností vůči většině agresivních látek – např. kyselinám, hydroxidům a rozpouštědlům. Monomerem a síťujícím činidlem je u těchto pryskyřic styren. Pryskyřice se pro zlepšení zpracovatelských podmínek dodávají i s přídavkem urychlovačů, speciálních voskových složek pro snížení odparu zdraví škodlivého styrenu případně s přídavkem thixotropních složek, upravujících viskozitu a snižujících stékání pryskyřice ze svislých stěn. Pro povrchové vrstvy, dodávající výrobku povětrnostní a chemickou odolnost a zajišťující estetický efekt se používají speciální polyesterové pryskyřice obsahující různá aditiva, zejména barevné pigmenty, UV stabilizátory a další složky [1].

Základními složkami pro zpracování jsou:

- samotná pryskyřice
- urychlovač
- iniciátor

Další složky jsou:

- Inhibitory - látky, které zpomalují reakci
- Antiabrazní aditiva - látky pro zlepšení odolnosti proti otěru.
- Antiemisní aditiva - látky ovlivňující (snižující) odpařování styrenu při polymeraci
- Aditiva - retardéry - pro docílení samozhášivosti pryskyřic - plniva, která se přidávají pro zlepšení požárních vlastností pryskyřic
- Barevné pigmenty, tzv. Farbpasty - probarvení pryskyřic
- Roztok směsi parafinů v rozpouštědle - do závěrných vrstev pryskyřice, tzv. top-coatů
- Tixotropní činidlo - zahuštění pryskyřic

## 1.4 Povrchová úprava

Lamináty jsou vystaveny faktorům, které mohou v průběhu času způsobit změnu povahy produktu. Je třeba vzít v úvahu dva aspekty:

1. Vystupování skelných vláken z produktu způsobené narušením prachem, kyselými dešti, sluncem a hydrolýzou materiálu.
2. Žloutnutí vlivem slunečních paprsků a povahy produktu.

Tento problém je možné vyřešit použitím povrchové ochrany. Existují tři typy ochrany: Gel-Coat, Melinex a Tedlar.

Použití vrstvy má dále funkci:

- Hladký povrch

- Ochrana před vlivem chemikálií a mechanickým poškozením
- Estetický vzhled

Životnost laminátu bez povrchové ochrany je 15 – 20 let.

Životnost laminátu s povrchovou ochranou je 35 – 40 let.

Údaje velmi závisí na vnějších podmínkách.

#### 1.4.1 Gel - coat

Ochrana *gel - coat* je vůbec první objevená aplikace chránící sklolaminátové výrobky před vystupováním skelných vláken. Velmi populární je použití například k ochraně lodí a karoserií obecně. *gel - coat* je čistá pryskyřice z nenasyceného (ortoftalického nebo izoftalického) polyesteru. Je aplikován automaticky na podpůrný povlak před pryskyřicí. Vrstva *gel - coatu* se poté vlivem teploty přemění z kapaliny na gel. Polyesterová pryskyřice se nanese na vrstvu gelového *gel - coatu* a vlivem vysoké teploty se chemicky neoddělitelně spojí, což eliminuje problém oddělování vrstev (peeling) díky tomu, že již nejde o dvě samostatné části. Za normálních klimatických podmínek je *gel - coat* ideální ochranou, protože drží skelná vlána v kontrolované vzdálenosti od povrchu, dělá povrch produktu lesklejší a průsvitnější [6].



*Obr. 8. Povrchová úprava  
gel – coat*

## 1.5 Výroba laminátů

Ve výrobě laminátů rozeznáváme dvě základní pracovní technologie [7]:

- ruční kladení
- zautomatizování procesu laminování

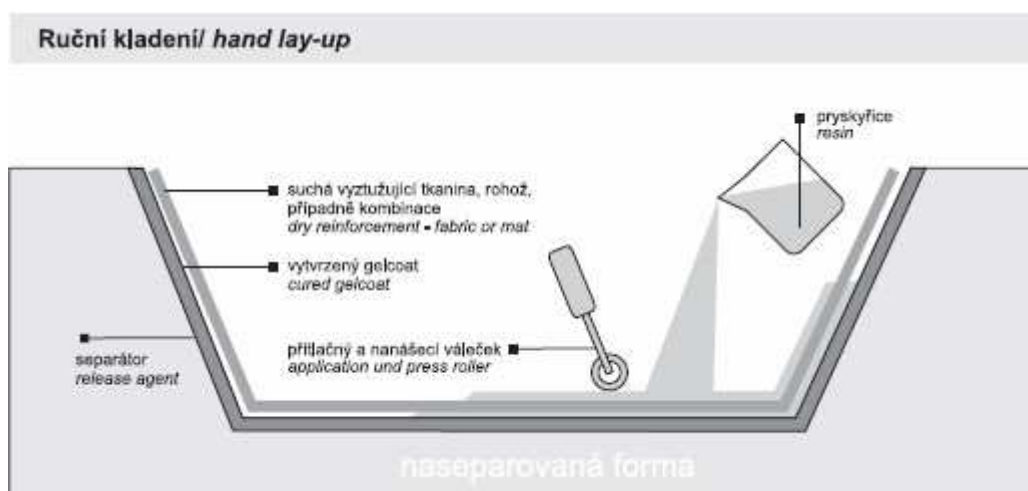
### 1.5.1 Ruční kladení

Ruční kladení se někdy nazývá i kontaktní lisování a jedná se o proces, ve kterém je nanášení pryskyřice i výztuže prováděno ručně na vhodný povrch pozitivní nebo negativní formy. Podle toho, na který povrch jsou komponenty nanášeny, je dosaženo kvality povrchu vytvrzeného kompozitního dílce. Jedná se o jednu z omezujících zvláštností tohoto výrobního procesu, totiž že pouze jedna strana výrobku má kvalitní povrch. Po položení výztuže a provlhčení pryskyřicí je připravený ruční kompozit ponechán k vytvrzení.

Jednotlivými fázemi tohoto procesu jsou:

- povrchová úprava formy separačním činidlem
- gel coat – pokud je třeba (kapitola 1.4.1)
- katalyzovaná pryskyřice
- výztuž
- další vrstva pryskyřice je válečkem vtlačena do výztuže a je přitom vytlačen přebytek vzduchu tvořícího bubliny
- tyto dva kroky jsou opakovány tak dlouho, až je vytvořena požadovaná tloušťka stěny
- vytvrzení v klidu
- vyjmutí z formy





Obr. 9. Ruční kladení

**Výhody:**

- jednoduchost technologie
- minimální náklady na nástroje
- prakticky neomezená variabilita tvarů a velikostí
- flexibilita konstrukce
- jednoduché dokončovací operace.

**Nevýhody:**

- nereprodukovatelnost odpadu, který lze jen těžko znovu zpracovat
- relativně velký objem odpadu
- náročnost na lidskou práci
- pouze jeden kvalitní povrch
- malá produktivita a kvalita výrobku silně závislá na zkušenosti a schopnostech pracovníka

Touto technikou jsou vyráběny lodě, skladovací nádrže, rovné plochy, bazény a různé prototypy.

### 1.5.2 Zautomatizování procesu laminování

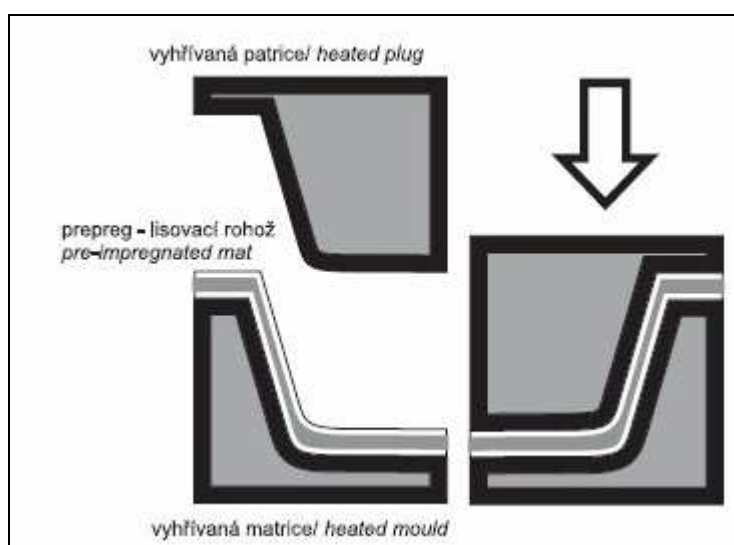
Převážně z důvodu zvýšení produkce a usnadnění některých operací se i v technologii laminování vyvinuly metody, kdy se ruční práce při typickém kladení usnadnila zautomatizováním či alespoň zpoloautomatizováním pomocí techniky. Lze tak proces laminování rozdělit na:

- poloautomatizovaný
- automatizovaný
- kontinuální

#### 1.5.2.1 Poloautomatizovaný proces laminování

Jedná se o metody, při nichž je na rozdíl od ručního kladení dostatečně zajištěno dodržení tloušťky laminátu, obsahu skelných vláken a vytvoření obou povrchů výrobku ve vyhovující kvalitě. Lisování se obvykle provádí ve dvoudílných kovových formách. Výroba těchto forem je poměrně nákladná, a proto se používá i jednodílných forem a tlak se zde vyvodí pryžovou plenou (vakem). Tlačnou sílu poskytne atmosférický tlak, umělý přetlak nebo kombinace obou. Lisování proces rozdělujeme na [4]:

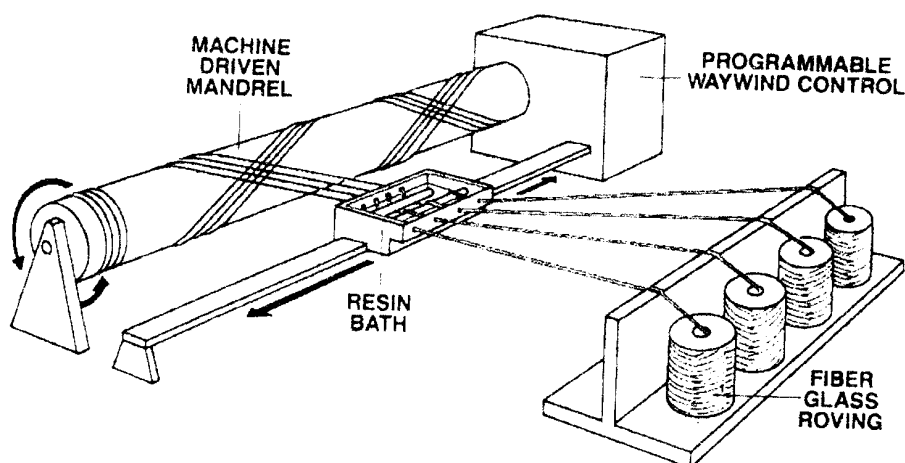
- lisování „za studena“
- lisování „za tepla“



Obr. 10. Lisování za tepla

### 1.5.2.2 Automatizovaný proces laminování

Plně automatizovaný proces laminování byl vyvinut pro velkosériovou produkci především sklem vyztužených trubek a tyčí. Nejpoužívanější technologií je v této oblasti *navíjení* (filament winding). Tato technologie je založena na kontinuálním navíjení svazku vláken či jinak upravených výztuží na kruhovou, smrštitelnou formu. Vlákná jsou navíjena buď již navlhčena pryskyřicí nebo se provlhčují až po navinutí. Požadovaných vlastností kompozitu se dosahuje přesným uspořádáním a orientací pramenců vláken a výztuží. Hodí se především pro výrobu potrubí, kolen, zásobníků paliv a tlakových nádob [4].



Obr. 11. Schéma navíjecího zařízení

### 1.5.2.3 Kontinuální proces laminování

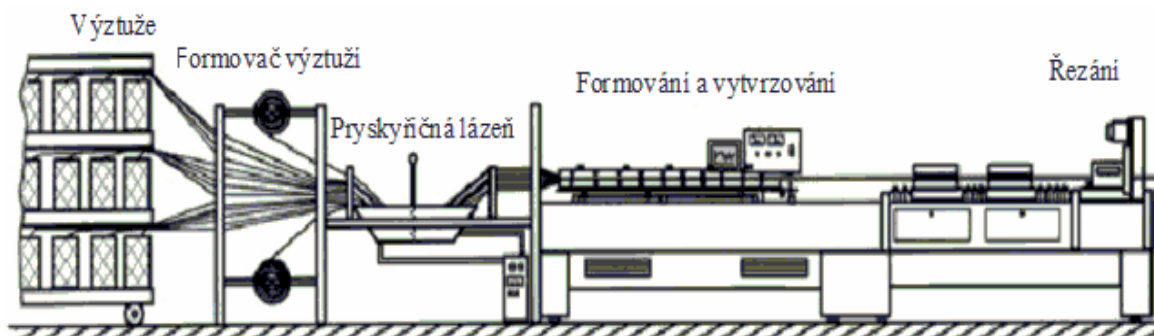
Kontinuální laminováním se vyrábějí především elektrické izolační desky, vlnité desky, desky pro střešní krytinu, tyče a trubky. Nejznámější kontinuální metodou laminování je *pultruze* [7].



Obr. 12. Tažený profil

*Pultruze* představuje kontinuální výrobní proces kompozitních profilů, jež mají konstantní příčný řez a jsou využívány pro specifické účely. Metoda zajišťuje opakovaně konstantní kvalitu. Jde o proces, který se bez větších zásahů používá od 50. let minulého století.

Pultruze je založena na tažení vyztužujícího materiálu (vláken), který je tažen přes naváděcí prvky. Jimi se vlákna precizně rozmisťují podle tvaru příčného řezu výrobku. Následně jsou možné dva způsoby jejich kontaktu s matricí. Vlákna jsou buďto vedena skrz impregnační vanu, kde se prosycují matricí a tato směs prosycených vláken a matrice se vede do formy, kde dojde ke konečnému zformování a k vytvrzení do požadovaného tvaru. Druhou možností je tzv. vstřikování, při němž dochází k vtažení výztuže do formy, do které je vstřikována pryskyřice. Ve formě je profil prohříván a dochází k jeho vytvrzování. Ke konečnému vytvrzení dochází v poslední části (zóně) výrobního zařízení. Profil opouštějící výrobní zařízení je zcela tvarově stálý a pevný. Injektážní metoda je zcela uzavřený proces, který udržuje vypařování rozpouštědel na minimální úrovni. Tím se zajišťuje dobré pracovní prostředí v porovnání s tradiční pultruzí, kde se výztuž vede otevřenou vanou obsahující matrici. Následně je profil tažen k pile, která řeže profily na stanovenou délku [8].



Obr. 13. Pultruzní linka

## 1.6 Oblasti využití laminátových struktur

Prvé použití laminátu se omezovalo na speciální výrobky pro *vojenské účely*. Z laminátu se vyráběly kryty radarových antén letadel, dále lodě, polární saně apod. To bylo v raných počátcích, kdy se s použitím laminátu pro běžné účely nemohlo počítat. Lamináty začaly pronikat do civilního provozu až po druhé světové válce a po zvládnutí technologie, ekonomiky provozu a často i estetiky povrchu se začaly uplatňovat jejich výhodné vlastnosti ve stále větší míře v nejrůznějších oborech průmyslového podnikání.



Obr. 14. Vojenská loď

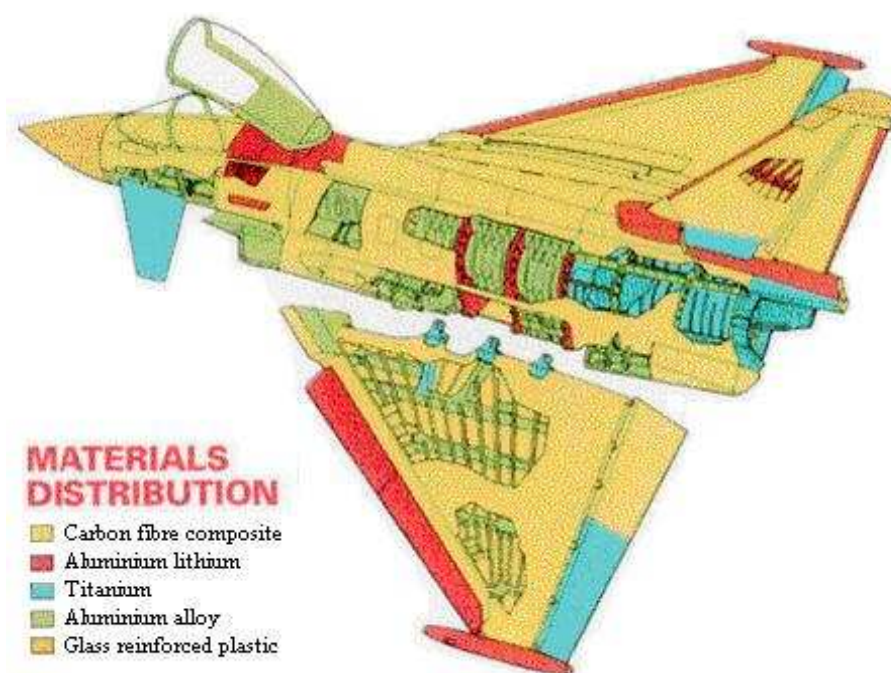
Jedna z prvních a snad nejdůležitějších oblastí jejich použití je *stavba lodí*. Pro vodní dopravní zařízení mají tu výhodu, že jsou netečné ke sladké i slané vodě a že i rozměrné konstrukce se dají provádět monoliticky, tj. z jednoho kusu. Nasákavost je mizivá a údržba nepatrná. Střídaté máčení a osušení nezanechává u laminátu z nealkalického textilu žádné následky. Loď je prakticky nezničitelná a snese i velmi tvrdé zacházení. Velkou předností je snadná, rychlá a levná oprava havarovaného místa. Lze tak vyrobit velké motorové lodě, stejně jako lehká kanoe a kajaky.

Velmi dobře se lamináty osvědčují jako materiál pro karosérie *motorových vozidel*. Lze vyrábět libovolné tvary a plochy zakřivit tak, aby byly dostatečně tuhé a pevné. Dalším důležitým činitelem, který způsobuje, že jsou vyhledávaným konstrukčním materiálem v automobilovém průmyslu, je jejich malá váha. Karoserie mohou být mnohem lehčí, a to dvakrát až třikrát než karoserie plechové. Zejména dveře jsou lehké a tuhé, takže nepodléhají trvalým deformacím a vždy dobře přiléhají. Bylo již řečeno, že lamináty jsou materiály nekorodující. To je u karosérií moment velmi závažný. Zejména podběhy a podlahy karosérií vystavené vlivům počasí je velmi výhodné vyrábět z tohoto materiálu. Rovněž u karosérií a kapot sportovních a závodních automobilů i motocyklů se oceňuje vysoká mez únavy a útlumu vibrací.

Další důležitou kapitolou v *dopravní technice* je použití laminátu jako konstrukčního materiálu pro výrobu nádrží na dopravu různých kapalin, např. mléka, vody, pohonných hmot apod. Vedle malé váhy působí velmi příznivě i jejich vlastnosti tepelně izolační. Lamináty jsou často používaným materiálem pro konstrukci chladírenských vozů, kde se všech jejich výborných vlastností plně využije.

Lze říci, že se dnes používá laminátu skoro v celém světě při zhotovování prototypových kusů všech druhů automobilů a kapotáže jednostopých vozidel. Je třeba zdůraznit a ocenit, že havarované nebo poškozené karosérie lze poměrně snadno spravit jednoduchými prostředky.

V leteckém průmyslu se laminátu používá při výrobě krytu antén běžných komunikačních přístrojů, obtížných částí trupu, ocasních ploch a křídel. Stejně se jich používá na různá potrubí a náhradní palivové nádržky, plováky hydroavionu a dokonce se uvažuje i o výrobě vrtulových listů. Velké možnosti se otevírají ve stavbě sportovních letounů a kluzáků.



Obr. 15. Vojenské letadlo

I v *elektrotechnice* je lze výhodně zužitkovat na lehké a pevné skřínky přístrojů. Ve sdělovací technice najdou své uplatnění zejména v rozsahu centimetrových vln. Pro tento účel jsou k dispozici desky, profilové tyče a trubky. Typickým výrobkem jsou kryty vyzářovacích systému pro velmi krátké elektromagnetické vlny.

Polyesterové skelné lamináty si získaly značnou oblibu ve výrobě *sportovního nářadí*. Zde nalezly široké pole působnosti. Vyrábějí se z nich luky, rybářské pruty, lyže a oštěpy, tyče pro skok do výšky a množství jiných předmětů. Používá se netkaných skelných vláken s vhodnou apretací. Tím, že ve výrobcích jsou vlákna uložena rovnoběžně s osou, dosahuje se značné pevnosti v daném směru a značné pružnosti výrobku, zejména použije li se speciálních typu polyesterových pryskyřic.



Rovněž ve *stavebnictví* se počítá s širokým uplatněním polyesterových skelných laminátů. Hlavními používanými prvky jsou tu nosníky, profily, okenní rámy a zvláště lehčené konstrukce. Toto uspořádání zvětšuje tuhost kombinované desky a tak odstraňuje pružnost laminátu, která je v mnoha případech použití nevhodná (tzv. sendvičové konstrukce). Sendvičové desky silné pět i více centimetrů jsou neobyčejně tuhé a pevné, mají dobré izolační vlastnosti a dají se dobře spojovat. Hodí se především pro montované stavby ve formě panelu nebo pro konstrukce dveří vystavených vlivu povětrnosti. Mimo sendvičové konstrukce se používá ve stavebnictví laminátů pro výrobu odpadových a ventilačních potrubí, kde zvláště dobře vyhovují pro svou odolnost k agresivním vodám a parám.



*Obr. 16. Příklad laminátového zastřešení*

Dobré chemické vlastnosti laminátu a jeho odolnost proti oděru umožňují jeho rozsáhlé použití v *chemickém průmyslu*, ať už na nádoby a nádrže, nebo na přepravní potrubí. Při konstrukcích chemických zařízení vystavených účinkům silně korozivních činidel se vyrobí z polyesterových laminátů vnější mechanicky namáhaný plášť, který se vyloží lamináty furanovými, které mají sice mechanické vlastnosti daleko horší než polyesterové lamináty, ale svými chemickými vlastnostmi je daleko předčí [9].

Tímto výčtem však nejsou možnosti použití laminátů zdaleka vyčerpány, neboť tvůrčí fantazii konstruktéra se zde nabízí materiál neobyčejně univerzální. Musíme si však uvědomit, že úspěch aplikace je dán zvážením výhod a předností a ekonomickým zhodnocením.

## 2 MECHANICKA LAMINÁTŮ

### 2.1 Základní pojmy

Na poli laminátových struktur se setkáváme s pojmy, které charakterizují strukturu a symetrii této struktury.

*Homogenní:* označujeme jednofázovou, jednokomponentní látku, jejíž fyzikální vlastnosti jsou ve všech bodech tělesa stejné.

*Heterogenní:* materiál se skládá ze dvou a více komponent nebo fází téže komponenty.

Další významnou charakteristikou kompozitů je symetrie jejich fyzikálních vlastností.

*Izotropní:* materiálové vlastnosti jsou ve všech směrech stejné.

*Monotropní:* v rovinách kolmých k ose monotropie jsou elastické vlastnosti ve všech směrech stejné.

*Ortotropní:* materiál vykazuje symetrii elastických vlastností ke třem vzájemně kolmým rovinám. Průsečnice těchto rovin jsou tzv. přirozenými resp. materiálovými souřadnými osami ortotropie.

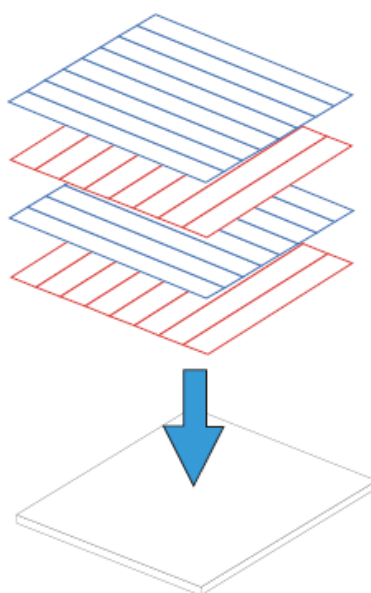
*Anizotropní:* takovými, které vykazují různé mechanické vlastnosti v různých směrech.

V teorii laminátu se setkáváme s pojmem *kvaziizotropní*, který znamená, že daný laminát je možno v makroskopickém měřítku považovat za izotropní v rovině vláknité výztuže. Mikroskopicky je však takový materiál anizotropní.

### 2.2 Anizotropie laminátů

Plošné výrobky vyztužené dlouhými vlákny jsou obvykle vícevrstvé, s úhlovým vrstvením několika vrstev (tzv. lamin). Každá lamina obsahuje obvykle jedinou výztužnou vrstvu jednosměrnou či vícesměrnou, a je proto příliš tenká, než aby se jí dalo použít přímo k jakékoliv aplikaci. Struktura vzniká kladením více vrstev – lamin s různou orientací a vlastnostmi se nazývá laminát. Výsledné vlastnosti laminátu závisejí na jeho struktuře a vlastnostech jednotlivých lamin.





*Obr. 17. Kladení lamin*

Obecně mohou být laminy anizotropními materiály, tj. takovými, které vykazují různé mechanické vlastnosti v různých směrech. Je-li struktura plošného prvku souměrná k dvěma navzájem kolmým osám (např. jednosměrně vyztužená vrstva), hovoříme o zvláštním případě anizotropie vlastností – o ortotropii [10].

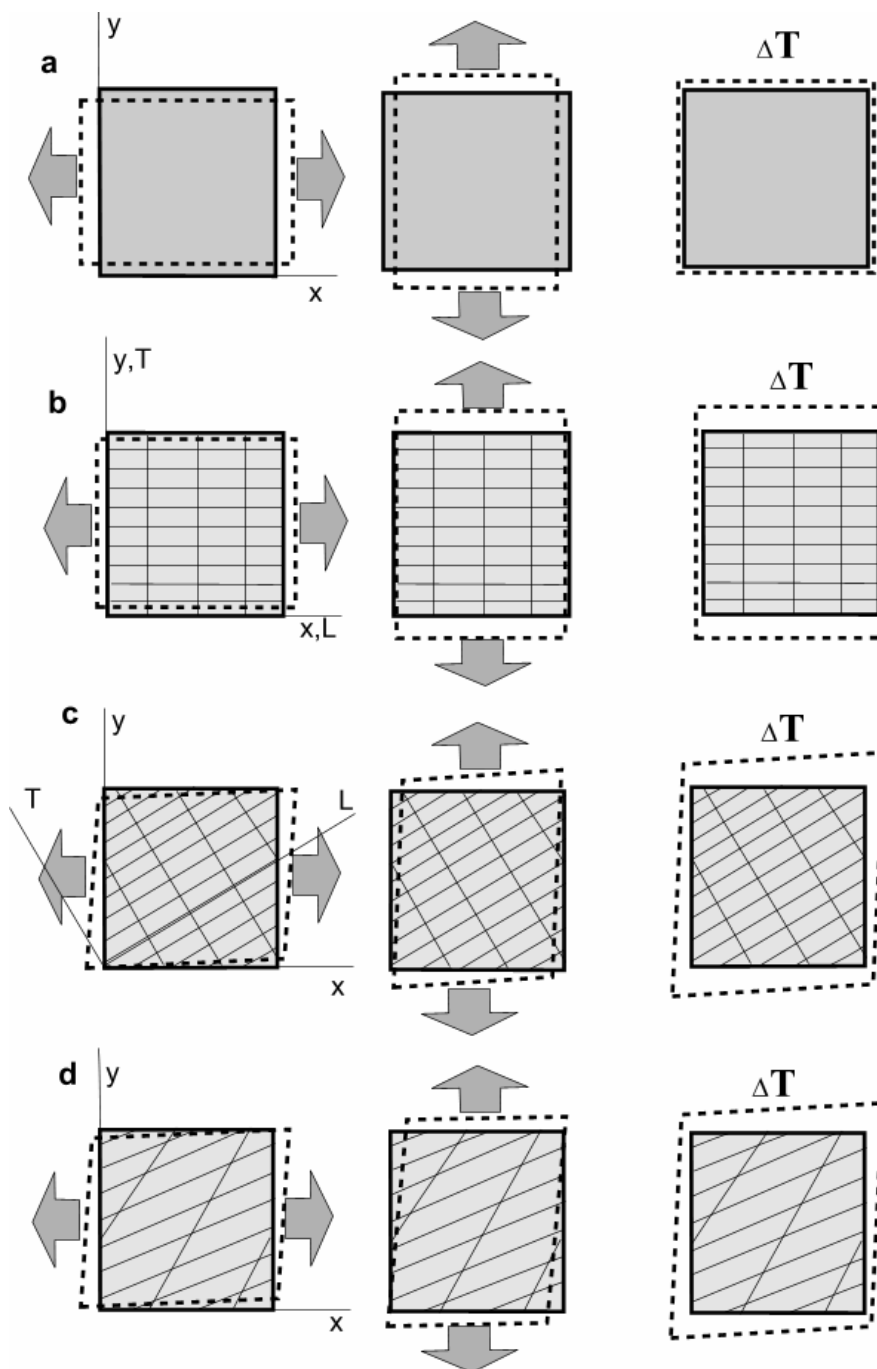
Srovnání deformační odezvy izotropního, ortotropního a obecně anizotropního plošného prvku je znázorněno na (Obr. 18). Izotropní prvek vykazuje při namáhání jednoosým normálovým napětím pouze normálové deformace: prodloužení ve směru působícího napětí a příčnou kontrakci. Jeho pravé úhly se při této deformaci nemění. Se změnou směru zatížení zůstává deformační odezva beze změny.

Ortotropní plošný prvek, jehož osy  $x$ ,  $y$  jsou totožné s materiálovými (přirozenými) osami ortotropie  $L$ ,  $T$  se chová při jednoosém namáhání normálovým napětím resp. při ohřevu co do charakteru deformace obdobně jako izotropní prvek – tj. dochází pouze k normálovým deformacím, nikoliv změně pravého úhlu vzorku. Hodnoty deformací resp. teplotních dilatací však pro směry  $x = L$ ,  $y = T$  nabývají rozdílných hodnot.

Kdybychom nyní pootočili lokální souřadný systém plošného vzorku shodného ortotropního materiálu o určitý úhel vůči přirozenému (materiálovému) souřadnému systému  $L$ ,  $T$ , byla by jeho mechanická i teplotní deformační odezva na vnější namáhání zcela obecná – prvek by se choval navenek jako anizotropní. Tak např. při namáhání pouhým normálovým

napětím ve směru  $x$  by se prvek nejen prodloužil ve směru 1, zúžil ve směru 2, ale vykázal by i smykovou deformaci, jak je znázorněno na (Obr. 18c).

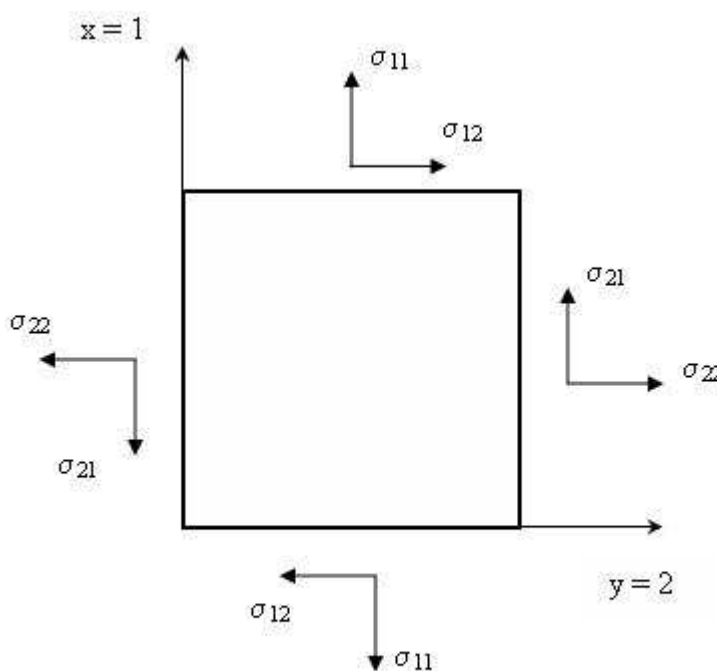
Jak je znázorněno na (Obr. 18d), má chování obecně anizotropního materiálu zdánlivě shodný charakter. Anizotropní prvek však nevykazuje přirozený souřadný systém, v němž by se prvky matice poddajnosti rovnaly nule. Elastické chování anizotropního plošného prvku je tak určeno šesti navzájem nezávislými elastickými konstantami [11].



Obr. 18. Mechanické chování a) izotropního, b,c) ortotropního, d) obecně anizotropního plošného prvku

### 2.3 Rovnice elasticity pro anizotropní materiály

Stav napětí v daném bode tělesa je obecně popsán devíti složkami tenzoru napětí  $\sigma_{ij}$ ,  $i, j = x, y, z$ . Tomuto tenzoru odpovídá tenzor deformace s devíti složkami  $\varepsilon_{ij}$ . Omezíme li se na případy dvouosé napjatosti tenkostěnných plošných výrobku, bude stav napjatosti určen čtyřmi složkami – (Obr.19).



Obr. 19. Příklad dvouosé napjatosti

Z momentové podmínky rovnováhy znázorněného prvku vyplývá, že  $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$ , takže jen tři složky jsou navzájem nezávislé – tenzor napjatosti je symetrický. Lineární vztah mezi složkami deformace a napjatosti lze pak vyjádřit ve tvaru (pro dvouosou napjatost):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 = \varepsilon_x \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_z \\ \varepsilon_3 = \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 = \sigma_x \\ \sigma_2 = \sigma_z \\ \sigma_3 = \tau_{xz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Zkráceně pak

$$[\varepsilon] = [C] \cdot [\sigma] \quad (2)$$

Matice poddajnosti  $[C]$  pro dvouosou napjatost obsahuje obecně 9 elastických konstant. Vyjádříme-li měrnou elastickou energii napjatosti při dvouosé normálové napjatosti  $\sigma_1, \sigma_2$  jako superpozici dvou jednoosých napjatostí  $(\sigma_1; 0), (0; \sigma_2)$ , bude zřejmě podle Bettiho věty  $A_{I,II} = A_{II,I}$ , část II

$$C_{12}\sigma_1\sigma_2 = C_{21}\sigma_2\sigma_1; \quad C_{12} = C_{21} \quad (3)$$

Obdobně  $C_{13} = C_{31}$  a  $C_{32} = C_{23}$ , takže matice  $[C]$  je symetrická podle hlavní diagonály a pouze 6 elastických konstant je navzájem nezávislých. Je-li ortotropní prvek vystaven normálové napjatosti ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) a směry napětí  $\sigma_1, \sigma_2$  jsou shodné s jeho přirozenými osami, bude podle (1)

$$\gamma_{xz} = C_{31}\sigma_1 + C_{32}\sigma_2 = 0 \quad (4)$$

Je tedy  $C_{13} = 0, C_{32} = 0$  a matice poddajnosti ortotropního prvku, namáhaného ve směru jeho přirozených os je:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Namísto elastických konstant  $C_{ij}$  se v technické praxi pracuje s moduly pružnosti a Poissonovými čísly. Například, při tahové zkoušce, ve směru osy 1 je podélné prodloužení:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} = C_{11}\sigma_1 \quad \text{takže} \quad C_{11} = \frac{1}{E_1} \quad (6)$$

a příčné zúžení:

$$\varepsilon_2 = -\nu_1\varepsilon_1 = -\frac{\nu_1}{E_1}\sigma_1 = C_{21}\sigma_1 \quad C_{21} = -\frac{\nu_1}{E_1} \quad (7)$$

Obdobně lze vyjádřit i ostatní konstanty  $C_{ij}$ . Obdržíme tak matici poddajnosti ve tvaru:

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Index u  $\nu$  má význam směru napětí, které danou kontrakci způsobí. Vzhledem k souměrnosti matice poddajnosti je:

$$\frac{\nu_1}{E_1} = \frac{\nu_2}{E_2} \quad (9)$$

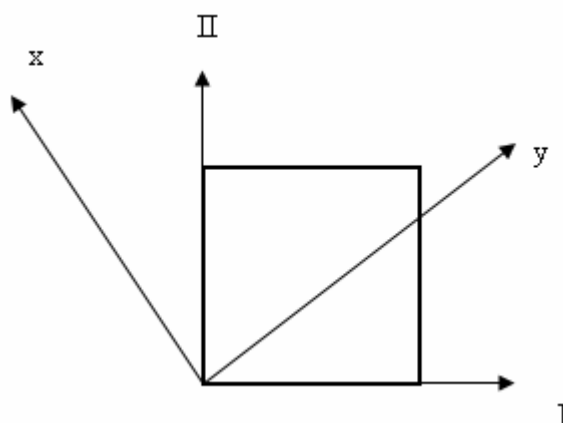
takže pouze čtyři z pěti konstant  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ,  $G_{12}$  jsou navzájem nezávislé. Rovnice elasticity (1) můžu psát i ve tvaru:

$$[\sigma] = [S] \cdot [\varepsilon] \quad (10)$$

kde  $[S] = [C]^{-1}$  je matice tuhosti. Inverzí (8) obdržíme:

$$[S] = \begin{bmatrix} E_1^{**} & \nu_2 E_1^{**} & 0 \\ \nu_1 E_2^{**} & E_2^{**} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad E_i^{**} = \frac{E_i}{1 - \nu_i \nu_j} \quad i, j = 1, 2 \quad (11)$$

Jak již bylo řečeno, je struktura laminátu vytvořena spojením několika lamin v jisté posloupnosti orientace. Směry hlavních os každé vrstvy tedy svírají různé úhly se základními referenčními osami výrobku. Je proto nutno znát mechanické chování ortotropní laminy z hledem k libovolným osám, svírajícím s jejími přirozenými osami úhel  $\varphi$  - (Obr. 20).



Obr. 20. Mechanické chování ortotropní laminy vzhledem k libovolným osám

Složky napjatosti a deformace lze transformovat z jedné soustavy souřadnic do druhé pomocí vztahu:

$$[\sigma] = [T] \cdot [\sigma'] \quad (12)$$

$$[\varepsilon] = [T] \cdot [\varepsilon'] \quad (13)$$

kde transformační matice je určena výrazem:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & \sin^2 \varphi & 2 \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin^2 \varphi & \cos^2 \varphi & -2 \sin \varphi \cos \varphi \\ -\sin \varphi \cos \varphi & \sin \varphi \cos \varphi & \cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi \end{bmatrix} \quad (14)$$

Dosadíme-li (13) do rovnice (10), bude:

$$[\sigma] = [S] \cdot [T] \cdot [\varepsilon'] \quad (15)$$

s použitím (12) pak

$$[T] \cdot [\sigma'] = [S] \cdot [T] \cdot [\varepsilon'] \quad [\sigma'] = [T]^{-1} \cdot [S] \cdot [T] \cdot [\varepsilon'] \quad (16)$$

kde  $[T]^{-1}$  je inverzní matice k matici  $[T]$ . Matice tuhosti ortotropní laminy v obecné orientaci je tedy

$$[S'] = [T]^{-1} \cdot [S] \cdot [T] \quad (17)$$

Po algebraických úpravách obdržíme pro jednotlivé členy matice  $[S']$  vztahy:

$$\begin{aligned} S'_{11} &= S_{11} \cos^4 \varphi + S_{22} \sin^4 \varphi + 2(S_{12} + 2S_{13}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \\ S'_{22} &= S_{11} \sin^4 \varphi + S_{22} \cos^4 \varphi + 2(S_{12} + 2S_{33}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \\ S'_{12} &= (S_{11} + S_{22} - 4S_{33}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + S_{12} (\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi) \\ S'_{33} &= (S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - 2S_{33}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + S_{33} (\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi) \\ S'_{13} &= (S_{11} - S_{12} - 2S_{33}) \cos^3 \varphi \sin \varphi - (S_{22} - S_{12} - 2S_{33}) \cos \varphi + \sin^3 \varphi \\ S'_{23} &= (S_{11} - S_{12} - 2S_{33}) \cos \varphi \sin^3 \varphi - (S_{22} - S_{12} - 2S_{33}) \cos^3 \varphi + \sin \varphi \end{aligned} \quad (18)$$

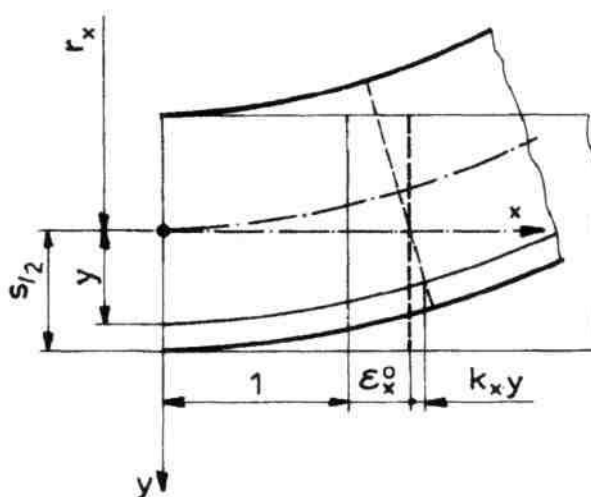
Matice  $[S']$  má všechny prvky nenulové jako matice pro zcela anizotropní laminu. Zdá se proto, že k popisu elastického chování ortotropní laminy v obecné orientaci je třeba šesti elastických konstant. Prvky  $S'_{13}$  a  $S'_{23}$  lze však ve skutečnosti vyjádřit jako lineární kombinaci čtyř základních konstant  $S'_{11}$ ,  $S'_{22}$ ,  $S'_{12}$ ,  $S'_{33}$ . Namísto konstant  $S'_{ij}$ , případně  $C'_{ij}$  se v praxi opět používají technické konstanty. Například matice poddajnosti je:

$$[C'] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_z}{E_z} & -\frac{\mu_x}{E_{II}} \\ -\frac{\nu_x}{E_x} & \frac{1}{E_z} & -\frac{\mu_z}{E_{II}} \\ -\frac{\mu_x}{E_{II}} & -\frac{\mu_x}{E_{II}} & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Elastické konstanty  $E_x$ ,  $E_z$ ,  $\nu_x$ ,  $\nu_z$ ,  $G_{xz}$ ,  $\mu_x$ ,  $\mu_z$ , vztahující se k libovolným osám  $x$ ,  $z$ , lze vyjádřit pomocí čtyř nezávislých základních veličin  $E_{||}$ ,  $E_{\perp}$ ,  $G_{\perp||}$  a  $\nu_{||}$ .

## 2.4 Konstituční rovnice anizotropních materiálů

Mechanické vlastnosti jednosměrně vyztuženého plastu jsou ve směru vláken dány v podstatě pouze vlastnosti vláken. V příčném směru jsou rozhodující vlastnosti plastové matrice. V praktických aplikacích by tak byly vlastnosti v příčném směru neostatečné. Jsou proto lamináty tvořeny z více jednosměrných vrstev s navzájem různou orientací a navzájem spojených tak, aby vytvářely integrální konstrukční prvek s požadovanými vlastnostmi v jednotlivých směrech. Analýzu mechanického chování plošného laminátového prvku založíme na předpokladech analogických k předpokladům pro vrstevnaté izotropní desky. Uvažovány jsou opět pouze složky deformace v rovinách rovnoběžných se střední plochou, (Obr. 21).



Obr. 21. Složky deformace

Závislosti složek deformace na pořadnici ve směru normály ke střední ploše budou za předpokladu platnosti Kirchhoffovy-Loveovy hypotézy dány lineárními vztahy, takže lze položit:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_z^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{bmatrix} + y \begin{bmatrix} k_x \\ k_z \\ k_{xz} \end{bmatrix} \quad (20)$$

ve zkrácené formě pak

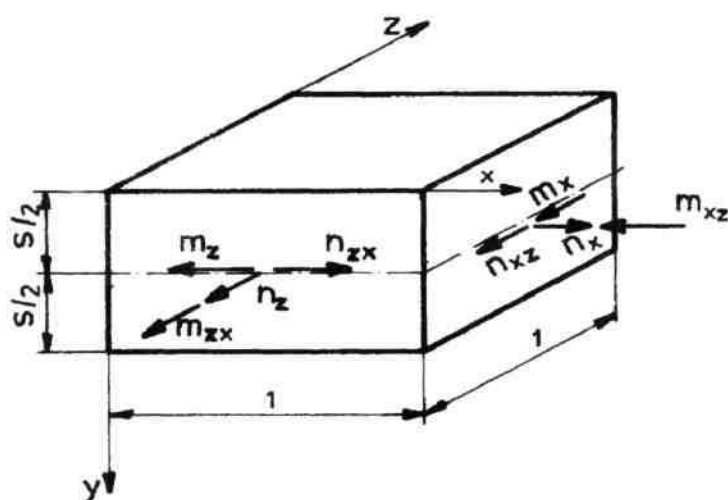
$$[\varepsilon] = [\varepsilon]^0 + y[k] \quad (21)$$

kde  $[\varepsilon]^0$  jsou deformace ve střední ploše. Analogicky k rovnici  $\varepsilon_i^0(y) = \frac{1}{r_i} y$ ;  $i = x, z$  představují konstanty  $[k]$  křivosti střední plochy po deformaci. Složky napětí jsou pak

$$[\sigma] = [S] \cdot [\varepsilon] = [S] \cdot [\varepsilon]^0 + y \cdot [S] \cdot [k] \quad (22)$$

kde  $[S]$  je matice tuhosti v dané rovině.

Ekvivalentní systém sil a momentů vztažených ke střední ploše laminátu je znázorněn na (Obr. 22).



Obr. 22. Ekvivalentní systém sil a momentů

Rovnice rovnováhy jsou dány vztahy analogickými k  $\int_{(s)} \sigma_i^M(y) dy = n_i$ ;  $i = x, z$  a

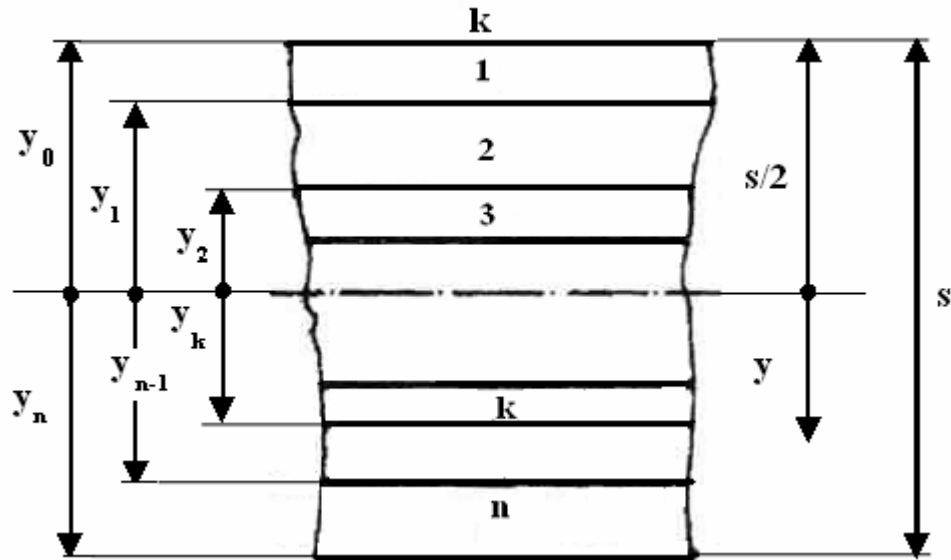
$$\int_{(s)} \sigma_i^0(y) dy = m_i; \quad i = x, z$$

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_z \\ n_{xz} \end{bmatrix} = \int_{(s)} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} dy \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_z \\ m_{xz} \end{bmatrix} = \int_{(s)} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} y dy \quad (24)$$



Laminát je obecně složen z  $n$  ortotropních vrstev s různou orientací a různou tloušťkou. Uvnitř každé vrstvy  $k$  jsou mechanické vlastnosti dané maticí tuhosti  $[S]_k$  neproměnné.



Obr. 23. Označení vrstev

S označením znázorněným na (Obr.23) lze rovnice (23) a (24) psát ve tvaru

$$[n] = \sum_{k=1}^n \int_{y_{k-1}}^{y_k} [\sigma] dy \quad (25)$$

$$[m] = \sum_{k=1}^n \int_{y_{k-1}}^{y_k} [\sigma] y dy \quad (26)$$

Dosazením za sloupce napětí  $[\sigma]$  podle rovnice (22) do rovnic rovnováhy (23), (24) bude dále

$$[n] = \sum_{k=1}^n \left( [S]_k \int_{y_{k-1}}^y dy [\varepsilon] + [S] \int_{y_{k-1}}^y y dy [k] \right) \quad (27)$$

$$[m] = \sum_{k=1}^n \left( [S]_k \int_{y_{k-1}}^y y dy [\varepsilon] + [S] \int_{y_{k-1}}^y y^2 dy [k] \right) \quad (28)$$

po integraci pak

$$[n] = [A] \cdot [\varepsilon]^0 + [B] \cdot [k], \quad [m] = [B] \cdot [\varepsilon]^0 + [D] \cdot [k] \quad (29)$$

s označením

$$\begin{aligned}
 A &= \sum_{k=1}^n [S]_k (y_k - y_{k-1}) && \text{matice membránové tuhosti} \\
 B &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [S]_k (y_k^2 - y_{k-1}^2) && \text{matice vazebné tuhosti} \\
 D &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [S]_k (y_k^3 - y_{k-1}^3) && \text{matice ohybové tuhosti}
 \end{aligned} \tag{30}$$

Vztahy (29) vyjadřují závislosti složek vnitřních sil a momentů v průřezech laminátů na jeho deformačním stavu. Matice tahové pevnosti [A] váže složky sil deformacemi střední roviny. Matice ohybové tuhosti [D] váže spolu složky momentů a křivosti střední plochy. V ortotropní vrstvě s obecnou orientací je smykové napětí vázáno na normálové složky deformace, normálová napětí na smykové složky deformace. Proto u laminátu s obecnou skladbou vyvolává účinek např. normálových sil mimo normálové deformace střední roviny i smykovou deformaci. Existence matice vazebné tuhosti [B] v konstitučních rovnicích (29) pak způsobuje mechanickou vazbu mezi ohybem a tahem laminátové plošné konstrukce. Síly ve střední rovině proto obecně způsobují kromě deformací střední roviny i její průhyb a zkroucení, tedy její zakřivení. Podobně ohybové a kroutící momenty způsobují kromě zakřivení i normálové a smykové deformace střední plochy. Tento tzv. „coupling effect“ byl i experimentálně potvrzen. Podle (29) je např. pro dvouosý tah v ose x a z

$$\begin{aligned}
 n_x &= A_{11}\varepsilon_x^0 + A_{12}\varepsilon_z^0 + A_{13}\gamma_{xz}^0 + B_{11}k_x + B_{12}k_z + B_{13}k_{xz} \\
 n_z &= A_{21}\varepsilon_x^0 + A_{22}\varepsilon_z^0 + A_{23}\gamma_{xz}^0 + B_{21}k_x + B_{22}k_z + B_{23}k_{xz}
 \end{aligned}$$

Pokud [B] = 0, A<sub>13</sub> = 0, A<sub>23</sub> = 0, je

$$n_x = A_{11}\varepsilon_x^0 + A_{12}\varepsilon_z^0; n_z = A_{21}\varepsilon_x^0 + A_{22}\varepsilon_z^0$$

tj. laminátový prvek se chová jako ortotropní.

## 2.5 Typy laminátových struktur

Vzájemná vazba mezi tahovými a ohybovými efekty, představována maticí [B], nevyplývá jen z ortotropie či anizotropie jednotlivých vrstev, ale je spíše důsledkem způsobu vrstvení laminátu. Matice [B] je identicky rovna nule pro lamináty, v jejichž struktuře existuje ke každé vrstvě nad střední plochou identická vrstva umístěná ve stejné vzdálenosti pod střední plochou. Lamináty vyráběné vrstvením lamin symetricky ke střední ploše jsou označo-

vány jako symetrické. Představují nejčastěji vyráběný typ laminátu. Jejich výhodou je eliminace tahově ohybové vazby a tím odstranění nežádoucího borcení plochy laminátu při zatížení v jeho rovině, případně při teplotních změnách.

Kromě podmínky  $[B] = 0$  je pro ortotropní chování laminátového prvku při zatížení silami v jeho rovině nutno splnit, aby  $A_{13} = 0$ ,  $A_{23} = 0$ . Příspěvek  $k$ -té vrstvy-laminy k prvku matice  $[A]$  je dán součinitelem odpovídajícího prvku matice  $[S]_k$  a tloušťky vrstvy. Příspěvek jedné vrstvy tak lze eliminovat příspěvkem jiné vrstvy stejné tloušťky, když její odpovídající prvek  $S'_{ij}$  má opačné znaménko. Z rovnic (18) vyplývá, že  $S'_{11}$ ,  $S'_{22}$ ,  $S'_{12}$ ,  $S'_{33}$  jsou vždy kladné, takže  $A_{11}$ ,  $A_{22}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{33}$  nemohou být rovny nule.  $S'_{13}$  a  $S'_{23}$  jsou však nulové  $\varphi = 0^\circ$  a  $90^\circ$  a mohou nabývat kladných nebo záporných hodnot pro kladnou nebo zápornou orientaci  $\pm\varphi$ . Podmínka  $A_{13} = 0$ ,  $A_{23} = 0$  je tak splněna, pokud pro každou vrstvu orientovanou pod úhlem  $+\varphi$  existuje vrstva stejné tloušťky a ortotropie orientované pod úhlem  $-\varphi$ . Vzájemné polohy obou vrstev jsou libovolné. Tak lze navrhnout symetrický ( $[B] = 0$ ) a zároveň ortotropní laminát (vzhledem k silám v jeho střední rovině).

Laminát, jenž má izotropní matici tahové tuhosti  $[A]$  se nazývá kvaziizotropní. Lze jej vyrobit za těchto podmínek:

Celkový počet lamin je nejméně 3.

Jednotlivé laminy musí mít identické matice tuhosti  $[S]$  a tloušťky.

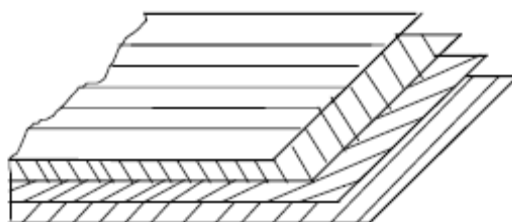
Sousední laminy musí být navzájem orientovány pod stejnými úhly.

Kvaziizotropním se takový systém nazývá proto, že vykazuje izotropii pouze vzhledem k matici  $[A]$ , obecně však již ne k maticím  $[B]$ ,  $[D]$ .

Prvky  $D_{13}$ ,  $D_{23}$  matice ohybové tuhosti  $[D]$  jsou nulové, jsou-li všechny vrstvy orientovány pouze pod úhly  $0^\circ$  nebo  $90^\circ$ , nebo jestliže ke každé vrstvě orientované pod úhlem  $+\varphi$  v určité vzdálenosti nad střední rovinou existuje identická vrstva umístěná ve stejné vzdálenosti pod střední rovinou, orientovaná pod úhlem  $-\varphi$ . Prvky  $D_{13}$ ,  $D_{23}$  tedy nejsou nulové pro lamináty symetrické, s výjimkou těch, jejichž vrstvy jsou orientovány pouze pod úhly  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Je-li však laminát vyroben střídavým vrstvením většího počtu lamin s orientací  $\pm\varphi$ , nabývají prvky  $D_{13}$ ,  $D_{23}$  pouze malých hodnot [12].

## 2.6 Zápis (kódování) orientace laminátů

Pro dosažení dobrých vlastností laminátu, vyrobeného z vrstev s jednosměrně orientovanými vlákny, je nutno jednosměrné vrstvy při kladení různě orientovat. Orientaci vrstev zapisujeme kódem, v němž úhel pootočení vláken vůči zvolenému hlavnímu směru laminátu je označen příslušným znaménkem a číslem udávajícím počet stupňů úhlu. Většinou jsou vyráběny lamináty symetrické vůči střední rovině. Na následujícím obrázku je ale schéma nesymetrického čtyřvrstvého laminátu, jehož kód lze zapsat jako  $[0 / +\alpha / -\alpha / 90]$ .



Obr. 24. Schéma nesymetrického čtyřvrstvého laminátu

Jestliže na spodní straně uvedeného laminátu pokračujeme vrstvením  $[90 / -\alpha / +\alpha / 0]$ , dostaneme osmivrstvý laminát symetrický kolem střední roviny. V případě lichého počtu vrstev bude laminát symetrický kolem střední vrstvy. Symetrii zapisujeme indexem  $s$ .

V případě, že by se ve stěně laminátu tato skladba  $n$  krát opakovala, zapíšeme

$$[(0 / \pm\alpha / 90)_n]_s.$$

Pro  $n$ -kráte se opakující vrstvu, např. vrstvu  $0^\circ$ , je používáno zápisu

$$[0_n / \pm 45 / 90]_s$$

Je-li počet vrstev lichý, zapíše se nad úhel střední vrstvy čárka:

$$[0_2 / \pm 45 / \overline{90}]_s$$

Příklady kódů skladby:

Symetrické lamináty:

$$[0 / +45 / 90 / 90 / +45 / 0]$$

kód  $[0 / 45 / 90]_s$

$$[0 / +45 / 90 / +45 / 0]$$

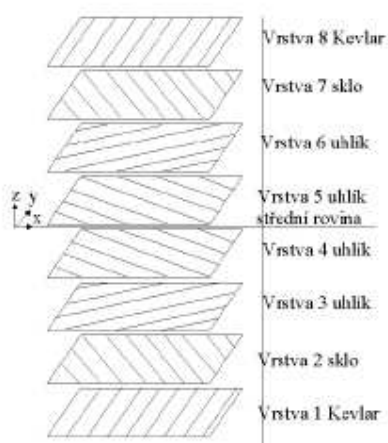
kód  $[0 / 45 / 90]_s$

Příklad antisymetrického laminátu:

$$[\alpha / -\alpha / \alpha / -\alpha]$$

Téměř dokonalou izotropii ve své rovině mají tzv. **kvazi-izotropní lamináty** (téměř izotropní)  $[60/0/-60]$  nebo  $[45/0/-45/90]$ . Nejčastější je symetrický kvazi-izotropní laminát  $[0/\pm 45/90]_S$ .

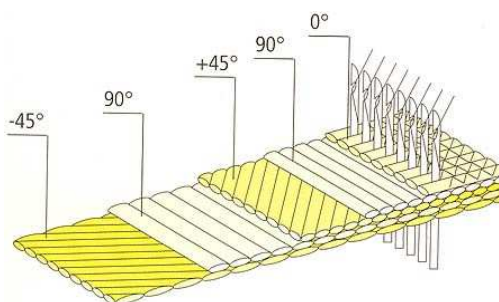
Pokud jde o hybridní laminát, v němž se střídají vrstvy s různými vlákny, je k úhlu vrstvy možno připsat dolní index označující materiál vláken (K - Kevlar, G - sklo, B - bór nebo C - uhlík). Příklad symetrického hybridního laminátu je na následujícím obrázku (Obr. 25).



Obr. 25. Schéma symetrického hybridního laminátu

Kód tohoto laminátu je  $[90_K/-45_G/\pm 30_C]_S$  (aramidová (K), skleněná (G) a uhlík. vlákna (C))

Obecná nesymetrická skladba laminátu, např.  $[0/0/0/90/90/90]$  nebo  $[0/\alpha/-\alpha/90]$  se vyznačuje torzní deformací (zkroucením) při jednoosém tahu. Nesymetrická skladba je využívána například u listů vrtulí větrných elektráren. Při nesymetrické skladbě laminátu se při zvýšení odstředivé síly (silnější vítr) profil listu zkroučí tak, že otáčky nestoupnou nad kritickou mez, při kterých by se listy porušily odstředivou silou (pasivní kontrola) [13].



Obr. 26. Schéma laminátu

### 3 BIMODULARITA

Bimodulární materiály vykazují výrazně odlišné hodnoty modulu pružnosti v tahu a tlaku.

#### 3.1 Úvod

Bimodulární chování různých materiálů bylo známo a zdokumentováno již v minulosti. Již v 1963 Clark ukázal, že několik směsí - kompozitů složených z pryže a následujících materiálů - umělého hedvábí, ocelového drátu nebo nylonového vlákna - vykazovaly významně odlišné moduly v tlaku a tahu. Podobně Patel (1976) shledal v kompozitech složených z pryže s polyesterovými či aramidovými vlákny významné bimodulární chování (poměr  $E_t/E_d = 59$  pro kompozit vlákna polyesteru a pryže a poměr  $E_t/E_d = 294$  pro kompozit vlákna aramidu a pryže); kompozit ocelových vláken a pryže nevykazoval účinek (bimodularity) ve významném rozsahu.

I u další materiálů byla prokázána bimodularita. Patří sem: kompozity z aramidu (Zweben, 1978; Piggott and Harris, 1980), uhlíkové kompozity (Jones and Nelson, 1976), porézní nerezová ocel (Ducheyne et al., 1978), skleněná vlákna v epoxidové pryskyřici - matrici (Davis and Zurkowski), bórová vlákna v epoxidové pryskyřici - matrici (Air Force Materials Lab, 1971), uhlíková vlákna v uhlíkové matrici (Kratsch et al., 1972), granulovaný ZTA uhlík (Seldin, 1966) a granulovaný ATJ-S uhlík (Starrett a Pears, 1973). Poměr  $E_t/E_d$  pro tyto materiály je v rozsahu od 1,2 do téměř 300 - viz tabulka (Tab. 5.) - data do Zweben (1978), Jones (1977) a Bert (1979) [20].

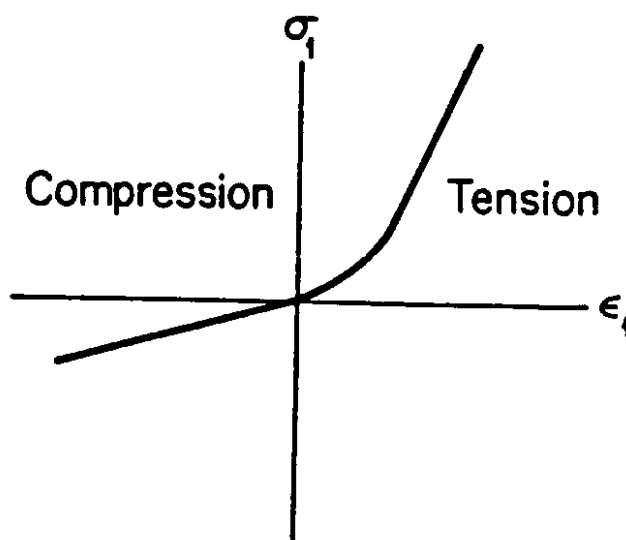
Tab. 5. Poměr  $E_t/E_d$  pro různé materiály

Materiál	poměr $E_t/E_d$
aramid/polyester	1,15
sklo/epoxid	1,25
bór/epoxid	0,8
uhlík/epoxid	1,4
tkanina/pryž	2,6
různé tkaniny/pryž	2-14
vlákna polyesteru/pryž	59
vlákna aramid/pryž	294
vlákna umělého hedvábí/pryž	278

### 3.2 Mechanismy pro bimodulární chování

Ačkoli jev bimodularity byl pozorovaný pro řadu materiálů (většinou vláknité), existuje jen málo teorií jak vysvětlit proč nějaké materiály jsou bimodulární. Zdá se, že mechanismy zodpovědné za bimodularitu nejsou dobře vysvětleny. Bert (1979) uvádí, že všechny mechanické modely pro vláknité kompozity mohou být rozděleny do dvou tříd: "*mean fiber angle*" model a "*tie-bar/column on elastic foundation*" model.

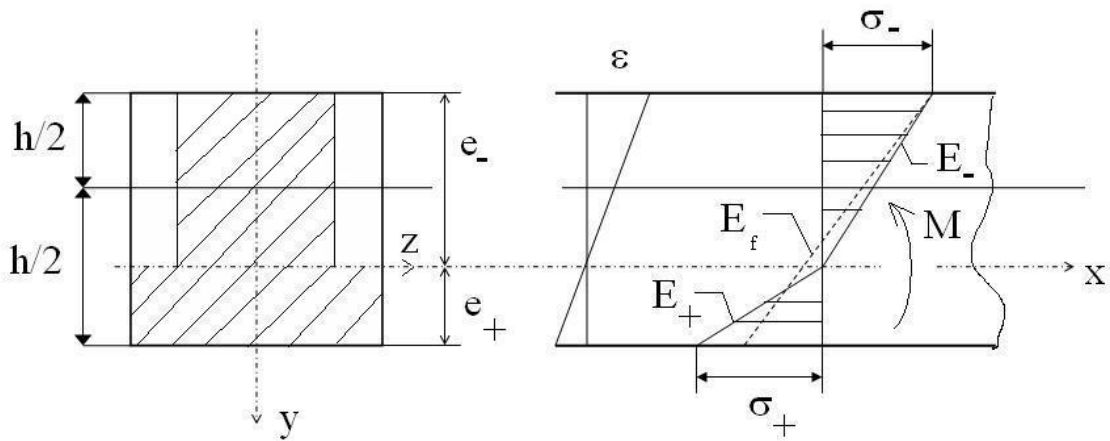
Tyto modely vysvětlují bimodulární chování předpokladem, že vláknitá vyztuž má již nějaké počáteční zakřivení. Toto zakřivení mizí v tahu, ale pod napětím v tlaku vrůstá. Následkem toho tahové moduly vykazují větší hodnoty než moduly v tlaku. Bylo prokázáno, že i malý stupeň zakřivení má za následek významné rozdíly mezi tahovými a tlakovými moduly (Herrmann et al., 1967). Modely předpokládají, že materiál matrice je relativně flexibilnější ve srovnání s materiálem vláknem. Některé materiály, jako aramidová vlákna, mohou být bimodulární kvůli jejich chemické struktuře (molecular conformation) [20].



Obr. 27. Typická bimodulární odezva pro jednosměrně vyztuženou laminu [21]

### 3.3 Modul pružnosti v ohybu bimodulárního materiálu

Vzorek pro ohybovou zkoušku má průřez obdélníkového tvaru (Obr. 28.). Z podmínky nulového součtu osových sil v průřezu je poloha neutrální osy



Obr. 28. Princip bimodulárního ohybu

$$\frac{e_+}{e_-} = \eta \quad (31)$$

s označením

$$\eta^2 = \frac{E_-}{E_+} \quad (32)$$

poněvadž  $e_+ + e_- = h$ , je

$$e_- = \frac{h}{1+\eta} \quad e_+ = \frac{\eta h}{1+\eta} \quad (33)$$

pak tuhost v ohybu je

$$K_f = \frac{b}{3} (E_+ e_+^3 + E_- e_-^3) = E_- b e_-^3 (1+\eta) / 3 \quad (34)$$

Vztah pro *modul pružnosti v ohybu* vyplývá z porovnání výrazů pro ohybovou tuhost homogenního průřezu s výrazem (34):

$$E_f b h^2 = E_- b e_-^3 (1+\eta) / 3 \quad (35)$$

odtud je po úpravě

$$\frac{E_f}{E_+} = \left( \frac{2\eta}{1+\eta} \right)^2 \quad (36)$$



## 4 ZKOUŠENÍ VÝROBKŮ Z LAMINÁTŮ

### 4.1 Úvod

Je velmi obtížné stanovit směrnice pro porovnání fyzikálních, chemických a elektrických vlastností laminátu. Příčinou toho je rada činitelů, majících vliv na výsledné hodnoty. Ani tehdy, použije-li se pro přípravu zkušebních tělísek stejné tkaniny a pryskyřice, nemusí být výsledné hodnoty stejné. U každého materiálu se vyskytují určité odchylky proti standardu, ale u laminátu mohou být mezní hodnoty tak odlišné jako u žádného jiného materiálu. Tak velký rozptyl je způsoben nejen tím, že jde o složený materiál, nýbrž i tím, za jakých podmínek bylo laminováno, jaký byl stupeň vytvrzení ve vztahu k pomocným látkám, použitá technologie, svědomitost práce a v neposlední řadě i příprava zkušebních tělísek a jejich opracování.

Abychom nalezené hodnoty vůbec mohli porovnávat, musíme tělíška vyrábět laboratorně, za podmínek vždy stejných a předem určených tak, aby reprodukce v kterýkoliv čas byla zaručena. A přesto i při nejpečlivější práci může dojít k odchylkám, které jsou dány výrobními tolerancemi základních i pomocných složek, vlivem nedostatečného uzavření formy na vytlačení části pryskyřice apod.

Mluví-li se o fyzikálních, chemických a elektrických hodnotách laminátu, je třeba vždy přesně určit, o jaký druh materiálu jde. Je nutné stanovit přesnou specifikaci a podmínky, za nichž byl laminát vyroben, a teplotu a relativní vlhkost, za které byly zkoušky konány. Nelze také hovořit o vlastnostech laminátu obecně, poněvadž jsou jiné u laminátu z textilu a jiné z rohože nebo sekané stříže. Jiné budou také při beztlakovém vrstvení za pokojové teploty a jiné za tlaku a teploty kolem 100°C.

Je proto každá tabulka hodnot dosud pouze informační a relativní a nemůže se jí používat k přesnějšímu absolutnímu srovnávání [10].

### 4.2 Mechanické zkoušky laminátů

Kompozitní materiály vykazují větší rozptyl vlastností než konvenční materiály. Statistická analýza je proto nezbytnou součástí hodnocení vlastností.

Minimální počet zkoušek: 5 pro jedny zkušební podmínky (teplota, vlhkost) a určuje se pevnost v tahu a tlaku ve směru vláken, pevnost kolmo k vláknům v tahu a tlaku a pevnost ve smyku.

Pevnost kompozitu je funkcí pravděpodobnosti výskytu nebezpečného defektu tzv. **velikostní faktor**. Velké vzorky mají menší střední pevnost než vzorky malé.

Pro požadovanou přesnost  $\Delta$  (polovina konfidenčního intervalu (meze spolehlivosti, rovno údaji psanému za průměrem jako  $\pm$ )) je nutný počet měření dán rovnicí

$$n = u_p^2 \frac{s^2}{\Delta^2} \quad (37)$$

kde  $s$  je směrodatná odchylka hlavního souboru. Jelikož směrodatnou odchylku hlavního souboru  $s$  neznáme, použijeme odhad směrodatné chyby z  $n$  měření

$$s_o^2 = s^2 \frac{n}{n-1} \quad (38)$$

kde  $s_o$  je výběrová směrodatná odchylka.

Pro spolehlivost 95 % je konstanta  $u_p = 1,96$  (jen 5 % výsledků leží mimo interval spolehlivosti), pro spolehlivost 99 % je  $u_p = 2,58$ .

Potřebný minimální počet vzorků  $n_{min}$  je potom dán rovnicí:

$$n_{min} = u_p^2 \frac{s_o^2}{\Delta^2} \quad (39)$$

### 4.3 Tahová zkouška

Statická zkouška jednosměrným (osovým) tahem je pravděpodobně nejjednodušší a nejobvyklejší mechanická zkouška. Tato zkouška se používá k určení modulu pružnosti, pevnosti v tahu a Poissonova čísla materiálu. V případě kompozitních materiálu je tahová zkouška obvykle prováděna na plochých vzorcích.

Údaje zaznamenávané při tahové zkoušce se skládají z měření působícího zatížení a z měření přetvoření jak ve směru, tak kolmo k zatížení. Z těchto údajů, snímaných až do porušení, může být lehce vynesena křivka napětí – přetvoření, tzv. pracovní diagram materiálu a určeny žádané materiálové vlastnosti [14].

### 4.3.1 Mechanismus porušování laminátu při tahové zkoušce

Při současném výskytu vrstev různých orientací (tj. i vrstev s vlákny skloněnými pod úhlem  $\alpha$  vůči ose tahu) dochází v průběhu tahové zkoušky k tomuto sledu poškozování laminátu:

- 1) vzniku příčných trhlin ve vrstvách  $90^\circ$
- 2) vzniku smykových trhlin matrice a porušování rozhraní vlákno/matrice ve vrstvách s úhlem  $\alpha$
- 3) přetržení vláken ve vrstvách  $0^\circ$  a lom laminátu.

Viditelný zlom na křivce síla-prodloužení způsobí až porušení vrstev  $\pm \alpha$ .

Jestliže se během tahové zkoušky laminát nejdříve poruší delaminací vrstev, svědčí to o nezvládnuté technologii nebo o použití starých polotovarů (zestárlé, tj. prošlé prepregy) [13].

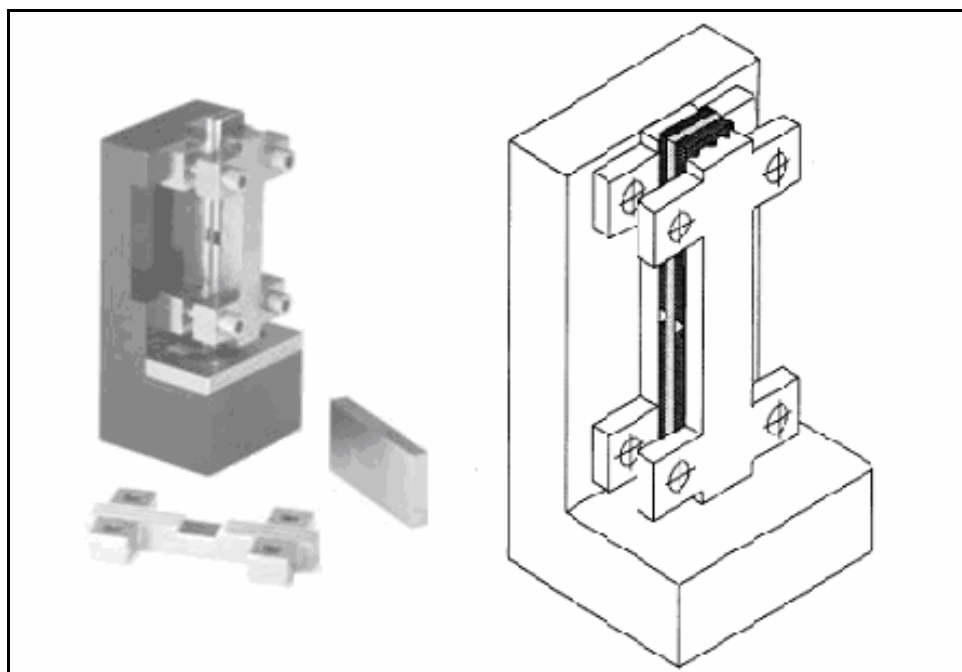
## 4.4 Tlaková zkouška

Statické zkoušky jednosměrným (osovým) tlakem jsou podobné tahovým zkouškám, avšak vzniká při nich daleko více problémů. Největší problém je nezbytnost zabránit geometrickému vybočení vzorků. Tento požadavek je zvláště důležitý u tenkých plochých vzorků a jeho splnění je obvykle zajištěno provedením řady bočních podpěr, které zabraňují vzorku vybočit ze své roviny. Použití bočních podpěr lze vyloučit užitím vzorků ve tvaru bloku ty lze připravit mnohem obtížněji [14].

Při působení tlaku na jednosměrně vyztuženou vrstvu ve směru os vláken dochází k poruše ztrátou stability vláken (vzpěr). Hodnota pevnosti je značně citlivá na zvlnění vláken a na úroveň mezifázové soudržnosti. Při malé soudržnosti vláken a matrice dochází k rozvrstvení vzorku a je dosahována nízká pevnost v tlaku, zatímco při dobré soudržnosti dojde k ztrátě stability koordinovaným vybočením vláken, umožněným smykovou deformací matrice.

Největší pevnost v tlaku mají kompozity s vysoce tuhými vlákny o velkých průměrech, tj. vlákny bóru nebo SiC vyrobených depozicí par na vláknový substrát (CVD metoda).

Přípravek pro tlakovou zkoušku dle ASTM (American Society for Testing Materials) D-695 je ukázán na následujícím obrázku [13].



Obr. 29. Přípravek pro tlakovou zkoušku

#### 4.5 Mezilaminární smyková napětí

Tato smyková napětí mají vliv na výsledky ohybových zkoušek. Proto se jimi budu krátce zabývat a uvedu zde základní informace. Problematiky je podrobně popsána v knize [14] v kapitole 6.

Obecné poznatky o mezilaminárním napětí:

1. Mezilaminární smykové napětí u volného okraje laminátu je velmi vysoké. Pod volnými okraji rozumíme volné plochy stěn laminátu, výřezu, otvorů, atd.
2. Mezilaminární normálová složka napětí má poblíž volného okraje velmi strmý gradient. Její tahová hodnota může vyvolávat dělení laminátu na vrstvy (delaminaci), a tím urychlit lomový proces.
3. Sled vrstvení laminátu ovlivňuje velikost i povahu mezilaminárních napětí. Může se tedy objevit rozdíl statické pevnosti a meze únavy v případě, když změníme pořadí vrstvení, a to i tehdy, kdy se orientace jednotlivých vrstev nemění.
4. Na mezilaminární napětí můžeme pohlížet jako na čistě lokální jev, neboť jejich působení je omezeno na úzkou oblast okrajů. Odhad napětí podle teorie laminátu je přesný ve vzdálenějších polohách.

Ohybová zkouška pro určení tuhosti laminátu v ohybu (modulu pružnosti v ohybu) a pevnosti v ohybu vyžaduje dostatečně velký poměr vzdálenosti podpor právě proto, aby byl snížen účinek smykového napětí, kterým působí na nosník podpory a zatěžovací trn. Zmenšuje-li se vzdálenost podpor, rostou smykové složky napětí od posouvající síly. Při poměru vzdálenosti podpor ke tloušťce laminátu 5 : 1 je smykové napětí již tak velké, že laminát se porušuje delaminací, tj. dojde k poruše vzájemného spojení vrstev.

#### 4.6 Ohybová zkouška

Nejběžnější ohybové zkoušky jsou tříbodová a čtyřbodová zkouška. Při těchto zkouškách se plochý vzorek podepře na dvou koncích a zatíží buď středovým břemenem (tříbodová zkouška) nebo dvěma symetricky umístěnými břemeny (čtyřbodová zkouška). Středové břemeno při tříbodovém ohybu vyvolá ohybový moment v nosníku, který se mění lineárně od nuly u podpor k maximální hodnotě uprostřed. Současně je vyvoláno rovnoměrně rozdělené interlaminární smykové napětí po celé délce vzorku. To může způsobit předčasné porušení vlivem nízké interlaminární smykové pevnosti kompozitů. Dvě symetrická břemena při čtyřbodovém ohybu vyvolají ohybové momenty lineárně rostoucí od nuly na podpoře k maximální hodnotě pod břemenem. Ohybový moment mezi břemeny zůstává konstantní. V tomto případě nevzniká žádné smykové napětí mezi břemeny a tato část nosníku je tedy namáhána čistým ohybem. Interlaminární napětí jsou vyvolána pouze ve vnějších částech rozpětí, tj. mezi břemeny a podporami. Z hlediska stavu napětí je proto čtyřbodová ohybová zkouška vhodnější, kdežto tříbodová ohybová zkouška je snáze proveditelná.

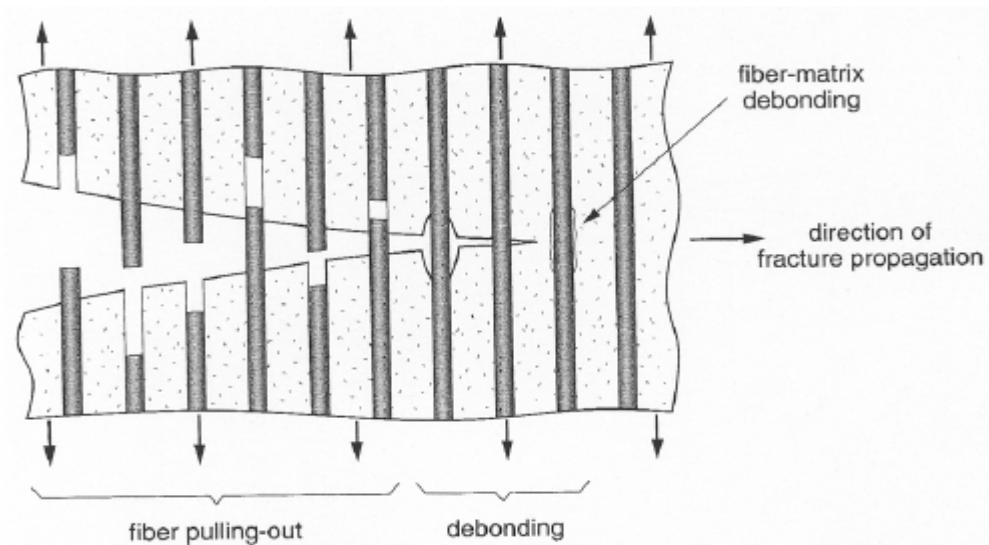
Určení správné hodnoty pevnosti v ohybu vyžaduje, aby porušení nastalo přetržením vláken, a nikoliv interlaminárním smykem. To je zajištěno při velkém poměru rozpětí k výšce vzorku a lze to určit nalezením interlaminárního smykového namáhání nosníku.

Rozpětí nosníku tedy neovlivňuje interlaminární smyk, zatímco větší rozpětí vede k vyššímu ohybovému momentu, a tím k větší tendenci podélného porušení. Větší poměr rozpětí k výšce však vede k větším průhybům, které naopak vyvolávají potřebu uvažovat při výpočtu ohybového momentu horizontální síly vzniklé na podporách.

Poměr vzdálenosti podpor ku tloušťce tělesa by měl být minimálně 16:1, aby smykové zatížení bylo malé. Normy ASTM doporučují poměry 16:1, 32:1, 40:1 a 60:1 [14].

#### 4.7 Způsoby porušení laminátů

Lze předpokládat, že porušení ve vláknitých kompozitech vzniká, stejně jako v kovech, z malých vrozených defektů v materiálu. Tyto defekty mohou být zlomená vlákna, chyby v matrici a uvolněný styk fází. K popsání procesu porušování během rozvoje trhliny, lze použít jednoduchý model trhliny ve vláknitém kompozitu na (Obr. 30). Model ukazuje některé možné “poškozovací” procesy nastávající během porušování vláknitého kompozitu. V jisté vzdálenosti před trhlinou jsou vlákna neporušena. V oblasti vysokého napětí blízko vrcholu trhliny jsou přetržena, nikoli však nezbytně v rovině trhliny. Bezprostředně za vrcholem trhliny se vlákna vytažují z matrice. Když jsou křehká vlákna dobře spojena s tažnou matricí, mají vlákna tendenci se přetrhnout před vrcholem trhliny, takže vzniknou můstky z materiálu matrice, které se zužují, až se poruší tvárným způsobem. K těmto místním mechanismům poškozování přistupuje navíc, jakmile trhlina dosáhne styku dvou vrstev v laminovaném kompozitu, rozštěpení a jeho šíření podél styku, tedy vznik delaminační trhliny [14].



Obr. 30. Model vrcholu trhliny ve vláknitém kompozitu, ukazující různé mechanismy poškozování

## 5 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Zde jsou vysvětleny základní pojmy a jejich matematické vztahy, které se v praxi užívají a které uvádí [15].

*Aritmetický průměr* -  $\bar{x}$  z  $n$  jednotlivých výsledků měření  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) je suma výsledků měření dělená jejich počtem  $n$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (40)$$

– vyjadřuje v jistém smyslu nejtypičtější hodnotu statistického souboru, tzv. těžiště dat.

Odchylka  $i$ -tého měření od aritmetického průměru je:

$$\Delta_i = \bar{x} - x_i \quad (41)$$

Vztah pro určení střední kvadratické chyby kteréhokoliv měření z celkového počtu  $n$ , vyjadřuje *směrodatnou odchylku* –  $s$ , je

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}} \quad (42)$$

– směrodatná odchylka vyjadřuje, jak se hodnoty liší od průměrné hodnoty (střední hodnota).

*Střední kvadratická chyba aritmetického průměru* je daná vztahem:

$$s = \sqrt{\frac{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (43)$$

Uvedená chyba vymezuje interval  $\langle x - s; x + s \rangle$ , v němž se s jistou pravděpodobností nachází správná hodnota měřené veličiny. Tato chyba má rozměr měřené veličiny a nazývá se *absolutní chyba*.

*Variační koeficient (výběrový)*- $v$  je absolutní chyba vztažená na hodnotu aritmetického průměru:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (44)$$

Variační koeficient je bezrozměrný. Jeho hodnota násobená číslem 100 vyjadřuje *relativní chybu* v %.

## **6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Cílem práce je připravit zkoušky v ohybu, tahu a tlaku vzorků laminátových stěn dané struktury a vyšetřit jejich mechanické charakteristiky.

Navrhnout strukturní model mechanického chování laminátové struktury a prokázat možnou aplikaci teorie bimodulárního ohybu pro laminátovou stěnu analytickým výpočtem a následným porovnáním s naměřenými daty.



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 7 ZAŘÍZENÍ A VZORKY PRO EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY

Na mechanické zkoušky byly použity vzorky dvou laminátových struktur: **S-4 a S-8** různých délek a směru kladení (T, L) ze společnosti **A.A.R. plast s.r.o.**

Zkušební vzorky byly dodány již ve formě zkušebních tělísek ve formě tyčinek obdélníkového průřezu a nebylo třeba vzorky připravovat.

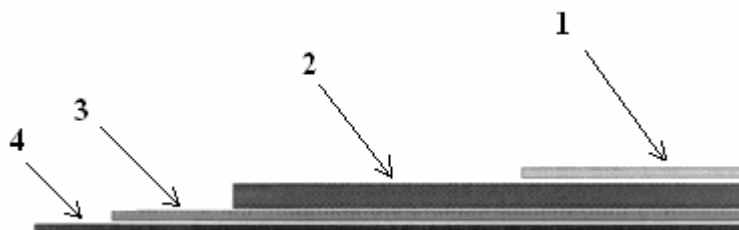
Ohybové, tlakové a tahové zkoušky byly provedeny na zkušebním univerzálním zkušebním stroji ZWICK 145 665.

Tab. 6. Soupis vzorků k dispozici s jejich rozměry

struktura S-4					
č.	struktura	délka	směr kladení	n	
1.	S-4	150 mm	podélný - L	67	
2.	S-4	150 mm	příčný - T	76	
3.	S-4	250 mm	podélný - L	74	
4.	S-4	250 mm	příčný - T	79	

struktura S-8					
č.	struktura	délka	směr kladení	n	
1.	S-8	150 mm	podélný - L	65	
2.	S-8	150 mm	příčný - T	74	
3.	S-8	250 mm	podélný - L	71	
4.	S-8	250 mm	příčný - T	81	

### 7.1 Struktura laminátových stěn

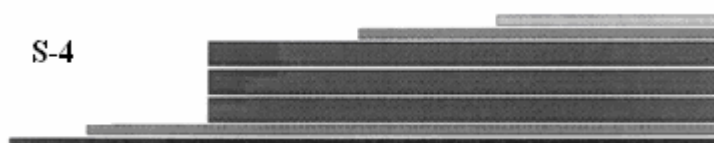


Obr. 31. Struktura laminátu

Tab. 7. Legenda struktury

1	TOPCOAT
2	COMBI 800/450 tkanina
3	ROHOŽ 450
4	GELCOAT

## 7.1.1 Struktura S-4

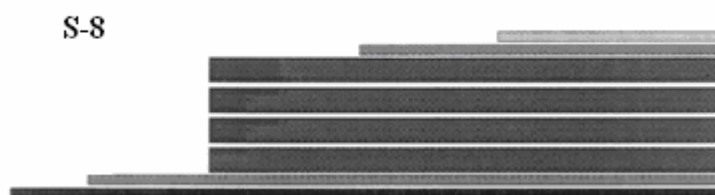


Obr. 32. Struktura laminátu S-4

Tab. 8. Složení struktur S-4

Struktura	Gelcoat	Topcoat	Pryskyřice	Rohož gramáž / vrstvy	Tkanina gramáž / vrstvy
S-4	Crystic 93 PA Grey 6057	Crystic 2000 Orange AC	Aropol K- 530 TB	2 x 450 g/m <sup>2</sup>	3 x 800/450 g/m <sup>2</sup>

## 7.1.2 Struktura S-8



Obr. 33. Struktura laminátu S-8

Tab. 9. Složení struktur S-8

Struktura	Gelcoat	Topcoat	Pryskyřice	Rohož gramáž / vrstvy	Tkanina gramáž / vrstvy
S-8	Maxguard RAL 7030	Aropol K- 530 TB	Aropol K- 530 TB	2 x 450 g/m <sup>2</sup>	4 x 800/450 g/m <sup>2</sup>

## 7.2 Použité přístroje a zařízení

Při stanovení mechanických vlastností vzorků byly použity tyto přístroje:

- Zkušební stroj: Zwick 145 665 připojený k PC s přídatnou teplotní komorou
- Software: testXpert V7.11
- Extenzometr připojený ke zkušebnímu stroji
- Posuvné digitální měřidlo Mitutoyo.



Obr. 34. Zwick 145 655





Obr. 35. Zwick 145 655 s teplotní komorou



Obr. 36. Přídavná nádoba ke zkušebnímu stroji

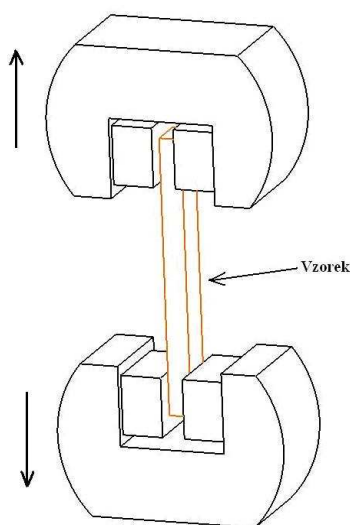
## 8 ZKOUŠKA TAHEM

Tahová zkouška byla provedena na zkušebním zařízení Zwick 145 665 ovládaném pomocí počítače. Hodnoty pro tahovou zkoušku byly stanoveny a měřeny dle příslušné normy ČSN EN ISO 527.

Po spuštění zkoušky byl na vzorek automaticky připojen extenzometr pro přesné stanovení Youngova modulu pružnosti. Podstata měření za pomoci extenzometru je v tom, že zaznamenává prodloužení v závislosti na napětí na vzdálenosti 20 mm, nikoli po celé délce vzorku. Zkouška probíhala až do úplného přetržení vzorku.

V průběhu zkoušky byly sledovány tyto parametry: tloušťka vzorku -  $a$ , šířka vzorku -  $b$ , mez pevnosti v tahu -  $\sigma_{tM}$ , poměrná deformace na mezi pevnosti -  $\varepsilon_M$ , modul pružnosti v tahu -  $E_t$ , celková deformace -  $\Delta l$ , deformace na mezi pevnosti  $\Delta l_M$ , síla na mezi pevnosti -  $F_M$ .

$\Delta l_M$  a  $\varepsilon_M$  byly měřeny extenzometrem na délce 20mm.



Obr. 37. Schéma tahové zkoušky

Pozn.: struktura S-8 vykazovala vysokou pevnost, která převyšovala dosažitelný výkon zkušebního zařízení (20kN). Pro přetržení vzorku bylo potřeba proto šířku vzorku zmenšit na  $b = 10\text{mm}$ . Zmenšení se docílilo ofrézováním na frézce FHV-50PD.

### 8.1 Nastavené hodnoty pro zkoušku tahem

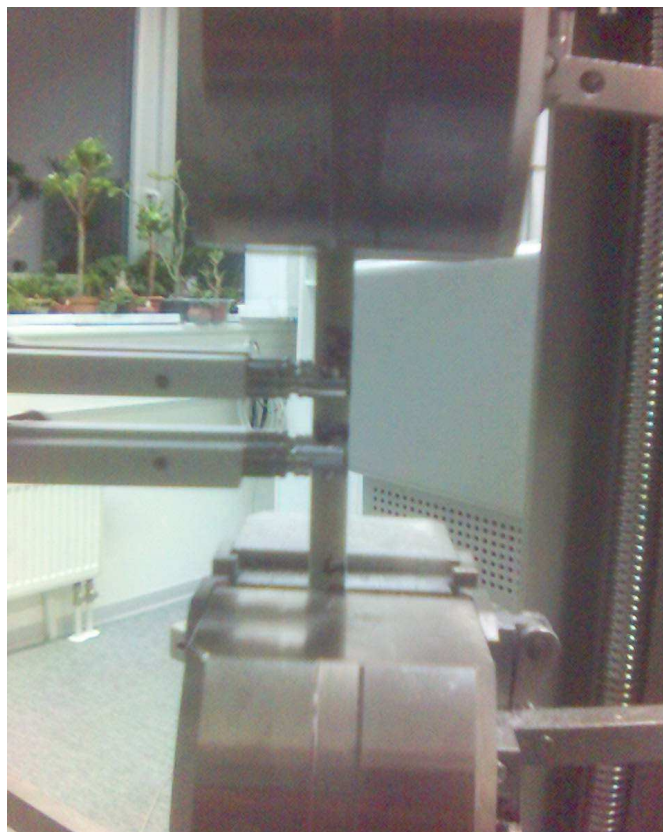
- rychlost	10	[mm·min <sup>-1</sup> ]
- předzatížení	2	[N]

- rychlost předzatižení	5	[mm·min <sup>-1</sup> ]
- měření modulu pružnosti při	0,05 – 0,25 % $\epsilon$	
- rychlost při měření modulu pružnosti	1	[mm·min <sup>-1</sup> ]
- tloušťka, šířka vzorku	$a, b$	[mm]
- teplota	$t$	[°C]

## 8.2 Zkouška tahem při teplotě +20°C

Tab. 10. Tahová zkouška – souhrn

TAH					
č. série	struktura	délka	směr kladení	n	poznámka
1.	S-4	150 mm	podélný - L	4	-
2.	S-4	150 mm	příčný - T	5	-
3.	S-8	150 mm	podélný - L	5	b = 10mm
4.	S-8	150 mm	příčný - T	5	b = 10mm



Obr. 38. Zkouška tahem – připojený extenzometr

## 8.2.1 Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S-4

Tab. 11. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L

#1	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$F_M$
n = 4	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm	N
x	6,65	15,13	198,55	12133,92	7,22	2,01	0,40	19968,39
s	0,13	0,10	14,18	776,03	0,54	0,12	0,02	1452,59

Tab. 12. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T

#2	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm	N
x	6,2	14,52	194,36	12863,97	6,62	1,95	0,39	17484,38
s	0,1	0,13	13,42	2297,90	0,39	0,21	0,04	1011,98

## 8.2.2 Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S-8

Tab. 13. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L

#3	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm	N
x	7,34	10,04	228,70	13483,91	7,33	2,16	0,43	16841,14
s	0,13	0,05	11,93	1291,97	0,18	0,19	0,04	585,53

Tab. 14. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T

#4	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm	N
x	7,06	10,22	198,01	12076,71	6,85	2,01	0,40	14446,00
s	0,38	0,04	20,84	1308,71	0,22	0,24	0,05	810,92

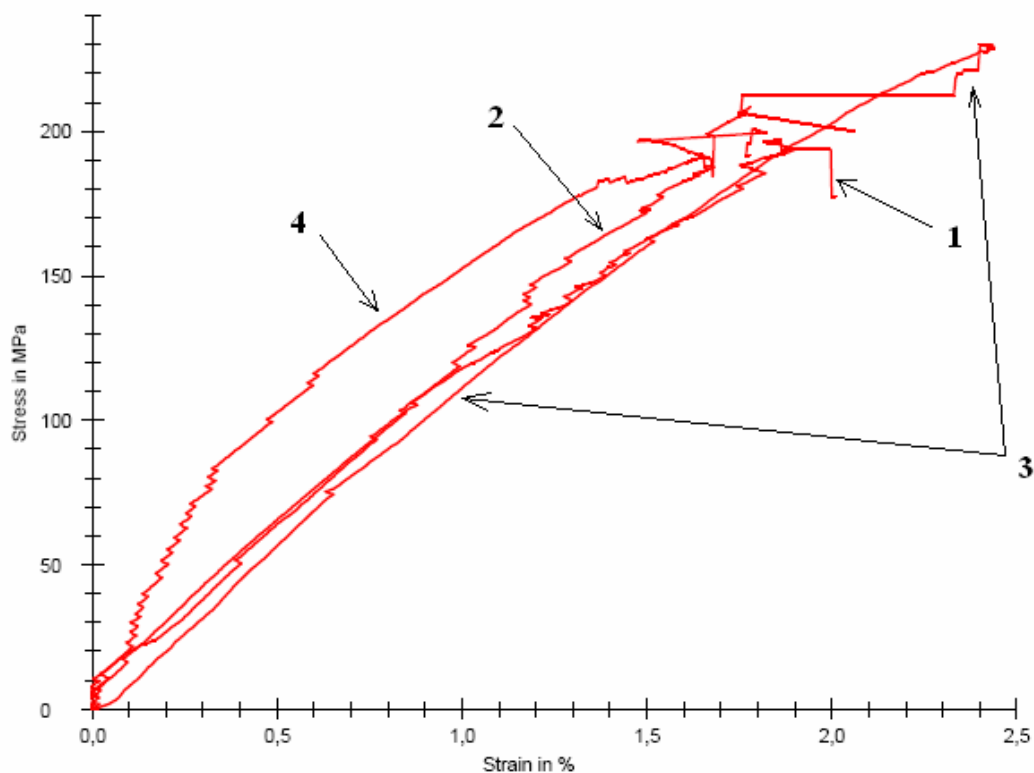


## 8.2.3

## 8.2.4 Shrnutí výsledků tahových zkoušek

Tab. 15. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TAH

	S-4		S-8	
	Směr L #1	Směr T #2	Směr L #3	Směr T #4
$E_t$ [MPa]	12133,92	12863,97	13483,91	12076,71
$\sigma_{tM}$ [MPa]	198,55	194,36	228,70	198,01
$\epsilon_M$ [%]	2,01	1,95	2,16	2,01
$F_M$ [N]	19968,39	17484,38	16841,14	14446,00



Obr. 39. Graf průměrných hodnot sérií #1 až #4 – TAH

- 1) struktura S-4 - směr L, 2) struktura S-4 - směr T, 3) struktura S-8 - směr L,  
4) struktura S-8 - směr T

### 8.3 Zkouška tahem v teplotní komoře při teplotě $-30^{\circ}\text{C}$

Zkouška probíhala v teplotní komoře při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$ . Teplota byla dosažena za pomoci dusíku z přídavné láhve.

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře k teplotě na požadovanou teplotu. Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny tahové zkoušky a zjištěny následující parametry: tloušťka a šířka vzorku, mez pevnosti v tahu, poměrná deformace na mezi pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu, celková deformace a deformace na mezi pevnosti v tahu.

Tab. 16. Tahová zkouška v teplotní komoře při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$  – souhrn

TAH						
č. série	struktura	délka	směr kladení	n	poznámka	
1.	S-4	150 mm	podélný - L	5	-	
2.	S-4	150 mm	příčný - T	5	-	
3.	S-8	150 mm	podélný - L	3	b = 10mm	
4.	S-8	150 mm	příčný - T	4	b = 10mm	



*Obr. 40. Zkouška tahem v teplotní komoře*

### 8.3.1 Výsledky tahových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě $-30^{\circ}\text{C}$

Tab. 17. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$

#1	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	6,58	14,10	218,97	13940,22	8,62	2,23	0,44
s	0,47	2,30	8,83	1518,74	0,36	0,16	0,03

Tab. 18. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$

#2	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	6,08	14,52	203,21	15121,29	8,22	2,04	0,40
s	0,18	0,13	30,74	1601,28	0,74	0,49	0,10

### 8.3.2 Výsledky tahových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě $-30^{\circ}\text{C}$

Tab. 19. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$

#3	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 3	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	7,1	10,1	235,63	16939,20	8,47	1,61	0,31
s	0,1	0,0	15,00	1480,60	0,61	0,48	0,10

Tab. 20. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$

#4	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 4	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	7,5	10,1	208,05	14800,35	8,26	2,06	0,41
s	0,2	0,0	7,59	1765,97	0,23	0,09	0,02

### 8.3.3 Shrnutí výsledků tahových zkoušek v teplotní komoře při teplotě $-30^{\circ}\text{C}$

Tab. 21. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TAH - při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$

	S-4		S-8	
	Směr L #1	Směr T #2	Směr L #3	Směr T #4
$E_t$ [MPa]	13940,22	15121,29	16939,20	14800,35
$\sigma_{tM}$ [MPa]	218,97	203,21	235,63	208,05
$\varepsilon_M$ [%]	2,23	2,04	1,61	2,06



Obr. 41. Zkouška tahem v teplotní komoře při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$

## 8.4 Zkouška tahem v teplotní komoře při teplotě +60°C

Zkouška probíhala v teplotní komoře při teplotě + 60°C. Teplota byla dosažena za pomoci elektricky vyhřívané teplotní komory.

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře k teplotě na požadovanou teplotu. Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny tahové zkoušky a zjištěny následující parametry: tloušťka a šířka vzorku, mez pevnosti v tahu, poměrná deformace na mezi pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu, celková deformace a deformace na mezi pevnosti v tahu.

Tab. 22. Tahová zkouška v teplotní komoře při teplotě +60°C – souhrn

TAH						
č. série	struktura	délka	směr kladení	n	poznámka	
1.	S-4	150 mm	podélný - L	5	-	
2.	S-4	150 mm	příčný - T	5	-	
3.	S-8	150 mm	podélný - L	5	b = 10mm	
4.	S-8	150 mm	příčný - T	5	b = 10mm	

### 8.4.1 Výsledky tahových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě +60°C

Tab. 23. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě +60°C

#1	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	6,3	15,16	191,59	10958,76	8,12	2,03	0,39
s	0,2	0,42	11,47	398,24	0,17	0,04	0,01

Tab. 24. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě +60°C

#2	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	5,98	14,50	156,72	10594,71	7,41	1,60	0,32
s	0,21	0,60	34,66	508,87	1,16	0,43	0,09

### 8.4.2 Výsledky tahových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě +60°C

Tab. 25. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě +60°C

#3	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	7,24	10,17	141,95	11178,87	6,46	1,33	0,26
s	0,09	0,04	58,30	474,21	1,99	0,56	0,11

Tab. 26. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě +60°C

#4	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	7,02	10,14	156,47	10575,64	7,25	1,67	0,32
s	0,40	0,05	15,73	508,36	0,21	0,16	0,04

### 8.4.3 Shrnutí výsledků tahových zkoušek v teplotní komoře při teplotě +60°C

Tab. 27. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TAH - při teplotě +60°C

	S-4		S-8	
	Směr L #1	Směr T #2	Směr L #3	Směr T #4
$E_t$ [MPa]	10958,76	10594,71	11178,87	10575,64
$\sigma_{tM}$ [MPa]	191,59	156,72	141,95	156,47
$\varepsilon_M$ [%]	2,03	1,60	1,33	1,67

### 8.5 Zkouška tahem v teplotní komoře při teplotě +100°C

Zkouška probíhala v teplotní komoře při teplotě + 100°C. Teplota byla dosažena za pomoci elektricky vyhřívané teplotní komory.

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře k teplotě na požadovanou teplotu. Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny tahové zkoušky a zjištěny následující parametry: tloušťka a šířka vzorku, mez pevnosti v tahu, poměrná deformace na mezi pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu, celková deformace a deformace na mezi pevnosti v tahu.

Tab. 28. Tahová zkouška v teplotní komoře při teplotě  $+100^{\circ}\text{C}$  – souhrn

TAH						
č. série	struktura	délka	směr kladení	n	poznámka	
1.	S-4	150 mm	podélný - L	5	-	
2.	S-4	150 mm	příčný - T	5	-	
3.	S-8	150 mm	příčný - T	5	b = 10mm	
4.	S-8	150 mm	podélný - L	5	b = 10mm	

### 8.5.1 Výsledky tahových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě $+100^{\circ}\text{C}$

Tab. 29. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě  $+100^{\circ}\text{C}$

#1	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	6,52	15,48	151,08	10636,04	8,26	1,68	0,33
s	0,24	0,16	20,38	724,78	0,13	0,27	0,05

Tab. 30. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě  $+100^{\circ}\text{C}$

#2	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	6,12	14,62	129,98	7641,82	8,38	1,60	0,31
s	0,20	0,13	12,02	894,11	0,48	0,19	0,04



### 8.5.2 Výsledky tahových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě +100°C

Tab. 31. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě +100°C

#3	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	7,62	10,10	122,44	7361,18	7,78	1,62	0,32
s	0,50	0	11,48	965,22	0,66	0,40	0,08

Tab. 32. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě +100°C

#4	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	7,36	10,22	122,87	8169,36	7,66	1,35	0,26
s	0,31	0,04	19,44	973,47	0,49	0,19	0,04

### 8.5.3 Shrnutí výsledků tahových zkoušek v teplotní komoře při teplotě +100°C

Tab. 33. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TAH - při teplotě +100°C

	S-4		S-8	
	Směr L #1	Směr T #2	Směr T #3	Směr L #4
$E_t$ [MPa]	10636,04	7641,82	7361,18	8169,36
$\sigma_{tM}$ [MPa]	151,08	129,98	122,44	122,87
$\epsilon_M$ [%]	1,68	1,60	1,62	1,35

## 8.6 Diskuze výsledků tahových zkoušek

- I. Vliv struktury: k dispozici byly dva typy struktur – S-4 a S-8.
- II. Vliv směru kladení: k dispozici byly dva směry kladení – L a T.
- III. Vliv teploty: měření probíhalo za teplot  $-30^\circ\text{C}$ ,  $+20^\circ\text{C}$ ,  $+60^\circ\text{C}$  a  $+100^\circ\text{C}$ .
- IV. Závěr: shrnutí.

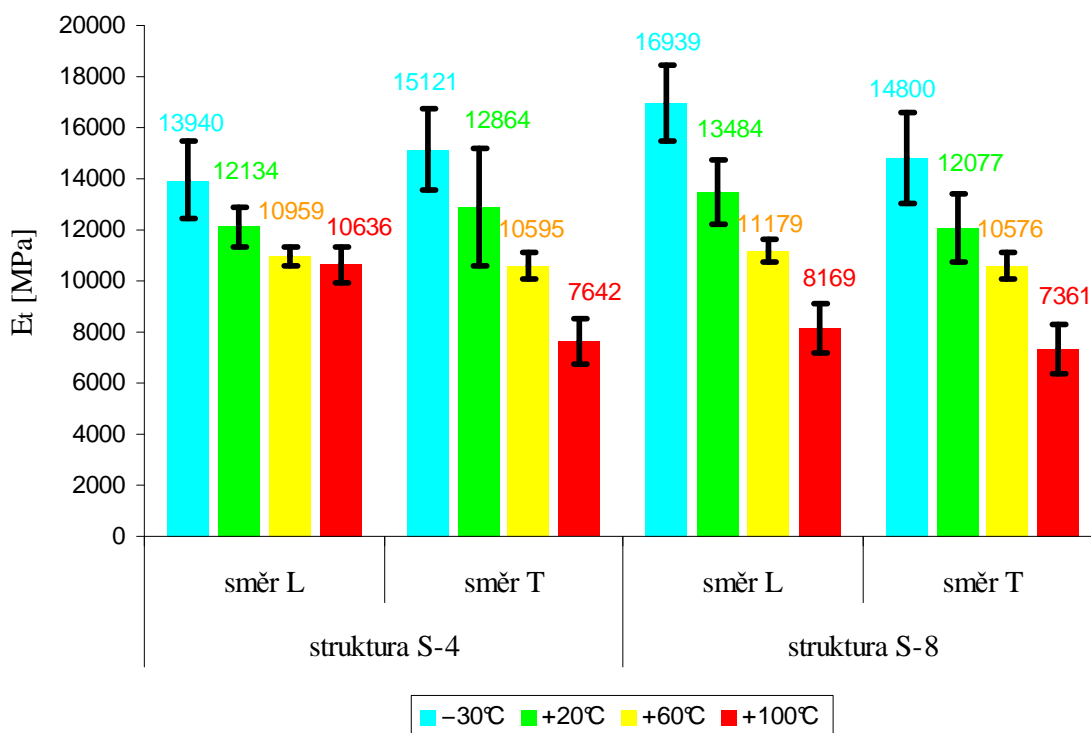
Tab. 34. Výsledky tahových zkoušek

		-30°C		+20°C		+60°C		+100°C	
		$E_t$ [MPa]	$\sigma_{tM}$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\sigma_{tM}$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\sigma_{tM}$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\sigma_{tM}$ [MPa]
S4	L	13940	219	12134	199	10959	192	10636	151
	T	15121	203	12864	194	10595	157	7642	130
S8	L	16939	236	13484	229	11179	142	8169	123
	T	14800	208	12077	198	10576	156	7361	122

### 8.6.1 Diskuze výsledků tahových zkoušek – modul pružnosti

 Tab. 35. Výsledky tahových zkoušek –  $E_t$ 

		-30°C		+20°C		+60°C		+100°C	
		$E_t$ [MPa]	s	$E_t$ [MPa]	s	$E_t$ [MPa]	s	$E_t$ [MPa]	s
S4	L	13940	1519	12134	776	10959	398	10636	725
	T	15121	1601	12864	2298	10595	509	7642	894
S8	L	16939	1481	13484	1292	11179	474	8169	973
	T	14800	1766	12077	1309	10576	508	7361	965

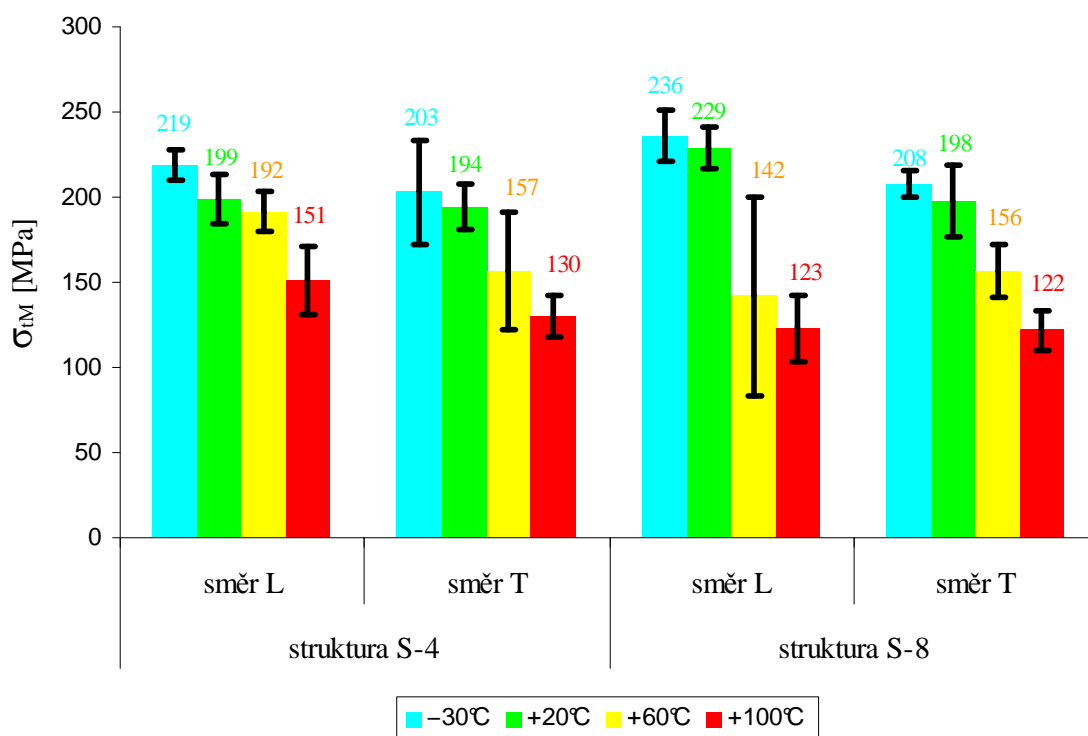

 Obr. 42. Graf výsledků tahových zkoušek –  $E_t$

- I. Vliv struktury: struktura *S-4 L* vykazuje menší hodnoty  $E_t$  než struktura *S-8 L* (mimo teplotu  $100^\circ\text{C}$ ); se vzrůstající teplotou se tento rozdíl zmenšuje a při teplotě  $+100^\circ\text{C}$  se trend obrací. Struktura *S-4 T* dle grafu (Obr. 42) má vyšší hodnoty  $E_t$  než *S-8 T* v celém rozsahu teplot.
- II. Vliv směru kladení: u struktury *S-4* je hodnota  $E_t$  při teplotách  $-30^\circ\text{C}$  a  $+20^\circ\text{C}$  u směru *L* menší než u *T* a u teplot  $+60^\circ\text{C}$  a  $+100^\circ\text{C}$  je to naopak. U *S-8* je hodnota  $E_t$  při všech teplotách pro směr *L* větší než pro *T*.
- III. Vliv teploty: na grafu (Obr. 42) lze pozorovat snižování  $E_t$  při stoupající teplotě - u všech směru (*L*, *T*) a struktur (*S-4*, *S-8*) přibližně podobně, mimo *S-4 L* – vykazuje nejmenší závislost na teplotě.
- IV. Závěr
- struktury *S-4* a *S-8* nevykazují stejné vlastnosti. Nelze obecně kvantifikovat, která ze struktur má větší  $E_t$  (liší se to dle teploty a směru kladení)
  - směr kladení *L* a *T* má vliv na hodnoty  $E_t$ . Tak jako v předchozím případě nelze učinit obecný závěr (závislost na teplotě a struktuře)
  - se zvyšující se teplotou klesá modul pružnosti v tahu a vice versa
  - největší hodnoty  $E_t$  dosáhl laminát *S-8 L* při teplotě  $-30^\circ\text{C}$
  - nejmenší hodnoty  $E_t$  dosáhl laminát *S-8 T* při teplotě  $+100^\circ\text{C}$

### 8.6.2 Diskuze výsledků tahových zkoušek – mez pevnosti

Tab. 36. Výsledky tahových zkoušek –  $\sigma_{tM}$

		$-30^\circ\text{C}$		$+20^\circ\text{C}$		$+60^\circ\text{C}$		$+100^\circ\text{C}$	
		$\sigma_{tM}$ [MPa]	<b>s</b>	$\sigma_{tM}$ [MPa]	<b>s</b>	$\sigma_{tM}$ [MPa]	<b>s</b>	$\sigma_{tM}$ [MPa]	<b>s</b>
<b>S4</b>	<b>L</b>	219	9	199	14	192	11	151	20
	<b>T</b>	203	31	194	13	157	35	130	12
<b>S8</b>	<b>L</b>	236	15	229	12	142	58	123	19
	<b>T</b>	208	8	198	21	156	16	122	11



Obr. 43. Graf výsledků tahových zkoušek –  $\sigma_{iM}$

- I. Vliv struktury: struktura *S-4 L* vykazuje menší hodnoty  $\sigma_{iM}$  než struktura *S-8 L* při teplotách  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $+20^{\circ}\text{C}$  a při  $+60^{\circ}\text{C}$  a  $+100^{\circ}\text{C}$  je tomu opačně. Struktura *S-4 T* a *S-8 T* mají téměř totožné hodnoty  $\sigma_{iM}$  v celém rozsahu teplot.
- II. Vliv směru kladení: u *S-4* je hodnota  $\sigma_{iM}$  při všech teplotách pro směr *L* větší než pro *T*. Pro *S-8* je to stejné s výjimkou teploty  $+60^{\circ}\text{C}$ .
- III. Vliv teploty: na grafu (Obr. 43) lze pozorovat snižování  $\sigma_{iM}$  při stoupající teplotě - u všech směrů (*L*, *T*) a struktur (*S-4*, *S-8*).
- IV. Závěr

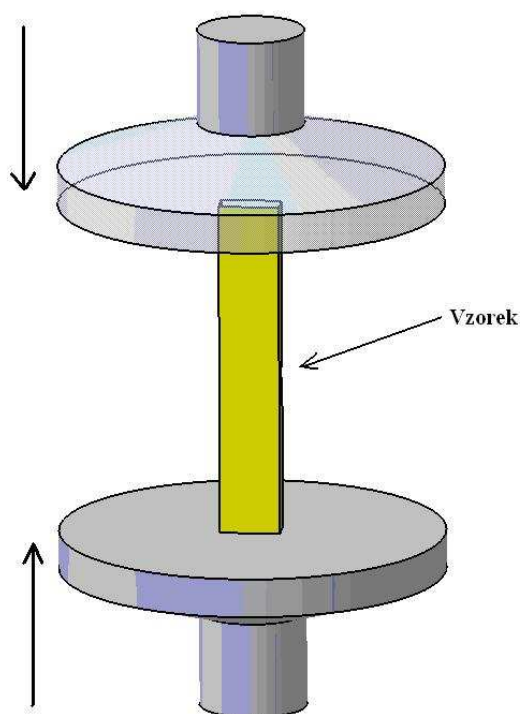
- směr kladení *T* u obou struktur má téměř stejné hodnoty
- se zvyšující se teplotou klesá mez pevnosti a vice versa
- největší hodnoty  $\sigma_{iM}$  dosáhl laminát *S-8 L* při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$
- nejmenší hodnoty  $\sigma_{iM}$  dosáhl laminát *S-8 T* při teplotě  $+100^{\circ}\text{C}$

## 9 ZKOUŠKA TLAKEM

Tlaková zkouška byla provedena na zkušebním zařízení Zwick 145 665 ovládaném pomocí počítače. Hodnoty pro tlakovou zkoušku nebyly měřeny dle normy.

Před spuštěním zkoušky byly zadány následující parametry zkoušeného vzorku: tloušťka a šířka.

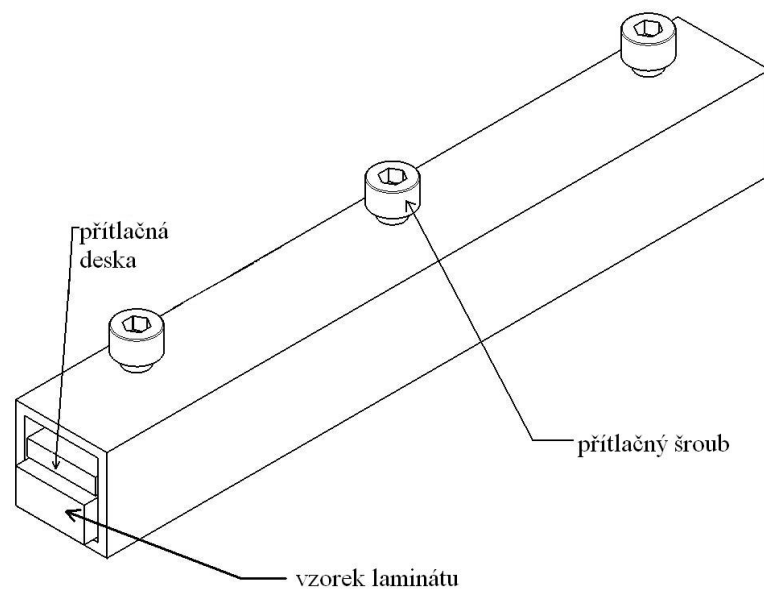
V průběhu zkoušky byly sledovány tyto parametry: tloušťka vzorku –  $a$ , šířka vzorku –  $b$ , mez pevnosti v tlaku –  $\sigma_{dM}$ , modul pružnosti v tlaku –  $E_d$  a deformace na mezi pevnosti v tlaku –  $\Delta l_M$ .



Obr. 44. Schéma zkoušky tlakem

Jak již bylo řečeno v kapitole 4.4 potýká se tlaková zkouška s mnoha problémy. Jedním z hlavních problémů je zabránit vybočení vzorků z kolmé roviny (ztrátě stability). Bylo proto využito jednoduchého přípravku (Obr. 45) – vyrobeného dle návrhu a možnostech dílen.

Bylo potřeba ještě zajistit kolmost přípravku k tlačným deskám. To bylo vyřešeno mini-svěrákem a ocelovými podložkami.



Obr. 45. Přípravek pro zkoušku tlakem



Obr. 46. Zkouška tlakem

## 9.1 Nastavené hodnoty pro zkoušku tlakem

- rychlost	$l$	$[\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}]$
- předzatížení	5	[N]
- rychlost předzatížení	5	$[\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}]$
- měření modulu pružnosti při	$0,05 - 0,25 \%$	$\varepsilon$
- rychlost při měření modulu pružnosti	$l$	$[\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}]$
- tloušťka, šířka vzorku	$a, b$	[mm]
- teplota	$t$	$[\text{°C}]$

## 9.2 Zkouška tlakem při teplotě +20°C

Tab. 37. Tlaková zkouška - souhrn

TLAK					
č. série	struktura	délka	směr kladení	n	
1.	S-4	150 mm	příčný - T	5	
2.	S-4	150 mm	podélný - L	5	
3.	S-8	150 mm	příčný - T	5	
4.	S-8	150 mm	podélný - L	5	

### 9.2.1 Výsledky tlakových zkoušek pro strukturu S-4

Tab. 38. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T

#1	a	b	$\sigma_{dM}$	$E_d$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm
x	6,14	14,32	176,78	8706,04	3,51
s	0,15	0,04	56,66	575,16	1,05

Tab. 39. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L

#2	a	b	$\sigma_{dM}$	$E_d$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm
x	6,4	15,26	188,33	8078,37	3,74
s	0,12	0,26	10,61	150,44	0,28

### 9.2.2 Výsledky tlakových zkoušek pro strukturu S-8

Tab. 40. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T

#3	a	b	$\sigma_{dM}$	$E_d$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm
x	7,44	15,52	170,75	7767,14	3,57
s	0,30	0,18	20,42	196,18	0,35

Tab. 41. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L

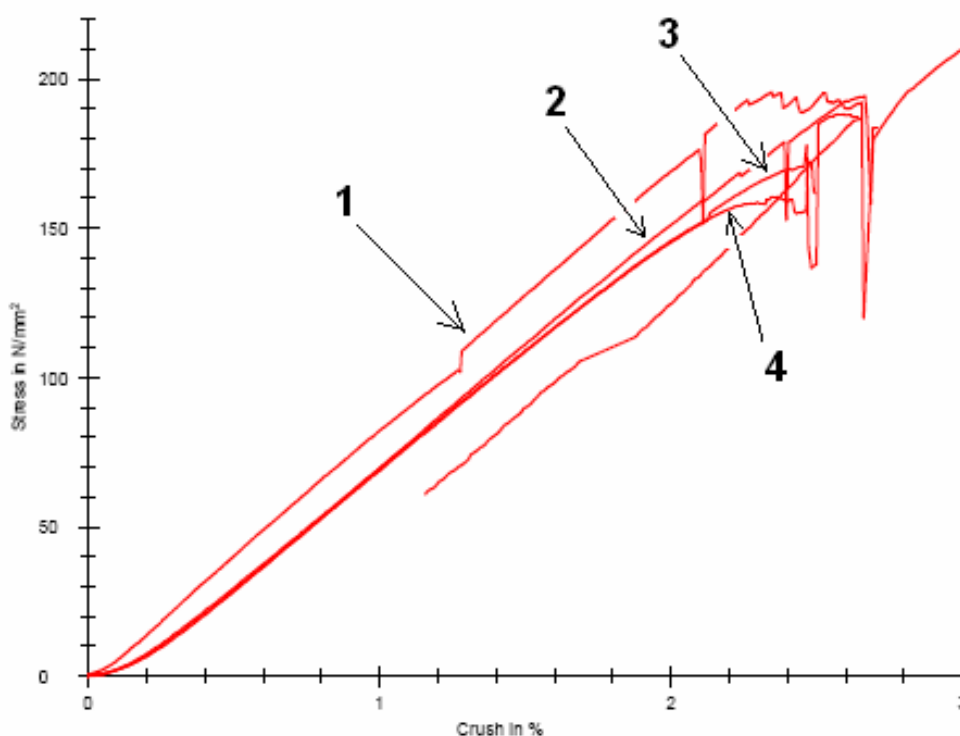
#4	a	b	$\sigma_{dM}$	$E_d$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm
x	7,34	15,72	162,11	7712,20	3,48
s	0,29	0,20	12,39	263,34	0,17

### 9.2.3 Shrnutí výsledků tlakových zkoušek

Tab. 42. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TLAK

	S-4		S-8	
	Směr T #1	Směr L #2	Směr T #3	Směr L #4
$E_d$ [MPa]	8706,04	8078,37	7767,14	7712,20
$\sigma_{dM}$ [MPa]	176,78	188,33	170,75	162,11
$\Delta l_M$ [mm]	3,51	3,74	3,57	3,48





Obr. 47. Graf průměrných hodnot sérií #1 až #4 – TLAK

- 1) struktura S-4 - směr T, 2) struktura S-4 - směr L, 3) struktura S-8 - směr T, 4) struktura S-8 - směr L

### 9.3 Zkouška tlakem v teplotní komoře při teplotě +60°C

Zkouška probíhala v teplotní komoře při teplotě + 60°C. Teplota byla dosažena za pomoci elektricky vyhřívané teplotní komory.

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře k temperaci na požadovanou teplotu spolu s přípravkem (Obr. 45). Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny tlakové zkoušky a zjištěny následující parametry: tloušťka a šířka vzorku, mez pevnosti v tlaku, modul pružnosti v tlaku a deformace na mezi pevnosti v tlaku.

Tab. 43. Tlaková zkouška v teplotní komoře při teplotě +60°C – souhrn

TLAK					
č. série	struktura	délka	směr kladení	n	
1.	S-4	150 mm	podélný - L	5	
2.	S-4	150 mm	příčný - T	5	
3.	S-8	150 mm	podélný - L	5	
4.	S-8	150 mm	příčný - T	5	

### 9.3.1 Výsledky tlakových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě +60°C

Tab. 44. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě +60°C

#1	a	b	$\sigma_{dM}$	$E_d$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm
x	6,18	15,1	79,89	6554,86	2,19
s	0,15	0,23	16,46	206,89	0,29

Tab. 45. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě +60°C

#2	a	b	$\sigma_{dM}$	$E_d$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm
x	6,04	14,42	64,45	6204,19	2,05
s	0,18	0,30	5,67	262,73	0,19

### 9.3.2 Výsledky tlakových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě +60°C

Tab. 46. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě +60°C

#3	a	b	$\sigma_{dM}$	$E_d$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm
x	7,62	15,18	69,89	6213,75	1,96
s	0,31	0,25	11,13	224,46	0,22

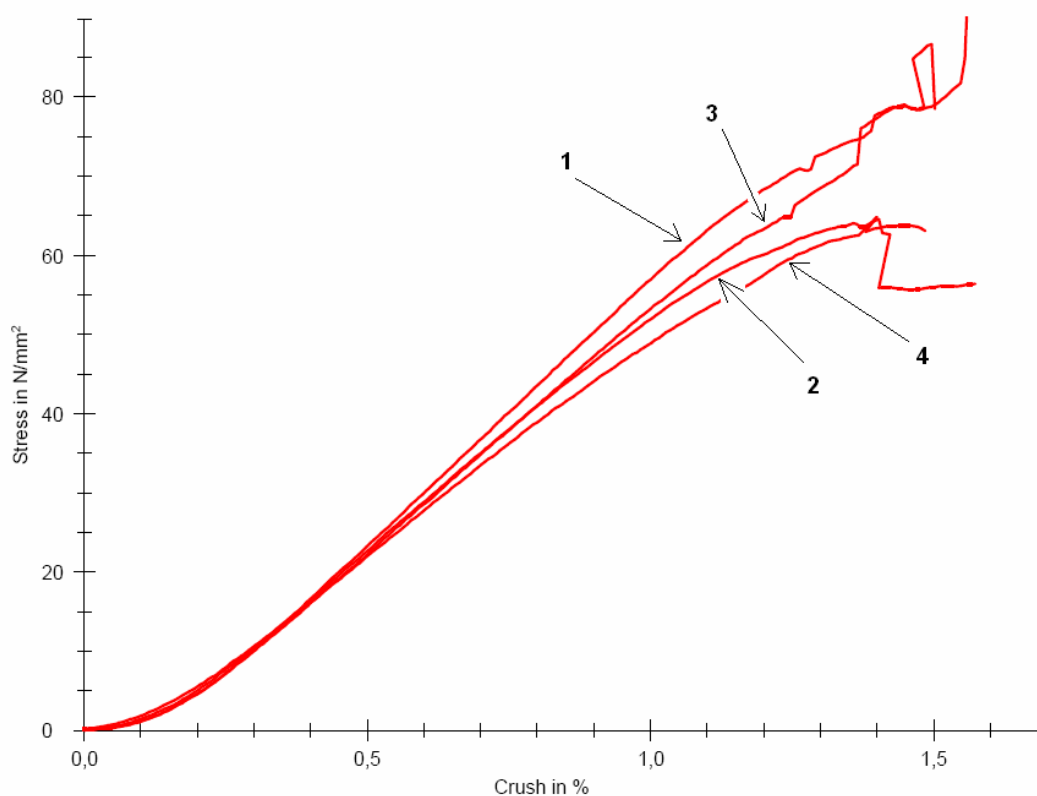
Tab. 47. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě +60°C

#4	a	b	$\sigma_{dM}$	$E_d$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm
x	7,64	15,38	60,69	5730,12	1,97
s	0,48	0,13	5,22	365,50	0,20

### 9.3.3 Shrnutí výsledků tlakových zkoušek v teplotní komoře při teplotě +60°C

Tab. 48. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TLAK - při teplotě +60°C

	S-4		S-8	
	Směr L #1	Směr T #2	Směr L #3	Směr T #4
$E_d$ [MPa]	6554,86	6204,19	6213,75	5730,12
$\sigma_{dM}$ [MPa]	79,89	64,45	69,89	60,69
$\Delta l_M$ [mm]	2,19	2,05	1,96	1,97



Obr. 48. Graf průměrných hodnot sérií #1 až #4 – TLAK - při teplotě +60°C

- 1) struktura S-4 - směr L, 2) struktura S-4 - směr T, 3) struktura S-8 - směr L,  
4) struktura S-8 - směr T

#### 9.4 Zkouška tlakem v teplotní komoře při teplotě +100°C

Zkouška probíhala v teplotní komoře při teplotě + 100°C. Teplota byla dosažena za pomoci elektricky vyhřívané teplotní komory.

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře k temperaci na požadovanou teplotu spolu s přípravkem (Obr. 45). Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny tlakové zkoušky a zjištěny následující parametry: tloušťka a šířka vzorku, mez pevnosti v tlaku, modul pružnosti v tlaku a deformace na mezi pevnosti v tlaku.

Tab. 49. Tlaková zkouška v teplotní komoře při teplotě +100°C

– souhrn

TLAK					
č. série	struktura	délka	směr kladení	n	
1.	S-4	150 mm	příčný - T	4	
2.	S-4	150 mm	podélný - L	5	
3.	S-8	150 mm	příčný - T	5	
4.	S-8	150 mm	podélný - L	4	

#### 9.4.1 Výsledky tlakových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě +100°C

Tab. 50. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě +100°C

#1	a	b	$\sigma_{dM}$	$E_d$	$\Delta l_M$
n = 4	mm	mm	MPa	MPa	mm
x	6,15	14,43	59,50	5407,22	4,30
s	0,24	0,13	5,57	151,86	1,65

Tab. 51. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě +100°C

#2	a	b	$\sigma_{dM}$	$E_d$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm
x	6,4	15,22	58,87	5736,46	2,06
s	0,21	0,22	6,72	106,81	0,31

### 9.4.2 Výsledky tlakových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě +100°C

Tab. 52. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě +100°C

#3	a	b	$\sigma_{dM}$	$E_d$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm
x	7,68	15,48	51,78	4956,60	1,93
s	0,18	0,11	3,70	225,95	0,12

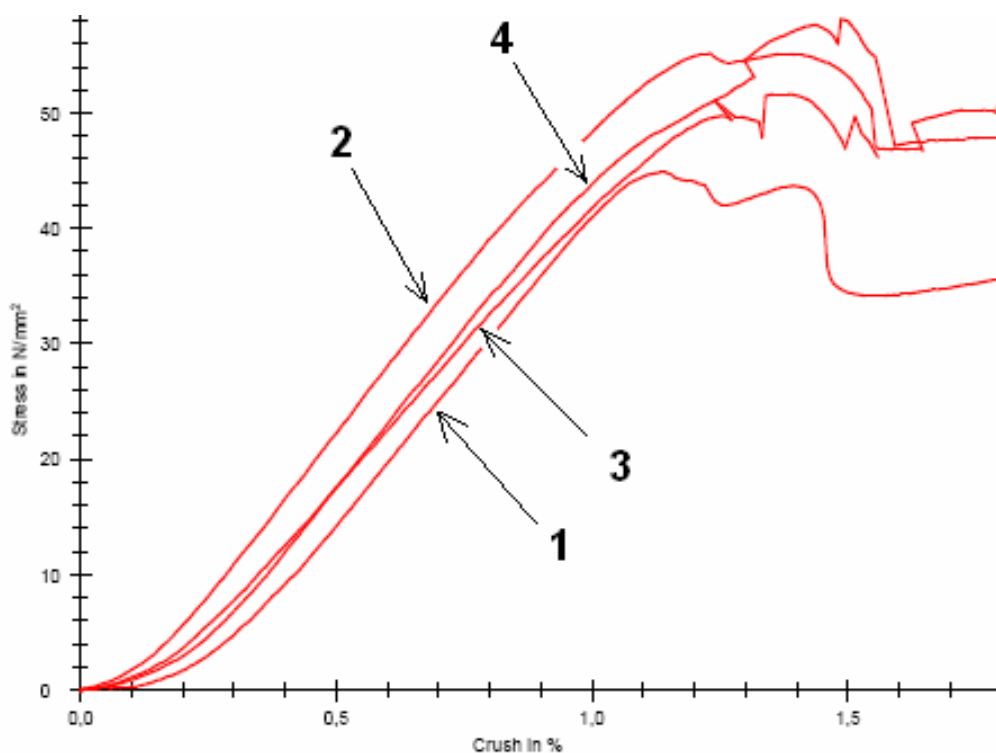
Tab. 53. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě +100°C

#4	a	b	$\sigma_{dM}$	$E_d$	$\Delta l_M$
n = 4	mm	mm	MPa	MPa	mm
x	7,5	15,48	57,08	5454,55	2,14
s	0,08	0,33	10,36	314,69	0,42

### 9.4.3 Shrnutí výsledků tlakových zkoušek v teplotní komoře při teplotě +100°C

Tab. 54. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TLAK - při teplotě +100°C

	S-4		S-8	
	Směr T #1	Směr L #2	Směr T #3	Směr L #4
$E_d$ [MPa]	5407,22	5736,46	4956,60	5454,55
$\sigma_{dM}$ [MPa]	59,50	58,87	51,78	57,08
$\Delta l_M$ [mm]	4,30	2,06	2,16	2,14



Obr. 49. Graf průměrných hodnot sérií #1 až #4 – TLAK - při teplotě +100°C  
 1) struktura S-4 - směr T, 2) struktura S-4 - směr L, 3) struktura S-8 - směr T,  
 4) struktura S-8 - směr L

## 9.5 Diskuze výsledků tlakových zkoušek

- I. Vliv struktury: k dispozici byly dva typy struktur – S-4 a S-8.
- II. Vliv směru kladení: k dispozici byly dva směry kladení – L a T.
- III. Vliv teploty: měření probíhalo za teplot +20°C, +60°C a +100°C.
- IV. Závěr: shrnutí

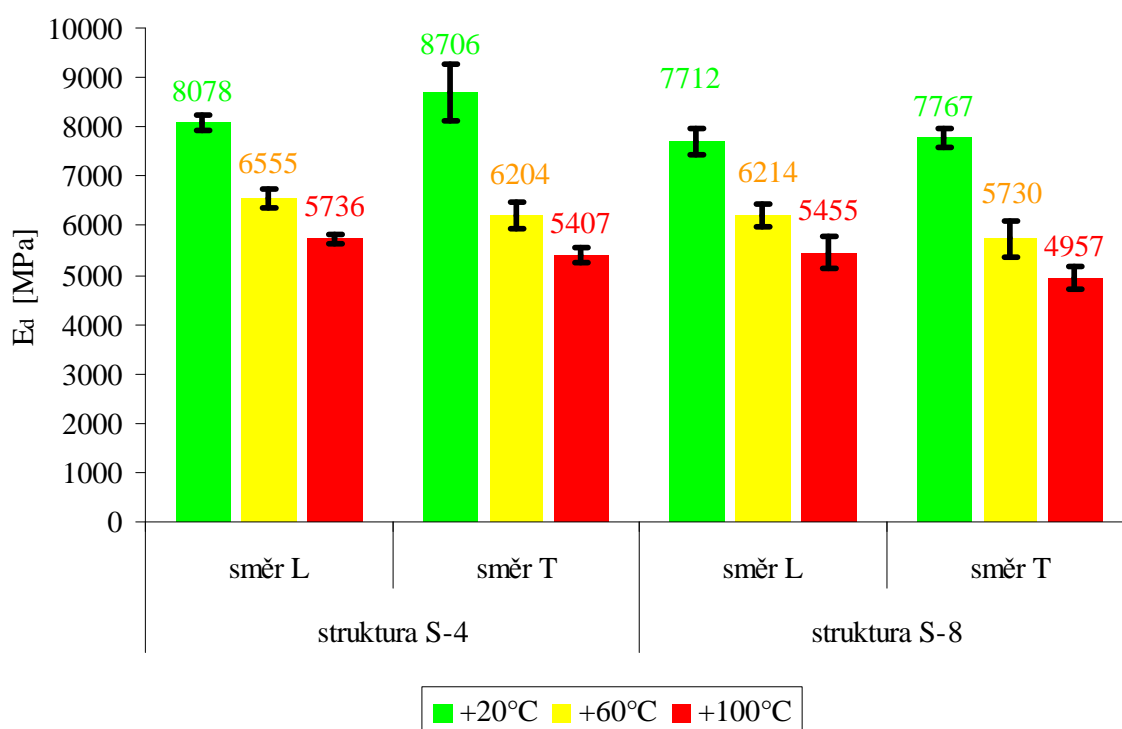
Tab. 55. Výsledky tlakových zkoušek

		+20°C		+60°C		+100°C	
		$E_d$ [MPa]	$\sigma_{dM}$ [MPa]	$E_d$ [MPa]	$\sigma_{dM}$ [MPa]	$E_d$ [MPa]	$\sigma_{dM}$ [MPa]
S4	L	8078	188	6555	80	5736	59
	T	8706	177	6204	64	5407	60
S8	L	7712	162	6214	70	5455	57
	T	7767	171	5730	61	4957	52

## 9.5.1 Diskuze výsledků tlakových zkoušek – modul pružnosti

Tab. 56. Výsledky tlakových zkoušek –  $E_d$ 

		+20°C		+60°C		+100°C	
		$E_d$ [MPa]	s	$E_d$ [MPa]	s	$E_d$ [MPa]	s
S4	L	8078	150	6555	207	5736	107
	T	8706	575	6204	263	5407	152
S8	L	7712	263	6214	224	5455	315
	T	7767	196	5730	366	4957	226

Obr. 50. Graf výsledků tlakových –  $E_d$ 

- I. Vliv struktury: struktura S-4 L vykazuje větší hodnoty  $E_d$  než struktura S-8 L u všech teplot přibližně o 300MPa. Struktura S-4 T dle grafu (Obr. 50) má taktěž vyšší hodnoty  $E_d$  než S-8 T v celém rozsahu teplot. Hodnoty se ale liší výrazněji.
- II. Vliv směru kladení: u obou struktur směr L má vyšší  $E_d$  (s výjimkou S-4 a S-8 L při +20°C)
- III. Vliv teploty: na grafu (Obr. 50) lze pozorovat snižování  $E_d$  při stoupající teplotě. Mezi teplotami +60°C a +100°C je pokles u všech hodnot přibližně stejný – okolo 800MPa.



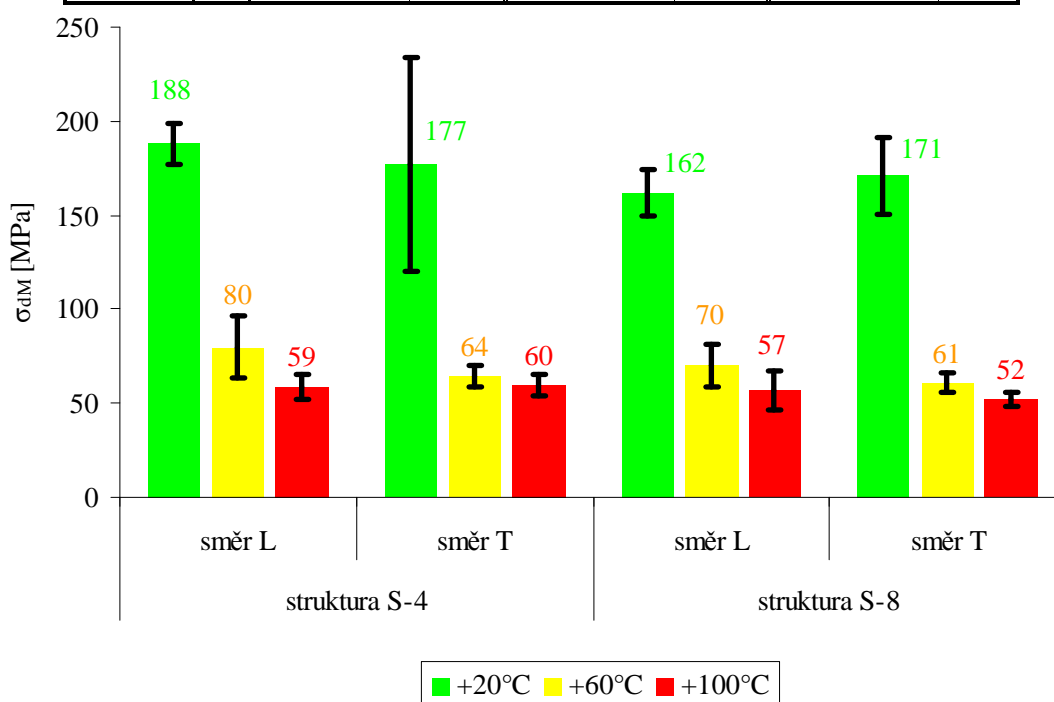
## IV. Závěr

- struktura S-4 má větší hodnoty modulu pružnosti
- směr kladení není při teplotě  $+20^{\circ}\text{C}$  rozhodující, při vyšších teplotách ( $+60^{\circ}\text{C}$  a  $+100^{\circ}\text{C}$ ) má směr L lepší (vyšší) hodnoty  $E_d \leftrightarrow$  zatížení působí kolmo k průřezu vláken  $\leftrightarrow$  nízká teplota  $\rightarrow$  měknutí matrice  $\rightarrow$  horší vlastnosti ve směru T - příčný
- se zvyšující se teplotou klesá modul pružnosti a vice versa
- největší hodnoty  $E_d$  dosáhl laminát S-4 T při teplotě  $+20^{\circ}\text{C}$
- nejmenší hodnoty  $E_d$  dosáhl laminát S-8 T při teplotě  $+100^{\circ}\text{C}$

## 9.5.2 Diskuze výsledků tlakových zkoušek – mez pevnosti

 Tab. 57. Výsledky tlakových zkoušek -  $\sigma_{dM}$ 

		$+20^{\circ}\text{C}$		$+60^{\circ}\text{C}$		$+100^{\circ}\text{C}$	
		$\sigma_{dM}$ [MPa]	s	$\sigma_{dM}$ [MPa]	s	$\sigma_{dM}$ [MPa]	s
S4	L	188	11	80	16	59	7
	T	177	57	64	6	60	6
S8	L	162	12	70	11	57	10
	T	171	20	61	5	52	4


 Obr. 51. Graf výsledků tlakových –  $\sigma_{dM}$

- I. Vliv struktury: *S-4 L - T* vykazuje větší hodnoty  $\sigma_{dM}$  než struktura *S-8 L - T* v celém rozsahu teplot.
  - II. Vliv směru kladení: u obou struktur směr *L* má vyšší  $\sigma_{dM}$  (s výjimkou *S -8 L* při  $+20^{\circ}\text{C}$ ).
  - III. Vliv teploty: na grafu (Obr. 51) lze pozorovat snižování  $\sigma_{dM}$  při stoupající teplotě - u všech směrů (*L, T*) a struktur (*S-4, S-8*).
- IV. Závěr
- struktura *S-4* má větší hodnoty meze pevnosti
  - směr *L* vyšší hodnoty meze pevnosti (viz závěr pro  $E_d$ )
  - se zvyšující se teplotou klesá mez pevnosti a více versa, z teploty  $+20^{\circ}\text{C}$  poklesla pevnost na teplotu  $+60^{\circ}\text{C}$  průměrně 2.5 krát, z  $+60^{\circ}\text{C}$  na  $+100^{\circ}\text{C}$  je pokles již menší
  - největší hodnoty  $\sigma_{dM}$  dosáhl laminát *S-4 L* při teplotě  $+20^{\circ}\text{C}$
  - nejmenší hodnoty  $\sigma_{dM}$  dosáhl laminát *S-8 T* při teplotě  $+100^{\circ}\text{C}$

## 10 ZKOUŠKA OHYBEM

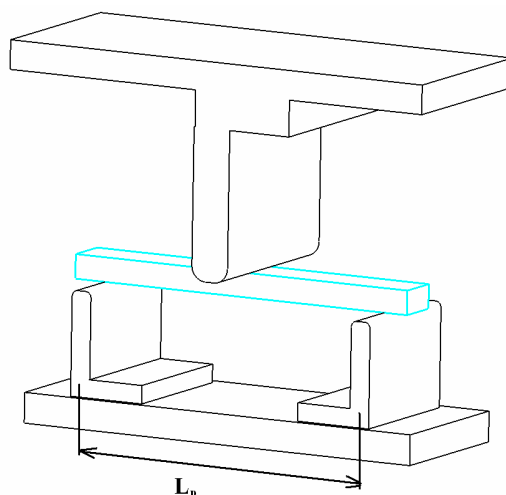
Ohybová zkouška byla provedena na zkušebním zařízení Zwick 145 665 ovládaném pomocí počítače. Hodnoty pro ohybovou zkoušku byly stanoveny a měřeny dle příslušné normy ČSN EN ISO 178.

Zkouška byla provedena tříbodovým systémem. Při všech ohybových zkouškách byla Gel-coat vrstva vždy umístěna na straně tlačné.

Zkouška musela být přerušena ve správném okamžiku. Při nesprávném době přerušeni zkoušky by mohlo totiž dojít k nežádoucímu zapříčení nebo vyklouznutí tělesa z podpěr a to by negativně ovlivnilo výsledek zkoušky.

Před spuštěním zkoušky byly zadány následující parametry zkoušeného vzorku: tloušťka a šířka.

V průběhu zkoušky byly sledovány tyto parametry: tloušťka vzorku –  $a$ , šířka vzorku –  $b$ , mez pevnosti v ohybu –  $\sigma_{fM}$ , poměrná deformace na mezi pevnosti v ohybu –  $\varepsilon_M$ , modul pružnosti v ohybu –  $E_f$ , deformace na mezi pevnosti v ohybu –  $\Delta l_M$ .



Obr. 52. Schéma ohybové zkoušky

### 10.1 Nastavené hodnoty pro zkoušku ohybem

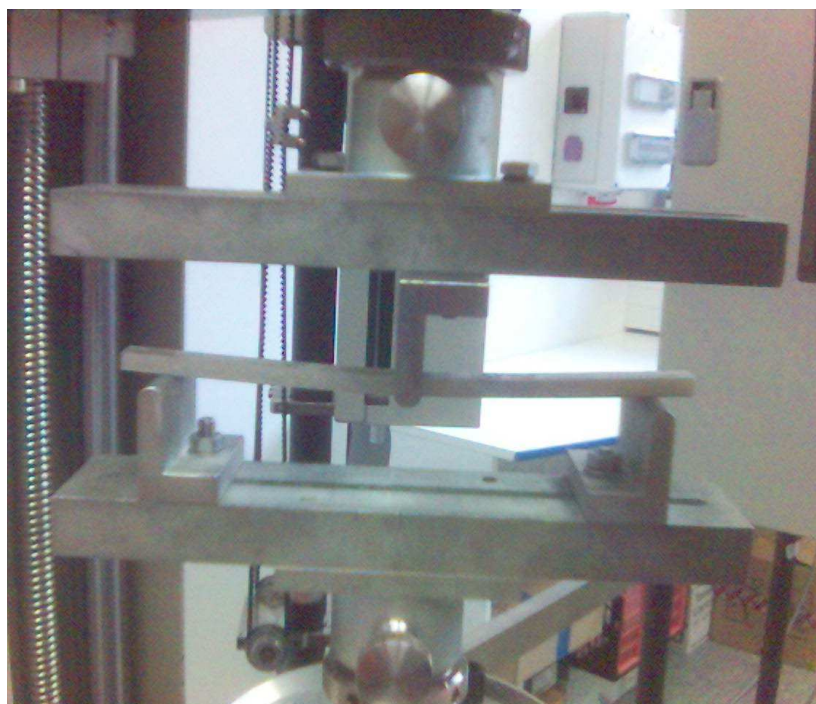
- rychlost zatížení	10	[mm·min <sup>-1</sup> ]
- předzatížení	2	[N]
- rychlost předzatížení	5	[mm·min <sup>-1</sup> ]

- měření modulu pružnosti při  $0,05 - 0,25 \% \varepsilon$
- vzdálenost podpěr  $L_p$  [mm]
- tloušťka, šířka vzorku  $a, b$  [mm]
- teplota  $t$  [°C]

## 10.2 Zkouška ohybem při teplotě 20°C

Tab. 58. Ohybová zkouška - souhrn

OHYB					
č. série	struktura	délka vzorku	směr kladení	n	$L_p$
1.	S-4	150/2 = 75 mm	podélný - L	4	64 mm
2.	S-4	150/2 = 75 mm	příčný - T	4	64 mm
3.	S-8	150/2 = 75 mm	podélný - L	4	64 mm
4.	S-8	150/2 = 75 mm	příčný - T	4	64 mm
5.	S-4	235 mm	příčný - T	3	200 mm
6.	S-8	235 mm	podélný - L	4	200 mm
7.	S-4	235 mm	podélný - L	4	200 mm
8.	S-8	235 mm	příčný - T	4	200 mm



Obr. 53. Zkouška ohybem

### 10.2.1 Výsledky ohybových zkoušek pro vzdálenost podpěr 64 mm

Vzdálenost podpěr  $L_p = 64$  mm. Délka vzorku 75 mm.

#### 10.2.1.1 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S-4

Tab. 59. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - pro

$L_p = 64$  mm

#1	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,5	15,23	285,62	4,16	4,39	9554,40
s	0,1	0,21	18,88	0,81	0,82	145,65

Tab. 60. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - pro

$L_p = 64$  mm

#2	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,15	14,13	280,84	4,05	4,49	9918,48
s	0,3	0,41	12,54	0,74	0,80	566,66

#### 10.2.1.2 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S-8

Tab. 61. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - pro

$L_p = 64$  mm

#3	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,33	15,6	335,63	4,38	4,09	10166,20
s	0,19	0,3	12,20	0,17	0,18	377,20

Tab. 62. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - pro

$L_p = 64$  mm

#4	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,55	15,55	306,30	4,44	4,01	8915,48
s	0,1	0,24	14,70	0,29	0,28	230,78

### 10.2.2 Výsledky ohybových zkoušek pro vzdálenost podpěr 200 mm

Vzdálenost podpěr  $L_p = 200$  mm. Délka vzorku 235 mm.

#### 10.2.2.1 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S-4

Tab. 63. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - pro

$L_p = 200$  mm

#5	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 3	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,4	14,23	210,00	3,06	34,08	10115,27
s	0,1	0,40	15,94	0,10	3,95	603,33

Tab. 64. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - pro

$L_p = 200$  mm

#7	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,35	16,73	235,36	3,26	34,21	10667,02
s	0,17	0,10	8,72	0,23	2,69	182,34

#### 10.2.2.2 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S-8

Tab. 65. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - pro

$L_p = 200$  mm

#6	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,33	15,05	276,94	2,84	25,85	13025,52
s	0,39	0,06	17,73	0,17	1,57	1021,61

Tab. 66. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - pro

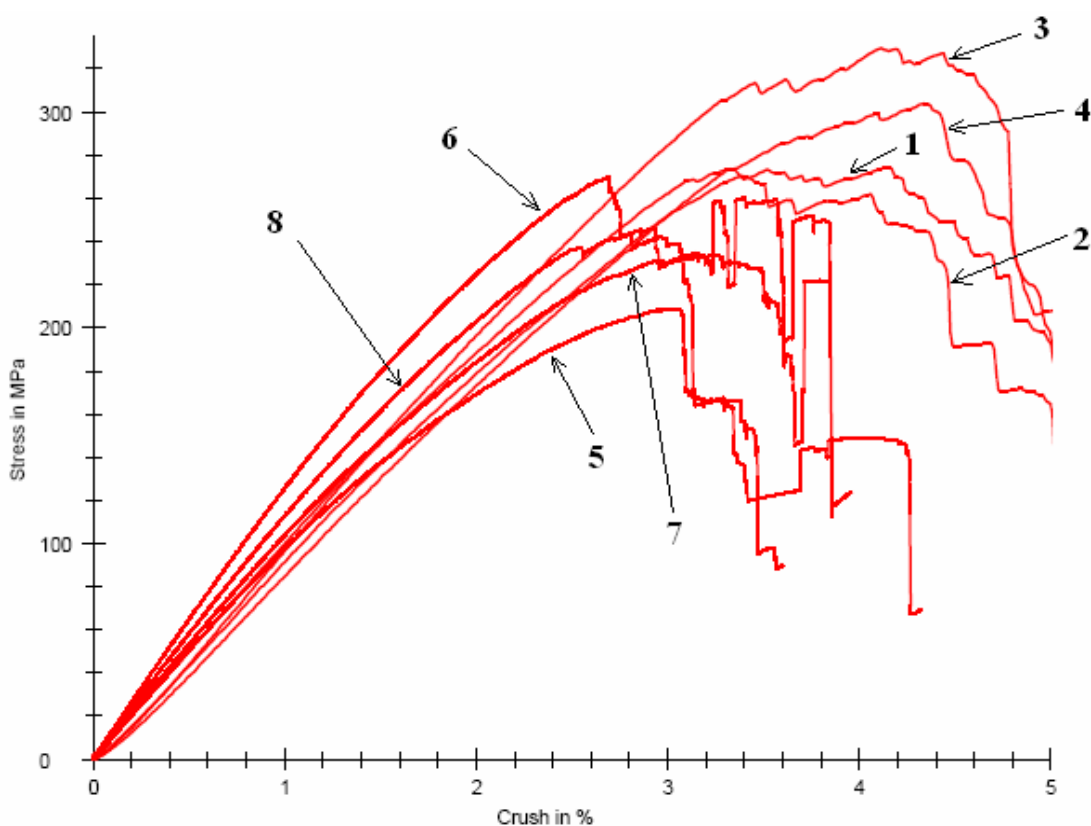
$L_p = 200$  mm

#8	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,7	15,2	250,08	3,15	27,25	11112,18
s	0,35	0,43	14,93	0,46	3,57	736,65

## 10.2.3 Shrnutí výsledků ohybových zkoušek

Tab. 67. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 8 – OHYB

	$L_p = 64 \text{ mm}$ , vzorek 75 mm				$L_p = 200 \text{ mm}$ , vzorek 235 mm			
	S-4		S-8		S-4		S-8	
	Směr L #1	Směr T #2	Směr L #3	Směr T #4	Směr T #5	Směr L #7	Směr L #6	Směr T #8
$E_f$ [MPa]	9554,40	9918,48	10166,20	8915,48	10115,27	10667,02	13025,52	11112,18
$\sigma_{fM}$ [MPa]	285,62	280,84	335,63	306,30	210,00	235,36	276,94	250,08
$\varepsilon_M$ [%]	4,16	4,05	4,38	4,44	3,06	3,26	2,84	3,15
$\Delta l_M$ [mm]	4,39	4,49	4,09	4,01	34,08	34,21	25,85	27,25



Obr. 54. Graf průměrných hodnot sérií #1 až #8 – OHYB

$L_p = 64 \text{ mm}$ , vzorek 75 mm

1) struktura S-4 - směr L, 2) struktura S-4 - směr T, 3) struktura S-8 - směr L, 4) struktura S-8 - směr T

$L_p = 200 \text{ mm}$ , vzorek 235 mm

5) struktura S-4 - směr T, 6) struktura S-8 - směr L, 7) struktura S-4 - směr L, 8) struktura S-8 - směr T

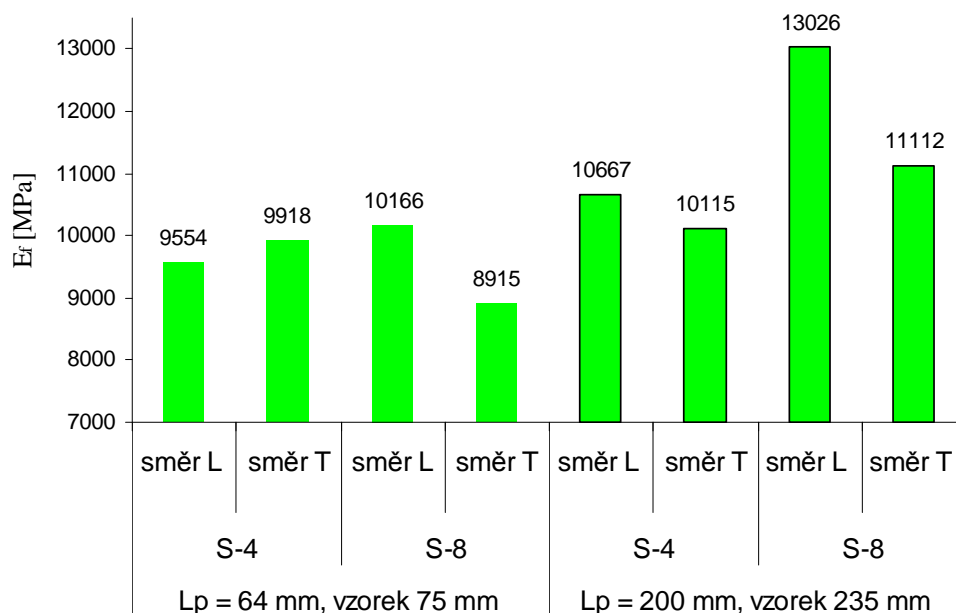
#### 10.2.4 Diskuze výsledků ohybových zkoušek při teplotě 20°C – vliv vzdálenosti podpěr $L_p$

I. Vliv vzdálenosti podpěr: vzdálenost podpěr má vliv na výsledky ohybové zkoušky u laminátů. Jak již bylo řečeno v kapitole 4.5. a 4.6. výsledky ovlivňuje interlaminární smyk. Proto poměr vzdálenosti podpor ku tloušťce tělesa by měl být minimálně 16:1, aby smykové zatížení bylo malé. Tuto podmínku vzdálenost podpěr  $L_p = 64 \text{ mm}$  nespĺňuje (poměr ~9:1). Dá se tedy předpokládat, že výsledky byly ovlivněny smykovým

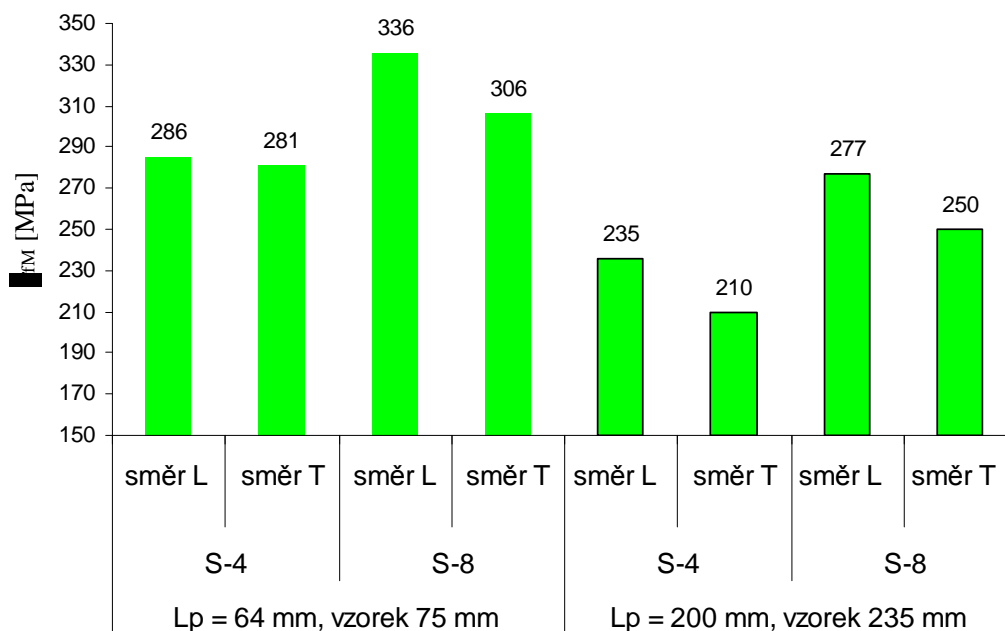


napětím. U vzdálenosti podpěr  $L_p = 200$  mm je poměr větší než 16:1 a k ovlivnění interlaminárním smykovým napětím nedochází.

- Modul pružnosti: vliv smykových napětí snižuje modul pružnosti. U S-8 ( $L_p = 64$  mm) došlo k poklesu o ~20% proti ( $L_p = 200$  mm). U S-4 poklesl  $E_f$  o ~2 až 11%.



Obr. 55. Graf hodnot modulu pružnosti – vliv vzdálenosti podpěr



Obr. 56. Graf hodnot meze pevnosti – vliv vzdálenosti podpěr

- Mez pevnosti: vliv smykových napětí zvyšuje mez pevnosti. U S-8 ( $L_p = 64$  mm) došlo k nárůstu o ~18% proti ( $L_p = 200$  mm). U S-4 nárůst meze pevnosti o ~18 až 25%.

### 10.3 Zkouška ohybem v teplotní komoře při teplotě $-30^{\circ}\text{C}$

Zkouška probíhala v teplotní komoře při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$ . Teplota byla dosažena za pomoci dusíku z přídavné láhve.

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře k teplotě na požadovanou teplotu. Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny ohybové zkoušky a zjištěny následující parametry: tloušťka a šířka vzorku, mez pevnosti v ohybu, poměrná deformace na mezi pevnosti v ohybu, modul pružnosti v ohybu a deformace na mezi pevnosti v ohybu.

Tab. 68. Ohybová zkouška v teplotní komoře při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$  – souhrn

OHYB						
č. série	struktura	délka	směr kladení	n	$L_p$	
1.	S-4	150/2 = 75 mm	podélný - L	5	64 mm	
2.	S-4	150/2 = 75 mm	příčný - T	5	64 mm	
3.	S-8	150/2 = 75 mm	podélný - L	5	64 mm	
4.	S-8	150/2 = 75 mm	příčný - T	6	64 mm	

#### 10.3.1 Výsledky ohybových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě $-30^{\circ}\text{C}$

Tab. 69. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$

#1	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,3	15,23	356,63	5,33	5,76	9633,71
s	0,3	0,37	40,15	0,94	1,04	1675,14

Tab. 70. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$

#2	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,14	14,3	348,01	5,47	6,07	9690,52
s	0,19	0,3	31,94	0,85	0,80	692,31

### 10.3.2 Výsledky ohybových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě $-30^{\circ}\text{C}$

Tab. 71. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$

#3	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,36	15,08	386,67	4,86	4,51	9917,95
s	0,11	0,11	22,91	0,25	0,26	514,11

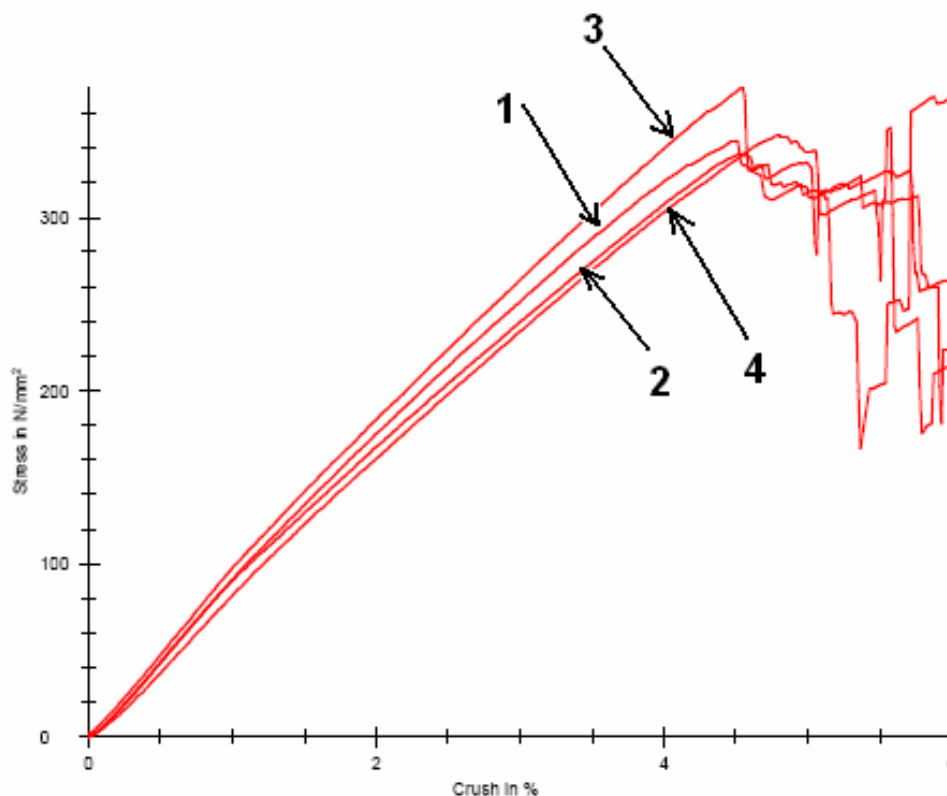
Tab. 72. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$

#4	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 6	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,7	15,7	355,65	5,25	4,67	8908,54
s	0,4	0,1	24,31	0,35	0,47	888,20

### 10.3.3 Shrnutí výsledků ohybových zkoušek v teplotní komoře při teplotě $-30^{\circ}\text{C}$

Tab. 73. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – OHYB - při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$

	$L_p = 64 \text{ mm, vzorek } 75 \text{ mm}$			
	S-4		S-8	
	Směr L #1	Směr T #2	Směr L #3	Směr T #4
$E_f$ [MPa]	9633,71	9690,52	9917,95	8908,54
$\sigma_{fM}$ [MPa]	356,63	348,01	386,67	355,65
$\varepsilon_M$ [%]	5,33	5,47	4,86	5,25
$\Delta l_M$ mm]	5,76	6,07	4,51	4,67



Obr. 57. Graf průměrných hodnot sérií #1 až #4 – OHYB - při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$

$L_p = 64 \text{ mm, vzorek } 75 \text{ mm}$

1) struktura S-4 - směr L, 2) struktura S-4 - směr T, 3) struktura S-8 - směr L, 4) struktura S-8 - směr T



*Obr. 58. Zkouška ohybem v teplotní komoře*

## 10.4 Zkouška ohybem v teplotní komoře při teplotě +60°C

Zkouška probíhala v teplotní komoře při teplotě + 60°C. Teplota byla dosažena za pomoci elektricky vyhřívané teplotní komory.

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře k teplotě na požadovanou teplotu. Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny ohybové zkoušky a zjištěny následující parametry: tloušťka a šířka vzorku, mez pevnosti v ohybu, poměrná deformace na mezi pevnosti v ohybu, modul pružnosti v ohybu a deformace na mezi pevnosti v ohybu.

Tab. 74. Ohybová zkouška v teplotní komoře při teplotě +60°C – souhrn

OHYB					
č. série	struktura	délka	směr kladení	n	L <sub>p</sub>
1.	S-4	150/2 = 75 mm	podélný - L	5	64 mm
2.	S-4	150/2 = 75 mm	příčný - T	5	64 mm
3.	S-8	150/2 = 75 mm	podélný - L	5	64 mm
4.	S-8	150/2 = 75 mm	příčný - T	5	64 mm

### 10.4.1 Výsledky ohybových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě +60°C

Tab. 75. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě +60°C

#1	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	E <sub>f</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,16	16,38	224,73	4,14	4,59	6640,89
s	0,11	0,31	7,46	0,31	0,31	255,87

Tab. 76. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě +60°C

#2	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	E <sub>f</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,04	14,46	232,98	3,95	4,47	7074,70
s	0,15	0,33	12,97	0,24	0,34	574,37

### 10.4.2 Výsledky ohybových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě +60°C

Tab. 77. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě +60°C

#3	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,08	15,88	264,80	3,96	3,82	7897,94
s	0,08	0,13	12,93	0,33	0,34	395,06

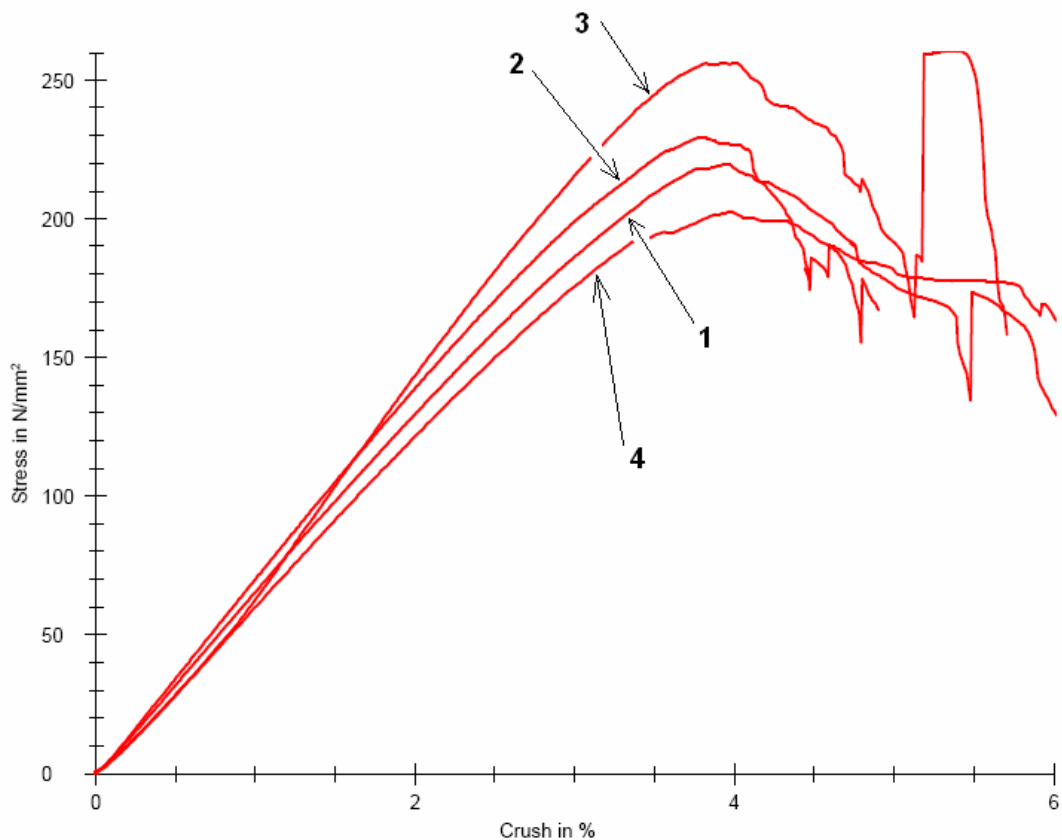
Tab. 78. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě +60°C

#4	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,48	15,66	211,52	4,06	3,70	6026,03
s	0,24	0,15	13,19	0,53	0,39	471,66

### 10.4.3 Shrnutí výsledků ohybových zkoušek v teplotní komoře při teplotě +60°C

Tab. 79. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – OHYB - při teplotě +60°C

	$L_p = 64 \text{ mm, vzorek } 75 \text{ mm}$			
	S-4		S-8	
	Směr L #1	Směr T #2	Směr L #3	Směr T #4
	$E_f$ [MPa]	6640,89	7074,70	7897,94
$\sigma_{fM}$ [MPa]	224,73	232,98	264,80	211,52
$\epsilon_M$ [%]	4,14	3,95	3,96	4,06
$\Delta l_M$ mm]	4,59	4,47	3,82	3,70



Obr. 59. Graf průměrných hodnot sérií #1 až #4 – OHYB - při teplotě +60°

$$L_p = 64 \text{ mm, vzorek } 75 \text{ mm}$$

- 1) struktura S-4 - směr L, 2) struktura S-4 - směr T, 3) struktura S-8 - směr L, 4) struktura S-8 - směr T

### 10.5 Zkouška ohybem v teplotní komoře při teplotě +100°C

Zkouška probíhala v teplotní komoře při teplotě + 100°C. Teplota byla dosažena za pomoci elektricky vyhřívané teplotní komory.

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře k teplotě na požadovanou teplotu. Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny ohybové zkoušky a zjištěny následující parametry: tloušťka a šířka vzorku, mez pevnosti v ohybu, poměrná deformace na mezi pevnosti v ohybu, modul pružnosti v ohybu a deformace na mezi pevnosti v ohybu.



Tab. 80. Ohybová zkouška v teplotní komoře při teplotě +100°C – souhrn

OHYB					
č. série	struktura	délka	směr kladení	n	L <sub>p</sub>
1.	S-4	150/2 = 75 mm	podélný - L	5	64 mm
2.	S-4	150/2 = 75 mm	příčný - T	5	64 mm
3.	S-8	150/2 = 75 mm	podélný - L	5	64 mm
4.	S-8	150/2 = 75 mm	příčný - T	5	64 mm

### 10.5.1 Výsledky ohybových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-4 při teplotě +100°C

Tab. 81. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě +100°C

#1	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	E <sub>f</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,34	15,36	104,00	4,75	5,10	3917,40
s	0,11	0,09	2,80	1,23	1,28	293,44

Tab. 82. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě +100°C

#2	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	E <sub>f</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,08	14,36	104,62	5,34	5,97	3964,16
s	0,13	0,29	13,38	1,68	1,78	213,33

### 10.5.2 Výsledky ohybových zkoušek v teplotní komoře pro strukturu S-8 při teplotě +100°C

Tab. 83. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě +100°C

#3	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	E <sub>f</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,32	15,78	121,19	12,11	11,26	3989,03
s	0,15	0,08	13,49	2,91	2,56	385,69

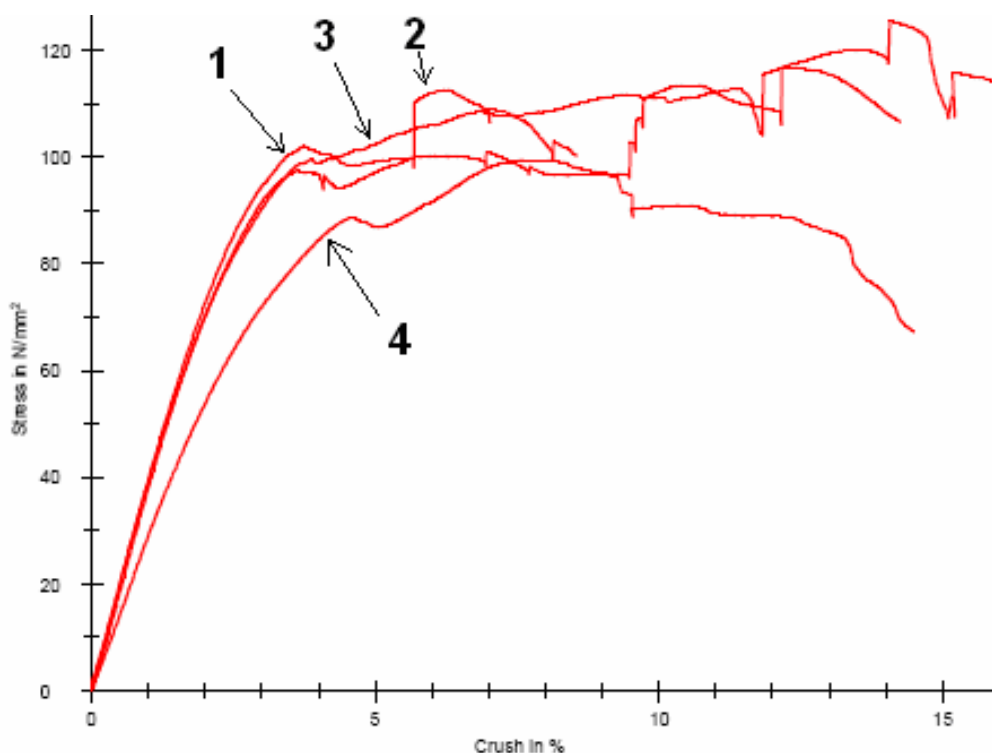
Tab. 84. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě +100°C

#4	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,28	15,66	102,88	8,95	8,39	2899,16
s	0,18	0,18	14,81	2,25	2,05	518,70

### 10.5.3 Shrnutí výsledků ohybových zkoušek v teplotní komoře při teplotě +100°C

Tab. 85. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – OHYB - při teplotě +100°C

	<b><math>L_p = 64</math> mm, vzorek 75 mm</b>			
	<b>S-4</b>		<b>S-8</b>	
	<b>Směr L #1</b>	<b>Směr T #2</b>	<b>Směr L #3</b>	<b>Směr T #4</b>
$E_f$ [MPa]	3917,40	3964,16	3989,03	2899,16
$\sigma_{fM}$ [MPa]	104,00	104,62	121,19	102,88
$\epsilon_M$ [%]	4,75	5,34	12,11	8,95
$\Delta l_M$ mm]	5,10	5,97	11,26	8,39



Obr. 60. Graf průměrných hodnot sérií #1 až #4 – OHYB - při teplotě +100°

$L_p = 64 \text{ mm}$ , vzorek 75 mm

1) struktura S-4 - směr L, 2) struktura S-4 - směr T, 3) struktura S-8 - směr

L, 4) struktura S-8 - směr T

## 10.6 Diskuze výsledků ohybových zkoušek

- I. Vliv struktury: k dispozici byly dva typy struktur – S-4 a S-8.
- II. Vliv směru kladení: k dispozici byly dva směry kladení – L a T.
- III. Vliv teploty: měření probíhalo za teplot  $-30^\circ\text{C}$ ,  $+20^\circ\text{C}$ ,  $+60^\circ\text{C}$  a  $+100^\circ\text{C}$ .
- IV. Závěr: shrnutí

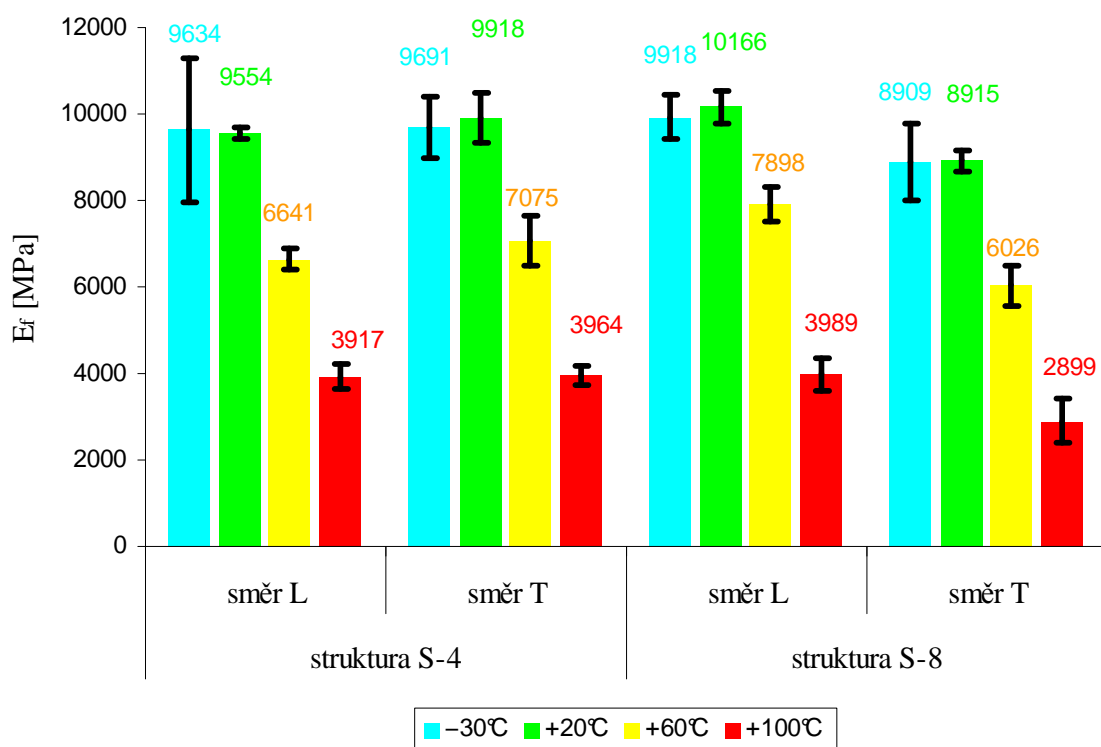
Tab. 86. Výsledky ohybových zkoušek

		$-30^\circ\text{C}$		$+20^\circ\text{C}$		$+60^\circ\text{C}$		$+100^\circ\text{C}$	
		$E_f$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]
<b>S4</b>	<b>L</b>	9634	357	9554	286	6641	225	3917	104
	<b>T</b>	9691	348	9918	281	7075	233	3964	105
<b>S8</b>	<b>L</b>	9918	387	10166	336	7898	265	3989	121
	<b>T</b>	8909	356	8915	306	6026	212	2899	103

## 10.6.1 Diskuze výsledků ohybových zkoušek – modul pružnosti

Tab. 87. Výsledky ohybových zkoušek –  $E_f$ 

		-30°C		+20°C		+60°C		+100°C	
		$E_f$ [MPa]	s	$E_f$ [MPa]	s	$E_f$ [MPa]	s	$E_f$ [MPa]	s
S4	L	9634	1675	9554	146	6641	256	3917	293
	T	9691	692	9918	567	7075	574	3964	213
S8	L	9918	514	10166	377	7898	395	3989	386
	T	8909	888	8915	231	6026	472	2899	519

Obr. 61. Graf výsledků ohybových zkoušek –  $E_f$ 

- I. Vliv struktury: struktura S-4 T vykazuje větší hodnoty  $E_f$  než struktura S-8 T v celém rozsahu teplot. Směr S-8 L vykazuje větší hodnoty  $E_f$  než struktura S-4 L v celém rozsahu teplot.
- II. Vliv směru kladení: směr L u S-8 má vyšší hodnoty  $E_f$  než směr T u S-8 v celém rozsahu teplot. U S-4 má naopak směr T vyšší hodnoty  $E_f$ .

III. Vliv teploty: snížení teploty na  $-30^{\circ}\text{C}$  nemá za následek výrazné zvýšení hodnoty  $E_f$  jako u předchozích zkoušek. Od teploty  $+20^{\circ}\text{C}$  již se zvyšující se teplotou klesá modul pružnosti.

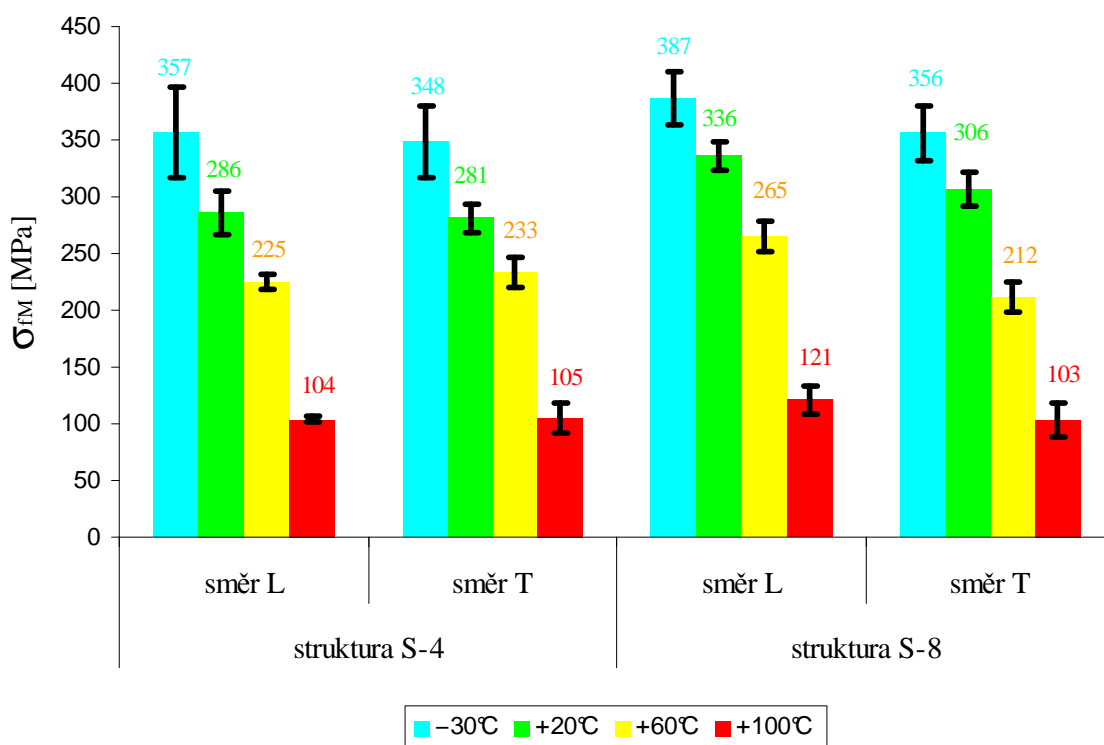
#### IV. Závěr

- nelze říci, která ze struktur má větší hodnoty  $E_f$  (vliv směru kladení)
- směr kladení má vliv různý dle struktury
- se zvyšující se teplotou klesá modul pružnosti, snížení teploty na  $-30^{\circ}\text{C}$  nemá za následek výrazný nárůst  $E_f$
- modul pružnosti v ohybu z teploty  $+20^{\circ}\text{C}$  na teplotu  $+60^{\circ}\text{C}$  poklesl o  $\sim 28\%$
- modul pružnosti v ohybu z teploty  $+20^{\circ}\text{C}$  na teplotu  $+100^{\circ}\text{C}$  poklesl o  $\sim 60\%$
- největší hodnoty  $E_f$  dosáhl laminát S-8 L při teplotě  $+20^{\circ}\text{C}$
- nejmenší hodnoty  $E_f$  dosáhl laminát S-8 T při teplotě  $+100^{\circ}\text{C}$

#### 10.6.2 Diskuze výsledků ohybových zkoušek – mez pevnosti

Tab. 88. Výsledky ohybových zkoušek –  $\sigma_{fM}$

		$-30^{\circ}\text{C}$		$+20^{\circ}\text{C}$		$+60^{\circ}\text{C}$		$+100^{\circ}\text{C}$	
		$\sigma_{fM}$ [MPa]	s	$\sigma_{fM}$ [MPa]	s	$\sigma_{fM}$ [MPa]	s	$\sigma_{fM}$ [MPa]	s
<b>S4</b>	<b>L</b>	357	40	286	19	225	7	104	3
	<b>T</b>	348	32	281	13	233	13	105	13
<b>S8</b>	<b>L</b>	387	23	336	12	265	13	121	13
	<b>T</b>	356	24	306	15	212	13	103	15



Obr. 62. Graf výsledků ohybových zkoušek –  $\sigma_{fM}$

- I. Vliv struktury: struktura S-8 L vykazuje větší hodnoty  $\sigma_{fM}$  než struktura S-4 L v celém rozsahu teplot. Směr T se chová u obou struktur různě dle teploty.
- II. Vliv směru kladení: u S-8 směr L dosahuje vyšších hodnot než směr T. Mez pevnosti u S-4 je téměř stejná v obou směrech.
- III. Vliv teploty: na grafu (Obr. 62) lze pozorovat snižování  $\sigma_{fM}$  při stoupající teplotě - u všech směrů (L, T) a struktur (S-4, S-8).
- IV. Závěr

- směry kladení L a T mají hodnotu meze pevnosti u struktury S-4 téměř stejnou
- se zvyšující se teplotou klesá mez pevnosti a vice versa, při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$  vzrostlo  $\sigma_{fM}$  z teploty  $+20^{\circ}\text{C}$  u S-4 o  $\sim 20\%$  a u S-8 o  $\sim 14\%$
- zvýšení teploty z  $+60^{\circ}\text{C}$  na  $+100^{\circ}\text{C}$  mělo za následek snížení meze pevnosti v ohybu o  $\sim 54\%$
- největší hodnoty  $\sigma_{fM}$  dosáhl laminát S-8 L při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$
- nejmenší hodnoty  $\sigma_{fM}$  dosáhl laminát S-8 T při teplotě  $+100^{\circ}\text{C}$

## 11 STUDIUM BIMODULARITY

### 11.1 Poměr modulů pružnosti v tlaku a tahu

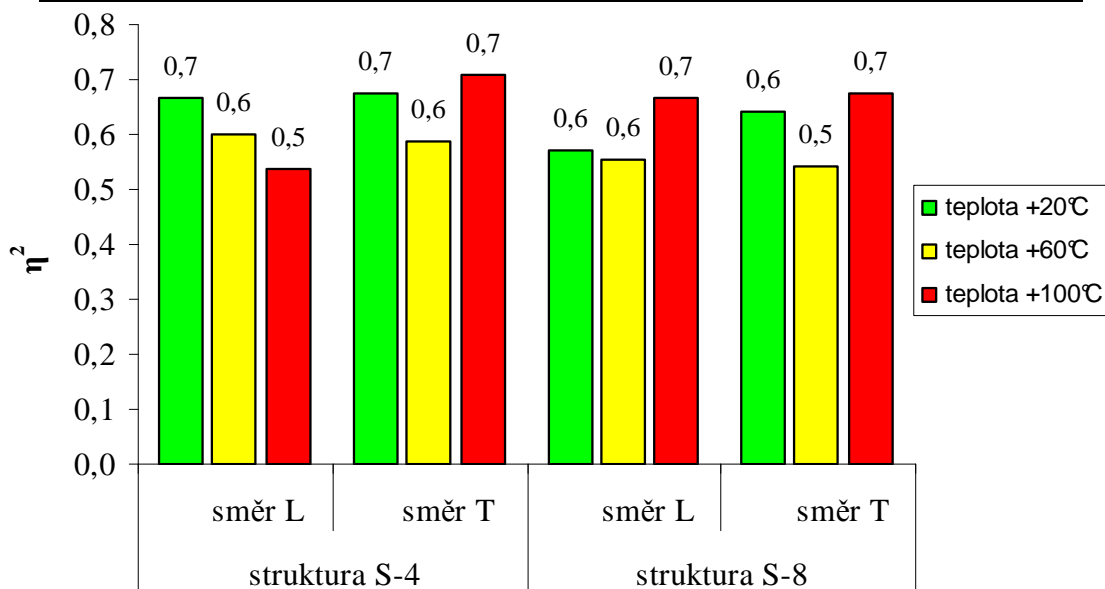
Poměr  $\eta^2$  se udává u bimodulárních materiálů. Je to poměr modulu pružnosti v tlaku ku modulu pružnosti v tahu, viz rovnice 32.

Tab. 89. Poměr  $\eta^2$  pro strukturu S-4

		struktura S-4					
		tah $E_t$		tlak $E_d$		$\eta^2$	
		směr L	směr T	směr L	směr T	směr L	směr T
teplota	+20°C	12134	12864	8078	8706	0,7	0,7
	+60°C	10959	10595	6555	6204	0,6	0,6
	+100°C	10636	7642	5736	5407	0,5	0,7

Tab. 90. Poměr  $\eta^2$  pro strukturu S-8

		struktura S-8					
		tah $E_t$		tlak $E_d$		$\eta^2$	
		směr L	směr T	směr L	směr T	směr L	směr T
teplota	+20°C	13484	12077	7712	7767	0,6	0,6
	+60°C	11179	10576	6214	5730	0,6	0,5
	+100°C	8169	7361	5455	4957	0,7	0,7

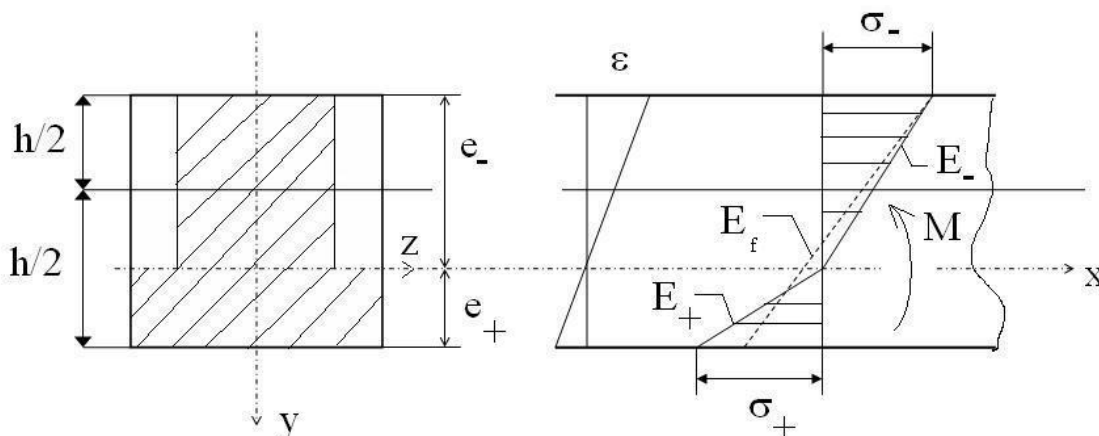


Obr. 63. Graf poměr  $\eta^2$  při různých teplotách

Hodnota koeficientu se pohybuje mezi 0,5 až 0,7 a pro směr L a T se většinou shoduje.

## 11.2 Návrh strukturního modelu mechanického chování laminátu

Při návrhu strukturního modelu, vycházíme z bimodulárního chování laminátu - viz. kapitola 3. Pokusíme se dokázat možnost aplikace vztahu bimodulárního ohybu prutu vyztužených dlouhými vlákny na testované lamináty - kapitola 3.3.



Obr. 64. Model bimodulárního ohybu

Modul pružnosti v tlaku a tahu bereme jako známé hodnoty. Pokusíme se vypočítat modul pružnosti v ohybu, pomocí známých vztahu, týkajících se bimodulárního ohybu prutu vyztužených dlouhými vlákny.

$$\eta^2 = \frac{E_-}{E_+} \quad \eta = \sqrt{\frac{E_-}{E_+}} \quad (45)$$

$$\frac{E_{fA}}{E_+} = \left( \frac{2\eta}{1+\eta} \right)^2 \quad (46)$$

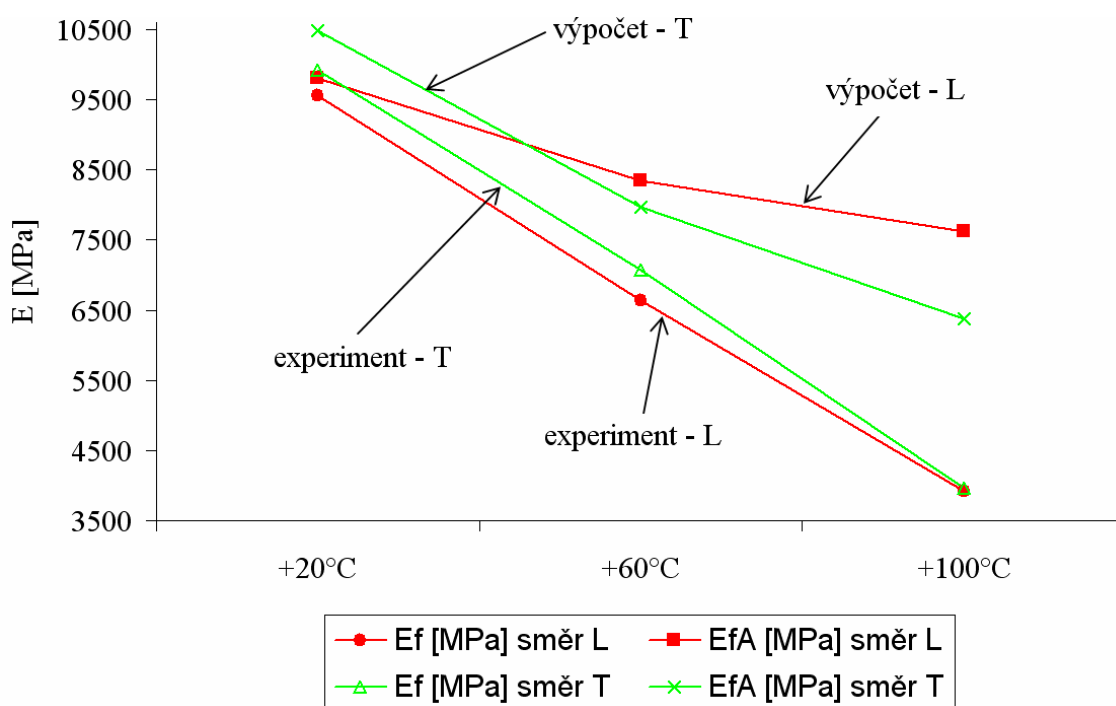
$$E_{fA} = \left( \frac{2\eta}{1+\eta} \right)^2 \cdot E_+ \quad (47)$$



## 11.2.1 Modul pružnosti v ohybu - analyticky vypočten pro S-4

Tab. 91. Porovnání modulů pružnosti v ohybu - data pro S-4

teplota	struktura S-4							
	tah $E_t$ ( $E_+$ ) [MPa]		tlak $E_d$ ( $E_-$ ) [MPa]		$E_f$ [MPa]	$E_{fA}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$E_{fA}$ [MPa]
	směr L	směr T	směr L	směr T	směr L	směr L	směr T	směr T
+20°C	12134	12864	8078	8706	9554	9799	9918	10483
+60°C	10959	10595	6555	6204	6641	8337	7075	7964
+100°C	10636	7642	5736	5407	3917	7628	3964	6380

 Legenda:  $E_f$  - experimentálně naměřený modul,  $E_{fA}$  - analyticky vypočtený modul


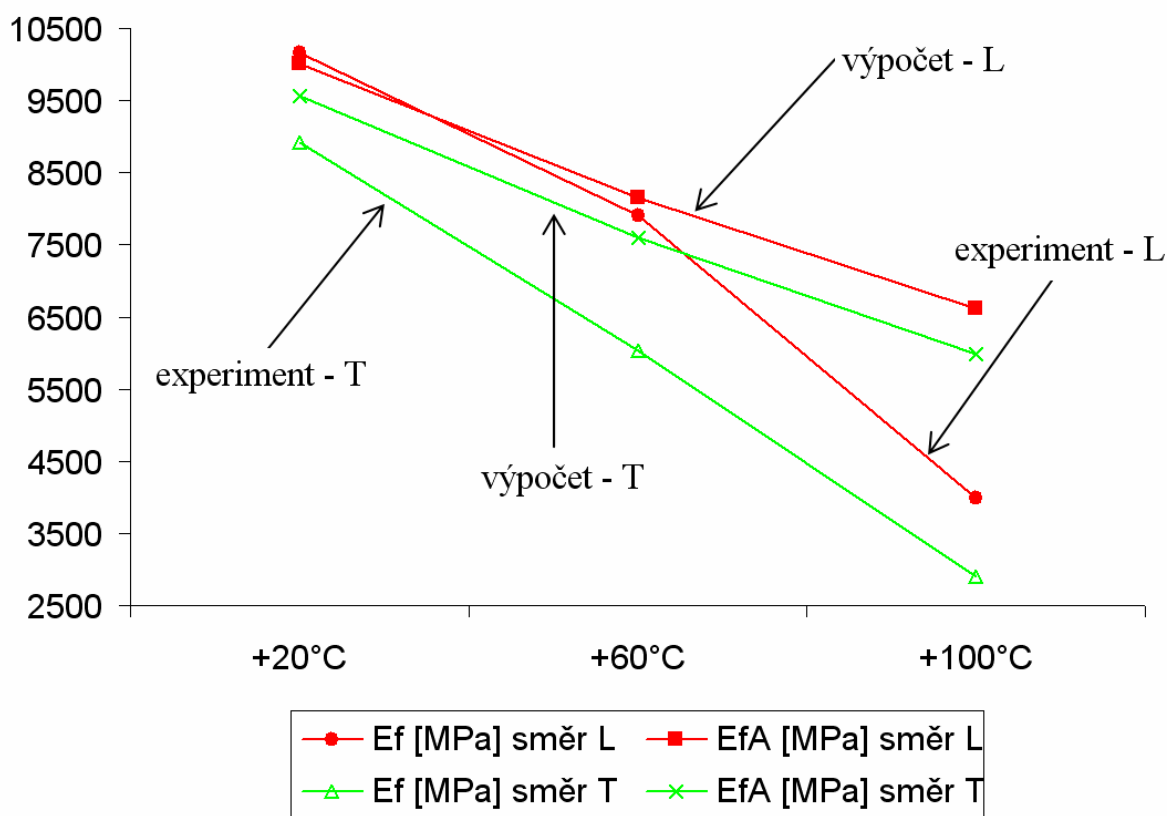
Obr. 65. Graf modulu pružnosti v ohybu analyticky vypočítaného a experimentálně naměřeného - porovnání dat pro S-4

## 11.2.2 Modul pružnosti v ohybu - analyticky vypočten pro S-8

Tab. 92. Porovnání modulů pružnosti v ohybu - data pro S-8

teplota	struktura S-8							
	tah $E_t$ ( $E_+$ ) [MPa]		tlak $E_d$ ( $E_-$ ) [MPa]		$E_f$ [MPa]	$E_{fA}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$E_{fA}$ [MPa]
	směr L	směr T	směr L	směr T	směr L	směr L	směr T	směr T
+20°C	13484	12077	7712	7767	10166	10001	8915	9568
+60°C	11179	10576	6214	5730	7898	8158	6026	7605
+100°C	8169	7361	5455	4957	3989	6608	2899	5982

 Legenda:  $E_f$  - experimentálně naměřený modul,  $E_{fA}$  - analyticky vypočtený modul

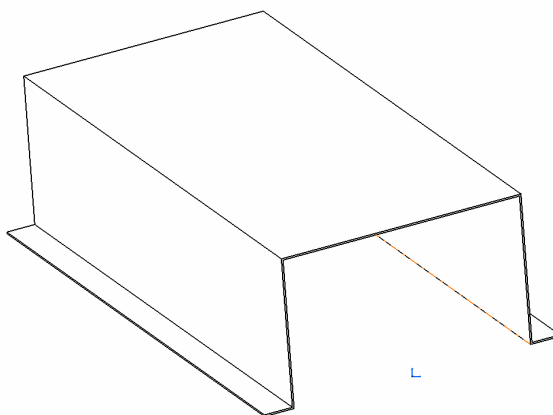


Obr. 66. Graf modulu pružnosti v ohybu analyticky vypočítaného a experimentálně naměřeného - porovnání dat pro S-8

I. Závěr: rozdíl mezi modulem pružnosti v ohybu experimentálně naměřeným a modulem pružnosti analyticky vypočteném dle rovnice 47 pro strukturu S-4 je zobrazen v tabulce (Tab. 91.) a grafu (Obr. 65.) a pro strukturu S-8 v tabulce (Tab. 92.) a grafu (Obr. 66.) Při teplotě +20°C lze považovat aplikaci bimodulární teorie za platnou neboť hodnoty se liší maximálně o 7%. Se vzrůstající teplotou již teorii nelze aplikovat - u teploty +60°C činí maximální rozdíl 26% a u teploty +100°C je maximální rozdíl až 106%. Příčinu vidím v měknutí matrice při vyšších teplotách, kde je ovlivněna soudržnost matrice a výztuže a do výsledku tak vstupují další ovlivňující faktory.

### 11.3 Model skořepinového krytu

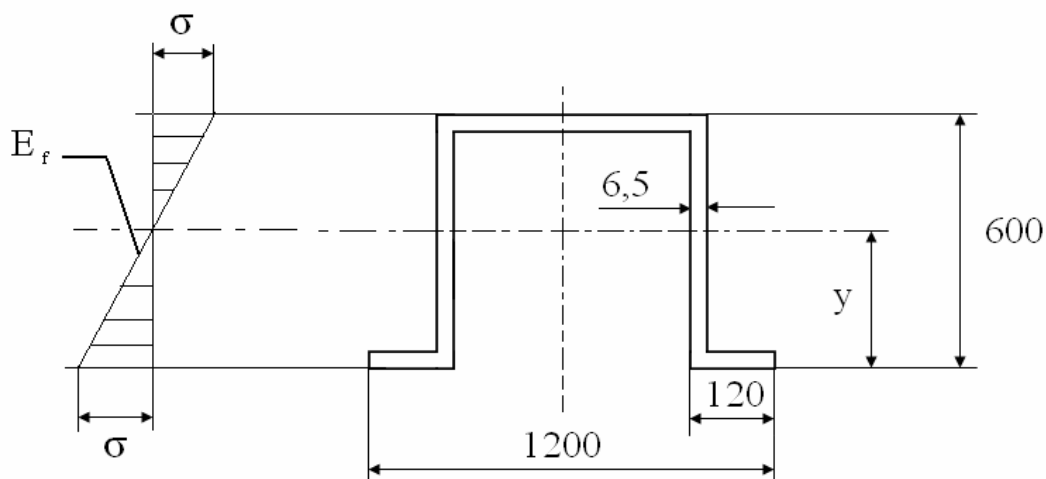
Navrhujeme skořepinový kryt obdélníkového průřezu. Šířku a výšku volíme dle krytů z praxe. Pokusíme se porovnat výsledky při klasické ohybové teorii – kompaktního materiálu a při užití bimodulární teorie ohybu – materiálu bimodulárního.



Obr. 67. 3D model krytu

Tab. 93. Hodnoty pro zvolený laminát

Struktura	S-4
Teplota	+20°C
Směr	L
Tloušťka lamin.	6,5 mm
$E_-$	8078 MPa
$E_+$	12134 MPa
$\sigma_{dM}$	188 MPa
$\sigma_{tM}$	199 MPa
$E_f$ ( $L_p = 200\text{mm}$ )	10667 MPa
$\eta^2$	0,67

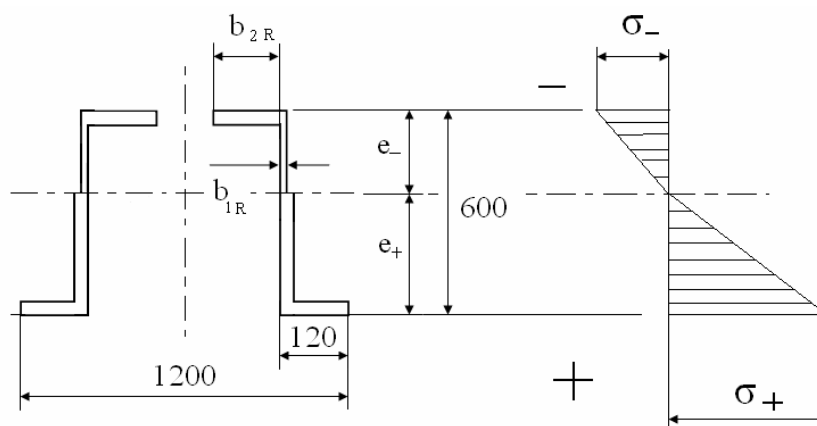


Obr. 68. Základní rozměry krytu

Hodnoty odečteny z programu Catia V5:

kvadratický moment:  $J = 0,000784619 \text{ m}^4$

poloha těžiště:  $y = 391,126 \text{ mm}$



Obr. 69. Základní rozměry krytu - po redukci šířek

$$b_{iR} = \frac{E_-}{E_+} \cdot b_i \quad (48)$$

$$b_{1R} = \frac{E_-}{E_+} \cdot b_1 = 4,33 \text{ mm}$$

$$b_{2R} = \frac{E_-}{E_+} \cdot b_2 = 319,55 \text{ mm}$$

Hodnoty odečteny z programu Catia V5 po redukci plochy:

redukovaný kvadratický moment:  $J_R = 0,000661431 \text{ m}^4 = 661431000 \text{ mm}^4$

poloha těžiště:  $e_+ = 349,074 \text{ mm}$ ,  $e_- = 250,926 \text{ mm}$

$$E_+ J_R \leftrightarrow E_f J \quad (49)$$

$$k_{iR} \leftrightarrow k_t$$

Z vypočtených výsledků vyplývá tuhost pro redukovaný – bimodulární materiál  $k_{iR} = 8,03$  a pro neredukovaný – nebimodulární materiál  $k_t = 8,37$ . Rozdíl mezi tuhostmi činí 4,1%.

Výpočet mezní ohybové únosnosti bimodulárního materiálu:

Mezní ohybový moment v tlaku:

$$M_- = \frac{\sigma_{dM} \cdot J_R}{\eta^2 \cdot e_-} = 739642621 \text{ Nmm} \quad (50)$$

Mezní ohybový moment v tahu:

$$M_+ = \frac{\sigma_{tM} \cdot J_R}{e_+} = 377068384 \text{ Nmm} \quad (51)$$

Výpočet napětí v profilu při mezním ohybovém momentu -  $M_+$  (menší z mezních ohybových momentů v tahu a tlaku):

Napětí v tlaku:

$$\sigma_{dM} = \eta^2 \cdot \frac{M \cdot e_-}{J_R} = 95,8 \text{ MPa} \quad (52)$$

Napětí v tahu:

$$\sigma_{tM} = \frac{M \cdot e_+}{J_R} = 199 \text{ MPa} \quad (53)$$

Z vypočtených hodnot mezní ohybové únosnosti vidíme, že průřez se poruší v tahu.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo analyzovat mechanického chování laminátových struktur. Na laminátu byly provedeny statické zkoušky v tahu, tlaku a v ohybu za různých teplot pro zjištění materiálových charakteristik. Z provedených experimentu vyplývají tyto výsledky a závěry.

U standardních zkoušek v tlaku, tahu a ohybu byly pozorovány změny mechanických charakteristik v závislosti na teplotě. Se zvyšující se teplotou klesá modul pružnosti a mez pevnosti. Vliv teploty nelze podcenit.

Vzdálenost podpěr má vliv na výsledky ohybové zkoušky u laminátů. Se zmenšující se vzdáleností podpěr roste vliv smykových sil. Se vzrůstajícím podílem smykového napětí se modul pružnosti snižují a mez pevnosti zvyšuje.

Při návrhu strukturního modelu, jsme vycházeli z bimodulárního chování laminátu. Porovnávali jsme modul pružnosti v ohybu experimentálně naměřený s modulem pružnosti v ohybu analyticky vypočteným. Při teplotě +20°C lze považovat aplikaci bimodulární teorie za platnou neboť hodnoty se liší maximálně o 7%. Se vzrůstající teplotou již teorii nelze aplikovat - u teploty +60°C činí maximální rozdíl 26% a u teploty +100°C je maximální rozdíl až 106%.

Naměřená data byla aplikována na model krytu a zjištěn mezní ohybový moment a odpovídající napětí. Z vypočtených hodnot mezní ohybové únosnosti jsme zjistili, že průřez se poruší v tahu.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] HAVEL, Miroslav. Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů.. *Kompozitní materiály* [online]. 2007 [cit. 2008-04-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.havel-composites.com/>>.
- [2] *POLYTEX COMPOSITE, s.r.o.* [online]. Karviná-Nové Město : c2002 [cit. 2008-02-03]. Dostupný z WWW: <[www.polytex.cz](http://www.polytex.cz)>.
- [3] LAŠ, Vladislav. MECHANIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ : 1.Úvod, základní pojmy,klasifikace. *ZCU* [online]. 2006 [cit. 2008-02-11].
- [4] JANČÁŘ , Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno : VUT, 2003. 193 s. ISBN 8021424435.
- [5] TOMKOVÁ, Blanka. Vlastnosti na rozhraní vlákna - matrice : 8. přednáška z předmětu Kompozity s textilní výztuží. *Katedra textilních materiálů* [online]. 2006 [cit. 2008-02-13].
- [6] Informace o povrchové ochraně Gel-Coat, Melinex a Tedlar. *Lanit Plast, s.r.o.* [online]. 2007 [cit. 2008-02-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.lanitplast.cz/prospekty/gel-coat%20preklad.pdf>>.
- [7] MATAJS, David. *Studium ohybového chování laminátových struktur na bázi skelných rohoží*. Zlín, 2000. 84 s. VUT Brno. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.
- [8] MICHNA, Štefan. *Kompozitní materiály. Technické materiály II* [online]. 2007 [cit. 2008-03-31]. Dostupný z WWW: <[http://stefanmichna.com/download/technicke-materialy\\_II/kompozitni\\_materialy.ppt](http://stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.ppt)>.
- [9] ŠTERNŠCHUSS, A., et al. *Polyesterové skelné lamináty*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1959. 141 s.
- [10] HORKÝ, Vladislav. *Studium mechanických charakteristik laminátové stěny*. Zlín, 2006. 106 s. UTB Zlín. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc..
- [11] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*. 1. vyd. Zlín : Univerzita Tomáše Bati, 2005. 112 s. ISBN 80-7318-287-4.

- [12] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*. 1. vyd. Brno : VUT Brno, 1988. 168 s.
- [13] KOŘÍNEK, Zdeněk. Lamináty - mechanika. *Kompozity* [online]. 2007 [cit. 2008-04-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/>>.
- [14] AGARWAL, Bhagwan D., BROUTMAN, Lawrence J. *Vláknové kompozity*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1987. s. 294.
- [15] VALENDIN, M.: *Mechanické chování těles II : Laboratorní cvičení*. 1. vyd. Zlín : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta technologická ve Zlíně, 1999. 125 s. ISBN 80-214-1479-0.
- [16] BRHEL, Marek. *Mechanické charakteristiky strukturního PP v tahu a ohybu*. Zlín, 2006. 95 s. UTB Zlín. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.
- [17] HARANGOZÓVÁ, Simona. *Studium a optimalizace mechanického chování laminátových krytů nádrží*. Zlín, 2006. 94 s. UTB Zlín. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.
- [18] [ŠUBA, Oldřich, ŽALUDEK , Milan. . *Mechanické chování laminátových prvků vystavených degradaci vnějším prostředím : Proceedings of the 24th International Scientific Conference Reinforced plastics*. [s.l.] : [s.n.], 2007. 9 s.
- [19] BERTOLDI, K., BIGONI, D., DRUGAN, W.J. Nacre: An orthotropic and bimodular elastic material. *COMPOSITES SCIENCE AND TECHNOLOGY* [online]. 2007 [cit. 2008-05-10]. Dostupný z WWW: <[http://www.ing.unitn.it/~bigoni/bertoldi\\_bigoni\\_drugan\\_mother\\_of\\_pearl.pdf](http://www.ing.unitn.it/~bigoni/bertoldi_bigoni_drugan_mother_of_pearl.pdf)>.
- [20] CONNERS, T.E., MEDVECZ, P.J. WOOD AS A BIMODULAR MATERIAL. *Institute of Paper Science and Technology Atlanta, Georgia* [online]. 1992 [cit. 2008-10-05]. Dostupný z WWW: <<http://smartech.library.gatech.edu/dspace/bitstream/1853/2115/1/tps-423.pdf>>.
- [21] CLARK, S.K. COMPOSITE THEORY APPLIED TO ELASTOMERS. *DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING AND APPLIED MECHANICS* [online]. 1986 [cit. 2008-10-05]. Dostupný z WWW: <[http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19870017602\\_1987017602.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19870017602_1987017602.pdf)>.



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\bar{x}$	Aritmetický průměr	-
$[\sigma]$	tenzor napětí	-
$[\epsilon]$	tenzor deformace	-
$[\epsilon]^0$	tenzor deformace ve střední ploše	-
$[A]$	matice tahové (membránové) tuhosti	-
$[B]$	matice vazebné tuhosti	-
$[C]$	matice poddajnosti	-
$[D]$	matice ohybové tuhosti	-
$[k]$	křivosti střední plochy po deformaci	-
$[m]$	matice ohybových momentů	-
$[n]$	matice membránových sil	-
$[S]$	matice tuhosti	-
$[T]$	transformační matice	-
a	tloušťka vzorku	mm
ASTM	American Society for Testing Materials	-
b	šířka vzorku	mm
$b_i$	šířka, tloušťka	mm
$b_{iR}$	redukovaná šířka, tloušťka	mm
C sklo	chemicky odolné sklo	-
CVD	chemická depozice z plynné fáze	-
d	index pro tlak	-
E	modul pružnosti	MPa
e.	vzdálenost od neutrální osy	mm
E sklo	bezalkalické sklo	-

$E^{**}$	válcový modul	MPa
$e_+$	vzdálenost od neutrální osy	mm
ECR	chemický odolné sklo	-
$E_d, E_c$	modul pružnosti v tlaku	MPa
$E_f$	modul pružnosti v ohybu	MPa
$E_{fA}$	vypočtený modul pružnosti v ohybu	MPa
$E_t, E_+$	modul pružnosti v tahu	MPa
$F$	síla	N
$f$	index pro ohyb	-
$F_M$	síla na mezi pevnosti	N
$G$	modul pružnosti ve smyku (torze)	MPa
$h$	výška (tloušťka)	mm
$J$	kvadratický moment	$m^4$
$J_R$	redukovaný kvadratický moment	$m^4$
$k$	označení vrstvy laminátu	-
$k_t$	tuhost v ohybu	-
$k_{tR}$	tuhost v ohybu redukovaného průřezu	-
$L$	podélný směr (lengthwise)	-
$L_p$	rozpětí podpor	mm
$n$	počet měření-vzorků	-
$n$	počet vzorků - měření	-
$n_{min}$	minimální počet vzorků	-
PE	Polyethylen	-
PESL	polyesterové lamináty	-
PP	Polypropylen	-

s	směrodatná odchylka	-
S-4	struktura laminátu	-
S-8	struktura laminátu	-
$s_o$	výběrová směrodatná odchylka	-
T	příčný směr (transverse)	-
t	index pro tah	-
$u_p$	konstanta	-
v	rychlost	mm/min
x	aritmetický průměr – v tabulkách	-
x,y,z	označení os souřadného systému	-
$x_i$	i-té měření	-
$\Delta_i$	odchylka i-tého měření od aritmetického průměru	-
$\Delta l$	celková deformace – prodloužení vzorku	mm
$\Delta l_M$	deformace na mezi pevnosti	mm
$\varepsilon$	poměrná deformace	-
$\eta^2$	koeficient bimodularity	-
$\nu$	Poissonovo číslo	-
$\sigma$	napětí	MPa
$\sigma_{dM}$	mez pevnosti v tlaku	MPa
$\sigma_{fM}$	mez pevnosti v ohybu	MPa
$\sigma_{tM}$	mez pevnosti v tahu	MPa
$\varphi$	úhel svírající osy laminy	°
M	mezní ohybový moment	Nmm
$\varepsilon_M$	poměrná deformace na mezi pevnosti	%
v	variační koeficient	-

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Synergické chování složek kompozitu</i> .....	13
<i>Obr. 2. Aramidové, uhlíkové a skleněné vlákno</i> .....	14
<i>Obr. 3. Schématické dělení nejčastěji využívaných vláken [4]</i> .....	15
<i>Obr. 4. Graf porovnání cen vláken [3]</i> .....	16
<i>Obr. 5. Skelná příze - roving</i> .....	17
<i>Obr. 6. Typy tkaní</i> .....	18
<i>Obr. 7. Schéma výroby skleněných vláken</i> .....	19
<i>Obr. 8. Povrchová úprava gel – coat</i> .....	23
<i>Obr. 9. Ruční kladení</i> .....	25
<i>Obr. 10. Lisování za tepla</i> .....	26
<i>Obr. 11. Schéma navíjecího zařízení</i> .....	27
<i>Obr. 12. Tažený profil</i> .....	27
<i>Obr. 13. Pultruzní linka</i> .....	28
<i>Obr. 14. Vojenská loď</i> .....	29
<i>Obr. 15. Vojenské letadlo</i> .....	30
<i>Obr. 16. Příklad laminátového zastřešení</i> .....	31
<i>Obr. 17. Kladení lamin</i> .....	33
<i>Obr. 18. Mechanické chování a) izotropního, b,c) ortotropního, d) obecně anizotropního plošného prvku</i> .....	34
<i>Obr. 19. Příklad dvousóse napjatosti</i> .....	35
<i>Obr. 20. Mechanické chování ortotropní laminy vzhledem k libovolným osám</i> .....	37
<i>Obr. 21. Složky deformace</i> .....	39
<i>Obr. 22. Ekvivalentní systém sil a momentů</i> .....	40
<i>Obr. 23. Označení vrstev</i> .....	41
<i>Obr. 24. Schéma nesymetrického čtyřvrstvého laminátu</i> .....	44
<i>Obr. 25. Schéma symetrického hybridního laminátu</i> .....	45
<i>Obr. 26. Schéma laminátu</i> .....	45
<i>Obr. 27. Typická bimodulární odezva pro jednosměrně vyztuženou laminu [21]</i> .....	47
<i>Obr. 28. Princip bimodulárního ohybu</i> .....	48
<i>Obr. 29. Přípravek pro tlakovou zkoušku</i> .....	52

<i>Obr. 30. Model vrcholu trhliny ve vláknitém kompozitu, ukazující různé mechanismy poškození</i> .....	54
<i>Obr. 31. Struktura laminátu</i> .....	58
<i>Obr. 32. Struktura laminátu S-4</i> .....	59
<i>Obr. 33. Struktura laminátu S-8</i> .....	59
<i>Obr. 34. Zwick 145 655</i> .....	60
<i>Obr. 35. Zwick 145 655 s teplotní komorou</i> .....	61
<i>Obr. 36. Přídavná nádoba ke zkušebnímu stroji</i> .....	61
<i>Obr. 37. Schéma tahové zkoušky</i> .....	62
<i>Obr. 38. Zkouška tahem – připojený extenzometr</i> .....	63
<i>Obr. 39. Graf průměrných hodnot sérií #1 až # 4 – TAH</i> .....	65
<i>Obr. 40. Zkouška tahem v teplotní komoře</i> .....	67
<i>Obr. 41. Zkouška tahem v teplotní komoře při teplotě –30°C</i> .....	69
<i>Obr. 42. Graf výsledků tahových zkoušek – <math>E_t</math></i> .....	74
<i>Obr. 43. Graf výsledků tahových zkoušek – <math>\sigma_{tM}</math></i> .....	76
<i>Obr. 44. Schéma zkoušky tlakem</i> .....	77
<i>Obr. 45. Přípravek pro zkoušku tlakem</i> .....	78
<i>Obr. 46. Zkouška tlakem</i> .....	78
<i>Obr. 47. Graf průměrných hodnot sérií #1 až # 4 – TLAK</i> .....	81
<i>Obr. 48. Graf průměrných hodnot sérií #1 až # 4 – TLAK - při teplotě +60°C</i> .....	84
<i>Obr. 49. Graf průměrných hodnot sérií #1 až # 4 – TLAK - při teplotě +100°C</i> .....	87
<i>Obr. 50. Graf výsledků tlakových – <math>E_d</math></i> .....	88
<i>Obr. 51. Graf výsledků tlakových – <math>\sigma_{dM}</math></i> .....	89
<i>Obr. 52. Schéma ohybové zkoušky</i> .....	91
<i>Obr. 53. Zkouška ohybem</i> .....	92
<i>Obr. 54. Graf průměrných hodnot sérií #1 až # 8 – OHYB</i> .....	96
<i>Obr. 55. Graf hodnot modulu pružnosti – vliv vzdálenosti podpěr</i> .....	97
<i>Obr. 56. Graf hodnot meze pevnosti – vliv vzdálenosti podpěr</i> .....	97
<i>Obr. 57. Graf průměrných hodnot sérií #1 až # 4 – OHYB - při teplotě –30°</i> .....	100
<i>Obr. 58. Zkouška ohybem v teplotní komoře</i> .....	101
<i>Obr. 59. Graf průměrných hodnot sérií #1 až # 4 – OHYB - při teplotě +60°</i> .....	104
<i>Obr. 60. Graf průměrných hodnot sérií #1 až # 4 – OHYB - při teplotě +100°</i> .....	107
<i>Obr. 61. Graf výsledků ohybových zkoušek – <math>E_f</math></i> .....	108

---

<i>Obr. 62. Graf výsledků ohybových zkoušek – <math>\sigma_{fM}</math>.....</i>	110
<i>Obr. 63. Graf poměr <math>\eta^2</math> při různých teplotách.....</i>	111
<i>Obr. 64. Model bimodulárního ohybu.....</i>	112
<i>Obr. 65. Graf modulu pružnosti v ohybu analyticky vypočítaného a experimentálně naměřeného - porovnání dat pro S-4.....</i>	113
<i>Obr. 66. Graf modulu pružnosti v ohybu analyticky vypočítaného a experimentálně naměřeného - porovnání dat pro S-8.....</i>	114
<i>Obr. 67. 3D model krytu.....</i>	115
<i>Obr. 68. Základní rozměry krytu.....</i>	115
<i>Obr. 69. Základní rozměry krytu - po redukci šířek.....</i>	116

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Volba vlákna dle konstrukčních požadavků [5]</i> .....	15
<i>Tab. 2. Vlastnosti vybraných výztuží – vláken [3]</i> .....	16
<i>Tab. 3. Volba matrice dle konstrukčních požadavků [5]</i> .....	21
<i>Tab. 4. Vlastnosti vybraných pojiv – matrice [3]</i> .....	21
<i>Tab. 5. Poměr <math>E_t/E_d</math> pro různé materiály</i> .....	46
<i>Tab. 6. Soupis vzorků k dispozici s jejich rozměry</i> .....	58
<i>Tab. 7. Legenda struktury</i> .....	59
<i>Tab. 8. Složení struktur S-4</i> .....	59
<i>Tab. 9. Složení struktur S-8</i> .....	59
<i>Tab. 10. Tahová zkouška – souhrn</i> .....	63
<i>Tab. 11. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L</i> .....	64
<i>Tab. 12. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T</i> .....	64
<i>Tab. 13. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L</i> .....	64
<i>Tab. 14. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T</i> .....	64
<i>Tab. 15. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TAH</i> .....	65
<i>Tab. 16. Tahová zkouška v teplotní komoře při teplotě <math>-30^{\circ}\text{C}</math> – souhrn</i> .....	66
<i>Tab. 17. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě <math>-30^{\circ}\text{C}</math></i> .....	68
<i>Tab. 18. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě <math>-30^{\circ}\text{C}</math></i> .....	68
<i>Tab. 19. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě <math>-30^{\circ}\text{C}</math></i> .....	68
<i>Tab. 20. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě <math>-30^{\circ}\text{C}</math></i> .....	68
<i>Tab. 21. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TAH - při teplotě <math>-30^{\circ}\text{C}</math></i> .....	69
<i>Tab. 22. Tahová zkouška v teplotní komoře při teplotě <math>+60^{\circ}\text{C}</math> – souhrn</i> .....	70
<i>Tab. 23. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě <math>+60^{\circ}\text{C}</math></i> .....	70
<i>Tab. 24. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě <math>+60^{\circ}\text{C}</math></i> .....	70
<i>Tab. 25. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě <math>+60^{\circ}\text{C}</math></i> .....	71
<i>Tab. 26. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě <math>+60^{\circ}\text{C}</math></i> .....	71
<i>Tab. 27. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TAH - při teplotě <math>+60^{\circ}\text{C}</math></i> .....	71
<i>Tab. 28. Tahová zkouška v teplotní komoře při teplotě <math>+100^{\circ}\text{C}</math> – souhrn</i> .....	72
<i>Tab. 29. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě <math>+100^{\circ}\text{C}</math></i> .....	72

Tab. 30. Tahové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě +100°C.....	72
Tab. 31. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě +100°C.....	73
Tab. 32. Tahové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě +100°C.....	73
Tab. 33. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TAH - při teplotě +100°C .....	73
Tab. 34. Výsledky tahových zkoušek .....	74
Tab. 35. Výsledky tahových zkoušek – $E_t$ .....	74
Tab. 36. Výsledky tahových zkoušek – $\sigma_{tM}$ .....	75
Tab. 37. Tlaková zkouška - souhrn .....	79
Tab. 38. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T.....	79
Tab. 39. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L.....	80
Tab. 40. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T.....	80
Tab. 41. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L.....	80
Tab. 42. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TLAK.....	80
Tab. 43. Tlaková zkouška v teplotní komoře při teplotě +60°C – souhrn .....	82
Tab. 44. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě +60°C.....	82
Tab. 45. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě +60°C.....	82
Tab. 46. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě +60°C.....	83
Tab. 47. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě +60°C.....	83
Tab. 48. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TLAK - při teplotě +60°C .....	83
Tab. 49. Tlaková zkouška v teplotní komoře při teplotě +100°C – souhrn .....	85
Tab. 50. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě +100°C.....	85
Tab. 51. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě +100°C.....	85
Tab. 52. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě +100°C.....	86
Tab. 53. Tlakové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě +100°C.....	86
Tab. 54. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – TLAK - při teplotě +100°C .....	86
Tab. 55. Výsledky tlakových zkoušek .....	87
Tab. 56. Výsledky tlakových zkoušek – $E_d$ .....	88
Tab. 57. Výsledky tlakových zkoušek - $\sigma_{dM}$ .....	89
Tab. 58. Ohybová zkouška - souhrn.....	92
Tab. 59. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - pro $L_p = 64$ mm .....	93



Tab. 60. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - pro $L_p = 64 \text{ mm}$ .....	93
Tab. 61. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - pro $L_p = 64 \text{ mm}$ .....	93
Tab. 62. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - pro $L_p = 64 \text{ mm}$ .....	93
Tab. 63. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - pro $L_p = 200 \text{ mm}$ .....	94
Tab. 64. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - pro $L_p = 200 \text{ mm}$ .....	94
Tab. 65. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - pro $L_p = 200 \text{ mm}$ .....	94
Tab. 66. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - pro $L_p = 200 \text{ mm}$ .....	94
Tab. 67. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 8 – OHYB.....	95
Tab. 68. Ohybová zkouška v teplotní komoře při teplotě $-30^\circ\text{C}$ – souhrn.....	98
Tab. 69. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě $-30^\circ\text{C}$ .....	98
Tab. 70. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě $-30^\circ\text{C}$ .....	99
Tab. 71. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě $-30^\circ\text{C}$ .....	99
Tab. 72. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě $-30^\circ\text{C}$ .....	99
Tab. 73. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – OHYB - při teplotě $-30^\circ\text{C}$ .....	100
Tab. 74. Ohybová zkouška v teplotní komoře při teplotě $+60^\circ\text{C}$ – souhrn.....	102
Tab. 75. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě $+60^\circ\text{C}$ .....	102
Tab. 76. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě $+60^\circ\text{C}$ .....	102
Tab. 77. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě $+60^\circ\text{C}$ .....	103
Tab. 78. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě $+60^\circ\text{C}$ .....	103
Tab. 79. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – OHYB - při teplotě $+60^\circ\text{C}$ .....	103
Tab. 80. Ohybová zkouška v teplotní komoře při teplotě $+100^\circ\text{C}$ – souhrn.....	105
Tab. 81. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr L - při teplotě $+100^\circ\text{C}$ .....	105
Tab. 82. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-4 směr T - při teplotě $+100^\circ\text{C}$ .....	105
Tab. 83. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr L - při teplotě $+100^\circ\text{C}$ .....	105
Tab. 84. Ohybové vlastnosti pro strukturu S-8 směr T - při teplotě $+100^\circ\text{C}$ .....	106
Tab. 85. Shrnutí vybraných průměrných hodnot jednotlivých sérií 1 až 4 – OHYB - při teplotě $+100^\circ\text{C}$ .....	106
Tab. 86. Výsledky ohybových zkoušek.....	107
Tab. 87. Výsledky ohybových zkoušek – $E_f$ .....	108
Tab. 88. Výsledky ohybových zkoušek – $\sigma_{fM}$ .....	109

---

<i>Tab. 89. Poměr <math>\eta^2</math> pro strukturu S-4.....</i>	111
<i>Tab. 90. Poměr <math>\eta^2</math> pro strukturu S-8.....</i>	111
<i>Tab. 91. Porovnání modulů pružnosti v ohybu - data pro S-4.....</i>	113
<i>Tab. 92. Porovnání modulů pružnosti v ohybu - data pro S-8.....</i>	113
<i>Tab. 93. Hodnoty pro zvolený laminát.....</i>	115