

# Mechanické chování laminátových struktur při nízkocyklovém namáhání

Bc. Josef Beníček

---

Diplomová práce  
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

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. Josef BENÍČEK**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**  
  
Téma práce: **Mechanické chování laminátových struktur při nízkocyklovém namáhání**

### Zásady pro vypracování:

1. Vypracujete literární studii na dané téma
2. Připravte zkoušky v nízkocyklové únavě v ohybu a tahu vzorků laminátových stěn dané struktury
3. Experimentálně vyšetřete mechanické charakteristiky laminátových stěn
4. Získané výsledky vyhodnoťte a stanovte doporučení pro aplikace

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

JANČAŘ, 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 vlastnosti skelných laminátů, zkoušení laminátů v cyklickém namáhání a možnosti využití laminátů.

V praktické části diplomové práce jsem se zabýval problematikou cyklického zatěžování laminátů. Při zjišťování materiálových vlastností jako je modul pružnosti a mez pevnosti, byly prováděny cyklické ohybové a tahové zkoušky. Následně byly dané výsledky porovnány s výchozím stavem, kde jsem se pokusil prokázat určitou závislost modulu pružnosti na počtu cyklů.

Klíčová slova: skelný laminát, ohyb, tah, mechanické vlastnosti

## **ABSTRACT**

This Master thesis describes tensile properties of fiber-glass laminates, their cycle strain testing and possibilities of utilization.

Experimental part of the thesis, describes the problems of cycle strain fatigue of fiber-glass. For determination of material properties as the modulus of elasticity and strength, cycle bend and cycle traction testing were performed. Subsequently the results were compared with the properties in initial stage, where I tried to demonstrate the dependence of the modulus of elasticity on the number of cycles.

Keywords: glass-fiber laminates, bend, traction, cycle strain fatigue, mechanical properties

**Motto:** *Vykonávat věc, které se bojíme, je první krok k úspěchu.*

### **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi pomáhali při tvorbě této práce. Za cenné rady a připomínky děkuji svému vedoucím diplomové práce doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc a Ing. M. Žaludkovi, PhD. Dále děkuji své rodině za morální a materiální podporu v průběhu celého studia, Bc. M. Brhelovi a Ing. V. Baránkovi za pomoc při měření a zpracovávání výsledků, Ing. L. Beníčkoví za rady a pomoc při překladu.

Zvláštní poděkování patří Ing. Martině Kalkové, která mi byla velkou oporou při studiu i u psaní téhle práce.

### **Prohlášení**

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>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 LITERÁRNÍ STUDIE LAMINÁTŮ</b> .....	<b>13</b>
1.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY KOMPOZITŮ.....	13
1.1.1 Matrice kompozitů.....	13
1.1.2 Výztuže kompozitů.....	15
1.2 STRUKTURA KOMPOZITU - KLASIFIKACE KOMPOZITŮ .....	16
1.3 ANALÝZA ORTOTROPNÍCH VRSTEV KOMPOZITŮ (LAMIN).....	17
1.4 ELASTICKÉ VLASTNOSTI LAMINÁTŮ .....	17
1.5 PAYNŮV EFEKT .....	18
1.6 ZÁPIS (KÓDOVÁNÍ) ORIENTACE LAMINÁTŮ .....	18
1.7 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	19
<b>2 SLOŽENÍ SKLENÝCH LAMINÁTŮ</b> .....	<b>21</b>
2.1 SKLENĚNÉ VÝZTUŽE .....	21
2.2 SKLENĚNÉ PRAMENCE .....	23
2.3 SKLENĚNÉ TKANINY .....	23
2.4 SKLENĚNÉ ROHOŽE.....	23
2.5 POLYESTEROVÉ PRYSKYŘICE .....	23
2.5.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice.....	24
2.6 EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE .....	25
2.7 GELCOATOVÁ A TOPCOATOVÁ VRSTVA .....	26
2.7.1 Aplikace gelcoatu .....	27
<b>3 TECHNOLOGIE VÝROBY SKLENÝCH LAMINÁTŮ</b> .....	<b>28</b>
3.1 LAMINOVÁNÍ.....	28
3.1.1 Technologie laminování .....	28
3.2 RUČNÍ KLADENÍ .....	31
3.3 NAVÍJENÍ .....	32
<b>4 ÚNAVOVÁ MECHANIKA LAMINÁTŮ</b> .....	<b>34</b>
4.1 MECHANIZMY ABSORPCE ENERGIE A ZPŮSOBY PORUŠENÍ.....	36
4.1.1 Přetrhávání vláken .....	37
4.1.2 Přetvoření a trhlinkování matrice .....	37
4.1.3 Oddělování vláken.....	38
4.1.4 Vytahování vláken.....	38
4.1.5 Delaminační trhliny .....	39
<b>5 MECHANICKÉ ZKOUŠKY DYNAMICKÉ ÚNAVOVÉ</b> .....	<b>40</b>
5.1 ZKOUŠENÍ ODOLNOSTI MATERIÁLU Z HLEDISKA ÚNAVY.....	40
5.2 VLIV KRÁTKODOBÉHO CYKLICKÉHO PŘETĚŽOVÁNÍ.....	41
5.2.1 Označování cyklického namáhání .....	42
<b>6 STATICKÉ MECHANICKÉ ZKOUŠKY</b> .....	<b>44</b>

6.1	ZKOUŠKA TAHEM .....	44
6.1.1	Tahová křivka.....	45
<b>7</b>	<b>ZKOUŠKA OHYBEM.....</b>	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>SUMARIZACE TEORETICKÉ ČÁSTI A STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI.....</b>	<b>51</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>52</b>
<b>9</b>	<b>ZKUŠEBNÍ VZORKY A ZAŘÍZENÍ PRO EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY .....</b>	<b>53</b>
9.1	STRUKTURA A SLOŽENÍ LAMINÁTOVÝCH STĚN S4 .....	53
9.2	STRUKTURA A SLOŽENÍ LAMINÁTOVÝCH STĚN S8.....	54
<b>10</b>	<b>STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ TAHEM.....</b>	<b>55</b>
10.1	NASTAVENÉ PARAMETRY PRO ZKOUŠKU TAHEM.....	55
10.1.1	Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 20 °C .....	57
10.1.2	Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě + 20 °C .....	57
10.1.3	Shrnutí výsledků tahových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě + 20 °C .....	58
10.2	ZKOUŠKA TAHEM V TEPLITNÍ KOMOŘE PŘI TEPLITĚ + 60 °C .....	59
10.2.1	Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 60 °C .....	59
10.2.2	Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě + 60 °C .....	59
10.2.3	Shrnutí výsledků tahových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě + 60 °C .....	60
10.3	ZKOUŠKA TAHEM V TEPLITNÍ KOMOŘE PŘI + 100 °C .....	61
10.3.1	Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 100 °C .....	61
10.3.2	Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě + 100 °C .....	61
10.3.3	Shrnutí výsledků tahových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě + 100 °C .....	62
10.4	ZKOUŠKA TAHEM V TEPLITNÍ KOMOŘE PŘI TEPLITĚ - 30 °C.....	63
10.4.1	Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě - 30 °C.....	64
10.4.2	Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě -30 °C.....	65
10.4.3	Shrnutí výsledků tahových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě - 30 °C .....	65
10.5	SHRUTÍ A DISKUZE VÝLEDKŮ TAHOVÝCH ZKOUŠEK PRO STRUKTURY S4 A S8	66
<b>11</b>	<b>STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ OHYBEM.....</b>	<b>70</b>
11.1	NASTAVENÉ PARAMETRY PRO ZKOUŠKU OHYBEM .....	70
11.1.1	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 20 °C, vzdálenost podpěr 64 mm .....	71
11.1.2	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě + 20 °C, vzdálenost podpěr 64 mm .....	71
11.1.3	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 20 °C, vzdálenost podpěr 200 mm .....	72
11.1.4	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 20 °C, vzdálenost podpěr 200 mm .....	73
11.1.5	Shrnutí a diskuze výsledků ohybových zkoušek pro vzdálenosti podpěr 64 mm a 200 mm, struktur S4 a S8, při teplotě + 20 °C .....	74

11.2	ZKOUŠKA OHYBEM V TEPLONÍ KOMOŘE PŘI TEPLOTĚ + 60 °C.....	76
11.2.1	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 60 °C .....	76
11.2.2	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě + 60 °C .....	76
11.2.3	Shrnutí výsledků ohybových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě + 60 °C .....	77
11.3	ZKOUŠKA OHYBEM V TEPLONÍ KOMOŘE PŘI TEPLOTĚ + 100 °C.....	78
11.3.1	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 100 °C .....	78
11.3.2	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě + 100 °C .....	78
11.3.3	Shrnutí výsledků ohybových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě +100°C .....	79
11.4	ZKOUŠKA OHYBEM V TEPLONÍ KOMOŘE PŘI TEPLOTĚ - 30 °C .....	80
11.4.1	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě - 30 °C .....	81
11.4.2	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě - 30 °C .....	81
11.4.3	Shrnutí výsledků ohybových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě - 30 °C .....	82
11.1	SHRUTÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ OHYBOVÝCH ZKOUŠEK PRO STRUKTURY S4 A S8.....	83
<b>12</b>	<b>STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ CYKlickÝM TAHEM.....</b>	<b>87</b>
12.1	NASTAVENÉ PARAMETRY PRO ZKOUŠKU CYKlickÝM TAHEM.....	87
12.1.1	Výsledky cyklických tahových zkoušek pro strukturu S4 ve směru L, při hodnotě zatížení 75 % F <sub>M</sub> , tj. 14975 N.....	88
12.1.2	Výsledky cyklických tahových zkoušek pro strukturu S4 ve směru T, při hodnotě zatížení 75 % F <sub>M</sub> , tj. 13113 N.....	89
12.1.3	Výsledky cyklických tahových zkoušek pro strukturu S8 ve směru L, při hodnotě zatížení 75 % F <sub>M</sub> , tj. 12631 N.....	90
12.1.4	Výsledky cyklických tahových zkoušek pro strukturu S8 ve směru T, při hodnotě zatížení 75 % F <sub>M</sub> , tj. 10835 N.....	91
12.2	SHRUTÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ CYKlickÝCH TAHOVÝCH ZKOUŠEK PRO STRUKTURY S4 A S8.....	92
<b>13</b>	<b>STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ CYKlickÝM OHYBEM.....</b>	<b>93</b>
13.1	NASTAVENÉ PARAMETRY PRO ZKOUŠKU CYKlickÝM OHYBEM .....	93
13.1.1	Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 ve směru L, při hodnotě zatížení 75 % F <sub>M</sub> , tj. 1390 N .....	94
13.1.2	Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 ve směru L, při hodnotě zatížení 87,5 % F <sub>M</sub> , tj. 1620 N.....	95
13.1.3	Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 ve směru T, při hodnotě zatížení 75 % F <sub>M</sub> , tj. 1170 N .....	96
13.1.4	Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 ve směru T, při hodnotě zatížení 87,5 % F <sub>M</sub> , tj. 1365 N.....	97
13.1.5	Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S8 ve směru L, při hodnotě zatížení 75 % F <sub>M</sub> , tj. 2193 N .....	98
13.1.6	Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S8 ve směru L, při hodnotě zatížení 87,5 % F <sub>M</sub> , tj. 2559 N.....	99
13.1.7	Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S8 ve směru T, při hodnotě zatížení 75 % F <sub>M</sub> , tj. 2123 N .....	100



13.1.8	Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S8 ve směru T, při hodnotě zatížení 87,5 % $F_M$ , tj. 2476 N.....	101
13.2	SHRNUTÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ CYKlickÝCH OHYBOVÝCH ZKOUŠEK PRO STRUKTURY S4 A S8.....	102
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>104</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>106</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>108</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>111</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>113</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>116</b>

## ÚVOD

Během vývoje lidské společnosti si člověk osvojil dovednost používat nejrůznější materiály jako kámen, bronz, železo, dřevo či keramiku. Zvládnutí výroby a použití těchto materiálů vždy posunulo úroveň uspokojování potřeb člověka a potažmo i úroveň techniky na kvalitativně vyšší úroveň. Velmi názorně lze tento vývoj dokumentovat u sportovních potřeb, jakými jsou například lyže či tenisové rakety, u lékařských zařízení a pomůcek či u dopravních prostředků. Nové materiály tak člověku otevírají i nové horizonty a posouvají bariéry jeho vývoje kupředu. Nové materiály mohou do značné míry přispět i k řešení globálních problémů lidstva jako je hlad či zhoršující se životní prostředí. Ve vývoji nových materiálů je zakotven i aktivní přístup k ochraně životního prostředí.

V současné době mají projektanti, designéři, umělci a další profese k dispozici přes 15 tisíc různých materiálů nabízených ve stovkách modifikací. Typickým a pravděpodobně nejdynamičtěji se rozvíjející skupinou nových materiálů jsou polymery a kompozity na jejich bázi. Polymerní materiály, laické veřejnosti splývající pod jednotné označení pryskyřice a plasty či umělé hmoty, se v masové míře začaly využívat v 50. letech, kdy se rozvinula petrochemie a suroviny pro výrobu těchto materiálů byly vedlejšími produkty výroby benzínu a jiných pohonných hmot.

Jestliže však do pryskyřice či plasty přidáme výztuž ve formě vláken, která mají vysokou tuhost, pevnost a teplotní stabilitu, získáme zcela novou, unikátní skupinu materiálů kombinujících synergicky mechanické vlastnosti výztuže se snadností zpracování polymerů. Tato skupina materiálů se nazývá vláknové polymerní kompozity či vláknové kompozity s polymerními matricemi.

To, čím vnímavého invenčního konstruktéra kompozity zaujmou, je řada velmi výhodných vlastností, jakými jsou především nízká hustota, velmi široký interval pevností a tuhostí. Velkou předností je i nekorozivnost, odolnost proti opotřebení, minimální tepelná vodivost, elektroizolační vlastnosti, prakticky nulový útlum elektromagnetických vln a vysoký útlum zvukových vln.

V praxi je třeba kromě výhod pečlivě zvážit i případné nevýhody kompozitů. Některé z nich nejsou skutečnými nevýhodami, spíše vyjadřují významnou odlišnost od tradičních materiálů způsobující komplikaci při konstruování s nimi.

Vláknové kompozity jsou obvykle vyráběny v jednom kroku zároveň s konečným tvarem dílce či výrobku. To znamená, že kompozitní materiály jsou do značné míry šity na míru konečné aplikaci, a to nejen svou strukturou a vlastnostmi, ale i výrobní technologií.

Použití těchto typů materiálu spadá především do oblasti chemického a potravinářského průmyslu, vodárenství, čistírenství apod. Chemická odolnost, zdravotní nezávadnost a další důležité vlastnosti jsou dány konkrétním typem použitého materiálu, zejména lami- načních pryskyřic. [19], [21]

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 LITERÁRNÍ STUDIE LAMINÁTŮ

## 1.1 Základní charakteristiky kompozitů

Kompozity jsou složené heterogenní systémy tvořené minimálně dvěma fázemi, obvykle rozdílného chemického složení, které se liší svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže se nazývá matrice.

K zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály musí být splněny následující podmínky:

- podíl výztuže musí být větší než 5 %
- vlastnosti výztuže a matrice se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice
- kompozit musí být připraven mísením složek

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů od těch nejmenších u nanokompozitů- rozměr výztuže (délka nebo průměr vlákna) se pohybuje v řádu  $10^0$  nm, dále pak u mikrokompazitů- největší příčný rozměr výztuže v rozmezí  $10^0$  až  $10^2$   $\mu$ m, které mají v průmyslu největší význam. Mikrokompazitní materiály mají oproti kovům a jejich slitinám menší hustotu a tedy příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě, čímž dosahují velké měrné pevnosti ( $\sigma_{pt}/\rho$ ) a měrného modulu ( $E/\rho$ ). Až po největší rozměry vyztužující fáze u makrokompazitů o velikosti příčného rozměru  $10^0$  a  $10^2$  mm a jsou používány především ve stavebnictví (železobeton, tj. beton zpevněný ocelovými lany nebo pruty), jiným příkladem mohou být plátované kovy, vícevrstvé materiály a konstrukce (např. chodníky a vozovky).[5], [8]

### 1.1.1 Matrice kompozitů

Matrice má v kompozitu několikerou úlohu: zajišťuje spojení výztuže v kompaktní celek (tvar a povrch výrobku), udržuje výztuž v požadovaném směru vůči namáhání, zprostředkovává přenos vnějších napětí na výztuž, odděluje vzájemně jednotlivé částice výztuže od sebe a zabraňuje tak spojitému šíření trhliny a nakonec chrání výztuž před účinky vnějšího zatížení.

Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních poruchách výztuže a její poměrné prodloužení při přetržení by mělo být větší než mezní prodloužení výztuže. Tento požadavek splňují pouze polymerní a kovové matrice. Na obr. 1 jsou schematicky znázorněny křivky napětí  $\sigma$ - poměrné prodloužení  $\varepsilon$  různých matric v porovnání s křivkou  $\sigma$ - $\varepsilon$  standardního uhlíkového vlákna.



Obr. 1. Schematické znázornění rozdílů v křivkách tahového napětí  $\sigma$ - poměrné prodloužení  $\varepsilon$  různých matric v porovnání s tahovým chováním standardního uhlíkového vlákna z PAN.

Keramické a uhlíkové matrice mají poměrné prodloužení při přetržení menší než standardní vlákno.

Je-li matrice v kapalném stavu (polymerní, kovová, skleněná a sklokeramická), tak je příprava kompozitů nejsnadnější.

Pokud požadujeme dokonalé obklopení výztuže matricí, pak je nezbytné, aby došlo k dobrému smáčení výztuže, tj. aby při vysoké energii volného povrchu výztuže měla kapalná matrice co nejmenší povrchovou energii. Povrchovou energii tavenin kovů lze zmenšovat vhodnými přísadami a smáčení výztuže podporovat úpravou jejího povrchu. Taveniny skel a sklokeramiky jsou málo tekuté, a proto je nutné vyvinout v kapalně matrici větší tlak, aby bylo dosaženo dobrého prosycení výztuže.

Matrice mohou být:

- Polymerní
- Kovové
- Skleněné, sklokeramické, keramické
- Uhlíkové

Kromě velké měrné pevnosti a měrného modulu pružnosti jsou kompozity s polymerní matricí používány také pro svou dobrou korozivzdornost a chemickou odolnost, dobré dielektrické vlastnosti a elektrickou nevodivost (pouze kompozity se skleněnými, křemennými nebo polymerními vlákny) a pro dobrou propustnost pro rentgenové záření (kompozity s uhlíkovými vlákny).

Polymerní matrice se dělí na dvě základní skupiny a to na reaktoplasty a termoplasty. Při výběru vhodné polymerní matrice rozhodují požadované mechanické vlastnosti kompozitu a jeho tepelná či chemická odolnost, eventuelně další vlastnosti (dobré kluzné vlastnosti, zdravotní nezávadnost, odolnost proti rozpouštědlům a agresivnímu prostředí).[7]

### 1.1.2 Výztuže kompozitů

Výztuž je možno považovat za takovou složku kompozitu, kvůli níž se kompozit vytvořil. Má některou výhodnou vlastnost, kterou je žádoucí uplatnit a využít v daných podmínkách, ale není to možné v elementární podobě výztuže přímo, protože jiné její vlastnosti to přímo neumožňují.

Výztuže se dají dělit podle různých hledisek: podle tvaru a velikosti, podle materiálu, podle použité matrice,... Při rozdělení podle tvaru a velikosti používáme štíhlostního poměru definovaného jako podíl největšího a nejmenšího rozměru výztuže.

Rozdělení podle tvaru a velikosti:

- Částice- které mají hodnotu štíhlostního poměru  $< 10$ 
  - Izometrické (tvar koule nebo elipsoidu) – štíhlostní poměr = 1
  - Anizometrické (tvar destiček nebo jehlic) – štíhlostní poměr  $> 1$
- Vlákna- které mají hodnotu štíhlostního poměru  $> 10$ 
  - Diskontinuální (krátká vlákna) – štíhlostní poměr řádově v desítkách až stovkách
  - Kontinuální (vláknové monokrystalů) - štíhlostní poměr =  $\infty$ 
    - Jednosměrné tkaniny
    - Tkaniny a rohože
    - Prostorové tkaniny a pleteniny

Na tvaru částice závisí vyztužení kompozitu (kulové částice  $<$  destičkové částice  $<$  skleněná vlákna), z toho vyplývá, že zpevnění roste se zvyšující se anizotropií částic.

Zvyšující se množství výztuže zesiluje jeho účinek, při překročení určité hranice však dochází ke ztrátě mechanických vlastností. Proto je nutná optimalizace složení kompozitu jak z hlediska použité matrice a výztuže, tak z hlediska plánovaného použití materiálu.

Částice mají buď přímo minerální původ a jsou jen průmyslově zpracovány, nejčastěji mechanickým mletím na nejvhodnější tvary a velikosti, nebo jsou průmyslově vyráběna z přírodních materiálů při chemické změně výchozích surovin. Tvar a velikost výztuží jsou dány procesem jejich výroby.

Výztuže ve tvaru vláken, mohou být dlouhá, nepřerušena po celé délce součástí, nebo krátká. Vlákna mohou být uspořádána v jednom směru, ve dvou směrech nebo chaoticky. Mohou být také uspořádána jako tkaniny nebo pletenina.

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 velmi malých příčných rozměrech menší. Vady existují jen v podobě submikroskopických až mikroskopických trhlinek a dutinek. Další příčinou, která byla experimentálně zjištěna, je přednostní nasměrování pevných kovalentních meziatomových vazeb ve směru podélné osy vlákna.[7]

## 1.2 Struktura kompozitu - klasifikace kompozitů

Prostorové způsoby uspořádání výztuže. Podle tohoto kritéria rozdělujeme kompozity na:

- Lamina (jedna vrstva kompozitu s tloušťkou zanedbatelnou ve srovnání se zbývajícími dvěma rozměry)
- Lamináty (střídání vrstev- lamin – s různými vzájemnými orientacemi výztuže)
  - lamináty s tkanou výztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna před prosycením pryskyřicí utkána běžnými nebo speciálními textilními technologiemi)
  - lamináty s netkanou výztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna zpracována do roun, aniž by byla tkána).



- tažené profily (komplikovanější tvary průřezu lineárních prvku s konstantním průřezem- profilů- s kombinací vyztužujících vláken a netkaných či tkaných rohoží, desky, trubky, komplikované profily)
- navíjené profily (kruhové nebo oválné tvary průřezu, tlakové nádoby či trubky)

Dalšími kritérii pro klasifikaci kompozitů mohou být technologie jejich výroby či typ použité matrice.[6]

### 1.3 Analýza ortotropních vrstev kompozitů (lamin)

Jediná vrstva laminátového kompozitu se nazývá obecně vrstva kompozitu či laminátu nebo jedním slovem lamina. Lamina smí mít minimální tloušťku 0,13 mm, v případě neimpregnované vrstvy, nebo 6 mm v případě tkaných vložek. Obvykle obsahuje jedinou vyztužnou vrstvu jednosměrnou či více směrnou. Jediná lamina je obvykle příliš tenká, aby se jí dalo použít přímo k jakékoliv technické aplikaci. Proto se spojuje dohromady více vrstev (lamin), vytvářejících novou strukturu, nazývanou laminát. Vlastnosti jednotlivých lamin a jejich orientace jsou voleny tak, abychom získali při konstrukci laminátu jeho požadované vlastnosti. Vlastnosti laminátu lze určovat ze znalosti vlastností jej vytvářejících lamin. Chování laminátu je pak určeno chováním jednotlivých lamin.[1]

### 1.4 Elastické vlastnosti laminátů

Kompozity s jednosměrně orientovanými vlákny jsou vhodné pouze v případech, kdy můžeme maximálně využít jejich předností, tedy v případě, že směr působení vnějších namáhání je ve směru orientace vláken. Taková situace nastává v praxi v relativně malém množství případů.

Z těchto důvodů je možno vytvořit vrstevnaté struktury s jednotlivými laminami ve formě UD orientovaných tenkých vrstev s různými směry orientace lokálních os vůči vnějšímu namáhání. Takové vrstevnaté materiály se nazývají lamináty. Speciálním případem kompozitu, na který lze pohlížet jako na dvouvrstvý či vícevrstvý laminát, přestože se ve skutečnosti jedná jen o jednu vrstvu, je lamina vyztužená vlákny ve formě běžných tkanin.[6]

## 1.5 Paynův efekt

*Pozn.: Paynův efekt je doposud znám jen pro kaučuk. Použil jsem zde tento článek, jelikož se domnívám, že může něco obdobného platit i pro lamináty.*

Paynův efekt může být kvantifikován podílem modulů  $G'$  při 15 % deformaci a  $G'$  při 0,5 % deformaci. V plněných materiálech a při nízké úrovni deformace (0,1- 15 %) moduly klesají s rostoucí úrovní deformace což je označováno jako Payne efekt. Pokud je vzorek okamžitě opakovaně zkoušen, hodnoty modulu jsou nižší, oproti vzorku, který byl původně testován. Tento měknoucí fenomén je označován jako Mullins efekt. Předpokládá se, že plnivo má vůči sobě nějakou afinitu a má tendenci tvořit aglomeráty s polymerní maticí. Tyto aglomeráty mají konečnou tuhost a pevnost, které přispívají ke složeným modulům. Když vzorek natahujeme, tyto aglomeráty jsou fyzikálně roztrhány a více nepřispívají k pevnosti směsi. To má za následek nižší hodnoty modulu, kdy vzorek je okamžitě znovu testován, a aglomeráty nemají dostatek času se přetvořit.

Disperze plniva může přispívat k Payne efektu. S dobrou disperzí je plnivo proniknuté do velmi malých částí a náhodně rozptýlené v polymerní maticí. Malé částičky obklopené polymerem se nemohou dostat do kontaktu s ostatními částmi plniva a tvořit tak ztužující síť, která může přispět k modulům směsi. S méně rozlámanými aglomeráty je méně rozdílů mezi moduly při deformaci 15 až 0,5 %. Paynův efekt je nižší s vyšším poměrem modulů při deformaci 15 a 0,5 %. [18]

## 1.6 Zápis (kódování) orientace laminátů

Každý laminát má unikátní vlastnosti a charakteristiky a proto musí být přesně popsány vždy, kdykoliv jsou požadovány určité kvantitativní údaje. Jednoznačné identifikace laminátu dosáhneme užitím zápisu orientace jednotlivých lamin. Správný kód musí jednoznačně a pokud možno i přesně vystihovat:

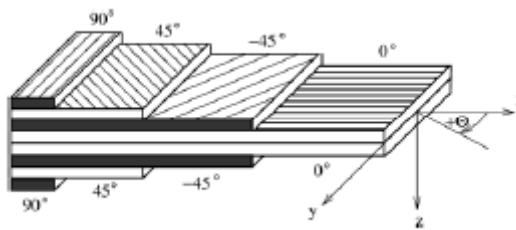
- 1) Orientaci každé laminy vzhledem ke vztažené ose označované v dalším textu osou x
- 2) Počet lamin každé orientace
- 3) Přesný geometrický sled lamin

V standardním kódu laminátu, popsané v tomto dodatku, předpokládáme, že všechny laminy jsou totožné jak v tloušťce, tak i ve vlastnostech.

Standardní kód laminátu je nejlépe definován tímto podrobným popisem struktury laminátu.

Prvky standardního kódu:

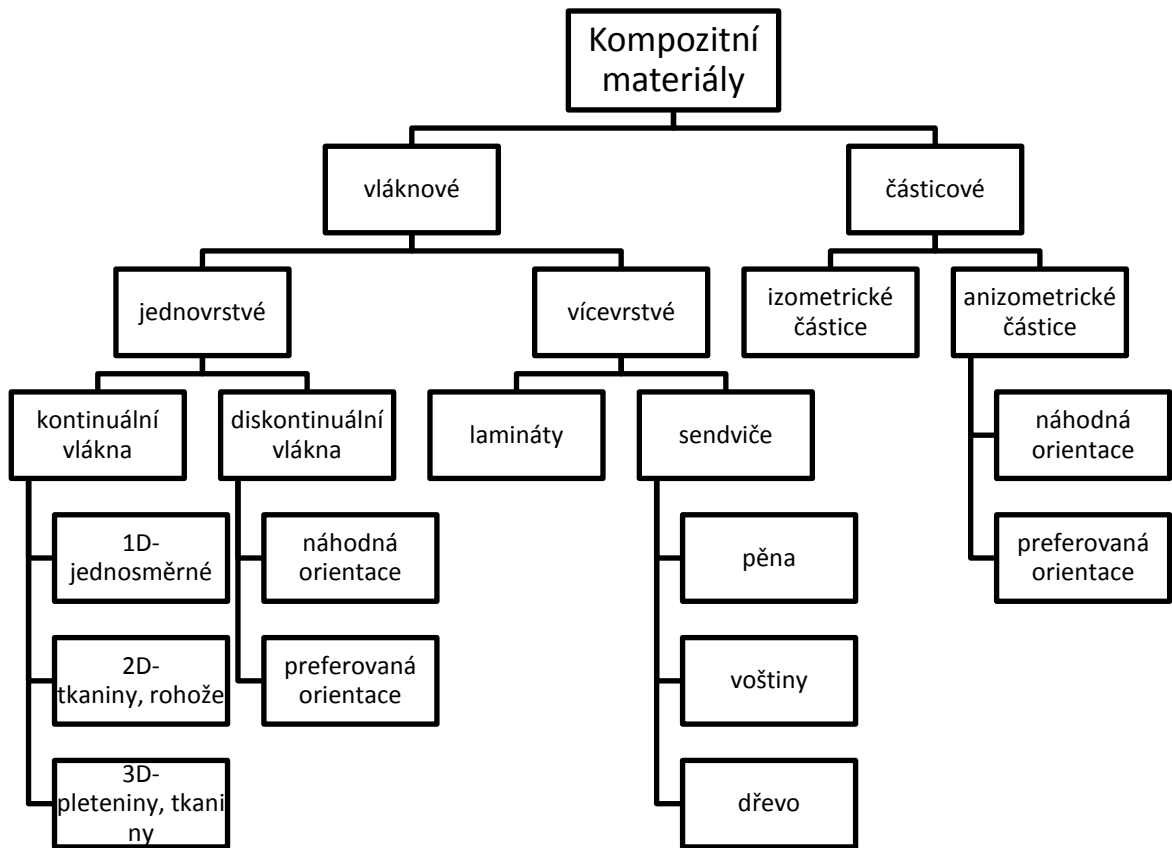
- Každá lamina je označována číslem představujícím úhel ve stupních mezi směrem vláken a osou  $x$
- Jednotlivé sousední laminy jsou odděleny v kódu svislou čarou, jsou-li jejich úhly od sebe odlišné
- Laminy se řadí postupně od vrchní plochy laminátu směrem ke spodní, počínaje první vrchní laminou. Závorky na začátku a na konci kódu označují začátek a konec laminátu.
- Má-li několik sousedních lamin stejnou orientaci, označí se to indexem udávajícím jejich počet u jednotlivých lamin.[1]



Obr. 2. Značení orientace lamin v lamině

## 1.7 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály lze rozdělit podle použitého materiálu matrice, podle geometrie výztuže, podle použité technologie výroby. Nejčastější rozdělení kompozitních materiálů vychází z rozdělení výztuží, které bylo uvedeno v předešlé části. Dle geometrie výztuže se kompozity dají členit následujícím způsobem.[7]



Obr. 3. Schéma rozdělení kompozitů

## 2 SLOŽENÍ SKELNÝCH LAMINÁTŮ

Nosným prvkem polyesterové pryskyřice ve skelném laminátu jsou skleněné výztuže pramence (tzv. roving), skleněné tkaniny, skleněné pramencové rohože nebo i jinak upravené skleněné vlákno. Vlastnosti a kvalita skleněných výztuží výrazně ovlivňují vlastnosti a kvalitu sklených laminátů.[2]

### 2.1 Skleněné výztuže

Největší význam pro ztužování plastických hmot mají příze bezzákrutové ve formě rovnoběžně sdružených pramenů, tzv. pramence.

Z pramenců se vyrábějí rohože různé tloušťky i hustoty a s různými apretacemi a pojivy:

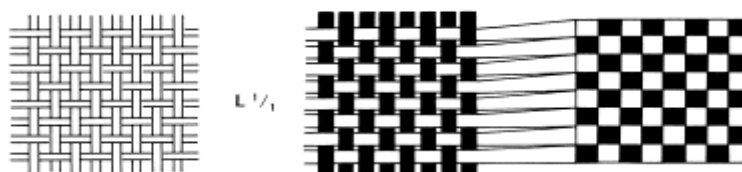
- a) Lepené rohože spojené látkami snadno rozpustnými v polyesterových pryskyřicích
- b) Lepené rohože spojené látkami nesnadno rozpustnými v polyesterových pryskyřicích
- c) Tvarovací rohože bez jakéhokoli chemického propojení (opatrně přepravovat)
- d) Jednosměrné rohože, vlákna jsou orientována převážně jedním směrem a rohože jsou prošity v kolmém směru
- e) Dvousměrné rohože, orientované ve dvou směrech, nejsou chemicky spojeny, nýbrž jen mechanicky zpevněny
- f) Křížové rohože, vyrobené z nekonečných vláken orientovaných ve dvou směrech svírající úhel asi  $15^\circ$ , takže se blíží svými vlastnostmi tkaninám; jsou spojeny látkami těžko rozpustnými v polyesterových pryskyřicích

Skleněný textil je materiál anizotropní a tento charakter si podržují i lamináty. Rozložení pevnosti závisí na vazbě, tj. na způsobu provázání osnovy a útku a na jakosti materiálu.

Podle vazby se tkaniny dělí na tři základní druhy:

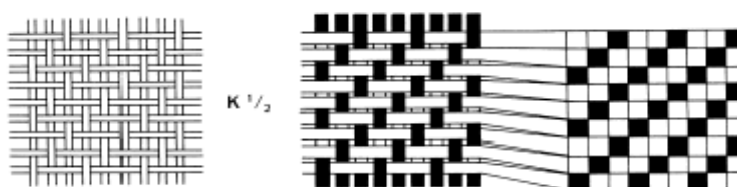
- 1) Plátňová vazba – je nejpevnější a také nejméně poddajná při tvarování, když prameny nebo roviny v osnově a útku jsou stejně silné a stejnoměrně vzdálené. Pramenec útku prochází vždy pod a nad každým pramenem osnovy- vyvážená plátňo-

vá vazba. Volnější a tím poddajnější plátňovou vazbu vytvářejí dva a více pramenů útků procházejících od dvou nebo více nitěmi osnovy- košíková vazba.



Obr. 4. Plátňová vazba tkaniny

- 2) Keprová vazba- je ohebnější, ovšem pouze při měkkém povrchové úpravě vláken. Vazba je vytvořena, když útek překříží minimálně dva prameny osnovy, než opět projde pod jedním nebo více prameny. V další řadě se útek posouvá doprava nebo doleva vždy k nejbližšímu prameni osnovy. Na tkanině je tak vytvořen diagonální vzor.



Obr. 5. Keprová vazba tkaniny

- 3) Atlasová neboli saténová vazba- je nejméně pevnou textilní vazbou. Jeden pramen osnovy je překryt čtyřmi a více prameny útku svrchu a jedním pramenem ze spodní strany. Počet pramenů osnovy překrytých útkem udává tzv. vaznost atlasu. Povrch tkaniny je hladký a lesklý, s dlouhými ploškami, v nichž vlákna leží rovnoběžně s povrchem. Vazba umožňuje dosáhnout vysoký objemový podíl vláken ve vrstvě kompozitu a zaručuje minimální zvlnění vláken. S atlasovou tkaninou je tedy možno získat kompozit s větší pevností a tuhostí než při použití běžných tkanin. Atlasová tkanina, je-li použito měkké povrchové úpravy vláken, je dobře tvarovatelná.[3], [7]



Obr. 6. Atlasová vazba tkaniny

## 2.2 Skleněné pramence

Základním materiálem pro další zpracování vláken na tkaniny a rohože je skleněný pramenec. Pramence se vyrábějí ze skloviny (nejčastěji se používá sklovina bezalkalická-tzv. sklo E), tavené v platinových píčkách, ze kterých se z trysek táhne nekonečné elementární vlákno průměru 9 až 13  $\mu\text{m}$ . Počet pramenů vláken se řídí podle dalšího zpracování pramence.

Kromě typu skloviny, průměru vlákna, obsahu vlhkosti, podstatně ovlivňuje kvalitu vláken jejich úprava, tzv. apretace nanášená na vlákno při tažení. Druh apretačního činidla se volí podle dalšího zpracování pramence.[2]

## 2.3 Skleněné tkaniny

Pro výrobu zhotovené ručním kladením se převážně používá skleněných tkanin v širokém rozsahu plošné váhy, tzv. gramáže.

Při zpracovávání skleněných tkanin je nutno zachovávat především dvě důležité zásady:

Skleněný textil se musí udržovat bezpodmínečně v suchu. I pouhé stopy vody jsou na závadu, stejně jako nadměrná vlhkost vzduchu, protože voda vytváří na povrchu skleněných výrobků vrstvu, která působí jako nevíтанé separační činidlo.

Druhý požadavek je, aby skleněná tkanina nebyla mastná. Nesmí proto přijít do styku s mastnými separačními činidly a ochrannými krémy.

Pro stanovení vhodné skladby skleněného textilu v laminátu je důležitá tloušťka nalamínované vrstvy dané gramáže.[2]

## 2.4 Skleněné rohože

Vlákna v rohožích jsou pojena pryskyřicemi, které jsou rozpustné ve styrenu obsaženém v laminační pryskyřici. Tloušťka laminátu vyrobeného z jedné vrstvy rohože se pohybuje od 0,8 do 1,5 mm, váha 1  $\text{m}^2$  laminátu z jedné vrstvy rohože je 900 až 3000g.[2]

## 2.5 Polyesterové pryskyřice

Polyesterové pryskyřice jsou pro výrobu polyesterových sklených laminátů stejně důležité jako výrobky ze skleněných vláken. Oba tyto materiály jsou přirozeně nedílnou a

nezbytnou součástí polyesterových sklených laminátů. Skleněná výztuž je nositelem mechanických vlastností laminátů; pryskyřice jako pojivo výztuže rozvádí zejména mechanické namáhání rovnoměrně na všechna vlákna výztuže a chrání před mechanickým nebo chemickým poškozením, tj. dodává laminátu odolnost proti chemickým, povětrnostním a jiným vlivům.

U polyesterových pryskyřic je důležité, že je zle vytvrzovat bez zvýšené teploty a tlaku. Tato vlastnost je dána chemickým složením pryskyřic, které se vyrábějí esterifikací dvojsytných kyselin dvojmocnými alkoholy a následným rozpouštěním polyesterové pryskyřice v monomeru.

Nenasycené polyesterové pryskyřice se vytvrzují za studena tzv. iniciačním systémem, tj. použije se iniciátoru, který umožňuje polymerační reakci, a urychlovače, jímž lze průběh reakce kontrolovatelně urychlit.[2]

### 2.5.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice

Nenasycené polyestery jsou lineární nebo velmi málo rozvětvené látky, obsahující nenasycené uhlíkaté řetězce, tj. řetězce s dvojnými vazbami schopnými polymerace. Protože dvojně vazby lineární makromolekuly jsou schopny polymerace, zesiluje se za určitých podmínek nenasycený polyester.

Běžný polyester je za normální teploty velmi viskózní, polotuhá až tuhá látka. Také dodatečné rozpouštění není snadné. Proto se nepoužívá samotného nenasyceného polyesteru, nýbrž výhradně jeho roztoku v nenasycené organické sloučenině schopné polymerace nebo kopolymerace v monomeru. Takovým monomerem je nejčastěji styren. Roztok nenasyceného polyesteru v monomeru je pak konvenčně nazýván nenasycená polyesterová pryskyřice a vyznačuje se těmito vlastnostmi:

- 1) Menší viskozita usnadňuje manipulaci s pryskyřicí a její další zpracování
- 2) Vytvrzování pryskyřice je kopolymerací
- 3) Tuhne beze zbytku a bez podstatného extrahovatelného podílu

Suroviny pro výrobu nenasycených polyesterových pryskyřic:

Základními surovinami pro výrobu pryskyřic jsou nenasycené dikarbonové kyseliny, resp. jejich anhydridy, dvojmocné alkoholy a monomery, ve kterých se vyrobený polyester rozpouští. Vedle nenasycených kyselin se používá i dikarbonových kyselin nasyce-



ných, které zlepšují mechanické vlastnosti výrobků, dále vícesytných kyselin a alkoholů pro zmenšení sklonu ke krystalizaci a zvýšení tepelné odolnosti a konečně monokarbo-  
ných kyselin a monoalkoholů, kterými se zmenšuje viskozita pryskyřice a zlepšuje snášen-  
livost s monomerem.[3]

## 2.6 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou sloučeniny, které obsahují v molekule epoxidovou sku-  
pinu. Tato skupina je velmi reaktivní s velkým počtem látek a umožňuje zesíťované mak-  
romolekulární produkty. Těto vlastnosti se využije pro různá lepidla, zalévací a lisovací  
hmoty, pojiva pro lamináty a lakařské pryskyřice. Při vytvrzování se neodštěpují vedlejší  
produkty a dochází jen k malému celkovému polymeračnímu smrštění (okolo 2 %). Tato  
vlastnost je velmi výhodná pro výrobu s požadavkem na přesné rozměry a pro výrobu  
kompozitů, kde je v důsledku minimálního smrštění minimalizováno vnitřní pnutí i ve vel-  
kých dílech. Epoxidová pryskyřice má nejlepší přilnavost k povrchově neupravené skelné  
výztuži v porovnání s ostatními pryskyřicemi.

Na druhu a množství tvrdidla závisí výsledné vlastnosti zpracované pryskyřice. Pro  
tyto materiály je charakteristická tzv. teplota skelného přechodu  $T_g$ , pod touto teplotu zů-  
stávají jednotlivé makromolekuly pod vlivem vazeb na svých místech. Při překročení této  
teploty dochází ke skokovému poklesu modulu pružnosti a měknutí pryskyřice, které může  
dále vést až k poruše.

Výhody epoxidových pryskyřic jsou. Vysoká statická a dynamická pevnost, tvarová  
stálost, výborná přilnavost, odolnost vůči chemikáliím a povětrnostním vlivům, elektroizo-  
lační vlastnosti, nízká hořlavost.

Při práci s pryskyřicí musí být dodržován směšovací poměr mezi pryskyřicí a tvrdi-  
dlem. Rychlost reakce závisí pouze na typu tvrdidla a teplotě, nedodržení směšovacího  
poměru vede ke snížení mechanických vlastností systému a nedokonalému vytvrzení. Do-  
ba zpracování, než dojde k zatuhnutí pryskyřice, závisí na typu tvrdidla a teplotě. Zvýšení  
teploty snižuje dobu zpracování.

K vytvrzení pryskyřice dochází při teplotě v rozmezí 20-25 °C v průběhu 24 hodin.  
Po uplynutí této doby je možné díl odformovat a dále zpracovávat. Následným dotrvzením  
při teplotě 50-60 °C po dobu cca 15 hodin dochází k další zvýšení pevnosti a ke zvýšení  
teploty skelného přechodu.[10]

## 2.7 Gelcoatová a topcoatová vrstva

Gelcoat je první vrstva pryskyřice aplikovaná do formy. Vytváří plochu opotřebenou pro konečný výlisek. Ten má sloužit k ochraně laminátů proti počasí, vlhkosti a chemikáliím a dává finální dekorativní zabarvení. Dále chrání laminát proti poškození během použití. Gelcoat musí být dostatečně houževnatý a tvrdý aby odolal nárazu i otěru. Pružnost je nezbytná proto, že se gelcoat ještě vyztuží s povrchovou úpravou tkaniny. Tloušťka je běžně 0-4 mm, ekvivalent pryskyřice je 450 g/m<sup>2</sup>.

Gelcoat může být průhledný anebo zbarvený podle druhu použití. Použitím vrstvy z C-skla a nebo umělého vlákna je dosažena vysoká chemická stálost i ochrana a zároveň maskování vláknové soustavy. V praktickém využívání při normálních podmínkách je gelcoat chráněn pryskyřicovým povrchem a zároveň povrchovou úpravou tkaniny.

Nejvíce pryskyřice je obsaženo v tixotropní přísadě, ta předchází nerovnostem při formování podobu aplikací a při její odstraňování. Tixotropní přísady jsou dostupné ve dvou formách, pro nátěr štětcem a nanášením sprejem. Rozdíl je ve viskozitě tixotropie.

Ve všeobecnosti je pryskyřicový gelcoat založený na orthoftalové nebo isoftalové pryskyřici. Isoftalová pryskyřice zlepšila odolnost vůči vodě, chemikáliím i nárazům. V podmínkách, kde je nutná zvýšená odolnost vůči povětrnostním podmínkám, je trvale používán isoftalový typ a může obsahovat směs metyl- metakrylátu a monomerní styren.

Někteří výrobci nabízejí gelcoat se sníženou hořlavostí, založený na HET kyselině nebo směs HET kyseliny-isoftalové, zatím co ostatní doporučují jen isoftalové pryskyřice. Pozornost při výběru je nutné věnovat následujícímu užití. Gelcoat se sníženou hořlavostí pro venkovní aplikaci musí mít dostatečnou odolnost vůči povětrnostním podmínkám. Tam, kde je požadována chemická odolnost, je gelcoat založený na isoftalové, orthoftalové nebo tereftalátové polyesterové pryskyřici. Volba při výběru závisí na chemickém složení, prostředí použití a provozní teplotě.

Je velký rozsah topcoatových pryskyřic, jako dodatek pro gelcoatové pryskyřice. Topcoat pryskyřice jsou podobné gelcoat pryskyřicím s tím rozdílem že, topcoatová pryskyřice netrpí vzdušným potlačováním po dobu odstraňování. Tento jev dosáhneme přidáváním vosku k pryskyřici. Vosk se přesouvá k povrchu po dobu počátečního stupně odstraňování.

Topcoat pryskyřice slouží k ochraně spodní části laminátu, dávají finální dekorativní povrch, čímž zlepšují kvalitu povrchu laminátu. Získaný povrch nemá nikdy stejnou kvalitu jako gelcoat finish, poněvadž to není lisovaný povrch.

Tam kde jsou opravy nebo žebrování, atd., spojené k s topcoatem, musí být usku-  
tečně dokonalé obroušení povrchu ještě před aplikací nové pryskyřice, jinak bude nevy-  
hnutelně docházet k propouštění nové pryskyřice.

Jako alternativní použití pryskyřicového polyesteru jako gelcoat, vyvinul ROHM and HAAS akrylátový lisovací prášek, který může být vytlačován ve formě desek a používán namísto tradičního gelcoatu. Výsledkem není jen vytvořit dekorativní povrch na výlisku ale též zpevnění. Akrylátový gelcoat může být použitý ve většině procesů, tam kde se používá tradiční gelcoat.[17]

### 2.7.1 Aplikace gelcoatu

Gelcoat je možné aplikovat pomocí štětce, válečku nebo spreje. Pro zjednodušení nátěru štětcem, bylo vytvořené zařízení pracující na principu katalyzovaného vstřikování, které přivádí katalyzovanou pryskyřici přímo k štětinám kartáče. Tímto způsobem jsou odstraněny problémy s mícháním a je zároveň zkrácený čas krystalizace.

*Nanášení nástřikem.* Touto strojní technologií se nanáší pneumaticky na formu speciální pistolí současně sekaný roving a iniciovaná pryskyřice. Nanášení se provádí převážně ručně, lze ke však mechanizovat a řídit počítačem.

Smíchání je uskutečněné uvnitř stříkací hlavy pro zajištění homogenity směsi. Nebo může ke smíchání dojít venku, kde pryskyřicový a katalyzátorový proud se mísí před do-  
sednutím na povrch. Ohřívací zařízení podporuje redukci pórovitosti v gelcoatu.

Propracovaný design sprchové hlavice minimalizuje přístup vzduchu a styrenových emisí.

*Tlakový systém.* Pryskyřice a katalyzátor je obsažen v tlakových kontejnerech. Ná-  
sledně je dopravován do stříkací pistole, odkud vychází pod tlakem rozstříknut. Pryskyřice je vystříknuta přes řízenou difuzní trubici nebo je vyháněna přes soustředěný otvor okolo hlavního potrubí. V klidném stavu se dvě kapaliny smíchají pomocí zúžení a opouští stří-  
kací pistol v podobě vzdušného proudu.[17], [20]

### 3 TECHNOLOGIE VÝROBY SKELNÝCH LAMINÁTŮ

#### 3.1 Laminování

Laminováním rozumíme pokládání jednotlivých vrstev skleněné výztuže a její propojování polyesterovou pryskyřicí. Na důkladném propojení jednotlivých vrstev skleněné výztuže do značné míry závisí výsledné vlastnosti polyesterového skelného laminátu, hlavně jeho mechanická pevnost.[2]

##### 3.1.1 Technologie laminování

Snad u žádného konstrukčního materiálu se nepoužívá tolika druhů forem jako při zpracování polyesterových skelných laminátů. Tento široký výběr je umožněn velkým počtem používaných technologií, neboť polyesterové lamináty lze často úspěšně zpracovávat i na nejjednodušších formách. Ve výrobě laminátů rozeznáváme dvě základní pracovní technologie:

- 1) „za studena“, a to bez tlaku nebo s tlakem
- 2) „za tepla“, a za tlaku

Kriteriem pro prvou metodu je teplota, při níž vrstvení a tvrzení probíhá. Nemá překročit 25 °C. Vytvrzování vrstvené hmoty probíhá bez tlaku a za přístupu vzduchu. Zpracování za tepla je charakterizováno tím, že formy, v nichž se materiál lisuje a tvrdí, jsou vyhřívány na teplotu asi 100 °C.

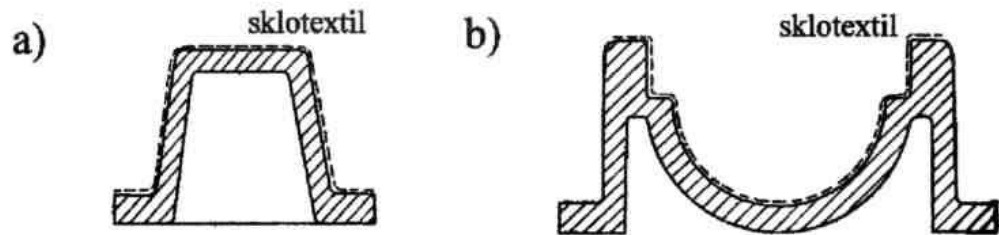
Pokud hovoříme o lisovacím tlaku, musíme si tento pojem zpřesnit. Normálně stačí takový tlak, aby obě plochy předmětu byly rovné a hladké a aby materiál neměl vzduchové bubliny ani na povrchu, ani uvnitř. Vždy je třeba mít na paměti, že vyšším lisovacím tlakem se mohou skleněná vlákna snadno porušit. Zvláště u tkanin může dojít k jejich rozdrčení v místě, kde jsou překládány.

Pro lamináty je charakteristickým technologickým procesem vrstvení bez tlaku za normální teploty. Z hlediska hospodárnosti a rychlosti provedení se nejlépe uplatňují formy dřevěné, sádrové a formy z plastických hmot nebo plechu. Používané formy lze rozdělit na pozitivní a negativní (viz obr. 7), přičemž každá z uvedených může být v provedení jednodílném nebo dvojdílném.

Jednodílnou pozitivní formou se rozumí forma, která představuje maketu budoucího výrobku, zmenšenou o tloušťku stěny hotového výrobku. Vrstvy skelné tkaniny se na-

kládají na její hladkou část. Bude tedy vnitřní plocha výrobku hladká a vnější, viditelná plocha bude drsná a nerovná, což je nevýhodou pozitivní formy.

Jednodílná negativní forma je taková, u níž se vrstvení provádí do dutiny. Po vyjmutí vytvrzeného výrobku je jeho vnější povrch hladký a rovný, takže viditelná plocha je po vzhledové stránce plně vyhovující.

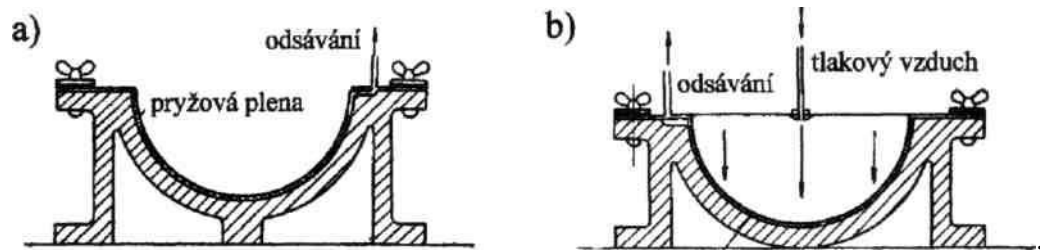


Obr. 7. Jednodílná forma pro beztlakové tváření a) pozitivní b) negativní.

Pro beztlakové tvarování se obvykle používá tkanin ze sdružených, obvykle nestáčených vláken nebo rohoží ze sekané stříže. Je třeba, aby skleněná vlákna měla hustou dostavu, protože převažující procento tvoří ve hmotě pryskyřice.

Tváření za studena lze provádět i za tlaku. Tlak ve hmotě se vyvozuje např. tím, že se použije dvoudílné formy. Výroba dvoudílné formy je však poněkud pomalá a poměrně nákladná. Používá se proto spíše jednodílných forem a tlak se vyvodí pryžovou plenou nebo plenou z plastické hmoty. Tlačnou sílu poskytne atmosférický tlak, umělý přetlak nebo kombinace obou. Příklad použití jednodílné formy s plenou vyvíjející pracovní tlak atmosférickým tlakem je uveden na obr. 8a.

Zvláštním způsobem tvarování na jednodílné formě je kombinovaný způsob podtlakový a přetlakový (obr. 8b). Do tuhé jednodílné formy se vloží tkanina a na ni se nalije pryskyřice. Na tkaninu se položí pryžová plena a forma se uzavře deskou. V nejvyšším místě se připojí odsávání a nad plenu se přivede vzduch nebo pára pod tlakem za současného odsávání prostoru pod plenou. Odsáváním, tedy podtlakem, se dosáhne dobrého proimpregnování skleněných vláken pryskyřicí, vnějším tlakem lze pak při konstantním množství skla snadno regulovat poměr mezi množstvím skla a pryskyřice. Tento poměr je jedním z rozhodujících činitelů určujících mechanické vlastnosti laminátů a jejich vzhled.

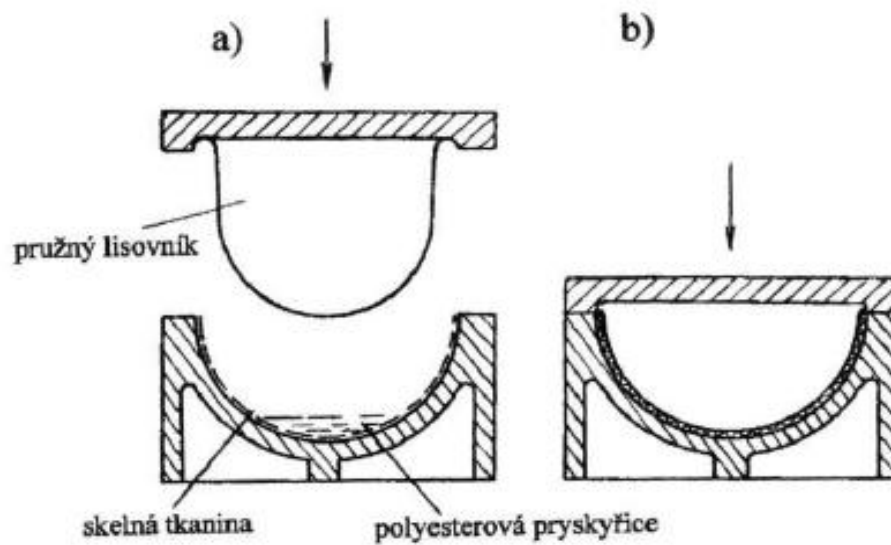


Obr. 8. Lisování pryžovou plenou a) vakuem, b) vakuem a přetlakem.

Všechny dosud uvedené metody jsou vhodné pro tvarování velkých předmětů v malých sériích. Jsou však pomalé, a proto málo výkonné. Jedna plocha je obvykle nerovná a tloušťka stěny velmi kolísá. Poměr množství skla a pryskyřice podléhá změnám, takže mechanické vlastnosti laminátů jsou velmi rozdílné.

Požitím dvojdílné formy zdi současného tlaku a obvykle také za zvýšené teploty se tyto nedostatky odstraní.

Nejjednodušší je lisování pružným lisovníkem (obr. 9a, obr. 9b). Jeden (obyčejně spodní) díl formy je nepohyblivý (obvykle je to lisovnice). Lisovník je z pružné hmoty a upevňuje se na tuhé desce. Lisovník i lisovnice musí být opatřeny vhodným separátorem. Do lisovnice se vloží textil a nalije pryskyřice. Lisovník se zavede do formy a svou pružností působí nejdříve na dno a pak na stěny lisovnice. Jakmile začne působit tlak na všechny stěny, musí se forma nahoře uzavřít deskou, aby se skelná tkanina mohla dokonale proimpregnovat pryskyřicí. Forma zůstává uzavřena pod tlakem tak dlouho, dokud předmět není vytvrzen. Tohoto způsobu výroby lze použít jak při vytvrzování za studena, tak i při vytvrzování za tepla. Lisovnice i lisovník mohou být z různých druhů materiálu. U velkých forem se lisovník plní po uzavření formy stlačeným vzduchem nebo parou.[3]



Obr. 9. Lisování pružným lisovníkem a) otevřená forma, b) forma po uzavření

### 3.2 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 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
- Gelcoat pokud je třeba
- 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, dokud není vytvořena požadovaná tloušťka stěny
- Vytvrzení v klidu

- Vyjmutí z formy

Výhodami ručního kladení je jednoduchost technologie, minimální náklady na nástroje a neomezená variabilita tvaru a velikostí.

Nevýhodou je relativně velký objem odpadu, malá produktivita a kvalita výrobku závislá na schopnostech pracovníka. Touto technikou jsou vyrobeny lodě, skladovací nádrže, rovné plochy, bazény a různé prototypy.[6]

### 3.3 Navíjení

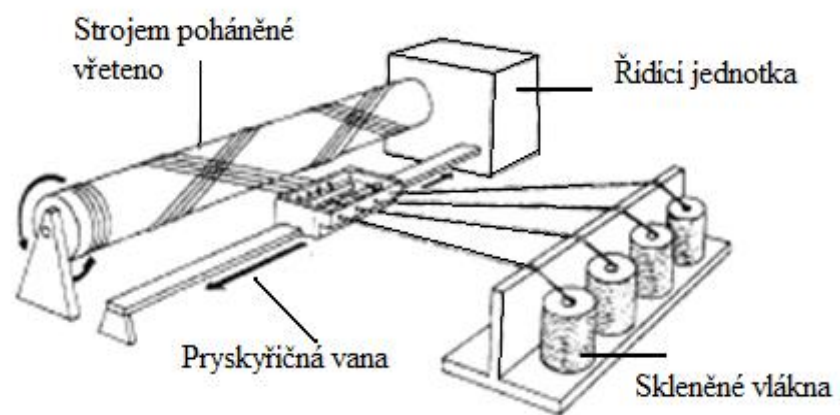
Tato technologie je založena na kontinuálním navíjení svazku vláken či jinak upravených výztuží na kruhovou, smrštitelnou formu. Vlákna jsou navíjena buď již navlhčena pryskyřicí, nebo se provlhčují až po navinutí. Požadovaných vlastností kompozitu se dosahuje přesným uspořádáním a orientací pramenců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

- Do rotačního zařízení je upnuto jádro, které je buď vyjímatelné, nebo se po skončení procesu stane součástí výrobku
- Jsou navinuty výztuže za předem naprogramovaného předpětí, složení, orientace, atd.
- Navíjená stopa je měněna podle požadavků designu a výpočtu vlastností tak dlouho, až je výrobek hotov.
- Kompozit je i s jádrem vložen do pece, kde se vytvrzuje při neustálé rotaci.
- Po vytvrzení je jádro vyndáno a výrobek je dokončen.

Výhodou je použití levnějšího použití formy výztuže - rovingu. Proces má dobrou produktivitu a může být automatizovaný. Hodí se pro výrobu potrubí, kolen, zásobníků paliv, velkých součástí s konkávním povrchem.

Nevýhodou je vysoká cena navíjecích strojů, nesnadné odstraňování vnitřních forem a nízká produktivita u výroby nádrží.[6]





Obr. 10. Schéma navijecího zařízení

## 4 ÚNAVOVÁ MECHANIKA LAMINÁTŮ

O mechanismu vzniku poškození a jeho rozvoje během únavy u kompozitních laminátů existuje řada studií. Je známo, že poškození nejdříve začíná oddělením vláken od matrice (tj. ztrátou adheze či soudržnosti) ve vysoce vyztužených oblastech u vrstev, ve kterých vlákna leží kolmo nebo ve velkém úhlu ke směru zatížení. Ke vzniku těchto trhlin vedou velké kontrakce přetvoření a napětí ve styku vlákna s matricí. Trhlina je obvykle kolmá ke směru zatížení a jde přes celou šířku vrstvy. Trhliny v příčné vrstvě mohou vzniknout během prvního cyklu zatížení, jestliže aplikované napětí převyšuje pevnost vrstvy, což se může stát při napětí dosahujícím jen 20 % pevnosti v závislosti na uspořádání laminátu. Počet trhlin v příčné vrstvě roste buď s počtem cyklů, nebo se zvýšením úrovně zatížení.

Trhliny v příčné vrstvě přecházejí přes celou šířku vrstvy, ale nejsou schopny se rozšiřovat do sousední vrstvy, zejména jde-li o vrstvu s vlákny uspořádanými ve směru zatížení. Trhliny v příčné vrstvě končí u styku dvou vrstev. Avšak vrchol trhliny vyvolává před sebou koncentraci napětí. Výsledná vysoká interlaminární napětí vyvolávají příznivé podmínky pro počátek delaminační trhliny podél styku vrstev. S rostoucím počtem cyklů vznikne víc delaminačních trhlin a trhliny se rozšiřují. V okamžiku, kdy vznikají delaminační trhliny je také pozorován další typ poškození. Začnou se také přetrhávat vlákna v podélných vrstvách a dochází ke ztrátě soudržnosti (oddělování vláken od matrice) a ke vzniku trhlin v podélných vrstvách. Trhliny v podélné vrstvě nemají žádný určitý směr, na rozdíl od trhlin v příčných vrstvách, které jsou obvykle kolmé ke směru zatížení.

Ke konečnému porušení kompozitu dojde, když je dostatečně zeslaben trhlínami v podélných vrstvách a delaminačními trhlínami. Trhliny ve vrstvách s podélnými vlákny zeslabují právě ty části kompozitu, které přenášejí převážnou část zatížení. Přítomnost delaminačních trhlin brání rozdělení zatížení mezi vrstvy a kompozit se nezbytně redukuje na řadu nezávislých podélných vrstev paralelně přenášejících působící zatížení. Nejslabší z těchto podélných vrstev se přetrhne a způsobí porušení zbývajících podélných vrstev. Delaminační trhliny, které jsou příčinou konečného porušení materiálu, jsou však jasně znatelné pouze v pokročilých stavech únavové zkoušky, např. asi po 90 % únavové zkoušky.

Diskontinuita vyvolaná přetržením vlákna způsobí vysoké smykové napětí na rozhraní matrice- vlákno, takže vzniknou příznivé podmínky pro růst smykové trhliny. Smy-

ková trhlinka může růst buď v hraniční oblasti nebo v přilehlém materiálu matrice podle toho, zda je větší pevnost v soudržnosti či pevnost matrice.

V kompozitu se slabým stykem může nastat rozštěpení mezifázového rozhraní před únavovou trhlinou v matrici. Rozvětvení trhliny a rozštěpení způsobí snížení koncentrace napětí v sousedství čela trhliny a zvýší únavovou životnost materiálu jako důsledek slabé pevnosti v soudržnosti mezi matricí a vláknem. Plastické přetvoření matrice při nízké hodnotě meze kluzu otupí vrchol trhliny tím zabrání jejímu růstu.

Vznik vnitřních trhlín vede ke snížení tuhosti a pevnosti kompozitního materiálu. Zbytková pevnost a tuhost se zmenšuje s rostoucí hustotou trhlín. Pracovní diagram panenského, příčně vrstevnatého materiálu může být aproximován dvěma přímkami, udávajícími dva moduly pružnosti materiálu. Tyto dva moduly jsou označovány jako primární (1) a sekundární modul (2).

Modul kompozitu ve směru zatížení:

$$E = \frac{1}{n} E_L + \frac{m}{n} E_T \quad (1)$$

,tento počáteční modul kompozitu  $E$  je někdy označován jako primární modul.

Modul kompozitu při porušení  $90^\circ$  vrstev se někdy označuje jako sekundární modul  $E_s$  a je:

$$E_s = \frac{1}{n} E_L \quad (2)$$

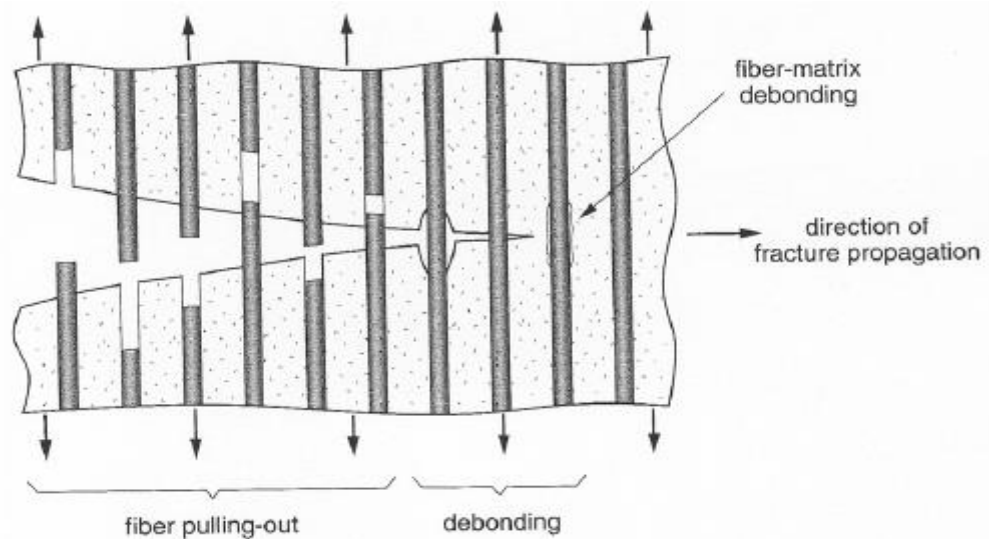
Materiál vykazuje vyšší primární modul na počátku zkoušky (protože nejsou přítomny žádné trhliny) a jak podélné, tak příčné vrstvy plně přispívají k tuhosti kompozitu. Při zvyšování zatížení vznikají trhliny v příčných vrstvách, tím se příspěvek příčných vrstev k tuhosti kompozitu zmenšuje a redukuje se modul. Při únavových zkouškách se modul snižuje nejprve vznikem trhlín v příčných vrstvách, pak v podélných vrstvách, a konečně vlivem delaminačních trhlín. Proto při opakovaném zatížení se pracovní diagram materiálu stává lineární s modulem blízkým sekundárnímu modulu panenského materiálu. Tento modul může být i menší než sekundární modul materiálu, vzniknou-li během opakovaného zatížení trhliny v podélných vrstvách a delaminační trhliny.

Je-li materiál vystaven rostoucímu počtu cyklů zatížení na jisté úrovni, dochází ke značnému snížení statické pevnosti. Ke snížení pevnosti dochází z větší části při prvních 25 % únavové životnosti; pak se snižování statické pevnosti zpomalí, až dojde k vyčerpání

únavové životnosti a nastane porušení. Opět je důvodem počáteční ztráty pevnosti porušení příčných vrstev. Vývoj trhlin v podélných vrstvách a delaminačních trhlin je pomalý, a proto je pomalá i ztráta pevnosti v pozdějších stádiích únavové životnosti. Rychlé ztráty pevnosti nastávají pak v několika posledních cyklech, když se poruší pevnější vrstvy. Před touto rychlou ztrátou pevnosti se sice jednotlivé vrstvy zeslabují, ale celkové snížení pevnosti je malé.[1]

#### 4.1 Mechanizmy absorpce energie a způsoby porušení

Můžeme 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. 11. 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 vytahují 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. [1]



Obr. 11. Šíření trhliny v lamině [9]

#### 4.1.1 Přetrhávání vláken

Jakmile se začne rozvíjet trhlina ve směru kolmém k vláknům, dojde nakonec k přetrhání vláken a úplnému rozpadu laminátu. Vlákná se mohou porušovat po dosažení jejich mezního přetvoření. Energie potřebná na porušení vláken tahem na jednotkovou plochu kompozitu je dána výrazem:

$$u = \frac{V_f \sigma_{pf} l}{6E_f} \quad (3)$$

kde  $V_f$  je objemový podíl vláken,  $P_f$  je pevnost vláken,  $E_f$  je modul vláken a  $l$  je délka vláken.

Ačkoli jsou vlákna příčinou vysoké pevnosti kompozitů, porušení vláken představuje jen velmi malou část celkové absorbované energie. Bylo prokázáno, že počet porušených vláken má malý vliv na celkovou rázovou energii.[1]

#### 4.1.2 Přetvoření a trhlinkování matrice

Aby došlo k úplnému poškození kompozitu, musí se porušit i materiál matrice, obklopující vlákna.

Práce vykonaná při přetvoření matrice je úměrná práci  $U_m$ , vykonané přetvořením matrice do lomu na jednotku objemu, násobené objemem přetvořené matrice na jednotku plochy povrchu trhliny.

Energie potřebná pro porušení matrice na jednotku plochy je daná vztahem:

$$u = \frac{(1-V_f)^2}{V_f} \frac{\sigma_{pm} d}{4\tau} U_m \quad (4)$$

kde  $\sigma_{pm}$  je pevnost v tahu matrice,  $d$  je průměr vlákna,  $\tau$  je mezifázové smykové napětí.

Celková energie absorbovaná trhlinkováním matrice je rovna násobku povrchové energie a nové plochy vytvořené trhlinou. Jestliže se trhlina šíří pouze v jednom směru, nově vzniklá plocha je malá a odpovídající lomová energie je nízká. Velké trhlinové plochy mohou vzniknout při rozvětvení trhliny, při nichž trhliny běží ve směru kolmém k základnímu směru porušení.[1]

### 4.1.3 Oddělování vláken

Během procesu porušování se mohou vlákna oddělit od materiálu matrice trhlinami běžícími rovnoběžně s vlákny. Během tohoto procesu dochází k porušování chemických nebo sekundárních vazeb mezi vlákny a matricí. K takovým trhlinám dochází, když jsou vlákna pevná a styk je slabý. Mezifázová smyková trhlina může běžet buď přímo na styku vlákna s matricí, nebo v okolní matrici v závislosti na jejich relativních pevnostech. V každém případě vznikne nový povrch. Jestliže je oddělování rozsáhlé, může dojít ke značnému zvýšení lomové energie. Se snížením stykové pevnosti souvisí zvýšení rázové energie, protože umožňuje rozsáhlé oddělování nebo delaminaci.

Velikost práce k oddělování různých materiálu je obvykle  $\leq 500 \text{ J.m}^{-2}$  a řádu stykové pevnosti násobené mezním přetvořením pryskyřice.[1]

### 4.1.4 Vytahování vláken

K vytahování vláken dojde, když křehká vlákna nebo spojitá vlákna jsou vložena do houževnaté matrice. Vlákna se přetrhnou ve svém nejslabším příčném průřezu, který musí nezbytně ležet v rovině lomu kompozitu. Koncentrace napětí v matrici vyvolané přetržením vláken, se redukuje kluzem matrice. Tím se zabrání vzniku trhliny v matrici, která by mohla spojovat porušení vláken v různých místech. V takovém případě může porušení pokračovat vytahováním zlomených vláken z matrice, spíše než dalším přetrháváním vláken v rovině lomu kompozitu.

Energie vytahování na jednotku plochy je dána:

$$u = \frac{V_f \sigma_{fu} l_c}{12} \quad (5)$$

Rozdíl mezi oddělováním vláken a vytahováním vláken lze popsat takto: oddělování vláken začne, když trhlina matrice není schopna pokračovat přes vlákno, zatím co vytahování vláken je výsledek neschopnosti trhliny vzniklé při přetržení vlákna rozšiřovat se houževnatou matricí. Vytahování vláken je obvykle provázáno rozsáhlým přetvořením matrice, které chybí při oddělování vláken. Oddělování vláken a vytahování vláken se může zdát podobným jevem, protože k porušení dochází v obou případech na styku matrice s vláknem, ale oba způsoby porušování jsou vyvolány speciálními podmínkami. Oba jevy výrazně zvyšují lomovou energii.[1]

#### 4.1.5 Delaminační trhliny

Rozvoj trhliny v jisté vrstvě laminátu může být omezen, když vrchol trhliny dojde k vláknům sousední vrstvy. Proces zastavení trhliny je podobný zastavení trhliny v matrici na styku matrice s vláknem. Z důvodu vysokého smykového napětí v matrici blízko vrcholu trhliny se trhlina musí rozvětvit a pokračovat na mezipovrchu rovnoběžném s rovinou vrstev. Tyto trhliny jsou nazývány delaminační trhliny a kdekoli se vyskytnou, jsou příčinou absorbování značného množství lomové energie. Delaminační trhliny vznikají často, když je laminát zkoušen v ohybu.[1]

## 5 MECHANICKÉ ZKOUŠKY DYNAMICKÉ ÚNAVOVÉ

Určité součásti jsou při práci namáhány kmitavým anebo nepravidelně opřetrovaným zatěžováním. Toto proměnné zatěžování způsobuje, že v určitých místech součástí, kde se napětí koncentruje, vznikají jemné trhlinky, které se postupně zvětšují, až se konečně součást zlomí. Napětí, při kterém se tímto způsobem namáhané součásti poruší, je menší než pevnost materiálu těchto součástí zjištěná statickou zkouškou. Z toho plyne, že proměnné namáhání je pro některé součástky daleko nebezpečnější než klidné, statické namáhání. Ve strojírenské praxi velmi mnoho poruch je způsobeno tímto jevem, který označujeme jako *únava materiálu*.

Únava materiálu vzniká při různých způsobech namáhání součástí (ohybem, kroucením, tahem, tlakem, ... a v praxi nejčastěji při namáhání kombinovaném).

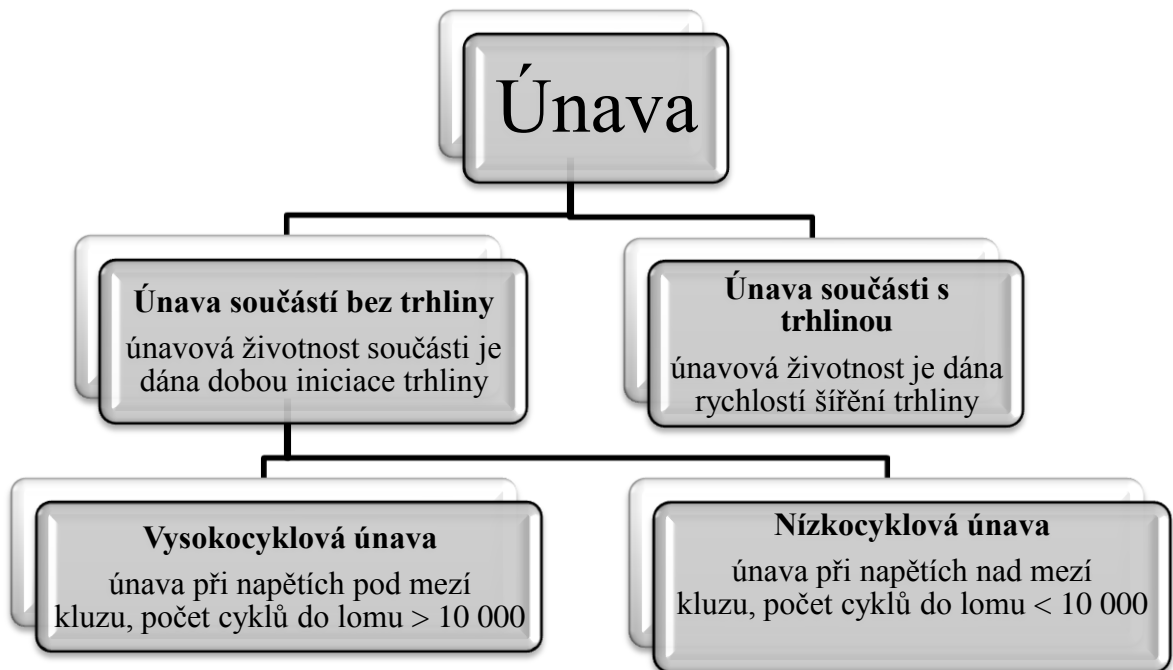
Zvláště nebezpečné je proměnné (periodické, cyklické) namáhání když vlastní kmitočet součásti je roven kmitočtu zatěžovací síly, takže dojde k resonanci této součásti stroje. Vysoké špičky napětí, které při resonanci vznikají, převyšují mnohonásobně normální napětí v součásti a vedou obvykle k lomu. Nepříznivý účinek resonance je snižován vnitřním útlumem materiálu, který se tak stává důležitým činitelem při kmitavém namáhání. Dosud není jednotného názoru o tom, jaký je vztah mezi útlumovou schopností a únavovými jevy při kmitavém namáhání materiálu.[4]

### 5.1 Zkoušení odolnosti materiálu z hlediska únavy

Trhlina v materiálu může vzniknout a zvětšovat se při napětích menších než je mez kluzu nebo pevnost, a to v případě, že zatěžování je buďto cyklické, nebo prostředí, které obklopuje součást je korozní.

Z hlediska zkoušení odolnosti materiálu vůči únavovému porušení rozlišujeme následující oblasti únavy obr. 12.





Obr. 12. Únavová hierarchie

Po určitém počtu cyklů může v závislosti na velikosti působícího napětí k lomu. Cílem únavových zkoušek hladkých zkušebních těles je zjištění parametrů křivky únavové životnosti materiálu. Únavová křivka životnosti je závislost amplitudy napětí, případně deformace na počtu cyklů do porušení.[5]

## 5.2 Vliv krátkodobého cyklického přetěžování

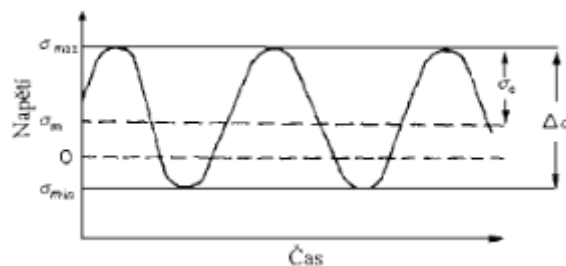
Některé součásti zatěžované cyklickým namáháním jsou v provozu vystaveny občasnému krátkodobému přetěžování. V tomto údobí se cyklické namáhání přechodně zvýší na hodnotu vyšší, než je mez únavy. Pokud se při tom nezvýší napětí v součásti nad mez kluzu zkoušeného materiálu, nemusí mít toto přetížení škodlivý vliv na mez únavy, tj. po opětovném snížení kmitavého namáhání pod mez únavy může součástka pracovat stejně dlouho, někdy i déle jako součástka krátkodobě nepřetěžovaná. V některých případech kdy je přetěžování dlouhodobé a napětí proti mezi únavy značně zvýšené, převažuje nad zpevnujícím účinkem škodlivý účinek a odolnost proti vzniku lomu z únavy se snižuje.

Proto se provádí studium vlivu krátkodobého přetížení na různé druhy materiálu, při němž se zkušební tělesa z těchto materiálů zatěžují cyklickým namáháním o různém výkmitu, obvykle vyšším než je výkmit na mezi únavy.[4]

### 5.2.1 Označování cyklického namáhání

Při studii únavy, kdy probíhá namáhání cyklické, se napětí v součásti mění periodicky od horní hodnoty na hodnotu dolní. Doba trvání jednoho cyklu, tj. jeden kmit, je nejmenší časový úsek, za který se opakuje týž průběh napjatosti. Průběh napjatosti není vždy jednoduchou funkcí, jak je patrné z obr. 13. Pro zhodnocení výsledku zkoušek se však nahrazuje nejbližší jednoduchou funkcí, což bývá většinou funkce sinusová. Druhy křivek, podle nichž se mění napětí, se mohou od sebe značně lišit.

V případě únavových zkoušek pracujeme se smluvním napětím. Protože při cyklickém zatěžování nedochází k tvarové změně zkušebního tělesa a není tedy nutné rozlišovat smluvní a skutečné napětí. Pro napětí používáme symbol  $\sigma$ . Pro popis cyklického zatěžování definujeme obr. 13.[4], [5]



Obr. 13. Časový průběh napětí při cyklickém zatěžování

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (6)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (7)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (8)$$

kde  $\Delta\sigma$  je rozkmit napětí,  $\sigma_m$  je střední hodnota,  $\sigma_a$  je amplituda kmitu.

Podle normy ČSN 420302 je mez únavy charakteristika materiálu, tj. největší výkmit napětí, který při symetrickém cyklu zatížení (tah, tlak, ohyb, krut) materiál teoreticky vydrží po nekonečný počet zátěžných cyklů.

Prakticky se však provádí určení meze únavy z konečného počtu cyklů, který je různý pro různé materiály. Jsou-li absolutní hodnoty horního a dolního napětí různé, jde o střídavé napětí nesouměrné. Při stejných absolutních hodnotách horního a dolního napětí jde o střídavé napětí souměrné. Pulsující neboli tepavé napětí je takové, při němž horní a dolní napětí jsou téhož smyslu. Ve zvláštním případě, kdy je horní nebo dolní napětí rovno nule, jde o mívivé napětí.[4]

## 6 STATICKÉ MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Těmito zkouškami se hodnotí chování materiálu za působení stálých nebo pomalu spojitě měnících sil. Zkušební těleso se zatěžuje zpravidla jen jednou, a to až do porušení. Podle druhu namáhání jde o zkoušku tahem, tlakem, ohybem krutem nebo stříhem.[11]

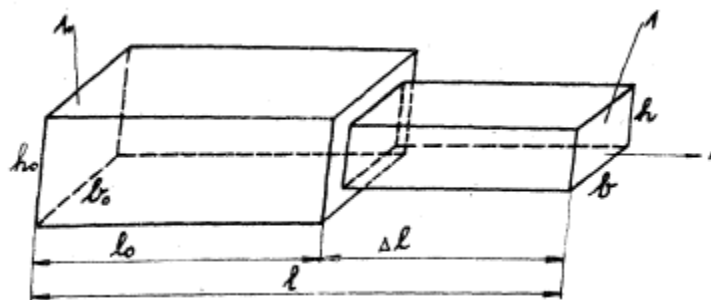
### 6.1 Zkouška tahem

Tahová zkouška je jednou z nejdůležitějších mechanických zkoušek – ČSN EN ISO 527 (ČSN EN 638). Používá se u všech plastových materiálů ke stanovení základních pevnostních charakteristik. Zkušební tělesa se připravují obvykle ve tvaru lopatky [12]. Při zkoušce tahem je materiál namáhán silou tak, že dojde k jeho porušení. Kdyby byl materiál izotropní, bylo by napětí v celém průřezu zkušebního tělesa rozloženo rovnoměrně. V praxi se tento ideální stav nevyskytuje, vlastnosti plastu se v různých místech liší a tahové napětí je rozloženo rovnoměrně. Vznikají tím smyková napětí [13]. Deformaci tahem můžeme znázornit na hranolu v pravoúhlých souřadnicích, jehož původní průřez  $A_0$  je dán součinem šířky  $b_0$  a výšky  $h_0$ : [14]

$$A_0 = b_0 \cdot h_0 \quad (9)$$

Jestliže budeme působit na průřez tělesa  $A_0$  silou  $F$ , bude osově napětí působící v průřezu zkušebního tělesa při tahové zkoušce: [13]

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [MPa] \quad (10)$$



Obr. 14. Jednosměrná deformace tělesa tahem.

Průřez tělesa se při zkoušce bude měnit až do okamžiku, kdy se dosáhne rovnováhy mezi deformací a napětím. Při dalším zvětšování síly se dostaneme do okamžiku, kdy se těleso přetrhne [13]. S prodlužováním tělesa se mění jeho původní délka  $l_0$  na  $l$  a vyjadřujeme ji jako poměrné (relativní) prodloužení:[13], [14]

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (11)$$

S prodlužováním zkušebního tělesa nastává i zmenšování průřezu, které vyjadřujeme poměrným zkrácením základny nebo výšky hranolu:[13], [14]

$$\varepsilon_b = \frac{b_0 - b}{b_0} = \frac{\Delta b}{b_0} \quad (12)$$

Vztah mezi poměrným zkrácením a poměrným prodloužením je tzv. Poissonův poměr, který charakterizuje relativní změnu průřezu v závislosti na relativní změně délky: [13, 14]

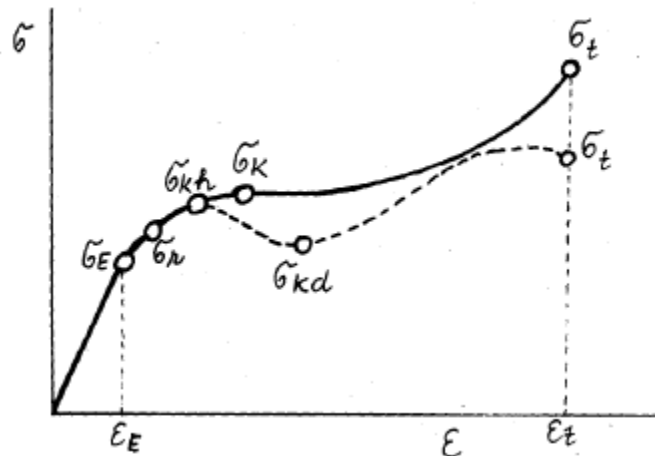
$$\nu = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_l} \quad (13)$$

Z hlediska deformačního chování nás především zajímá změna délky zkoušeného tělesa až do stadia jeho přetržení. Abychom nemuseli délkovou změnu vyjadřovat dvěma slovy, tj. poměrným prodloužením, zavedeme pro tento pojem kratší označení, a to „protažení“[15]

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (14)$$

### 6.1.1 Tahová křivka

Nejdůležitější mechanické vlastnosti plastu při krátkodobém namáhání se zjišťují tahovou trhací zkouškou. Výsledkem zkoušky je závislost napětí na deformaci a z této závislosti můžeme zjistit meze kluzu a pevnosti, tažnost, modul pružnosti v tahu a celkové chování materiálu při deformaci včetně typu lomu. Ze získaných hodnot můžeme odvodit dovolené namáhání v tahu a přepočtem i ve smyku.[16]



Obr. 15. Obecná tahová křivka.

Bod na křivce, kde končí Hookovské chování, je mez úměrnosti  $\sigma_E$ . [14] Až do meze úměrnosti je průběh tahové křivky prakticky přímkový a v této oblasti platí Hookův zákon. [13] Zakřivení, vznikající v dalším průběhu křivky, zahrnuje již časově závislou elastickou a plastickou deformaci. Místo, do kterého je ještě tato deformace vratná, je mezi pružnosti  $\sigma_r$ . Z tohoto bodu se po uvolnění napětí vrací deformace po celé křivce do původního bodu. [14]

Zvětšuje-li se napětí nad mez úměrnosti, obvykle hodnota  $\Delta\sigma/\Delta\epsilon$  klesá. Zatímco napětí stoupá pomalu, deformace se rychleji zvětšuje. Je to úsek za mezí pružnosti, kde nastává převážně nevratná plastická deformace. Tomuto místu říkáme mez kluzu  $\sigma_K$ . [14] Jestliže materiál vykazuje mez kluzu, považujeme tuto mez za horní hranici přípustného napětí při provozu součásti, neboť nad ní vznikají již velké trvalé deformace [16]. Projevili se na křivce za tímto bodem snížení napětí, je to horní mez kluzu  $\sigma_{Kh}$ , zatímco na pokračující křivce místo minimálního napětí je dolní mez kluzu  $\sigma_{Kd}$ . Za dolní mezí kluzu vzrůstá opět napětí do určité maximální hodnoty  $\sigma_r$ , kde se těleso buď přetrhne, nebo nastává za touto mezí porušením soudržnosti další pokles napětí až k  $\sigma_{destr}$ , kdy dojde k lomu. [14]

Mez pevnosti v tahu, krátce nazývaná pevnost v tahu, je definována jako napětí potřebné k přetržení, vztažené na původní průřez, nebo krátce jako smluvní napětí potřebné k přetržení. Pro výpočet se dosazuje vždy hodnota  $F_{max}$ , i když k destrukci došlo později při nižším napětí: [13]

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad [MPa] \quad (15)$$

### ***Modul pružnosti v tahu***

Modul pružnosti v tahu, nebo také Youngův modul, je směrnice v počátku tahové křivky.[18] Vypočte se jako podíl napětí v tahu  $\sigma$  a poměrného prodloužení  $\varepsilon$  v oblasti, ve které existuje lineární závislost mezi napětím a prodloužením - na mezi kluzu.[13]

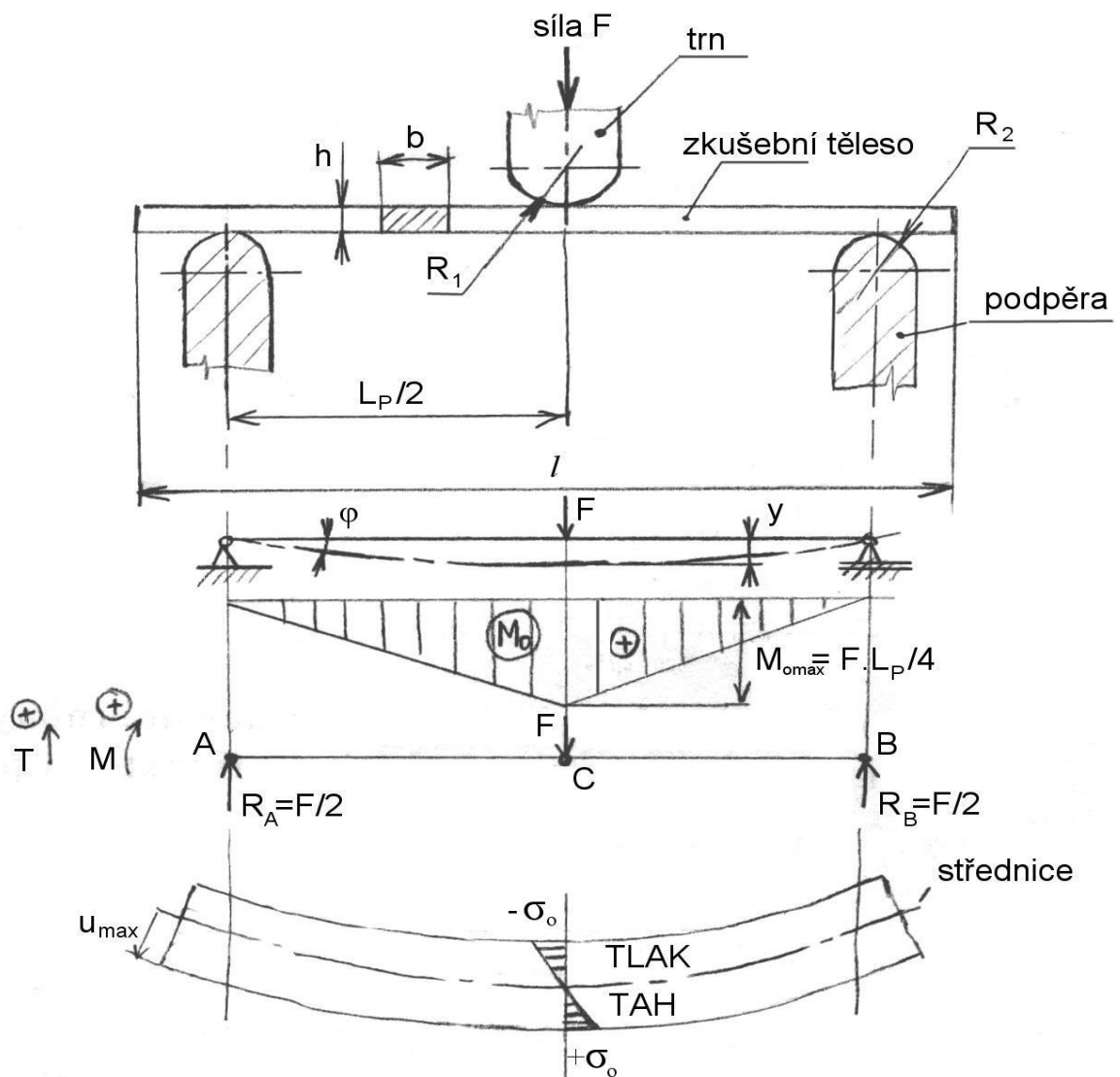
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \operatorname{tg} \alpha \quad [MPa] \quad (16)$$

Čím je přímka strmější, tím je zapotřebí k určitému jednotkovému protažení větší napětí, materiál je soudržnější, tužší.  $E$  je tedy mírou tuhosti pružných materiálu, tvarové stálosti a odolnosti vůči napětí.[14] Plasty vykazují relativně velmi úzké oblasti platnosti Hookova vztahu, neboť modul pružnosti se následkem viskoelastického chování polymeru značně mění a to tak, že  $E$  klesá s rostoucím působícím napětím, s rostoucí teplotou a dobou působení napětí,  $E$  roste s frekvencí zatěžování při dynamickém namáhání.[16]

## 7 ZKOUŠKA OHYBEM

Stanovení ohybových vlastností podle ČSN EN ISO 178. Ohybová zkouška je velmi důležitá k charakterizaci polymeru z hlediska praktické použitelnosti. Touto zkouškou můžeme dělit polymery na křehké (lámavé) a houževnaté. Křehké materiály při určitém napětí prasknou, houževnaté se při zkoušce stále deformují, až vyklouznou z podpěr přístroje.[13]

Nejběžnější způsob uspořádání zkoušky je ten, kdy zkušební těleso je ve tvaru trámce, umístěného na dvou podpěrách, vzdálených od sebe ve vzdálenosti  $l$ . Síla způsobující průhyb tělesa působí uprostřed mezi podpěrami, nebo je rozdělena na dvě stejné síly  $F/2$  působící v určité vzdálenosti od podpěr.[14] Zkoušce na dvou podpěrách se také říká tříbodové uspořádání.[13] Je znázorněno na obr. 15.



Obr. 16. Tříbodový systém ohybové zkoušky



Během zkoušky se horní strana zkušební tyče zkracuje, dolní se prodlužuje. Zkušební tělísko je asi do poloviny namáháno tlakem, v polovině je nulová (neutrální) vrstva a v dolní polovině je tahové namáhání [13]. Ohybový moment je minimální v místě podpěr a maximální uprostřed. Dojde-li při  $M_{max}$  k prolomení, dosazujeme tuto hodnotu pro výpočet pevnosti v ohybu:

$$\sigma_0 = \frac{M_{max}}{W_0} \quad (17)$$

Pro tříbodový systém a těleso obdélníkového průřezu šířky  $b$  a výšky  $h$  platí:

$$M_{max} = \frac{F_{max} \cdot l}{4} \quad [Nmm] \quad (18)$$

$$W_0 = \frac{bh^2}{6} \quad [mm^3] \quad (19)$$

a pevnost v ohybu:[14]

$$\sigma_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot l}{bh^2} \quad [MPa] \quad (20)$$

### **Modul pružnosti v ohybu**

Způsob výpočtu modulu pružnosti v ohybu je obdobný jako u modulu v tahu. Hodnotu modulu je možno vypočítat z oblasti namáhání, v níž je lineární závislost průhybu na zatížení. Vzorec pro modul pružnosti v ohybu je odvozen za předpokladu zachování rovinnosti průřezu, platnosti Hookova zákona a zanedbání vlivu posouvajících se sil. Tyto předpoklady jsou dostatečně splněny u štíhlého nosníku, je-li průhyb relativně malý.[13] Ohybová zkouška je výhodná pro stanovení modulu pružnosti, zvláště u polymerního materiálu s nepatrnou tažností. V oblasti elastických deformací platí pro tříbodový systém, že prohnutí  $y$  je přímo úměrné síle a délce podpěr, nepřímo modulu pružnosti a momentu setrvačnosti.[20]

$$y = \frac{Fl^3}{48E_0 \cdot I} \quad [mm] \quad (21)$$

Modul pružnosti se určuje tak, že se stanoví průhyby pro různá zatížení a hodnoty se vynesou do grafu  $F - y$ . Spojnice hodnot má být přímka vycházející z počátku a modul pružnosti se pak vypočítá z přímkové oblasti:[14]

$$E_0 = \frac{l^3}{4bh^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta y} \quad [MPa] \quad (22)$$

## 8 SUMARIZACE TEORETICKÉ ČÁSTI A STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI

Literární část této práce je rozdělena do několika kategorií. V těchto kategoriích je věnována pozornost charakteristice a rozdělení kompozitů přes složení a výrobu až po únavovou mechaniku laminátů.

Únavová mechanika laminátů se již věnuje samotnému cyklickému zatěžování a zabývá se různými způsoby porušení vláken.

Nejdůležitějším cílem diplomové práce je zjištění vlivu počtu cyklů na tuhost laminátu v tahu a ohybu.

V experimentální části, při měření statických zkoušek, byl použit přístroj Zwick 1456 s programem tXpert. Statické zkoušky byly měřeny pro různé teploty, a to + 20 °C, + 60 °C, + 100 °C a - 30 °C. Při měření únavové zkoušky, byl použit totožný stroj Zwick 1456 s programem tXpert II.

V závěrečné části budou naměřené hodnoty u statické zkoušky vyhodnoceny v závislosti na rozdílu teplot. U únavové zkoušky se zjistí úbytek tuhosti na jeden cyklus.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

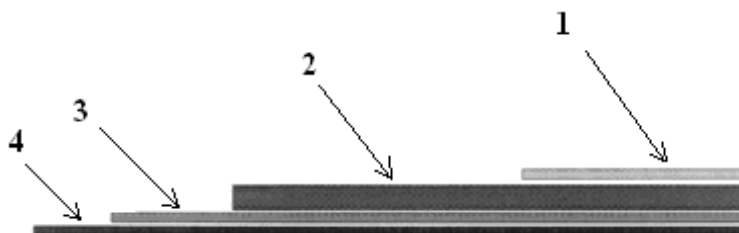
## 9 ZKUŠEBNÍ VZORKY A ZAŘÍZENÍ PRO EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY

Pro mechanické zkoušky poskytla vzorky společnost A.A.R. plast s.r.o. Byly použity dvě struktury laminátů, a to: S4 a S8 různých délek a směru kladení, L a T.

Zkušební vzorky byly dodány ve formě obdélníkového průřezu různých délek.

Ohybové, tahové i cyklické ohybové a tahové zkoušky byly provedeny na zkušebním univerzálním stroji ZWICK 145 665.

### 9.1 Struktura a složení laminátových stěn S4



Obr. 17. Struktura laminátu S4

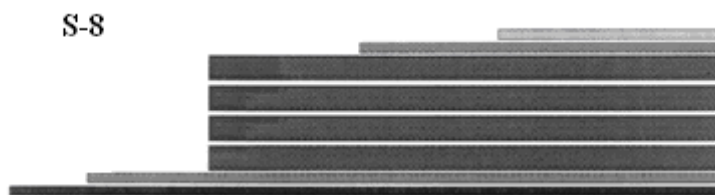
Tab. 1. Legenda struktury

1	TOPCOAT
2	Combi 800/450 tkanina
3	Rohož 450
4	Gelcoat

Tab. 2. Složení struktury S4- obchodní názvy

Gelcoat	Topcoat	Pryskyřice	Rohož gramáž/ vrstvy	Tkanina gra- máž/ vrstvy
Crystic 93 PA Grey 6057	Crystic 2000 Orange AC	Aropol K-530 TB	2x450 g/m <sup>2</sup>	3x800/450 g/m <sup>2</sup>

## 9.2 Struktura a složení laminátových stěn S8



Obr. 18. Struktura laminátu S8

Tab. 3. Složení struktury S8- obchodní názvy

Gelcoat	Topcoat	Pryskyřice	Rohož gramáž/ vrstvy	Tkanina gra- máž/ vrstvy
Maxguard RAL 5005	Aropol K-530 TB	Aropol K-530 TB	2x450 g/m <sup>2</sup>	4x800/450 g/m <sup>2</sup>

## 10 STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ TAHEM

Tahové vlastnosti byly stanoveny dle normy ČSN EN ISO 527, ačkoli rozměry zkušebních vzorků neodpovídali rozměrům stanovených v příslušné normě.

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

Po spuštění programu testXpert byl ke vzorku 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 hodnoty: mez pevnosti v tahu -  $\sigma_{tM}$ , poměrná deformace na mezi pevnosti -  $\varepsilon_M$ , modul pružnosti v tahu -  $E_t$ , celková deformace -  $\Delta l$ , síla na mezi pevnosti -  $F_M$  a další.

Pozn.: Jelikož struktura S8 vykazovala větší pevnost v tahu (20 kN), než byl stroj Zwick 145 665 možný vyvinout bylo nutné tuto strukturu ofrézovat na šířku 10 mm. K ofrézování byla použita frézka FHV-50PD.

### 10.1 Nastavené parametry pro zkoušku tahem

- rychlost	10	[mm·min <sup>-1</sup> ]
- předzatižení	2	[N]
- rychlost předzatižení	5	[mm·min <sup>-1</sup> ]
- měření modulu pružnosti při	0,05 – 0,25	[ % $\varepsilon$ ]
- rychlost při měření modulu pružnosti	1	[mm·min <sup>-1</sup> ]
- tloušťka, šířka vzorku	a,b	[mm]
- délka vzorku	150	[mm]



*Obr. 19. Zkouška tahem- připojený extenzometr*



### 10.1.1 Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 20 °C

Tab. 4. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L

#1	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$F_M$
n = 4	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm	N
x	6,65	15,13	199	12134	7,22	2,01	0,40	19968
s	0,13	0,10	14,1	776	0,54	0,12	0,02	1453

Tab. 5. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T

#2	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm	N
x	6,20	14,52	194	12864	6,62	1,95	0,39	17484
s	0,10	0,13	13,4	2298	0,39	0,21	0,04	1012

### 10.1.2 Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě + 20 °C

Tab. 6. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L

#3	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm	N
x	7,34	10,04	229	13483	7,33	2,16	0,43	16841
s	0,13	0,06	11,9	1291	0,18	0,19	0,04	586

Tab. 7. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T

#4	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm	N
x	7,06	10,22	198	12077	6,85	2,01	0,40	14446
s	0,38	0,05	20,8	1309	0,22	0,24	0,05	811

**10.1.3 Shrnutí výsledků tahových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě + 20 °C***Tab. 8. Srovnání průměrných tahových hodnot pro struktury S4 a S8 při + 20 °C*

	S4		S8	
	L	T	L	T
<b><math>E_t</math> [MPa]</b>	12134	12864	13484	12077
<b><math>\sigma_{tM}</math> [MPa]</b>	199	194	229	198
<b><math>\varepsilon_M</math> [%]</b>	2,0	2,0	2,2	2,0
<b><math>F_M</math> [N]</b>	19968	17484	16841	14446

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

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře, aby se vytemperovali na stejnou teplotu a to 60 °C. Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny tahové zkoušky a zjištěny následující parametry, které jsou v níže uvedených tabulkách.

### 10.2.1 Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 60 °C

Tab. 9. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L

#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	192	10959	8,12	2,03	0,39
s	0,21	0,42	11,5	398	0,17	0,04	0,01

Tab. 10. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T

#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	14,5	157	10595	7,41	1,60	0,32
s	0,21	0,45	34,7	509	1,16	0,43	0,09

### 10.2.2 Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě + 60 °C

Tab. 11. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L

#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	142	11179	6,46	1,33	0,26
s	0,09	0,04	58,3	474	1,99	0,56	0,11

Tab. 12. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T

#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	10576	7,25	1,67	0,32
s	0,40	0,05	15,7	508	0,21	0,16	0,04

### 10.2.3 Shrnutí výsledků tahových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě + 60 °C

Tab. 13. Srovnání průměrných tahových hodnot pro struktury S4 a S8 při + 60 °C

	S4		S8	
	L	T	L	T
<b><math>E_t</math> [MPa]</b>	10959	10595	11179	10576
<b><math>\sigma_{tM}</math> [MPa]</b>	192	157	142	157
<b><math>\varepsilon_M</math> [%]</b>	2,0	1,6	1,3	1,7

### 10.3 Zkouška tahem v teplotní komoře při + 100 °C

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře, aby se vytemperovali na stejnou teplotu a to 100 °C. Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny tahové zkoušky a zjištěny následující parametry, které jsou v níže uvedených tabulkách.

#### 10.3.1 Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 100 °C

Tab. 14. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L

#1	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	6,52	15,48	152	10636	8,26	1,68	0,33
s	0,24	0,16	20,4	725	0,13	0,27	0,05

Tab. 15. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T

#2	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	6,12	14,62	130	7642	8,38	1,60	0,31
s	0,21	0,13	12,02	894	0,48	0,19	0,04

#### 10.3.2 Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě + 100 °C

Tab. 16. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L

#3	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	7,62	10,1	122	7361	7,78	1,62	0,32
s	0,49	0,00	11,5	965	0,66	0,40	0,08

Tab. 17. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T

#4	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	7,36	10,22	123	8169	7,66	1,35	0,26
s	0,31	0,04	19,4	973	0,49	0,19	0,04

### 10.3.3 Shrnutí výsledků tahových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě + 100 °C

Tab. 18. Srovnání průměrných tahových hodnot pro struktury S4 a S8 při +100 °C

	S4		S8	
	L	T	L	T
<b><math>E_t</math> [MPa]</b>	10636	7642	7361	8169
<b><math>\sigma_{tM}</math> [MPa]</b>	151	130	122	123
<b><math>\varepsilon_M</math> [%]</b>	1,7	1,6	1,6	1,4

#### 10.4 Zkouška tahem v teplotní komoře při teplotě - 30 °C

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře, aby se vytemperovali na stejnou teplotu a to -30 °C. K podchlazení vzorků byl použit stlačený dusík. Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny tahové zkoušky a zjištěny následující parametry, které jsou v níže uvedených tabulkách.



*Obr. 20. Tahová zkouška při - 30 °C*



Obr. 21. Přídavná láhev s dusíkem

#### 10.4.1 Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě - 30 °C

Tab. 19. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L

#1	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	6,58	14,1	219	13940	8,62	2,23	0,44
s	0,47	2,28	8,83	1519	0,36	0,16	0,03

Tab. 20. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T

#2	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	6,08	14,52	203	15121	8,22	2,04	0,40
s	0,18	0,13	30,7	1601	0,74	0,49	0,10



### 10.4.2 Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě -30 °C

Tab. 21. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L

#3	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 3	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	7,10	10,10	236	16939	8,47	1,61	0,31
s	0,10	0,00	15,0	1481	0,61	0,48	0,10

Tab. 22. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T

#4	a	b	$\sigma_{tM}$	$E_t$	$\Delta l$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$
n = 4	mm	mm	MPa	MPa	mm	%	mm
x	7,50	10,10	208	14800	8,26	2,06	0,41
s	0,16	0,00	7,59	1766	0,23	0,09	0,02

### 10.4.3 Shrnutí výsledků tahových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě - 30 °C

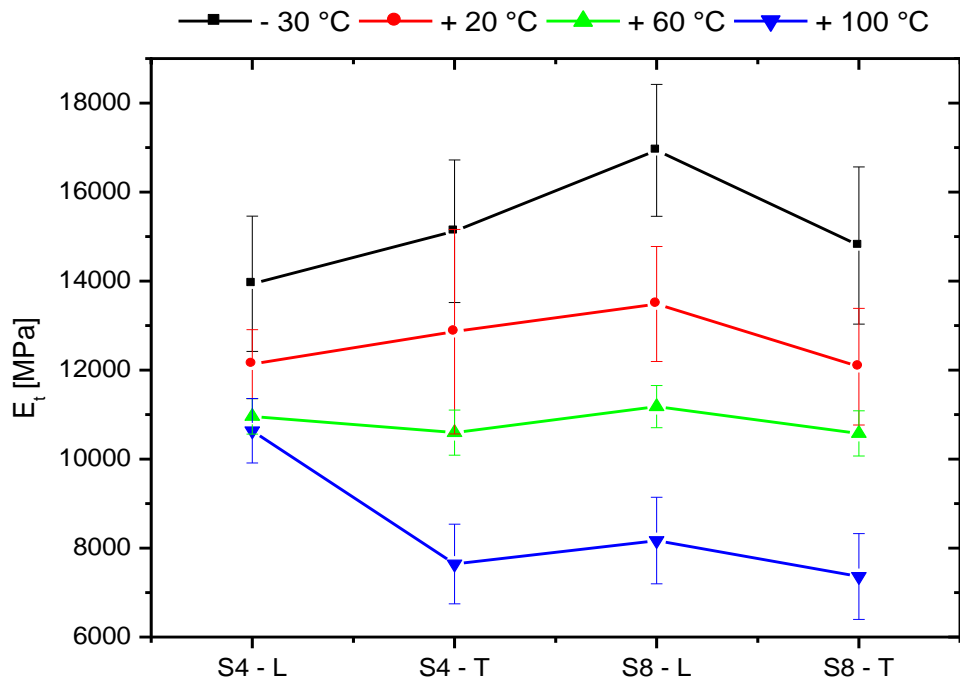
Tab. 23. Srovnání průměrných tahových hodnot pro struktury S4 a S8 při -30 °C

	S4		S8	
	L	T	L	T
<b><math>E_t</math> [MPa]</b>	13940	15121	16939	14800
<b><math>\sigma_{tM}</math> [MPa]</b>	219	203	236	208
<b><math>\varepsilon_M</math> [%]</b>	2,2	2,0	1,6	2,1

## 10.5 Shrnutí a diskuze výsledků tahových zkoušek pro struktury S4 a S8

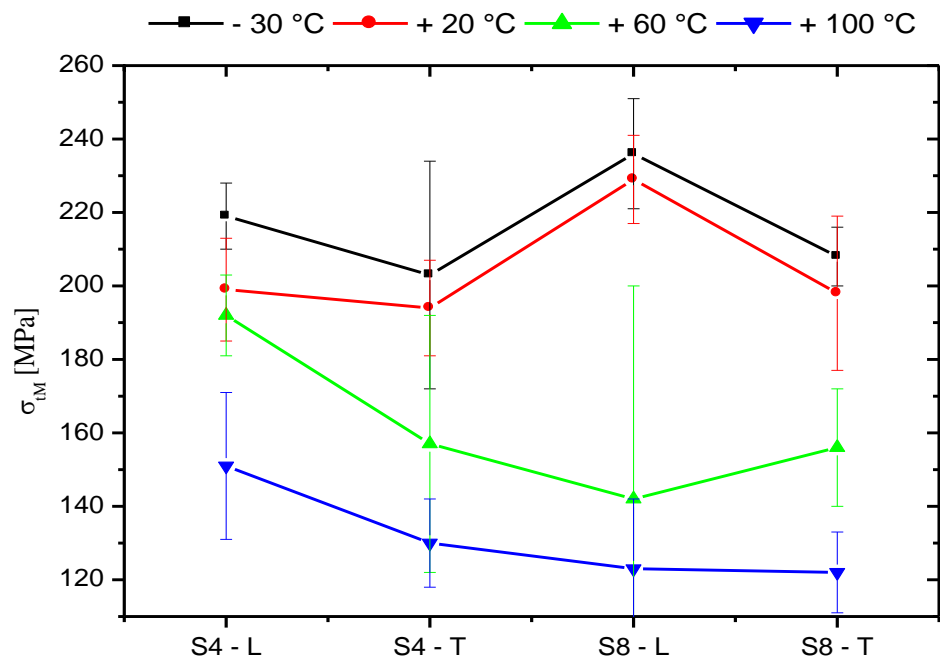
Tab. 24. Hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti v tahu pro různé teploty

		- 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]
<b>S4</b>	<b>L</b>	13940	219	12134	199	10959	192	10636	151
	<b>T</b>	15121	203	12864	194	10595	157	7642	130
<b>S8</b>	<b>L</b>	16939	236	13484	229	11179	142	8169	123
	<b>T</b>	14800	208	12077	198	10576	156	7361	122



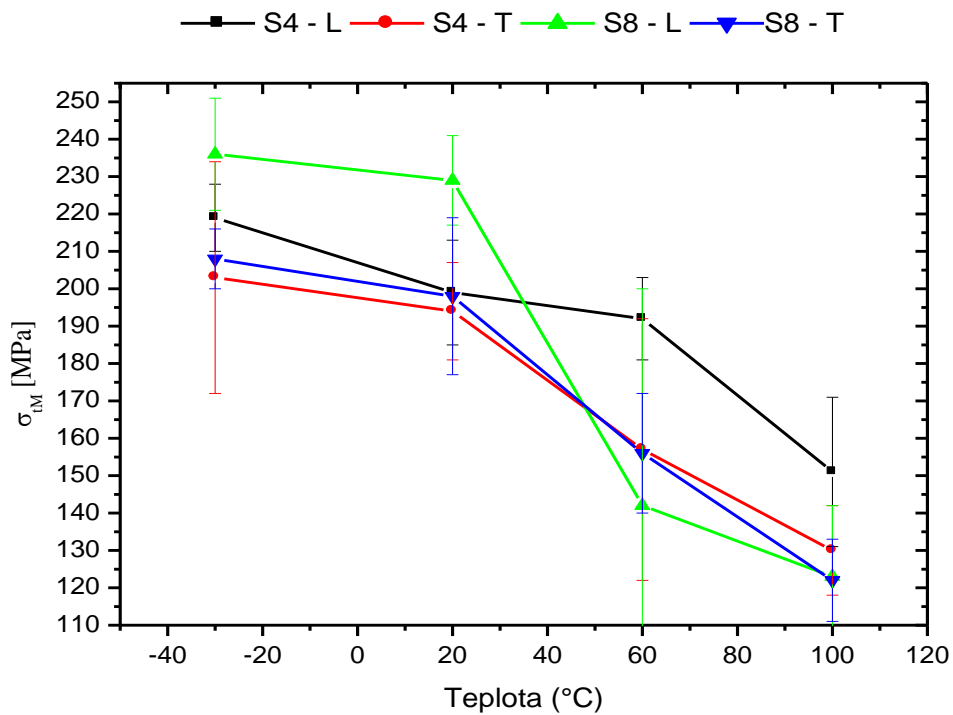
Obr. 22. Srovnání modulu pružnosti v tahu u struktur S4 a S8

Při srovnání modulu pružnosti v tahu za různých teplot dosahuje největší modul pružnosti vždy podchlazený laminát, ať už se jedná o strukturu S4 nebo o strukturu S8. Při podchlazení vzroste modul laminátu o 16 % u struktury S4 oproti pokojové teplotě laminátu. U struktury S8 činí nárůst modulu 24 %. Pokud zvyšujeme teplotu prostředí při zkoušení laminátu, klesá s tím modul pružnosti. Při srovnání hodnot laminátu za pokojové teploty a teploty + 100 °C, došlo k poklesu modulu u struktury S4 o 27 % a u struktury S8 se jedná o pokles o 39 %.



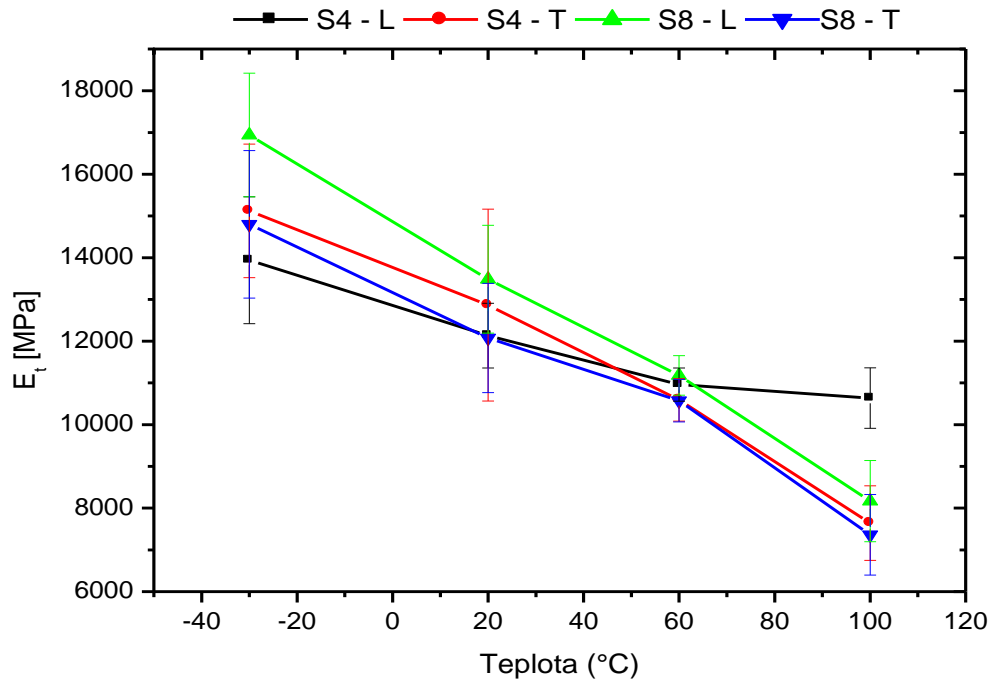
Obr. 23. Srovnání meze pevnosti v tahu u struktur S4 a S8

Největší pevnost byla naměřena u struktury S8 při teplotě  $-30\text{ °C}$ . I když byl laminát podchlazen, nenastalo výrazné zvýšení pevnosti oproti teplotě  $+20\text{ °C}$ . Se vzrůstající teplotou laminátu klesá jeho pevnost. Největší rozdíl byl zaznamenán u struktury S8, kdy rozdíl mezi pokojovou teplotou a teplotou  $+100\text{ °C}$  činí 43 %.



Obr. 24. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě

Struktura S8 dosáhla největší pevnosti při teplotě  $-30\text{ °C}$  a  $+20\text{ °C}$ . U této struktury nastal výrazný pokles pevnosti při zvýšení teploty na  $+60\text{ °C}$  a  $+100\text{ °C}$ . Zde se jevila struktura S8 jako nejméně pevná, tím pádem i nejméně odolná vůči vyšším teplotám. S rostoucí teplotou se pevnost struktur opět snižovala.



Obr. 25. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě

Největší modul pružnosti byl naměřen u struktury S8- L při teplotách  $-30\text{ °C}$ ,  $+20\text{ °C}$  a  $+60\text{ °C}$ . Jen u teploty  $+100\text{ °C}$  vykazovala lepší modul struktura S4- L. Je zajímavé, že při teplotě  $+60\text{ °C}$  se modul pružnosti dostal na stejnou úroveň u všech struktur laminátu.

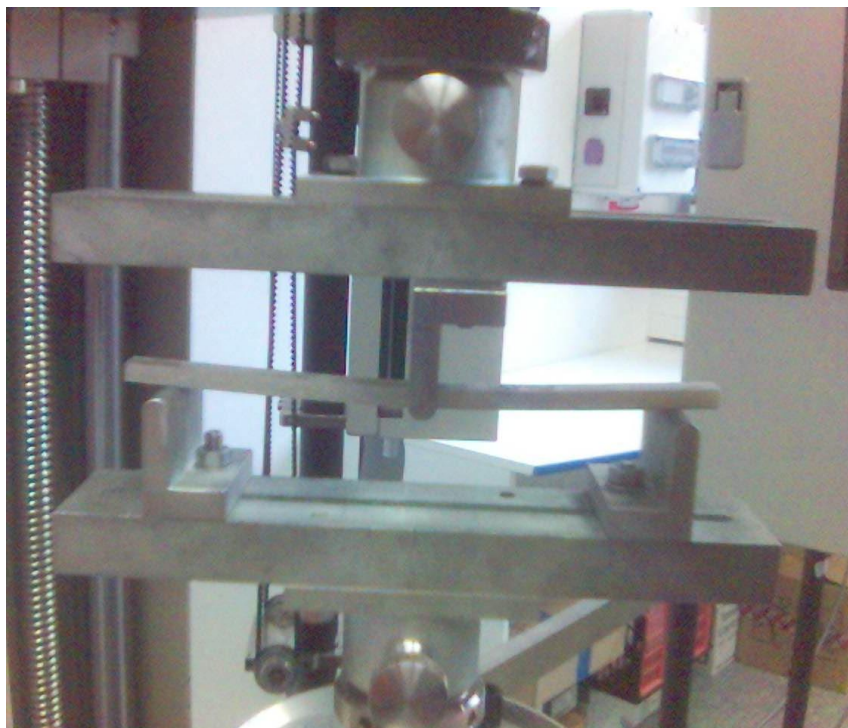
## 11 STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ OHYBEM

Ohybová zkouška byla provedena na zkušebním stroji ZWICK 145 665 s pomocí programu testXpert. Rozpětí podpěr bylo zvoleno tak, aby co nejvíce odpovídalo vztahu  $L = (16 \pm 1)h$ , což v našem případě odpovídá hodnotě 64 mm pro tloušťku  $h = 4$  mm. Pro ostatní tloušťky, nebo struktury se ponechala vzdálenost podpěr na hodnotě 64 mm, z důvodu krátké délky vzorků (75 mm). Pro vzorky dlouhé 235 mm byla nastavena vzdálenost rozpěr 200 mm.

Zkušební vzorky o délce 235 mm byly použity jen při teplotě 20 °C.

### 11.1 Nastavené parametry 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 – 0,2	[% ε]
- vzdálenost podpěr	$L_p$	[mm]
-tloušťka, šířka vzorku	$a, b$	[mm]



Obr. 26. Ohybová zkouška

### 11.1.1 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 20 °C, vzdálenost podpěr 64 mm

Tab. 25. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L

#1	a	b	$\sigma_{fM}$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$	$R_{mF}$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa	N
x	6,5	15,23	286	4,16	4,39	9554	1852
s	0,1	0,21	18,9	0,81	0,82	146	143

Tab. 26. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T

#2	a	b	$\sigma_{fM}$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$	$R_{mF}$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa	N
x	6,15	14,13	281	4,05	4,49	9918	1561
s	0,30	0,41	12,5	0,74	0,80	567	100

### 11.1.2 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě + 20 °C, vzdálenost podpěr 64 mm

Tab. 27. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L

#3	a	b	$\sigma_{fM}$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$	$R_{mF}$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa	N
x	7,33	15,60	336	4,38	4,09	10166	2924
s	0,19	0,34	12,2	0,17	0,18	377	96,7

Tab. 28. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T

#4	a	b	$\sigma_{fM}$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$	$R_{mF}$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa	N
x	7,55	15,55	306	4,44	4,01	8915	2830
s	0,10	0,24	14,7	0,29	0,28	231	198

### 11.1.3 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 20 °C, vzdálenost podpěr 200 mm

Tab. 29. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L

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

Tab. 30. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T

#5	a	b	$\sigma_{fM}$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,40	14,23	210	3,06	34,08	10115
s	0,10	0,40	15,9	0,10	3,95	603



#### 11.1.4 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 20 °C, vzdálenost podpěr 200 mm

Tab. 31. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L

#6	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,33	15,05	277	2,84	25,85	13026
s	0,39	0,06	17,7	0,17	1,57	1022

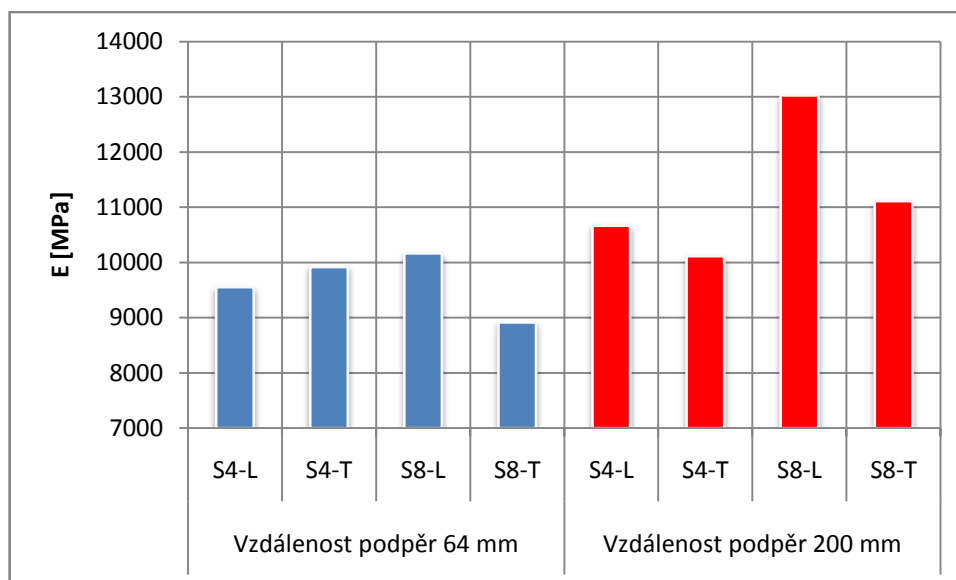
Tab. 32. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T

#8	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 4	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,70	40,20	250	3,15	27,25	11112
s	0,35	50,00	14,9	0,46	3,57	737

### 11.1.5 Shrnutí a diskuze výsledků ohybových zkoušek pro vzdálenosti podpěr 64 mm a 200 mm, struktur S4 a S8, při teplotě + 20 °C

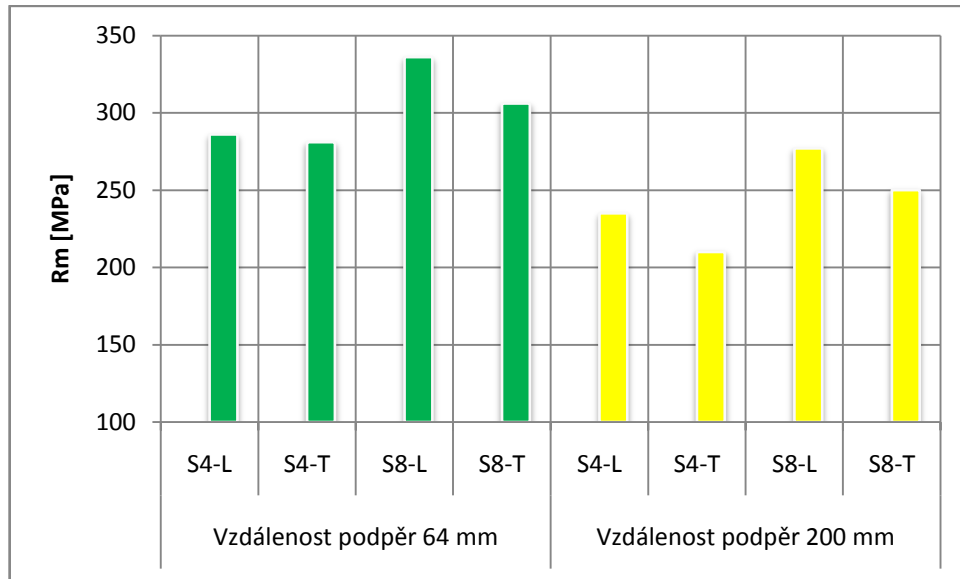
Tab. 33. Srovnání průměrných ohybových hodnot pro struktury S4 a S8 při +20 °C

	$L_p = 64 \text{ mm}$				$L_p = 200 \text{ mm}$			
	S 4		S 8		S 4		S-8	
	Směr L	Směr T	Směr L	Směr T	Směr L	Směr T	Směr L	Směr T
$E_f$ [MPa]	9554	9918	10166	8915	10667	10115	13026	11112
$\sigma_{fM}$ [MPa]	286	281	336	306	235	210	277	250
$\varepsilon_M$ [%]	4,2	4,1	4,4	4,4	3,3	3,1	2,8	3,2



Obr. 27. Srovnání modulu pružnosti v ohybu na délce vzorku

Při porovnání laminátů o dvou různých vzdálenostech podpěr, 64 mm a 200 mm bylo prokázáno, že vzorky na delší vzdálenost podpěr vykazují vždy větší modul pružnosti v tahu než kratší vzorky. Je jednoznačné, že vzdálenost podpěr má vliv na výsledky ohybové zkoušky. Vliv smykových napětí snižuje modul pružnosti, tzn., že na krátké vzorky působila větší smyková síla než na vzorky dlouhé. Tím pádem došlo u krátkých vzorků k poklesu modulu o 6 % u struktury S4 vůči dlouhým vzorkům a u struktury S8 činil tento rozdíl 21 %.



Obr. 28. Srovnání meze pevnosti v ohybu na délce vzorku

Při srovnání meze pevnosti v tahu u dvou různých vzdáleností podpěr, byla naměřena největší pevnost u délky podpěr 64 mm. Je to způsobeno tím, že u krátkých vzorků působí větší vliv smykových napětí, tím pádem se zvyšuje i mez pevnosti. U krátkých vzorků struktury S4 byl nárůst pevnosti 21 % oproti dlouhým vzorkům a u struktury S8 byl nárůst pevnosti o 18 %.

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

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře, aby se vytemperovali na stejnou teplotu a to + 60 °C. Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny tahové zkoušky a zjištěny následující parametry, které jsou v níže uvedených tabulkách.

### 11.2.1 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 60 °C

Tab. 34. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L

#1	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
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. 35. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T

#2	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,04	14,46	233	3,95	4,47	7075
s	0,15	0,33	13,0	0,24	0,34	574

### 11.2.2 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě + 60 °C

Tab. 36. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L

#3	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,08	15,88	265	3,96	3,82	7898
s	0,08	0,13	12,9	0,33	0,34	395

Tab. 37. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T

#4	a	b	$\sigma_{fM}$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,48	15,66	212	4,06	3,70	6026
s	0,24	0,15	13,2	0,53	0,39	472

### 11.2.3 Shrnutí výsledků ohybových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě + 60 °C

Tab. 38. Srovnání průměrných ohybových hodnot pro struktury S4 a S8 při +60 °C

	S4		S8	
	L	T	L	T
<b><math>E_f</math> [MPa]</b>	6641	7075	7898	6026
<b><math>\sigma_{fM}</math> [MPa]</b>	225	233	265	212
<b><math>\varepsilon_M</math> [%]</b>	4,1	4,0	4,0	4,1

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

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře, aby se vytemperovali na stejnou teplotu a to + 100 °C. Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny ohybové zkoušky a zjištěny následující parametry, které jsou v níže uvedených tabulkách.

#### 11.3.1 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě + 100 °C

Tab. 39. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L

#1	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,34	15,36	104	4,75	5,10	3917
s	0,11	0,09	2,80	1,23	1,28	293

Tab. 40. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T

#2	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,08	14,36	105	5,34	5,97	3964
s	0,13	0,29	13,4	1,68	1,78	213

#### 11.3.2 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě + 100 °C

Tab. 41. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L

#3	a	b	$\sigma_{fM}$	$\epsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,32	15,78	121	12,11	11,26	3989
s	0,15	0,08	13,5	2,91	2,56	386

Tab. 42. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T

#4	a	b	$\sigma_{fM}$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,28	15,66	103	8,95	8,39	2899
s	0,18	0,18	14,8	2,25	2,05	519

### 11.3.3 Shrnutí výsledků ohybových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě +100°C

Tab. 43. Srovnání průměrných ohybových hodnot pro struktury S4 a S8 při +100 °C

	S4		S8	
	L	T	L	T
$E_f$ [MPa]	3917	3964	3989	2899
$\sigma_{fM}$ [MPa]	104	105	121	103
$\varepsilon_M$ [%]	4,8	5,3	12,1	9,0

### 11.4 Zkouška ohybem v teplotní komoře při teplotě - 30 °C

Zkušební vzorky byly ponechány cca 30 minut v teplotní komoře, aby se vytemperovali na stejnou teplotu a to -30 °C. Po vytemperování byly na těchto vzorcích provedeny ohvé zkoušky a zjištěny následující parametry, které jsou v níže uvedených tabulkách.



*Obr. 29. Ohybová zkouška při - 30 °C*



## 11.4.1 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 při teplotě – 30 °C

Tab. 44. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L

#1	a	b	$\sigma_{fM}$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,30	14,88	357	5,33	5,76	9634
s	0,26	0,84	40,2	0,94	1,04	1675

Tab. 45. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T

#2	a	b	$\sigma_{fM}$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	6,14	14,3	348	5,47	6,07	9691
s	0,20	0,26	31,9	0,85	0,80	692

## 11.4.2 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S8 při teplotě – 30 °C

Tab. 46. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L

#3	a	b	$\sigma_{fM}$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 5	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,36	15,08	387	4,86	4,51	9918
s	0,11	0,11	22,9	0,25	0,26	514

Tab. 47. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T

#4	a	b	$\sigma_{fM}$	$\varepsilon_M$	$\Delta l_M$	$E_f$
n = 6	mm	mm	MPa	%	mm	MPa
x	7,70	15,70	356	5,25	4,67	8909
s	0,40	0,09	24,3	0,35	0,47	888

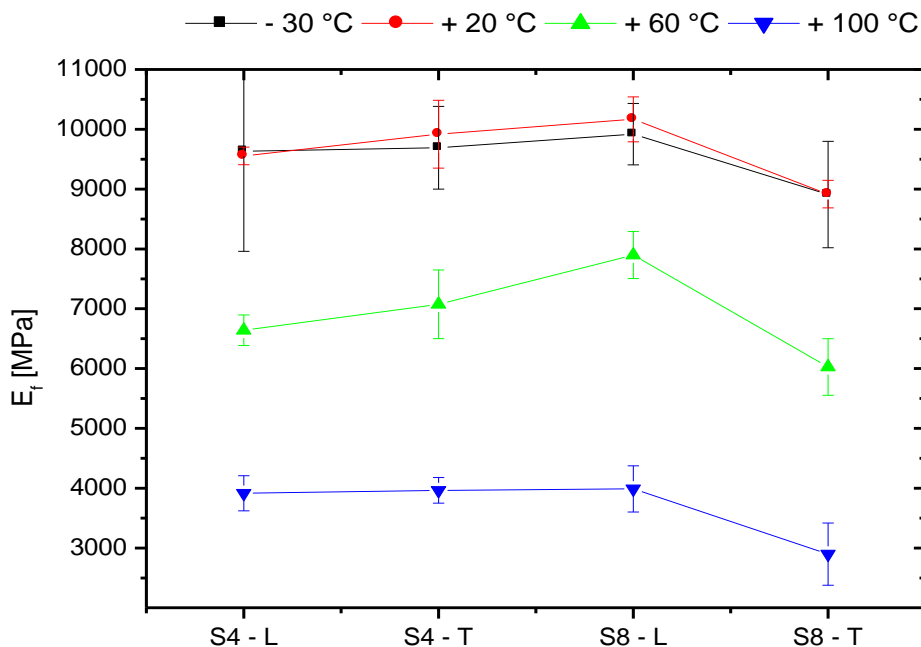
**11.4.3 Shrnutí výsledků ohybových zkoušek pro struktury S4 a S8 při teplotě – 30 °C***Tab. 48. Srovnání průměrných ohybových hodnot pro struktury S4 a S8 při - 30 °C*

	S4		S8	
	L	T	L	T
<b><math>E_f</math> [MPa]</b>	9634	9691	9918	8908
<b><math>\sigma_{fM}</math> [MPa]</b>	357	348	387	356
<b><math>\varepsilon_M</math> [%]</b>	5,2	5,5	4,9	5,3

## 11.1 Shrnutí a diskuze výsledků ohybových zkoušek pro struktury S4 a S8

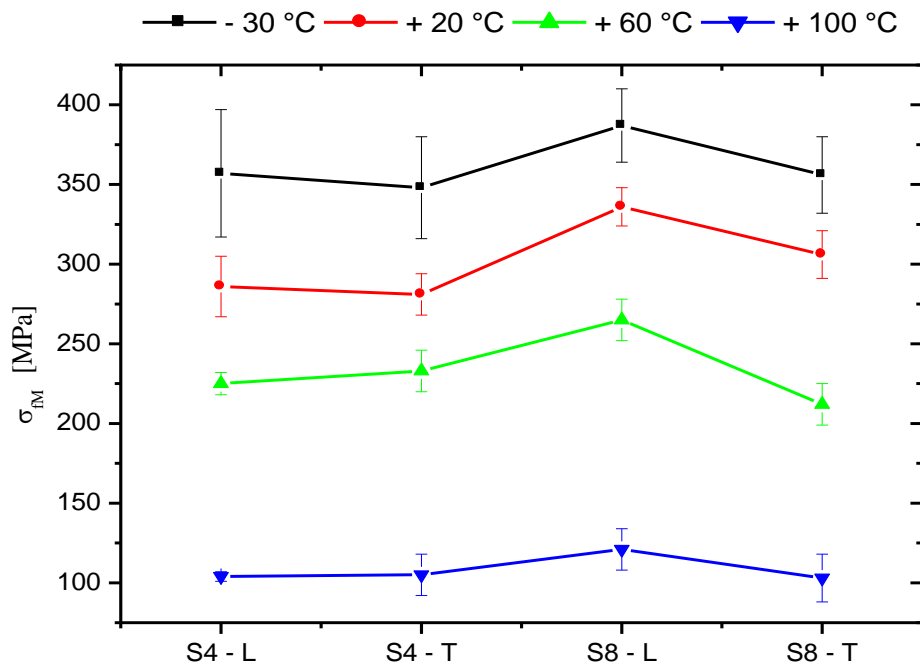
Tab. 49. Hodnoty modulu pružnosti a mezi pevnosti v ohybu pro různé teploty

		- 30 °C		+ 20 °C		+ 60 °C		+ 100 °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



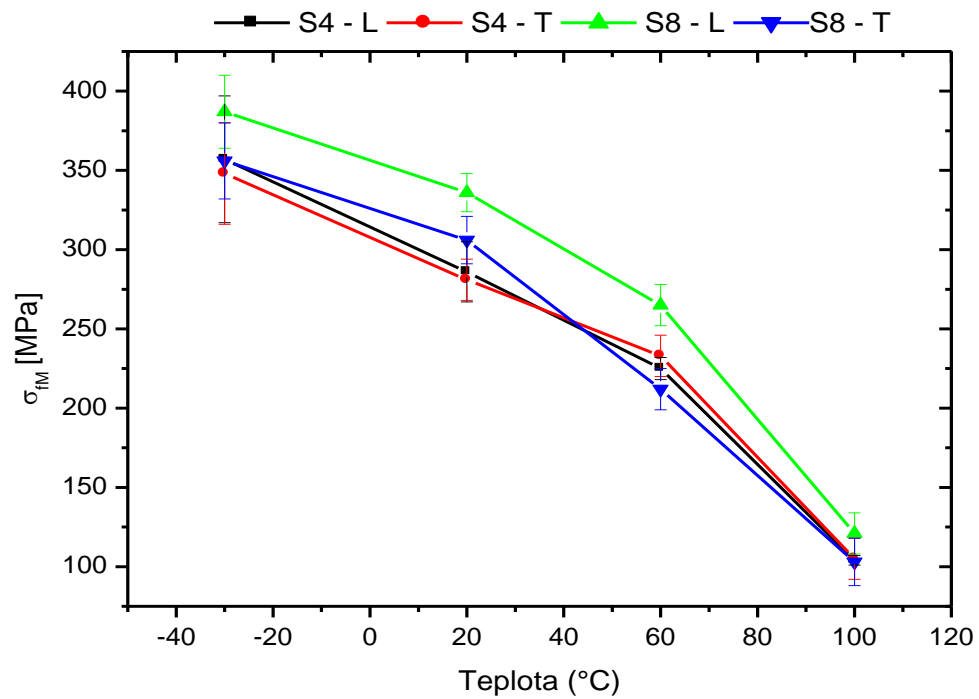
Obr. 30. Srovnání modulu pružnosti v ohybu na struktuře S4 a S8

Uvedené struktury na obr. 30. ukazují pro teplotu + 20 °C a – 30 °C prakticky tožné velikosti modulů pružnosti. Podchlazené vzorky se vyrovnají tuhostí vzorkům za pokojové teploty, i když při teplotě – 30 °C se stávají křehčími. S rostoucí kladnou teplotou modul pružnosti klesá u všech vzorků. Při srovnání struktury S4 při + 20 °C a + 60 °C došlo ke snížení modulu o 30 %, u struktury S8 došlo ke snížení modulu o 27 %. Při srovnání teploty + 20 °C a + 100 °C došlo u struktury S4 ke snížení modulu o 60 % a u struktury S8 o 64 %.



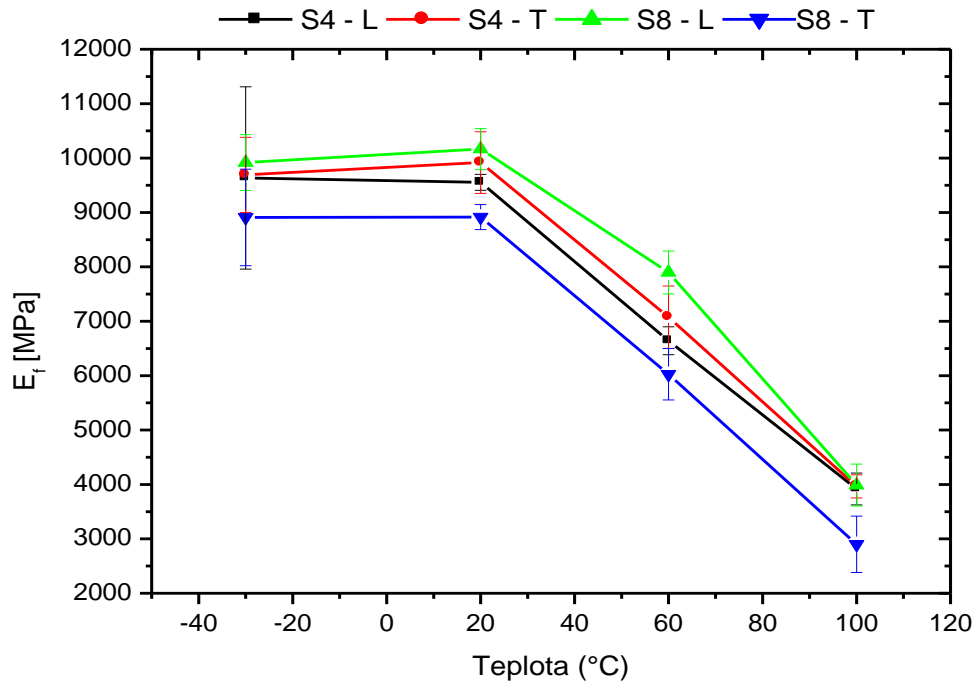
Obr. 31. Srovnání meze pevnosti v ohybu na struktuře S4 a S8

Největší hodnoty meze pevnosti byly naměřeny při teplotě  $-30\text{ °C}$ . Laminát byl podchlazen, proto vykazoval největší pevnost v ohybu, ale za to se stal více křehkým. U struktury S4 byl nárůst pevnosti při podchlazení o 24 % větší než za teploty  $+20\text{ °C}$ . U struktury S8 se jedná při shodných teplotách o 16- ti % zvýšení pevnosti. S rostoucí teplotou klesá pevnost zkoušených vzorků. Pokud srovnáme teplotu  $+20\text{ °C}$  a  $+100\text{ °C}$  vyjde nám u struktury S4 pokles pevnosti až o 63 %. U struktury S8 činí tento rozdíl dokonce 65 %.



Obr. 32. Závislost meze pevnosti v ohybu na teplotě

Nejlepší pevnost při měřených teplotách byla naměřena u struktury S8- L. Zbylé tři struktury dosahovali prakticky stejné pevnosti při všech teplotách. S rostoucí teplotou klesala i pevnost laminátu. U teploty + 100 °C se pevnost všech struktur stává velmi podobná.



Obr. 33. Závislost modulu pružnosti v ohybu na teplotě

Struktura S8- L dosahuje největšího modulu pružnosti při všech měřených teplotách. Zajímavé je, že při teplotě + 100 °C vykazují stejný modul pružnosti všechny struktury kromě struktury S8- T, která má nejnižší modul při zmíněné teplotě. Nejmenší modul byl naměřený u struktury S8- T u všech teplot.

## 12 STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ CYKLICKÝM TAHEM

Zkouška cyklickým tahem byla měřena za pokojové teploty při 20 °C. Pro každou strukturu (S4 a S8) byly naměřeny dvě únavové hodnoty. První únavová hodnota byla 75 %  $F_M$  a druhá byla 87,5 %  $F_M$ . Statickou zkouškou byla zjištěna velikost síly při přetržení, tj.  $F_M$ .

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

Po spuštění programu testXpert II byl ke vzorku automaticky připojen extenzometr. 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. Jelikož program zaznamenával jen určité data, bylo nutné po měření provést výpočet modulu pružnosti  $E_t$  pro každý naměřený vzorek.

Pozn.: Struktura S8 byla ofrézována na šířku 10 mm. K ofrézování byla použita frézka FHV-50PD.

### 12.1 Nastavené parametry pro zkoušku cyklickým tahem

- rychlost cyklování	20	[mm·min <sup>-1</sup> ]
- předzatižení	5	[N]
- rychlost předzatižení	10	[mm·min <sup>-1</sup> ]
- tloušťka, šířka vzorku	$a, b$	[mm]
- velikost zatížení na 1 cyklus	75 a 87,5	[% · $F_M$ ]

### 12.1.1 Výsledky cyklických tahových zkoušek pro strukturu S4 ve směru L, při hodnotě zatížení 75 % $F_M$ , tj. 14975 N

Tab. 50. Tahové únavové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L, při zatížení 14975 N

	$\sigma_{pct}$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\Delta(E_{t,a}-E_{t,c})$ [MPa]	n- cyklů	$E_{ut}$ na cyklus
1a.Vzorek	149	12460	4984	48	104
1c.Vzorek		7476			
2a.Vzorek	166	12000	667	6	111
2c.Vzorek		11333			
3a.Vzorek	142	11570	2083	256	8
3c.Vzorek		9488			
4a.Vzorek	154	12884	466	38	12
4c.Vzorek		12418			
5a.Vzorek	154	11722	1443	155	9
5c.Vzorek		10280			

1a.Vzorek- naměřený modul v tahu ( $E_{t,a}$ ) při prvním cyklu

1c.Vzorek- naměřený modul v tahu ( $E_{t,c}$ ) při posledním cyklu

Tab. 51. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus

pokles tuhosti na 1 cyklus
19 [MPa]



### 12.1.2 Výsledky cyklických tahových zkoušek pro strukturu S4 ve směru T, při hodnotě zatížení 75 % $F_M$ , tj. 13113 N

Tab. 52. Tahové únavové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T, při zatížení 13113 N

	$\sigma_{pct}$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\Delta(E_{ta}-E_{tc})$ [MPa]	n- cyklů	$E_{ut}$ na cyklus
1a.Vzorek	150	13430	2893	544	5
1c.Vzorek		10537			
2a.Vzorek	151	11530	1504	207	7
2c.Vzorek		10026			
3a.Vzorek	156	12870	2845	3	948
3c.Vzorek		10025			
4a.Vzorek	151	12261	766	42	18
4c.Vzorek		11494			
5a.Vzorek	155	11853	1317	69	19
5c.Vzorek		10536			

Tab. 53. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus

úbytek tuhosti na 1 cyklus
11 [MPa]

### 12.1.3 Výsledky cyklických tahových zkoušek pro strukturu S8 ve směru L, při hodnotě zatížení 75 % $F_M$ , tj. 12631 N

Tab. 54. Tahové únavové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L, při zatížení 12631 N

	$\sigma_{pct}$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\Delta(E_{ta}-E_{tc})$ [MPa]	n- cyklů	$E_{ut}$ na cyklus
1a.Vzorek	175	13387	761	26	29
1c.Vzorek		12626			
2a.Vzorek	180	12646	872	20	44
2c.Vzorek		11774			
3a.Vzorek	179	12573			
3c.Vzorek					
4a.Vzorek	180	12698			
4c.Vzorek					
5a.Vzorek	176	12488	978	32	31
5c.Vzorek		11510			

Tab. 55. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus

úbytek tuhosti na 1 cyklus
33 [MPa]

Pozn.: Jelikož byl u třech vzorků naměřen určitý počet cyklů, který se příliš nelišil mezi sebou, byl udělán průměr s úbytkem tuhosti na 1 cyklus.

### 12.1.4 Výsledky cyklických tahových zkoušek pro strukturu S8 ve směru T, při hodnotě zatížení 75 % $F_M$ , tj. 10835 N

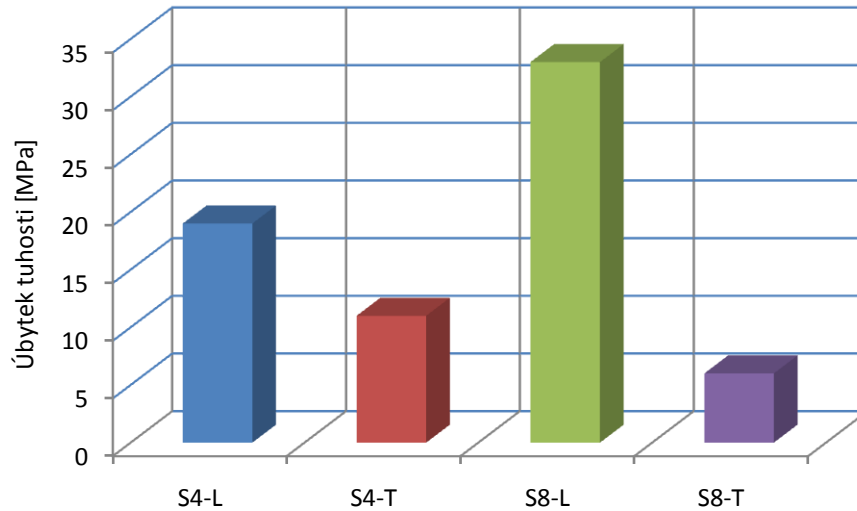
Tab. 56. Tahové únavové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T, při zatížení 10835 N

	$\sigma_{pct}$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\Delta(E_{ta}-E_{tc})$ [MPa]	n- cyklů	$E_{ut}$ na cyklus
1a.Vzorek	150	10684	937	89	11
1c.Vzorek		9747			
2a.Vzorek	166	13656	1413	305	5
2c.Vzorek		12244			
3a.Vzorek	149	14226	2002	6	334
3c.Vzorek		12223			
4a.Vzorek	148	12379	2476	739	3
4c.Vzorek		9903			
5a.Vzorek	149	11729	1351	265	5
5c.Vzorek		10378			

Tab. 57. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus

úbytek tuhosti na 1 cyklus
6 [MPa]

## 12.2 Shrnutí a diskuze výsledků cyklických tahových zkoušek pro struktury S4 a S8



Obr. 34. Úbytek tuhosti pro struktury S4 a S8 při 75 %  $F_M$

Nejmenšího úbytku, cca 6 MPa, v cyklickém tahu při hodnotě 75 %  $F_M$  dosáhla struktura S8-T. Struktura S8-L vykazovala zvýšení úbytku tuhosti o 450 % vůči struktuře S8-T. Porovnáním struktur S4 došlo ke zvýšení úbytku tuhosti o 73 % ve směru L.

Cyklické tahové zkoušky byly měřeny i pro 87,5 %  $F_M$  hodnotu zatížení laminátu. Jelikož při takto velkém zatížení došlo vždy k přetrhnutí vzorku dříve, než se uskutečnil alespoň jeden takový cyklus, bylo tohle měření odebráno z výsledků. Samotné předčasné přetrhnutí má za následek program testXpert II, který se při najíždění horní hranice zatížení snažil dosáhnout přesně nastavené hodnoty, což řádově trvalo i několik desítek vteřin.

## 13 STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ CYKLICKÝM OHYBEM

Zkouška cyklickým ohybem byla měřena za pokojové teploty při 20 °C. Pro každou strukturu (S4 a S8) byly naměřeny dvě únavové hodnoty. První únavová hodnota byla 75 %  $F_M$  a druhá byla 87,5 %  $F_M$ . Statickou zkouškou byla zjištěna velikost síly při přelomení, tj.  $F_M$ .

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

Zkouška probíhala až do úplného prasknutí vzorku. Jelikož program testXpert II zaznamenával jen určité data, bylo nutné po měření provést výpočet modulu pružnosti  $E_f$  pro každý naměřený vzorek.

### 13.1 Nastavené parametry pro zkoušku cyklickým ohybem

- rychlost cyklování	20	[mm·min <sup>-1</sup> ]
- předzatížení	5	[N]
- rychlost předzatížení	10	[mm·min <sup>-1</sup> ]
- tloušťka, šířka vzorku	$a, b$	[mm]
- velikost zatížení na 1 cyklus	75 a 87,5	[% · $F_M$ ]

### 13.1.1 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 ve směru L, při hodnotě zatížení 75 % $F_M$ , tj. 1390 N

Tab. 58. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L, při zatížení 1390 N

	$\sigma_{pc0}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\Delta(E_{fa} - E_{fc})$ [MPa]	n- cyklů	$E_{uf}$ na cyklus
1a.Vzorek	241	9950	4478	84	53
1c.Vzorek		5473			
2a.Vzorek	241	10592	4025	32	126
2c.Vzorek		6567			
3a.Vzorek	206	9998	3658	615	6
3c.Vzorek		6340			
4a.Vzorek	212	10021	3655	1314	3
4c.Vzorek		6366			
5a.Vzorek	241	9851	3284	104	32
5c.Vzorek		6567			

1a.Vzorek- naměřený modul v ohybu ( $E_{fa}$ ) při prvním cyklu

1c.Vzorek- naměřený modul v ohybu ( $E_{fc}$ ) při posledním cyklu

Tab. 59. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus

pokles tuhosti na 1 cyklus
9 [MPa]

### 13.1.2 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 ve směru L, při hodnotě zatížení 87,5 % $F_M$ , tj. 1620 N

Tab. 60. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L, při zatížení 1620 N

	$\sigma_{pc0}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\Delta(E_{fa} - E_{fc})$ [MPa]	n- cyklů	$E_{uf}$ na cyklus
1a.Vzorek	241	8477	2628	29	91
1c.Vzorek		5849			
2a.Vzorek	247	8544	2729	10	273
2c.Vzorek		5815			
3a.Vzorek	247	9779	3630	340	11
3c.Vzorek		6149			
4a.Vzorek	230	8476	3582	42	85
4c.Vzorek		4895			
5a.Vzorek	228	8960	3225	247	13
5c.Vzorek		5734			

Tab. 61. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus

<b>pokles tuhosti na 1 cyklus</b>
24 [MPa]

### 13.1.3 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 ve směru T, při hodnotě zatížení 75 % $F_M$ , tj. 1170 N

Tab. 62. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L, při zatížení 1170 N

	$\sigma_{pc0}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\Delta(E_{fa} - E_{fc})$ [MPa]	n- cyklů	$E_{uf}$ na cyklus
1a.Vzorek	195	8333	2222	1090	2
1c.Vzorek		6111			
2a.Vzorek	221	9607	3362	904	4
2c.Vzorek		6245			
3a.Vzorek	184	7804	3143	802	4
3c.Vzorek		4661			
4a.Vzorek	217	7662	1889	134	14
4c.Vzorek		5773			
5a.Vzorek	245	9127	2852	62	46
5c.Vzorek		6275			

Tab. 63. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus

pokles tuhosti na 1 cyklus
5 [MPa]



### 13.1.4 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 ve směru T, při hodnotě zatížení 87,5 % $F_M$ , tj. 1365 N

Tab. 64. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T, při zatížení 1365 N

	$\sigma_{pc0}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\Delta(E_{fa} - E_{fc})$ [MPa]	n- cyklů	$E_{uf}$ na cyklus
1a.Vzorek	249	8806	2481	38	65
1c.Vzorek		6325			
2a.Vzorek	223	9838	3791	477	8
2c.Vzorek		6047			
3a.Vzorek	254	9193	2961	13	228
3c.Vzorek		6232			
4a.Vzorek	223	9259	2222	433	5
4c.Vzorek		7037			
5a.Vzorek	216	8280	2650	486	5
5c.Vzorek		5631			

Tab. 65. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus

<b>pokles tuhosti na 1 cyklus</b>
10 [MPa]

### 13.1.5 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S8 ve směru L, při hodnotě zatížení 75 % $F_M$ , tj. 2193 N

Tab. 66. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L, při zatížení 2193 N

	$\sigma_{pc0}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\Delta(E_{fa} - E_{fc})$ [MPa]	n- cyklů	$E_{uf}$ na cyklus
1a.Vzorek	260	9379	2984	465	6
1c.Vzorek		6395			
2a.Vzorek	246	9599	2688	353	8
2c.Vzorek		6911			
3a.Vzorek	231	8437	3128	841	4
3c.Vzorek		5308			
4a.Vzorek	261	9301	2027	221	9
4c.Vzorek		7274			
5a.Vzorek	231	8289	2308	1187	2
5c.Vzorek		5980			

Tab. 67. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus

pokles tuhosti na 1 cyklus
4 [MPa]

### 13.1.6 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S8 ve směru L, při hodnotě zatížení 87,5 % $F_M$ , tj. 2559 N

Tab. 68. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L, při zatížení 2559 N

	$\sigma_{pc0}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\Delta(E_{fa} - E_{fc})$ [MPa]	n- cyklů	$E_{uf}$ na cyklus
1a.Vzorek	277	8880	2816	38	74
1c.Vzorek		6065			
2a.Vzorek	287	8810	2356	14	168
2c.Vzorek		6455			
3a.Vzorek	257	7997	2543	15	170
3c.Vzorek		5454			
4a.Vzorek	280	8714	3394	86	39
4c.Vzorek		5320			
5a.Vzorek	313	9630	3555	34	105
5c.Vzorek		6076			

Tab. 69. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus

pokles tuhosti na 1 cyklus
78 [MPa]

### 13.1.7 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S8 ve směru T, při hodnotě zatížení 75 % $F_M$ , tj. 2123 N

Tab. 70. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T, při zatížení 2123 N

	$\sigma_{pc0}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\Delta(E_{fa} - E_{fc})$ [MPa]	n- cyklů	$E_{uf}$ na cyklus
1a.Vzorek	252	8040	2412	50	48
1c.Vzorek		5628			
2a.Vzorek	249	7409	1482	110	13
2c.Vzorek		5927			
3a.Vzorek	249	7826	2640	32	82
3c.Vzorek		5186			
4a.Vzorek	259	8759	2471	218	11
4c.Vzorek		6288			
5a.Vzorek	242	8202	2793	89	31
5c.Vzorek		5408			

Tab. 71. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus

pokles tuhosti na 1 cyklus
24 [MPa]

### 13.1.8 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S8 ve směru T, při hodnotě zatížení 87,5 % $F_M$ , tj. 2476 N

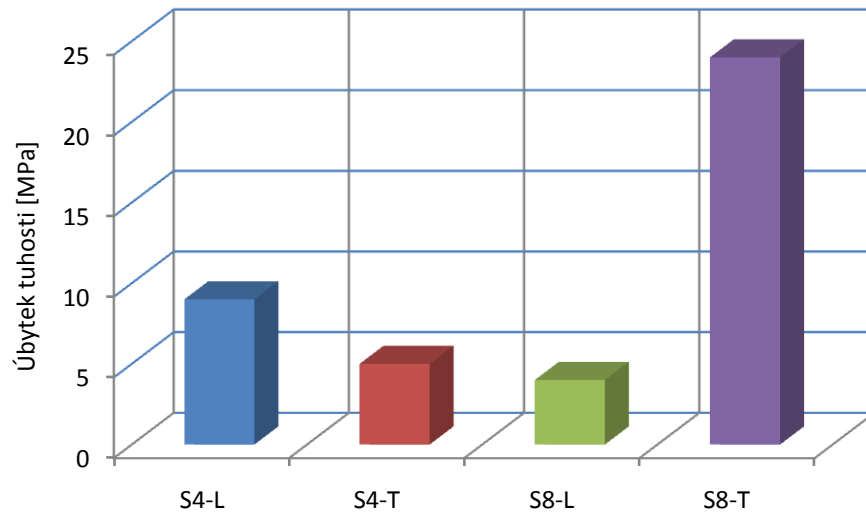
Tab. 72. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T, při zatížení 2476 N

	$\sigma_{pc0}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\Delta(E_{fa} - E_{fc})$ [MPa]	n- cyklů	$E_{uf}$ na cyklus
1a.Vzorek	273	8091	2496	136	18
1c.Vzorek		5595			
2a.Vzorek	271	7794	1699	153	11
2c.Vzorek		6096			
3a.Vzorek	280	7780	2068	14	148
3c.Vzorek		5711			
4a.Vzorek	284	7874	2073	25	83
4c.Vzorek		5800			
5a.Vzorek	334	10109	2148	12	179
5c.Vzorek		7961			

Tab. 73. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus

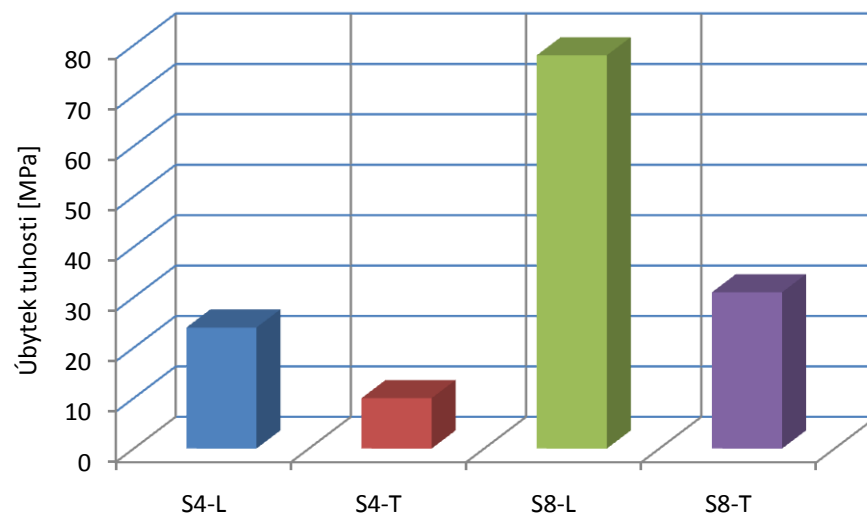
<b>pokles tuhosti na 1 cyklus</b>
31 [MPa]

### 13.2 Shrnutí a diskuze výsledků cyklických ohybových zkoušek pro struktury S4 a S8



Obr. 35. Úbytek tuhosti pro struktury S4 a S8 při 75 %  $F_M$

Při hodnotě 75 %  $F_M$  byl naměřen nejmenší úbytek tuhosti u struktury S8- L. I když je struktura S8-L podstatně rozdílná, jak v tloušťce, tak v počtu tkanin vykazovala přibližně stejný nebo aspoň srovnatelný úbytek tuhosti jako struktura S4-T. U obou těchto struktur se pohybuje úbytek tuhosti kolem hodnoty 5 MPa na jeden ohybový cyklus. Výrazný úbytek tuhosti, lišící se hodně od ostatních, ukázala struktura S8-T, kde byl nárůst úbytku tuhosti až šesti násobný než u struktury S8- L.



Obr. 36. Úbytek tuhosti pro struktury S4 a S8 při 87,5 %  $F_M$

Při hodnotě 87,5 %  $F_M$  byl naměřen nejmenší úbytek tuhosti na jeden ohybový cyklus u struktury S4- T. Struktura S4- L vykazuje přibližně zvýšení úbytku tuhosti o 140 % oproti struktuře S4- T. Výrazné odskočení od ostatních struktur bylo až na hodnotu bez mála 80 MPa u struktury S8-L. Zde došlo ke zvýšení úbytku tuhosti oproti struktuře S8- T o 152 %.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zjistit vliv mechanického chování laminátových struktur při cyklickém namáhání. Na laminátu byly provedeny statické zkoušky v tahu a v ohybu za různých teplot pro zjištění meze pevnosti. Následně byly provedeny únavové zkoušky v tahu a v ohybu pro dva různé stupně zatěžování laminátu. Na těchto únavových zkouškách byl sledován úbytek tuhosti na počtu cyklů.

### *Zkouška tahem za teplot $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$*

Z provedených souborů materiálových charakteristik kompozitního materiálu lze vyzorovat, že nejlepší pevnost i tuhost v tahu dosáhl materiál při podchlazení na teplotu  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nejlepší hodnoty tuhosti i pevnosti při teplotách  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  vykazovala struktura S8- L, zatím co při teplotách  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  jde o strukturu S4- L.

Při zkoušce tahem došlo vždy k prasknutí laminátu v nejtenčím místě. Před samotným roztrhnutím se dal zaznamenat jemný zvuk, který signalizoval praskání vláken. Samotné odtržení vnější vrstvy od skleněné rohože může mít za následek nedostatečnou pevnost pryskyřice.

### *Zkouška ohybem za teplot $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$*

Materiálová charakteristika zkoušky ohybem vykazuje největší pevnost i tuhost u struktury S8- L při zmíněných teplotách.

U zkoušky ohybem došlo k přelomení laminátu v místě pod zatěžovacím prvkem. Místo přelomení se projeví tím, že axiální napětí na tlačené straně dosáhne kritické hodnoty.

### *Zkouška cyklickým tahem při $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$*

U zkoušky cyklický tahem zjišťujeme úbytek tuhosti na jeden cyklus. Porovnáním naměřených materiálových hodnot laminátu vykazují nejmenší úbytek tuhosti příčně kladená vlákna. Cyklickým zatěžováním je laminát postupně porušován, dochází k protažení a vytrhávání vláken z matrice až nakonec k jejich prasknutí. Počet cyklů, který je laminát schopný unést do značné míry závisí na průřezu a na velikosti napětí, kterým je laminát zatěžován.



### *Zkouška cyklickým ohybem při + 20 °C*

U zkoušky cyklický ohybem zjišťujeme úbytek tuhosti na jeden cyklus. Při hodnotě zatěžování 75 %  $F_M$  byl nejmenší úbytek tuhosti zaznamenán v podélném směru u struktury S8. U hodnoty zatěžování 87,5 %  $F_M$  byl nejnižší úbytek tuhosti naměřen v příčném směru u struktury S4.

Počet cyklů, který je laminát schopný unést do značné míry závisí na průřezu a na velikosti napětí, kterým je laminát zatěžován. Při cyklické zkoušce ohybem docházelo vlivem cyklování ke zvlnění horní desky laminátu.

Ve velké většině případů dochází vlivem zvýšené teploty ke zhoršení naměřených materiálových charakteristik, zatím co snížením teploty se materiálové charakteristiky zlepšují. Zvýšená teplota ovlivňuje matrici, která měkne, a proto ztrácí laminát svoji tuhost i pevnost.

#### Doporučení:

V důsledku omezeného množství vzorků a dusíku nebylo možné provést cyklické experimentální zkoušky pro různé teploty. Z tohoto důvodu bych doporučil provést chybějící zkoušky, jednak pro doplnění databáze, tak i pro srovnání.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] AGARWAL B. D., BROUTMAN L. J. *Vláknové kompozity*, SNTL, 1987
- [2] REJMAN, M.: *Co a jak s polyesterovými skelnými lamináty*, SNTL, 1972
- [3] ŠTERNSCHUSS, A., ZVONAŘ, V., SLEZÁK, O., KUČERA, M.: *Polyesterové skelné lamináty*, SNTL, 1959. 141 s.
- [4] PÍŠEK, F. *Nauka o materiálu II, 1. Svazek*, vydalo nakladatelství České akademie věd, výtiskl Knihotisk, n.p., závod 05, Praha 8, 660 stran
- [5] PTÁČEK, L. a kolektiv: *Nauka o materiálu I*, Brno: CERM, 2001
- [6] JANČÁŘ, J.: *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*, Brno: VUT, 2003. ISBN 8021424435. 193 s.
- [7] HRUDŇÁK, M.: *Materiálové charakteristiky a struktura kompozitních materiálů pro malé sportovní letouny*, diplomová práce, 2004
- [8] BENÍČEK, J.: *Studium mechanických vlastností vstříkovaných stěn vyztužených krátkými vlákny*, bakalářská práce, 2006
- [9] Technologie: kompozity [online]. 2007 [cit. 2007-10-6] Dostupný z www: <http://www.kompozity.info>
- [10] BAUMRUK, M.: *Kompozitové materiály v leteckém průmyslu v ČR*, Praha: ČVUT, 2006
- [11] PLUHAŘ, J. a kolektiv: *Nauka o materiálech*, Praha: SNTL, 1989
- [12] SOVA, M., KREBS, J. a kolektiv: *Termoplasty v praxi (CD ROM)*
- [13] JARUŠEK, J. *Metody zkoumání polymeru*. VŠCHT Pardubice, 1989, 2. Vydání
- [14] SCHATZ, M., VONDRÁČEK, P. *Zkoušení polymerů. 2. vyd.*, Praha, VŠCHT, 1988, 276 s.
- [15] PETERS, S. T.: *Handbook of Composites - second edition*, London: Chapman & Hall, 1998
- [16] KOLOUCH, J. *Strojní součásti z plastů. 1. vyd.*, Praha: SNTL, 1981. ISBN : 04-234-81. 258 s.
- [17] WEATHERHEAD R. G. *Hand Book: FRP technology*, 1. Fiber reinforced plastics, 1. Title, 1994. 664 s. ISBN 0-85334-886-3.

- 
- [18] DICK J. S. *Rubber Technology, Compounding and Testing for Performance*, Hanser Publisher, Munich, ISBN 1-56990-278-X.
- [19] ŽALUDEK, Milan a ŠUBA, Oldřich. Mechanické chování laminátových prvků vystavených degradaci vnějším prostředím. *Proceedings of the 24th International Scientific Conference Reinforced plastics 2007*, 2007 . ISBN 978-80-239-8857-4
- [20] Technologie: kompozity [online]. 2008 [cit. 2008-3-10] Dostupný z [www: http://www.havel-composites.com](http://www.havel-composites.com)
- [21] JANČÁŘ, J.: *Úvod do materiálového inženýrství kompozitů*, Brno: ÚCHM FCH VUT, 1999

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Plocha	mm <sup>2</sup>
E	Modul pružnosti	MPa
E <sub>L</sub>	Modul pružnosti v podélném směru	MPa
E <sub>T</sub>	Modul pružnosti v příčném směru	MPa
F	Síla	N
Δl	Změna délky- absolutní prodloužení	mm
l <sub>0</sub>	Počáteční délka	mm
l	Koncová délka	mm
ε <sub>l</sub>	Poměrné prodloužení	-
Δb	Změna průřezu	mm
b <sub>0</sub>	Počáteční průřez	mm
b	Koncový průřez	mm
ε <sub>b</sub>	Poměrné prodloužení průřezu	-
L <sub>p</sub>	Vzdálenost podpěr	mm
T <sub>g</sub>	Teplota skleného přechodu	°C
T <sub>m</sub>	Teplota tání	°C
σ <sub>pt</sub>	Pevnost v tahu	MPa
σ <sub>o</sub>	Ohybové napětí	MPa
ρ	Hustota	kg/m <sup>3</sup>
W <sub>o</sub>	Modul průřezu v ohybu	mm <sup>3</sup>
I	Moment setrvačnosti	mm <sup>4</sup>
ν	Poissonovo číslo	-
F <sub>M</sub>	Síla na mezi pevnosti	MPa

$F_{\max}$	Maximální síla	N
b	Šířka	mm
h	Tloušťka	mm
$\alpha$	Úhel	°
Re	Mez kluzu	MPa
$M_{\max}$	Maximální ohybový moment	Nmm
M	Ohybový moment	Nmm
$\bar{x}$	Aritmetický průměr	-
n	Počet měření vzorků	-
s	Směrodatná odchylka	-
v	Variační koeficient	-
l	Délka vzorku	mm
$\Delta l$	Celková deformace- prodloužení vzorku	mm
$\varepsilon_M$	Poměrná deformace na mezi pevnosti	%
$\Delta l_M$	Deformace na mezi pevnosti	mm
$R_{mF}$	Síla na mezi pevnosti	N
a	Tloušťka vzorku	mm
$G'$	Paynův modul	MPa
PAN	polyakrylonitril	-
y <sub>rm</sub>	Průhyb v závislosti na zatížení	mm
1a.Vzorek	Modul pružnosti při prvním cyklu u vzorku 1	-
1c.Vzorek	Modul pružnosti při posledním cyklu u vzorku 1	-
S4	Struktura laminátu	-
S8	Struktura laminátu	-
L	Podélný směr	-
T	Příčný směr	-

---

$\sigma_{fM}$	Mez pevnosti v ohybu	MPa
$E_f$	Modul pružnosti v ohybu	MPa
$E_t$	Modul pružnosti v tahu	MPa
$\sigma_{tM}$	Mez pevnosti v tahu	MPa
#1	Číslo sub- série	-
$\sigma_{pct}$	Napětí při přelomení v cyklickém tahu	MPa
$\sigma_{pco}$	Napětí při přelomení v cyklickém ohybu	MPa
$E_{ut}$	Úbytek modulu v cyklickém tahu na 1 cyklus	MPa
$E_{uf}$	Úbytek modul v cyklickém ohybu na 1 cyklus	MPa

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Schematické znázornění rozdílů v křivkách tahového napětí <math>\sigma</math>- poměrné prodloužení <math>\varepsilon</math> různých matic v porovnání s tahovým chováním standardního uhlíkového vlákna z PAN.</i>	14
<i>Obr. 2. Značení orientace lamin v lamině</i>	19
<i>Obr. 3. Schéma rozdělení kompozitů</i>	20
<i>Obr. 4. Plátňová vazba tkaniny</i>	22
<i>Obr. 5. Keprová vazba tkaniny</i>	22
<i>Obr. 6. Atlasová vazba tkaniny</i>	22
<i>Obr. 7. Jednodílná forma pro beztlakové tváření a) pozitivní b) negativní.</i>	29
<i>Obr. 8. Lisování pryžovou plenou a) vakuem, b) vakuem a přetlakem.</i>	30
<i>Obr. 9. Lisování pružným lisovníkem a) otevřená forma, b) forma po uzavření</i>	31
<i>Obr. 10. Schéma navijecího zařízení</i>	33
<i>Obr. 11. Šíření trhliny v lamině [9]</i>	36
<i>Obr. 12. Únavová hierarchie</i>	41
<i>Obr. 13. Časový průběh napětí při cyklickém zatěžování</i>	42
<i>Obr. 14. Jednosměrná deformace tělesa tahem.</i>	44
<i>Obr. 15. Obecná tahová křivka.</i>	46
<i>Obr. 16. Tříbodový systém ohybové zkoušky</i>	48
<i>Obr. 17. Struktura laminátu S4</i>	53
<i>Obr. 18. Struktura laminátu S8</i>	54
<i>Obr. 19. Zkouška tahem- připojený extenzometr</i>	56
<i>Obr. 20. Tahová zkouška při <math>-30\text{ }^{\circ}\text{C}</math></i>	63
<i>Obr. 21. Přídavná láhev s dusíkem</i>	64
<i>Obr. 22. Srovnání modulu pružnosti v tahu u struktur S4 a S8</i>	66
<i>Obr. 23. Srovnání meze pevnosti v tahu u struktur S4 a S8</i>	67
<i>Obr. 24. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě</i>	68
<i>Obr. 25. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě</i>	69
<i>Obr. 26. Ohybová zkouška</i>	70
<i>Obr. 27. Srovnání modulu pružnosti v ohybu na délce vzorku</i>	74
<i>Obr. 28. Srovnání meze pevnosti v ohybu na délce vzorku</i>	75
<i>Obr. 29. Ohybová zkouška při <math>-30\text{ }^{\circ}\text{C}</math></i>	80
<i>Obr. 30. Srovnání modulu pružnosti v ohybu na struktuře S4 a S8</i>	83

---

<i>Obr. 31. Srovnání meze pevnosti v ohybu na struktury S4 a S8 .....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 32. Závislost meze pevnosti v ohybu na teplotě .....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 33. Závislost modulu pružnosti v ohybu na teplotě .....</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 34. Úbytek tuhosti pro struktury S4 a S8 při 75 % <math>F_M</math> .....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 35. Úbytek tuhosti pro struktury S4 a S8 při 75 % <math>F_M</math> .....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 36. Úbytek tuhosti pro struktury S4 a S8 při 87,5 % <math>F_M</math> .....</i>	<i>103</i>



## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Legenda struktury .....</i>	53
<i>Tab. 2. Složení struktury S4- obchodní názvy .....</i>	53
<i>Tab. 3. Složení struktury S8- obchodní názvy .....</i>	54
<i>Tab. 4. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L .....</i>	57
<i>Tab. 5. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T .....</i>	57
<i>Tab. 6. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L .....</i>	57
<i>Tab. 7. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T .....</i>	57
<i>Tab. 8. Srovnání průměrných tahových hodnot pro struktury S4 a S8 při + 20 °C.....</i>	58
<i>Tab. 9. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L .....</i>	59
<i>Tab. 10. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T .....</i>	59
<i>Tab. 11. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L .....</i>	59
<i>Tab. 12. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T .....</i>	60
<i>Tab. 13. Srovnání průměrných tahových hodnot pro struktury S4 a S8 při + 60 °C.....</i>	60
<i>Tab. 14. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L .....</i>	61
<i>Tab. 15. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T .....</i>	61
<i>Tab. 16. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L .....</i>	61
<i>Tab. 17. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T .....</i>	62
<i>Tab. 18. Srovnání průměrných tahových hodnot pro struktury S4 a S8 při +100 °C.....</i>	62
<i>Tab. 19. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L .....</i>	64
<i>Tab. 20. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T .....</i>	64
<i>Tab. 21. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L .....</i>	65
<i>Tab. 22. Tahové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T .....</i>	65
<i>Tab. 23. Srovnání průměrných tahových hodnot pro struktury S4 a S8 při -30 °C.....</i>	65
<i>Tab. 24. Hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti v tahu pro různé teploty .....</i>	66
<i>Tab. 25. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L.....</i>	71
<i>Tab. 26. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T.....</i>	71
<i>Tab. 27. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L.....</i>	71
<i>Tab. 28. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T.....</i>	72
<i>Tab. 29. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L.....</i>	72
<i>Tab. 30. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T.....</i>	72
<i>Tab. 31. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L.....</i>	73
<i>Tab. 32. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T.....</i>	73

<i>Tab. 33. Srovnání průměrných ohybových hodnot pro struktury S4 a S8 při +20 °C .....</i>	74
<i>Tab. 34. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L.....</i>	76
<i>Tab. 35. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T.....</i>	76
<i>Tab. 36. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L.....</i>	76
<i>Tab. 37. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T.....</i>	77
<i>Tab. 38. Srovnání průměrných ohybových hodnot pro struktury S4 a S8 při +60 °C .....</i>	77
<i>Tab. 39. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L.....</i>	78
<i>Tab. 40. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T.....</i>	78
<i>Tab. 41. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L.....</i>	78
<i>Tab. 42. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T.....</i>	79
<i>Tab. 43. Srovnání průměrných ohybových hodnot pro struktury S4 a S8 při +100 °C .....</i>	79
<i>Tab. 44. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L.....</i>	81
<i>Tab. 45. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T.....</i>	81
<i>Tab. 46. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L.....</i>	81
<i>Tab. 47. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T.....</i>	81
<i>Tab. 48. Srovnání průměrných ohybových hodnot pro struktury S4 a S8 při - 30 °C .....</i>	82
<i>Tab. 49. Hodnoty modulu pružnosti a mezi pevnosti v ohybu pro různé teploty .....</i>	83
<i>Tab. 50. Tahové únavové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L, při zatížení 14975 N....</i>	88
<i>Tab. 51. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus .....</i>	88
<i>Tab. 52. Tahové únavové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T, při zatížení 13113 N....</i>	89
<i>Tab. 53. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus .....</i>	89
<i>Tab. 54. Tahové únavové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L, při zatížení 12631 N....</i>	90
<i>Tab. 55. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus .....</i>	90
<i>Tab. 56. Tahové únavové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T, při zatížení 10835 N....</i>	91
<i>Tab. 57. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus .....</i>	91
<i>Tab. 58. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L, při zatížení 1390N.....</i>	94
<i>Tab. 59. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus .....</i>	94
<i>Tab. 60. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L, při zatížení 1620N.....</i>	95
<i>Tab. 61. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus .....</i>	95
<i>Tab. 62. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L, při zatížení 1170N.....</i>	96
<i>Tab. 63. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus .....</i>	96
<i>Tab. 64. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T, při zatížení 1365N.....</i>	97
<i>Tab. 65. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus .....</i>	97

---

<i>Tab. 66. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L, při zatížení 2193N.....</i>	98
<i>Tab. 67. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus .....</i>	98
<i>Tab. 68. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L, při zatížení 2559N.....</i>	99
<i>Tab. 69. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus .....</i>	99
<i>Tab. 70. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T, při zatížení 2123N...</i>	100
<i>Tab. 71. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus .....</i>	100
<i>Tab. 72. Ohybové únavové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T, při zatížení 2476N...</i>	101
<i>Tab. 73. Průměrný úbytek modulu pružnosti na jeden cyklus .....</i>	101

## SEZNAM PŘÍLOH

Všechny naměřené data jsou přiloženy na CD: Beníček\_DP\_2008

## **PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY**