

# Studium mechanických vlastností kvaziizotropních sklolaminátů

Bc. Jan Ondruš

---

Diplomová práce  
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan ONDRUŠ**

Osobní číslo: **T09697**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Studium mechanických vlastností kvaziizotropních sklolaminátů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární studii na dané téma**
- 2. Provedte přípravu vzorků laminátové struktury**
- 3. Provedte určené zkoušky mechanických vlastností**
- 4. Vyhodnoďte naměřené výsledky**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího DP**

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

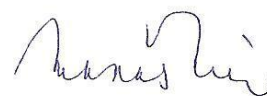
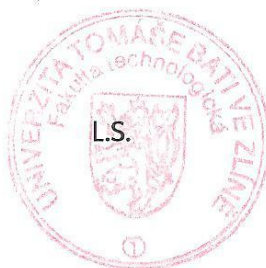
Datum zadání diplomové práce: **14. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2011**

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011



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




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

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 11.5.2011



.....

---

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

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

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

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

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

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

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

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

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá studiem mechanických vlastností skelných laminátů s polyesterovou matricí.

Teoretická část definuje kompozitní materiály, popisuje základní rozdělení a jednotlivé části. Dále jsou zde uvedeny aplikace kompozitních materiálů v praxi, jejich výroba a mechanické chování laminátových struktur.

Praktická část je zaměřena na statické a cyklické zkoušky tahem i ohybem u skelných laminátů v různých prostředích. K provádění mechanických zkoušek byl použit univerzální zkušební stroj ZWICK 1456. Jsou zjišťovány materiálové vlastnosti jako mez pevnosti, modul pružnosti a jiné. Na závěr byly naměřené hodnoty vyhodnoceny v programu Minitab.

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

## **ABSTRACT**

This master thesis studies the mechanical properties of glass laminates with polyester matrix.

The theoretical section defines composite materials, describes the basic distribution and the individual parts. There are presented the application of composite materials in practice, their production and mechanical behaviour of laminate structures.

The practical part is focused on static and cyclic tensile and bending tests of glass-fiber laminates in different environments for. The implementation of mechanical tests were using a universal testing machine ZWICK 1456<sup>th</sup> was used. They measured the material properties such as modulus of elasticity and strength and others. Finally, measured values were evaluated in Minitab program.

Keywords: mechanical properties, glass-fiber laminate, tensile, bend

Chtěl bych poděkovat za cenné rady, připomínky a čas vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc a doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. Dále poděkování patří také Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D za pomoc při experimentálních zkouškách, Doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi při vyhodnocování výsledků a mým rodičům za materiální i morální poru během celého studia.

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

# OBSAH

ÚVOD .....	11
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>12</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY (COMPOSITE MATERIALS).....</b>	<b>13</b>
1.1 SOUČASNÁ DEFINICE KOMPOZITŮ .....	13
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	14
1.2.1 Rozdělení podle typu matrice .....	14
1.2.2 Rozdělení podle tvaru disperze.....	14
<b>2 VRSTVENÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY – LAMINÁTY (LAYERED COMPOSITE MATERIALS – LAMINATES) .....</b>	<b>17</b>
2.1 MATRICE (MATRIX) .....	18
2.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (Unsaturated Polyester Resin).....	19
2.1.2 Vinylesterové pryskyřice (Vinyl Ester Resin) .....	22
2.1.3 Epoxidové pryskyřice (Epoxy Resin).....	24
2.1.4 Fenolické pryskyřice (Phenol Formaldehyde Resin) .....	26
2.2 VLÁKNA (FIBRE) .....	26
2.2.1 Skleněná vlákna (Glass Fiber).....	28
2.3 TYPY PRODUKTŮ Z VLÁKEN.....	31
2.4 APLIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	34
2.4.1 Automobilový a vlakový průmysl .....	35
2.4.2 Vodní doprava .....	35
2.4.3 Stavebnictví .....	36
2.4.4 Chemický průmysl.....	37
2.4.5 Letecký průmysl.....	37
2.4.6 Lékařství.....	38
2.4.7 Energetický průmysl.....	38
2.5 VYUŽITÍ POLYESTEROVÝCH SKELNÝCH LAMINÁTŮ .....	40
<b>3 TECHNOLOGIE VÝROBY LAMINÁTŮ (THE PRODUCTION TECHNOLOGY OF LAMINATES).....</b>	<b>41</b>
3.1 VÝROBA LAMINÁTŮ RUČNÍM KLADENÍM .....	41
3.2 VÝROBA LAMINÁTŮ METODOU VAKUOVÉHO VAKU .....	42
<b>4 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ LAMINÁTOVÝCH STRUKTUR (MECHANICAL BEHAVIOR OF LAMINATED STRUCTURES) .....</b>	<b>48</b>



4.1	KONSTITUČNÍ ROVNICE LAMINY .....	48
4.2	GEOMETRICKÉ DEFORMAČNÍ ROVNICE LAMINÁTOVÉ STĚNY .....	49
4.3	KONSTITUČNÍ ROVNICE LAMINÁTOVÉ STĚNY OBEČNÉ STRUKTURY .....	50
4.4	KONSTITUČNÍ ROVNICE LAMINÁTOVÉ STĚNY, ZAHRNÚJÍCÍ VLIV TEPLOTNÍCH ZMĚN .....	52
4.5	TEPLOTNÍ NAPJATOST LAMINÁTOVÉ STRUKTURY .....	52
4.6	KVAZIIZOTROPNÍ LAMINÁTOVÉ STRUKTURY .....	53
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>54</b>
<b>5</b>	<b>STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>ZKUŠEBNÍ VZORKY A ZAŘÍZENÍ PRO MECHANICKÉ ZKOUŠKY .....</b>	<b>56</b>
6.1	ZKUŠEBNÍ VZORKY .....	56
6.1.1	Struktura laminátových stěn S4 .....	58
6.1.2	Struktura laminátových stěn S8 .....	58
6.2	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ PRO EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY .....	59
<b>7</b>	<b>STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ TAHEM A CYKLIČKÝM TAHEM .....</b>	<b>60</b>
7.1	ZKOUŠKA TAHEM .....	60
7.1.1	Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S4 – Etalon .....	62
7.1.2	Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S4 – H <sub>2</sub> O .....	62
7.2	ZKOUŠKA CYKLIČKÝM TAHEM .....	63
7.2.1	Výsledky cyklických tahových zkoušek pro strukturu S4 – Etalon .....	64
7.2.2	Výsledky cyklických tahových zkoušek pro strukturu S4 – H <sub>2</sub> O .....	64
7.3	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ A DISKUZE K TAHOVÝM A CYKLIČKÝM TAHOVÝM ZKOUŠKÁM .....	65
7.3.1	Shrnutí výsledků a diskuze pro mez pevnosti v tahu .....	66
7.3.2	Shrnutí výsledků a diskuze pro modul pružnosti v tahu .....	69
<b>8</b>	<b>STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ OHYBEM A CYKLIČKÝM OHYBEM .....</b>	<b>72</b>
8.1	ZKOUŠKA OHYBEM .....	72
8.1.1	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – Etalon, L <sub>p</sub> = 128 mm .....	74
8.1.2	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – Etalon, L <sub>p</sub> = 64 mm .....	75
8.1.3	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – H <sub>2</sub> O .....	76
8.1.4	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – 40 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 40 °C .....	77
8.1.5	Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – 40 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 21 °C .....	78
8.2	ZKOUŠKA CYKLIČKÝM OHYBEM .....	79
8.2.1	Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – Etalon, .....	80

$L_p = 128$ mm.....	80
8.2.2 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – Etalon, $L_p = 64$ mm.....	81
8.2.3 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – H <sub>2</sub> O.....	82
8.2.4 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 – 40% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 40°C.....	83
8.2.5 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 – 40% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 21°C.....	83
8.3 SHRNUÍ VÝSLEDKŮ A DISKUZE K OHYBOVÝM A CYKlickÝM OHYBOVÝM ZKOUŠKÁM .....	84
8.3.1 Shrnutí výsledků a diskuze pro mez pevnosti v ohybu.....	86
8.3.2 Shrnutí výsledků a diskuze pro modul pružnosti v ohybu.....	96
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>107</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>109</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>112</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>114</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>118</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>121</b>

## ÚVOD

Během vývoje lidské společnosti si člověk osvojil dovednost používat nejrůznější materiály jako kámen, bronz, železo, dřevo či keramiku. Zvládnutí výroby a použití nových materiálů vždy posunulo úroveň uspokojování potřeb člověka a potažmo i úroveň techniky na kvalitativně vyšší úroveň. V současné době si nelze představit další pokrok v technice, medicíně, informatice i umění bez nových materiálů. Nové materiály tak člověku otevírají i nové horizonty a posouvají bariéry jeho vývoje kupředu. Mohou do značné míry přispět i k řešení globálních problémů lidstva jako je hlad či zhoršující se životní prostředí. Ve vývoji progresivních materiálu je zakotven i aktivní přístup k ochraně životního prostředí.

V současné době mají konstruktéři, projektanti, designéři, umělci, ortopedi, stomatologové a další profese k dispozici přes 15 tisíc různých materiálů nabízených ve stovkách modifikací. Pravděpodobně nejdynamičtěji se rozvíjející skupinou nových materiálů jsou polymery (plasty) a jejich modifikace – směsi a kompozity. Jestliže však do pryskyřice či plastu přidáme výztuž ve formě vláken, které mají vysokou tuhost, pevnost a teplotní stabilitu, či ve formě práškových plniv, získáváme zcela novou, unikátní skupinu materiálů kombinující mnohdy synergicky mechanické vlastnosti výztuže se snadností zpracování polymerů. Skupina těchto materiálů obsahující vláknové výztuže se nazývá polymerní kompozity.

Polymerní kompozity se svým spektrem vlastností vyrovnají tradičním konstrukčním materiálům a jsou tedy použitelné i při výrobě nosných prvků konstrukcí a jsou tedy nejnadějnějšími kandidáty pro náhradu kovů a jiných tradičních materiálů v konstrukčních aplikacích. Největšího rozšíření v této oblasti dosáhly kompozity, ve kterých jsou pojivem organické polymery a výztužemi jsou různé typy anorganických či organických vláken.

Nejvýznamnější předností kompozitů s organickými matricemi je synergická kombinace snadné tvarovatelnosti málo pevného polymeru s pevností a tuhostí vyztužujících vláken. Skutečností, která vedla k obrovskému rozvoji vláknových kompozitů v posledních dvaceti letech a která odlišuje kompozity od tradičních materiálů je i fakt, že vláknové kompozity jsou obvykle vyráběny s konečným dílcem či výrobkem. 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 [3].

## I. TEORETICKÁ ČÁST

# 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY (COMPOSITE MATERIALS)

Základní vlastností kompozitních materiálů je to, že jde o kombinaci dvou nebo více materiálů, které se od sebe odlišují. Takto použitá definice kompozitního materiálu umožňuje považovat za kompozit téměř jakýkoliv technický materiál. Proto je definici třeba alespoň poněkud zpřesnit [1].

## 1.1 Současná definice kompozitů

Všeobecně uznávaná jasná definice kompozitního materiálu neexistuje, nejčastěji se hovoří o těchto dvou definicích.

Definice, používaná v USA, vytvořená ve spolupráci NASA a amerických vojenských vývojových center, používaná v Composite Metals Handbooku:

Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vytuzovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní.

Druhá je definice F. G. Milтона, zavedená v knize Theory of Composites, používané jako učebnice v Cambridgi:

Kompozity jsou materiály, ve kterých jsou délkové nehomogenity v rozměrech mnohem větší než jsou atomární (což nám umožňuje používat pro tyto účely nehomogenity rovnice klasické fyziky), které jsou ale v makroskopickém měřítku přirozeně (statisticky) homogenní.

Pro představu uveďme ještě např. velmi omezenou definici, soustředěnou jen na nejběžnější kompozity:

Pod pojmem kompozitní materiály rozumíme heterogenní materiály, složené ze dvou nebo více fází, které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Pro kompozitní materiály je dále charakteristické, že se vyrábějí mechanickým mísením jednotlivých složek. Tím se liší např. od slitin, které jsou rovněž heterogenní. Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti

kompozitu jsou vyšší, než by odpovídalo jednoduchému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek [1].

## 1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

Vzhledem k velikému sortimentu různých kompozitních materiálů je nutné k jejich bližšímu popisu a uspořádání použít určitá kritéria rozdělení kompozitů. V zásadě musí mít kompozit jednu složku, která je v celém rozsahu spojitá a určuje tvar a rozměry kompozitu (drží ho pohromadě) – tuto složku označujeme jako matrice.

Všechny ostatní složky kompozitu, které jsou zpravidla v matici rozptýleny – dispergovány, označujeme jako disperze [1].

### 1.2.1 Rozdělení podle typu matrice

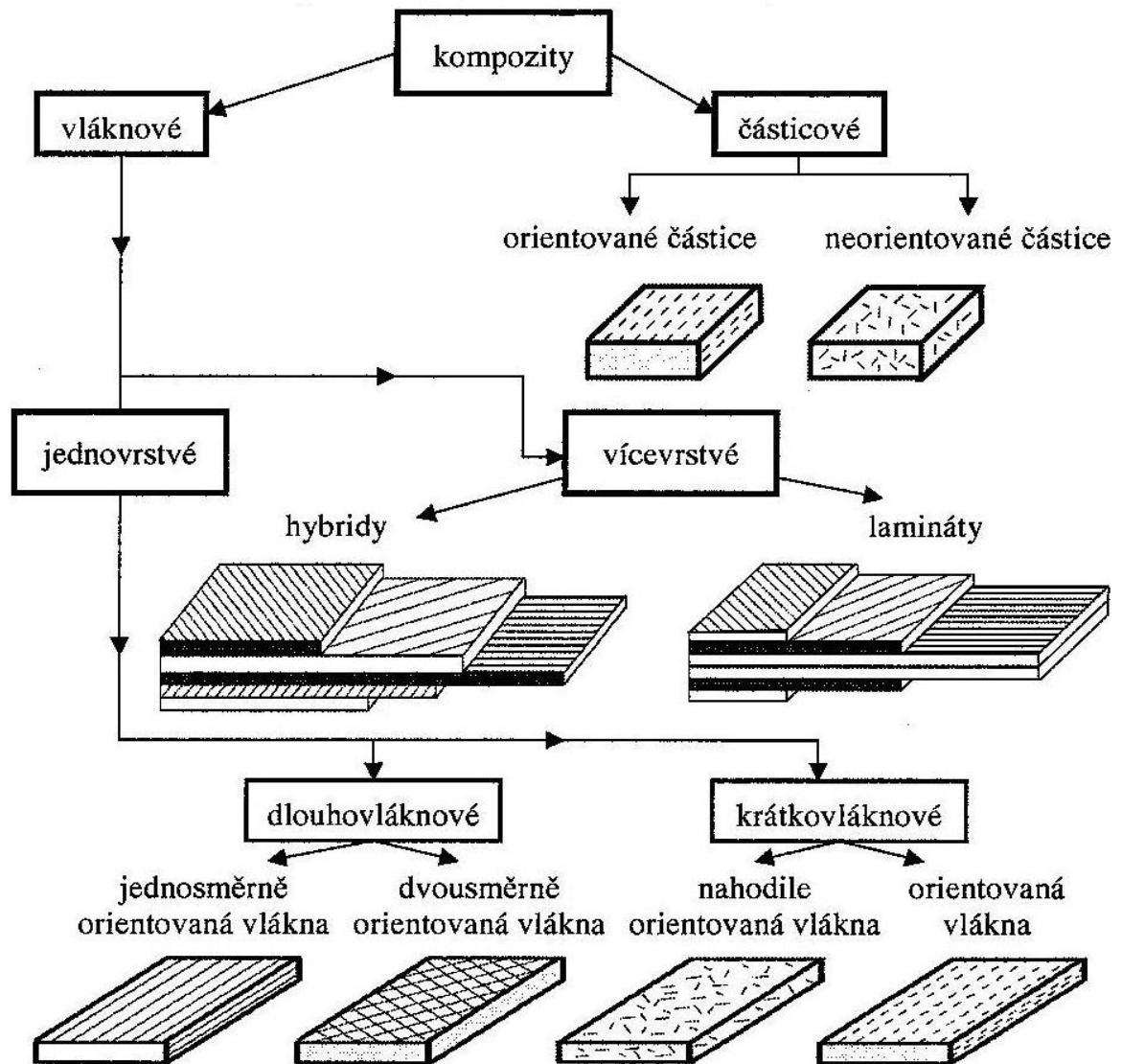
Jako základní rozdělení kompozitních materiálů se zpravidla používá rozdělení podle typu matrice.

- Kompozitní materiály s plastovou maticí (Plastic Matrix Composites – PMC)
- Kompozitní materiály s kovovou maticí (Metal Matrix Composites – MMC)
- Kompozitní materiály s keramickou maticí (Ceramic Matrix Composites – CMC)

V závorkách jsou uvedeny běžně používané zkratky těchto typů kompozitů. Některé kompozitní materiály do toho rozdělení zcela nezapadají – především jsou to kompozity se skleněnou maticí. Pro podobné vlastnosti se zpravidla přiřazují ke kompozitům s keramickou maticí [1].

### 1.2.2 Rozdělení podle tvaru disperze

Tvar jednotlivých částí disperze se podstatně podílí na anizotropii vlastností i na způsobu interakce mezi maticí a disperzí [1].



Obr. 1. Obecně přijatá klasifikace kompozitních materiálů [4].

Základní rozdělení je na vláknové a částicové kompozity. Vláknové kompozity jsou vyztuženy vlákny, které mají délkové rozměry podstatně větší než průřezové. Částicové kompozity jsou plněny částicemi, které jsou definovány jako nevláknový útvar, který nemá dlouhý rozměr.

Vláknové kompozity lze rozdělit na jednovrstvé a vícevrstvé. Jednovrstvé kompozity jsou buď tvořeny jednou vrstvou nebo jsou složeny z několika samostatných vrstev, z nichž každá vrstva má stejnou orientaci a stejné vlastnosti. Jednovrstvé kompozity lze dále rozdělit dle délky vlákna na dlouhovláknové a krátkovláknové [4].

U dlouhvláknových jednovrstvých kompozitů mohou být vlákna uspořádána v jednom směru (jednosměrně orientovaná vlákna) a tím je vytvořen tzv. jednosměrový kompozit – lamina. U krátkovláknových kompozitů jsou krátká vlákna orientována nahodile nebo v určitém směru. Ve většině případů jsou orientována nahodile a bývají často vstříkována do formy zároveň s tekutou pryskyřicí.

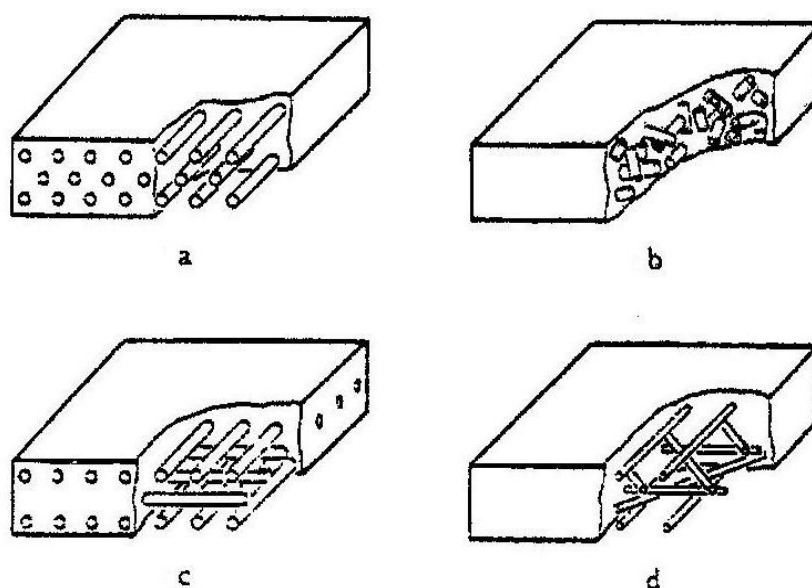
V praxi se nejčastěji používají vícevrstvé kompozity, které se skládají z několika tenkých různě orientovaných jednosměrných vláknových kompozitů – lamin. Jsou-li materiály v každé vrstvě stejné, nazývá se tento kompozit laminát. V případě že jsou vrstvy vyrobeny z různých materiálů, hovoříme o tzv. hybridních laminátech [4].



## 2 VRSTVENÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY – LAMINÁTY (LAYERED COMPOSITE MATERIALS – LAMINATES)

Laminát je kompozit složený s několika vrstev (lamin) pevně spojených v jeden celek. Každá z vrstev je obvykle tvořena z matrice (např. pryskyřice) a z výztužných vláken. Vrstvy jsou v laminátu uloženy jednosměrně, dvousměrně, vícesměrně, nahodile nebo také prostorově, takže laminát může dosáhnout i izotropních vlastností. Přitom se předpokládá, že spoj mezi dvěma vrstvami je dokonale pevný, nekonečně tenký a smykově nedeformovatelný.

V případě, že je laminát vytvořen z vrstev obsahující vlákna z různých materiálů, jedná se o laminát hybridní. Ten může vzniknout i současným použitím částicové a vláknové výztuže [6].



Obr. 2. Prostorové uspořádání vyztužujících vláken [4].

a) jednosměrně orientovaný dlouhvláknový kompozit, b) krátkovláknový kompozit s náhodně orientovanými vlákny, c) kompozit s dvousměrnou výztuží (tkanina), d) kompozit s náhodně orientovanými vlákny – netkaná rohož [3].

Synergické působení pevných a tuhých vláken s poddajnou nebo křehkou kovovou, polymerní nebo keramickou maticí umožňuje konstruovat kompozity s vysokou pevností,

tuhostí a houževnatostí, jejichž vlastnosti přesahují vše, co bylo kdy dosaženo u tradičních monolitních materiálů. Bez existence kompozitů by byl další technický pokrok ve všech oborech, ale zejména v leteckém, kosmickém a automobilovém průmyslu, nemyslitelný [6].

## 2.1 Matrice (Matrix)

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, kterým je prosycen systém vláken a partikulární komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek [2].

Kompozity s plastovou maticí jsou nejužívanější a nejlépe rozpracovanou skupinou kompozitních materiálů [1].

Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken, tj.:

- přenos namáhání na vlákna,
- převedení namáhání z vlákna na vlákno,
- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku,
- ochrana vláken před vlivy okolí [2].

Zásadním hlediskem pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice – vlákno. Pro dosažení lepší fyzikální a případně i chemické vazby mezi vláknem a maticí se nanese na vlákno apretace vhodná pro určitý druh matrice. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno smočila úplně a bez bublin [2].

V technologii vláknových kompozitních materiálů se v současné době používá jako matic převážně termosetů, v menší míře jsou však zkoušeny i matrice termoplastické poskytující některé výhody ve srovnání s termosety. Jako matrice se nejčastěji používají nenasycené polyestery (Unsaturated Polyester Resin), vinylestery (Vinyl Ester Resin), epoxidy (Epoxy Resin) a fenolické pryskyřice (Phenol Formaldehyde Resin) pro kompozity s výrazně sníženou hořlavostí. Z celkového objemu pryskyřic světově zpracovávaných při výrobě vláknových kompozitů připadá 75 % na nenasycené polyestery, 20 % tvoří vinylestery a 5 % tvoří speciální pryskyřice jako fenolické, epoxidy, polyamidy, bismaleimidy, atd [3].

Největší překážkou většího rozšíření termoplastů je v současné době především velká viskozita taveniny při zpracování, která je o 2 - 4 řády vyšší než u běžných termosetů. To vede ke vzniku defektů (bublíny, nesmočené pramence vláken, problematická smáčení tkanin, atd.) při smáčení výztuže a tím ke vzniku kompozitů s nedostatečnými užitnými vlastnostmi. Pro odstranění tohoto problému je třeba jako vstupní surovinu používat už termoplastem preimpregovaná vlákna, což s sebou přináší podstatné zvýšení ceny hotových kompozitních profilů [3].

Tab. 1. Srovnání vybraných druhů pryskyřic [2]

	Nenasycené polyesterové a vinylesterové pryskyřice	Epoxidové pryskyřice
Zpracování	+	-
Adheze	(-)	++
Smrštění	-	+
Vlastnosti: - mechanické	-	+ (1,2krát)
-dynamické	-	++
Cena	+	- (4krát)
Podíl na aplikacích	92%	8%
		(4% matrice, 4% lici pryskyřice a lepidla)

### 2.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (Unsaturated Polyester Resin)

Tyto reaktivní pryskyřice jsou bezbarvé, až slabě nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech, které je možno vytvrzovat za normální nebo zvýšené teploty, aniž by vznikaly těkavé vedlejší produkty. Při vytvrzování se uvolňuje reakční teplo a dochází k objemovému smrštění o 5 až 9 %. Vzhledem k nízké viskozitě, dobrému smáčení vláken, vysoké (resp. pružně regulovatelné) rychlosti vytvrzování a přiměřeně nízké ceně jsou UP – R v mnoha případech nejčastěji používaným materiálem pro kompozitní aplikace [2].

Existuje mnoho typů polyesterových pryskyřic s nejrůznějšími vlastnostmi, které se liší druhem základní molekuly.

Viskozita pryskyřice je z větší části závislá na obsahu styrenu, který se pohybuje v rozsahu 30 až 50 %. Aby byla pryskyřice snadněji zpracovatelná a lépe prosycovala vlák-

na, může zpracovatel snížit viskozitu směsi pryskyřice zvýšením obsahu styrenu v určitých hranicích [2].

Výběrem výchozích materiálů a pomocí různých přísad lze u nenasyčených polyesterových pryskyřic měnit zpracovatelnost i vlastnosti vyrobených lisovacích hmot ve velkém rozsahu. Přísady se často používají jako objemové plnivo i jako zlevňující materiál.

Kromě přísad je možno měnit vlastnosti nenasyčených polyesterových pryskyřic změnou chemické struktury a přidáním aditiv [2].

Aditiva jako např. stabilizátory, retardéry hoření a nukleační činidla se přidávají do polymerů s cílem modifikace vlastností. Jako aditiva se obvykle označují materiály, jejichž obsah v polymeru je  $\leq 5$  % objemu. Prioritní úlohou aditiv je modifikace zpracovatelských a fyzikálních vlastností polymerů (podíl krystalické fáze, termická stabilita, viskozita a jiné) [11].

Neexistuje univerzální chemicky odolná nenasyčená polyesterová pryskyřice. Jsou odolné buď pouze proti alkáliím, anebo jen proti aromatickým uhlovodíkům.

K vytvrzování UP – R dochází radikálovou kopolymerizací dvojných vazeb v pryskyřici s dvojnými vazbami molekuly styrenu. Obecně lze říci, že vysoce zesíťované pryskyřice (tj. s vysokou tepelnou odolností) potřebují vysokou, málo zesíťované pryskyřice nízkou vytvrzovací teplotu.

Je bezpodmínečně nutno přidávat iniciátor a urychlovač postupně odděleně. Nejprve smísit urychlovač a pryskyřici, potom přidat iniciátor. Pokud se dostane do přímého kontaktu iniciátor s urychlovačem, může dojít až k výbušnému rozkladu.

Hodnota maximální přípustné koncentrace při zpracování je pro monomerní styren 20 ml na 1m<sup>3</sup> vzduchu. Pro tento účel byly vyvinuty pryskyřičné systémy, které obsahují látky tvořící na povrchu film. Tyto látky migrují v průběhu zpracování na povrch výrobku, čímž snižují emisi styrenu [2].

### **Zvláštní vlastnosti nenasyčených polyesterových pryskyřic**

- levné, spolehlivé a mnohostranně použitelné licí pryskyřice,
- velká variabilita při zpracování, možnosti volby obsahu jednotlivých složek – styrenu a katalyzátoru/urychlovače,

- velké smrštění při zpracování (6 až 9 %), z velké části po zgelovatění,
- dobrá odolnost proti povětrnosti, částečně neodolávají alkalickému namáhání
- velké nároky na životní prostředí působením styrenu [2].

Tab. 2. Vlastnosti a použití různých nenasyčených polyesterových pryskyřic [2].

Základní složky	Vlastnosti					Použití
	$\eta$ (mPa·s)	HDT/T <sub>g</sub> (°C)	$\sigma_{Pt}$ (N·mm <sup>-2</sup> )	E (N·mm <sup>-2</sup> )	$\delta$ (%)	
Kyselina ortoftalová, standartní glykoly	540 - 610	63/93	70	4300	2	Nízko - až středně reaktivní, použitelná pro méně namáhané konstrukční prvky; stavba lodí
	700 - 900	90/122	85	4400	2,4	Středně až vysoce reaktivní, sklon k vzniku trhlin; nádrže, potrubí, výlis-ky
	240 - 290	108/130	80	3470	4,2	Vysoce reaktivní, nízkoviskozní, dobré prosycování při ruční laminaci a injektování, lze hodně plnit
Dicyklopentadien	450 - 1000	70/-	66	3500	3	Dobré zesíťování, nízké prorážení výztuže; především pro stavbu lodí
Kyselina tereftalová	540 - 610	125/	60	3350	2,1	Vysoká tepelná odolnost; pro laminátové nádrže, potrubí (hlavně na uhlovodíky)
Kyselina maleinová, standartní glykoly	1150- 1400	145/	55	3400	1,7	Základní pryskyřice pro lisovací hmoty (SMC) s malým smrštěním (třída A)
Kyselina izoftalová, standartní glykoly	3000 -3600	130/150	60	3700	1,8	Vysokoviskozní pryskyřice pro lisovací hmoty (SMC/BMC), dobrá odolnost proti hydrolýze

### 2.1.2 Vinylesterové pryskyřice (Vinyl Ester Resin)

Vinylesterové pryskyřice (VE – R) se liší od nenasycených polyesterových pryskyřic tím, že zesíťování probíhá pomocí koncových metakrylátových skupin, kde jsou esterové vazby [2].

Vinylesterové pryskyřice mají oproti nenasyceným polyesterovým pryskyřicím dvě přednosti: jsou výrazně houževnatější a mají vyšší chemickou odolnost. Předností vinylesterových systému v porovnání s epoxidovými pryskyřicemi je jejich nižší viskozita a říditelná vytvrzovací reakce, která umožňuje snadnější zpracování. Vzhledem k uvedeným vlastnostem se vinylesterové pryskyřice používají zejména v oblastech s vysokým korozním namáháním [2].

#### Zvláštní vlastnosti vinylesterových pryskyřic

- ve srovnání s nenasycenými polyesterovými pryskyřicemi jsou houževnatější a dražší,
- velká variabilita při zpracování pomocí dávkování styrenu a urychlovače,
- aplikace v korozním prostředí,
- zatížení prostředí styrenem [2].

Tab. 3. Vlastnosti a použití různých vinylesterových pryskyřic [2].

Základní složky	Vlastnosti					Použití
	Nevytvrzená pryskyřice	Vytvrzená pryskyřice				
		$\eta$ (mPa·s)	HDT/T <sub>g</sub> (°C)	$\sigma_{Pt}$ (N·mm <sup>-2</sup> )	E (N·mm <sup>-2</sup> )	
Bisfenol A-epoxid	440-500	105/130	95	3600	6,1	Středně reaktivní; pro nádrže, potrubí, sanaci kanálů
	360-400	105/130	95	3600	6,1	Středně reaktivní, se sníženou emisí styrenu
	650-750	107/132	90	3800	3,9	Velmi dobré mechanické vlastnosti a chemická odolnost; prepregy na sanaci kanálů odpadních vod, možno vytvrzovat UV zářením
	400-500	115/132	83	3500	4,2	Pryskyřice pro prepregy a lisovací hmoty s vysokou protikorozní chemickou odolností; použití pro části automobilů
Bisfenol A-uretan	400-500	125/-	85	3300	5-7	S vysokou tepelnou a chemickou odolností, tixotropizovatelná, vhodná pro aramidová vlákna; navijení, odstředivé lití, stříkání
Flexibilizovaný bisfenol A-uretan	210-280	140/150	90	3500	4	S velmi vysokou tepelnou a chemickou odolností při současné vysoké pružnosti, velmi dobré prosycení vláken; navijení (nádrže), odstředivé lití
Epoxid novolak	1000	135/160	75	3400	2,6	S tepelnou a korozní odolností; nádrže, potrubí, komíny

### 2.1.3 Epoxidové pryskyřice (Epoxy Resin)

Epoxidové pryskyřice (ČSN EN ISO 3673 1 - 2) jsou za normální teploty kapalné až pevné látky, které mohou obsahovat přidané pomocné látky, např. rozpouštědla. V molekule obsahují nejméně jednu, většinou však dvě epoxidové skupiny, nutné jako funkční skupiny pro stavbu makromolekuly. Tvrdidlo se přidává v kapalné nebo pevné formě a obsahuje v molekule aktivní vodíkové ionty, které reagují s epoxidovými skupinami pryskyřice.

Epoxidové pryskyřice patří mezi velmi vhodné termosety s velice dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou rozměrovou stálostí a přilnavostí k podkladu. Pouze 8% se zpracovává ve formě vyztužených kompozitů.

Vlastnosti vytvrzených pryskyřic jsou ve velkém rozsahu ovlivněny širokou paletou tvrdidel, která jsou většinou přizpůsobena pro speciální aplikace. Vhodnou volbou pryskyřic, tvrdidel a přísad lze dosáhnout mnoha rozdílných vlastností pojiva [2].

#### Zvláštní vlastnosti epoxidových pryskyřic

- objemové smrštění EP – R je poměrně nízké, 2 až 5 %. Vzniká převážně v kapalné fázi, takže je vyrovnáno dodatečně přitékající pryskyřicí.
- zvláštní vlastnosti epoxidových pryskyřic
- cenově jsou nevýhodné, 3 až 4krát dražší než nenasycené polyesterové pryskyřice,
- musí být dodržen přesný stechiometrický poměr mísení pryskyřice/tvrdidlo,
- vzhledem k velmi dobrým mechanickým vlastnostem jsou vhodné jako matrice pro vysokopevnostní vlákna,
- dobrá adheze k mnoha druhům podkladu,
- pro poměrně vysokou viskozitu a pomalou vytvrzovací reakci jsou hůře zpracovatelné než (UP – R) nebo (VE – R),
- chemická odolnost je závislá na druhu tvrdidla,
- rozsah tepelné odolnosti je vyšší než u UP – R a VE – R,
- možné podráždění kůže a alergie při zpracování kapalných pryskyřic [2].



Tab. 4. Vlastnosti a použití různých typů epoxidových pryskyřic pro kompozity [2].

Základní složky	Vlastnosti					Použití
	Nevytvrzená pryskyřice	Vytvrzená pryskyřice				
		$\eta$ (mPa·s)	HDT/T <sub>g</sub> (°C)	$\sigma_{Pt}$ (N·mm <sup>-2</sup> )	E (N·mm <sup>-2</sup> )	
Roztok bromované EP-R	2100-2900	135-140	10	10	6,1	FR4 produkt pro prepregy a lamináty; desky pro tištěné spoje
Bisfenol A EP-R s formulovaným aminovým tvrdidlem	5200-6000	185-195	110-120	2800	5,5-6,5	Systém s dobrou odolností proti hydrolyze
Cykloalifatická pryskyřice s anhydridovým tvrdidlem a imidazolovým urychlovačem	150-250	188-193	48-65	3050	1,8-2,5	Nízkoviskózní systém s vysokou tepelnou odolností; pro navijení, pultruzi aj.
Bisfenol A EP-R s anhydridovým tvrdidlem a imidazolovým urychlovačem	600-900	145-153	80-90	3200	5-7	Standartní systém vytvrzovaný anhydridem; pro navijení, pultruzi aj.
Formulovaná EP-R pryskyřice s cykloalifatickým aminovým tvrdidlem	500-700	143-148	71-77	2600	4,5-5,5	Zpracovatelná technologií RTM pro navijení, lisování, laminování aj.
Houževnatá modifikovaná EP-R s aminovým tvrdidlem	720-860	100-110	120-130	2800	9-12	Dobré mechanické vlastnosti a tažnost
Formulovaná EP-R a aminovým tvrdidlem	320-380	90-105	125-130	2900	7-12	Nízkoviskózní flexibilní systém pro průmyslové aplikace
	350-400					
Formulovaná EP-R s tvrdidly na bázi alifatických polyamidů	300-400	80-86	70-74	3200	10-13	Nastavitelná reaktivita; systém pro laminování velkých konstrukčních dílců (např. lopatky rotorů větrných elektráren)
	550-800	77-82	82-86	3500	5,2-5,8	
	1000-1200	85-89	85-90	3700	5-6,2	

### 2.1.4 Fenolické pryskyřice (Phenol Formaldehyde Resin)

Fenolické pryskyřice (ČSN EN ISO 10082) jsou reaktivní pryskyřice, které se vyrábějí kondenzací fenolů a 30 až 50 % vodných roztoků aldehydů. Jednotlivé varianty vycházejí z různých druhů fenolických surovin, různých molárních poměrů fenolů/formaldehyd a z různých chemických nebo fyzikálních modifikací.

Konečným produktem vytvrzování fenolických pryskyřic je vysokomolekulární rezit, který je nerozpustný a netavitelný. Celý vytvrzovací proces je procesem exotermním, který po počátečním zahřátí potřebuje silné chlazení.

Fenolické pryskyřice PF – R jsou křehké, a musí být proto pro většinu konstrukčních aplikací modifikovány. Podíl fenolických pryskyřic PF – R ve výrobě klasických vyztužených kompozitů je poměrně nízký.

Fenolické pryskyřice, a to zejména ty, které obsahují novolaky, na světle hnědnou a mohou se při vytvrzování zbarvit. Vyrábějí se proto v tmavých krycích barevných odstínech [2].

#### Zvláštní vlastnosti fenolických pryskyřic

- jejich podíl na celkové výrobě klasických vyztužených kompozitů je nízký,
- jejich zpracování je ztíženo použitím kyselin a odštěpování reakčních zplodin,
- jsou vysoce tepelně a chemicky odolné a tvarově stále,
- mají příznivé chování při požáru a při zachování vysoké zbytkové pevnosti [2].

## 2.2 Vlákna (Fibre)

Materiály ve formě vláken se cíleně jako konstrukční prvky používají zřídka. Zajímavou skupinou materiálu se stávají teprve v kompaktní formě, jako je tomu v kompozitních materiálech. Kompozitní – vlákna vyztužená – plasty se skládají jednak z vláken s vysokou měrnou pevností, příp. tuhostí, jednak z rozmanitě přizpůsobivého úložného materiálu – matrice [2].

V kompozitech se používají nejrůznější druhy vláken. V zásadě je můžeme rozřadit na následující skupiny :

- Přírodní vlákna
- Skleněná vlákna
- Uhlíková a grafitová vlákna
- Aramidová vlákna
- Keramická vlákna
- Kovová vlákna
- Whiskery [1].



Obr. 3. Druhy vláken [28],[29],[26],[25],[24],[22],[21],[27].

a) přírodní vlákno, b) skleněné vlákno, c) uhlíkové vlákno, d) grafitové vlákno,  
e) aramidové vlákno, f) keramické vlákno, g) ocelové vlákno, h) whisker

Tab. 5. Vlastnosti některých druhů vláken [3].

Vlákno	Uhlíkové	Grafitové	Whisker	Skleněné	Ocelové
Průměr [ $\mu\text{m}$ ]	7-10	5-7	0.2	12-20	13
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1,6	2	2,26	2,5	7,87
Pevnost v tahu [GPa]	2,5-3,5	2-2,5	20	3,5	4,2
Modul pružnosti [GPa]	250-300	400-500	500-1000	70-85	210
Měrná pevnost [ $\text{m}^2\text{s}^{-2}\cdot 10^9$ ]	1,55-2,2	1-1,25	8,85	1,4	0,53
Měrný modul [ $\text{m}^2\text{s}^{-2}\cdot 10^8$ ]	156-188	200-250	220-240	28	27
Teplota tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]	3650	3650	3650	700	1400
Teplotní odolnost inert [ $^{\circ}\text{C}$ ]	2000	2000	2000	500	
Teplotní odolnost vzduch [ $^{\circ}\text{C}$ ]	350	350	350	300	

### 2.2.1 Skleněná vlákna (Glass Fiber)

Textilní skleněná vlákna (GF) je společný název pro tenká vlákna ( $\varnothing$  3,5 až 24  $\mu\text{m}$ ) s pravidelným kruhovým průřezem, tažená s roztavené skloviny a používaná pro textilní účely.

Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou vynikajícím elektrickým izolantem s vysokou prostupností pro záření, proto se označují jako E – vlákna (elektrická a jejich sklovina jako E – sklovina. Je to nejčastěji používaný druh skloviny pro výrobu vláken, který postupně jako standardní typ obsadil téměř 90 % trhu.

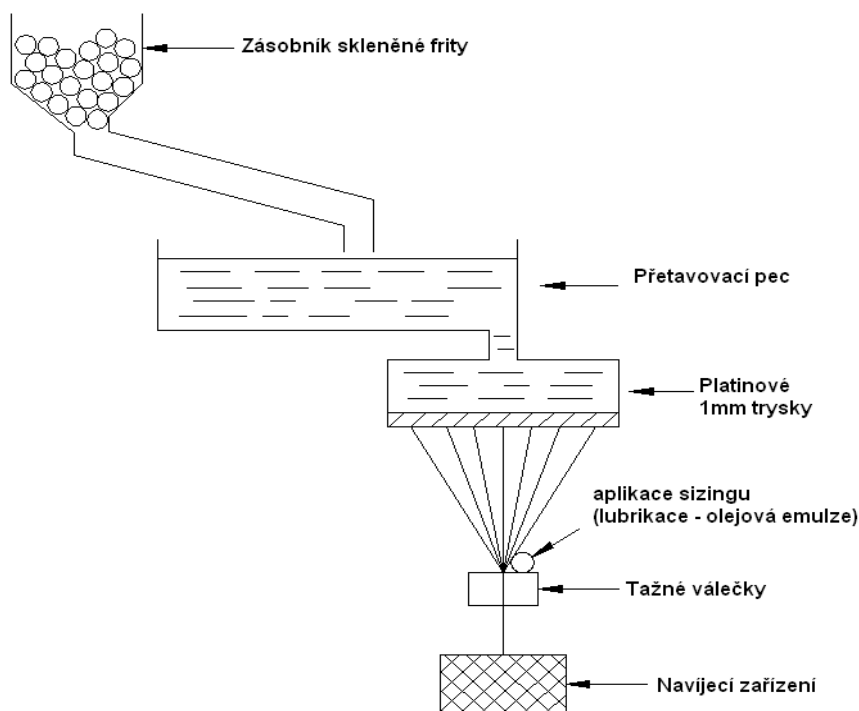
Sklovina s vyšším obsahem  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  má o 40 až 70 % vyšší pevnost a označuje se v USA jako S – sklovina (S – strenght), v Evropě jako R – sklovina (R – resistance) a v Japonsku jako T – sklovina.

Dále se vyrábí tzv. C – sklovina s vysokou odolností proti kyselinám a proti chemicky agresivním látkám a pevná, vysoce chemicky odolná bezboritá C – sklovina, tzv. ECR – sklovina. Bezalkalická skleněná vlákna – AR – vlákna, s poněkud odlišným složením oproti E – vláknům, mají vysokou odolnost proti alkáliím a používají se pro vyztužení betonu [2].

Relativně vysoké hodnoty pevnosti a  $E$  – modulu jsou důsledkem silné kovalentní vazby mezi křemíkem a kyslíkem v trojrozměrné síti skloviny. Zesíťovaná struktura a síla jednotlivých vazeb je závislá také na druhu použitých oxidů kovů. Skleněná vlákna jsou na základě své amorfní struktury izotropní, na rozdíl od uhlíkových a aramidových vláken.

Dodací formou textilního skla jsou příze, skaná příze, pramenec, rohož, sekáný pramenec a krátké vlákno [2].

Vyrábějí se tažením směsi oxidů Si (s příměsí oxidů Al, Ca, Mg a B) s velmi malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K. Potřebného průměru vláken se dosáhne dlužením proudu skla vytékajícího tryskami (průměr trysky 1mm) ze dna zvlákňovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékající skloviny a rychlostí odtahování „monovláken“. Monovlákná se po povrchové úpravě (sizing) sdružují do pramence a navíjejí na cívku. Sdružením pramenů vzniká roving (pramenec nebo kábílek). V kompozitech jsou používána vlákna ze skloviny E, S, C (kyselinám odolná vlákna), ACR (vlákna odolná alkáliím) a křemenná vlákna [12].



Obr. 4. Schéma výroby skleněných vláken [1].

### Vlastnosti skleněných vláken

- Modul pružnosti v tahu skleněných vláken je přibližně stejně velký jako u hliníku a činí asi jednu třetinu hodnoty oceli, pevnost v tahu je vyšší než u většiny organických a anorganických vláken a je většinou podstatně vyšší než u oceli. Vzhledem k porovnatelně nižší hustotě skla je hodnota měrné pevnosti vláken zvláště vysoká.
- Mez průtažnosti skleněného vlákna má hodnotu kolem 3 %. Deformace je přitom poměrně elastická, tj. skleněné vlákno nemá viskoelastické chování jako syntetická vlákna.
- Tepelné vlastnosti skleněných vláken překonávají tepelné vlastnosti jiných materiálů. Ani dlouhodobé trvalé tepelné namáhání při 250 °C nesnižuje hodnoty mechanických vlastností. Tepelná vodivost je naproti tomu vyšší než u ostatních materiálů, ale podstatně nižší než u kovů.
- Skleněná vlákna jsou nehořlavá, a tudíž ohnivzdorná, hodí se proto pro kompozity a závěsy
- Bod měknutí E - skloviny je vyšší než 625 °C
- Součinitel teplotní délkové roztažnosti skleněných vláken je nižší než u většiny konstrukčních materiálů.

Při široké nabídce výztuží ze skleněných vláken jsou konečné vlastnosti kompozitu ve značné míře závislé na druhu, obsahu a orientaci skleněných vláken, příp. výrobků z nich [2].

Tab. 6. Vlastnosti jednotlivých druhů skel [3].

Sklo	E	S	D	C	L
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	2540	2490	2160	2490	4300
Pevnost v tahu [GPa]	3,5	4,65	2,45	2,8	1,68
Modul pružnosti v tahu [GPa]	73,5	86,8	52,5	70	51,1
Poměrné prodloužení do mezi pevnosti [%]	4,8	5,4	4,7		
Dielektická konstanta, $20^\circ\text{C}$ , $10^6$ Hz	5,8	4,53	3,56	6,24	9,49

### 2.3 Typy produktů z vláken

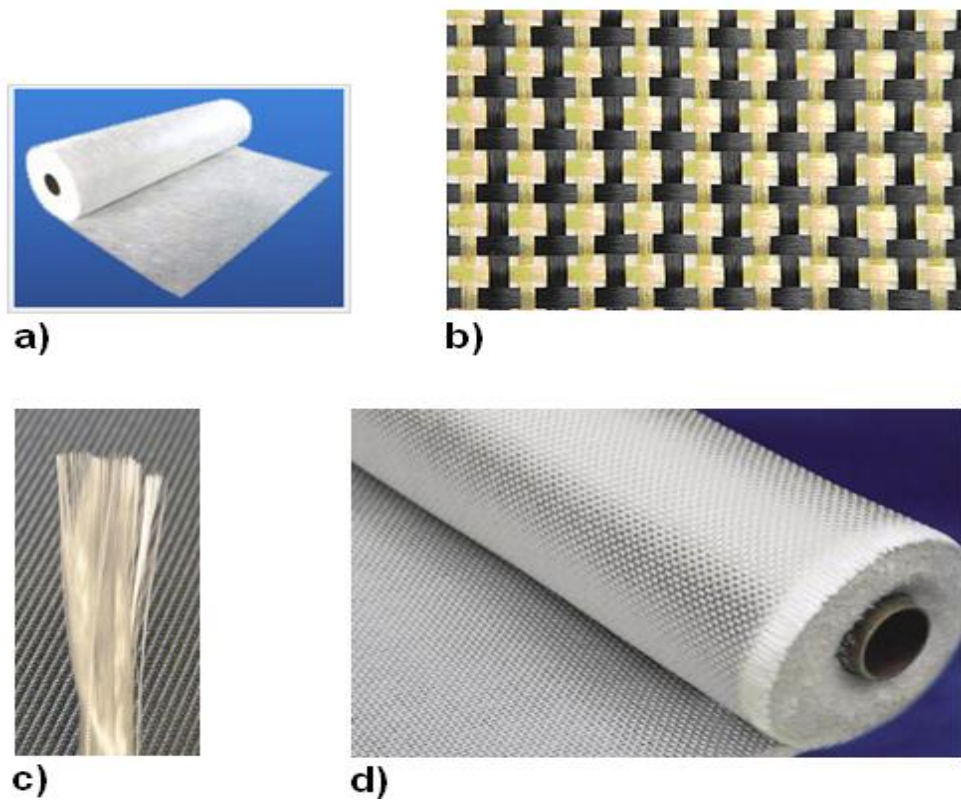
Jednotlivá vyztužující vlákna se samostatně používají jen výjimečně. Ze zpracovatelských důvodů se většinou aplikují upravené produkty. Následující pojmy uvedené pro skleněná vlákna platí většinou i pro ostatní typy vláken:

- **Příze** – vyrábí se spřádáním z vláken a zpracovává se dále na tkaniny, pásy a pletené výrobky [2].
- **Rovingy (pramence)** – jsou to sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutů (méně než 40 zákrutů/m) pro výrobu profilů tažením, pro navíjení a pro výrobu prepregů. Jsou dodávány na válcových cívkách o větší hmotnosti. Pro výrobu tkanin jsou rovingy dodávány na menších cívkách s kónickým zakončením [12].
- **Nitě (skaná příze)** – vyrábějí se jedno, nebo víceštruhové, skládají se z jedné nebo více přízí, které jsou společně spředeny. Zpracovávají se dále podobně jako příze (ČSN EN ISO 2078)
- **Spředený roving** – vyrábí se z vláken stočených kolem podélné osy.
- **Rohože ze sekaných pramenců** – netkané plošné výrobky o hmotnosti 300 až 900  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ . vyrábějí se z 25 nebo 50 mm dlouhých sekaných vláken nepravidelně plošně uložených. Vlákna jsou uložena do vrstev, postříkána pojivem a po vysušení

v pastové sušárně spojena tak, že je možno vzniklou rohož, podobnou plsti, navíjet do rolí, které jsou připraveny pro okamžité další použití.

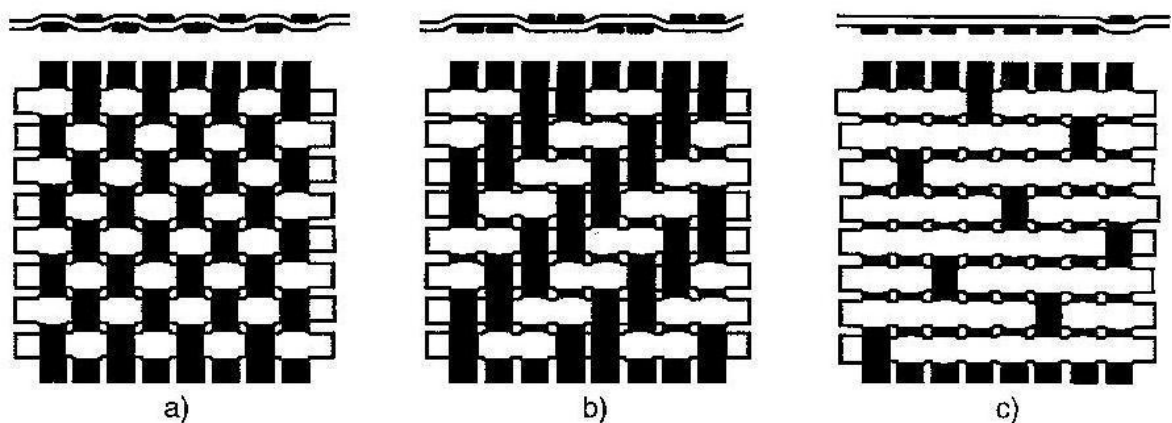
- **Rohože z kontinuálních vláken** – skládají se z nekonečných skleněných vláken, která jsou uložena nepravidelně bez jakékoliv orientace ve smyčkách v několika vrstvách a jsou vzájemně spojena pojivem. Tvarují se lépe než rohože ze sekaných pramenců.
- **Povrchové (závojové) rohože** – netkané plošné výrobky o hmotnosti 20 až 50 g.m<sup>2</sup> ze skleněných nebo termoplastových vláken, které se pokládají do povrchové vrstvy laminátu s vysokým obsahem pryskyřice, aby se zamezilo vzniku trhlin. Zabraňují proražení struktury hrubší výztuže na povrch a zesilují tenké vrstvy.
- **Krátká vlákna** – mletá a na jednotlivá elementární vlákna rozptýlená vlákna o různé délce (0,1 – 5 mm), používaná pro vyztužení termoplastů [2].
- **Jednosměrné pásy** – textilní pásy z jedné nebo více rovnoběžně uložených vrstev přímých, nezvlněných netkaných vláken, které jsou spojeny příčnou tenkou vrstvou lepicí rohože nebo útkovými vlákny, uloženými ve větším odstupu.
- **Úplety** – textilní plošné výrobky, které se vyrábějí z jednoho nebo více druhů vláken pletením, umožňujícím volbu nejrůznějších geometrických tvarů.
- **Trojrozměrné tkaniny** – úplety nebo trojrozměrné tkaniny jsou textilní plošné výrobky, které jsou vyrobeny z jednoho nebo více vláknových systémů technologií pletení.
- **Pleteniny** – jiný typ vyztužení představují úplety a pleteniny, které mohou být přizpůsobeny tvaru a způsobu namáhání konstrukčních prvků formou přetvarovaných a bezprořezových prostorových výztuží prosycených pryskyřicí. Stabilizace geometrie jejich uložení je v případě potřeby zajištěna prošitím.
- **Tkaniny** – plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově, které působí výztužně ve dvou směrech. Zvýšením počtu vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení vláken, které se nazývají vazby. Tkaniny jsou v porovnání s jednosměrně orientovanou výztuží snáze zpracovatelné [2].





Obr. 5. Nejdůležitější typy sklovláknitých výstuží [17], [18], [19], [20].

Pro reaktivní pryskyřice: a) rohož, b) tkanina z vláken, c) roving (pramenec) d) tkanina z pramenců



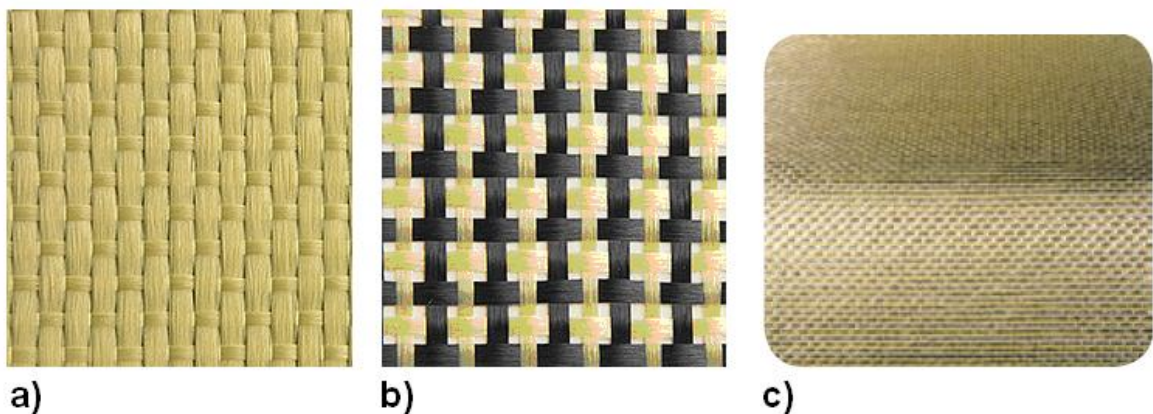
Obr. 6. Druhy vazeb vyztužujících tkanin [2].

a) plátnová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová (saténová) vazba

**Plátňová vazba** – jednoduchá základní vazba, jednoduché zpracování tkaniny vzhledem k dobré rozměrové stálosti a malému otřepu při řezání,

**Keprová vazba** – vyšší pevnost a tuhost laminátu způsobená menším zvlněním vláken. Tkaniny jsou ohebnější, a jsou proto vhodnější pro tvarované prvky než tkaniny s plátňovou vazbou [2].

**Atlasová (saténová) vazba** – má menší vychýlení vláken než keprová vazba, velmi dobrou řasitelnost a z toho vyplývající vhodnost pro prostorově složité prvky. Atlasové tkaniny umožňují dosáhnout velmi hladký povrch.



Obr. 7. Tkaniny s různou skladbou vláken v osnově a útku [16], [18], [30].

a) jednosměrná tkanina, b) směsná tkanina, c) hybridní tkanina

## 2.4 Aplikace kompozitních materiálů

Materiálového inženýra zaujmou kompozity především obrovskou flexibilitou relativně jednoduše tvořených materiálových struktur a tomu odpovídajícím širokým spektrem užitných vlastností. Specifikou výroby kompozitů je i fakt, že ve většině případů je kompozitní materiál vyráběn v jednom kroku s konečným produktem (laminace sportovních lodí, navíjení rybářských prutů, tažení profilů) a je tedy obtížné oddělit od sebe vlastnosti materiálu od užitných vlastností výrobku, což je u konkurenční oceli či hliníku velmi snadné a podstatně to zjednodušuje optimalizaci a spolehlivost konstrukčních postupů. V následujících podkapitolách jsou uvedeny příklady některých aplikací kompozitních materiálů [3].

### 2.4.1 Automobilový a vlakový průmysl



*Obr. 8. Stolek pro vlakové soupravy [31].*



*Obr. 9. Vnější bok City autobusu pro městskou dopravu [31].*

### 2.4.2 Vodní doprava

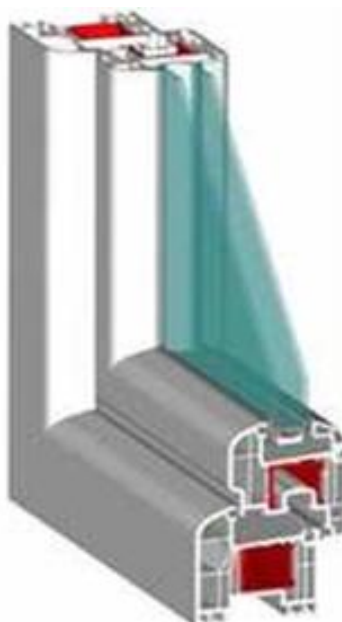


*Obr. 10. Celokompozitový hlídkový člun pro U.S. Navy [12]*



*Obr. 11. Regata švédské armády s technologií stealth [12]*

### 2.4.3 Stavebnictví



*Obr. 12. Výztuha v okenním rámu [32].*



#### 2.4.4 Chemický průmysl



*Obr. 13. Kryty čistíren odpadních vod [9]*

#### 2.4.5 Letecký průmysl



*Obr. 14. Nadzvukové letadlo společnosti Lockheed Martin [12]*

#### 2.4.6 Lékařství



*Obr. 15. Náhrada [12]*

#### 2.4.7 Energetický průmysl



*Obr. 16. Lopatky větrných turbín [23]*

**Výhody laminátů:**

- velká pružnost při deformaci,
- vysoká pevnost a tuhost, kterou lze přizpůsobit směru a druhu zatížení, zejména zatížení v tahu ve směru vláken, při nízké hmotnosti kompozitu,
- značná přizpůsobivost každému tvaru,
- značná odolnost vůči dynamickému namáhání při vysokém mechanickém tlumení,
- nízký součinitel teplotní délkové roztažnosti,
- vysoká odolnost proti stárnutí a korozi,
- mnoho možností kombinace matrice a vláken, umožňující složení materiálu tzv. „na míru“,
- dobrá surovinová základna,
- menší požadavek na investice při malém počtu výrobků (i velkoplošných),
- možnost oprav při použití termosetické matrice.

Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně [2].

**Nevýhody laminátů:**

- množství variant materiálového složení, neexistuje standardní kompozit,
- neobvyklé chování materiálu (vlastnosti kompozitu nelze jednoduše odvodit součtem vlastností jeho složek),
- specifické vlastnosti materiálu a způsoby zpracování,
- obtížné nedestruktivní zkoušení materiálu,
- nízká mez pevnosti v tahu ve směru kolmo ke směru uložení vláken (tvorba trhlin, oslabení spojení vlákna a matrice),
- možné katastrofální následky při havárii,
- vysoké náklady při dimenzování náročných konstrukcí,

- nízká odolnost proti působení vlhkosti za tepla,
- místní poškození, např. nárazem, se obtížně poznávají a hůře opravují než u např. hliníkových konstrukcí [2].

## 2.5 Využití polyesterových skelných laminátů

V praktické části diplomové práce budou prováděny mechanické zkoušky polyesterových sklolaminátových vzorků. V této kapitole je uvedeno využití skelných laminátů v praxi.

Polyesterové skelné lamináty jsou velmi dobrým konstrukčním materiálem, avšak jejich cena, jak se zdá, nebude nikdy tak nízká, aby se jich mohlo používat i na méně náročné výrobky. Proto se bude jejich použití omezovat především na výrobky s velkými nároky na mechanické, chemické i elektrické vlastnosti a na jakostní výrobky s malou specifickou váhou [5].



Obr. 17. Výrobky ze sklolaminátu [13].

- a) dopravní značka, b) golfová překážka, c) žlabové rozvody v chladících věžích,  
d) vanová vložka, e) umývadlo, f) sedačka

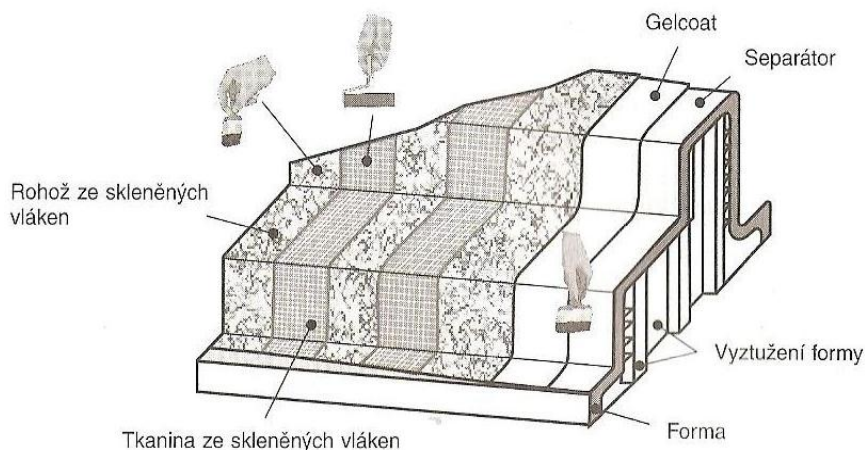


### 3 TECHNOLOGIE VÝROBY LAMINÁTŮ (THE PRODUCTION TECHNOLOGY OF LAMINATES)

#### 3.1 Výroba laminátů ručním kladením

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

- povrchová úprava formy separačním činidlem
- „gel coat“ pokud je třeba
- katalyzovaná pryskyřice
- výztuž
- další vrstva pryskyřice je válečkem vtlačena do výztuže a je přitom vtlačen přebytek vzduchu tvořící bubliny
- tyto dva kroky jsou opakovány tak dlouho, až je vytvořena požadovaná tloušťka stěny
- vytvrzení v klidu
- vyjmutí z formy [3].



Obr. 18. Postup ručního kladení [2].

Výhodami ručního kladení jsou především jednoduchost technologie, minimální náklady na nástroje a prakticky neomezená variabilita tvarů a velikostí. Flexibilita konstrukce, možnost jednoduše aplikovat „gel coat“ a jednoduché dokončovací operace jsou největšími výhodami tohoto výrobního procesu.

Nevýhodou je nereprodukovatelnost odpadu, který lze jen těžko znovu zpracovat, relativně velký objem odpadu, náročnost na lidskou práci, pouze jeden kvalitní povrch, malá produktivita a kvalita výrobku silně závislá na zkušenosti a schopnostech pracovníka. Touto technikou byly vyrobeny lodě, skladovací nádrže, rovné plochy, bazény a různé prototypy [3].

### 3.2 Výroba laminátů metodou vakuového vaku

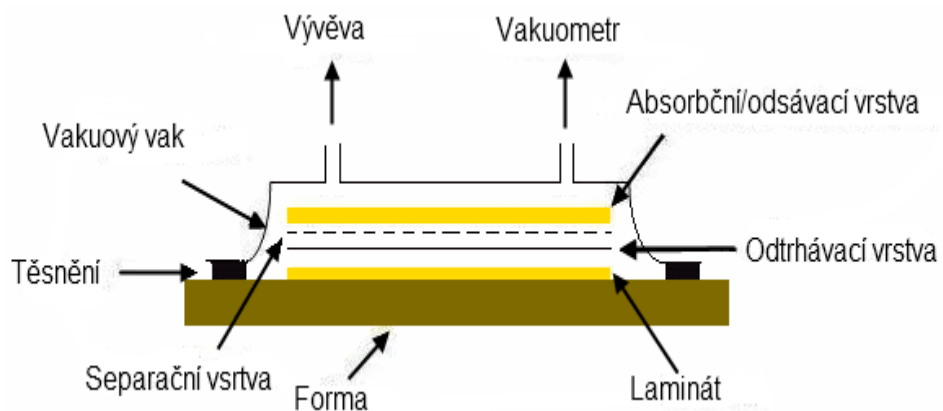
Tato metoda je pouze zlepšením metody ručního kladení v poslední fázi vytvrzování. Tenký vzduch nepropouštějící film je položen na volný povrch ručně kladeného kompozitu, forma je evakuována a tlakem filmu dojde k vytlačení přebytečných bublin. Postupné kroky této metody jsou následující:

- ruční kladení laminátu
- fólie je položena přes volný povrch kompozitního dílce
- prostor formy je evakuován

- ručně je film dotlačen na kompozit a všechny přebytečný vzduch je vytlačen ven
- vytvrzení FRC
- film je stržen z laminátu a výrobek je dokončen [3].

Výhodami tohoto výrobního postupu je možnost připravit materiály s minimálním obsahem vzduchových bublin, umožňuje dosáhnout vyššího obsahu výztuží, všechny výhody kladení jsou zachovány, je vynikající pro sendvičové struktury.

Nevýhodami jsou velký obsah odpadu, vyžaduje velmi zručnou pracovní sílu a celý proces je velmi pomalý. Navíc není možno zarovnat okraje výrobku ještě před jeho vytvrzením, což prodražuje celý proces. Hlavními aplikacemi jsou vojenské a letecké součásti, kde cena nehraje hlavní roli a důležité jsou především fyzikální vlastnosti [3].



Obr. 19. Metoda vakuového vaku [14].

Tab. 7. Technologie výroby vláknových kompozitů I [2], [3].

Technologie výroby vláknových kompozitů	Výhody	Nevýhody	Využití
<p>Nanášení kompozitu do formy sprejem (Spray lay-up)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- přesnost,</li> <li>- nízká cena zařízení,</li> <li>- poměrně dobrá produktivita a reprodukovatelnost výrobku</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nesnadné dosažení přesných tolerancí,</li> <li>- horší vlastnosti materiálů,</li> <li>- poměrně vysoké požadavky na pracovní sílu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- výroba stejná jako u ručního kladení,</li> <li>- velké díly (panely, lodě, zásobníky atd.)</li> </ul>
<p>Navíjení (Filament winding)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- použití nejlevnější formy výztuže,</li> <li>- velmi dobrá produktivita,</li> <li>- možnost automatizace,</li> <li>- výrobky s vynikajícími fyzikálními vlastnostmi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vysoká cena navíjecích strojů,</li> <li>- nesnadné odstraňování vnitřních forem,</li> <li>- nízká produktivita u výroby tlakových nádrží</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- výroba potrubí,</li> <li>- kolen,</li> <li>- zásobníků paliv,</li> <li>- velkých součástí s kokávním povrchem,</li> <li>- vyztužení pušek</li> </ul>

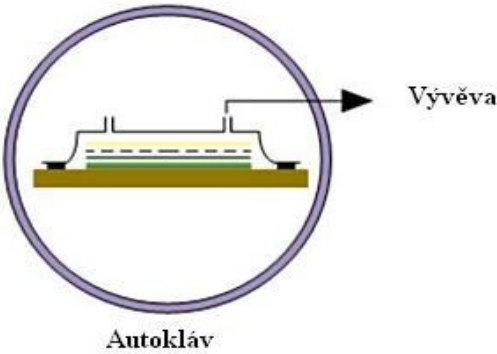
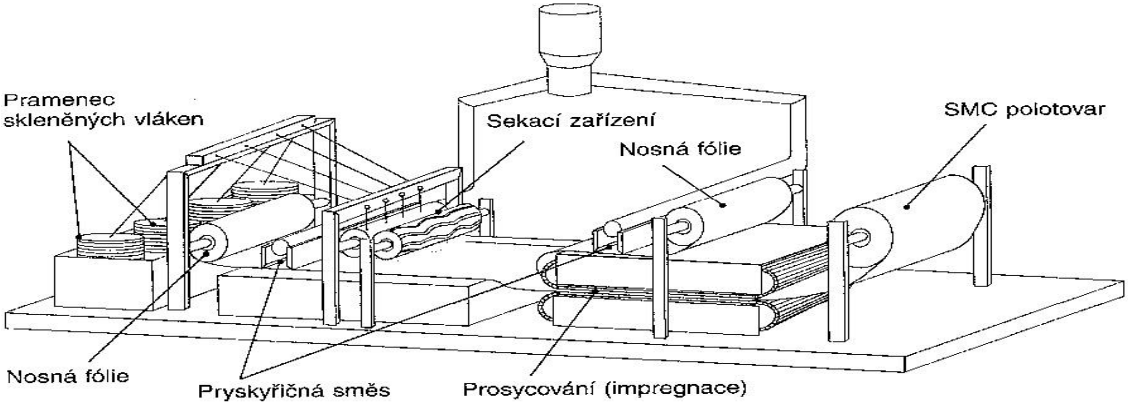
Tab. 8. Technologie výroby vláknových kompozitů 2 [2], [3], [10].

Technologie výroby vláknových kompozitů	Výhody	Nevýhody	Využití
<p>Pultruze (Pultrusion)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- neomezená variabilita tvaru průřezů,</li> <li>- nekonečná délka vyrobeného profilu,</li> <li>- vysoká produktivita,</li> <li>- minimální nároky na lidskou práci,</li> <li>- vysoký stupeň automatizace,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- velké investiční náklady na pořízení technologie,</li> <li>- relativně drahý provoz,</li> <li>- nutnost velmi kvalitního řídicího systému</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- trámy a nosníky používané v střešní konstrukci,</li> <li>- mosty,</li> <li>- žebříky,</li> <li>- rámy</li> </ul>
<p>Lisování se vstříkem matrice (Pressing the injection matrix)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- výroba kompozitních dílů s oboustranně dobrým povrchem,</li> <li>- velmi přesné řízení tloušťkových tolerancí,</li> <li>- snadné laminování různých přírub a jiných součástí.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nutnost velmi těžkých a drahých kovových forem,</li> <li>- fyzikální vlastnosti těchto materiálů nižší než u jiných procesů</li> <li>- FRC díly vyrobené touto metodou se většinou nepoužívají v konstrukčních aplikacích jako nosné prvky</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- výroba velkých plošných výrobků</li> </ul>

Tab. 9. Technologie výroby vláknových kompozitů 3 [3], [10].

Technologie výroby vláknových kompozitů	Výhody	Nevýhody	Využití
Kontinuální laminace FRC (Continuous lamination fiber reinforced composites)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- možnost výroby „nekonečné“ délky FRC profilu o daném průřezu,</li> <li>- výroba různé tloušťky,</li> <li>- nízké náklady a minimální odpad při kontinuální výrobě</li> <li>- oboustranně kvalitní povrch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vysoká cena výrobního zařízení,</li> <li>- velmi nesnadno se mění tvar vyráběného dílu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- výroba střešní krytiny,</li> <li>- různé dělicí příčky, - kapotáže klimatizace, atd.</li> </ul>
tvarovací a vytvrzovací komora			
Odstředivé lití FRC (Centrifugal casting fiber reinforced composites)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- minimum nutných nástrojů,</li> <li>- snadno automatizovatelný proces,</li> <li>- možnost dosažení poměrně dobrých povrchů na obou stranách výrobku,</li> <li>- minimální odpad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- poměrně vysoká cena technologického zařízení</li> <li>- a nutnost vyrobit formy, které jsou velmi přesně vyváženy i pro vysoké úhlové rychlosti otáčení</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- výroba trubek,</li> <li>- paraboly radarů,</li> <li>- velké skladovací nádoby, atd.</li> </ul>

Tab. 10. Technologie výroby vláknových kompozitů 4 [2], [3], [15].

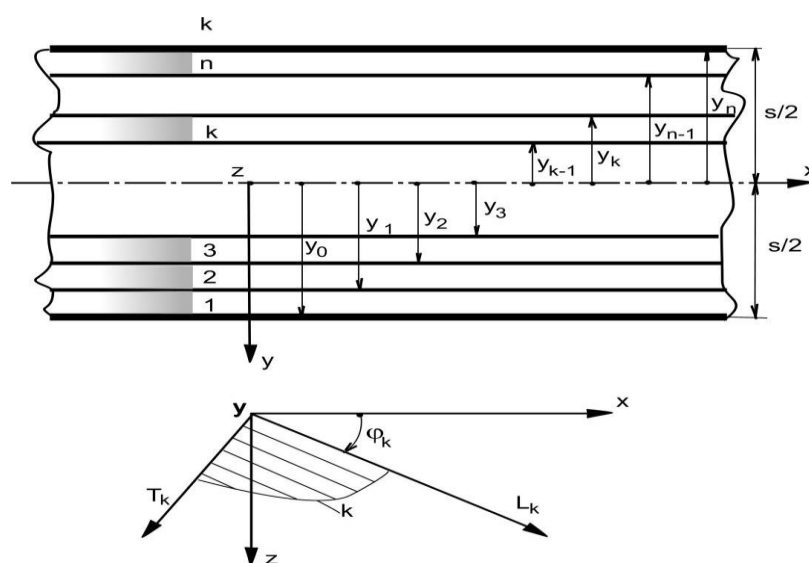
Technologie výroby vláknových kompozitů	Výhody	Nevýhody	Využití
Lisování z prepregů (Prepreg moulding)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- velmi přesné a předem definované uložení výztuže,</li> <li>- velmi dobré a izotropní vlastnosti vyztuženého dílce</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vyšší cena prepregu ve srovnání se samotnou pryskyřicí a samotnou výztuží,</li> <li>- velký odpad,</li> <li>- nutnost skladovat prepregy při nízkých teplotách,</li> <li>- finanční náročnost procesu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- výroba radarových domů,</li> <li>- klapky náběhové a brzdové,</li> <li>- dveře,</li> <li>- vstupní panely,</li> <li>- kryty komunikační přístrojů a kryty turbín, atd.</li> </ul>
 <p style="text-align: center;">Autokláv</p>			
SMC Materiály (Sheet moulding compound materials)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- velkosériová výroba,</li> <li>- nízké nároky na obsluhující personál - velmi reprodukovatelná výroba s vynikajícími povrchy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vysoká cena nástrojů, forem a lisů,</li> <li>- nutnost velké výrokové série,</li> <li>- málo flexibilní metoda z hlediska vysokých odpisů výrobního zařízení a nákladů na údržbu,</li> <li>- velikost vyráběných dílů omezena velikostí lisů</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- díly o proměnné tloušťce, (auta, spotřebiče)</li> </ul>
			

## 4 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ LAMINÁTOVÝCH STRUKTUR (MECHANICAL BEHAVIOR OF LAMINATED STRUCTURES)

V teorii laminátů se setkáváme s pojmem **kvaziizotropní**, který znamená, že daný laminát nebo kompozit je možno v makroskopickém měřítku (celý dílec) považovat za izotropní v rovině vláknité výztuže. Mikroskopicky je však takový materiál anizotropní [3].

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

Jednotlivé laminy jsou považovány za ortotropní a homogenní vrstvy. Spojení mezi laminami je považováno za ideálně tuhé, tzn., že posunutí jsou po tloušťce stěny laminátu spojitá [8].



Obr. 20. Pořadová čísla lamin, jejich rozhraní [8].

### 4.1 Konstituční rovnice laminy

Pořadová čísla lamin resp. jejich rozhraní volme dle obr. 20. Závislost složek napětí na složkách deformace k-té laminy v jejím přirozeném – materiálovém souřadném systému  $L, T$  je

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



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

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

Pokud není orientace laminy vůči globálnímu souřadnému systému laminátového prvku roven  $0^\circ$ , tj. materiálový souřadný systém  $k$ -té laminy je vůči globálnímu souřadnému systému pootočen, budou složky napětí v globálním souř. systému  $xz$  a místě  $y$

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

kde matice tuhosti je dána transformací

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

## 4.2 Geometrické deformační rovnice laminátové stěny

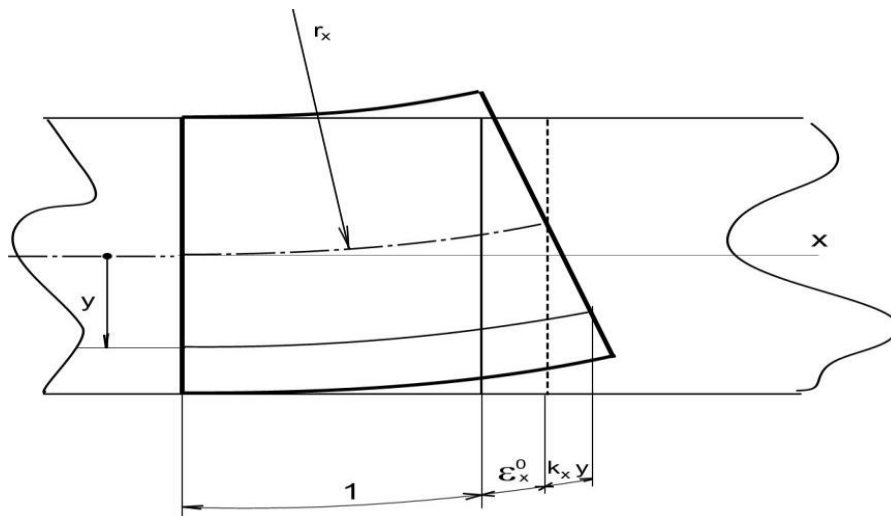
Na obr. 21. jsou znázorněny složky deformace ve směru globální osy  $x$  v místě vzdáleném od střednice stěny o  $y$ . Střední plocha  $xz$  je zvolena jako referenční, tj. její deformace jsou považovány za membránovou část deformace stěny. K těmto deformacím se v obecném místě  $y$  přičítají deformace působené ohybově torzními přetvořeními laminátové stěny. Za předpokladu platnosti Kirchhoffovy – Loveovy hypotézy jsou závislosti těchto složek na pořadnici  $y$  dány lineárními vztahy. Pro deformaci v rovině rovnoběžné se střednicí, ve vzdálenosti  $y$  je tak

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

V symbolickém zápisu pak

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

kde  $(\varepsilon^0)$  je sloupec složek tenzoru deformace střední – referenční plochy,  $(k)$  je sloupec křivosti [8].



Obr. 21. Složky deformace ve směru globální osy  $x$  [8].

### 4.3 Konstituční rovnice laminátové stěny obecné struktury

Ekvivalentní systém jednotlivých sil a momentů v průřezech laminátové stěny, vztažený ke střední – referenční ploše je znázorněn na obr. 22. Vzhledem k symetrii tenzoru napjatosti jsou smykové složky napětí  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$  sdružené. Jsou tedy sdružené i výslednice smykových sil o průřezu laminátové stěny. Membránové smykové síly jsou tak  $n_{xz} = n_{zx}$ , torzní momenty  $m_{xz} = m_{zx}$ . Ekvivalence náhradního systému silových a momentových výslednic, vztažených k referenční ploše je pak dána šesti rovnicemi rovnováhy, které můžeme uspořádat do dvou maticových rovnic [8].

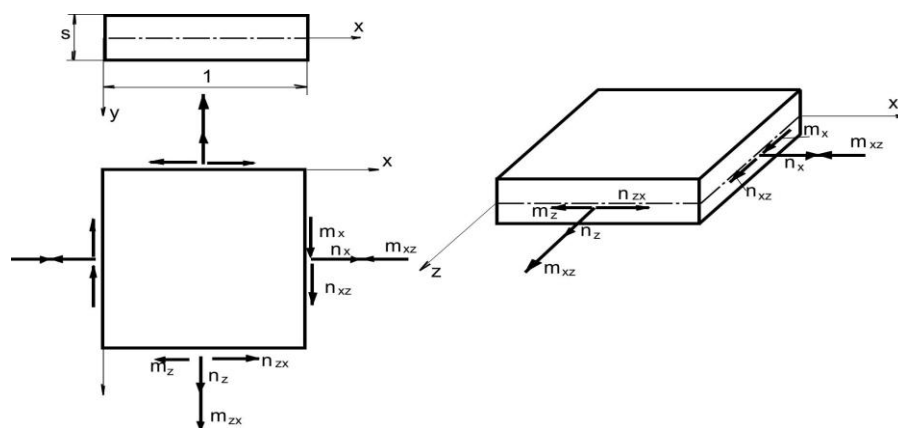
$$\begin{pmatrix} n_x \\ n_z \\ n_{xz} \end{pmatrix} = \int_{(s)} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{pmatrix} dy, \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_z \\ m_{xz} \end{pmatrix} = \int_{(s)} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{pmatrix} y dy. \quad (8)$$

v symbolickém zápisu

$$(n) = \int_{(s)} (\sigma) dy, \quad (9)$$

$$(m) = \int_{(s)} (\sigma) y dy. \quad (10)$$



Obr. 22. Ekvivalentní systém jednotlivých sil a momentů v průřezech laminátové stěny [8].

Znaménko integrace v rov. (9), (10) symbolicky vyjadřuje sčítání elementárních příspěvků sil a momentů po průřezu, resp. po tloušťce stěny. Uvnitř každé laminy se považují mechanické vlastnosti za neproměnné, a funkce průběhu složek napětí jsou tedy spojitě. Prakticky je tak nutno integrovat v rámci každé laminy a tyto výsledky sčítat přes všechny laminy. Rovnice (9), (10) pak přejdou na tvar

$$(n) = \sum_{k=1}^n \int_{y_{k-1}}^{y_k} (\sigma)_k dy, \quad (11)$$

$$(m) = \sum_{k=1}^n \int_{y_{k-1}}^{y_k} (\sigma)_k y dy. \quad (12)$$

#### 4.4 Konstituční rovnice laminátové stěny, zahrnující vliv teplotních změn

Dosazením za složky napětí do rovnic rovnováhy elementu laminátové stěny obdržíme konstituční rovnice se zahrnutím vlivu teplotních dilatací

$$(n) + (n)^T = [A](\varepsilon)^0 + [B](k), \quad (13)$$

$$(m) + (m)^T = [B](\varepsilon)^0 + [D](k), \quad (14)$$

#### 4.5 Teplotní napjatost laminátové struktury

Nechť je laminátová stěna pouze prostě podepřena tak, že není bráněno jejím deformacím, a to jak membránovým - v její ploše ("in plane"), tak ohybově torzním ("off plane"). Pokud není laminátová stěna mechanicky zatěžována a je vystavena pouze změně teploty, budou jak membránové síly, tak ohybové a torzní momenty nulové,

tj.  $(n) = (0)$ ,  $(m) = (0)$ . Konstituční rovnice pro tento případ jsou tak

$$(n)^T = [A](\varepsilon)^0 + [B](k), \quad (15)$$

$$(m)^T = [B](\varepsilon)^0 + [D](k).$$

Praktické případy představují deformační stav, kdy je bráněno ohybově torzním deformacím, tedy deplanacím stěny, membránové deformace však zůstávají volné. Je tedy

$(k) = (0)$ , a vzhledem k volným membránovým deformacím  $(n) = (0)$ . rovnice (13) se tak redukuje na tvar

$$(n)^T = [A](\varepsilon)^0, \quad (16)$$

Pokud je bráněno všem složkám deformací, je  $(\varepsilon)^0 = (0)$ ,  $(k) = (0)$ , takže konstituční vztahy se redukují na tvar

$$(n) + (n)^T = (0) \quad (17)$$

$$(m) + (m)^T = (0),$$

#### 4.6 Kvaziizotropní laminátové struktury

Laminát, který bude vykazovat při namáhání membránovými silami v libovolném souřadném systému shodné membránové vlastnosti, je označován jako izotropní vzhledem k matici membránové tuhosti  $[A]$ . Znamená to, že matice  $[A]$  je izotropní, tj. má tvar

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

Matice  $[A]$  bude izotropní, pokud:

- počet vrstev  $n$  je min. 3,
  - vrstvy jsou vzájemně pootočeny o úhel  $180/n$ ,
- vrstvy jsou shodné co do tloušťek i vlastností [8].

## **PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je zkoumání mechanických vlastností skelných laminátů s polyesterovou maticí v různém prostředí a následné vyhodnocení naměřených hodnot.

Budou provedeny tahové, ohybové i cyklické tahové a ohybové zkoušky. Zaměřím se na materiálové charakteristiky jako je napětí na mezi pevnosti a modul pružnosti. Výsledkem práce by mělo být zjištění vlivu jednotlivých prostředí a cyklického namáhání na mechanické vlastnosti polyesterových skelných laminátů.

## 6 ZKUŠEBNÍ VZORKY A ZAŘÍZENÍ PRO MECHANICKÉ ZKOUŠKY

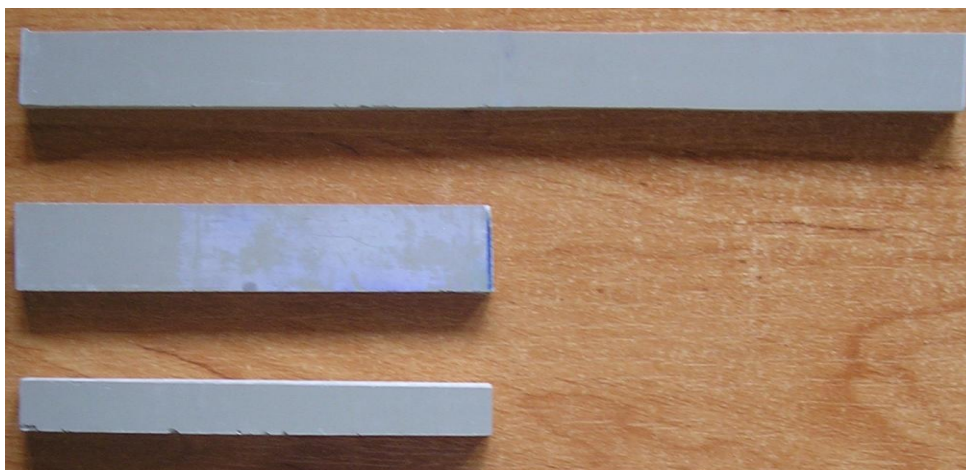
Pro experimentální zkoušky dodala vzorky firma A.A.R. plast s.r.o. Vzorky byly ve formě zkušebních tělísek obdélníkového průřezu, směru kladení L a T ve dvou strukturách S4 a S8. Proto nebylo již třeba vzorky připravovat.

Ohybové, tahové i cyklické ohybové a tahové zkoušky byly prováděny na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456.

### 6.1 Zkušební vzorky

Mechanické vlastnosti vybraného počtu zkušebních tělísek byly ovlivněny časovým působením vody a kyseliny sírové.

- Etalon – jedná se o laminát, který byl při teplotě 21 °C odležen po dobu 12 měsíců od dodání.
- 4000 hodin v H<sub>2</sub>O – Výchozím materiálem je Etalon. Vzorky byly exponovány při teplotě 21 °C po dobu 4000 hodin v H<sub>2</sub>O.
- 2200 hodin v 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – Výchozím materiálem je Etalon. Vzorky byly exponovány při teplotě 40 °C po dobu 2200 hodin v 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- 1500 hodin v 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – Výchozím materiálem je Etalon. Vzorky byly exponovány při teplotě 21 °C po dobu 1500 hodin v 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



Obr. 23. Sklolaminátové vzorky

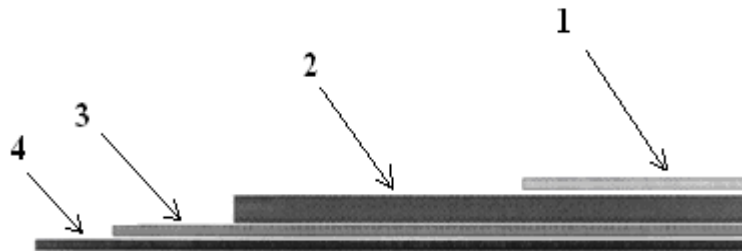


Tab. 11. Soupis vzorků pro tahové zkoušky

č.	struktura	směr kladení	délka [mm]	počet vzorků
1	S4	L - podélný	125	20
2	S4	T - příčný	125	20

Tab. 12. Soupis vzorků pro ohybové zkoušky

č.	struktura	směr kladení	délka [mm]	počet vzorků
1	S8	L - podélný	250	30
2	S8	T - příčný	250	30
3	S8	L - podélný	125	10
4	S8	T - příčný	125	10
5	S4	L - podélný	250	40
6	S4	T - příčný	250	40
7	S4	L - podélný	125	10
8	S4	T - příčný	125	10



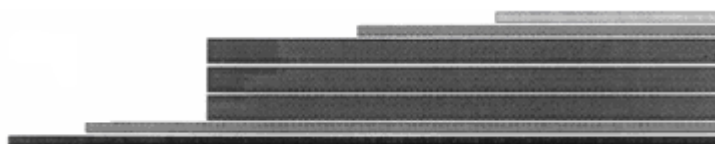
Obr. 24. Složení laminátu

1) Topcoat, 2) Combi 800/450 tkanina, 3) Rohož 450, 4) Gelcoat

### 6.1.1 Struktura laminátových stěn S4

Tab. 13. Složení struktury S4

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

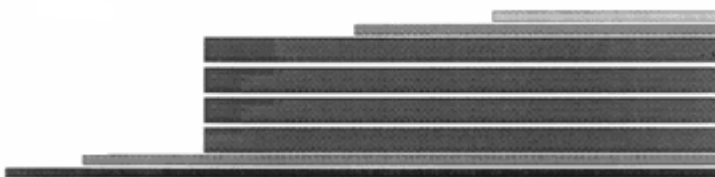


Obr. 25. Struktura laminátu S4

### 6.1.2 Struktura laminátových stěn S8

Tab. 14. Složení struktury S8

Topcoat	Gelcoat	Tkanina gramáž/vrstvy	Rohož gramáž/vrstvy	Pryskyřice
Aropol K- 530 TB	Maxguard RAL 5005	4 x 800/450 g/m <sup>2</sup>	2 x 450 g/m <sup>2</sup>	Aropol K- 530 TB



Obr. 26. Struktura laminátu S8

## 6.2 Použité přístroje a zařízení pro experimentální zkoušky

Pro stanovení mechanických vlastností byly použity následující zařízení a přístroje:

- Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456 s připojeným extenzometrem
- Posuvné digitální měřidlo Mitutoyo



Obr. 27. Univerzální zkušební stroj

Tab. 15. Technické údaje přístroje ZWICK 1465

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

## 7 STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ TAHEM A CYKLICKÝM TAHEM

Zkouška tahem je nejrozšířenější statickou zkouškou. Je nutná téměř u všech technických materiálů, protože její pomocí získáváme některé základní hodnoty potřebné pro výpočet konstrukčních prvků a volbu vhodného materiálu. Zkoušky tahem se zpravidla nedělají přímo na vyrobené součásti, ale na zkušebních tyčích, jejichž tvary a rozměry jsou normalizovány. Zkouškou tahem zjišťujeme pevnost v tahu, poměrné prodloužení, tažnost a kontrakci zkoušeného materiálu [7].

### 7.1 Zkouška tahem

Tahová zkouška byla provedena na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456 řízeném pomocí počítače. Vlastnosti sklolaminátových vzorků v tahu byly stanoveny dle normy ČSN EN ISO 527 navzdory tomu, že rozměry zkušebních tělísek neodpovídaly rozměrům předepsaným v dané normě.

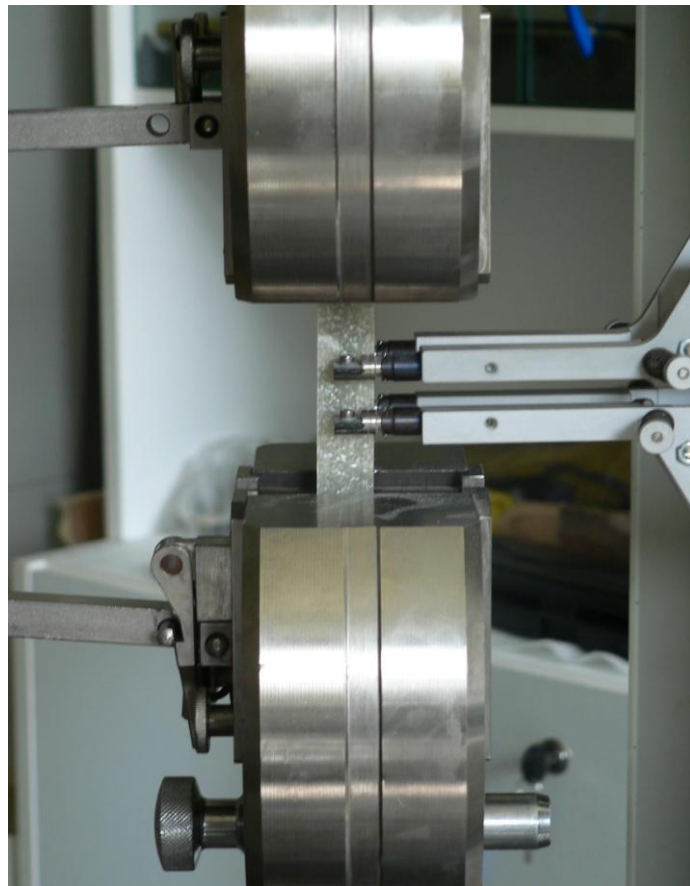
Před spuštěním zkoušky byla pomocí posuvného měřidla změřena u každého vzorku šířka a tloušťka. Tyto parametry byly zadány do programu testExpert V7.11 a vzorek upnut do čelistí. Po spuštění zkoušky byl na vzorek automaticky připojen extenzometr pro přesné stanovení Youngova modulu pružnosti. Extenzometr zaznamenává prodloužení v závislosti na napětí na vzdálenosti 20mm, nikoliv po celé délce vzorku. Zkouška probíhala do úplného přetržení zkušebního tělíška.

V průběhu zkoušky byla sledována celá řada hodnot: modul pružnosti v tahu –  $E_t$ , síla při přetržení -  $F_M$ , mez pevnosti v tahu -  $\sigma_M$ , poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu -  $\varepsilon_M$ , deformace na mezi pevnosti v tahu -  $\Delta l_M$  a další.

Pozn. Struktura S8 vykazovala pevnost v tahu převyšující výkon zkušebního zařízení. Vzorky této struktury nebyly do tahových zkoušek zařazeny.

Tab. 16. Nastavené parametry pro tahovou zkoušku

<b>Rychlost</b>	10 [mm·min <sup>-1</sup> ]
<b>Předzatížení</b>	2 [N]
<b>Rychlost předzatížení</b>	5 [mm·min <sup>-1</sup> ]
<b>Měření modulu pružnosti při</b>	0,05 – 0,25 % $\epsilon$
<b>Rychlost při měření modulu pružnosti</b>	1 [mm·min <sup>-1</sup> ]
<b>Tloušťka, šířka vzorku</b>	a,b [mm]



Obr. 28. Zkouška tahem s připojeným extenzometrem



Obr. 29. Zkušební vzorek po tahové zkoušce

## 7.1.1 Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S4 – Etalon

Tab. 17. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L - Etalon

#1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>M</sub>	E <sub>t</sub>	ε <sub>M</sub>	σ <sub>B</sub>	ε <sub>B</sub>	Δl <sub>M</sub>	Δl <sub>B</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,34	10,12	209,51	15083,00	2,00	201,25	2,01	0,40	0,40	13190,00
x	6,24	10,11	211,02	14718,73	2,04	204,25	2,59	0,41	0,52	13303,79
s	0,20	0,03	8,71	2466,08	0,26	14,00	1,50	0,05	0,30	301,87

Tab. 18. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T - Etalon

#2	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>M</sub>	E <sub>t</sub>	ε <sub>M</sub>	σ <sub>B</sub>	ε <sub>B</sub>	Δl <sub>M</sub>	Δl <sub>B</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,34	10,04	198,35	14790,00	2,08	189,72	2,08	0,41	0,42	12723,00
x	6,14	10,04	198,23	15113,03	1,90	194,51	1,89	0,38	0,38	12183,10
s	0,32	0,03	17,86	1017,63	0,29	18,61	0,35	0,06	0,07	833,45

7.1.2 Výsledky tahových zkoušek pro strukturu S4 – H<sub>2</sub>OTab. 19. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L - H<sub>2</sub>O

#5	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>M</sub>	E <sub>t</sub>	ε <sub>M</sub>	σ <sub>B</sub>	ε <sub>B</sub>	Δl <sub>M</sub>	Δl <sub>B</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,25	16,51	188,29	14234,00	1,74	183,86	1,82	0,34	0,36	19618,00
x	6,22	16,56	184,84	14114,38	1,70	181,71	1,74	0,34	0,35	19002,58
s	0,30	0,12	16,42	1167,08	0,17	14,80	0,20	0,03	0,04	1431,40

Tab. 20. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T - H<sub>2</sub>O

#6	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>M</sub>	E <sub>t</sub>	ε <sub>M</sub>	σ <sub>B</sub>	ε <sub>B</sub>	Δl <sub>M</sub>	Δl <sub>B</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,51	13,79	178,59	12852,00	1,75	178,09	1,70	0,35	0,34	0,34
x	6,47	13,83	178,47	13263,71	1,84	177,67	1,84	0,37	0,37	15966,68
s	0,26	0,24	7,93	1074,24	0,33	8,17	0,35	0,07	0,07	831,14

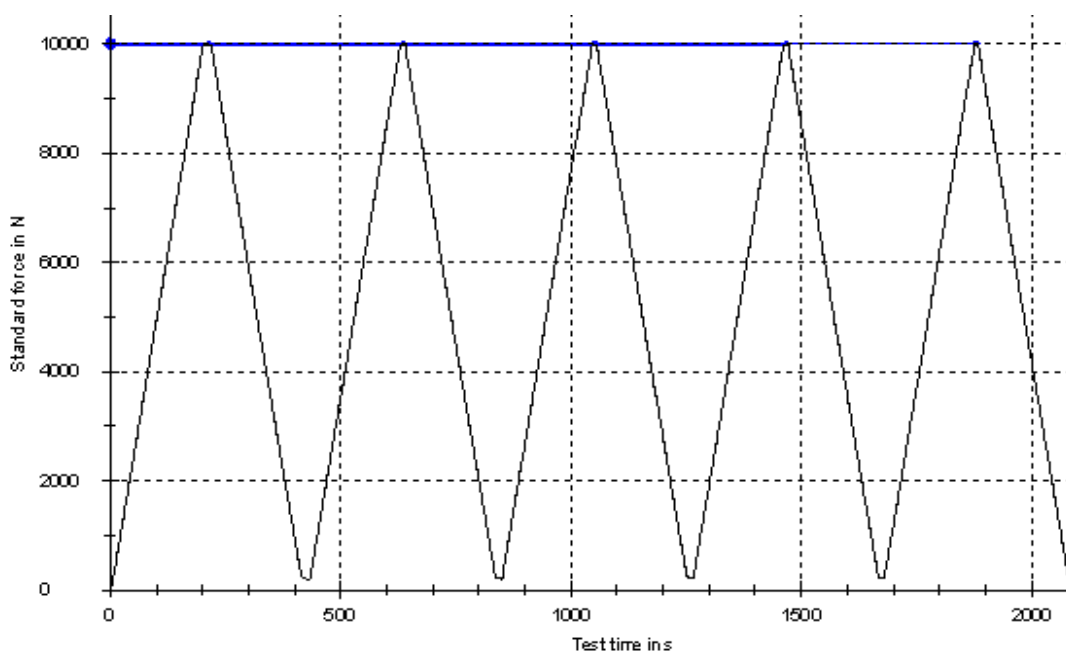
## 7.2 Zkouška cyklickým tahem

Cyklická tahová zkouška byla rovněž provedena na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456 řízeném pomocí počítače. Z naměřených hodnot předcházející statické tahové zkoušky byla zjištěna síla při přetržení -  $F_M$ . Pro cyklování vzorků byl použit program testExert II. U každého vzorku bylo provedeno 5 cyklů se 75 % hodnotou  $F_M$  na jeden cyklus.

Poté byla provedena statická tahová zkouška v programu testExpert V7.11, která probíhala do úplného přetržení zkušebního tělíska. Před spuštěním zkoušky byla pomocí posuvného měřidla změřena u každého vzorku šířka a tloušťka. Zadání těchto parametrů a automatické upnutí extenzometru na vzorek po spuštění zkoušky bylo realizováno u obou programů.

Tab. 21. Nastavené parametry pro cyklickou tahovou zkoušku

<b>Rychlost cyklování</b>	100 [N/s]
<b>Předzatížení</b>	5 [N]
<b>Rychlost předzatížení</b>	10 [mm·min <sup>-1</sup> ]
<b>Měření modulu pružnosti při</b>	0,05 – 0,25 % $\epsilon$
<b>Tloušťka, šířka vzorku</b>	a,b [mm]
<b>Velikost zatížení na jeden cyklus</b>	75 % $F_M$



Obr. 30. Graf namáhání vzorku cyklickým tahem z programu testExpertII

## 7.2.1 Výsledky cyklických tahových zkoušek pro strukturu S4 – Etalon

Tab. 22. Tahové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru L - Etalon

#3	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>M</sub>	E <sub>t</sub>	ε <sub>M</sub>	σ <sub>B</sub>	ε <sub>B</sub>	Δl <sub>M</sub>	Δl <sub>B</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	5,93	9,94	210,75	13909,00	1,77	205,10	1,78	0,35	0,36	12976,00
x	5,88	9,86	218,07	14158,35	1,62	218,07	1,70	0,32	0,34	12596,89
s	0,55	0,29	20,85	1977,90	0,47	20,85	0,55	0,09	0,11	1052,67

Tab. 23. Tahové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T - Etalon

#4	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>M</sub>	E <sub>t</sub>	ε <sub>M</sub>	σ <sub>B</sub>	ε <sub>B</sub>	Δl <sub>M</sub>	Δl <sub>B</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,42	10,09	192,72	11970,00	1,80	184,56	1,37	0,36	0,27	11908,00
x	6,33	10,09	187,21	12212,46	1,72	182,63	1,35	0,34	0,27	11943,88
s	0,20	0,05	10,55	963,30	0,21	11,18	0,44	0,04	0,09	600,53

7.2.2 Výsledky cyklických tahových zkoušek pro strukturu S4 – H<sub>2</sub>OTab. 24. Tahové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru L - H<sub>2</sub>O

#7	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>M</sub>	E <sub>t</sub>	ε <sub>M</sub>	σ <sub>B</sub>	ε <sub>B</sub>	Δl <sub>M</sub>	Δl <sub>B</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,34	16,44	189,85	13210,00	1,66	189,04	1,53	0,33	0,31	20185,00
x	6,38	16,38	191,98	13569,95	1,63	188,40	1,59	0,33	0,32	20069,11
s	0,18	0,25	5,75	2238,62	0,25	6,52	0,25	0,05	0,05	739,65

Tab. 25. Tahové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T - H<sub>2</sub>O

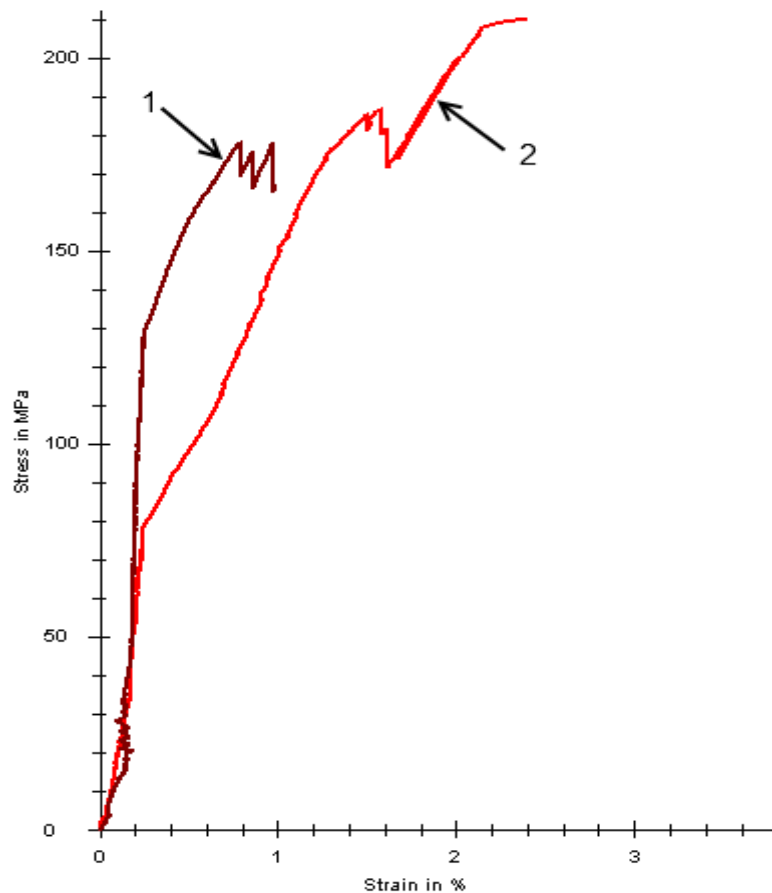
#8	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>M</sub>	E <sub>t</sub>	ε <sub>M</sub>	σ <sub>B</sub>	ε <sub>B</sub>	Δl <sub>M</sub>	Δl <sub>B</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,06	14,10	196,05	13658,00	1,71	191,92	1,73	0,34	0,35	16816,00
x	6,09	14,06	194,62	13020,52	1,73	191,50	1,81	0,35	0,36	16620,49
s	0,31	0,31	16,27	1307,10	0,13	18,68	0,26	0,03	0,05	761,49



### 7.3 Shrnutí výsledků a diskuze k tahovým a cyklickým tahovým zkouškám

Tab. 26. Hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti pro tahové a cyklické tahové zkoušky

			Etalon		Etalon - cykly		H <sub>2</sub> O		H <sub>2</sub> O - cykly	
			E <sub>t</sub> [MPa]	σ <sub>M</sub> [MPa]	E <sub>t</sub> [MPa]	σ <sub>M</sub> [MPa]	E <sub>t</sub> [MPa]	σ <sub>M</sub> [MPa]	E <sub>t</sub> [MPa]	σ <sub>M</sub> [MPa]
S4	L	Med	15083,00	209,51	13909,00	210,75	14234,00	188,29	13210,00	189,85
		x	14718,73	211,02	14158,35	218,07	14114,38	184,84	13569,95	191,98
S4	T	Med	14790,00	198,35	11970,00	192,72	12852,00	178,59	13658,00	196,05
		x	15113,03	198,23	12212,46	187,21	13263,71	178,47	13020,52	194,62



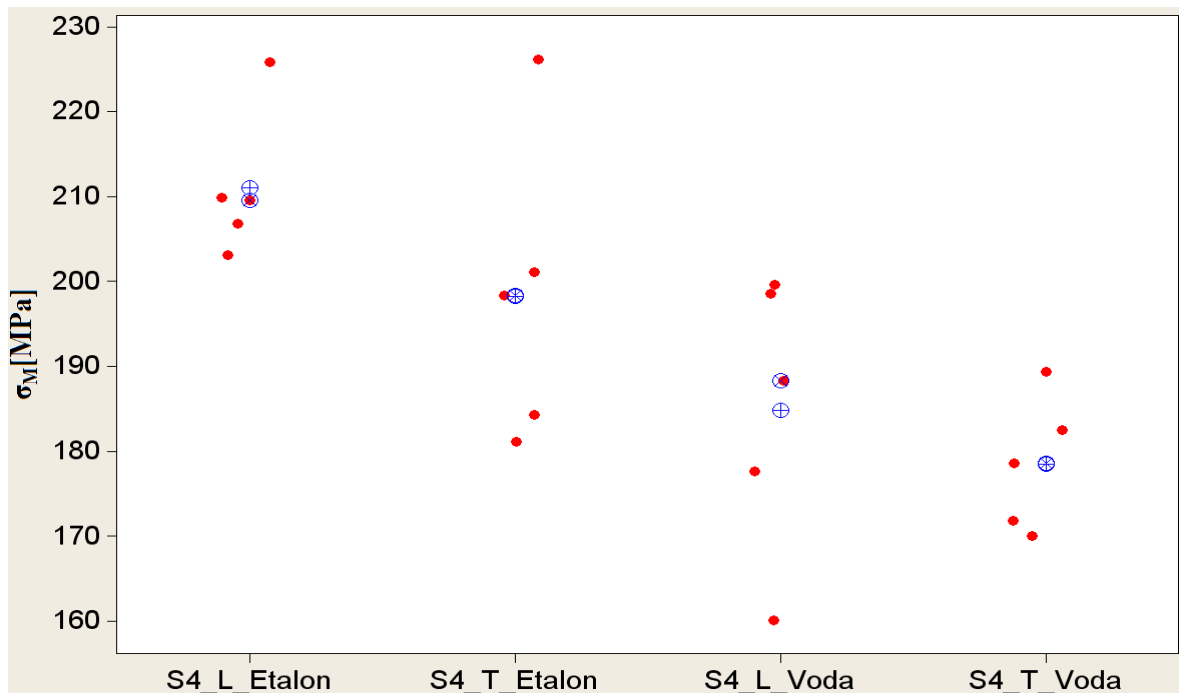
Obr. 31. Tahová křivka pro sérii #3 a #1

- 1) Struktura S4 ve směru kladení L u Etalonu – cyklická tahová zkouška
- 2) Struktura S4 ve směru kladení L u Etalonu – statická tahová zkouška

7.3.1 Shrnutí výsledků a diskuze pro mez pevnosti v tahu



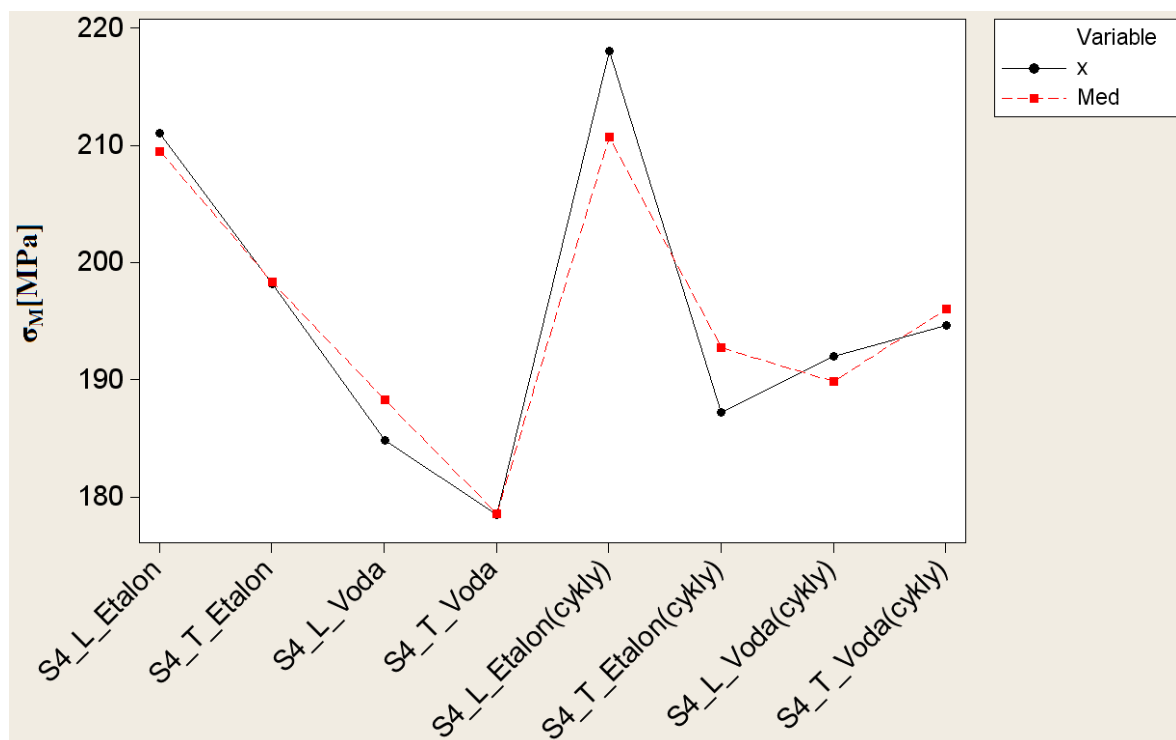
Obr. 32. Srovnání meze pevnosti v tahu u Etalonu a H<sub>2</sub>O



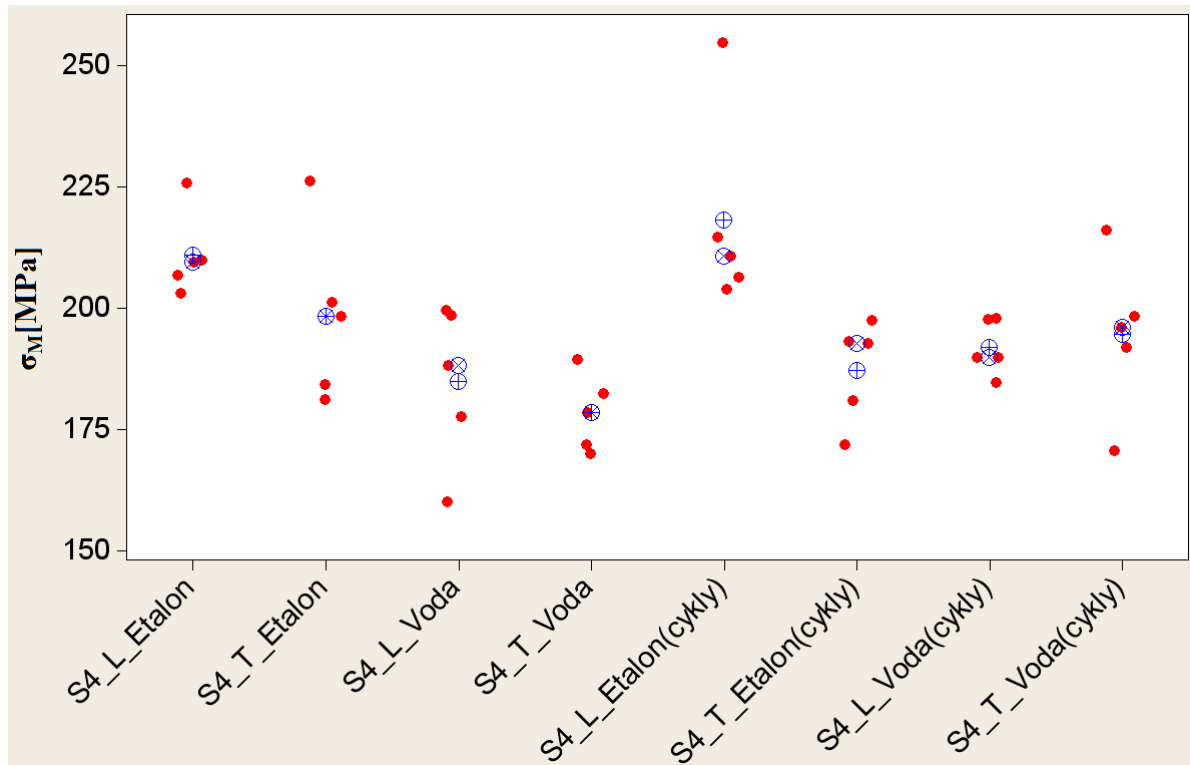
Obr. 33. Srovnání meze pevnosti v tahu u Etalonu a H<sub>2</sub>O pomocí hodnot jednotlivých vzorků

## I. Vliv směru kladení a prostředí

- Mez pevnosti v tahu u vzorků struktury S4 je u Etalonu vyšší, než u vzorků téže struktury exponovaných v H<sub>2</sub>O.
- Nejvyšší hodnoty meze pevnosti v tahu u struktury S4 dosahovaly vzorky ve směru kladení L a to jak u Etalonu tak u H<sub>2</sub>O.
- Nejvyšší hodnoty meze pevnosti v tahu vykazovala struktura S4 u Etalonu ve směru kladení L, naopak nejnižší hodnoty meze pevnosti dosahovala struktura S4 ve směru kladení T u H<sub>2</sub>O.
- Z grafu (Obr. 33.) je patrný značný rozptyl naměřených hodnot v jednotlivých sériích.



Obr. 34. Srovnání meze pevnosti v tahu u Etalonu a H<sub>2</sub>O při statické a cyklické zkoušce

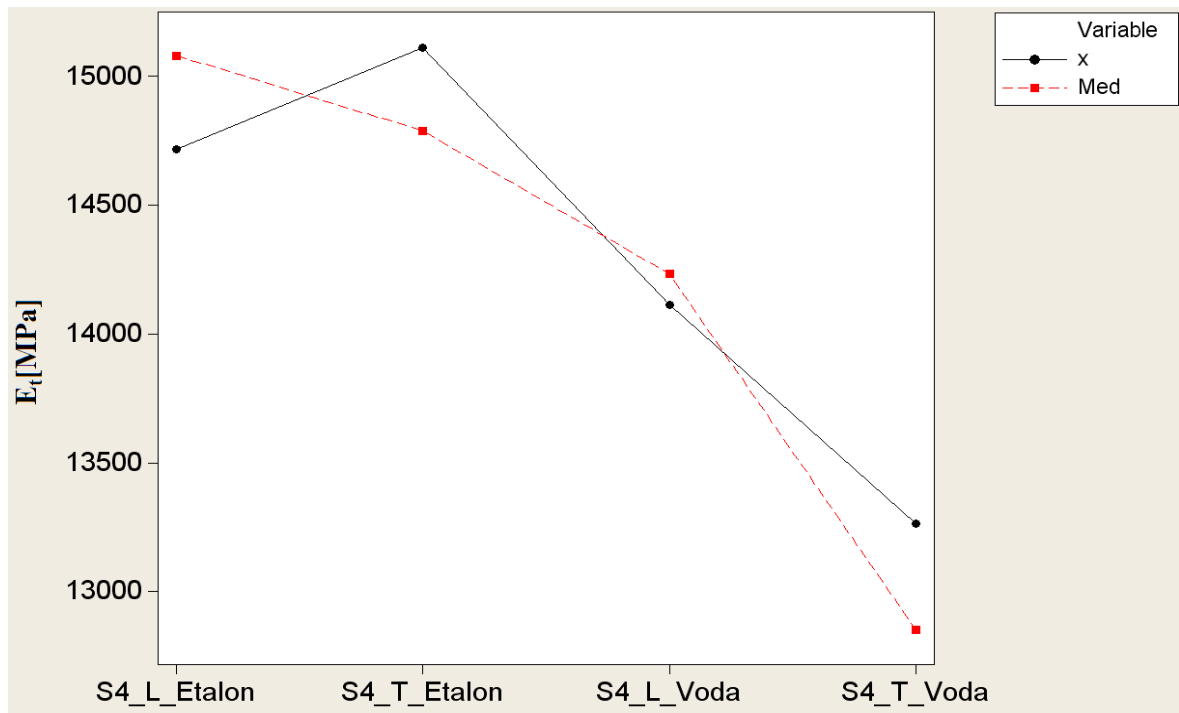
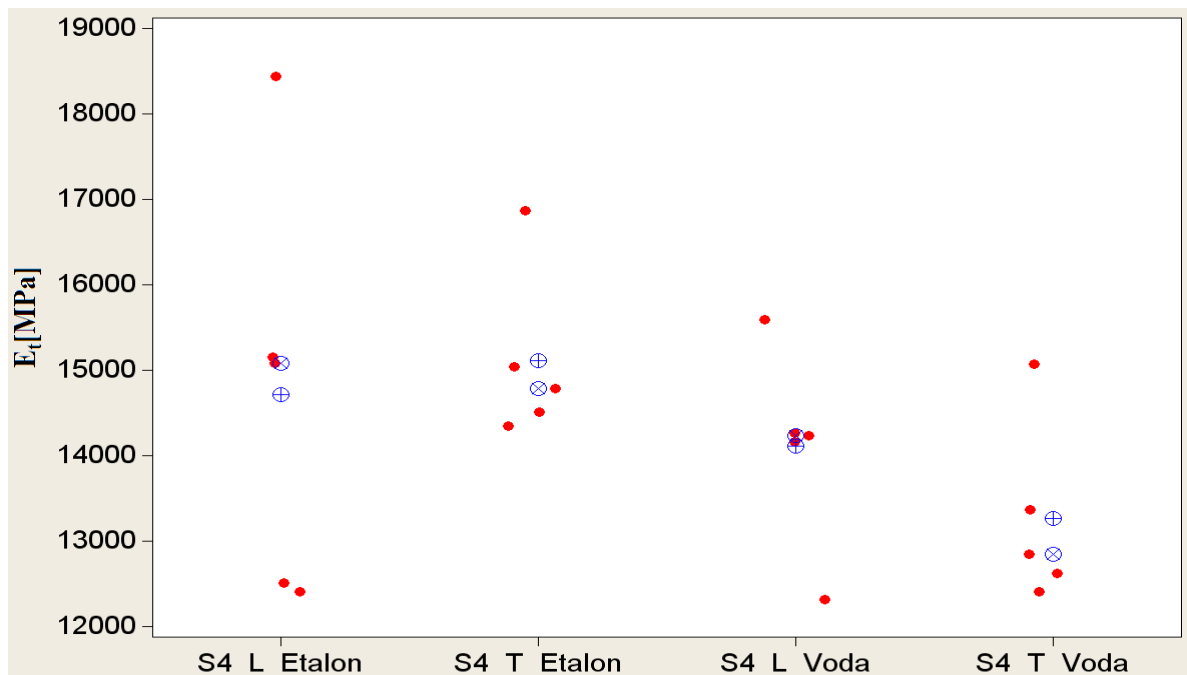


Obr. 35. Srovnání meze pevnosti v tahu u Etalonu a H<sub>2</sub>O při statické a cyklické zkoušce pomocí hodnot jednotlivých vzorků

## II. Vliv cyklického namáhání

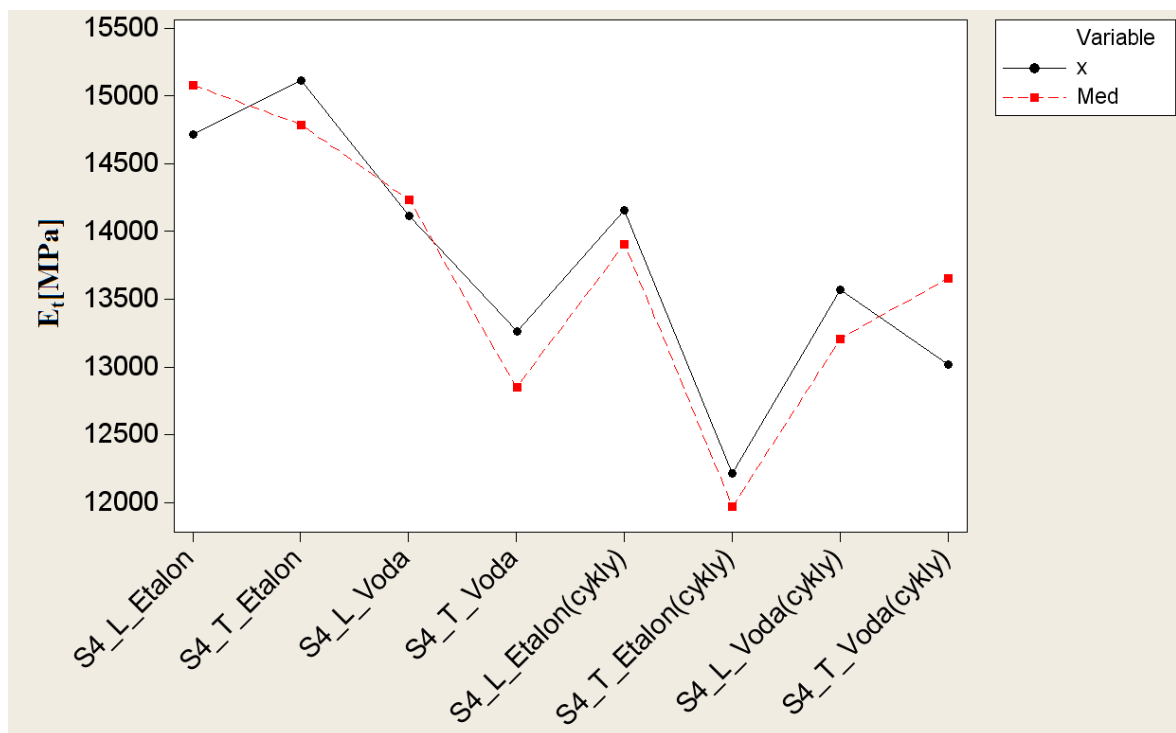
- Na grafu (Obr. 34) lze pozorovat vyšší mez pevnosti u vzorků po cyklickém namáhání při následné statické zkoušce, než u vzorků které byly podrobeny tahové zkoušce bez předchozího cyklování. Výjimku tvoří vzorky struktury S4 u Etalonu ve směru kladení T, který vykazoval po cyklování nižší hodnoty.
- Nejvyšší hodnotu meze pevnosti v tahu vykazovaly vzorky struktury S4 ve směru L u Etalonu po cyklickém namáhání. Nejnižší mez pevnosti byla zjištěna u vzorků těže struktury ve směru T u H<sub>2</sub>O.
- Vzhledem ke značnému rozptylu hodnot při měření na univerzálním zkušebním stroji patrném z grafu (Obr. 35), malému počtu zkušebních vzorků v sériích a nízkému rozdílu průměrů i mediánů nelze jednoznačně určit vliv cyklů na mez pevnosti v tahu.

## 7.3.2 Shrnutí výsledků a diskuze pro modul pružnosti v tahu

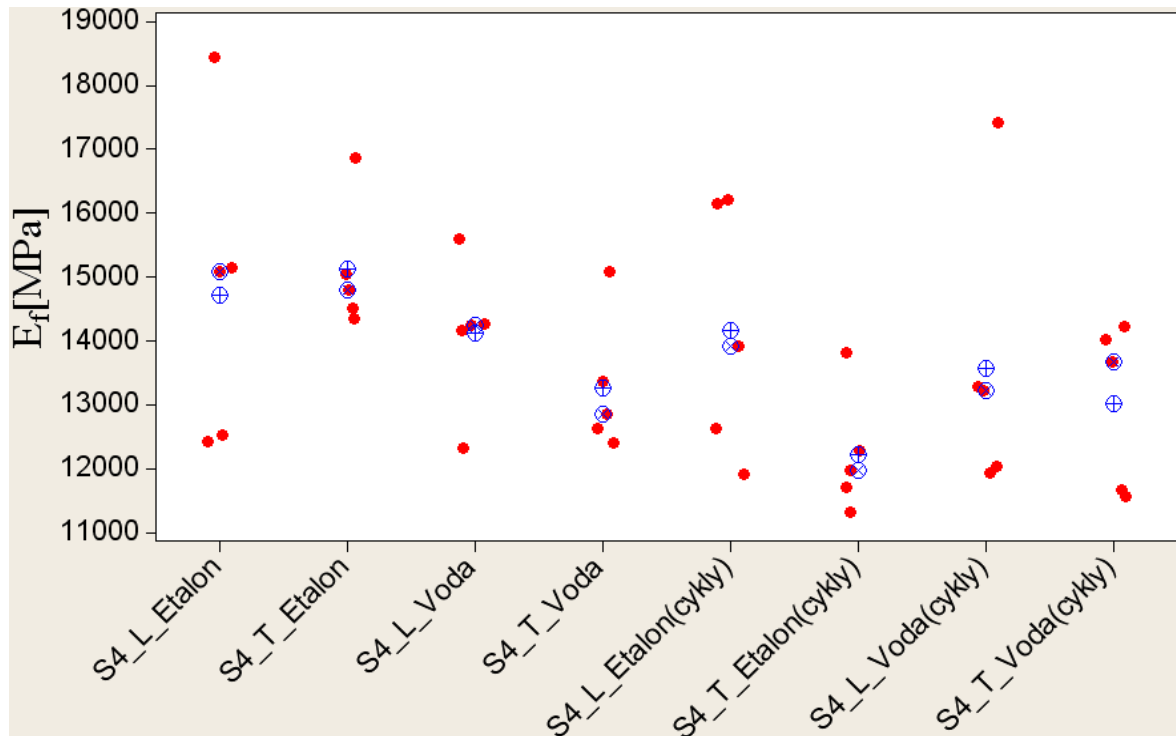
Obr. 36. Srovnání modulu pružnosti v tahu u Etalonu a  $H_2O$ Obr. 37. Srovnání modulu pružnosti v tahu u Etalonu a  $H_2O$  pomocí hodnot jednotlivých vzorků

## I. Vliv směru kladení a prostředí

- Modul pružnosti v tahu u vzorků struktury S4 je u Etalonu vyšší, než u vzorků téže struktury exponovaných v H<sub>2</sub>O.
- Směr kladení L vykazuje u struktury S4 vyšší hodnoty modulu pružnosti než směr T a to v případě Etalonu i H<sub>2</sub>O.
- Nejnižší hodnotu modulu pružnosti vykazovala struktura S4 ve směru kladení T u H<sub>2</sub>O. Nejvyššího modulu pružnosti v tahu dosáhla stejná struktura ve směru kladení L u Etalonu.
- Z grafu (Obr. 37.) je patrný značný rozptyl naměřených hodnot v jednotlivých sériích. Proto v případě rozcházejících se výsledků upřednostňujeme robustnější statistickou veličinu medián.



Obr. 38. Srovnání modulu pružnosti v tahu u Etalonu a H<sub>2</sub>O při statické a cyklické zkoušce



Obr. 39. Srovnání modulu pružnosti v tahu u Etalonu a  $H_2O$  při statické a cyklické zkoušce pomocí hodnot jednotlivých vzorků

## II. Vliv cyklického namáhání

- Na grafu (Obr. 38) lze pozorovat nižší modul pružnosti u vzorků po cyklickém namáhání při následné statické zkoušce, než u vzorků které byly podrobeny tahové zkoušce bez předchozího cyklování. Výjimku tvoří vzorek struktury S4 u  $H_2O$  ve směru kladení T, který vykazoval po cyklování vyšší hodnoty
- Nejvyšší hodnotu meze pevnosti v tahu vykazovaly vzorky struktury S4 ve směru L u Etalonu. Nejnižší mez pevnosti byla zjištěna u vzorků téže struktury ve směru T u Etalonu po cyklickém namáhání.
- Rozptyl hodnot při měření na univerzálním zkušebním stroji je patrný z grafu (Obr. 39). Navzdory malému počtu vzorků v sériích lze určit vliv cyklického namáhání na modul pružnosti. Rozdíl hodnot je v některých případech poměrně značný a všechny výsledky s výjimkou mediánu vzorků struktury S4 u  $H_2O$  ve směru kladení T vykazují stejný trend. Modul pružnosti v tahu po provedených cyklických tahových zkouškách klesá.

## 8 STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ OHYBEM A CYKLICKÝM OHYBEM

Zkouška ohybem se užívá pro hodnocení křehkých materiálů a pro svarové a spájené spoje. Pro houževnaté materiály, u nichž k porušení ohybem nedochází, se zkouška neuplatňuje. Při zkoušce se zkušební tyč uložena na dvou podporách zatěžuje uprostřed plynule rostoucí silou až do porušení. Napětí v průřezu je rozděleno nerovnoměrně, tj. od nulové hodnoty neutrální ose roste do maxima v povrchových vláknech. Zjišťuje se pevnost v ohybu a průhyb tyče, které odpovídají porušení. Zkouška ohybem se zpravidla užívá u šedé litiny, kde se z průhybu tyče usuzuje i na houževnatost [7].

### 8.1 Zkouška ohybem

Ohybová zkouška byla provedena na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456 řízeném pomocí počítače. Vlastnosti sklolaminátových vzorků v ohybu byly stanoveny dle normy ČSN EN ISO 178.

Zkouška byla provedena třibodovým ohybem a Gelcoat vrstva byla ve všech případech na straně dvoubodové podpěry. Vzdálenost podpěr pro vzorky délky 125 mm je 64 mm a u vzorků dvojnásobné délky je 128 mm.

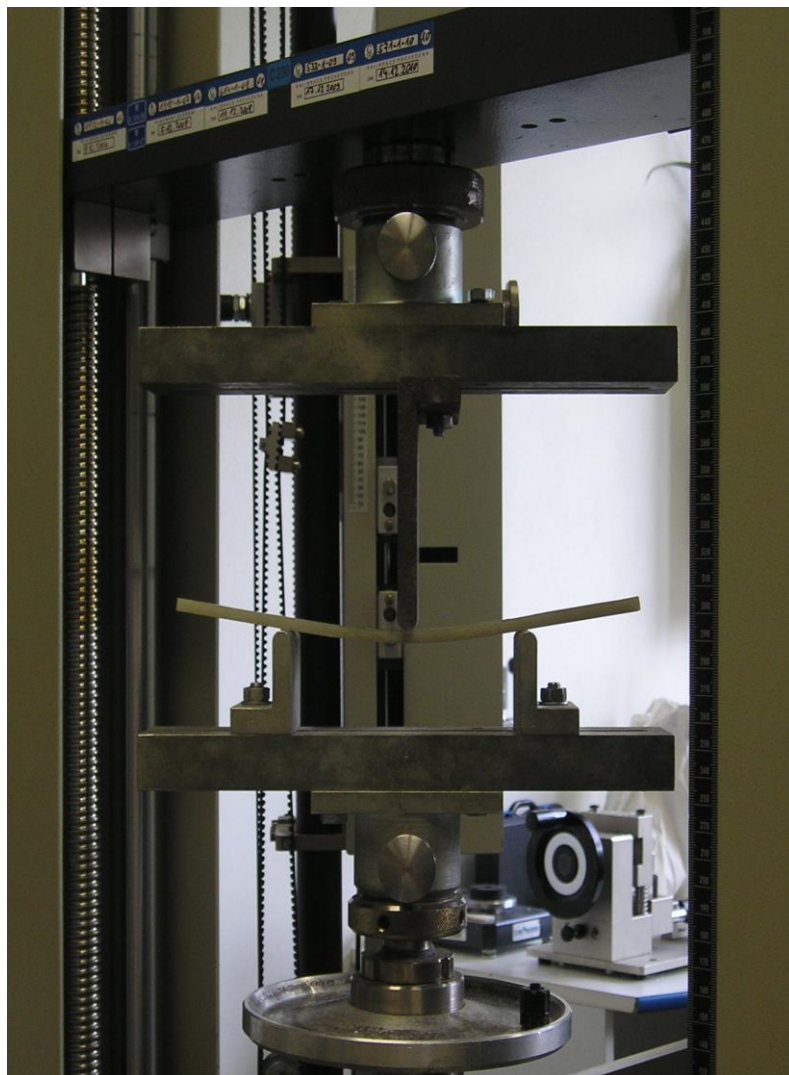
Před spuštěním zkoušky byla pomocí posuvného měřidla změřena u každého vzorku šířka a tloušťka. Tyto parametry byly zadány do programu testExpert V7.11 Zkouška probíhala do úplného zlomení zkušebního tělíska.

V průběhu zkoušky byla sledována celá řada hodnot: modul pružnosti v ohybu –  $E_f$ , síla při přetržení -  $F_M$ , mez pevnosti v ohybu -  $\sigma_{fM}$ , deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu -  $\varepsilon_{fM}$ , deformace na mezi pevnosti v ohybu -  $\Delta y_{fM}$  a další.

Tab. 27. Nastavené parametry pro ohybovou zkoušku

<b>Rychlost</b>	10 [mm·min <sup>-1</sup> ]
<b>Předzatížení</b>	2 [N]
<b>Rychlost předzatížení</b>	5 [mm·min <sup>-1</sup> ]
<b>Měření modulu pružnosti při</b>	0,05 – 0,25 % $\varepsilon$
<b>Vzdálenost podpěr</b>	$L_p$
<b>Tloušťka, šířka vzorku</b>	a,b [mm]





*Obr. 40. Zkouška ohybem*



*Obr. 41. Zkušební vzorek po ohybové zkoušce*

8.1.1 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – Etalon,  $L_p = 128$  mmTab. 28. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T – Etalon,  $L_p=128$  mm

#3	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,27	14,10	270,04	11009,00	3,26	95,42	5,73	15,23	24,51	767,50
x	6,16	14,08	270,31	11066,51	3,32	91,29	5,48	14,71	24,25	752,79
s	0,24	0,10	7,29	678,98	0,27	20,70	1,17	1,01	5,05	45,40

Tab. 29. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L – Etalon,  $L_p=128$  mm

#4	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,00	16,73	288,58	10488,00	3,52	109,20	6,29	16,30	28,90	928,40
x	6,24	16,70	286,32	10906,90	3,63	117,11	6,17	15,90	26,81	969,68
s	0,44	0,09	22,07	1019,33	0,37	35,16	1,58	1,20	5,56	130,71

Tab. 30. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T – Etalon,  $L_p=128$  mm

#1	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,25	15,00	304,40	12066,00	3,57	74,10	5,42	13,50	20,12	1256,60
x	7,33	14,96	287,83	11372,68	3,65	80,25	5,88	13,51	22,06	1219,56
s	0,21	0,35	33,47	1432,69	0,47	22,95	1,85	1,39	7,11	95,93

Tab. 31. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L – Etalon,  $L_p=128$  mm

#2	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,55	15,29	330,03	12759,00	3,40	73,42	6,36	12,28	25,81	1402,20
x	7,48	15,20	325,41	12636,57	3,37	72,84	6,73	12,40	24,69	1430,45
s	0,44	0,26	21,50	764,11	0,23	7,35	1,01	1,09	3,40	183,44

8.1.2 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – Etalon,  $L_p = 64$  mmTab. 32. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T – Etalon,  $L_p=64$  mm

#9	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,20	14,00	290,80	8227,00	4,05	106,60	5,94	4,68	6,62	1738,20
x	6,23	14,09	306,36	8776,31	4,02	92,46	7,38	4,42	8,11	1741,38
s	0,29	0,20	27,87	1030,30	0,31	31,39	2,21	0,46	2,49	150,09

Tab. 33. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L – Etalon,  $L_p=64$  mm

#10	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,26	10,09	305,60	9600,00	3,89	78,80	7,69	4,54	8,82	1128,10
x	6,17	10,01	304,51	8644,61	3,84	86,14	8,42	4,27	9,29	1201,40
s	0,35	0,38	38,34	2308,17	0,46	24,10	1,40	0,61	1,09	142,12

Tab. 34. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T – Etalon,  $L_p=64$  mm

#11	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,63	15,21	337,76	9106,00	4,75	91,97	8,70	4,21	8,26	3134,10
x	7,62	15,21	335,06	8797,20	4,80	90,73	8,63	4,30	7,75	3084,62
s	0,31	0,20	15,01	872,14	0,15	8,78	1,22	0,16	1,17	201,64

Tab. 35. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L – Etalon,  $L_p=64$  mm

#12	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,14	15,28	372,88	9077,00	4,57	107,10	6,95	4,40	6,69	3232,00
x	7,25	15,15	373,77	9161,34	4,61	151,21	7,32	4,35	6,86	3107,00
s	0,24	0,30	18,17	615,14	0,10	125,11	2,02	0,14	1,76	276,08

8.1.3 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – H<sub>2</sub>OTab. 36. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T – H<sub>2</sub>O

#20	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,21	14,31	240,89	9965,00	3,15	97,82	4,14	13,87	19,05	695,50
x	6,21	14,26	239,20	10300,18	3,08	91,61	4,36	13,58	19,18	683,45
s	0,24	0,26	12,52	765,04	0,20	9,52	0,75	0,93	3,28	29,15

Tab. 37. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L – H<sub>2</sub>O

#19	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	5,96	16,56	260,10	10375,00	3,18	96,37	4,23	13,53	19,50	777,50
x	6,12	16,55	248,36	10248,00	3,22	91,65	4,34	14,34	19,34	248,36
s	0,27	0,10	30,18	981,05	0,52	9,08	0,47	2,07	1,91	30,18

Tab. 38. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T – H<sub>2</sub>O

#18	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,27	15,09	254,86	11082,00	2,87	62,92	4,30	10,06	16,18	1092,20
x	7,40	15,10	260,70	11082,93	2,77	66,74	4,17	10,23	15,38	1122,79
s	0,36	0,06	14,51	923,74	0,23	18,15	0,60	0,87	2,08	86,18

Tab. 39. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L – H<sub>2</sub>O

#17	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,32	15,14	267,20	1117,40	2,91	64,57	5,27	10,85	15,15	11783,00
x	7,31	15,13	244,06	9519,30	4,51	64,88	6,51	10,71	16,56	1135,97
s	0,09	0,15	66,75	4607,69	3,59	18,64	4,15	0,24	3,48	82,81

8.1.4 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 40 °CTab. 40. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 40 °C

#28	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	5,92	14,32	269,28	11168,00	2,99	92,96	4,24	14,27	20,58	716,20
x	5,98	14,35	263,23	11148,02	3,21	91,97	4,59	13,98	21,03	704,00
s	0,34	0,17	12,65	534,12	2,90	12,91	0,73	0,96	3,70	60,25

Tab. 41. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 40 °C

#27	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,29	16,69	256,50	10489,00	3,16	93,40	5,56	13,41	24,62	872,60
x	6,45	16,67	244,82	9777,88	3,32	94,46	5,22	13,34	22,27	872,78
s	0,42	0,12	39,35	1583,27	2,97	26,18	0,67	0,98	3,96	54,32

Tab. 42. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 40 °C

#26	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,40	15,31	254,26	11155,00	3,02	56,18	5,77	10,72	21,30	1185,40
x	7,56	15,30	261,52	10984,97	2,98	58,57	6,06	11,93	21,78	1188,93
s	0,53	0,07	15,06	942,11	0,10	4,11	0,97	9,73	2,08	113,63

Tab. 43. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 40 °C

#25	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,15	15,42	290,74	12011,00	2,98	57,63	4,97	10,49	17,39	1270,70
x	7,41	15,33	292,11	11847,06	2,98	67,35	4,97	11,01	18,35	1283,27
s	0,43	0,30	10,96	664,64	0,19	16,37	0,94	0,89	3,69	142,46

8.1.5 Výsledky ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 21 °CTab. 44. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 21 °C

#34	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,28	13,98	261,21	8491,00	3,28	80,77	4,06	14,21	18,38	743,50
x	6,34	14,03	258,14	8543,12	3,23	82,39	4,36	13,96	18,81	758,26
s	0,36	0,17	12,95	504,40	0,33	9,76	0,56	1,58	2,24	71,47

Tab. 45. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 21 °C

#33	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,24	16,56	261,34	8466,00	3,41	96,64	5,97	14,91	26,56	867,60
x	6,25	16,68	258,94	8345,42	3,44	98,19	5,62	15,03	24,57	879,86
s	0,15	0,27	11,08	475,86	0,13	19,24	0,77	0,56	3,34	70,72

Tab. 46. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 21 °C

#32	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,46	15,15	261,93	8064,00	3,33	57,09	4,82	12,07	17,75	1228,60
x	7,56	15,22	264,80	8082,07	3,24	60,21	4,88	11,73	17,65	1199,56
s	0,42	0,29	18,13	1037,81	0,19	10,45	0,39	0,70	1,08	130,42

Tab. 47. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 21 °C

#31	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,43	15,43	292,32	8210,40	3,39	58,83	4,99	11,94	18,07	1251,40
x	7,45	15,24	287,93	8263,85	3,29	66,80	4,78	12,09	17,51	1269,70
s	0,28	0,32	7,33	121,15	0,28	15,41	0,60	1,12	1,93	114,97

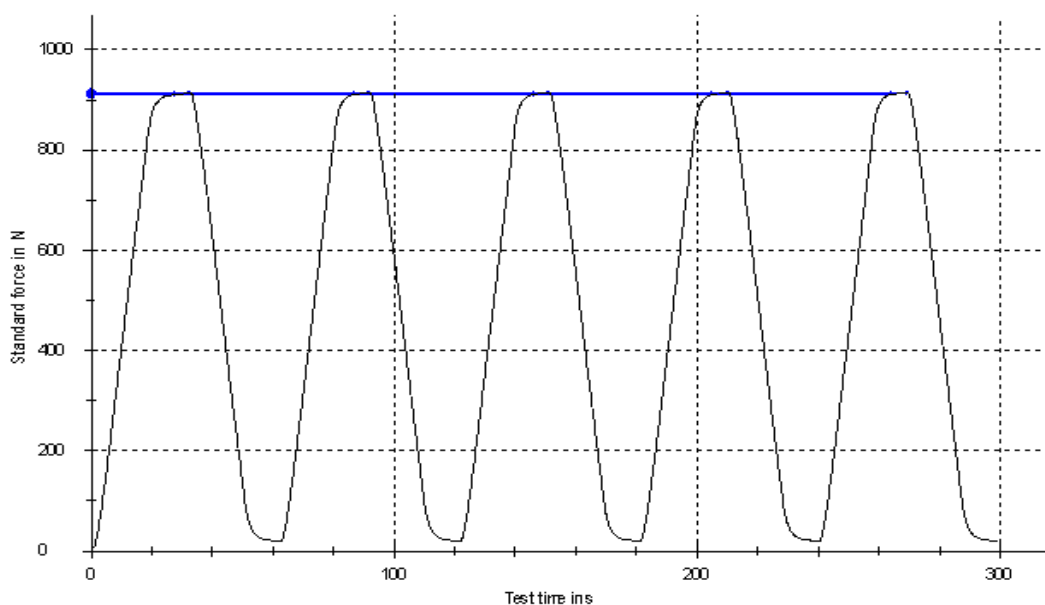
## 8.2 Zkouška cyklickým ohybem

Cyklická ohybová zkouška byla rovněž provedena na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456 řízeném pomocí počítače. Z naměřených hodnot předcházející statické ohybové zkoušky byla zjištěna síla při přelomení -  $F_M$ . Pro cyklování vzorků byl použit program testExpert II. U každého vzorku bylo provedeno 5 cyklů se 75 % hodnotou  $F_M$  na jeden cyklus.

Poté byla provedena statická ohybová zkouška v programu testExpert V7.11, která probíhala do úplného přelomení zkušebního tělíska. Před spuštěním zkoušky byla pomocí posuvného měřidla změřena u každého vzorku šířka a tloušťka. Zadání těchto parametrů a nastavení příslušné vzdálenosti podpěr bylo realizováno u obou programů.

Tab. 48. Nastavené parametry pro cyklickou ohybovou zkoušku

<b>Rychlost</b>	50 [N/s]
<b>Předzatížení</b>	5 [N]
<b>Rychlost předzatížení</b>	10 [mm·min <sup>-1</sup> ]
<b>Měření modulu pružnosti při</b>	0,05 – 0,25 % $\varepsilon$
<b>Vzdálenost podpěr</b>	$L_p$
<b>Tloušťka, šířka vzorku</b>	a,b [mm]
<b>Velikost zatížení na jeden cyklus</b>	75 % $F_M$



Obr. 42. Graf namáhání vzorku cyklickým ohybem z programu testExpertII

## 8.2.1 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – Etalon,

$$L_p = 128 \text{ mm}$$

Tab. 49. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T – Etalon,  $L_p=128 \text{ mm}$ 

#7	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,07	14,11	278,30	10155,00	3,23	94,43	5,43	14,54	24,02	725,50
x	6,23	14,13	256,80	10157,27	3,32	85,21	5,25	14,59	22,93	726,63
s	0,34	0,19	31,94	945,27	0,19	21,67	0,81	0,77	2,57	36,83

Tab. 50. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru L – Etalon,  $L_p=128 \text{ mm}$ 

#8	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,27	16,70	275,52	9316,00	3,69	85,45	6,56	16,25	28,23	921,20
x	6,28	16,67	274,89	9557,30	3,73	88,24	6,49	16,19	28,20	941,40
s	0,16	0,23	14,95	628,09	0,44	20,19	1,01	1,66	4,02	85,03

Tab. 51. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S8 ve směru T – Etalon,  $L_p=128 \text{ mm}$ 

#5	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,78	15,27	287,12	10758,00	3,41	62,54	5,95	11,84	21,43	1334,90
x	7,68	15,17	291,13	10849,12	3,45	66,68	6,09	12,28	21,75	1351,64
s	0,42	0,41	17,42	850,40	0,33	11,59	0,96	1,09	4,03	71,32

Tab. 52. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S8 ve směru L – Etalon,  $L_p=128 \text{ mm}$ 

#6	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,60	15,03	321,08	11725,00	3,06	75,16	6,38	10,92	23,44	1349,30
x	7,44	15,03	316,41	11841,33	3,16	75,02	6,39	11,59	23,40	1371,89
s	0,28	0,21	15,17	736,40	0,28	7,06	1,24	0,99	4,05	101,52



## 8.2.2 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – Etalon,

$$L_p = 64 \text{ mm}$$

Tab. 53. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T – Etalon,  $L_p=64 \text{ mm}$ 

#13	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
<b>n = 5</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>MPa</b>	<b>MPa</b>	<b>%</b>	<b>MPa</b>	<b>%</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N</b>
<b>Med</b>	6,38	14,06	306,19	7943,00	3,53	142,70	5,90	4,02	6,33	1741,50
<b>x</b>	6,26	14,05	297,91	8233,17	3,81	143,79	5,94	4,15	6,48	1709,01
<b>s</b>	0,26	0,09	17,99	996,48	0,53	28,02	0,48	0,49	0,41	179,78

Tab. 54. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru L – Etalon,  $L_p=64 \text{ mm}$ 

#14	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
<b>n = 5</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>MPa</b>	<b>MPa</b>	<b>%</b>	<b>MPa</b>	<b>%</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N</b>
<b>Med</b>	6,33	16,53	321,99	9012,00	4,45	82,00	7,17	4,87	7,71	2168,70
<b>x</b>	6,26	16,50	333,68	8755,12	4,53	108,31	6,90	4,93	7,51	2246,31
<b>s</b>	0,23	0,16	21,61	959,36	0,44	44,52	1,00	0,41	1,00	120,49

Tab. 55. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S8 ve směru T – Etalon,  $L_p=64 \text{ mm}$ 

#15	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
<b>n = 5</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>MPa</b>	<b>MPa</b>	<b>%</b>	<b>MPa</b>	<b>%</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N</b>
<b>Med</b>	7,59	14,99	335,91	8354,00	4,36	89,85	7,04	3,96	6,55	2999,50
<b>x</b>	7,57	15,06	331,10	8191,58	4,39	84,23	7,39	3,96	6,66	2977,57
<b>s</b>	0,16	0,17	12,19	1039,24	0,42	12,22	0,75	0,34	0,68	143,52

Tab. 56. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S8 ve směru L – Etalon,  $L_p=64 \text{ mm}$ 

#16	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{fM}$	$E_f$	$\varepsilon_{fM}$	$\sigma_{fB}$	$\varepsilon_{fB}$	$\Delta y_{fM}$	$\Delta y_{fB}$	$F_M$
<b>n = 5</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>MPa</b>	<b>MPa</b>	<b>%</b>	<b>MPa</b>	<b>%</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N</b>
<b>Med</b>	7,17	15,17	340,45	8530,00	3,78	72,40	7,38	3,63	6,85	2770,20
<b>x</b>	7,25	15,14	343,53	8678,70	3,85	93,34	6,91	3,63	6,52	2845,15
<b>s</b>	0,14	0,16	11,87	642,14	0,13	51,47	1,29	0,17	1,26	163,27

8.2.3 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 a S8 – H<sub>2</sub>OTab. 57. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T – H<sub>2</sub>O

#24	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,65	14,16	220,45	7166,00	3,02	74,31	3,90	13,03	16,03	711,50
x	6,44	14,26	226,00	7515,69	3,08	79,52	3,80	13,08	16,08	694,57
s	0,30	0,27	12,95	622,28	0,15	11,50	0,38	0,46	0,94	34,64

Tab. 58. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru L – H<sub>2</sub>O

#23	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,74	16,51	255,00	8093,00	3,22	75,20	4,35	13,91	17,40	974,70
x	6,85	16,10	257,12	7911,40	3,06	74,27	4,41	12,33	17,67	1011,86
s	0,50	0,64	8,92	903,02	0,43	24,74	0,62	2,43	3,06	105,39

Tab. 59. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S8 ve směru T – H<sub>2</sub>O

#22	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,33	15,20	252,54	7598,00	3,16	120,60	4,29	11,02	16,12	1136,20
x	7,47	15,22	261,11	7936,08	3,06	101,24	4,45	11,17	16,26	1155,97
s	0,32	0,10	22,13	591,36	0,20	39,49	0,34	0,62	1,02	116,45

Tab. 60. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S8 ve směru L – H<sub>2</sub>O

#21	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	7,49	15,03	272,32	8346,70	2,90	59,52	4,06	10,90	15,07	1197,70
x	7,47	14,96	274,23	8350,66	2,92	65,21	4,08	10,71	14,91	1191,72
s	0,32	0,31	17,91	214,84	0,16	10,83	0,59	0,69	1,91	117,11

8.2.4 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 – 40% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 40°CTab. 61. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 40 °C

#29	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,43	14,36	234,87	9378,00	3,09	88,90	4,56	12,97	19,36	731,40
x	6,34	14,20	239,87	9891,72	3,08	84,89	4,77	13,24	20,69	709,52
s	0,40	0,37	16,60	1063,42	0,34	24,57	0,53	0,87	3,40	49,23

Tab. 62. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru L – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 40 °C

#30	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,52	16,32	268,08	9965,00	3,36	106,18	5,84	14,07	24,74	968,81
x	6,60	16,47	260,48	9827,52	3,27	104,37	5,77	13,59	23,92	971,11
s	0,23	0,35	11,70	480,85	0,22	8,40	0,44	1,34	2,20	8,09

8.2.5 Výsledky cyklických ohybových zkoušek pro strukturu S4 – 40% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 21°CTab. 63. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 21 °C

#36	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,34	14,17	255,96	8064,00	3,17	84,00	4,09	13,67	17,20	727,80
x	6,28	14,19	257,71	7919,61	3,33	94,96	4,54	14,47	19,74	749,71
s	0,21	0,29	17,50	497,07	0,39	18,36	0,92	1,66	3,93	58,23

Tab. 64. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 21 °C

#35	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>fM</sub>	E <sub>f</sub>	ε <sub>fM</sub>	σ <sub>fB</sub>	ε <sub>fB</sub>	Δy <sub>fM</sub>	Δy <sub>fB</sub>	F <sub>M</sub>
n = 5	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	N
Med	6,40	16,66	273,95	8244,00	3,43	95,16	5,87	15,08	24,93	945,80
x	6,38	16,64	270,91	8136,09	3,43	90,64	5,41	14,67	23,20	957,56
s	0,15	0,08	13,95	244,87	0,26	10,09	0,94	1,23	4,32	73,11

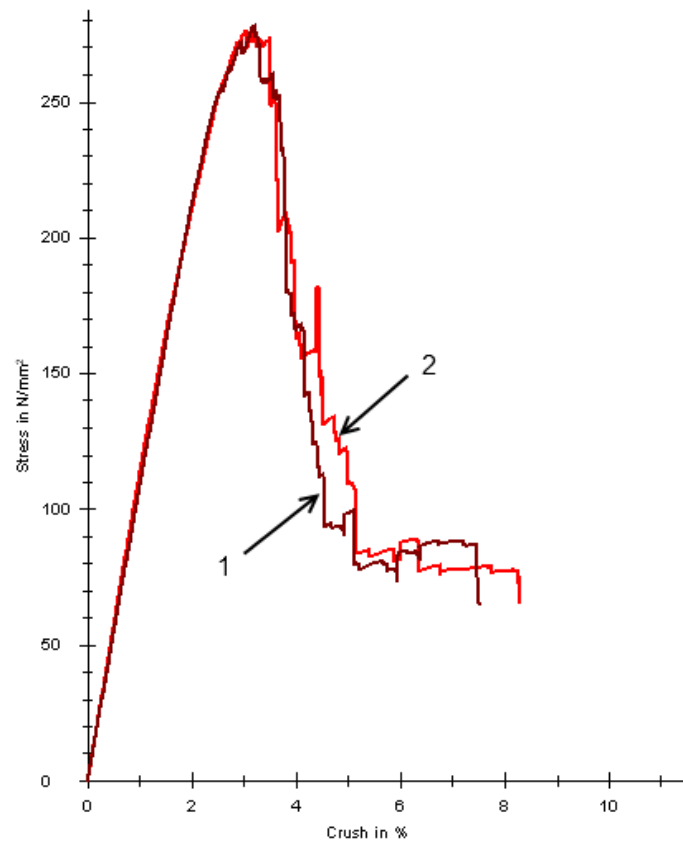
### 8.3 Shrnutí výsledků a diskuze k ohybovým a cyklickým ohybovým zkouškám

Tab. 65. Hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti pro ohybové zkoušky

		4				8			
		L		T		L		T	
		$E_f$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]
Etalon, $L_p=128\text{mm}$	Med	10488,00	288,58	11009,00	270,04	12759,00	330,03	12066,00	304,40
	x	10906,90	286,32	11066,51	270,31	12636,57	325,41	11372,68	287,83
Etalon, $L_p=64\text{mm}$	Med	9600,00	305,60	8227,00	290,80	9077,00	372,88	9106,00	337,76
	x	8644,61	304,51	8776,31	306,36	9161,34	373,77	8797,20	335,06
H <sub>2</sub> O	Med	10375,00	260,10	9965,00	240,89	1117,40	267,20	11082,00	254,86
	x	10248,00	248,36	10300,18	239,20	9519,30	244,06	11082,93	260,70
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 40%,40°C	Med	10489,00	256,50	11168,00	269,28	12011,00	290,74	11155,00	254,26
	x	9777,88	244,82	11148,02	263,23	11847,06	292,11	10984,97	261,52
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 40%,21°C	Med	8466,00	261,34	8491,00	261,21	8210,40	292,32	8064,00	261,93
	x	8345,42	258,94	8543,12	258,14	8263,85	287,93	8082,07	264,80

Tab. 66. Hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti pro cyklické ohybové zkoušky

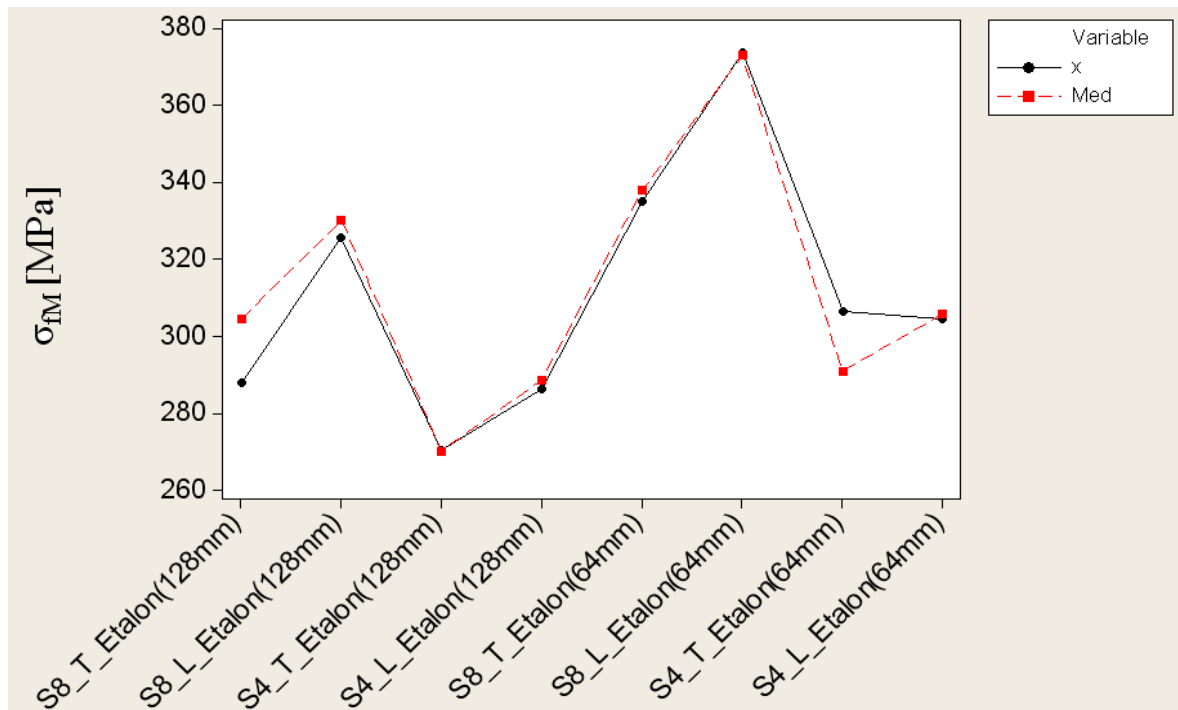
		4				8			
		L		T		L		T	
		$E_f$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]
Etalon, $L_p=128\text{mm}$	Med	9316,00	275,52	10155,00	278,30	11725,00	321,08	10758,00	287,12
	x	9557,30	274,89	10157,27	256,80	11841,33	316,41	10849,12	291,13
Etalon, $L_p=64\text{mm}$	Med	9012,00	321,99	7943,00	306,19	8530,00	340,45	8354,00	335,91
	x	8755,12	333,68	8233,17	297,91	8678,70	343,53	8191,58	331,10
H <sub>2</sub> O	Med	8093,00	255,00	7166,00	220,45	8346,70	272,32	7598,00	252,54
	x	7911,40	257,12	7515,69	226,00	8350,66	274,23	7936,08	261,11
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 40%,40°C	Med	9965,00	268,08	9378,00	234,87	-	-	-	-
	x	9827,52	260,48	9891,72	239,87	-	-	-	-
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 40%,21°C	Med	8244,00	273,95	8064,00	255,96	-	-	-	-
	x	8136,09	270,91	7919,61	257,71	-	-	-	-



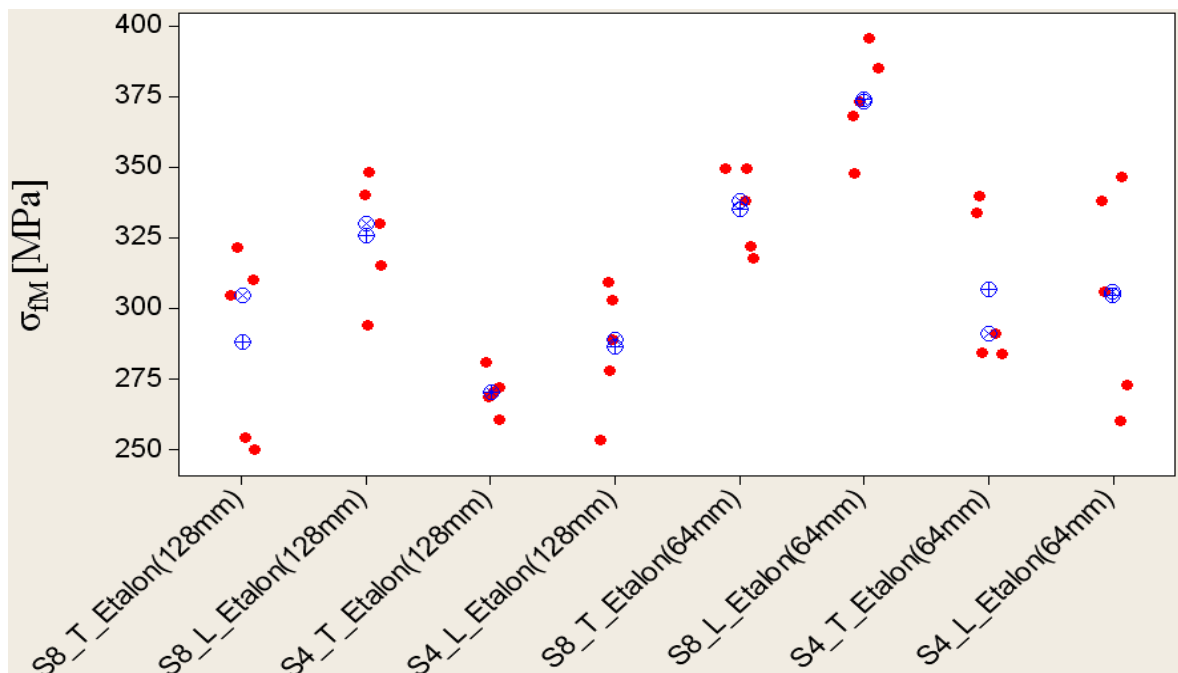
Obr. 43. Tahová křivka pro sérii #5 a #1

1) Struktura S8 ve směru kladení T u Etalonu – cyklická ohybová zkouška 2) Struktura S8 ve směru kladení T u Etalonu – statická ohybová zkouška

8.3.1 Shrnutí výsledků a diskuze pro mez pevnosti v ohybu



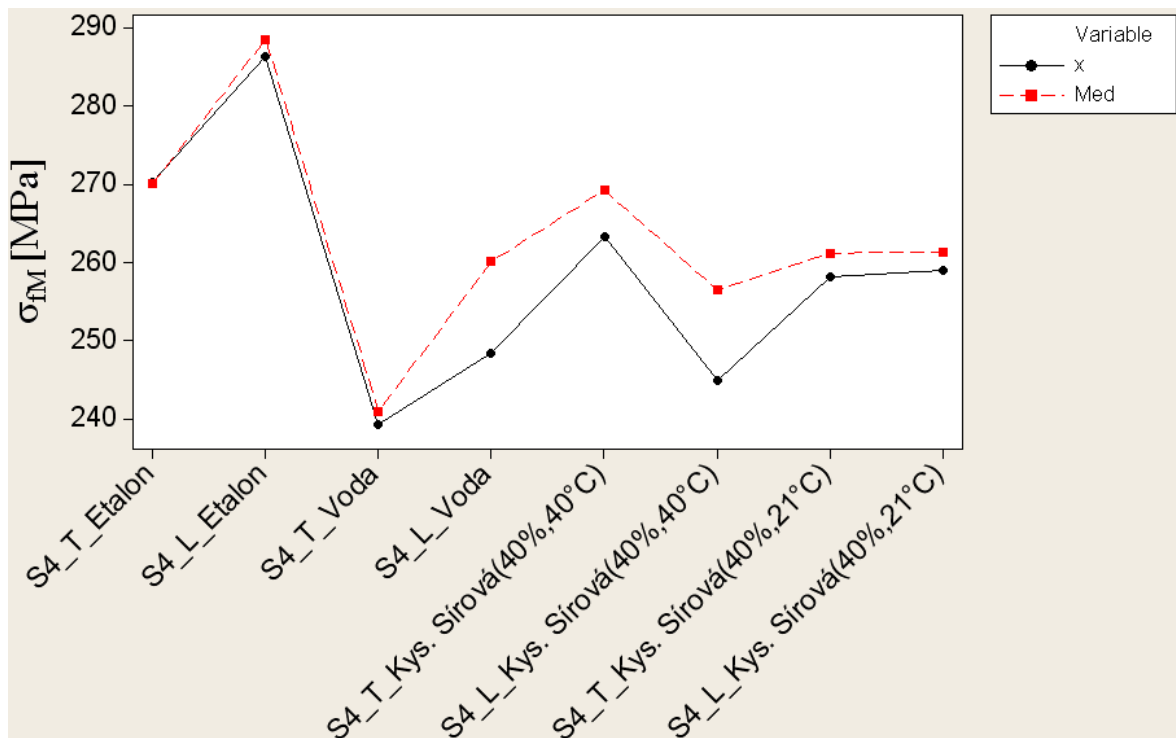
Obr. 44. Srovnání meze pevnosti v ohybu u Etalonu na délce vzorku



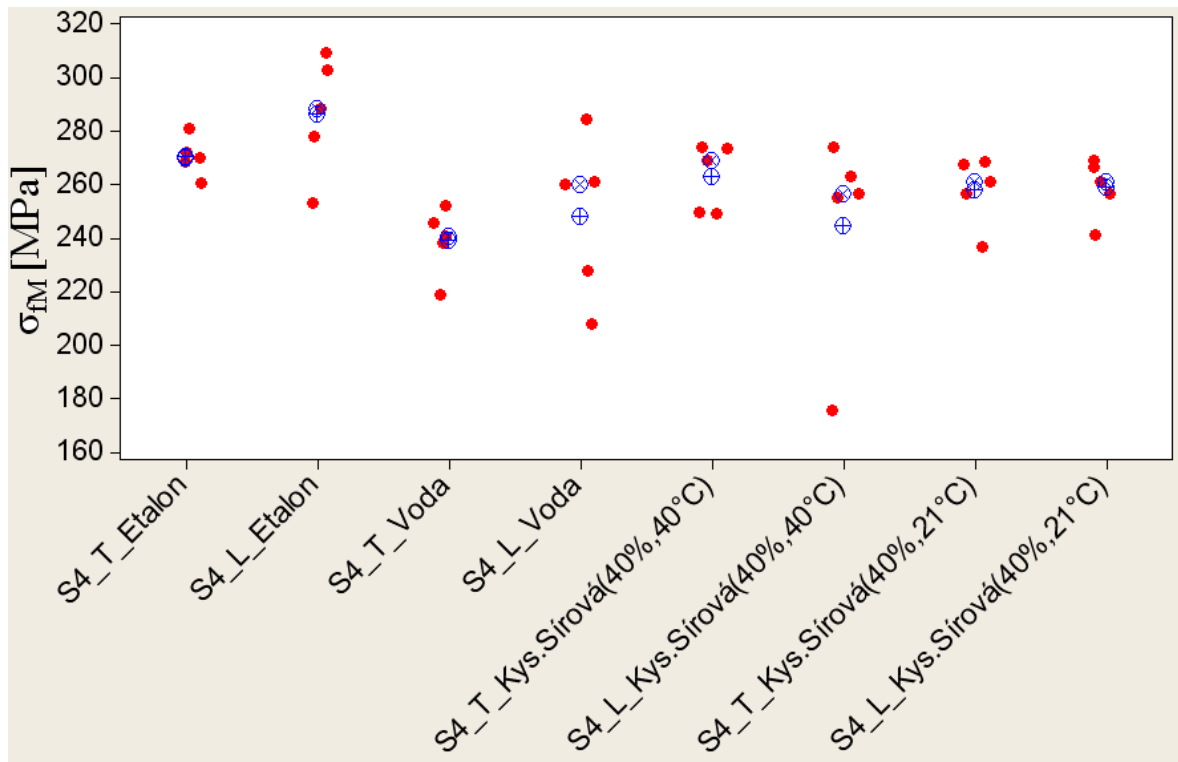
Obr. 45. Srovnání meze pevnosti v ohybu u Etalonu, pomocí hodnot jednotlivých vzorků na jejich délce

## I. Vliv délky vzorků

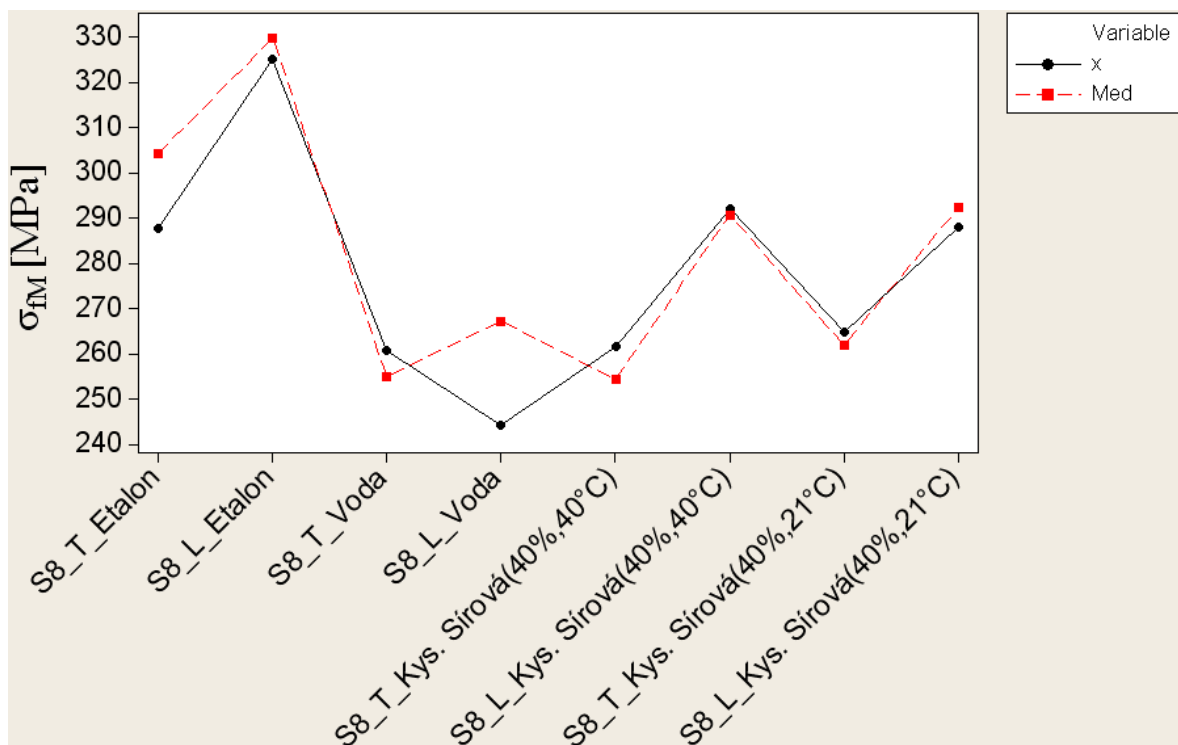
- Při srovnání meze pevnosti v ohybu u vzorků s různou vzdáleností podpěr, byla naměřena největší pevnost u délky podpěr 64 mm.
- Je to způsobeno tím, že u krátkých vzorků působí větší vliv smykových napětí, tím pádem se zvyšuje i mez pevnosti.
- Největší meze pevnosti v ohybu dosáhly vzorky struktury S8 ve směru kladení L při délce podpěr 64mm. Nejmenší mez pevnosti naopak vykazovaly vzorky struktury S4 ve směru kladení T při délce podpěr 128 mm.
- Mez pevnosti v ohybu klesá s rostoucí délkou vzorků.



Obr. 46. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S4

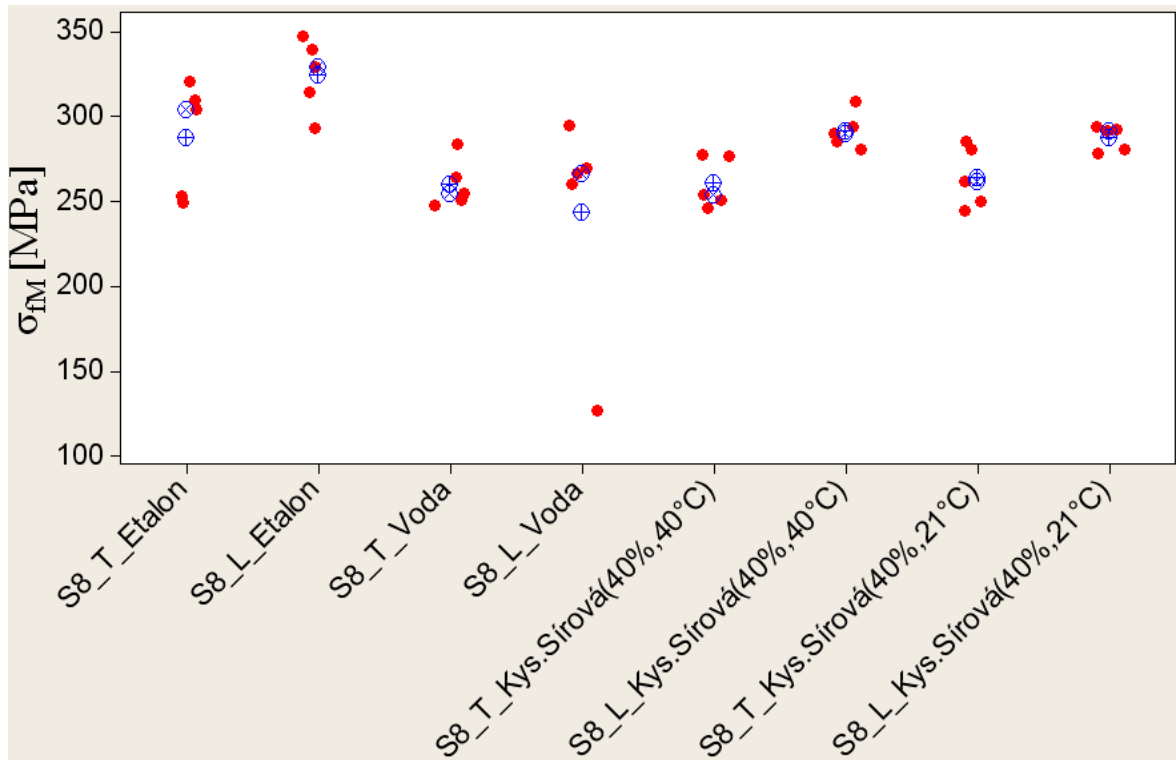


Obr. 47. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S4 pomocí hodnot jednotlivých vzorků

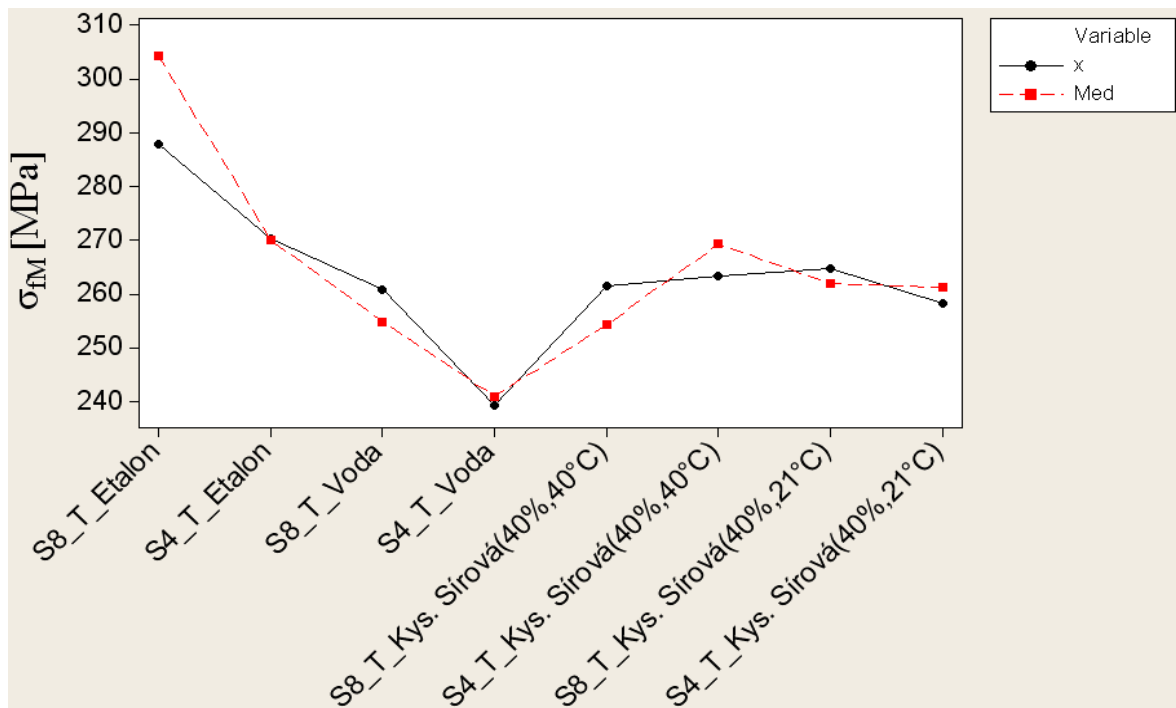


Obr. 48. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8

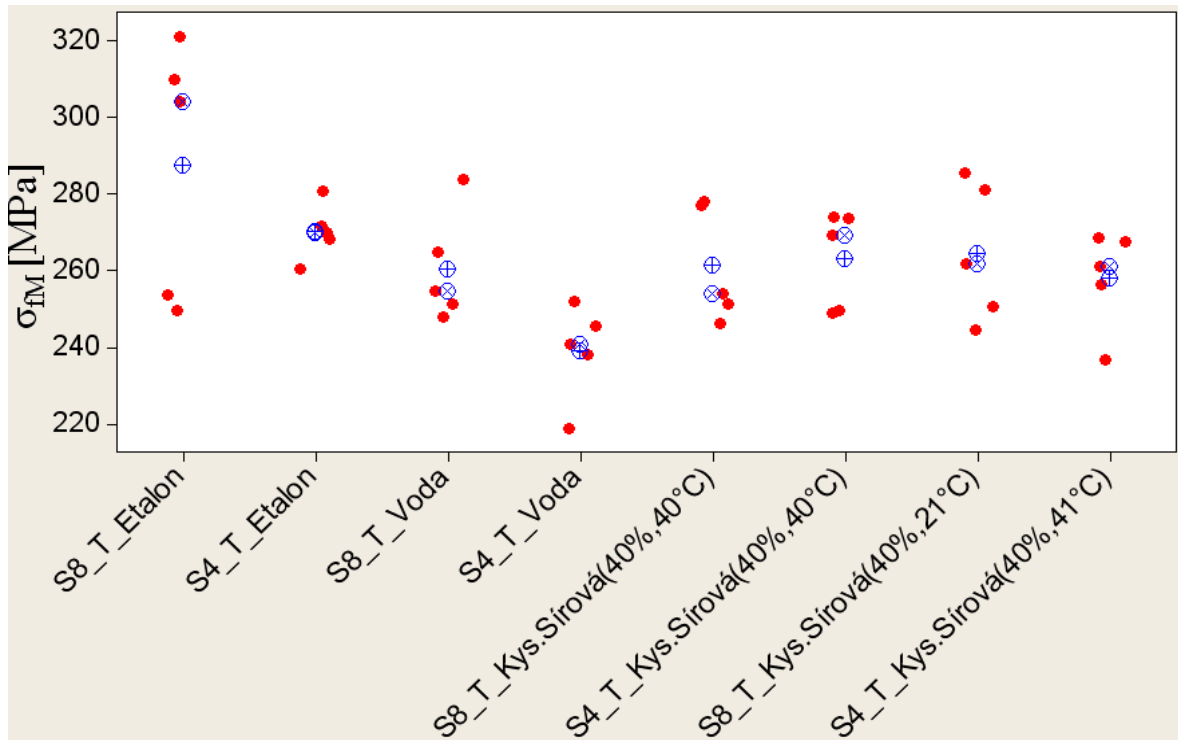




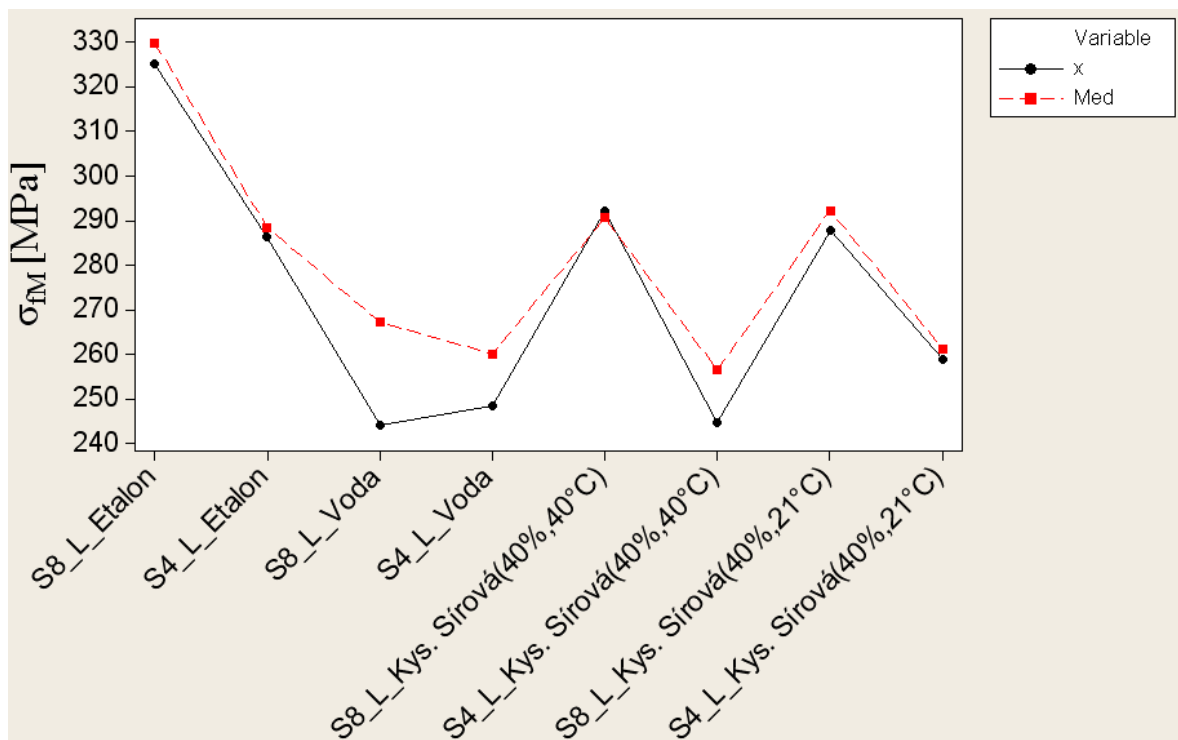
Obr. 49. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 pomocí hodnot jednotlivých vzorků



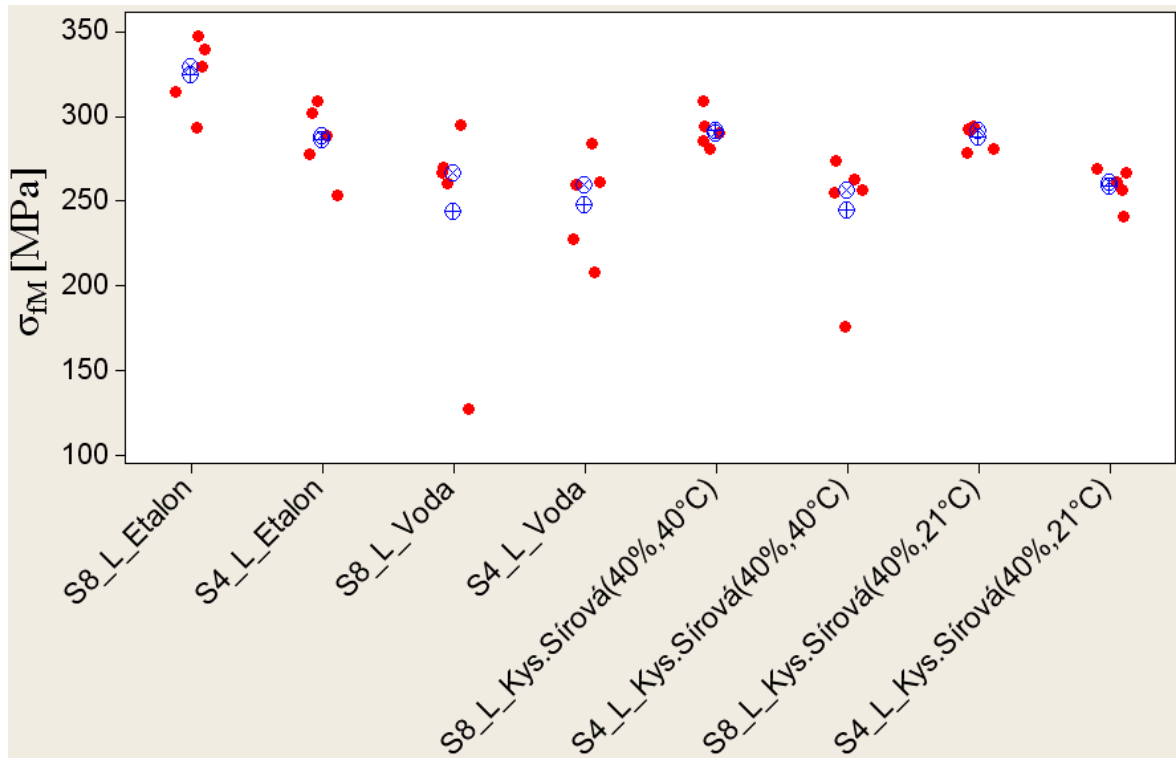
Obr. 50. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru T



Obr. 51. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru T pomocí hodnot jednotlivých vzorků



Obr. 52. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru L

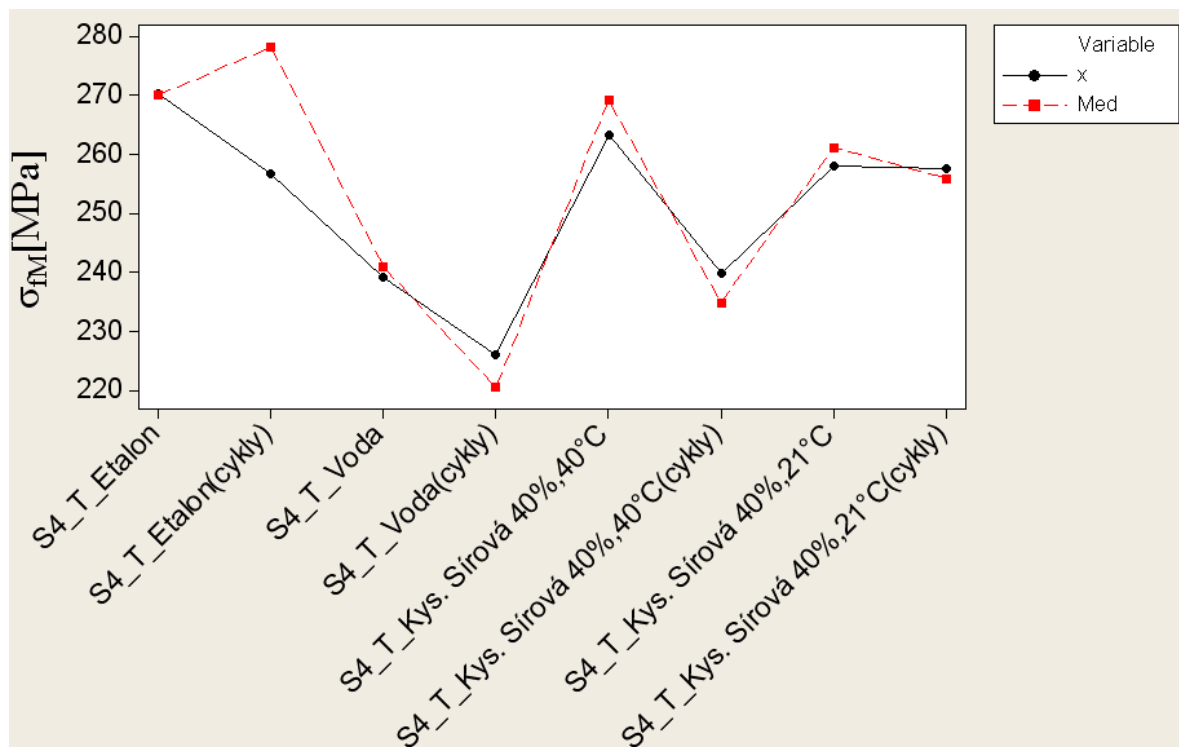


Obr. 53. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru L pomocí hodnot jednotlivých vzorků

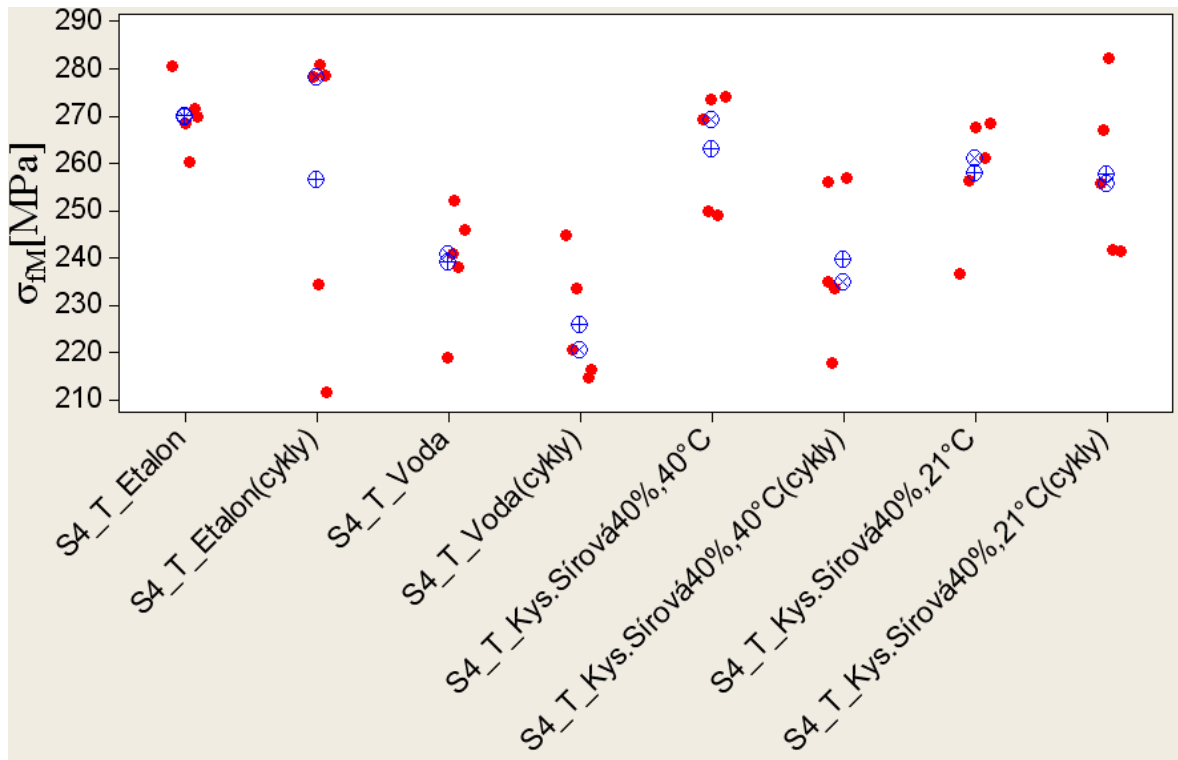
## II. Vliv směru kladení, struktury a prostředí

- Z grafu (Obr. 46) je patrné, že námi zvolená prostředí snižují mez pevnosti v ohybu u vzorků struktury S4.
- Největší meze pevnosti v ohybu dosahuje struktura S4 ve směru kladení L u Etalonu. Naopak nejmenší hodnotu meze pevnosti vykazovaly vzorky téže struktury ve směru kladení T v  $H_2O$ .
- Na grafu (Obr. 48) lze pozorovat, že zvolená prostředí snižují mez pevnosti v ohybu u vzorků struktury S8.
- Vzorky struktury S8 ve směru kladení L mají vyšší mez pevnosti než vzorky téže struktury kladené ve směru T.
- Největší meze pevnosti v ohybu dosahuje struktura S8 ve směru kladení L u Etalonu. Nejmenší hodnoty meze pevnosti naopak struktura S8 dosahovala ve směru kladení T u  $H_2O$  a 40 %  $H_2SO_4$  při teplotě 40 °C.

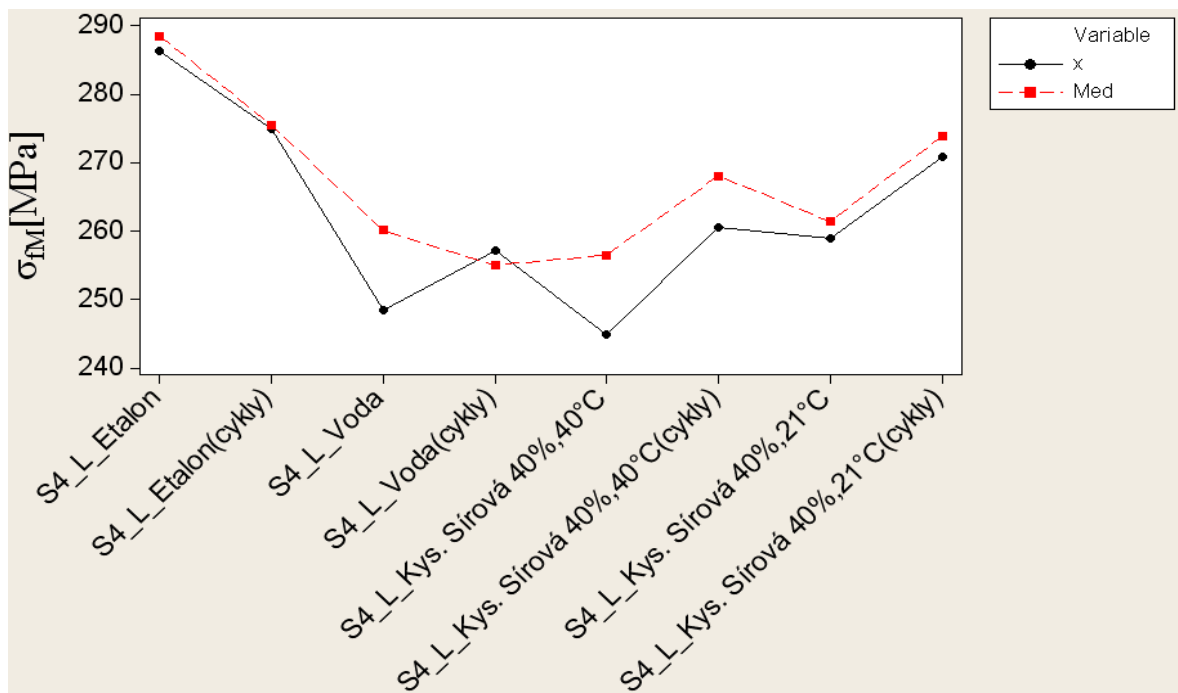
- V případě Etalonu a H<sub>2</sub>O mají vzorky struktury S8 ve směru kladení L i T větší mez pevnosti v ohybu, než vzorky struktury S4 kladené ve stejných směrech. Stejný trend vykazují vzorky struktur S8 a S4 ve směru kladení L v 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> při teplotě 40 °C i 21 °C.
- Rozptyl hodnot při měření na univerzálním zkušebním stroji je patrný z grafu (Obr. 49). V případě rozcházejících se výsledků upřednostňujeme robustnější statistickou veličinou medián.
- Mez pevnosti v ohybu závisí na typu struktury, směru kladení i prostředí.



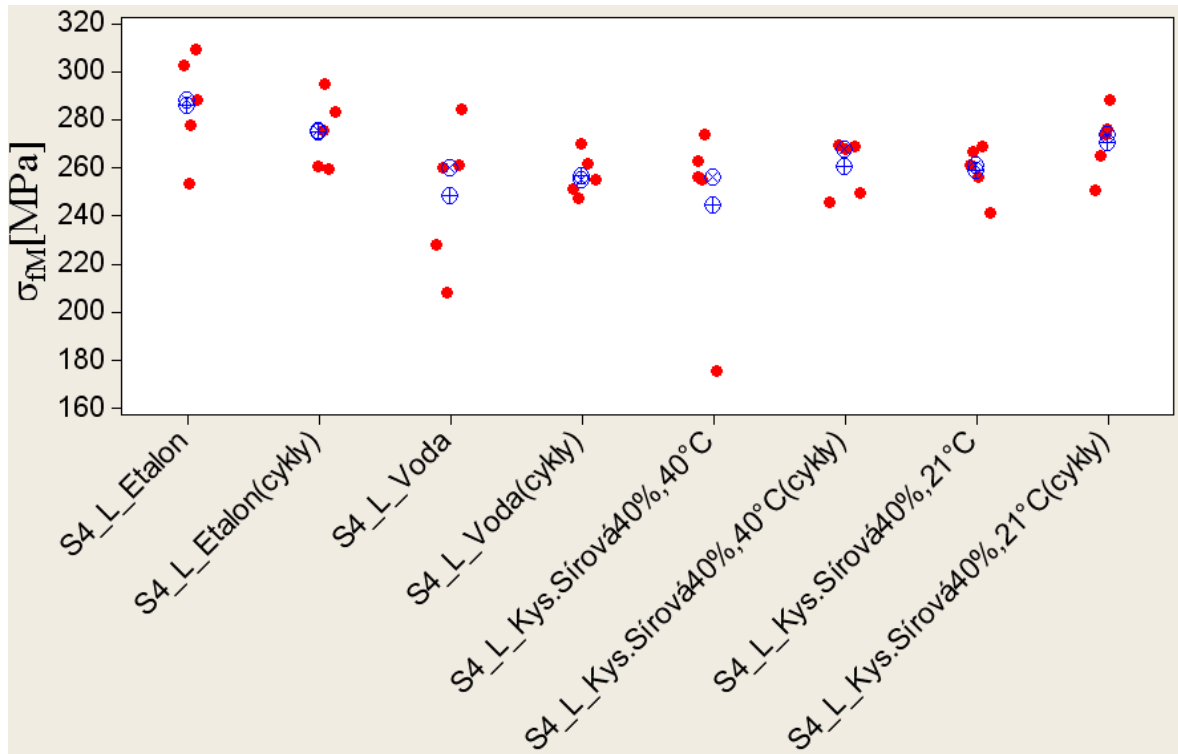
Obr. 54. Srovnání meze pevnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení T v různých prostředích.



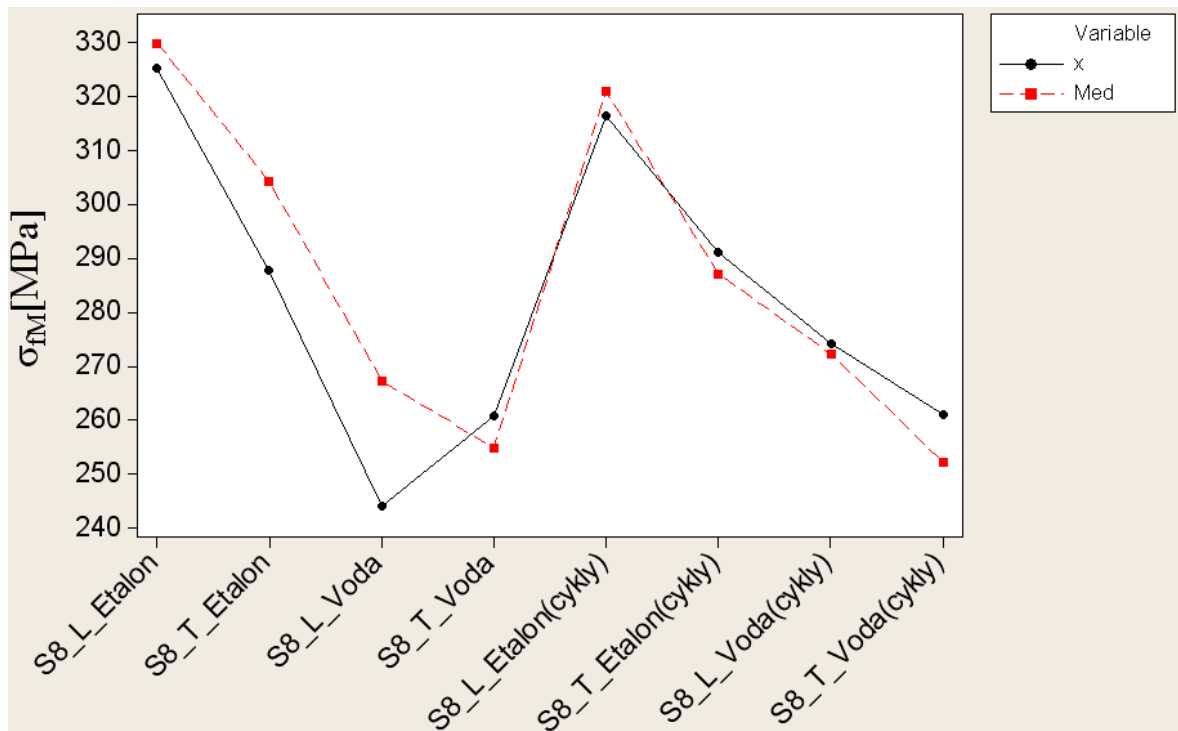
Obr. 55. Srovnání meze pevnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení T v různých prostředích pomocí hodnot jednotlivých vzorků.



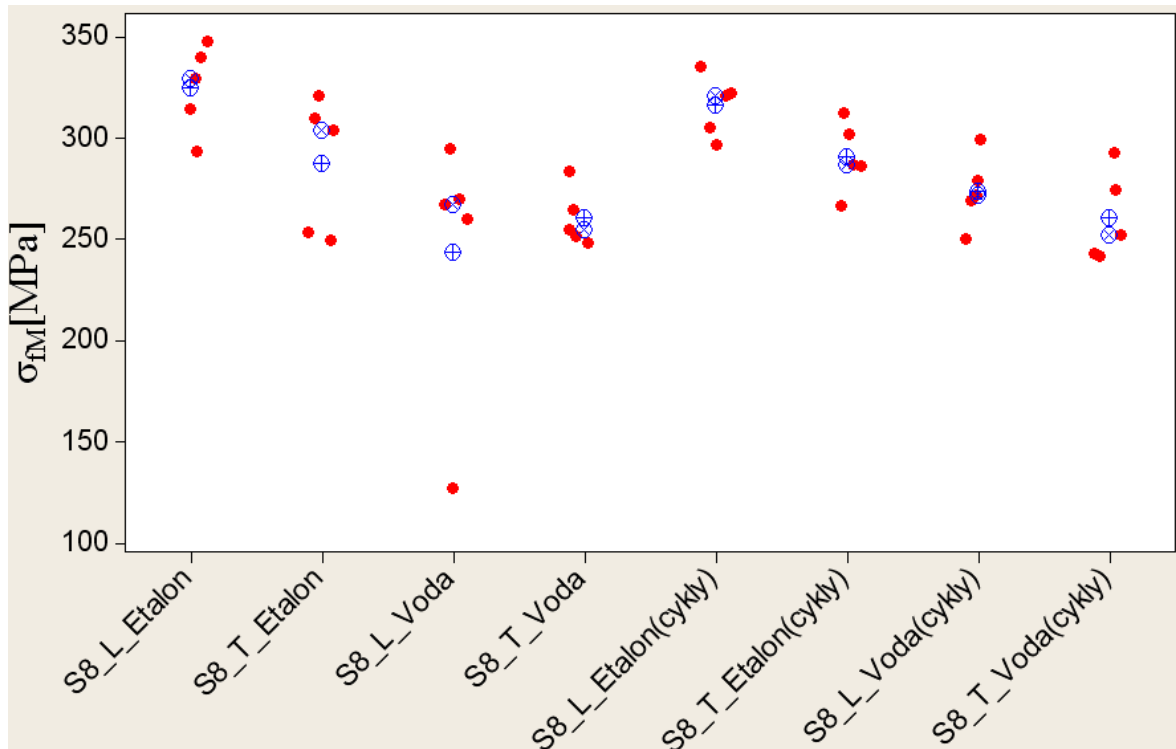
Obr. 56. Srovnání meze pevnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení L v různých prostředích.



Obr. 57. Srovnání meze pevnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení L v různých prostředích pomocí hodnot jednotlivých vzorků



Obr. 58. Srovnání meze pevnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S8 u Etalonu a H<sub>2</sub>O



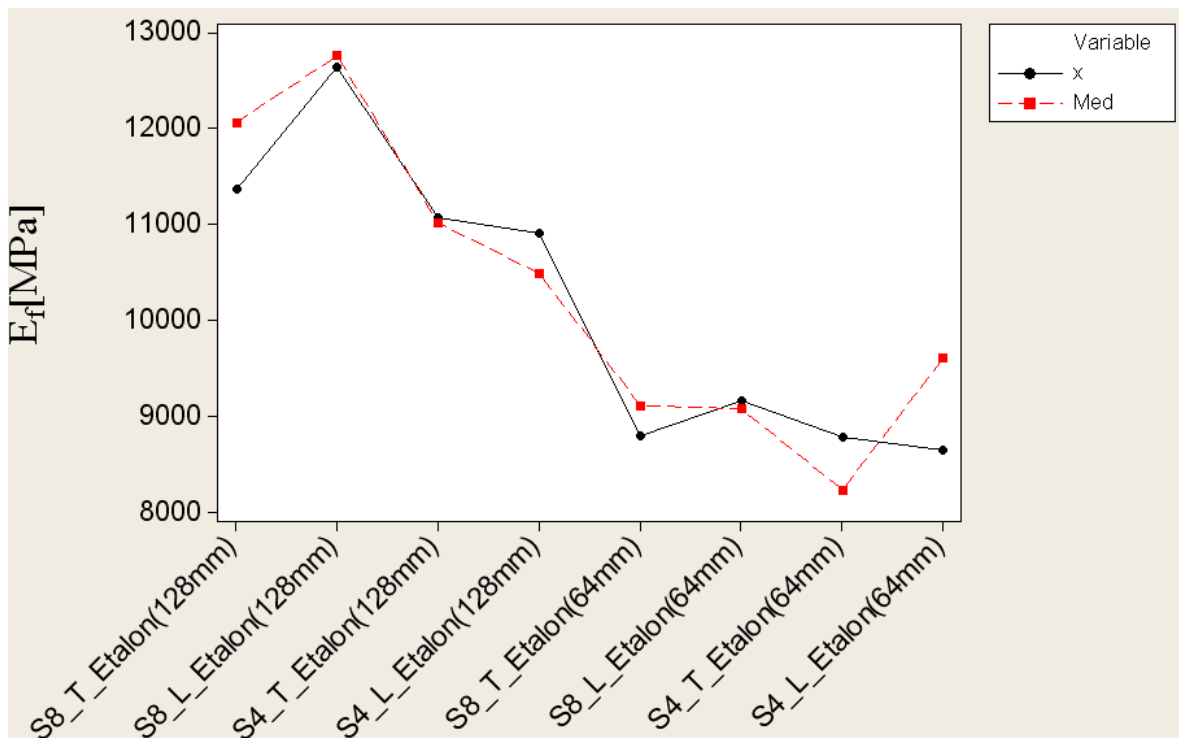
Obr. 59. Srovnání meze pevnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S8 Etalonu a H<sub>2</sub>O pomocí hodnot jednotlivých vzorků

### III. Vliv cyklického namáhání

- Na grafu (Obr. 54) je patrné, že mez pevnosti v ohybu u vzorků struktury S4 ve směru kladení T v různých prostředích po cyklických zkouškách klesá, na rozdíl od Etalonu kde má stoupající trend.
- Nejvyšší hodnoty meze pevnosti dosáhly vzorky struktury S4 ve směru kladení T u Etalonu po cyklickém namáhání. Nejnižší hodnotu pevnosti naopak vykazovaly vzorky téže struktury a směru kladení v H<sub>2</sub>O rovněž po cyklických zkouškách.
- Z grafu (Obr. 56) vyplývá klesající mez pevnosti v ohybu u vzorků struktury S4 ve směru kladení L po cyklických zkouškách u Etalonu a H<sub>2</sub>O. Mez pevnosti v 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> při 40 °C a 21 °C roste.
- Nejvyšší hodnoty meze pevnosti dosáhly vzorky struktury S4 ve směru kladení L u Etalonu. Nejnižší hodnotu pevnosti naopak vykazovaly vzorky téže struktury a směru kladení v H<sub>2</sub>O po cyklických zkouškách.

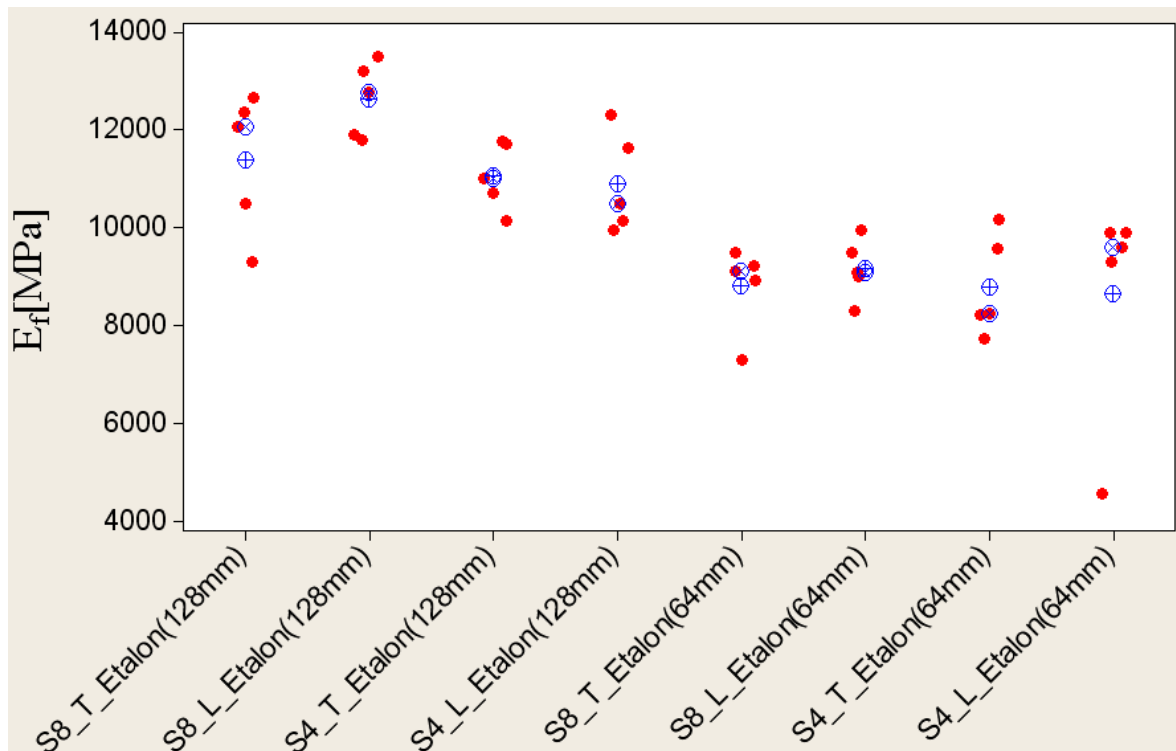
- Na grafu (Obr. 58) lze pozorovat u vzorků struktury S8 ve směru kladení T klesající mez pevnosti v ohybu po cyklickém namáhání u Etalonu i H<sub>2</sub>O. Vzorky struktury S8 kladené ve směru L vykazovaly po cyklických zkouškách u Etalonu menší mez pevnosti a u H<sub>2</sub>O větší.
- Vzhledem ke značnému rozptylu hodnot při měření na univerzálním zkušebním stroji patrném např. z grafu (Obr. 59) a malému počtu zkušebních vzorků v sériích nelze jednoznačně určit vliv cyklů na mez pevnosti v ohybu. V případě rozcházejících se výsledků upřednostňujeme robustnější statistickou veličinou medián.

### 8.3.2 Shrnutí výsledků a diskuze pro modul pružnosti v ohybu



Obr. 60. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u Etalonu na délce vzorku

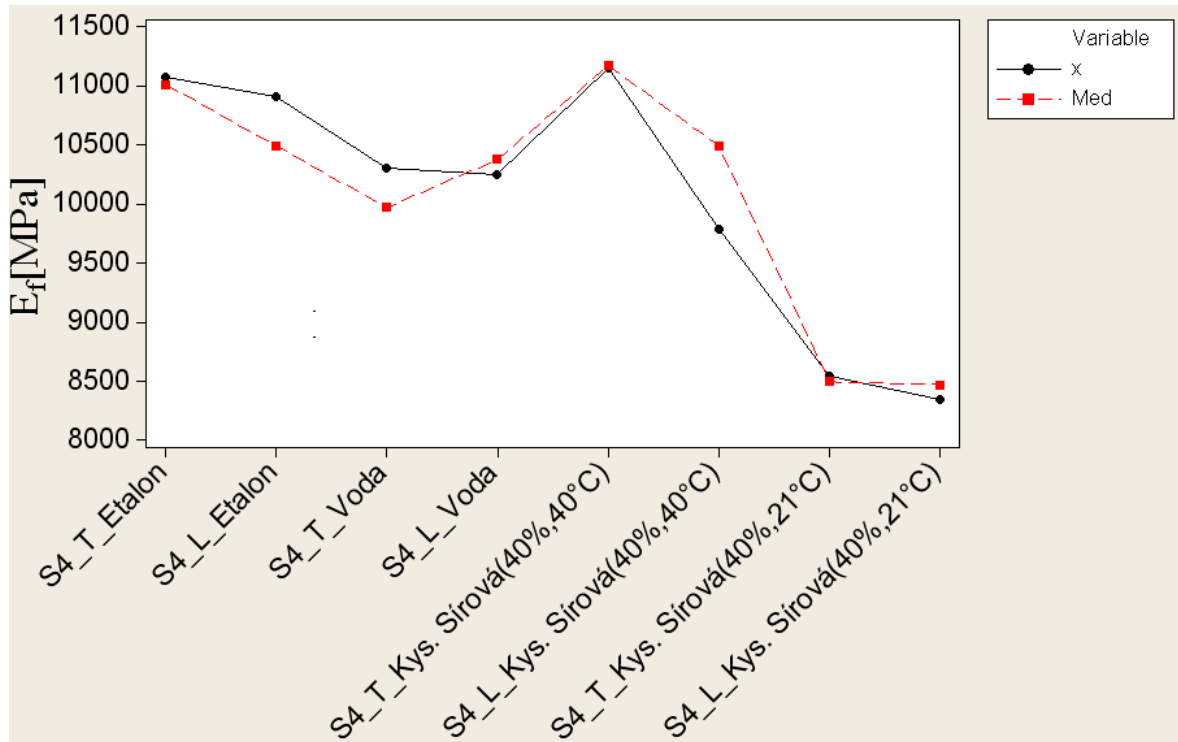




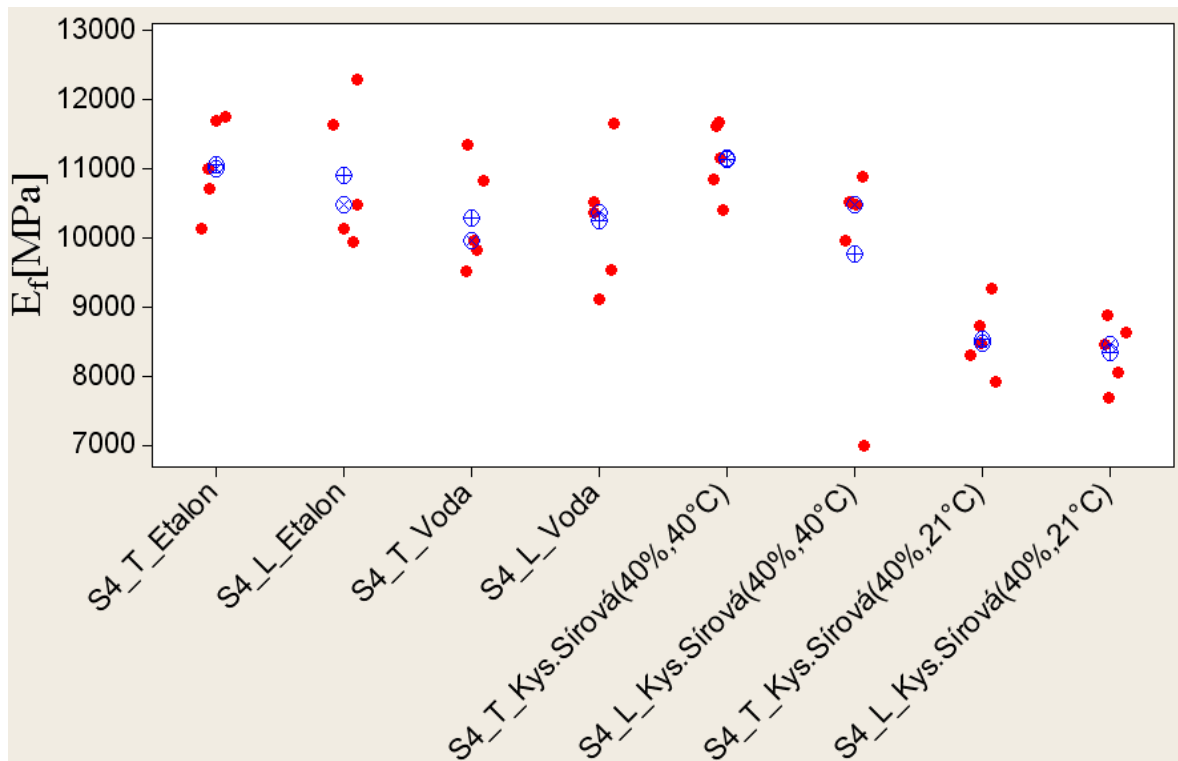
Obr. 61. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u Etalonu, pomocí hodnot jednotlivých vzorků na jejich délce

### I. Vliv délky vzorků

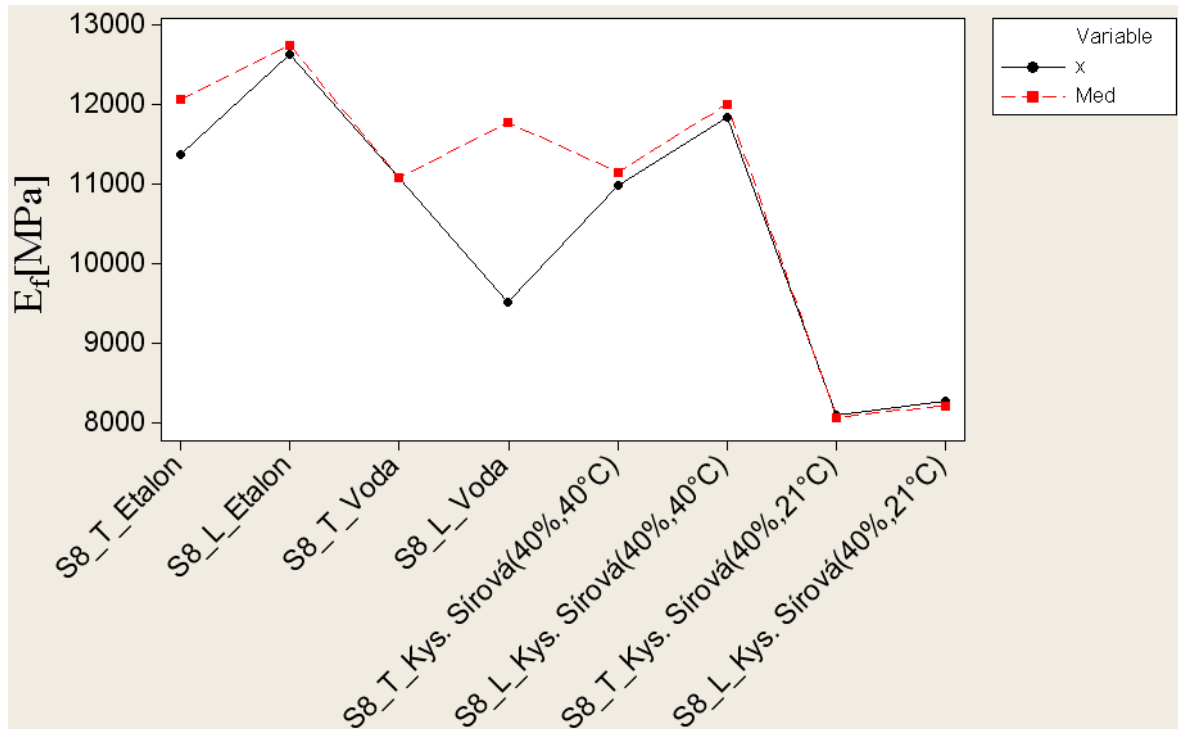
- Při srovnání vzorků s různou vzdáleností podpěr, byl naměřen největší modul pružnosti u délky podpěr 128 mm.
- Je to způsobeno tím, že vliv smykových napětí snižuje modul pružnosti. Na krátké vzorky působí větší smyková síla než na vzorky dlouhé.
- Největšího modulu pružnosti v ohybu dosáhly vzorky struktury S8 ve směru kladení L při délce podpěr 128 mm. Nejmenší modul pružnosti naopak vykazovaly vzorky struktury S4 ve směru kladení T při délce podpěr 64 mm.
- Rozptyl hodnot při měření na univerzálním zkušebním stroji je patrný z grafu (Obr. 61). V případě rozcházejících se výsledků upřednostňujeme robustnější statistickou veličinou medián.
- Modul pružnosti v ohybu vzrůstá s délkou vzorků.



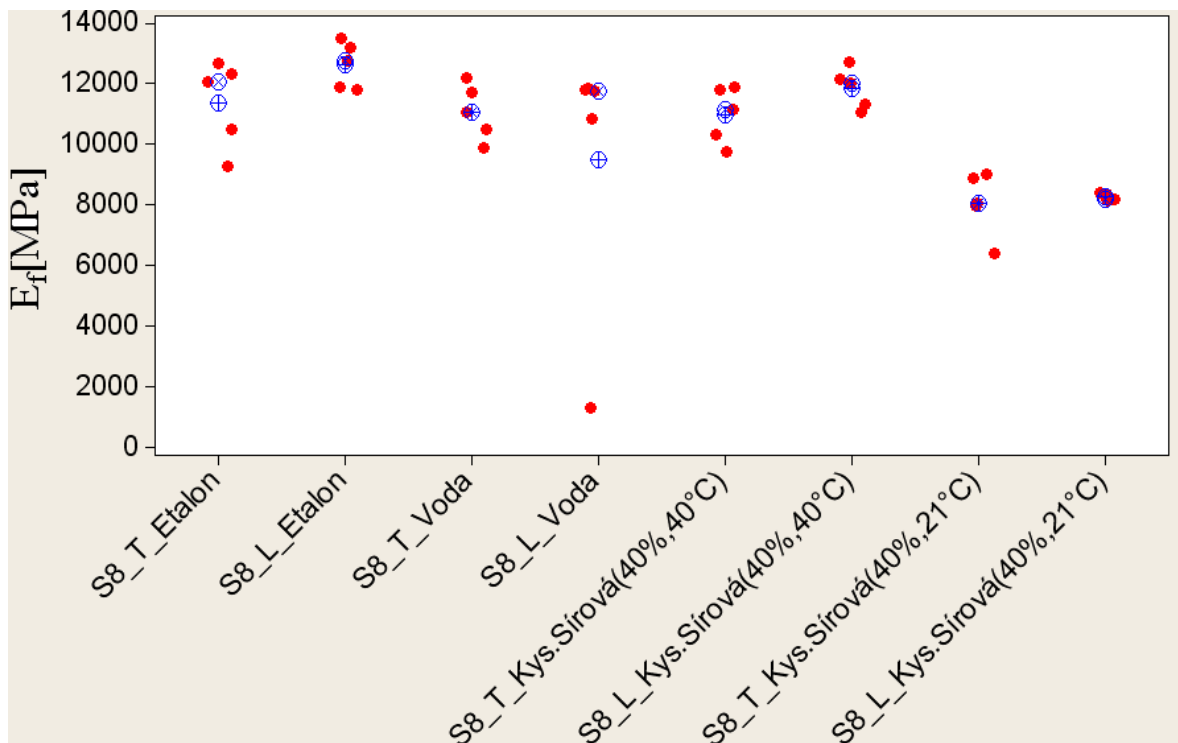
Obr. 62. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S4



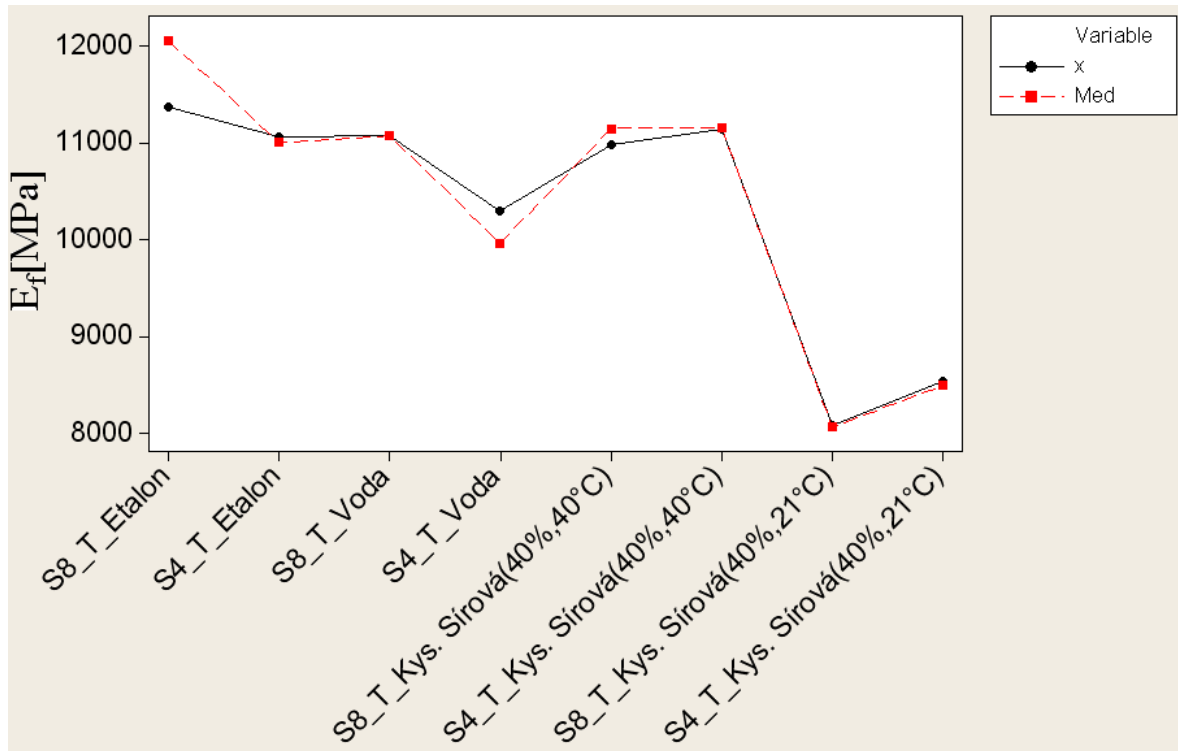
Obr. 63. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S4 pomocí hodnot jednotlivých vzorků



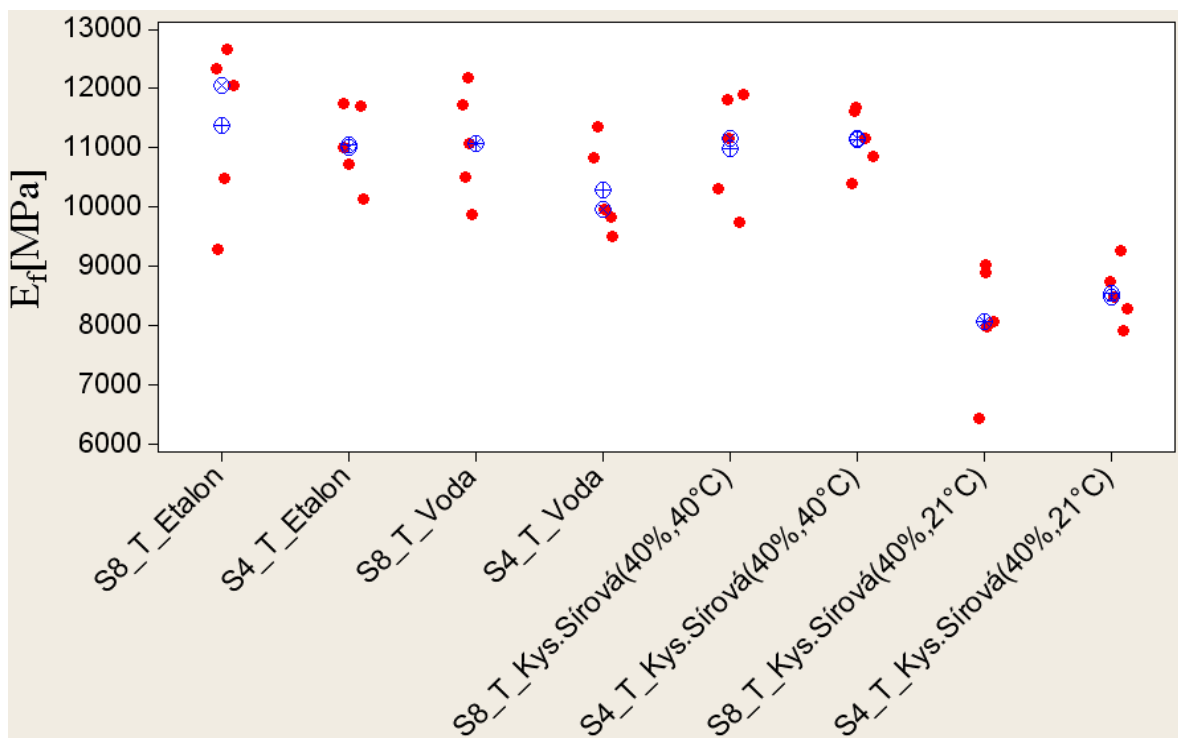
Obr. 64. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8



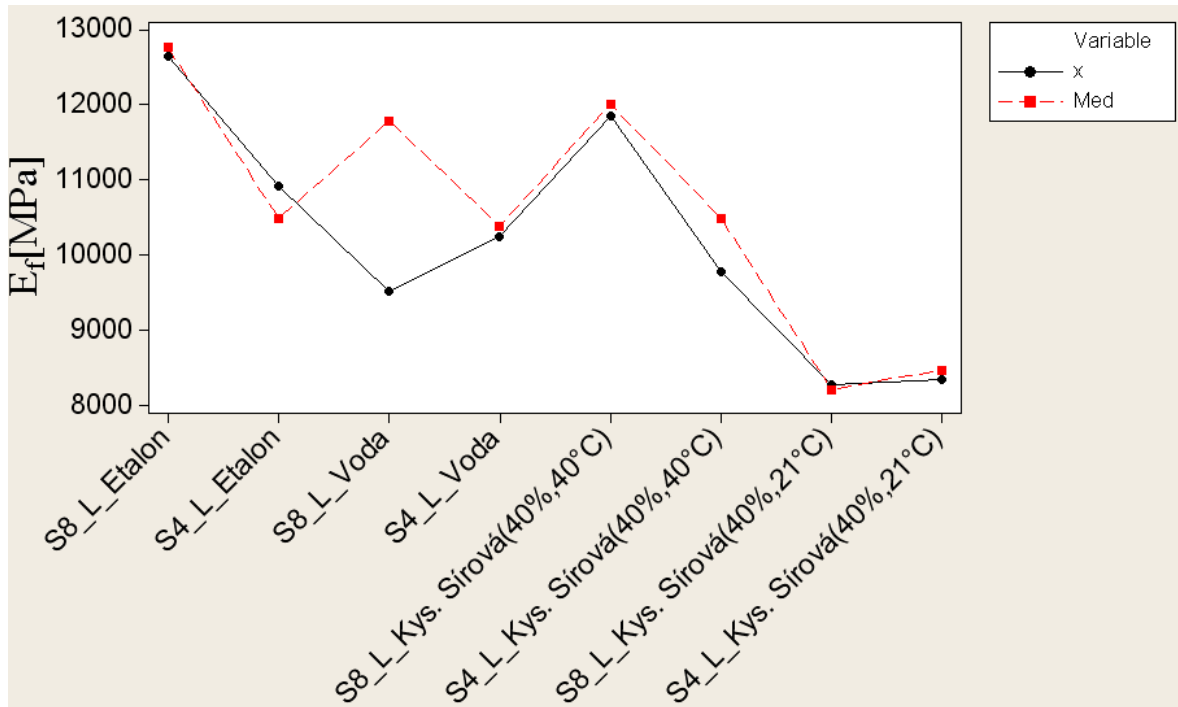
Obr. 65. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 pomocí hodnot jednotlivých vzorků



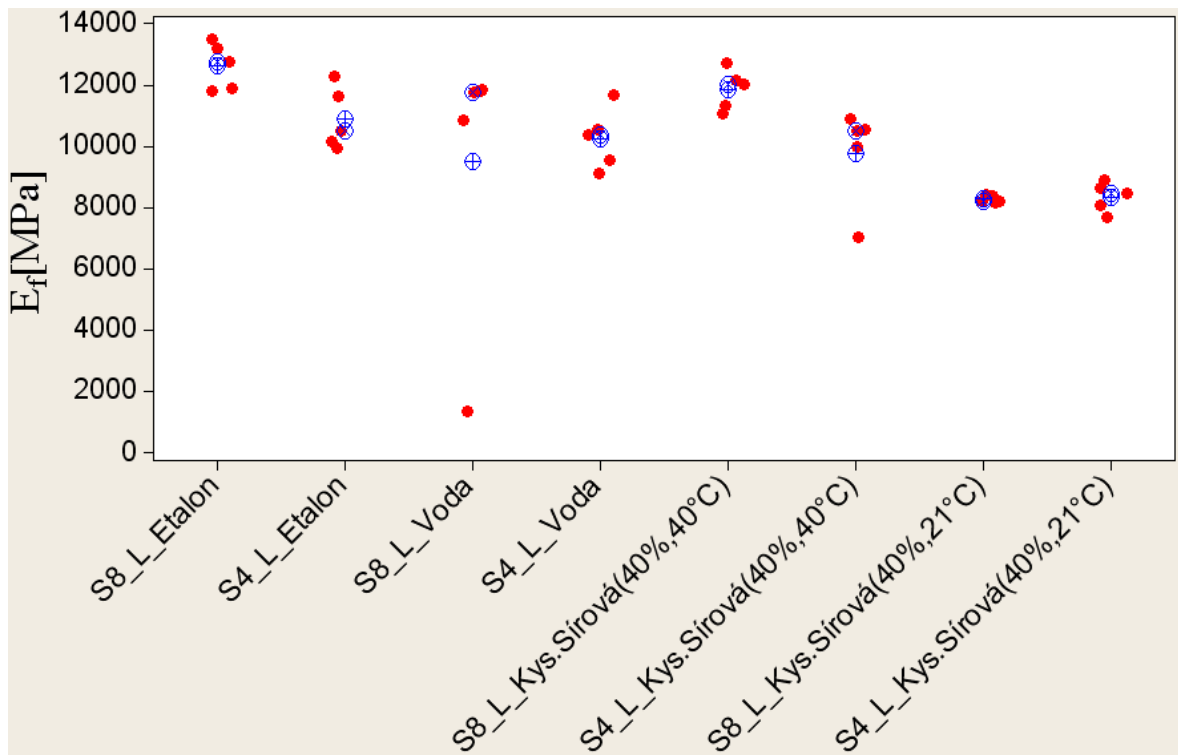
Obr. 66. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru T



Obr. 67. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru T pomocí hodnot jednotlivých vzorků



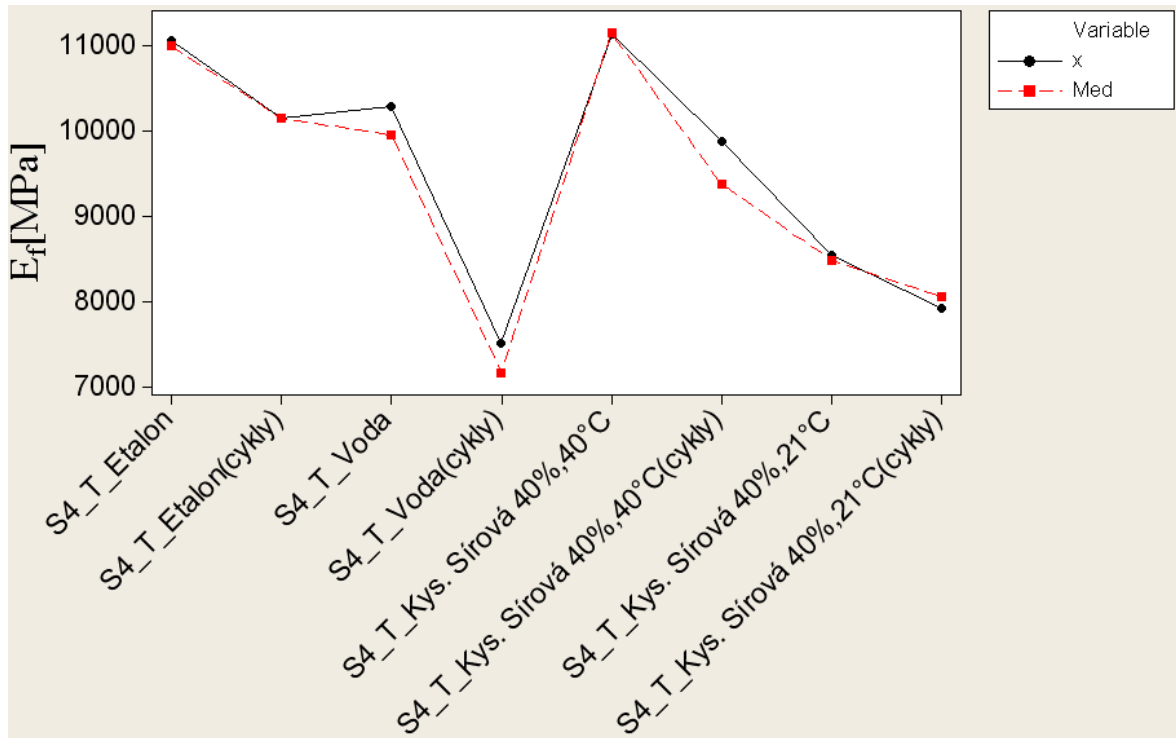
Obr. 68. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru L



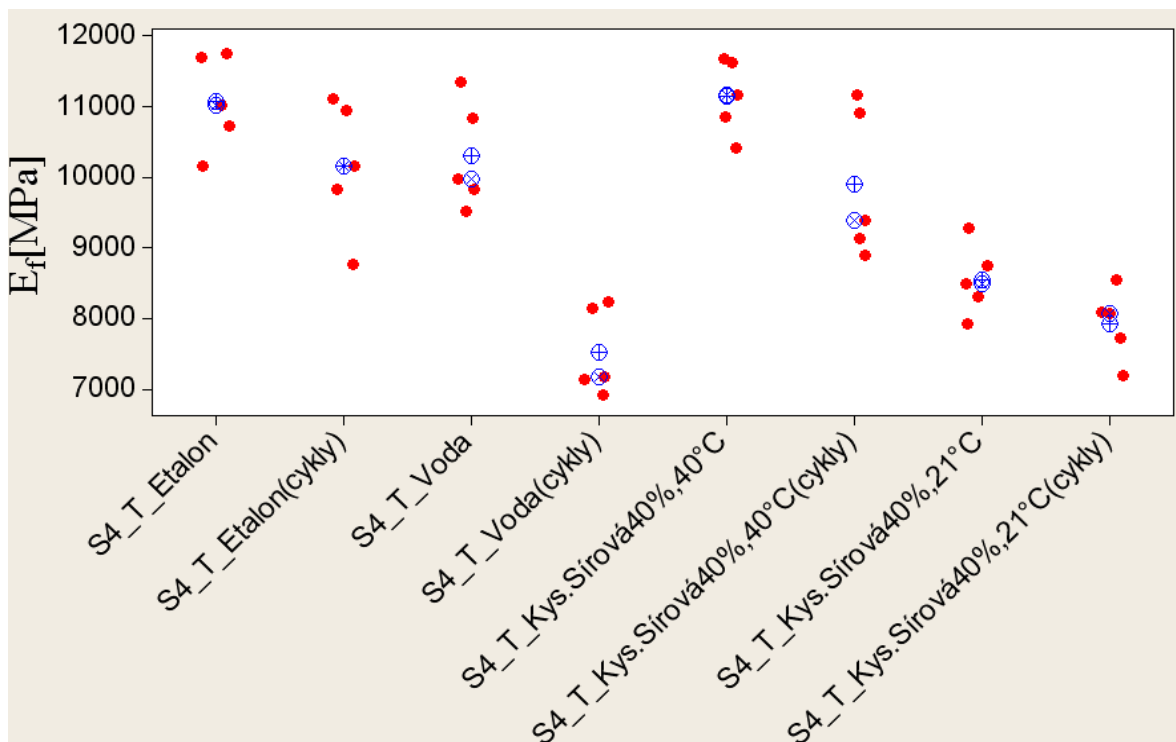
Obr. 69. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru L pomocí hodnot jednotlivých vzorků

## II. Vliv směru kladení, struktury a prostředí

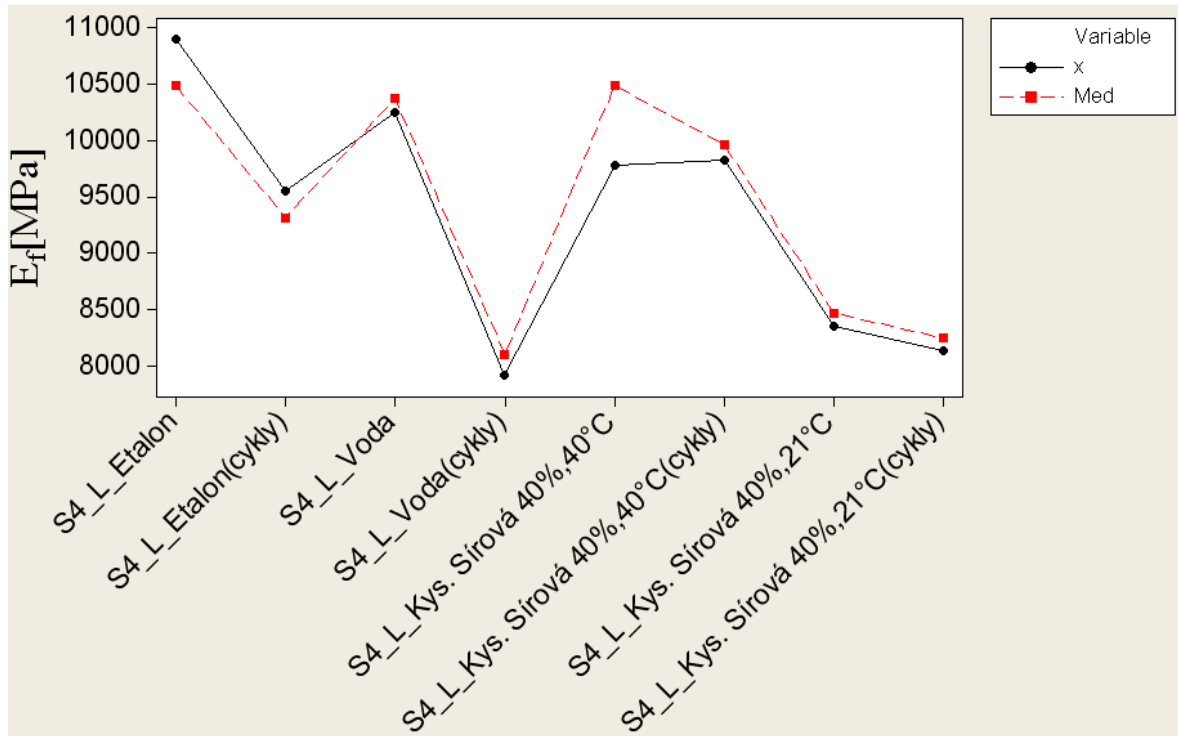
- Z grafu (Obr. 62) je patrné, že největšího modulu pružnosti v ohybu dosahuje struktura S4 ve směru kladení T u 40 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  při teplotě 40 °C. Naopak nejmenší hodnotu modulu pružnosti vykazovaly vzorky téže struktury ve směru kladení L a T u 40 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  při teplotě 21 °C
- Na grafu (Obr. 64) lze pozorovat, že zvolená prostředí snižují modul pružnosti v ohybu u vzorků struktury S8.
- Vzorky struktury S8 ve směru kladení L mají vyšší mez pevnosti než vzorky téže struktury kladené ve směru T.
- Největšího modulu pružnosti v ohybu dosahuje struktura S8 ve směru kladení L u Etalonu. Nejmenší hodnoty modulu pružnosti vykazovala struktura S8 ve směru kladení L a T u 40 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  při teplotě 21 °C.
- V případě Etalonu a  $\text{H}_2\text{O}$  mají vzorky struktury S8 ve směru kladení L i T větší modul pružnosti v ohybu, než vzorky struktury S4 kladené ve stejných směrech. V případě 40 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  při teplotě 21 °C mají vzorky struktury S8 ve směru kladení L i T menší modul pružnosti, než vzorky struktury S4 s tožnými směry kladení.
- Rozptyl hodnot při měření na univerzálním zkušebním stroji je patrný z grafu (Obr. 69). V případě rozcházejících se výsledků upřednostňujeme robustnější statistickou veličinou medián.
- Modul pružnosti v ohybu závisí na typu struktury, směru kladení i prostředí



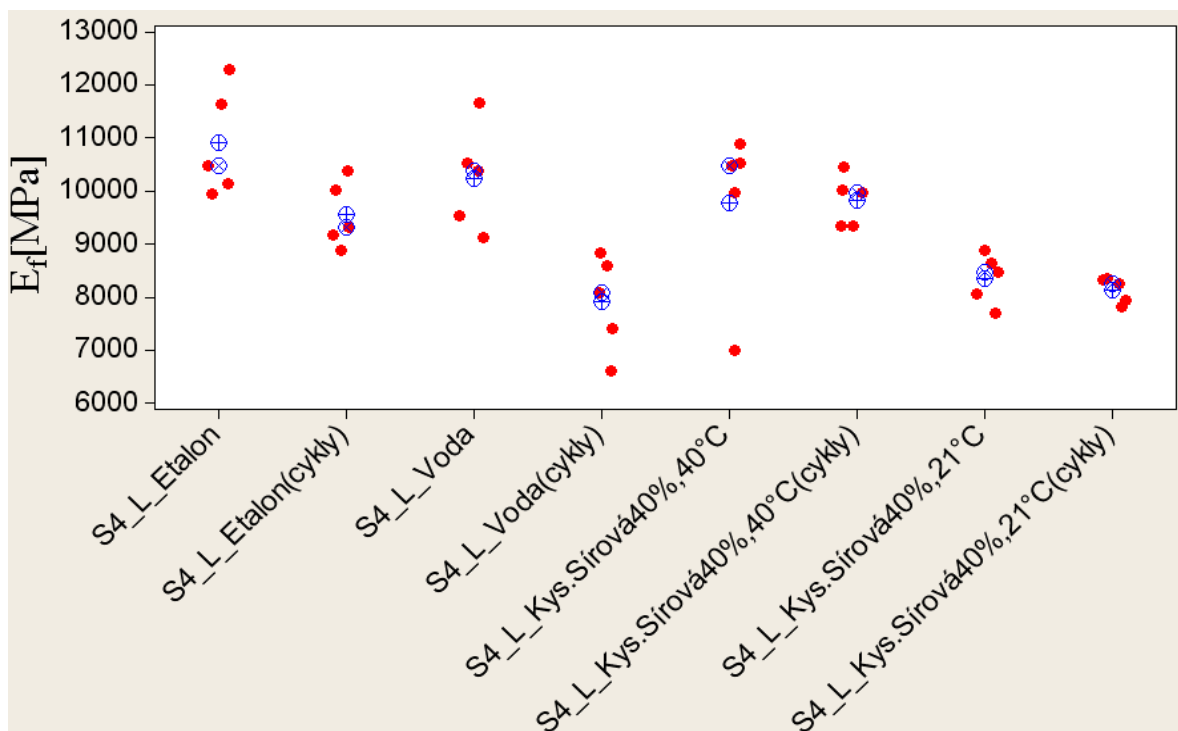
Obr. 70. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení T v různých prostředích.



Obr. 71. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení T v různých prostředích pomocí hodnot jednotlivých vzorků

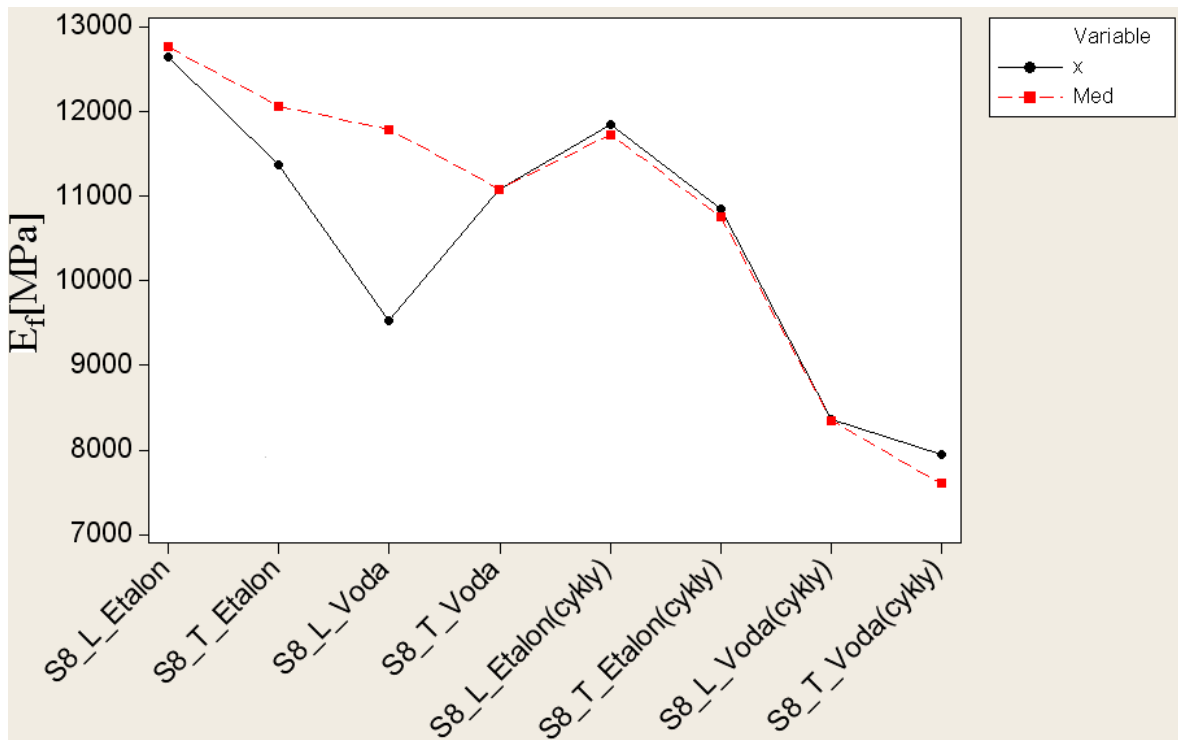


Obr. 72. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení L v různých prostředích.

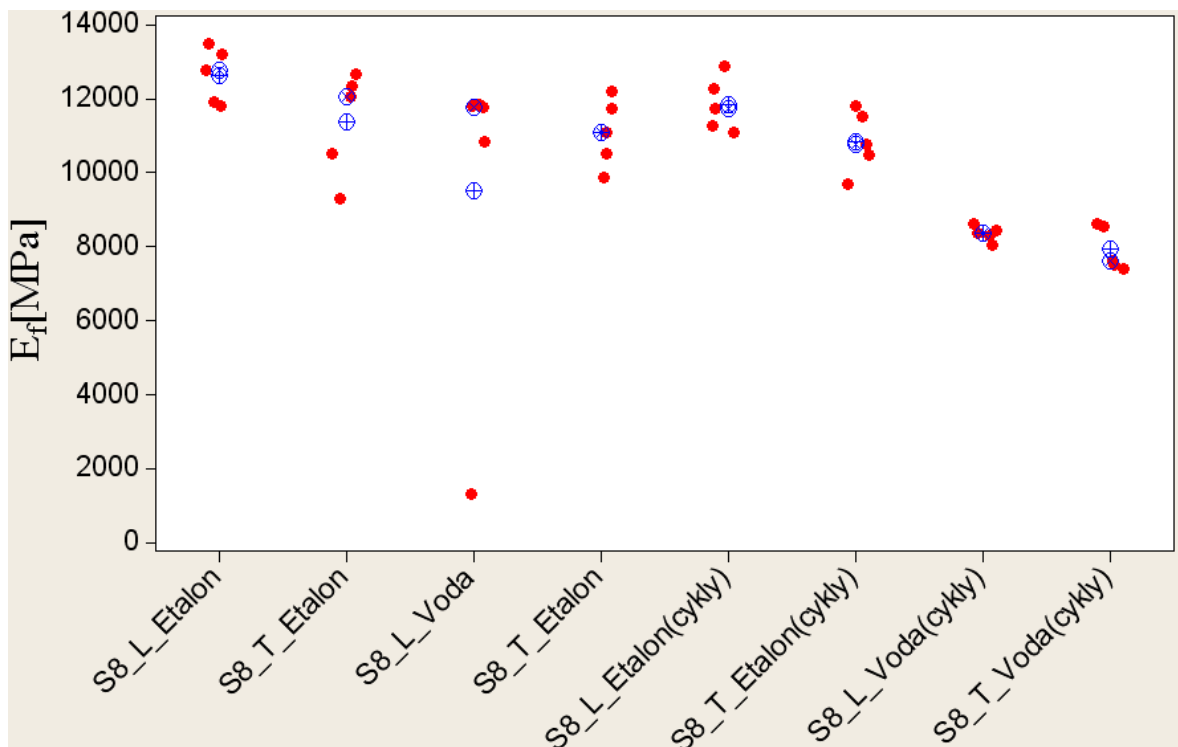


Obr. 73. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení L v různých prostředích pomocí hodnot jednotlivých vzorků





Obr. 74. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S8 u Etalonu a H<sub>2</sub>O



Obr. 75. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S8 u Etalonu a H<sub>2</sub>O pomocí hodnot jednotlivých vzorků

## III. Vliv cyklického namáhání

- Na grafech (Obr. 70,72) je patrný klesající modul pružnosti v ohybu u vzorků struktury S4 ve směrech kladení L a T v různých prostředích po cyklických zkouškách.
- Nejmenší hodnoty modulu pružnosti dosahovaly vzorky struktury S4 v obou směrech kladení u H<sub>2</sub>O po cyklickém namáhání. Největšího modulu pružnosti dosahovaly vzorky téže struktury ve směrech kladení L a T u Etalonu a 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> při 40°C.
- Z grafu (Obr. 74) vyplývá klesající modul pružnosti v ohybu u vzorků struktury S8 ve směru kladení L a T po cyklických zkouškách u Etalonu i H<sub>2</sub>O.
- Největšího modulu pružnosti vykazovaly vzorky struktury S8 u Etalonu ve směru kladení L. Nejmenší modul pružnosti byl zjištěn u vzorků téže struktury a směru kladení T u H<sub>2</sub>O po cyklickém namáhání.
- Rozptyl hodnot při měření na univerzálním zkušebním stroji je patrný z např. z grafu (Obr. 73). Navzdory malému počtu vzorků v sériích v tomto případě lze určit vliv cyklického namáhání na modul pružnosti. Rozdíl hodnot je v některých případech poměrně značný a všechny výsledky vykazují stejný trend.
- Modul pružnosti v ohybu po provedených cyklických ohybových zkouškách klesá.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zkoumání mechanických vlastností skelných laminátů s polyesterovou matricí v různém prostředí a při cyklickém namáhání. Na zkušebním stroji ZWICK 1456 byly provedeny tahové, ohybové i cyklické tahové a ohybové zkoušky. Z mnoha materiálových charakteristik byly jako nejdůležitější vybrány modul pružnosti a mez pevnosti. Vyhodnocování naměřených hodnot bylo provedeno v programu Minitab, pomocí dvou statistických veličin průměru a mediánu. Vzhledem k velkému rozptylu při měření na univerzálním zkušebním stroji a menšímu počtu vzorků v sériích, mají větší vypovídající hodnotu výsledky mediánu. Výhodou mediánu je taky to, že není ovlivněn extrémními hodnotami. Z provedených experimentů vyplývají tyto výsledky a závěry.

### **Statické tahové a ohybové zkoušky**

Z provedených tahových a ohybových zkoušek lze pozorovat snížení meze pevnosti v námi zvolených prostředích v porovnání s Etalonem. U tahových zkoušek je mez pevnosti v tahu u struktury S4 kladené ve směru L vyšší, než u téže struktury kladené ve směru T a to v případě Etalonu i H<sub>2</sub>O. Ohybové zkoušky vykázaly u vzorků struktury S4 v námi zvolených prostředích pokles meze pevnosti v ohybu ve srovnání s Etalonem. Směr kladení L u struktury S8 vykazuje vyšší hodnoty meze pevnosti v ohybu, než směr kladení T a to jak u Etalonu, tak v prostředích. Směr kladení L vykazuje u struktury S4 nižší hodnoty meze pevnosti v ohybu než u struktury S8 u Etalonu i ve všech prostředích. Stejná závislost byla prokázána u struktur S4 a S8 pro směr T pouze u Etalonu a H<sub>2</sub>O. V případě ohybových zkoušek byl u vzorků prokázán vliv smykových napětí v závislosti na délce. Mez pevnosti s rostoucí délkou klesá, naopak modul pružnosti vzrůstá.

Modul pružnosti v tahu je u vzorků exponovaných v H<sub>2</sub>O nižší než u Etalonu. Struktura S4 ve směru kladení L vykazuje vyšší modul pružnosti v tahu než směr T u Etalonu i H<sub>2</sub>O. Prostředí snižují modul pružnosti v ohybu u vzorků struktury S8 ve směru L i T v porovnání s Etalonem. Směr kladení L u téže struktury vykazuje vyšší modul pružnosti než směr T. Modul pružnosti v ohybu je vyšší u struktury S8 než u struktury S4 pro oba směry u Etalonu i H<sub>2</sub>O.

### **Cyklické tahové a ohybové zkoušky**

Při cyklických tahových a ohybových zkouškách nelze jednoznačně prokázat vliv cyklů na mez pevnosti. Byl prokázán určitý trend, ale vzhledem k velkému rozptylu hodnot při měření na univerzálním zkušebním stroji a menšímu počtu vzorků v sériích nelze vyvodit jasný závěr. Naopak v případě modulu pružnosti je patrné, že cyklické tahové i ohybové zkoušky snižují modul pružnosti. Modul pružnosti v ohybu je u vzorků struktury S8 ve směru kladení L vyšší, než u vzorků téže struktury kladených ve směru T u H2O i Etalonu.

Z důvodů hlubšího prozkoumání problematiky cyklického namáhání u sklolaminátových vzorků by bylo vhodné provést další a podrobnější experimentální zkoušky.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2007. 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha : Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 193 s. ISBN 8021424435.
- [4] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň : Západočeská univerzita, 2004. 154 s. ISBN 80-7043-273-X.
- [5] ŠTERNSCHUSS, Antonín. *Polyesterové skelné lamináty*. 2., dopl. vyd. Praha : SNTL, 1961. 153 s.
- [6] MACHEK, Václav; SODOMKA, Jaromír . *Polymery a kompozity s polymerní maticí : Nauka o materiálu. 4. část*. Vyd. 1. . Praha : České vysoké učení technické, 2008. 86 s. ISBN 978-80-01-03297-4.
- [7] HLUCHÝ, Miroslav; KOLOUCH, Jan. *Strojírenská technologie 1. 3., přeprac. vyd.* Praha : Scientia, 2002. 266 s. ISBN 80-7183-262-6.
- [8] ŠUBA, Oldřich. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická, 2011. 110 s. ISBN 978-80-7454-015-8.
- [9] HARANGOZÓOVÁ, Simona. *Studium a optimalizace mechanického chování laminátových krytů nádrží* [online]. [s.l.], 2006. 87 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati, Technologická fakulta.
- [10] HOVĚZÁKOVÁ, Michaela . *Stavební konstrukční kompozitní prvky*. [s.l.], 2006. 106 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati, Technologická fakulta.
- [11] LIPTÁKOVÁ, Tatiana, et al. *Polymerné technické materiály* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2011-04-11]. Dostupné z WWW: <[http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/10/polymerne\\_konstrukcne\\_materialy.pdf](http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/10/polymerne_konstrukcne_materialy.pdf)>.
- [12] *Volny.cz* [online]. c2010 [cit. 2011-04-19]. Kompozity. Dostupné z WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/>>.

- [13] TOMEK, Jaroslav. *Sklolaminat.cz* [online]. 2000, poslední změna 20.3.2005 [cit. 2010-11-21]. Nabídka. Dostupné z WWW: <<http://www.sklolaminat.cz/index.html>>.
- [14] *Netcomposites.com* [online]. c2008 [cit. 2011-04-11]. Vacuum Bagging. Dostupné z WWW: <<http://www.netcomposites.com/education.asp?sequence=57>>.
- [15] *Netcomposites.com* [online]. c2008 [cit. 2011-04-11]. Prepreg Moulding. Dostupné z WWW: <<http://www.netcomposites.com/education.asp?sequence=62>>.
- [16] *Havel-composites.com* [online]. c2010 [cit. 2011-04-13]. Jednosměrné. Dostupné z WWW: <<http://www.havel-composites.com/shop/43-Jednosmerne/465-Aramidova-tkanina-158gmspan-stylefont-size-8pxsup2supspan---jednosmerna.html?pls=0>>.
- [17] *Altimabohemia.cz* [online]. c2008 [cit. 2011-04-13]. Rovingové tkaniny. Dostupné z WWW: <[http://www.altimabohemia.cz/?str=vyztuzove\\_materialy/rovingove\\_tkaniny](http://www.altimabohemia.cz/?str=vyztuzove_materialy/rovingove_tkaniny)>.
- [18] *Havel-composites.com* [online]. c2010 [cit. 2011-04-13]. Hybridní. Dostupné z WWW: <<http://www.havel-composites.com/shop/47-Hybridni/437-Aramid-uhlikova-tkanina-71gmspan-stylefont-size-8pxsup2supspan-platno-.html?pls=0>>.
- [19] *Zaltan.com.pl* [online]. [cit. 2011-04-13]. Skelné vlákna. Dostupné z WWW: <<http://www.zaltan.com.pl/pol/wlokna.htm>>.
- [20] Sklen%C4%9Bn%C3%A1 textiln%C3%AD vl%C3%A1kna. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 30.1.2007, last modified on 18.2.2011 [cit. 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C4%9Bn%C3%A1\\_textiln%C3%AD\\_vl%C3%A1kna](http://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C4%9Bn%C3%A1_textiln%C3%AD_vl%C3%A1kna)>.
- [21] *3ninc.com* [online]. c2004 [cit. 2011-04-13]. Conductive Plastic. Dostupné z WWW: <[http://www.3ninc.com/conductive\\_plastic\\_master\\_batche.htm](http://www.3ninc.com/conductive_plastic_master_batche.htm)>.
- [22] *Intersourceusa.com* [online]. [cit. 2011-04-13]. Ceramic Fibre Textiles. Dostupné z WWW: <[http://www.intersourceusa.com/ceramic\\_fiber\\_textiles.htm](http://www.intersourceusa.com/ceramic_fiber_textiles.htm)>.
- [23] *Ekobydlení.eu* [online]. 2007 [cit. 2011-04-14]. Větrná energie. Dostupné z WWW: <<http://www.ekobydleni.eu/energie/spanelsko-75-elektriny-z-obnovitelnych-zdroju>>.

[24] *Smarttrigging.com* [online]. 2004 [cit. 2011-04-14]. Aramid (Trawon) The performance fibre. Dostupné z WWW: <<http://www.smartrigging.com/fibres/aramid-twaron-the-performance-fibre/>>.

[25] *Exportdeck.com* [online]. c2011 [cit. 2011-04-14]. Products. Dostupné z WWW: <<http://www.exportdeck.com/2787901/tradeleads-3492768/photo-10411265/graphite-packing-reinforced-graphite-packing.shtml>>.

[26] *Auto.howstuffworks.com* [online]. c2011 [cit. 2011-04-14]. Can carbon fiber solve the oil crisis?. Dostupné z WWW: <<http://auto.howstuffworks.com/fuel-efficiency/fuel-economy/carbon-fiber-oil-crisis1.htm>>.

[27] *Iopscience.iop.org* [online]. c2011 [cit. 2011-04-19]. Nanotechnology. Dostupné z WWW: <[http://iopscience.iop.org/0957-4484/17/17/039/pdf/0957-4484\\_17\\_17\\_039.pdf](http://iopscience.iop.org/0957-4484/17/17/039/pdf/0957-4484_17_17_039.pdf)>.

[28] *Eshop-balicipotreby.cz* [online]. c2010 [cit. 2011-04-14]. Motouzy-snury-stuhy. Dostupné z WWW: <<http://www.eshop-balicipotreby.cz/index.php/konopny-motouz-textilni-3-mm-x-1-000-m-100-g/>>.

[29] *Sachinspeciality.tradeindia.com* [online]. c2011 [cit. 2011-04-14]. Fibre Glass Chemicals . Dostupné z WWW:

[http://sachinspeciality.tradeindia.com/Exporters\\_Suppliers/Exporter17570.271758/Fibre-Glass-Chemicals.html](http://sachinspeciality.tradeindia.com/Exporters_Suppliers/Exporter17570.271758/Fibre-Glass-Chemicals.html)

[30] *Gurit.com* [online]. c2011 [cit. 2011-04-19]. Guide to composites. Dostupné z WWW: <<http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>>.

[31] *Form-composites.com* [online]. c2010 [cit. 2011-04-19]. Výrobní sortiment. Dostupné z WWW: <<http://www.form-composite.com/sortiment.htm>>.

[32] *Krystov.cz* [online]. c2010 [cit. 2011-04-19]. Plastová okna. Dostupné z WWW: <[http://www.termoprofil.eu/images/windows/salam\\_sl\\_3d.swf](http://www.termoprofil.eu/images/windows/salam_sl_3d.swf)>.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku	-
SMC	Sheet moulding compound	-
BMC	Bulk moulding compound	-
FR4	Sklotextit- vrstvený materiál	-
RTM	Resin Transfer Moulding	-
$\eta$	Viskozita	mPa·s
HDT	Tvarová stálost za tepla	°C
$T_g$	Teplota skelného přechodu	°C
$\sigma_{Pt}$	Mez pevnosti v tahu	MPa
E	Modul pružnosti v tahu	MPa
$\delta$	Tažnost	%
FRC	Vláknny vyztužené kompozity	-
[S]	Matice tuhosti	-
[T]	Transformační matice	-
( $\varepsilon$ )	Tenzor deformace	-
[A]	Matice membránové tuhosti	-
[B]	Matice vazebné tuhosti	-
[D]	Matice ohybové tuhosti	-
S8	Struktura laminátu	-
S4	Struktura laminátu	-
L	Podélný směr kladení	-
T	Příčný směr kladení	-
#1	Číslo série	-
$a_0$	Výška vzorku	mm



$b_0$	Šířka vzorku	mm
Med	Statistická veličina Medián	-
$\bar{x}$	Aritmetický průměr	-
$s$	Směrodatná odchylka	-
$\sigma_M$	Mez pevnosti v tahu	MPa
$E_t$	Modul pružnosti v tahu	MPa
$\varepsilon_M$	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu	%
$\sigma_B$	Napětí v tahu při přetržení	MPa
$\varepsilon_B$	Poměrné prodloužení při přetržení	%
$\Delta l_M$	Deformace na mezi pevnosti	mm
$\Delta l_B$	Deformace při přetržení	mm
$F_M$	Síla na mezi pevnosti	N
$L_p$	Vzdálenost podpěr	mm
$\sigma_{fM}$	Mez pevnosti v ohybu	MPa
$E_f$	Modul pružnosti v ohybu	MPa
$\varepsilon_{fM}$	Deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu	%
$\sigma_{fB}$	Napětí v ohybu v okamžiku lomu	MPa
$\varepsilon_{fB}$	Deformace ohybem v okamžiku lomu	%
$\Delta y_{fM}$	Průhyb na mezi pevnosti	mm
$\Delta y_{fB}$	Průhyb při přetržení	mm

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Obecně přijatá klasifikace kompozitních materiálů [4].</i>	15
<i>Obr. 2. Prostorové uspořádání vyztužujících vláken [4].</i>	17
<i>Obr. 3. Druhy vláken [28],[29],[26],[25],[24],[22],[21],[27].</i>	27
<i>Obr. 4. Schéma výroby skleněných vláken [1].</i>	29
<i>Obr. 5. Nejdůležitější typy skloláknitých výstuží [17], [18], [19], [20].</i>	33
<i>Obr. 6. Druhy vazeb vyztužujících tkanin [2].</i>	33
<i>Obr. 7. Tkaniny s různou skladbou vláken v osnově a útku [16], [18], [30].</i>	34
<i>Obr. 8. Stolek pro vlakové soupravy [31].</i>	35
<i>Obr. 9. Vnější bok City autobusu pro městskou dopravu [31].</i>	35
<i>Obr. 10. Celokompozitový hlídkový člun pro U.S. Navy [12].</i>	35
<i>Obr. 11. Regata švédské armády s technologií stealth [12].</i>	36
<i>Obr. 12. Výztuha v okenním rámu [32].</i>	36
<i>Obr. 13. Kryty čistíren odpadních vod [9].</i>	37
<i>Obr. 14. Nadzvukové letadlo společnosti Lockheed Martin [12].</i>	37
<i>Obr. 15. Náhrada [12].</i>	38
<i>Obr. 16. Lopatky větrných turbín [23].</i>	38
<i>Obr. 17. Výrobky ze sklolaminátu [13].</i>	40
<i>Obr. 18. Postup ručního kladení [2].</i>	42
<i>Obr. 19. Metoda vakuového vaku [14].</i>	43
<i>Obr. 20. Pořadová čísla lamin, jejich rozhraní [8].</i>	48
<i>Obr. 21. Složky deformace ve směru globální osy x [8].</i>	50
<i>Obr. 22. Ekvivalentní systém jednotlivých sil a momentů v průřezech laminátové stěny [8].</i>	51
<i>Obr. 23. Sklolaminátové vzorky</i>	56
<i>Obr. 24. Složení laminátu</i>	57
<i>Obr. 25. Struktura laminátu S4</i>	58
<i>Obr. 26. Struktura laminátu S8</i>	58
<i>Obr. 27. Univerzální zkušební stroj</i>	59
<i>Obr. 28. Zkouška tahem s připojeným extenzometrem</i>	61
<i>Obr. 29. Zkušební vzorek po tahové zkoušce</i>	61
<i>Obr. 30. Graf namáhání vzorku cyklickým tahem z programu testExpertII</i>	63

<i>Obr. 31. Tahová křivka pro sérii #3 a #1 .....</i>	65
<i>Obr. 32. Srovnání meze pevnosti v tahu u Etalonu a H<sub>2</sub>O .....</i>	66
<i>Obr. 33. Srovnání meze pevnosti v tahu u Etalonu a H<sub>2</sub>O pomocí hodnot jednotlivých vzorků .....</i>	66
<i>Obr. 34. Srovnání meze pevnosti v tahu u Etalonu a H<sub>2</sub>O při statické a cyklické zkoušce.....</i>	67
<i>Obr. 35. Srovnání meze pevnosti v tahu u Etalonu a H<sub>2</sub>O při statické a cyklické zkoušce pomocí hodnot jednotlivých vzorků.....</i>	68
<i>Obr. 36. Srovnání modulu pružnosti v tahu u Etalonu a H<sub>2</sub>O.....</i>	69
<i>Obr. 37. Srovnání modulu pružnosti v tahu u Etalonu a H<sub>2</sub>O pomocí hodnot jednotlivých vzorků.....</i>	69
<i>Obr. 38. Srovnání modulu pružnosti v tahu u Etalonu a H<sub>2</sub>O při statické a cyklické zkoušce.....</i>	70
<i>Obr. 39. Srovnání modulu pružnosti v tahu u Etalonu a H<sub>2</sub>O při statické a cyklické zkoušce pomocí hodnot jednotlivých vzorků.....</i>	71
<i>Obr. 40. Zkouška ohybem .....</i>	73
<i>Obr. 41. Zkušební vzorek po ohybové zkoušce .....</i>	73
<i>Obr. 42. Graf namáhání vzorku cyklickým ohybem z programu testExpertII .....</i>	79
<i>Obr. 43. Tahová křivka pro sérii #5 a #1 .....</i>	85
<i>Obr. 44. Srovnání meze pevnosti v ohybu u Etalonu na délce vzorku .....</i>	86
<i>Obr. 45. Srovnání meze pevnosti v ohybu u Etalonu, pomocí hodnot jednotlivých vzorků .....</i>	86
<i>Obr. 46. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S4.....</i>	87
<i>Obr. 47. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S4 pomocí hodnot jednotlivých vzorků.....</i>	88
<i>Obr. 48. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8.....</i>	88
<i>Obr. 49. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 pomocí hodnot jednotlivých vzorků.....</i>	89
<i>Obr. 50. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru T.....</i>	89
<i>Obr. 51. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru T pomocí hodnot jednotlivých vzorků .....</i>	90

<i>Obr. 52. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru L .....</i>	90
<i>Obr. 53. Srovnání meze pevnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru L pomocí hodnot jednotlivých vzorků .....</i>	91
<i>Obr. 54. Srovnání meze pevnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení T v různých prostředích. ....</i>	92
<i>Obr. 55. Srovnání meze pevnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení T v různých prostředích pomocí hodnot jednotlivých vzorků. ....</i>	93
<i>Obr. 56. Srovnání meze pevnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení L v různých prostředích. ....</i>	93
<i>Obr. 57. Srovnání meze pevnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení L v různých prostředích pomocí hodnot jednotlivých vzorků .....</i>	94
<i>Obr. 58. Srovnání meze pevnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S8 u Etalonu a H<sub>2</sub>O .....</i>	94
<i>Obr. 59. Srovnání meze pevnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S8 Etalonu a H<sub>2</sub>O pomocí hodnot jednotlivých vzorků .....</i>	95
<i>Obr. 60. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u Etalonu na délce vzorku .....</i>	96
<i>Obr. 61. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u Etalonu, pomocí hodnot jednotlivých vzorků .....</i>	97
<i>Obr. 62. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S4 .....</i>	98
<i>Obr. 63. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S4 pomocí hodnot jednotlivých vzorků .....</i>	98
<i>Obr. 64. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 .....</i>	99
<i>Obr. 65. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 pomocí hodnot jednotlivých vzorků .....</i>	99
<i>Obr. 66. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru T .....</i>	100

<i>Obr. 67. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru T pomocí hodnot jednotlivých vzorků .....</i>	100
<i>Obr. 68. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru L .....</i>	101
<i>Obr. 69. Srovnání modulu pružnosti v ohybu pro různá prostředí u vzorků struktury S8 a S4 ve směru L pomocí hodnot jednotlivých vzorků .....</i>	101
<i>Obr. 70. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení T v různých prostředích. ....</i>	103
<i>Obr. 71. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení T v různých prostředích pomocí hodnot jednotlivých vzorků.....</i>	103
<i>Obr. 72. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení L v různých prostředích. ....</i>	104
<i>Obr. 73. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S4 ve směru kladení L v různých prostředích pomocí hodnot jednotlivých vzorků.....</i>	104
<i>Obr. 74. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S8 u Etalonu a H<sub>2</sub>O .....</i>	105
<i>Obr. 75. Srovnání modulu pružnosti v ohybu u statické a cyklické zkoušky pro strukturu S8 u Etalonu a H<sub>2</sub>O pomocí hodnot jednotlivých vzorků .....</i>	105

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Srovnání vybraných druhů pryskyřic [2] .....</i>	19
<i>Tab. 2. Vlastnosti a použití různých nenasycených polyesterových pryskyřic [2]. .....</i>	21
<i>Tab. 3. Vlastnosti a použití různých vinylesterových pryskyřic [2]. .....</i>	23
<i>Tab. 4. Vlastnosti a použití různých typů epoxidových pryskyřic pro kompozity [2]. .....</i>	25
<i>Tab. 5. Vlastnosti některých druhů vláken [3]. .....</i>	28
<i>Tab. 6. Vlastnosti jednotlivých druhů skel [3]. .....</i>	31
<i>Tab. 7. Technologie výroby vláknových kompozitů 1 [2], [3]. .....</i>	44
<i>Tab. 8. Technologie výroby vláknových kompozitů 2 [2], [3], [10]. .....</i>	45
<i>Tab. 9. Technologie výroby vláknových kompozitů 3 [3], [10]. .....</i>	46
<i>Tab. 10. Technologie výroby vláknových kompozitů 4 [2], [3], [15]. .....</i>	47
<i>Tab. 11. Soupis vzorků pro tahové zkoušky .....</i>	57
<i>Tab. 12. Soupis vzorků pro ohybové zkoušky.....</i>	57
<i>Tab. 13. Složení struktury S4 .....</i>	58
<i>Tab. 14. Složení struktury S8 .....</i>	58
<i>Tab. 15. Technické údaje přístroje ZWICK 1465 .....</i>	59
<i>Tab. 16. Nastavené parametry pro tahovou zkoušku .....</i>	61
<i>Tab. 17. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L - Etalon .....</i>	62
<i>Tab. 18. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T - Etalon .....</i>	62
<i>Tab. 19. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L - H<sub>2</sub>O.....</i>	62
<i>Tab. 20. Tahové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T - H<sub>2</sub>O.....</i>	62
<i>Tab. 21. Nastavené parametry pro cyklickou tahovou zkoušku.....</i>	63
<i>Tab. 22. Tahové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru L - Etalon.....</i>	64
<i>Tab. 23. Tahové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T - Etalon.....</i>	64
<i>Tab. 24. Tahové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru L - H<sub>2</sub>O .....</i>	64
<i>Tab. 25. Tahové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T - H<sub>2</sub>O .....</i>	64
<i>Tab. 26. Hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti pro tahové a cyklické tahové zkoušky.....</i>	65
<i>Tab. 27. Nastavené parametry pro ohybovou zkoušku.....</i>	72
<i>Tab. 28. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T – Etalon, L<sub>p</sub>=128 mm .....</i>	74
<i>Tab. 29. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L – Etalon, L<sub>p</sub>=128 mm .....</i>	74
<i>Tab. 30. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T – Etalon, L<sub>p</sub>=128 mm .....</i>	74

Tab. 31. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L – Etalon, $L_p=128$ mm .....	74
Tab. 32. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T – Etalon, $L_p=64$ mm .....	75
Tab. 33. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L – Etalon, $L_p=64$ mm .....	75
Tab. 34. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T – Etalon, $L_p=64$ mm .....	75
Tab. 35. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L – Etalon, $L_p=64$ mm .....	75
Tab. 36. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T – $H_2O$ .....	76
Tab. 37. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L – $H_2O$ .....	76
Tab. 38. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T – $H_2O$ .....	76
Tab. 39. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L – $H_2O$ .....	76
Tab. 40. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T – 40 % $H_2SO_4$ , 40 °C .....	77
Tab. 41. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L – 40 % $H_2SO_4$ , 40 °C .....	77
Tab. 42. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T – 40 % $H_2SO_4$ , 40 °C .....	77
Tab. 43. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L – 40 % $H_2SO_4$ , 40 °C .....	77
Tab. 44. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru T – 40 % $H_2SO_4$ , 21 °C .....	78
Tab. 45. Ohybové vlastnosti pro strukturu S4 ve směru L – 40 % $H_2SO_4$ , 21 °C .....	78
Tab. 46. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru T – 40 % $H_2SO_4$ , 21 °C .....	78
Tab. 47. Ohybové vlastnosti pro strukturu S8 ve směru L – 40 % $H_2SO_4$ , 21 °C .....	78
Tab. 48. Nastavené parametry pro cyklickou ohybovou zkoušku .....	79
Tab. 49. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T – Etalon, $L_p=128$ mm .....	80
Tab. 50. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru L – Etalon, $L_p=128$ mm .....	80
Tab. 51. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S8 ve směru T – Etalon, $L_p=128$ mm .....	80
Tab. 52. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S8 ve směru L – Etalon, $L_p=128$ mm .....	80
Tab. 53. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T – Etalon, $L_p=64$ mm .....	81
Tab. 54. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru L – Etalon, $L_p=64$ mm .....	81
Tab. 55. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S8 ve směru T – Etalon, $L_p=64$ mm .....	81

<i>Tab. 56. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S8 ve směru L – Etalon, <math>L_p=64</math> mm.....</i>	81
<i>Tab. 57. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T – H<sub>2</sub>O.....</i>	82
<i>Tab. 58. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru L – H<sub>2</sub>O.....</i>	82
<i>Tab. 59. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S8 ve směru T – H<sub>2</sub>O.....</i>	82
<i>Tab. 60. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S8 ve směru L – H<sub>2</sub>O.....</i>	82
<i>Tab. 61. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 40 °C.....</i>	83
<i>Tab. 62. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru L – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 40 °C.....</i>	83
<i>Tab. 63. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 21 °C.....</i>	83
<i>Tab. 64. Ohybové vlastnosti po cyklech pro strukturu S4 ve směru T – 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 21 °C.....</i>	83
<i>Tab. 65. Hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti pro ohybové zkoušky.....</i>	84
<i>Tab. 66. Hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti pro cyklické ohybové zkoušky .....</i>	84



## SEZNAM PŘÍLOH

Všechna naměřená data jsou přiložena na CD: Ondruš\_DP\_2011