

# Studium mechanických charakteristik laminátové stěny

Bc. Vladislav Horký

---

Diplomová práce  
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2005/2006

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

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

Téma práce: **Studium mechanických charakteristik laminátové stěny**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma
2. Připravte zkoušky v ohybu a tahu vzorků laminátových stěn dané struktury, včetně vzorků dlouhodobě exponovaných ve vodním prostředí a za zvýšených teplot a vzorků se šroubovými spoji
3. Experimentálně vyšetřete mechanické charakteristiky laminátové stěny, resp. šroubových spojů okrajů stěn
4. Navrhněte strukturální model mechanického chování laminátové struktury
5. Získané výsledky vyhodnoťte a stanovte doporučení pro praxi

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Jančář, J.: Organické materiály a kompozity**

**Šuba, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů**

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**14. února 2006**

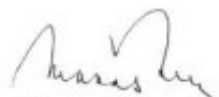
Termín odevzdání diplomové práce:

**31. května 2006**

Ve Zlíně dne 12. ledna 2006



prof. Ing. Josef Šimoník, CSc.  
*děkan*



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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce popisuje druhy, vlastnosti (materiálové charakteristiky) skelných laminátů, zkoušení výrobků z laminátů a možnosti využití laminátů obecně.

V praktické části diplomové práce se zabývám problematikou stárnutí laminátu vlivem prostředí ve kterém se vyskytuje. Jako prostředí byla zvolena voda, 30% kyselina sírová a teplo. Při zjišťování materiálových vlastností jako je modul pružnosti a mez pevnosti, provádím ohybové, tahové a tlakové zkoušky. Následně dané výsledky porovnávám s výchozím stavem a pokusím se prokázat možnou aplikaci bimodulární teorie pro dané lamináty.

Klíčová slova: Laminát, ohyb, tah, tlak, stárnutí

## **ABSTRACT**

The dissertation analyses different types and material characteristics of glass fibres as well as it deals with testing and possible usage of laminated products in general.

In the practical section of dissertation I am concerned with material ageing dependent on laminate occurrence in different environments – in water, in 30% sulphur acid and in warm. I examine material characteristics like modulus of elasticity and strength limit by flexion, pulling and pressing. I compare subsequent results with the initial condition and I attempt to approve these results by the application of bimodular theory.

Keywords: laminate plastic, flexion, pulling, pressing, ageing

Motto: *....naším osudovým omylem je naše nepozornost....*

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci psal sám a uvedenou literaturu pouze citoval.

Chtěl bych poděkovat Doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc. za kvalitní a metodické vedení mé diplomové práce a Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D, za pomoc při získávání podkladů pro kvalitní zpracování praktické části diplomové práce.

Souhlasím, aby vedoucí mé diplomové práce naložil s výsledky této práce tak, jak uzná za vhodné.

Ve Zlíně dne: .....

.....

Podpis diplomanta

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 LITERÁRNÍ STUDIE</b> .....	<b>11</b>
1.1 PŘIBLÍŽENÍ PROBLEMATIKY .....	11
1.2 DRUHY POLYESTEROVÝCH SKELNÝCH LAMINÁTŮ .....	11
1.3 VLASTNOSTI POLYESTEROVÝCH SKELNÝCH LAMINÁTŮ .....	13
1.3.1 Laminát jako anizotropní materiál .....	14
1.3.2 Rovnice elasticity pro anizotropní materiály.....	15
1.3.3 Konstituční rovnice anizotropních materiálů .....	19
<b>2 VÝROBA SKELNÝCH LAMINÁTŮ</b> .....	<b>25</b>
2.1 MATERIÁLY K VÝROBĚ SKELNÝCH LAMINÁTŮ.....	26
2.2 TECHNOLOGIE LAMINOVÁNÍ .....	34
2.2.1.1 Předformovací metoda .....	38
2.2.1.2 Lisování suchého, pryskyřicí předimpregnovaného textilu .....	41
2.2.1.3 Kontinuální procesy .....	42
2.3 VOLBA TECHNOLOGIE LAMINOVÁNÍ .....	43
2.4 OBRÁBĚNÍ POLYESTEROVÝCH SKELNÝCH LAMINÁTŮ .....	44
2.5 ZKOUŠENÍ VÝROBKŮ Z LAMINÁTŮ .....	45
2.6 MOŽNOSTI VYUŽITÍ LAMINÁTŮ .....	46
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>50</b>
<b>3 STANOVENÍ CÍLŮ</b> .....	<b>51</b>
<b>4 ZKOUŠKY V OHYBU, TAHU A TLAKU LAMINÁTOVÝCH STĚN</b> .....	<b>52</b>
4.1 STRUKTURA LAMINÁTOVÝCH STĚN .....	52
4.1.1 Postup a podmínky testování materiálu .....	53
4.1.2 Typy prováděných zkoušek .....	55
4.2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY LAMINÁTU .....	57
4.2.1 Mechanické namáhání laminátu v ohybu .....	58
4.2.1.1 Po dodání .....	58
4.2.1.2 Etalon .....	59
4.2.1.3 2000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	59
4.2.1.4 4000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	60
4.2.1.5 500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	61
4.2.1.6 8 hodin při 150°C.....	61
4.2.2 Mechanické namáhání laminátu v tahu .....	62
4.2.2.1 Po dodání .....	62
4.2.2.2 Etalon .....	63
4.2.2.3 2000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	63
4.2.2.4 4000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	64
4.2.2.5 500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	65

4.2.2.6	8 hodin při 150°C.....	65
4.2.3	Mechanické namáhání laminátu v tlaku.....	66
4.3	ZPRACOVÁNÍ DAT MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ LAMINÁTU.....	67
4.3.1	Po dodání.....	67
4.3.2	Vliv vody – 2000 hodin a 4000 hodin v H <sub>2</sub> O.....	70
4.3.3	500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	73
4.3.4	8 hodin při 150°C.....	77
<b>5</b>	<b>ANALYTICKÉ VÝPOČTY PRO LAMINÁTOVOU STRUKTURU .....</b>	<b>80</b>
5.1	SOUČINITELE A A B .....	80
5.1.1	Definice postupů a prostředků ke stanovení součinitelů.....	80
5.1.2	Stanovení součinitele $\alpha$ .....	81
5.1.3	Stanovení součinitele $\beta$ .....	82
5.2	NÁVRH STRUKTURNÍHO MODELU MECHANICKÉHO CHOVÁNÍ LAMINÁTU .....	83
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>85</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>86</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>87</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>89</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>94</b>

## ÚVOD

Největší jednorázovou stavební aplikací nejběžnějších sklolaminátových materiálů v Evropě, a to ve formě tažených vláknových kompozitních profilů (v ČR vyráběných např. firmou Prefa Brno, závod kompozity), bylo jejich použití při stavbě tunelu pod kanálem La Manche, kde bylo 3500 t tažených kompozitních profilů polyester/sklo použito k montáži kabelových tratí s vynikající odolností proti korozi a nehořlavostí. V ČR byla do roku 1994 odhadována spotřeba nejrůznějších typů dlouhvláknových kompozitů na 2-3 tisíce tun ročně, většinou ve formě ručně kladených laminátových polotovarů. V přepočtu na jednoho obyvatele to tedy bylo zhruba 15krát méně než v USA a 10krát méně než v Japonsku a zemích EU. Výrobní základna je i přes velmi dynamický rozvoj zaznamenaný především v posledních 3-4 letech v ČR podobně jako v celé Evropě značně roztržštěná. Přesto se odhaduje meziroční nárůst kapacity na zhruba 10 % a výroba se přiblížila 10 tisíci tunám ročně. Právě roztržštěnost výrobních kapacit, malá informovanost technické veřejnosti, její větší konzervativnost a nedostatek technických norem pro konstruování s kompozity jsou hlavními důvody zaostávání Evropy za Japonskem a USA v této oblasti. Největší jednorázovou aplikací vláknových kompozitů v ČR byly pochůzkové rošty pro čističku odpadních vod v Prostějově v rozsahu kolem 5 tun (Prefa Brno) a pochůzkové rošty a lávky u kamencového jezírka v Mostě (cca 2 tuny, Prefa Brno).

Skutečností, která vedla k obrovskému rozvoji vláknových kompozitů v posledních dvaceti letech a která odlišuje kompozity od tradičních materiálů, je i to, že vláknové kompozity jsou obvykle vyráběny v jednom kroku zároveň s konečným tvarem dílce či výrobku. To znamená, že kompozitní materiály jsou do značné míry šity na míru konečné aplikace, a to nejen svou strukturou a vlastnostmi, ale i výrobní technologií. Nejtradičnějším a technologicky nejjednodušším způsobem výroby je ruční kladení, kdy je skleněná výztuž kladena na kopyto či do formy, kde je následně prosycena pojivem obsahujícím všechna aditiva nutná k vytvrzení. Požadovaná tloušťka je budována postupně z vrstev (laminace), poté je pojivo vytvrzeno za pokojové či zvýšené teploty a dílec je vyjmut z formy či sejmut z kopyta pro konečné dokončení. Tato technologie je kapitálově nejméně náročná (pokud nejsou používány k tvrzení autoklávy), poskytuje však kompozity s nejnižšími hodnotami mechanických vlastností. Umožňuje však vyrábět i velmi složité komplexní tvary, jako jsou různé vany, zásobníky, lodě atd. Zavedení automatizovaných výrob kompozitních materiálů, jakými je tažení (pultruze), navíjení atd., si vynucuje změny formy vstupních suro-



vin, a jejich ekonomika je tedy silně závislá na objemu výroby. Výsledné kompozity mají však mnohem reprodukovatelnější vlastnosti, velmi dobré konstrukční tolerance a existuje o nich relativně značné množství informací použitelných pro konstrukční výpočty.

## TEORETICKÁ ČÁST

## 1 LITERÁRNÍ STUDIE

### 1.1 Přiblížení problematiky

Lisovací hmoty na bázi syntetických pryskyřic musí vyhovovat spotřebiteli po stránce technologické i ekonomické. V technologickém hledisku je zahrnuta snadnost výroby, zpracování a vlastnosti výrobku, které se hodí pro zamýšlené použití. Ekonomická stránka je vyjádřena požadavkem dostupnosti surovin, levné výroby a zpracování bez nákladných investic.

Tímto je dán směr vývoje lisovacích hmot a snaha výrobců nabídnout spotřebiteli co nejširší paletu pryskyřic a umožnit mu tak výběr co nejvhodnější pryskyřice.

Požadavek výroby výlisků s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi bez použití velkých lisovacích tlaků a vysokých teplot vedl jednak k vyvinutí nízkotlakých pryskyřic a jednak k použití vláknitých plniv, která podobně jako ocelová armatura v betonu značně zlepšuje mechanické vlastnosti výrobků. Postupem času byla celulózová a azbestová vlákna nahrazována tkaninami ze skleněných a syntetických vláken. Ve výrobku nesou tyto tkaniny, mají velmi dobrou mechanickou pevnost, hlavní část mechanického namáhání, a pryskyřice, která je bez armování poměrně křehká, se stává pojivem mezi jednotlivými vrstvami. Tak vzniká nová druh konstrukčních materiálů – vrstevné hmoty, lamináty.

### 1.2 Druhy polyesterových skelných laminátů

Lamináty se vyrábějí lisováním a podle lisovacích tlaků se zhruba dělí na kontaktní (beztlakové), nízkotlaké (do  $30\text{kg/cm}^2$ ) a vysokotlaké, k jejichž výrobě je zapotřebí tlaků několika desítek až několika set  $\text{kg/cm}^2$ . Z vysokotlakých pryskyřic pro vrstevnaté hmoty lze uvést *melaminformaldehydové* kondenzáty pro výrobu dekoračních materiálů a elektroizolačních desek. Vynikají značnou tvrdostí, mají světlou barvu a výborné dielektrické vlastnosti. Protože pryskyřice je prakticky bezbarvá, dá se vybarvovat na světlé pastelové odstíny a dobře se uplatňuje jako dekorační obkládací materiál. Podmínkou pro dosažení dokonale lesklých povrchů je použití poměrně vysokých teplot a tlaků při lisování. Impregnuje se vodnými roztoky pryskyřic. Podmínkou je, že se poměrně velká část vody misí odpařit.

Prvními pryskyřicemi pro lisování středními nebo nízkými tlaky *fenoplasty* a to jak

*rezoly* tak i *novolaky*. Rezolovými pryskyřicemi, pokud mají vhodnou konzistenci se impregnuje přímo, novolakovými pryskyřicemi v alkoholických roztocích. Rozpouštědlo se musí před lisováním odpařit, takže hlavní nevýhodou novolaků je manipulace s rozpouštědly. Tato nevýhoda je částečně vyvážena suchým povrchem impregnovaného materiálu. Při vytvrzování v lisu se stejně jako u melaminových kondenzátů uvolňují plynné zplodiny – vodní pára, formaldehyd. Může se zde vyskytnout i čpavek. Pryskyřice jsou levné a mají dobrou tepelnou odolnost.

Ekonomicky výhodné jsou i pryskyřice *furanové*, které se vyznačují velkou tepelnou i chemickou odolností. Jejich většímu rozšíření brání obtížnější výroba a zpracování, horší mechanické vlastnosti, uvolňování těkavých zplodin při lisování a tmavé zabarvení.

V prodeji se vyskytují nízkotlaké pryskyřice silikonové. Jejich použití se omezilo na poměrně úzký okruh výrobků. Důvodem je jejich vyšší cena a horší mechanické vlastnosti. Mají však výbornou tepelnou stálost a elektrické vlastnosti.

Epoxidové pryskyřice se vyrábějí alkalickou kondenzací dichlórhydrinu nebo epichlorhydrinu a bis-4-fenoxypropanu-2,2. Konzistence pryskyřice se řídí vzájemným poměrem obou složek. Sklotextil se impregnuje buď roztokem pryskyřice v inertním rozpouštědle, které se musí po impregnaci odpařit, nebo v rozpouštědlech, jež se aktivně účastní vytvrzování a prakticky bezzbytku se zabudují do prostorové mříže. Takovými „aktivními“ rozpouštědly jsou např. glykol-bis-glycidéter nebo některé monomery jako styrén a butylmetakrylát. Epoxidové pryskyřice se vytvrzují za normální teploty přidávkem aminů, za zvýšené teploty přidávkem anhydritů organických kyselin. V případě, že je přítomen monomer jako rozpouštědlo, přidávají se ještě organické peroxidy. Epoxidové pryskyřice mají dobrou adhezi ke skelnému vláknu a malou objemovou kontrakci při vytvrzování (asi 0,3 až 0,4 %). Obojí dodává laminátům dobré mechanické vlastnosti a lepší odolnost proti vodě než polyestery. Malá smrštitivost a velká adheze ke kovům způsobují nesnáze při uvolňování z forem, což je spolu s vyšší cenou příčinou, proč se jich zatím používá daleko méně než pryskyřic polyesterových.

*Alylové* pryskyřice (alymery) jsou estery a étery alylalkoholu, který je spolu s alylchloridem výchozí surovinou pro jejich výrobu. Vzájemnou kombinací těchto sloučenin nebo jejich kopolymerací s jinými monomery se dosahuje poměrně širokého výběru požadovaných vlastností. Protože jsou to látky nízkomolekulární, které se dají dobře čistit desti-

lací nebo krystalizací, dávají polymerací zcela bezbarvé produkty, což je někdy žádoucí (např. pro optické materiály). Nevýhodou je poměrně malá reaktivita azylových sloučenin, takže k vytvrzování dochází teprve při teplotě nad 50 °C.

Dalšími typy kontaktních pryskyřic jsou nenasycené polyestery, vzniklé esterifikací dvojsytných kyselin dvojmocnými alkoholy. Komerční výrobky jsou roztokem těchto pryskyřic ve vhodném monomeru. Patří mezi jedny z nejmladších pryskyřic. Základní reakce je sice již velmi dlouho známá, avšak pryskyřice schopné praktického použití vznikly až těsně před druhou světovou válkou (v Anglii a USA). Dnes se vyrábějí ve velkém měřítku a v mnoha typech vhodných pro nejrůznější účely. Nejčastěji jako pojivo pro lamináty, jako zalévací hmoty nebo jako tzv. bezrozpuštědlové laky.[7]

### 1.3 Vlastnosti polyesterových skelných laminátů

Pokud jde o vlastnosti laminátů, oceňuje se především:

- výborná elektroizolační schopnost
- nemagnetičnost
- dobrá propustnost elektromagnetického vlnění
- malá tepelná vodivost
- dobrá odolnost proti působení povětrnosti
- dobrá odolnost proti působení četných chemikálií
- dobrá propustnost světla

Některé jeho vlastnosti, uváděné jako přednost, mohou být někdy nevítané: velká pružnost, nemagnetičnost, malá tepelná vodivost. Některými chemikáliemi se materiál porušuje. K tomu přistupují další nevýhody: malá produktivita práce, nepříjemné účinky polyesterové pryskyřice, iniciátoru a skleněných vláken na lidský organismus, malá tepelná odolnost (do 80°C), nereprodukovatelnost kvalitních výsledků při sériové výrobě i značná nákladnost laminátových výrobků.

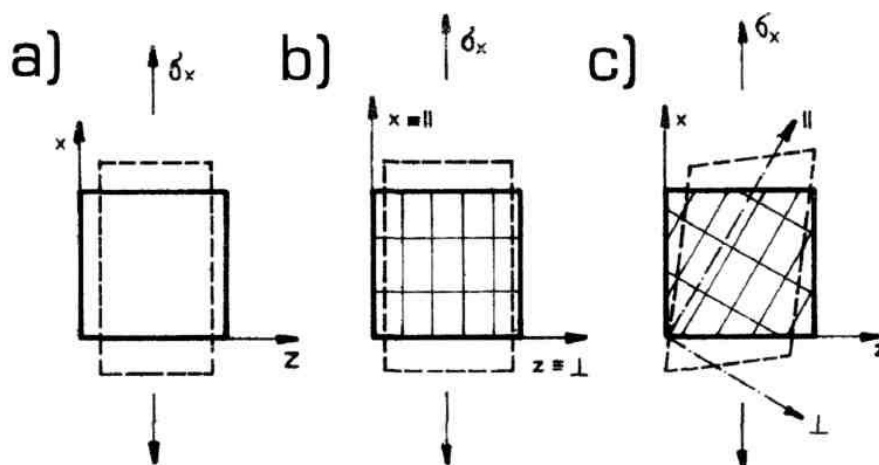
Při navrhování konstrukce laminátového výrobku se musí přihlížet ke všem zvlášt-

nostem, jimiž se tento materiál liší od tradičních a konstruktérům většinou dobře známých materiálů ostatních. Aby se podařilo zhotovit ze skleněho laminátu technicky vyvážený a esteticky působivý výrobek, musíme mít cit pro nový materiál a respektovat jeho zvláštnosti, umět využít jeho přednosti a potlačit nevýhody.

### 1.3.1 Laminát jako anizotropní materiál

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

Obecně mohou být laminy anizotropními materiály, tj. takovými, které vykazují různé mechanické vlastnosti v různých směrech. Je-li struktura plošného prvku souměrná k dvěma navzájem kolmým osám (např. jednosměrně vyztužená vrstva), hovoříme o zvláštním případě anizotropie vlastností – o ortotropii. Rozdíly v mechanickém chování izotropního, ortotropního a obecně anizotropního plošného prvku jsou znázorněny na Obrázek 1[1].



Obrázek 1. Mechanické chování a) izotropního, b) ortotropního, c) obecně anizotropního plošného prvku

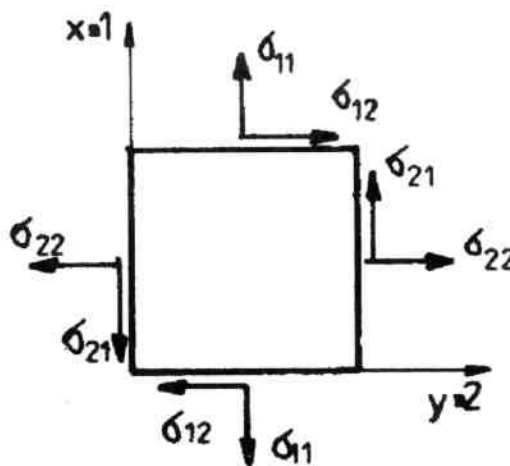
Jednoosé napětí způsobí v izotropní vrstvě pouze podélnou a příčnou normálovou

deformaci, úhly prvku zůstávají zachovány. Obdobně se chová ortotropní prvek, působí-li napětí ve směru některé osy symetrie jeho struktury. Obecně je však odezva materiálu různá ve směrech  $x$  a  $z$ , tj. napětí působící ve směru  $x$  vyvolá jiné hodnoty podélné a příčné deformace než stejné napětí působící ve směru  $z$ . Osy souměrnosti ortotropního prvku jsou nazývány rovněž jeho přirozenými silami. Nepůsobí-li napětí ve směru jedné z těchto os, vznikají nejen normálové, ale i smykové deformace – prvek se chová jako anizotropní.

Specifickou vlastností anizotropních materiálů je, že normálové napětí vyvolávají obecně nejen normálové, ale i smykové deformace, smyková napětí pak nejen smykové, ale i normálové deformace. S tímto vzájemným ovlivňováním normálových a smykových efektů jsme se u izotropních materiálů nesečkáme. Složitější mechanické chování v případě ortotropie a anizotropie znamená, že počet elastických konstant bude vyšší než u izotropního materiálu.[7]

### 1.3.2 Rovnice elasticity pro anizotropní materiály

Stav napětí v daném bodě tělesa je obecně popsán devíti složkami tenzoru napětí  $\sigma_{ij}$ ,  $i, j = x, y, z$ . Tomuto tenzoru odpovídá tenzor deformace s devíti složkami  $\varepsilon_{ij}$ . Omezíme-li se na případy dvouosé napjatosti tenkostěnných plošných výrobků, bude stav napjatosti určen čtyřmi složkami – Obrázek 2[1].



Obrázek 2. Příklad dvouosé napjatosti

Z momentové podmínky rovnováhy znázorněného prvku vyplývá, že  $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$ , takže jen tři složky jsou navzájem nezávislé – tenzor napjatosti je symetrický. Lineární vztah

mezi složkami deformace a napjatosti lze pak vyjádřit ve tvaru (pro dvouosou napjatost):

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

Zkráceně pak:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

a příčné zúžení:



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

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

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

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

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

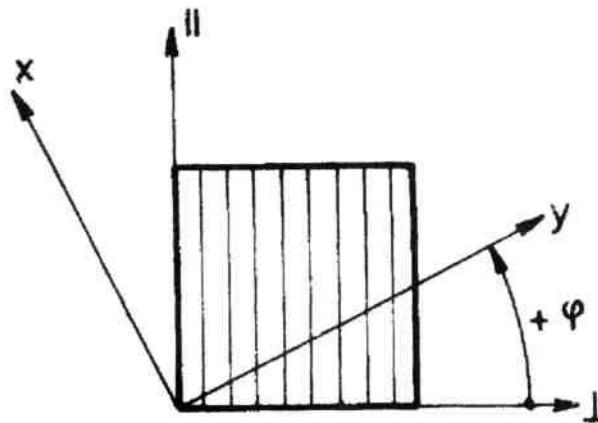
takže pouze čtyři z pěti konstant  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ,  $G_{12}$  jsou navzájem nezávislé. Rovnice elasticity (1) můžeme psát i ve tvaru :

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

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

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

Jak již bylo řečeno, je struktura laminátů vytvořena spojením několika lamin v jisté posloupnosti orientace. Směry hlavních os každé vrstvy tedy svírají různé úhly se základními referenčními osami výrobku. Je proto nutno znát mechanické chování ortotropní laminy z hledem k libovolným osám, svírajícím s jejími přirozenými osami úhel  $\varphi$  - Obrázek 3. [1]



Obrázek 3. Mechanické chování ortotropní laminy  
vzhledem k libovolným osám

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

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

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

kde transformační matice je určena výrazem:

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

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

$$[\sigma] = [S] \cdot [T] \cdot [\varepsilon']$$

s použitím (12) pak

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

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

$$[S'] = [T]^{-1} \cdot [S] \cdot [T] \quad (15)$$

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

$$\begin{aligned}
 S'_{11} &= S_{11} \cos^4 \varphi + S_{22} \sin^4 \varphi + 2(S_{12} + 2S_{13}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \\
 S'_{22} &= S_{11} \cos^4 \varphi + S_{22} \sin^4 \varphi + 2(S_{12} + 2S_{33}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \\
 S'_{12} &= (S_{11} + S_{22} - 4S_{33}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + S_{12} (\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi) \\
 S'_{33} &= (S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - 2S_{33}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + S_{33} (\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi) \\
 S'_{13} &= (S_{11} - S_{12} - 2S_{33}) \cos^3 \varphi \sin \varphi - (S_{22} - S_{12} - 2S_{33}) \cos \varphi \sin^3 \varphi \\
 S'_{12} &= (S_{11} - S_{12} - 2S_{33}) \cos \varphi \sin^3 \varphi - (S_{22} - S_{12} - 2S_{33}) \cos^3 \varphi \sin \varphi
 \end{aligned} \tag{16}$$

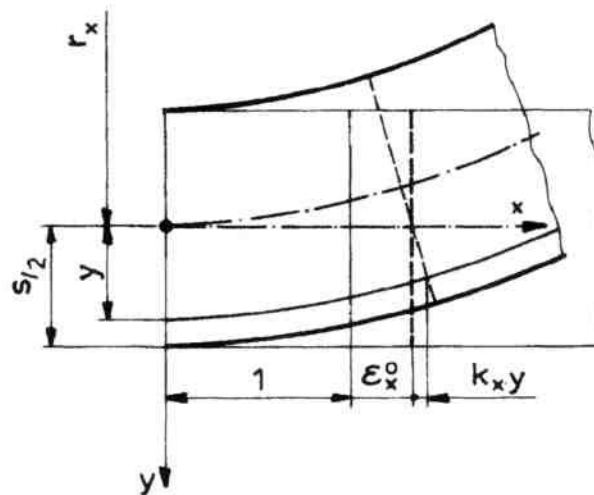
Matrice  $[S']$  má všechny prvky nenulové jako matice pro zcela anizotropní laminu. Zdá se proto, že k popisu elastického chování ortotropní laminy v obecné orientaci je třeba šesti elastických konstant. Prvky  $S'_{13}$  a  $S'_{23}$  lze však ve skutečnosti vyjádřit jako lineární kombinaci čtyř základních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

$$[C'] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_z}{E_z} & -\frac{\mu_x}{E} \\ -\frac{\nu_x}{E_x} & \frac{1}{E_z} & -\frac{\mu_z}{E} \\ -\frac{\mu_x}{E} & -\frac{\mu_x}{E} & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix} \tag{17}$$

Elastické konstanty  $E_x$ ,  $E_z$ ,  $\nu_x$ ,  $\nu_z$ ,  $G_{xz}$ ,  $\mu_x$ ,  $\mu_z$ , vztahující se k libovolným osám  $x$ ,  $z$  lze vyjádřit pomocí čtyř nezávislých základních veličin  $E_{\parallel}$ ,  $E_{\perp}$ ,  $G_{\perp\parallel}$  a  $\nu_{\parallel}$ . [8]

### 1.3.3 Konstituční rovnice anizotropních materiálů

Mechanické vlastnosti jednosměrně vyztuženého plastu jsou ve směru vláken dány v podstatě pouze vlastnosti vláken. V příčném směru jsou rozhodující vlastnosti plastové matrice. V praktických aplikacích by tak byly vlastnosti v příčném směru neostatečné. Jsou proto lamináty tvořeny z více jednosměrných vrstev s navzájem různou orientací a navzájem spojených tak, aby vytvářely integrální konstrukční prvek s požadovanými vlastnostmi v jednotlivých směrech. Analýzu mechanického chování plošného laminátového prvku založíme na předpokladech analogických k předpokladům pro vrstevnaté izotropní desky. Uvažovány jsou opět pouze složky deformace v rovinách rovnoběžných se střední plochou, Obrázek 4.[1]



Obrázek 4. Příklad deformace

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

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_z^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{bmatrix} + y \begin{bmatrix} k_x \\ k_z \\ k_{xz} \end{bmatrix} \quad (18)$$

ve zkrácené formě pak

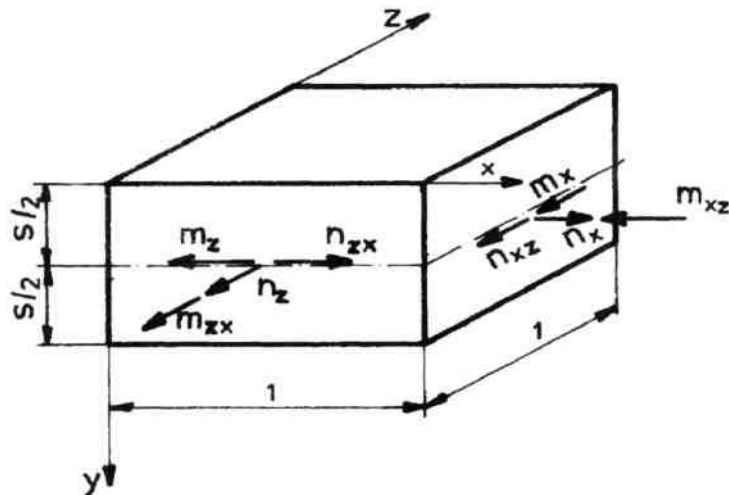
$$[\varepsilon] = [\varepsilon]^0 + y[k] \quad (19)$$

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

$$[\sigma] = [S] \cdot [\varepsilon] = [S] \cdot [\varepsilon]^0 + y \cdot [S] \cdot [k] \quad (20)$$

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

Ekvivalent systému sil a momentů vztahených ke střední ploše laminátu je znázorněn na Obrázek 5.[1]



Obrázek 5. Ekvivalentní systém sil a momentů

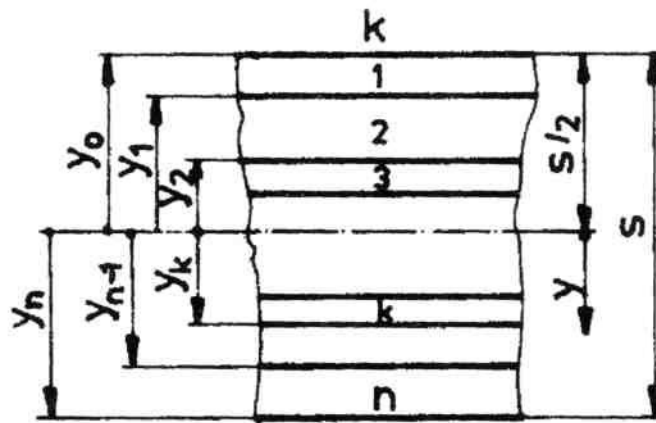
Rovnice rovnováhy jsou dány vztahy analogickými k  $\int_{(s)} \sigma_i^M(y) dy = n_i; i = x, z$  a

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

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_z \\ n_{xz} \end{bmatrix} = \int_{(s)} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} dy \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_z \\ m_{xz} \end{bmatrix} = \int_{(s)} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} y dy \quad (22)$$

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



Obrázek 6. Označení vrstev

S označením znázorněným na Obrázek 6 [1] lze rovnice (21) a (22) psát ve tvaru

$$[n] = \sum_{k=1}^n \int_{y_{k-1}}^{y_k} [\sigma] dy \quad (23)$$

$$[m] = \sum_{k=1}^n \int_{y_{k-1}}^{y_k} [\sigma] y dy \quad (23)$$

Dosazením za sloupce napětí  $[\sigma]$  podle rovnice (20) do rovnic rovnováhy (23), (24) bude dále

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

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

po integraci pak

$$[n] = [A] \cdot [\varepsilon]^0 + [B] \cdot [k]; [m] = [B] \cdot [\varepsilon]^0 + [D] \cdot [k] \quad (24)$$

s označením

$$A = \sum_{k=1}^n [S]_k (y_k - y_{k-1})$$

$$B = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [S]_k (y_k^2 - y_{k-1}^2)$$

$$D = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [S]_k (y_k^3 - y_{k-1}^3)$$

Vztahy (24) vyjadřují závislosti složek vnitřních sil a momentů v průřezech laminátů na jeho deformačním stavu. Matice tahové pevnosti [A] váže složky sil deformacemi střední roviny. Matice ohybové tuhosti [D] váže spolu složky momentů a křivosti střední plochy. V ortotropní vrstvě s obecnou orientací je smykové napětí vázáno na normálové složky deformace, normálová napětí na smykové složky deformace. Proto u laminátu s obecnou skladbou vyvolává účinek např. normálových sil mimo normálové deformace střední roviny i smykovou deformaci. Existence matice vazebné tuhosti [B] v konstitučních rovnicích (24) pak způsobuje mechanickou vazbu mezi ohybem a tahem laminátové plošné konstrukce. Síly ve střední rovině proto obecně způsobují kromě deformací střední roviny i její průhyb a zkroucení, tedy její zakřivení. Podobně ohybové a kroutící momenty způsobují kromě zakřivení i normálové a smykové deformace střední plochy. Tento tzv. „coupling effect“ byl i experimentálně potvrzen. Podle (24) je např. pro dvouosý tah v ose  $x$  a  $z$

$$n_x = A_{11}\epsilon_x^0 + A_{12}\epsilon_z^0 + A_{13}\gamma_{xz}^0 + B_{11}k_x + B_{12}k_z + B_{13}k_{xz}$$

$$n_z = A_{21}\epsilon_x^0 + A_{22}\epsilon_z^0 + A_{23}\gamma_{xz}^0 + B_{21}k_x + B_{22}k_z + B_{23}k_{xz}$$

Pokud [B] = 0,  $A_{13} = 0$ ,  $A_{23} = 0$ , je

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

tj. laminátový prvek se chová jako ortotropní.

Vzájemná vazba mezi tahovými a ohybovými efekty, představována maticí [B], nevyplývá jen z ortotropie či anizotropie jednotlivých vrstev, ale je spíše důsledkem způsobu vrstvení laminátu. Matice [B] je identicky rovna nule pro lamináty, v jejichž struktuře existuje ke každé vrstvě nad střední plochou identická vrstva umístěná ve stejné vzdálenosti pod střední plochou. Lamináty vyráběné vrstvením lamin symetricky ke střední ploše jsou označovány jako symetrické. Představují nejčastěji vyráběný typ laminátu. Jejich výhodou je eliminace tahové ohybové vazby a tím odstranění nežádoucího borcení plochy laminátu při zatížení v jeho rovině, případně při teplotních změnách.

Kromě podmínky  $[B] = 0$  je pro ortotropní chování laminátového prvku při zatížení silami v jeho rovině nutno splnit, aby  $A_{13} = 0$ ,  $A_{23} = 0$ . Příspěvek  $k$ -té vrstvy-laminy k prvku matice  $[A]$  je dán součinitelem odpovídajícího prvku matice  $[S]_k$  a tloušťky vrstvy. příspěvek jedné vrstvy tak lze eliminovat příspěvkem jiné vrstvy stejné tloušťky, když její odpovídající prvek  $S'_{ij}$  má opačné znaménko. Z rovnic (16) vyplývá, že  $S'_{11}$ ,  $S'_{22}$ ,  $S'_{12}$ ,  $S'_{33}$  jsou vždy kladné, takže  $A_{11}$ ,  $A_{22}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{33}$  nemohou být rovny nule.  $S'_{13}$  a  $S'_{23}$  jsou však nulové  $\varphi = 0^\circ$  a  $90^\circ$  a mohou nabývat kladných nebo záporných hodnot. Pro kladnou nebo zápornou orientaci  $\pm\varphi$ . Podmínka  $A_{13} = 0$ ,  $A_{23} = 0$  je tak splněna, pokud pro každou vrstvu orientovanou pod úhlem  $+\varphi$  existuje vrstva stejné tloušťky a ortotropie orientované pod úhlem  $-\varphi$ . Vzájemné polohy obou vrstev jsou libovolné. Tak lze navrhnout symetrický ( $[B] = 0$ ) a zároveň ortotropní laminát (vzhledem k silám v jeho střední rovině).

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

1. Celkový počet lamin je nejméně 3.
2. Jednotlivé laminy musí mít identické matice tuhosti  $[S]$  a tloušťky.
3. Sousední laminy musí být navzájem orientovány pod stejnými úhly.

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

Prvky  $D_{13}$ ,  $D_{23}$  matice ohybové tuhosti  $[D]$  jsou nulové, jsou-li všechny vrstvy orientovány pouze pod úhly  $0^\circ$  nebo  $90^\circ$ , nebo jestliže ke každé vrstvě orientované pod úhlem  $+\varphi$  v určité vzdálenosti nad střední rovinou existuje identická vrstva umístěná ve stejné vzdálenosti pod střední rovinou, orientovaná pod úhlem  $-\varphi$ . Prvky  $D_{13}$ ,  $D_{23}$  tedy nejsou nulové pro lamináty symetrické, s výjimkou těch, jejichž vrstvy jsou orientovány pouze pod úhly  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Je-li však laminát vyroben střídavým vrstvením většího počtu lamin s orientací  $\pm\varphi$ , nabývají prvky  $D_{13}$ ,  $D_{23}$  pouze malých hodnot.[7]



## 2 VÝROBA SKELNÝCH LAMINÁTŮ

Skelný laminát se vyrábí ze skleněných vláken prosycených pryskyřicí. Sklo se používá buď jako provazec (rayon – vlákna jsou v jednom směru, mohou být předepjatá), nebo jako tkanina (vlákna jsou pouze ve dvou kolmých směrech, nemusí jich být v obou směrech stejně) a konečně jako rohož (s nepravidelnou orientací vláken), kdy vyplňuje rovinu ve všech směrech.

Pevnost běžně vyráběného skelného laminátu se v tahu blíží pevnosti normální oceli – tah přenáší sklo. Namáhání v tlaku přenáší pryskyřice, která má vysoké pevnosti, přibližně třetinu pevnosti oceli. Se vzpěrem, dynamickým namáháním a stabilitou konstrukce je to mnohem horší, laminát je výborný materiál, ale konstrukce musí odpovídat jeho specifickým vlastnostem.

Aby se dosáhlo vyšší pevnosti v tahu, je nutné mít co nejvíce skla a co nejméně pryskyřice. Při tom musí být každé vlákno obaleno, nesmí zůstat neprosycená místa. Bubliny vzduchu také velice snižují pevnost. Z tohoto důvodu má již laminát lisovaný pod velkým tlakem značně vyšší pevnost než laminát vyráběný vytvrzování bez tlaku.

Polyesterové skelné lamináty jsou vrstevné hmoty, které se vyrábějí tak, že jednotlivé vrstvy skleněné tkaniny nebo jiné skleněné výztuže se impregnují a vzájemně spojují polyesterovou pryskyřicí. Řadíme je mezi reaktoplasty, třebaže vlivem zvýšené teploty měknou.

Polyesterové pryskyřice se začaly vyrábět před druhou světovou válkou v USA, ale první dílčí chemické reakce, jichž se dnes při jejich výrobě užívá, byly známy už v polovině devatenáctého století.

K intenzivnímu výzkumu vlastností polyesterových skelných laminátů došlo za druhé světové války v USA a ve Velké Británii. Vedla k tomu snaha nahrazovat nedostatek kovů, potřebných pro vojenské účely, jinými materiály. Z polyesterových skelných laminátů se začaly vyrábět ochranné vesty proti střelám z lehkých zbraní, nádrže na benzín pro letadla, záchranné čluny, kryty radarů. Postupným zdokonalováním se polyesterový skelný laminát nakonec stal z pouhé náhražky kovů samostatným konstrukčním materiálem vynikajících vlastností.

Původní tendence pohlížet na plastické hmoty jako na nedokonalou náhražku

osvědčených tradičních materiálů, zvláště kovů, byla u polyesterových skelných laminátů brzy vystřídána až nekritickým obdivem k jejich vynikajícím vlastnostem, zejména mimořádné mechanické pevnosti, lehkosti, nemagnetičnosti, odolnosti proti povětrnostním vlivům a možnosti vyrábět z nich tvarově komplikované a rozměrné díly. Nekritičnost vedla některé konstruktéry i k nevhodným aplikacím, což se po špatných zkušenostech projevilo částečným poklesem o tento materiál. Výrobci laminátů tím však získali čas k důkladnému, serióznímu zhodnocení jeho výhod i nevýhod. Studovalo se chování laminátů za různých podmínek a při různém namáhání, výsledky byly matematicky zhodnoceny. Byly vypracovány speciální zkušební metody, jak to požadovali zájemci ve stavebnictví a strojnictví.[4]

## 2.1 Materiály k výrobě skelných laminátů

### a) skleněné výztuže

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

Výroba skleněných vláken se stala samostatným průmyslovým odvětvím, zejména, když se podařilo vyvinout nízkotlaké polyesterové pryskyřice, k jejichž zpevnování se skelná vlákna neobyčejně dobře hodí. Jejich sortiment je dnes už tak široký, že výrobce skelných laminátů musí mít dobrý přehled o charakteristických vlastnostech jednotlivých výrobků, protože všechny druhy skelných vláken a tkanin nejsou pro ztužování plastických hmot stejně vhodné. Velejemná skelná vlákna ( $0,2 - 1,5\mu$ ) se vyrábějí vesměs foukáním roztavené skloviny za velkých rychlostí a jsou získávána ve formě stříže o délce 20-50mm. Podobně i středně jemná vlákna ( $2 - 3,5\mu$ ) se získávají foukáním nebo k některým speciálním účelům i tažením z platinových pecí. Jemná skleněná vlákna ( $4 - 10\mu$ ) se vyrábějí ve formě stříže a nekonečných vláken. Obě formy se dají dobře zpracovat na tkaniny a jiné tkalcovské výrobky.

K výrobě skleněných vláken se hodí různé skloviny. Různé chemické složení sklovin dodává skleněným vláknům specifické vlastnosti – pevnost, ohebnost, chemickou odolnost, elektrické izolační schopnosti, zbarvení nebo i tepelnou odolnost. V průmyslu plastických hmot, k výrobě laminátů se nejčastěji používá vláken vyrobených ze speciální

bezalkalické bóríté skloviny. Jako bezalkalické e označují takové skloviny, které obsahují méně než 1% alkálií. Z těchto sklovin se vyrábějí nekonečná vlákna a stříž. Tyto dva hlavní druhy skleněných vláken jsou v poslední době skoro výhradně určeny pro laminování.

Ze základních pramenů skleněných vláken se sdružují příze a dalším sdružováním přízí vznikají nitě. Přitom dostávají příze i výsledná nit zákrutu, který je buď pravotočivý (Z), nebo levotočivý (S). Celkový zákrut nitě je opačného smyslu než u přízí, z nichž byla vyrobena. V zásadě rozlišujeme tři druhy skleněných přízí:

- 1) příze bez zákrutů (nebo s max. 60 zákruty na 1m)
- 2) příze středně kroucené (do 200 zákrutů na 1m)
- 3) příze vysoce kroucené (od 200 do 400 zákrutů na 1m)

Největší význam pro ztužování plastických hmot mají příze bezzákrutové ve formě rovnoběžně sdružených pramenů, jako tzv. pramence (rovings). Z pramenců se vyrábějí rohože různé tloušťky i hustoty a s různými apretacemi a pojivy:

- 1) lepené rohože spojené látkami snadno rozpustnými v polyesterových pryskyřicích
- 2) lepené rohože spojené látkami nespustnými v polyesterových pryskyřicích
- 3) tvarovací rohože bez jakéhokoliv chemického propojení
- 4) jednosměrné rohože vyrobené tak, že vlákna jsou orientována převážně jedním směrem a rohože jsou prošity v kolmém směru
- 5) dvousměrné rohože, orientované ve dvou směrech, které nejsou chemicky propojeny, nýbrž jen mechanicky zpevněny
- 6) křížové rohože „Diamond“, vyrobené z nekonečných vláken orientovaných ve dvou směrech svírajících spolu úhel cca 15°, takže se už blíží vlastnostmi tkaninám; jsou spojeny látkami těžko rozpustnými v polyesterových pryskyřicích

Skleněné nitě, příze radonového typu i typu angorového a pramence se zpracovávají na tkaniny. Jsou dražší než rohože, dávají však pevnější výrobky. Nejdůležitější jsou výrobky z pramenců. Podmínkou úspěšné a ekonomické výroby skelných laminátů je správná volba skelné laminy, která je při minimálních nákladech schopna zajistit žádanou pev-

nost. Skleněný textil je materiál anizotropní a tento charakter si podržují i lamináty. Rozložení pevnosti závisí na vazbě a na jakosti materiálu.

Podle vazby se tkaniny dělí na tři základní druhy:

- a) Plátňová vazba – vazné body se střídají tak, že tvoří souvislé diagonály ve dvou směrech. Je nejjednodušší, nejhustší a také nejpevnější.
- b) Keprová vazba – vazné body se střídají tak, že tvoří souvislé diagonály v jednom směru, zcela odděleně od sousedních. Tvoří svými vlastnostmi přechodný typ mezi plátnem a atlasovou vazbou.
- c) Atlasová (saténová) vazba – vazné body jsou navzájem zcela izolovány. Je nejméně pevná, ale nejpoddajnější. Vazné body jsou obvykle téměř zaryty a povrch tkaniny je vytvořen osnovní nebo útkovou nití.

Při navrhování laminátových konstrukcí je třeba mít stále na zřeteli mechanickou anizotropii sklotextilu. Je-li tato vlastnost nežádoucí, lze ji potlačit vhodným skládáním vrstev, např. tak, že osnovy dvou sousedních vrstev jsou vždy proti sobě o určitý úhel pootočeny. Jindy je naopak anizotropie vítána, má-li laminát vykazovat maximální pevnost v určitém směru.[4]

#### **b) polyesterové pryskyřice**

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

Základními surovinami pro výrobu pryskyřic jsou nenasycené dikarbonové kyseliny, resp. jejich anhydridy, dvojmocné alkoholy a monomery, ve kterých se vyrobený polyester rozpouští. Vedle nenasycených kyselin se používá i dikarbonových kyselin nasyčených, které zlepšují mechanické vlastnosti výrobků, dále vícesytných kyselin a alkoholů pro zmenšení sklonu ke krystalizaci a zvýšení tepelné odolnosti a konečně monokarbonových kyselin a monoalkoholů, kterými se zmenšuje viskozita pryskyřice a zlepšuje snášlivost s monomerem.

Vlastní polyester lze pokládat za polyfunkční monomer, protože má ve svém řetězci více dvojných vazeb, zpravidla tři až pět na jednu molekulu. Typickým a nejčastěji použí-

vaným komonomerem je styrén, který je dvojfunkční. Vytvrzovací proces je pak radikálovou kopolymerací obou složek. Vytvrzená polyesterová pryskyřice je netavitelná a nerozpustná. Při zahřívání však měkne a v některých rozpouštědlech (acetonu, chloroformu, apod.) bobtná. Čím dokonaleji byla vytvrzená, tj. čím hustší je zesíťování, tím je tepelně odolnější a tím méně bobtná. Stejný vliv má stupeň vytvrzení i na mechanické vlastnosti. Proto je stupeň vytvrzení předmětem stálého zájmu.

Polyesterové pryskyřice přicházejí na trh v několika typech:

1) *univerzální typ pro výrobu laminátů*

Podle rychlosti vytvrzování můžeme pryskyřice rozdělit na velmi reaktivní, středně reaktivní a málo reaktivní. Reaktivita závisí na množství a druhu stabilizátoru a na nenasycenosti pryskyřice. Nenasycenost zvyšuje nejen reaktivitu, ale i tvrdost a tepelnou odolnost. Tvrdé typy dávají lamináty s větší tepelnou odolností, kdežto z méně reaktivních vznikají pružnější a ohebnější lamináty. Méně reaktivní typy pryskyřic jsou vhodné pro odlévání, protože průběh vytvrzování se u nich dá lépe kontrolovat a odlitky nepraskají jak tomu bývá u reaktivnějších pryskyřic. Pro svou pružnost se také hodí k povrchové úpravě laminátů (předželatinový nátěr), neboť povrchové vrstvy pryskyřice neobsahují ztužující vlákno a jsou křehké, při úderu snadno praskají. Proto se do nich přidávají ještě typy změkčující - obvykle vyrobené na bázi kyseliny adipové nebo sebakové.

2) *tepelně odolné pryskyřice*

Běžné typy pryskyřic jsou tepelně celkem málo odolné, a proto je použití laminátů omezeno na teplotu do 80-100°C. Pro vyšší teploty se musí volit speciální pryskyřice s větší tepelnou odolností.

3) *pryskyřice thixotropní*

Na svislých stěnách forem při kontaktním tváření se něžné typy pryskyřic neudrží a stékají dolů. Tím vznikají nehomogenní lamináty s místy nepropojenými dostatečně pryskyřicí a málo mechanicky pevnými. Na taková místa se nanáší thixotropní pryskyřice, která nemůže téci, ale je přitom dostatečně málo viskózní, aby se do ní dal dobře vmíchat katalyzátor i urychlovač.

4) *pryskyřice stabilizované proti UV paprskům*

Obsahují malé procento látek absorbujících UV paprsky stejné délky jako polyeste-

ry. Tyto látky chrání lamináty vystavené slunečnímu záření před žloutnutím a poklesem mechanických vlastností. Musí mít určité vlastnosti, jako je dobrá rozpustnost v polyesterových pryskyřicích, a nesmějí zabraňovat vytvrzování ani se nesmějí porušovat běžnými vytvrzovacími katalyzátory.

5) *pryskyřice neinhibované*

Vrstva pryskyřice, která je ve styku se vzdušným kyslíkem, se špatně vytvrzuje za normální teploty. Proto jsou lamináty vyrobené kontaktním tvářením poněkud lepkavé na plochách nechráněných před vzdušným kyslíkem. Tato lepkavost se odstraní tím, že se laminát nastříká tzv. neinhibovanou pryskyřicí, která obsahuje několik setin až desetin procenta parafinu nebo jiné voskovité látky, prakticky nerozpustné ve vytvrzující se pryskyřici. Tato látka při vytvrzování vyplyne na povrch a v tenkém filmu chrání pryskyřici před nevíтанým účinkem vzdušného kyslíku. Těchto pryskyřic se také může použít pro beztlakové tvářením přímo při laminování.

6) *nehořlavé pryskyřice*

Velkou nevýhodou polyesterových laminátů je jejich hořlavost. Proto se některé výrobky zhotovují z tepelně velmi odolných pryskyřic, které se těžko přeměňují v plyny. Tzv. *samozhášitelné* pryskyřice obsahují chlór nebo jiné látky, které potlačují reakce probíhající během hoření, takže hořící laminát po oddálení od plamene nebo jiného zdroje ohně zhasne. Tuto samozhášitelnost lze vyvolat i u běžných typů pryskyřic přidáním některých změkčovadel (chlórované parafíny a vosky) nebo látek obsahujících chlór, fosfor, dusík, bór, organické sloučeniny antimonu nebo plniva, jako je kysličník antimonitý a chlorid antimonitý, nebo jejich kombinací. Nevýhodou těchto látek, zvláště změkčovadel, je jejich nepříznivý vliv na mechanické pevnosti laminátů a na jejich tepelnou odolnost.

**c) iniciátory a urychlovače (tužidla)**

Nenasycené polyesterové pryskyřice se vytvrzují za studena tzv. iniciačním systémem, tj. použije se iniciátoru, který umožňuje polymerační reakci, a urychlovače, jímž lze průběh reakce kontrolované urychlit. Nezáleží na tom, v jakém pořadí se složky do směsi přidávají, musí se však dbát, aby nedošlo k vzájemnému smíšení těchto složek ještě před přidáním do směsi.

Výběr iniciačních systémů i v technickém měřítku je dnes neobyčejně bohatý, ale obvykle vystačí zpracovatel s dvěma, nanejvýš třemi druhy peroxidů. Při normální teplotě

se bude iniciovat osvědčeným systémem kobalt - peracetal. Nejčastějšími urychlovači jsou kobaltnaftenát a rodanokobaltnatan amonný. Pro vytvrzování za normální teploty je k dispozici kombinace -dibenzoylperoxid - dimetylanilín. Pro střední teploty (70-120°C) vyhovuje většinou dibenzoylperoxid. Je-li žádoucí vést kopolymeraci při teplotách ještě vyšších nezbyvá než sáhnout ke speciálním iniciátorům. Protože čisté peroxidy jsou látky explozivní a jsou-li krystalické, obtížně se rozpouštějí v polyesterové pryskyřici, dodávají se většinou ve formě 40-60%ní pasty nebo roztoku ve změkčovadle, které usnadňuje jejich rozmíchání. Kapalně skupenství tužidel je pro provozní podmínky výhodnější, protože umožňuje snadné dávkování odměřováním objemu. Řízení rychlosti vytvrzování změnou koncentrace iniciačního systému je ve zpracovatelské praxi oblíbená cesta, která umožňuje velmi jemnou regulaci a dává dobré výsledky. Je nutno upozornit na vliv teploty -ani nepřesnější dávkování tužidel není nic platné bez kontrolování teploty. Zvýšení teploty kopolymeraci urychluje, což má význam zejména pro zkracování výrobních cyklů v sériové výrobě.

#### **d) plniva**

Pro laminování se z různých důvodů (např. pro větší pracnost) plniv příliš nepoužívá, pracuje se většinou s čistými pryskyřicemi.

Existuje řada plniv do polyesterových pryskyřic, kterých se používá buď pro dosažení různých povrchových efektů nebo pro odlitky (zmenšují vnitřní pnutí pryskyřice i její smrštitost a zároveň snižují cenu odlitku, neboť jsou většinou levnější než pryskyřice).

Pro výrobu laminátů se pryskyřice mohou plnit organickými i minerálními látkami. Tato plniva laminát nejen zlevňují, ale i zlepšují některé jeho mechanické vlastnosti. Zvětšují povrchovou tvrdost a modul pružnosti, snižují maximální vytvrzovací teplotu a zmenšují smrštění pryskyřice při vytvrzování. Toto smrštění způsobuje propadání pryskyřice mezi skelná vlákna a vytváření vláknité struktury na povrchu laminátu. Tomuto propadání plniva zabraňují a zlepšují jakost povrchu. Některá plniva (sádra, cement) zlepšují odolnost proti vodě, jiná (plavená křída) ji zmenšují. Velmi jemně mletá slída zlepšuje elektrické vlastnosti laminátu a v určité modifikaci způsobuje i thixotropii pryskyřice. Kovové prášky (hliník) zlepšují tepelnou vodivost. Vlákenná plniva (azbest) zvětšují pevnost odlitků v ohybu rázem. Mimo uvedené látky se dále používá sráženého uhličitanu vápenatého, mletého skla, porcelánové moučky a kaolínu a z organických látek např. dřevěné moučky. Pro

lepší snášenlivost se plniva upravují i melaminovými nebo močovinovými pryskyřicemi nebo se barví. Plniva použitá pro polyesterové pryskyřice nesmějí obsahovat vlhkost, která zhoršuje vytvrzování, nemají chemicky reagovat s pryskyřicí a zhoršovat ve větší míře její vytvrzování.

Dále je nutné, aby plniva podstatně nezhoršovala zatékavost pryskyřice. Jakost plniv závisí i na jejich zrnitosti - čím jemněji je plnivo umleto, tím větší má povrch a tím méně se ho musí do pryskyřice přidat.

#### e) pigmenty

Výhodnou vlastností polyesterových skelných laminátů je, že se dají vybarvovat ve hmotě, a to jak transparentními, tak i krycími pigmenty. Jako všechny přísady do pryskyřic i pigmenty musí umožňovat vytvrzení a musí být světlostálé.

Typickou technologií pro lamináty je vybarvování ve hmotě za použití předželatinované povrchové vrstvy. Dobře se dají probarvovat předměty tvarované za studena. Při zpracování za tepla nelze takových výsledků dosáhnout. Předželatinovaná vrstva laminátu se vytvoří tak, že se na formu nanese tenká vrstva probarvené pryskyřice a nechá se částečně zatvrdnout. Nanáší se buď natíráním nebo nástřikem. Zatuhnutí se může urychlit mírným nahřáním infračervenou lampou nebo v peci. Je lépe nanést několik tenkých vrstev než jednu tlustou. Protože povrchová vrstva trpí nárazy a snadno praská, používá se k nátěrům pružných a méně reaktivních pryskyřic. Do ještě ne zcela zatuhlé vrstvy se pak klade textil a laminuje se běžným způsobem s pigmentovanou pryskyřicí. Důležité je, aby předželatinovaná vrstva byla natolik zatuhlá, aby se při laminování nepoškodila protlačenými skleněnými vlákny. Nesmí však být dokonale zatvrdlá, protože by se s laminátem nespojila a při nárazu by odprýskávala. Pryskyřice se probarvuje pastou, která se připraví z pryskyřice a pigmentu roztíráním na třecích válkách. Pro usnadnění homogenizace a prodloužení životnosti pasty je výhodnější nahradit polyesterovou pryskyřici změkčovadly, jejichž malé množství v předželatinovaném nátěru nevadí. Pro jiné výrobky se hodí speciální rohože, které jsou složeny z velmi jemných skelných, bavlněných nebo jiných (syntetických) vláken. Struktura vláken těchto rohoží po impregnaci pigmentovanou pryskyřicí prakticky zmizí a zakryje i strukturu tkaniny laminátu.

#### f) nátěrové hmoty

Pouhé vybarvení laminátu ve hmotě ani použití tzv. gelcoatu většinou samo nepo-



stačuje. I výrobek s dokonalou gelcoatovou vrstvou se zpravidla ještě musí leštit a přestříkat bezbarvým nitrocelulóзовým, epoxidovým nebo polyesterovým lakem.

Úprava nátěrovými hmotami je zatím nejrozšířenější povrchovou úpravou. Vlastní postup je stejný jako u povrchové úpravy předmětů z plechu. Aby se celý proces, který je poměrně náročný, urychlil a zhošpodárnil, musí být předmět z polyesterových skelných laminátů:

- 1) řádně odmaštěn
- 2) nemá mít pórovitý povrch
- 3) musí být homogenní (mezi vrstvami nesmějí být uzavřené vzduchové bubliny)
- 4) povrch musí být dokonale pokryt pryskyřicí tak, aby povrchovou vrstvou nepronikala tkanina

Použije-li se jako separátoru tuků, musí se pak povrch řádně odmastit - nejlépe omytím vařící vodou nebo zahříváním v sušárně, až se vosk roztaví. Pak se povrch důkladně otre. Takto předběžně odmaštěný povrch se buď omyje trichlóretylémem, nebo se pískuje. U filmotvorných separátorů není této obtížné operace zapotřebí. Na dobře očištěný povrch se nanáší syntetický olejový základ a na něj tmel v jedné nebo v několika vrstvách. Vrstvy tmelu se přebírují, až vznikne hladký, rovný povrch. Na tmel se nanáší stříkací tmel, brousí se a lakuje. Lze použít laků syntetických, vypalovacích nebo nitrolaků. Použije-li se syntetických vypalovacích laků, musí mít co nejnižší vypalovací teplotu. Dokončený povrch lze vyleštit. Jakostní povrchová úprava se ani po letech nemění, poněvadž laminát nekoroduje a nepodléhá větším objemovým změnám vlivem povětrnosti.

#### **g) separační činidla**

Polyesterové pryskyřice se vyznačují výbornou adhezí k řadě materiálů a tedy i k většině materiálů používaných na výrobu forem. Aby se laminovaný výrobek na formu nepřilepil, používá separačních činidel, která mezi formou a výrobkem vytvoří vrstvu schopnou zabránit přímému styku pryskyřice se formou. Separací činidla se obvykle rozdělují na masťná (vosky, oleje) a filmotvorná (polyvinylalkohol).

Na správné volbě separátoru závisí často úspěch nebo neúspěch celé výroby. Separátory mohou být látky tuhé nebo tekuté. Tuhé jsou buď folie, nebo prášky. Z folií je to

polyvinylchlorid, polyamid a celofán, z tekutých látek roztok parafínu nebo tvrdých vosků v toluenu, emulzní roztoky polyvinylalkoholu, polyvinylacetátu a roztoky lecitinu. V práškové formě se mohou nanášet rozemleté vosky nebo stearát zinečnatý, hlinitý a jiné. Žádný z uvedených separátorů není ideální a každý má dobré i špatné vlastnosti. Celofán je vhodný, ale netvoří hladkou plochu a nehodí se pro laminování zborcených ploch, vodné emulze a roztoky pomalu vytvářejí film odpařování vody. Všechny mastné separátory, nejvíce silikonové oleje, působí obtíže při dodatečném opracování povrchu výrobků nátěrovými hmotami, neboť zeslabují adhezi laku k povrchu laminátu. Výhodou je kombinovat separátory dva. Dosahuje se tím velmi dobrých výsledků ve všech směrech.

#### **h) rozpouštědla, čisticí a mycí prostředky**

K rozpouštění nevytvrzených polyesterových pryskyřic a mytí nástrojů, štětců se používá acetonu, metyletylketonu nebo etylacetátu.

## **2.2 Technologie laminování**

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

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

Kriteriem pro prvou metodu je teplota, při níž vrstvení a tvrzení probíhá. Nemá překročit 25°C. Vytvrzování vrstvené hmoty probíhá bez tlaku a za přístupu vzduchu

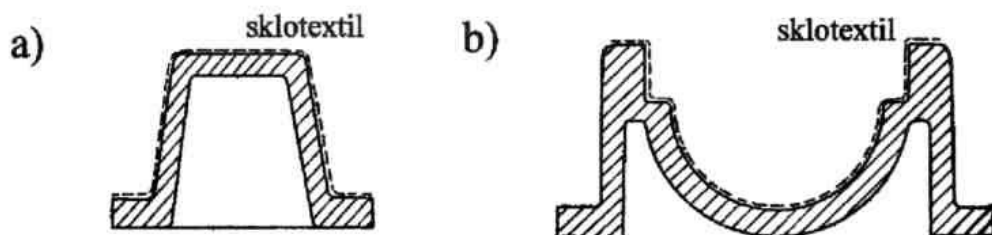
Zpracování za tepla je charakterizováno tím, že formy, v nichž se materiál lisuje a tvrdí, jsou vyhřívány na teplotu asi 100°C.

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

Pro lamináty je charakteristickým technologickým procesem vrstvení bez tlaku za normální teploty. Z hlediska hospodárnosti a rychlosti provedení se nejlépe uplatňují formy dřevěné, sádrové a formy z plastických hmot nebo plechu. Používané formy lze rozdělit na pozitivní a negativní (viz. Obrázek 7 [3]), přičemž každá z uvedených může být v provedení jednodílném nebo dvojdílném.

Jednodílnou pozitivní formou se rozumí forma, která představuje maketu budoucího výrobku, zmenšenou o tloušťku stěny hotového výrobku. Vrstvy skelné tkaniny se nakládají na její hladkou část. Bude tedy vnitřní plocha výrobku hladká a vnější, viditelná plocha bude drsná a nerovná, což je nevýhodou pozitivní formy.

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



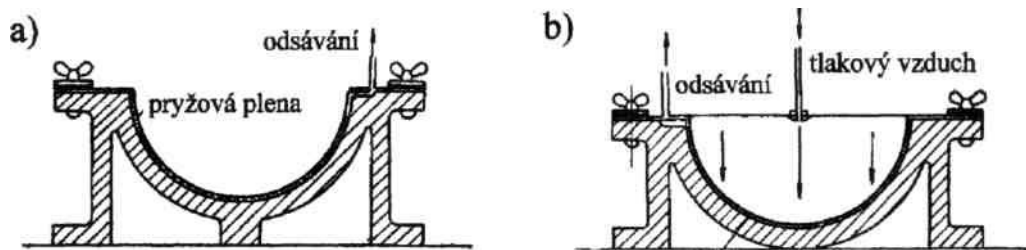
Obrázek 7. Jednodílná forma pro beztlakové tváření a) pozitivní b) negativní

Pro beztlakové tvarování se obvykle používá tkanin ze sdužených, obvykle nestáčených vláken nebo rohoží ze sekané stříže. Je třeba, aby skleněná vlákna měla hustou dostavu, protože převažující procento tvoří ve hmotě pryskyřice. Pracovní postup pak vypadá takto: Vhodně volená tkanina se konfekcionuje tak, aby bylo stříženo co nejméně dílů s co nejmenším počtem zástřížků, které vedou k tvorbě zdvojených stěn. Forma určená k tváření se řádně očistí a opatří separátorem. Ten se nanese buď štětcem, nebo se nastříká pistolí. Po zaschnutí se separační vrstva vyleští a položí se prvá vrstva tkaniny. Na tkaninu se nanáší připravená pryskyřice buď stěrkou nebo štětcem. Ťukáním se pryskyřice protlačí mezi vlákna. Je třeba dbát, aby impregnace tkaniny byla co nejlepší. Pronikáním pryskyřice se skleněná vlákna stávají průhlednými, poněvadž se vytlačuje vzduch, který vyplňuje mezery mezi nimi. Světlá mléčná místa svědčí o tom, že impregnace nebyla dosti intenzivní, a že

mezi tkaninou a formou byly uzavřeny bubliny vzduchu. Na prvou vrstvu se kladou další, až se dosáhne požadované tloušťky stěny. Po skončeném vrstvení se poslední vrstva uhladí stěrkou nebo válečkem a znovu se přezkouší, zda mezi vrstvami nejsou vzduchové bubliny. Vyskytnou-li se, odstraní se vytlačáním. Laminát se pak nechá vytvrdit přímo v pracovním prostředí nebo po zželatínování ve vyhřáté komoře při teplotě 50-60°C. Velmi výhodné je vytvrzování slunečním zářením. K dotvrzování lze také použít infračervených zářičů. Po vytvrzení se výrobek z formy opatrně vyjme a zkontroluje se jeho jakost. Aby dosáhl optimálních mechanických vlastností, musí se ještě několik dnů dotvrzovat. Laminát se však může dále opracovávat již po 12 hodinách po vyjmutí z formy. Po této době lze bez obav provádět další operace, jako ořezávání, vrtání, vyspravování vad a odstraňování zbytků separátorů. Forma se po vyjmutí výrobku řádně vyčistí a znovu se připraví k dalšímu tváření.

Tváření za studena lze provádět i za tlaku. Tlak ve hmotě se vyvozuje např. tím, že se použije dvoudílné formy. Výroba dvoudílné formy je však poněkud pomalá a poměrně nákladná. Používá se proto spíše jednodílných forem a tlak se vyvodí pryžovou plenou nebo plenou z plastické hmoty. Tlačnou sílu poskytne atmosférický tlak, umělý přetlak nebo kombinace obou. Příklad použití jednodílné formy s plenou vyvíjející pracovní tlak atmosférickým tlakem je uveden na Obrázek 8a [3]. Při práci se postupuje stejně jako u beztlakového tváření: Navrství se laminát a na hotový výrobek se položí celofánová folie. Přes celofán se napne plena a rámečkem se těsně přitáhne k rovné části formy. Vývěvou se odsaje vzduch, takže plena vlivem atmosférického tlaku těsně přilne k formě. Vytvrzovat se může opět za normálních teplot nebo se dotvrzuje v komorách za teploty 50-60°C. Po vytvrzení se plena a výrobek vyjmou z formy. Pryžová plena nesmí přijít do styku s pryskyřicí. Jednak by se přilepila, jednak by síra v ní obsažená působila na pryskyřici inhibičně.

Zvláštním způsobem tvarování na jednodílné formě je kombinovaný způsob podtlakový a přetlakový (Obrázek 8b [3]). Do tuhé jednodílné formy se vloží tkanina a na ni se nalije pryskyřice. Na tkaninu se položí pryžová plena a forma se uzavře deskou. V nejvyšším místě se připojí odsávání a nad plenu se přivede vzduch nebo pára pod tlakem za současného odsávání prostoru pod plenou. Odsáváním, tedy podtlakem, se dosáhne dobrého proimpregnování skleněných vláken pryskyřicí, vnějším tlakem lze pak při konstantním množství skla snadno regulovat poměr mezi množstvím skla a pryskyřice. Tento poměr je jedním z rozhodujících činitelů určujících mechanické vlastnosti laminátů a jejich vzhled.

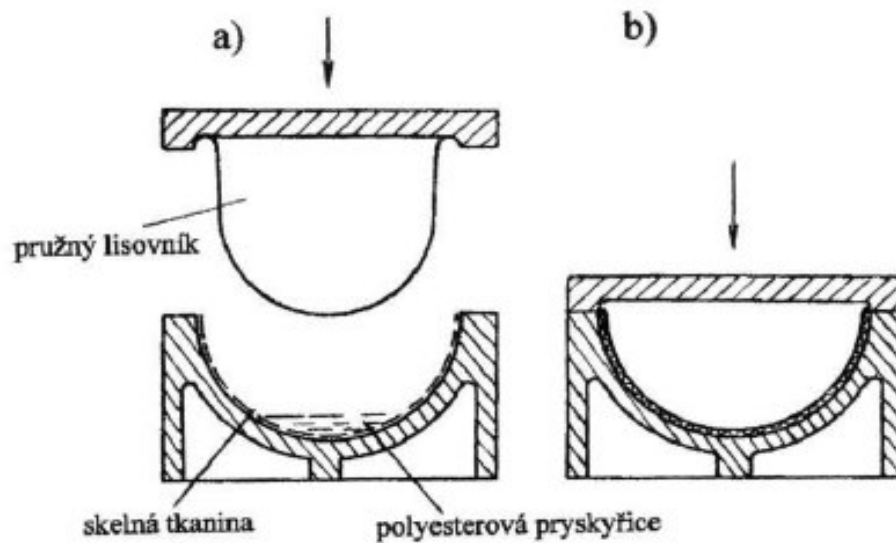


Obrázek 8. Lisování pryžovou plenou a) vakuem, b) vakuem a přetlakem

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

Požítím dvojdielné formy zdi současného tlaku a obvykle také za zvýšené teploty se tyto nedostatky odstraní.

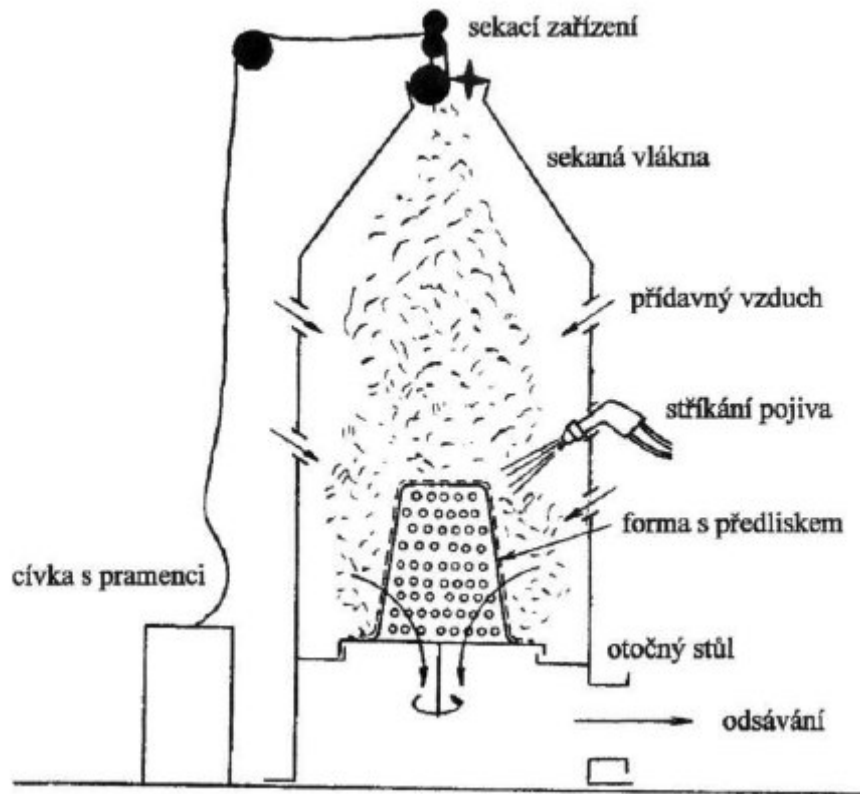
Nejjednodušší je lisování pružným lisovníkem (Obrázek 9a[3], Obrázek 9b[3]). Jeden (obvyčejně spodní) díl formy je nepohyblivý (obvykle je to lisovnice). Lisovník je z pružné hmoty a upevňuje se na tuhé desce. Lisovník i lisovnice musí být opatřeny vhodným separátorem. Do lisovnice se vloží textil a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



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

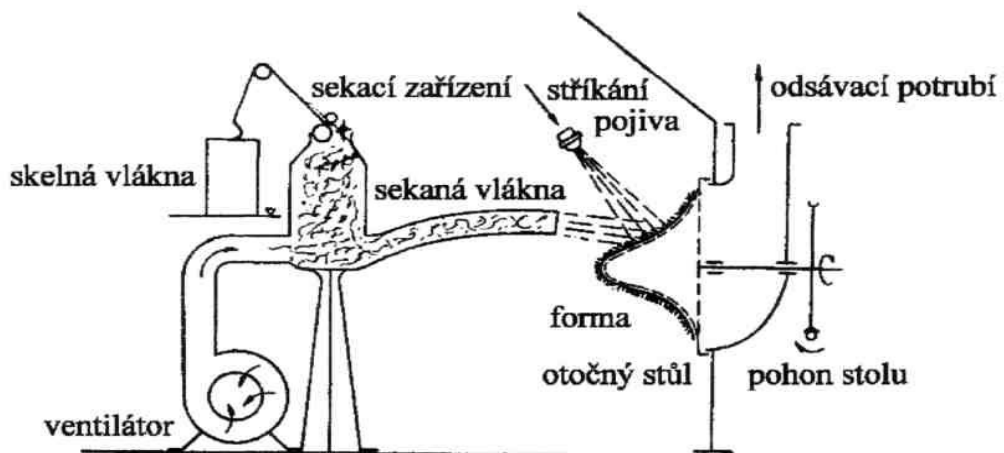
#### 2.2.1.1 Předformovací metoda

Pro menší a středně velké značně členité a hluboké výrobky je výhodné použít předformovací metody. Tato technologie je analogická výrobě plstěných klobouků Obrázek 10[3]). Pramence nekonečného skleněného vlákna se sekají na délku 40-50mm, vhánějí se do tzv. vločkovacího prostoru a jako vločky jsou přisávány na perforovanou formu. Stůl, na němž je uložena jedna nebo více forem, se otáčí. Osa stolu nekoresponduje s osou vločkovací komory. Po určité době a za předem stanovených podmínek se vytvoří na děrované formě vrstva sklené stříže.



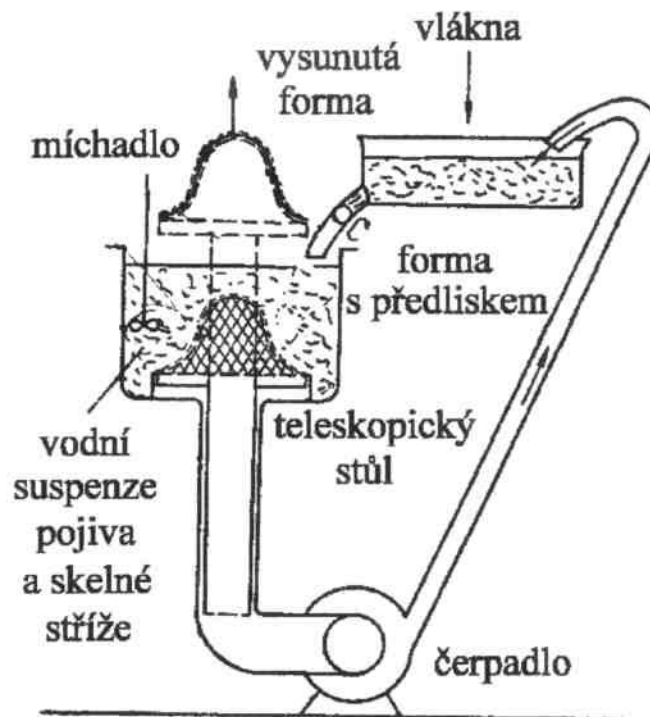
Obrázek 10. Schéma činnosti předformovacího stroje

Velké předměty, pro něž by popsané předformovací zařízení v uzavřeném tvaru vycházelo příliš veliké, se tvarují ze sekané stříže na zařízení podobném boxu na stříkání nátěrových hmot (Obrázek 11 [3]).



Obrázek 11. Schéma předformování v otevřeném prostoru

Výhodou je, že lze jednak libovolně měnit tloušťku stěny výrobku, jednak velmi jednoduchým způsobem zalísovat do laminátu různé kovové kroužky a armatury. Jako pojivo lze použít vodní emulzi polyesterové pryskyřice, roztoky fenolových, melaminových nebo močovinových pryskyřic. Jako suchá pojiva jsou nejvýhodnější práškové polyesterové. Na volbu pojiva má vliv technologie vrstvení a způsob tepelného zpracování předlisku. Po navrstvení potřebné tloušťky se forma sejme a vsune se do pece, ve které se odstraní případné rozpouštědlo pojiva a výlisek se zpevní. Pojivo musí být účinné, pokud jde o vzájemnou vazbu vláken, a nesmí nevhodně ovlivňovat další technologický proces, především impregnaci a vytvrzování.



Obrázek 12. Předformování „za mokra“

Tento způsob se nazývá předformování za sucha. Podobná metoda, při níž je vlákno rozptýleno ve vodě, tvoří tzv. „mokrý proces“. Nevýhodou tohoto způsobu je nutnost dodatečného sušení. Se skleněným vláknem se obvykle nanáší i vlákno celulózové jako pojivo. Jako nejlepší se ukázala směs 80% skla a 20% celulózy. Výhodou je neobvykle rychlý cyklus a možnost dobrého probarvení předlisku ve hmotě (Obrázek 12 [3]).

Základním znakem zařízení pracujících na uvedeném principu jsou speciální hlavičky, jimiž se směs vlákna a polyesterové pryskyřice nanáší na formu. Typickým znakem pro



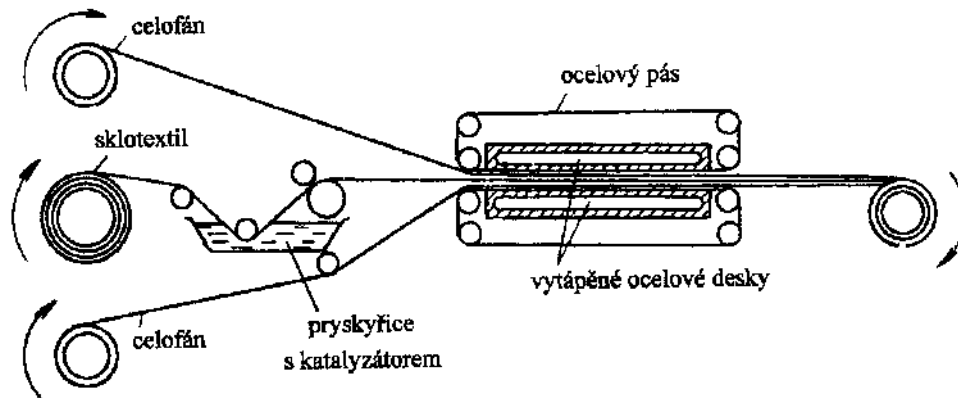
všechny stroje tohoto druhu je, že skleněné vlákno je přiváděno do stříkacího prostoru střední, poměrně velkou hubicí a z obou stran je stříž obalována pryskyřicí. Jednou tryskou je vháněna pryskyřice s katalyzátorem, druhou pryskyřice obsahující urychlovač. Při nastříkání na formu se hmoty promísí a vzájemným působením katalyzátoru a urychlovače se pryskyřice vytvrdí. Proto připravené pryskyřice může být značné množství a není obavy ze znehodnocení. Stroj má zařízení na ohřívání vzduchu, což zkracuje vytvrzování. Pryskyřici lze plnit nezesilujícími plnidly až do 30%. Poněvadž se při stříkání odpařuje styren, je nutné, aby se nástřík směsi prováděl v dobře odsávaném prostoru.

Použití takového zařízení přináší proti ručnímu kladení tyto výhody:

- snížení pracnosti
- zmenšení odpadu skleněného vlákna i pryskyřice
- zlepšení pracovních podmínek

### ***2.2.1.2 Lisování suchého, pryskyřicí předimpregnovaného textilu***

Tvářením tohoto textilu se získají velmi jakostní výlisky, avšak práce vyžaduje značnou pozornost při lisování. Požadované tlaky dosahují hranice nízkotlakého lisování. Výhodou je poměrně čistá práce se suchým textilem, nevýhodou je krátká skladovací doba textilu impregnovaného katalyzovanou pryskyřicí a dosti značný odpad drahého materiálu při konfekcionování. To může být částečně kompenzováno použitím těchto odpadů pro výrobu lisovacích hmot. Pro výrobu se používá předpolymerovaných styrenových pryskyřic, alylových derivátů nebo pryskyřic obsahujících krystalické monomery. Textil se impregnuje taveninou nebo roztoky těchto pryskyřic v acetonu, který se po impregnaci odpaří. Suchý textil se navíjí do rolí, jejichž jednotlivé závity jsou odděleny celofánovou folií. Tato folie pak slouží jako separátor při lisování. Princip výroby je naznačen na Obrázek 13 [3].



Obrázek 13. Schéma kontinuální výroby předimpregnovaného textilu

### 2.2.1.3 Kontinuální procesy

Velké množství výrobků se vyrábí kontinuálně. Hlavní zásadou je, aby šlo o výrobu hromadnou a poměrně jednoduchou. Kontinuálně se vyrábí např. tyče. Z cívek se odvíjejí pramence skelných vláken, impregnují se v katalyzované pryskyřici a protahují se průvlaky, v nichž pryskyřice želatinuje a polymeruje, a které výrobku dají konečný tvar. Kontinuální stroj na rovné trubky pracuje na principu kabelových opřádacích strojů. Mimo různé profily, tyče a trubky se vyrábějí kontinuálně i desky a vlnité desky pro střešní krytinu. Schéma výroby je podobné výrobě předimpregnovaného textilu. Skelný textil se odvíjí z válců a vede se do máčecí vany, kde se impregnuje katalyzovanou pryskyřicí. Nadbytku pryskyřice se zbavuje ve ždímacích válcích umístěných za máčecí vanou. Při zpracování rohoží, jejichž soudržnost se snadno porušuje, je skelná rohož vedena pod soustavou trysek, které ji skrápějí pryskyřicí. Impregnovaný textil nebo rohož (popř. v několika vrstvách) mezi dvěma pásy celofánové folie prochází vyhřívacím zařízením, kde pryskyřice želatinuje. Zařízením pro želatinaci mohou být lázně s olejem nebo nízkotajícími slitinami, soustava infračervených zářičů, komory vytápěné horkým vzduchem nebo parou nebo vyhřívané válce. Předželatinovaný laminát je pak diskontinuálně lisován za vyšší teploty v lisech nebo kontinuálně tvarován mezi nekonečnými pásy. Podle profilu zařízení je laminát buď rovný, nebo dostává tvar vlnité desky. Za lisovacím zařízením jsou nůžky, které nekonečný pás laminátu stříhají na desky používané k nejrůznějším účelům.

## 2.3 Volba technologie laminování

Volba formy a technologie pro zpracování polyesterových skelných laminátů se řídí řadou podmínek, z nichž nejdůležitější jsou tyto:

### a) Rozměr výrobku

Lamináty jsou neobyčejně tvárným konstrukčním materiálem a lze z nich zhotovovat výrobky v plochách prakticky neomezené velikosti. Nadto mohou být tyto plochy velmi členité. Čím zborcenější je plocha, tím větší je naděje na úspěšnou aplikaci. Z ekonomického hlediska je velmi důležité, aby velké i drobné výrobky měly co nejmenší počet dílců, které by se musely spojovat. Možnost vyrábět předměty z jednoho kusu je typická pro lamináty a musí se jí všestranně využívat. Ani u kusové výroby se tím nijak nezvyšují výrobní náklady, právě naopak - monolitčnost konstrukcí je z ekonomického hlediska žádoucí a vítaná.

### b) Počet vyráběných kusů

Výroba z laminátů je buď kusová, nebo malosériová. Vyrábět z laminátů velké série ručním kladením by nebylo účelné, vhodné ani žádoucí. Často lze dosáhnout uspokojivých výsledků levnějšími prostředky a s menšími výrobními náklady. Při malých rozměrech a velkém počtu kusů ztrácí použití laminátů význam. Jako příklad lze uvést výrobu prototypu automobilové karoserie typickou technologií laminování - ručním kladením za pokojové teploty. Tento způsob je účelný právě jen u malého počtu kusů.

### c) Požadované mechanické a fyzikální vlastnosti

Při volbě technologie se do značné míry řídíme také požadovanými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi a tedy i celkovou konstrukční koncepcí výlisku, která s uvedenými vlastnostmi těsně souvisí. Rozhodujícími činiteli pro dosažení nejlepšího výsledku je kromě volby vhodného materiálu i správné pojetí konstrukce, vyhovující mechanickými a fyzikálními vlastnostmi, funkční stránkou a snadnou zpracovatelností ve vhodné formě při správně volené technologii.

### d) Požadovaná jakost povrchu

Dobrého povrchu u výrobků z laminátů lze dosáhnout jen ve formách s dokonalou pracovní plochou. Povrch výrobku bude takový, jaká bude jakost použité formy. Proto se i při čištění formy, nanášení separátoru, vyjímání výrobku a udržování nástroje musí dbát,

aby se pracovní plochy nepoškodily. Při volbě materiálu na výrobu se řídíme také podle počtu kusů, které se mají ve formě vyrobit. Ze sádrové formy nezískáme více než 1 až 3 kusy jakostních výrobků. Trochu déle vydrží forma dřevěná a laminátová a největší počet bezvadných výrobků se přirozeně dá vyrobit ve formě kovové. Jakost povrchu je horší, použije-li se pozitivních forem nebo maket a má-li být funkční plocha vnější. Taková plocha se vždy musí dodatečně obrábět a zušlechťovat. Proto se vždy, chceme-li mít vnější plochu výrobku hladkou, používá forem negativních. Důležité je, aby na funkční ploše formy nebyly póry, které znesnadňují vyjímání vylisku z formy. Opatřují-li se formy nátěrem, musí se volit takový, se kterým nereaguje použitá pryskyřice. Sádrové formy snadno praskají a vyštipují se. To má přirozeně vliv jakost povrchu výrobku. Podobně u dřevěných forem se rýsují měkká a tvrdá léta, otevírají se spoje a bortí plochy.[9]

## 2.4 Obrábění polyesterových skelných laminátů

Zásadou je, že vylisek má potřebovat co nejméně opracování. Zcela se však obrábění zbavit nelze. Nejběžnější je ořezávání. Pokud nebyl výrobek ostřížen již při lisování, provádějí se operace ořezání nožem, ostříhání nůžkami, ořezání pilou nebo osekání pod lisem.

Nožem se ořezává předmět ještě ne zcela vytvrzený. Řez je čistý, práce rychlá. Řeže se od ruky, podle pravítka nebo podle šablony. Celkem dobře lze laminát stříhat. Stříhá se na strojních nůžkách, ručními elektrickými nůžkami nebo u rovných ploch nůžkami tabulovými. Je výhodné stříhat laminát ne zcela vytvrzený. Ořezávání pilkou je běžný výkon. Používá se ruční i stabilní pily nebo frézky. Pila může být kotoučová nebo pásová. Lepší než kotoučové pily jsou řezné kotouče. Řez musí být čistý a hladký. Důležité je chlazení emulzním roztokem vrtacího oleje. Pak je řez hladký a zuby pil se nezanášejí. Někdy je výhodné osekávat hrany nebo vysekávat otvory na lisu. Používá se stejných nástrojů jako při obrábění kovů s vůlí mezi lisovníkem a lisovnicí. Obrábění na lisu je možné až do tloušťky 6,5mm. Pokud jde o životnost nástroje, vydrží až 100 000 výseků. Ořezané předměty se ještě dále obrábějí, a to nejčastěji vrtáním, frézováním nebo broušením.

V zásadě lze říci, že všechny operace na laminátech lze provádět stejnou technologií jako u kovu. Používá se nástrojů z rychlořezné oceli, nejlépe tvrdých slitin. Lamináty jsou materiálem sice snadno obrobitelným, avšak nástroje se jimi rychle otupují. Životnost nástrojů prodlužuje použití chladicích a smáčecích kapalin. Obvodové rychlosti jsou stejné

jako při obrábění slitin hliníku nebo mosazi. Z hlediska hygieny práce je smáčení výhodnější než odsávání. Otvory pro spojovací díly je lépe vrtat. Ražením se materiál obvykle porušuje, kde však určité narušení nevádí, je výhodné razit otvory přímo v lisu.[4]

## 2.5 Zkoušení výrobků z laminátů

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

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

Mluví-li se o fyzikálních, chemických a elektrických hodnotách laminátů, je třeba vždy přesně určit, o jaký druh materiálu jde. Je nutné stanovit přesnou specifikaci a podmínky, za nichž byl laminát vyroben, a teplotu a relativní vlhkost, za které byly zkoušky konány.

Nelze také hovořit o vlastnostech laminátů obecně, poněvadž jsou jiné u laminátů z textilu a jiné z rohože nebo sekané stříže. Jiné budou také při beztlakovém vrstvení za pokojové teploty a jiné za tlaku a teploty kolem 100°C.

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

Lamináty jsou charakterizovány řadou fyzikálních, chemických a elektrických vlastností.[7]

Z fyzikálních jsou to zejména tyto:

- pevnost v tahu, tlaku, ohybu, modul pružnosti, pevnost v ohybu rázem a tvrdost
- rychlost zvuku, útlum,
- tepelná vodivost, roztažnost a odolnost
- únava při střídavém namáhání.

Z chemických vlastností jde především o odolnost k různým chemikáliím.

Z elektrických jsou to:

- elektrická pevnost,
- vnitřní a povrchový izolační odpor,
- ztrátový úhel,
- dielektrická konstanta.

## 2.6 Možnosti využití laminátů

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

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

Velmi dobře se lamináty osvědčují jako materiál pro karosérie motorových vozidel. Lze vyrábět libovolné tvary a plochy zakřivit tak, aby byly dostatečně tuhé a pevné. Dalším

důležitým činitelem, který způsobuje, že jsou vyhledávaným konstrukčním materiálem v automobilovém průmyslu, je jejich malá váha. Karoserie mohou být mnohem lehčí, a to dvakrát až třikrát než karosérie plechové. Zejména dveře jsou lehké a tuhé, takže nepodléhají trvalým deformacím a vždy dobře přiléhají. Bylo již řečeno, že lamináty jsou materiály nekorodující. To je u karosérií moment velmi závažný. Zejména podběhy a podlahy karosérií vystavené vlivům počasí je velmi výhodné vyrábět z tohoto materiálu. Rovněž u karosérií a kapot sportovních a závodních automobilů i motocyklů se oceňuje vysoká mez únavy a útlumu vibrací.

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

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

V leteckém průmyslu se laminátů používá při výrobě krytů antén běžných komunikačních přístrojů, obtížných částí trupu, ocasních ploch a křídel. Stejně se jich používá na různá potrubí a náhradní palivové nádržky, plováky hydroavionů a dokonce se uvažuje i o výrobě vrtulových listů. Ve stadiu zkoušek jsou různé kryty, dveře kabin apod. Velké možnosti se otevírají ve stavbě sportovních letounů a kluzáků.

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

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

li se speciálních typů polyesterových pryskyřic.

Z laminátů se vyrábějí ochranné přilby pro horníky, stavaře, motocyklisty i automobilové závodníky. Při poměrně malé hmotnosti se dosahuje značné pevnosti a pružnosti, takže přilba dobře chrání proti nárazu nebo úderu.

Také bytová architektura začíná využívat laminátů. Používá se jich na odpadové nádoby, které nekorodují, na mycí dřezy, koupací vany, obkladové dekorační desky i v řadě jiných aplikací.

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

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

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

Polyesterové lamináty mají několik charakteristických předností proti jiným materiálům. Jsou to:

1. malá specifická váha,



2. velká mechanická pevnost v širokém rozmezí teplot,
3. poměrně jednoduchá, rychlá, a proto poměrně levná kusová výroba,
4. dobré tepelné a zvukově izolační vlastnosti,
5. dobrá odolnost proti vlivům povětrnosti,
6. velká rázová pevnost a pružnost,
7. snadná oprava havarovaných dílců.

Naděje na obchodní a technický úspěch mají ty konstrukce, u nichž se uplatní alespoň čtyři z uvedených charakteristických vlastností. V opačném případě bude lépe vyhovovat jiný materiál. Všechny tyto okolnosti je nutno pečlivě uvážit, neboť jen tak se může správně využít všech konstrukčních možností a materiálních výhod, které tento tvárlivý materiál při správné aplikaci poskytuje.[6]

## **PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 STANOVENÍ CÍLŮ

Cílem diplomové práce je zjistit chování laminátu, plněného skelnými vlákny, v různém prostředí a následného vyhodnocení. Zaměřím se na materiálové charakteristiky jako je modul pružnosti a mez pevnosti v tahu tlaku a ohybu. Pokusíme se prokázat možnou aplikaci teorie bimodulárního ohybu, pro laminátovou stěnu, analytickým výpočtem a následným porovnáním s naměřenými hodnotami. Pokusíme se určit materiálové koeficienty týkající se creepové zkoušky a vzorků exponované ve vodě dle normy ČSN EN 978.

## 4 ZKOUŠKY V OHYBU, TAHU A TLAKU LAMINÁTOVÝCH STĚN

V této části diplomové práce se zabýváme problematikou stárnutí laminátu, způsobeného vlivem různých prostředí. Zkoumáme vlivy čisté vody, kyseliny sírové a tepla na laminátovou stěnu. Jako stěžejní materiálové hodnoty, které následně porovnáváme, jsou modul pružnosti a mez pevnosti, v tahu, tlaku a ohybu. Pro zkoušky používáme 3 druhy vzorků, které jsou podrobněji popsány v 4.1.

### 4.1 Struktura laminátových stěn

Vzorky S1, S2, S7 se od sebe liší hlavně počtem laminátových vrstev.

#### a) vzorek číslo 1



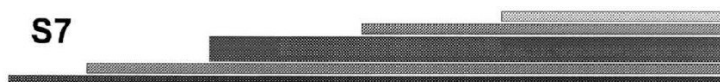
Obrázek 14. Laminát tloušťky 7mm

#### b) vzorek číslo 2



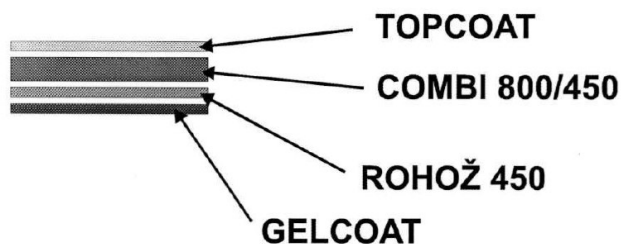
Obrázek 15. Laminát tloušťky 5mm

#### c) vzorek číslo 3



Obrázek 16. Laminát tloušťky 4mm

Legenda:



Obrázek 17. Složení jednotlivých vrstev laminátu

Tabulka 1. Složení jednotlivých vrstev laminátu

Označení	S2	S1	S7
Poměr skla a pryskyřice [%]	53,7:46,3	50,3:49,7	36,5:63,5
Rozměry (při výrobě) [mm]	1000x800x7	1000x800x5	540x550x4
Hmotnost [g]	7,92	6,4	1,74
Gelcoat	Crystic 93 PA Gray 6057	Crystic 93 PA Gray 6057	Crystic 93 PA Gray 6057
Topcoat	Crystic 2000 Orange AC	Crystic 2000 Orange AC	Aropol K-530 TB
Pryskyřice	Aropol M – 105 TA	Aropol M – 105 TA	Aropol M – 105 TA
Rohož (počet vrstev x [g/m <sup>2</sup> ])	2x450	2x450	2x450
Tkanina (počet vrstev x [g/m <sup>2</sup> ])	2x800/450	3x800/450	1x800/450

#### 4.1.1 Postup a podmínky testování materiálu

Ohybová zkouška je prováděna na přístroji Zwick 145 665 (dle normy ČSN EN ISO 178 dle následujících dispozic:

- rychlost zkoušky: 1mm/min
- vzdálenost podpor pro jednotlivé vzorky dle normy ČSN EN ISO 178 a konstrukčních možností
- zadání rozměrů každého vzorku dle hodnot naměřených posuvným měřidlem a mikrometrem
- vyhodnocení všech výsledků statisticky

Měření na přístroji Zwick 145 665

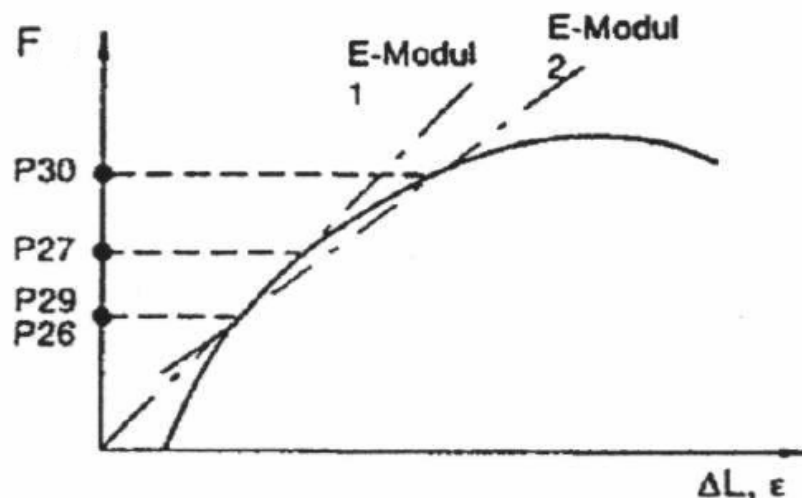
Přístroj použitý pro praktické testování vzorků tříbodovým ohybem měl tyto parametry: ZWICK AUGUST-NAGEL-STR. 11, D-89079 ULM, TYP 145665, WERK-NR 122480/93, AB-NR 321147, FNOM 20kN.

Univerzální program (dodávaný s přístrojem) pro zkoušky tahem, tlakem a ohybem je vhodný pro:

- zkoušky tahem a tlakem plastů, pěnových materiálů, textilu, vlákniny zpevněných kompozitů, laminátů, tkaninových popruhů, papíru, lepenky, dřeva a dentálních materiálů
- zkoušky tahem a tlakem kovů (bez speciálního hodnocení plastických vlastností)
- zkoušky tří a čtyřbodovým ohybem (pro všechny typy materiálů)
- určení max. dvou elastických modulů
- nastavení a regulace teploty pro teplotní komory

Tento program není doporučen pro automatické systémy transportu vzorků.

Zkušební program 7092.105 je vhodný pro provádění zkoušek ve spojení s univerzálními zkušebními stroji Zwick řady 14xx. Program musí být instalován na osobních počítačích PC-IBM a kompatibilních. Určení modulu pružnosti je zřejmé z následujícího schématu na obr. 18.



Obrázek 18. Určení modulu pružnosti

kde:  $F$  ...síla

$\Delta L$  ...prodloužení (zkrácení)

P26 ... dolní limit určení E-modulu 1

P27 ... horní limit určení E-modulu 1

P29 ... dolní limit určení E-modulu 2

P30 ... horní limit určení E-modulu 2

$\varepsilon$  ...poměrné prodloužení (poměrné zkrácení)

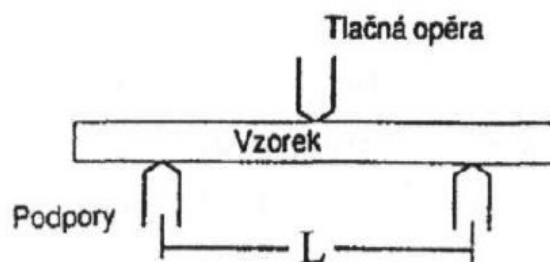
$\sigma$  ...napětí

Těmito dvěma parametry (P26, P27 resp. P29, P30) je omezena oblast, z níž je určena hodnota modulu pružnosti  $E$  jako sečna procházející zvolenými body grafického záznamu průběhu zkoušky.[5]

#### 4.1.2 Typy prováděných zkoušek

##### a) Zkouška ohybem

Nastavení podpor při zkoušce je znázorněno na obr.19. Parametry zkoumaného vzorku ohybovou zkouškou musí dodržovat podmínky udané normou ČSN EN 978. Ta udává celkovou délku vzorku a vzdálenost podpor vztahované na tloušťku laminátu. Rychlost zkoušky byla zvolena dle normy ČSN EN 978 na 1mm/min.



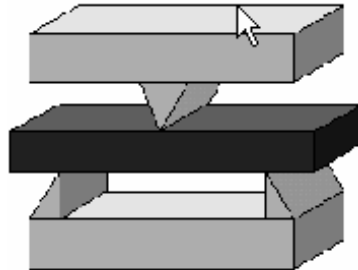
Obrázek 19. Princip podpěr při zkoušce ohybem

kde:  $L$  ...vzdálenost podpor

Podmínky pro provádění ohybové zkoušky:

- Vzdálenost podpor  $L = (16 \pm 1) \cdot h$

- rychlost zkoušky  $v = 1 \text{ mm/min}$
- tloušťka, šířka vzorku dle naměřených hodnot jednotlivého vzorku

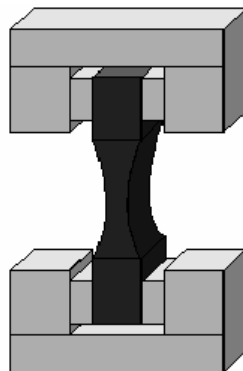


Obrázek 20. Uchopení vzorku při ohybové zkoušce

#### b) Zkouška tahem

Dle ČSN EN ISO 527 – 1 jsme stanovili podmínky pro provádění tahové zkoušky.

- rychlost zkoušky  $v = 1 \text{ mm/min}$
- tloušťka, šířka vzorku dle naměřených hodnot jednotlivého vzorku
- délka vzorku volena 120mm



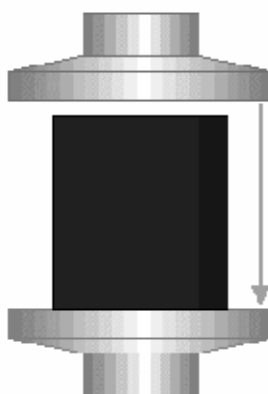
Obrázek 21. Schéma k tahové zkoušce

Pro zkoušku tahem jsme používali extenziometr. Ten slouží k přesnému určení modulu pružnosti v tahu. Podstata měření za pomoci extenziometru je v tom, že zaznamenává prodloužení v závislosti na napětí na vzdálenosti 20mm, nikoli po celé délce vzorku.



## c) Zkouška tlakem

- rychlost zkoušky  $v = 1 \text{ mm/min}$
- tloušťka, šířka vzorku dle naměřených hodnot jednotlivého vzorku
- délka vzorku volena 100mm



Obrázek 22. Schéma k tlakové zkoušce

## 4.2 Mechanické zkoušky laminátu

Přehled prováděných zkoušek v tahu, ohybu:

Tabulka 2. Přehled prováděných zkoušek v tahu a ohybu

Tloušťka	Po dodání	Etalon	2000hodin v H <sub>2</sub> O	4000 hodin v H <sub>2</sub> O	500hodin 30%H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	8hodin 150 °C
7mm	X	X	X	X	X	X
5mm	X	X	X	X	X	X
4mm		X	X		X	X

Zkouška tlakem byla provedena pouze pro tloušťku 7mm a to u etalonu a kyseliny sírové.

V tabulce číslo 2, je písmenem X označena prováděná zkouška, která je zpracována v části 4.2. Pro zjednodušení a upřesnění časové souslednosti, jsem určil následující terminologii:

- a) **Po dodání** – jedná se o vzorky které byly měřeny ihned po dodání z výroby. Nevznikla zde prodleva větší než 1 měsíc, mezi dodáním a testováním laminátu.

- b) **Etalon** – jedná se o laminát, který byl při teplotě 22°C odležen po dobu 4 měsíce od dodání.
- c) **2000hodin v H<sub>2</sub>O** – Výchozí stav materiálu pro tuto zkoušku je Etalon. Vzorky byly exponovány při teplotě 50°C po dobu 2000 hodin v H<sub>2</sub>O. Tato zkouška má simulovat běžný provoz při kontaktu s vodou.
- d) **4000 hodin v H<sub>2</sub>O** – Výchozí stav materiálu pro tuto zkoušku je Etalon. Vzorky byly exponovány při teplotě 50°C po dobu 4000 hodin v H<sub>2</sub>O. Tato zkouška má simulovat běžný provoz při dlouhodobém kontaktu s vodou.
- e) **500hodin 30% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** – Výchozí stav materiálu pro tuto zkoušku je Etalon. Vzorky byly exponovány při teplotě 22°C po dobu 500 hodin v H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Tato zkouška má simulovat problematiku kyselých dešťů a různých chemických havárií.
- f) **8hodin 150°C** – Výchozí stav materiálu pro tuto zkoušku je Etalon. Pro tuto zkoušku jsem použil horkovzdušnou pec, ve které jsem ponechal vzorky po dobu 8 hodin při teplotě 150°C. Zkouška simuluje provoz ve výrobních procesech, kde je zvýšená teplota zapříčiněna blízkostí laminátu u výrobních strojů.

#### 4.2.1 Mechanické namáhání laminátu v ohybu

##### 4.2.1.1 Po dodání

- a) Tloušťka laminátu 7mm

Tabulka 3. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 57. Ohyb\_7mm\_po dodání

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	ε <sub>pkř</sub>	y
n = 10	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	7,11	11,61	197,85	7586,82	3,95	13,32
s	0,2125	0,1208	12,55	471,17	0,75	2,46

- b) Tloušťka laminátu 5mm

Tabulka 4. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 58. Ohyb\_5mm\_po dodání

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	ε <sub>pkř</sub>	y
n = 10	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	5,386	11,55	183,57	6824,03	4,29	10,78
s	0,2365	0,04725	17,28	305,92	0,80	2,03

4.2.1.2 *Etalon*

a) Tloušťka laminátu 7mm

Tabulka 5. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 59. *Ohyb\_7mm\_etalon*

Sub-series #1	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	$\varepsilon_{pkr}$	y
n = 9	Mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	7,207	11,58	203,91	7874,60	4,25	14,04
s	0,2464	0,1109	21,82	263,43	0,92	2,86

b) Tloušťka laminátu 5mm

Tabulka 6. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 60. *Ohyb\_5mm\_etalon*

Sub-series #1	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	$\varepsilon_{pkr}$	y
n = 9	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	5,449	11,5	189,12	7472,57	4,16	10,30
s	0,1957	0,08604	12,02	283,15	1,01	2,50

c) Tloušťka laminátu 4mm

Tabulka 7. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 61. *Ohyb\_4mm\_etalon*

Sub-series #1	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	$\varepsilon_{pkr}$	y
n = 7	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	4,214	11,11	139,65	5138,18	3,96	6,47
s	0,2267	0,1349	20,61	383,50	1,15	2,07

4.2.1.3 *2000 hodin v H<sub>2</sub>O*

a) Tloušťka laminátu 7mm

Tabulka 8. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 62. *Ohyb\_7mm\_2000 hodin v H<sub>2</sub>O*

Sub-series #1	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	$\varepsilon_{pkr}$	y
n = 8	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	7,255	11,79	167,84	7384,08	3,43	10,94
s	0,1991	0,1229	22,12	167,51	0,56	1,68

b) Tloušťka laminátu 5mm

Tabulka 9. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 63. Ohyb\_5mm\_2000 hodin v H<sub>2</sub>O

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	ε <sub>pkř</sub>	y
n = 6	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	5,533	11,58	143,64	6281,26	3,48	8,53
s	0,2104	0,1154	11,18	459,18	0,71	1,90

c) Tloušťka laminátu 4mm

Tabulka 10. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 64. Ohyb\_4mm\_2000 hodin v H<sub>2</sub>O

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	ε <sub>pkř</sub>	y
n = 7	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	4,117	11,31	118,16	4849,79	4,16	6,90
s	0,1416	0,1081	19,47	279,93	0,83	1,35

#### 4.2.1.4 4000 hodin v H<sub>2</sub>O

a) Tloušťka laminátu 7mm

Tabulka 11. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 65. Ohyb\_7mm\_4000 hodin v H<sub>2</sub>O

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	ε <sub>pkř</sub>	y
n = 7	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	7,311	11,73	154,29	7240,40	2,89	9,18
s	0,1913	0,1979	8,31	309,65	0,23	0,70

b) Tloušťka laminátu 5mm

Tabulka 12. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 66. Ohyb\_5mm\_4000 hodin v H<sub>2</sub>O

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	ε <sub>pkř</sub>	y
n = 7	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	5,557	11,61	143,68	6266,30	3,29	8,01
s	0,256	0,09587	11,24	582,45	0,32	0,82

4.2.1.5 500 hodin v 30%  $H_2SO_4$ 

a) Tloušťka laminátu 7mm

Tabulka 13. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 67. Ohyb\_7mm\_500 hodin v 30%  $H_2SO_4$ 

Sub-series #1	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	$\varepsilon_{pkr}$	y
n = 7	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	7,126	11,62	186,58	6703,03	4,90	15,97
s	0,09829	0,1455	17,20	318,53	0,41	1,38

b) Tloušťka laminátu 5mm

Tabulka 14. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 68. Ohyb\_5mm\_500 hodin v 30%  $H_2SO_4$ 

Sub-series #1	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	$\varepsilon_{pkr}$	y
n = 7	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	5,546	11,67	175,43	6621,60	4,70	11,46
s	0,1011	0,07988	21,30	361,30	1,35	3,30

c) Tloušťka laminátu 4mm

Tabulka 15. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 69. Ohyb\_4mm\_500 hodin v 30%  $H_2SO_4$ 

Sub-series #1	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	$\varepsilon_{pkr}$	y
n = 7	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	4,169	11,03	141,08	4955,68	4,03	6,61
s	0,1131	0,1781	24,93	463,65	0,98	1,62

## 4.2.1.6 8 hodin při 150°C

a) Tloušťka laminátu 7mm

Tabulka 16. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 70. Ohyb\_7mm\_8hodin při 150°C

Sub-series #1	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	$\varepsilon_{pkr}$	y
n = 7	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	7,26	11,71	202,06	7672,34	4,48	14,33
s	0,1591	0,1034	14,22	502,36	0,34	1,14

b) Tloušťka laminátu 5mm

Tabulka 17. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 71. Ohyb\_5mm\_8hodin při 150°C

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	ε <sub>pkř</sub>	y
n = 7	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	5,627	11,61	200,49	7551,99	4,00	9,58
s	0,1836	0,1636	11,22	584,60	0,90	2,06

c) Tloušťka laminátu 4mm

Tabulka 18. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 72. Ohyb\_4mm\_8hodin při 150°C

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	ε <sub>pkř</sub>	y
n = 6	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
x	4,053	11,07	154,92	5736,99	4,67	7,86
s	0,2066	0,1917	21,78	249,80	1,34	2,21

## 4.2.2 Mechanické namáhání laminátu v tahu

### 4.2.2.1 Po dodání

a) Tloušťka laminátu 7mm

Tabulka 19. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 73. Tah\_7mm\_Po dodání

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
n = 9	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	7,142	11,57	159,30	11878,36	8,22	1,79	0,36	13147,35
s	0,1794	0,1305	8,04	670,65	0,29	0,17	0,03	483,96

b) Tloušťka laminátu 5mm

Tabulka 20. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 74. Tah\_5mm\_Po dodání

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
n = 10	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	5,48	11,55	150,21	11657,61	7,29	1,69	0,34	9488,66
s	0,2329	0,1044	9,74	726,16	0,25	0,13	0,03	483,50

4.2.2.2 *Etalon*

a) Tloušťka laminátu 7mm

Tabulka 21. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 75. Tah\_7mm\_etalon

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
n = 9	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	7,127	11,54	151,93	12644,52	7,80	1,60	0,32	12521,90
s	0,1556	0,1013	7,07	525,56	0,32	0,12	0,03	782,26

b) Tloušťka laminátu 5mm

Tabulka 22. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 76. Tah\_5mm\_etalon

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
n = 9	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	5,408	11,57	149,44	11856,41	7,09	1,74	0,35	9330,26
s	0,1887	0,115	12,98	987,91	0,35	0,24	0,05	547,15

c) Tloušťka laminátu 4mm

Tabulka 23. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 77. Tah\_4mm\_etalon

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
n = 16	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	4,074	11,05	122,47	9932,47	4,41	1,63	0,33	5492,91
s	0,2333	0,1568	13,55	599,01	0,34	0,37	0,07	462,02

4.2.2.3 *2000 hodin v H<sub>2</sub>O*

a) Tloušťka laminátu 7mm

Tabulka 24. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 78. Tah\_7mm\_2000 hodin v H<sub>2</sub>O

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
n = 6	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	7,168	11,53	128,96	11220,82	6,77	1,46	0,29	10647,01
s	0,1767	0,2151	4,86	610,95	0,28	0,23	0,05	311,75

b) Tloušťka laminátu 5mm

Tabulka 25. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 79. Tah\_5mm\_2000 hodin v H<sub>2</sub>O

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
n = 6	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	5,453	11,49	119,10	10871,17	5,96	1,34	0,27	7448,09
s	0,154	0,05865	12,49	810,45	0,48	0,19	0,04	630,44

c) Tloušťka laminátu 4mm

Tabulka 26. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 80. Tah\_4mm\_2000 hodin v H<sub>2</sub>O

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
n = 8	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	4,103	11,12	89,77	8399,69	3,93	1,32	0,26	4093,52
s	0,1871	0,2517	6,42	479,13	0,25	0,18	0,04	320,14

#### 4.2.2.4 4000 hodin v H<sub>2</sub>O

a) Tloušťka laminátu 7mm

Tabulka 27. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 81. Tah\_7mm\_4000 hodin v H<sub>2</sub>O

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
n = 8	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	7,464	11,75	114,91	10997,83	5,64	1,25	0,25	10061,44
s	0,2108	0,1822	10,36	549,81	0,34	0,11	0,02	759,20

b) Tloušťka laminátu 5mm

Tabulka 28. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 82. Tah\_5mm\_4000 hodin v H<sub>2</sub>O

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
n = 6	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	5,478	11,64	114,13	10152,90	4,78	1,30	0,26	7272,44
s	0,1219	0,1266	4,94	1077,56	0,26	0,18	0,04	265,53



4.2.2.5 500 hodin v 30%  $H_2SO_4$ 

a) Tloušťka laminátu 7mm

Tabulka 29 Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 83. Tah\_7mm\_500 hodin v 30%  $H_2SO_4$ 

Sub-series #1	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	Celkové protažení	$\epsilon_{ext}$	$\epsilon_{ext}$	$F_{max}$
n = 7	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	7,214	11,51	153,55	12478,52	6,35	1,76	0,35	12745,58
s	0,1598	0,2185	7,51	420,53	0,25	0,22	0,05	667,99

b) Tloušťka laminátu 5mm

Tabulka 30. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 84. Tah\_5mm\_500 hodin v 30%  $H_2SO_4$ 

Sub-series #1	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	Celkové protažení	$\epsilon_{ext}$	$\epsilon_{ext}$	$F_{max}$
n = 7	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	5,441	11,54	148,40	11441,59	4,87	1,94	0,39	9300,54
s	0,1553	0,1056	11,51	970,17	0,34	0,50	0,10	486,48

c) Tloušťka laminátu 4mm

Tabulka 31. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 85. Tah\_4mm\_500 hodin v 30%  $H_2SO_4$ 

Sub-series #1	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	Celkové protažení	$\epsilon_{ext}$	$\epsilon_{ext}$	$F_{max}$
n = 7	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	4,191	11,17	114,27	10035,89	3,60	1,55	0,31	5349,57
s	0,1455	0,2051	8,89	998,21	0,27	0,22	0,04	455,28

## 4.2.2.6 8 hodin při 150°C

a) Tloušťka laminátu 7mm

Tabulka 32. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 86. Tah\_7mm\_8 hodin při 150°C

Sub-series #1	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	Celkové protažení	$\epsilon_{ext}$	$\epsilon_{ext}$	$F_{max}$
n = 7	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	7,296	11,43	156,89	12944,15	6,81	1,76	0,35	13068,67
s	0,1515	0,1722	11,16	831,87	0,43	0,23	0,05	759,74

b) Tloušťka laminátu 5mm

Tabulka 33. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 87. Tah\_5mm\_8 hodin při 150°C

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
n = 6	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	5,55	11,56	161,92	12645,97	5,92	1,85	0,37	10383,80
s	0,1602	0,1206	6,72	1099,19	0,59	0,37	0,07	541,11

c) Tloušťka laminátu 4mm

Tabulka 34. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 88. Tah\_4mm\_8 hodin při 150°C

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
n = 6	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
x	3,98	11,05	116,68	10304,01	3,98	1,68	0,34	5123,75
s	0,1615	0,3252	8,12	641,31	0,11	0,14	0,03	294,20

#### 4.2.3 Mechanické namáhání laminátu v tlaku

a) Tloušťka laminátu 7mm – etalon

Tabulka 35. Statistika, viz. Příloha 3 - Tabulka 89. Tlak\_7mm\_etalon

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové	ε <sub>ext</sub>
n = 9	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	mm	N/mm <sup>2</sup>
x	7,238	11,47	102,77	1,92	1,89	5640,74
s	0,1221	0,2281	8,68	0,13	0,13	371,82

b) Tloušťka laminátu 7mm – 500 hodin v 30% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Tabulka 36. Statistika, viz. Příloha 3 - Tabulka 90. Tlak\_7mm\_500 hodin v 30% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Sub-series #1	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové pro-	ε <sub>ext</sub>
n = 6	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	mm	N/mm <sup>2</sup>
x	7,017	11,69	101,69	1,73	1,75	6129,24
s	0,2054	0,2412	14,60	0,12	0,11	544,73

### 4.3 Zpracování dat mechanického namáhání laminátu

Ve všech tabulkách v oddílu 4.3, označeny jako: „Porovnání modulů pružnosti“ a „Porovnání mezi pevnosti“, jsou neoznačené rozměry hodnot v [MPa].

V tabulkách, kde se místo číselné hodnoty nachází písmeno „X“, nebyla provedena daná zkouška.

#### 4.3.1 Po dodání

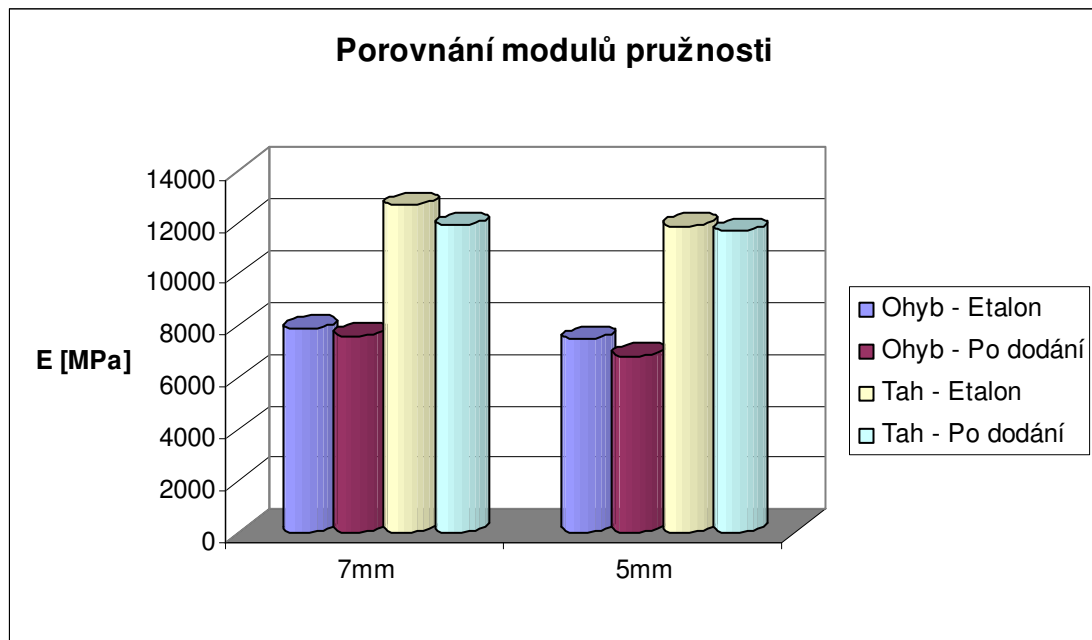
##### a) Porovnání modulů pružnosti v tahu a ohybu s etalonem:

Tabulka 37. Porovnání modulů pružnosti, Etalon – Po dodání

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb – Po dodání	Tah - Etalon	Tah – Po dodání
7mm	7874,6	7586,82	12644,52	11878,36
5mm	7472,57	6824,03	11856,41	11657,61

Tabulka 38. Procentuální vyjádření, Tabulka 37

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb – Po dodání	Tah - Etalon	Tah – Po dodání
7mm	100%	-3,65%	100%	-6,06%
5mm	100%	-8,68%	100%	-1,68%



Obrázek 23. Porovnání modulů pružnosti v tahu a ohybu, Tabulka 37

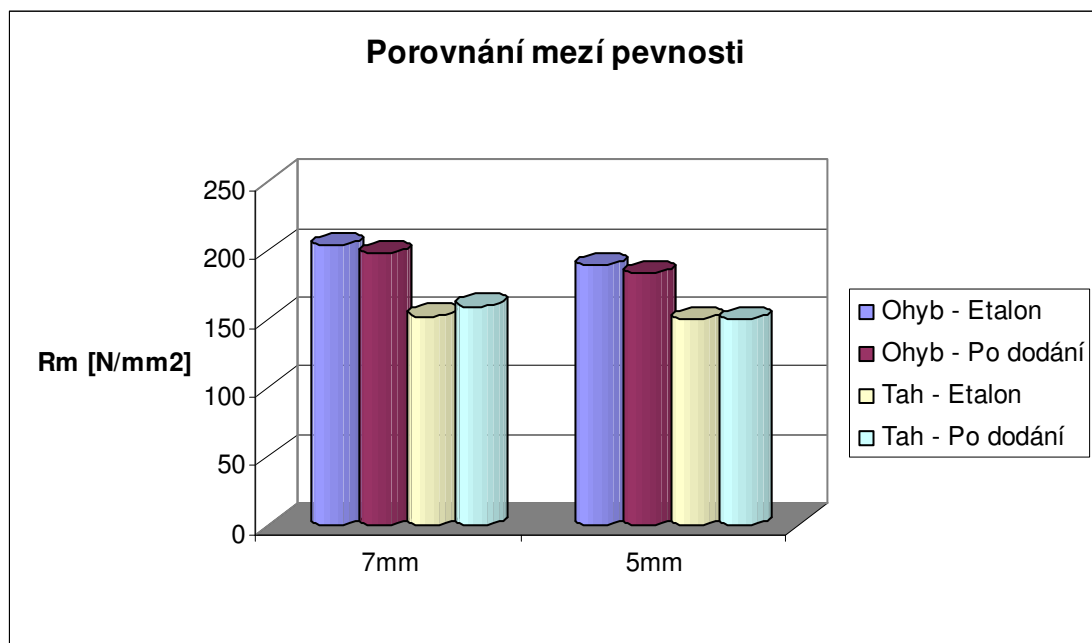
## b) Porovnání mezi pevnosti v tahu a ohybu s etalonem:

Tabulka 39. Porovnání mezi pevnosti, Etalon –Po dodání

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb – Po dodání	Tah - Etalon	Tah – Po dodání
7mm	203,91	197,85	151,93	159,3
5mm	189,12	183,57	149,44	150,21

Tabulka 40. Procentuální vyjádření, Tabulka 39

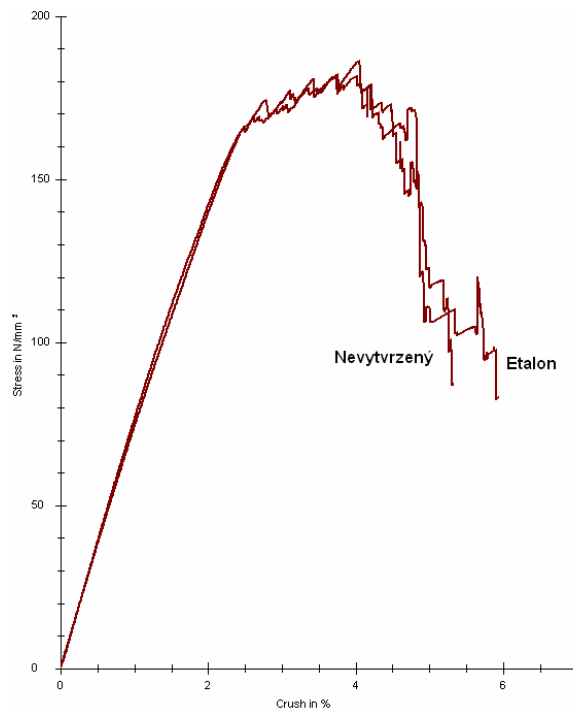
Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb – Po dodání	Tah - Etalon	Tah – Po dodání
7mm	100%	-2,97%	100%	4,85%
5mm	100%	-2,93%	100%	0,52%



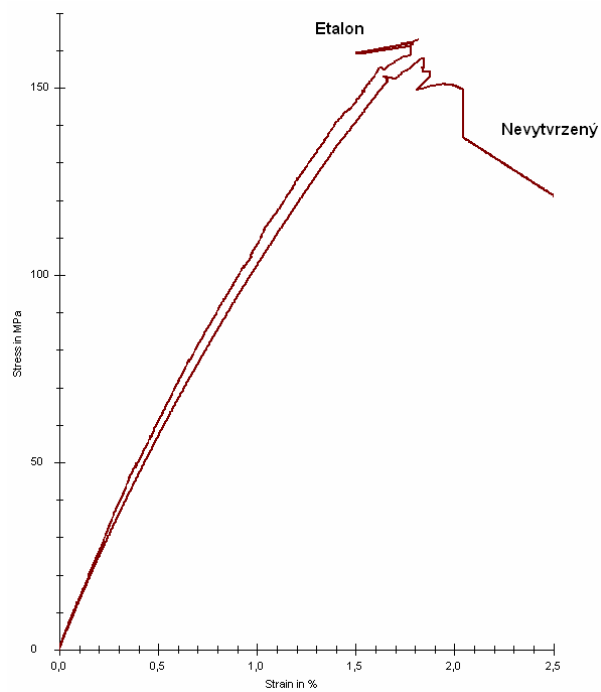
Obrázek 24. Porovnání mezi pevnosti v tahu a ohybu, Tabulka 39

## c) Shrnutí výsledků

Modul pružnosti v tahu a ohybu je pro laminát Po dodání o 3% - 8% nižší než pro Etalon. Mez pevnosti v ohybu rovněž poklesla o 3%, ale v tahu se zvýšila o 0,5% - 5%. Prokázali jsme změny materiálových vlastností.



Obrázek 25. Ohyb\_7mm, Etalon – Po dodání



Obrázek 26. Tah\_7mm, Etalon – Po dodání

4.3.2 Vliv vody – 2000 hodin a 4000 hodin v H<sub>2</sub>O

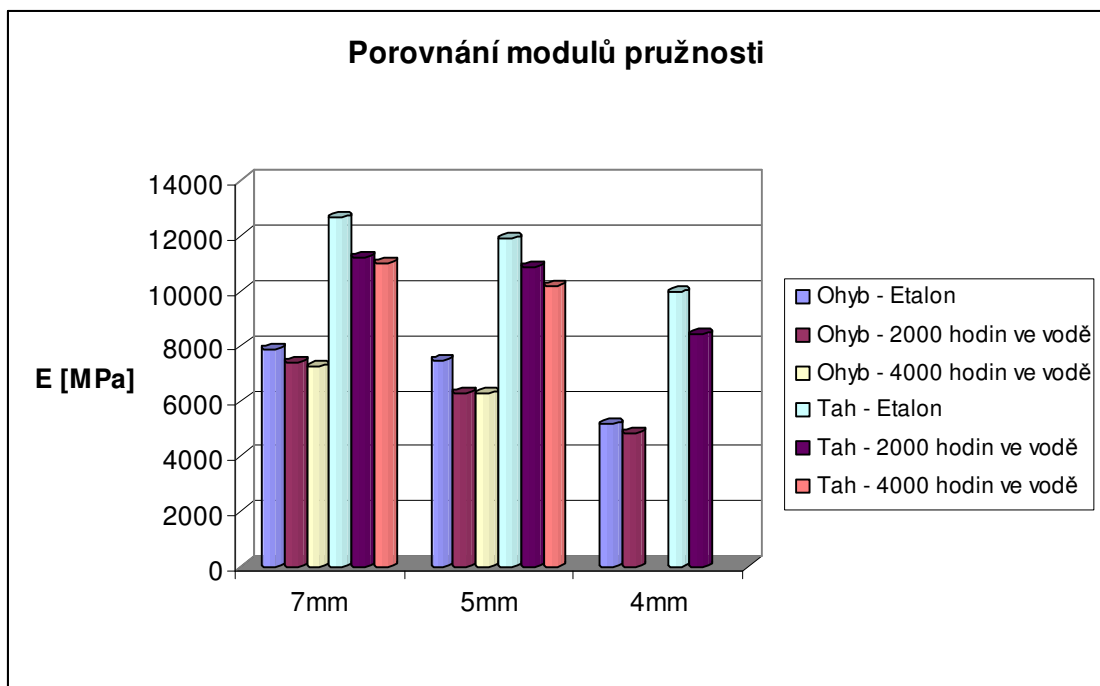
a) Porovnání modulů pružnosti v tahu a ohybu s etalonem:

Tabulka 41. Porovnání modulů pružnosti, Etalon – voda

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb - 2000 hodin ve vodě	Ohyb - 4000 hodin ve vodě	Tah - Etalon	Tah - 2000 hodin ve vodě	Tah - 4000 hodin ve vodě
7mm	7874,6	7384,08	7240	12644,52	11220,82	10997,83
5mm	7472,57	6281,26	6266	11856,41	10871,17	10152,9
4mm	5138,18	4849,79	X	9932,47	8399,69	X

Tabulka 42. Procentuální vyjádření, Tabulka 41

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb - 2000 hodin ve vodě	Ohyb - 4000 hodin ve vodě	Tah - Etalon	Tah - 2000 hodin ve vodě	Tah - 4000 hodin ve vodě
7mm	100%	-6,23%	-8,05%	100,00%	-11,26%	-13,02%
5mm	100%	-15,94%	-16,14%	100,00%	-8,31%	-14,37%
4mm	100%	-5,61%	X	100,00%	-15,43%	X



Obrázek 27. Porovnání modulů pružnosti v tahu a ohybu, Tabulka 41

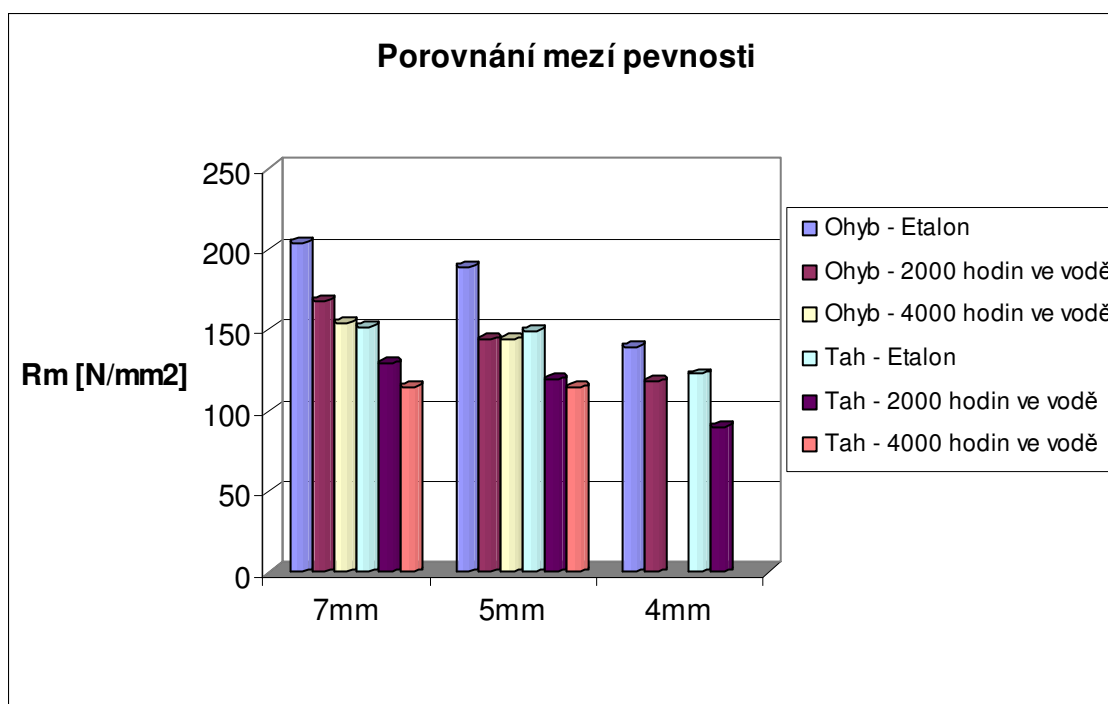
## b) Porovnání mezi pevnosti v tahu a ohybu s etalonem:

Tabulka 43. Porovnání mezi pevnosti, Etalon - voda

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb - 2000 hodin ve vodě	Ohyb - 4000 hodin ve vodě	Tah - Etalon	Tah - 2000 hodin ve vodě	Tah - 4000 hodin ve vodě
7mm	203,91	167,84	154,29	151,93	128,96	114,91
5mm	189,12	143,64	143,68	149,44	119,1	114,13
4mm	139,65	118,16	X	122,47	89,77	X

Tabulka 44. Procentuální vyjádření, Tabulka 43

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb - 2000 hodin ve vodě	Ohyb - 4000 hodin ve vodě	Tah - Etalon	Tah - 2000 hodin ve vodě	Tah - 4000 hodin ve vodě
7mm	100%	-17,69%	-24,33%	100%	-15,12%	-24,37%
5mm	100%	-24,05%	-24,03%	100%	-20,30%	-23,63%
4mm	100%	-15,39%	X	100%	-26,70%	X

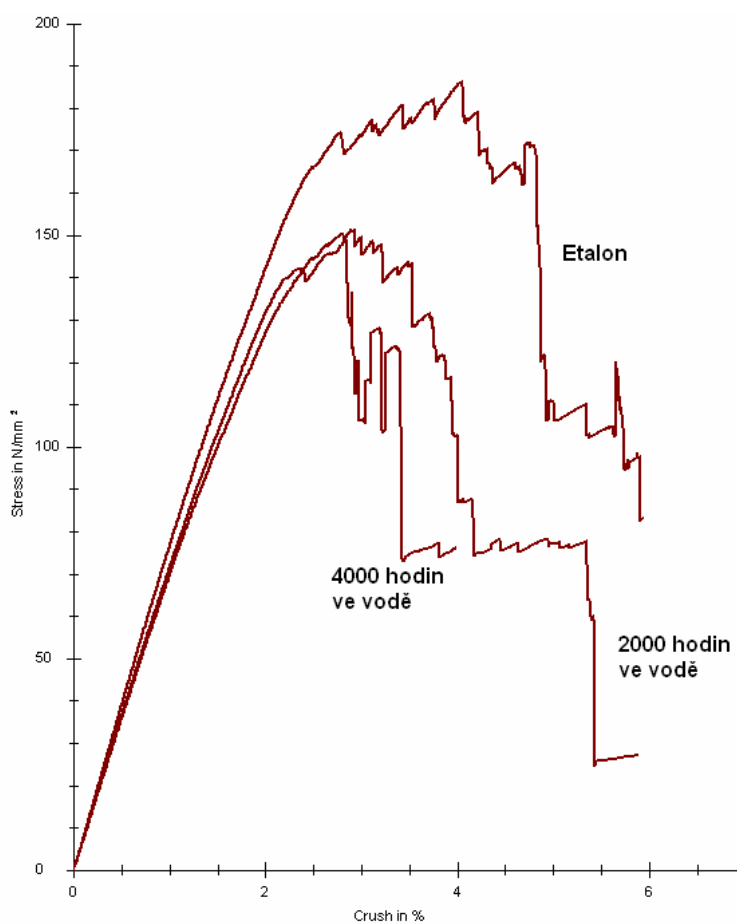


Obrázek 28. Porovnání mezi pevnosti v tahu a ohybu, Tabulka 43

## c) Porovnání výsledků

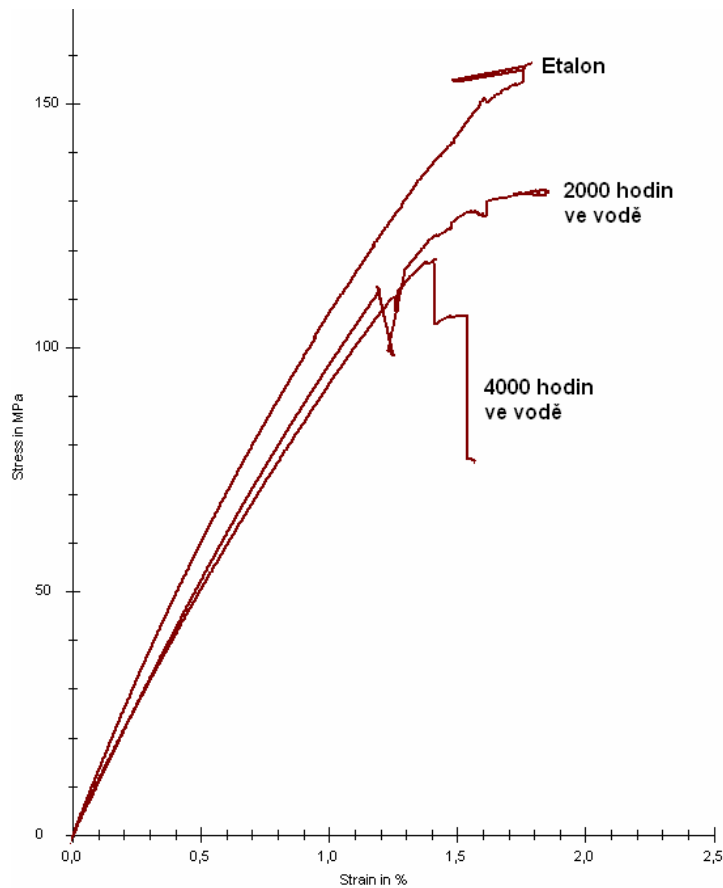
Voda způsobila velké změny modulů pružnosti a mezí pevnosti v tahu a ohybu. Rozdíl mezi dobou, po kterou jsme nechali laminát ve vodě (2000 hodin a 4000 hodin), není již tak velký, jako porovnání etalon – 2000 hodin ve vodě. Zde došlo k poklesům hodnot až o

15% – 25%. Nemůžeme zde ale s jistotou tvrdit, zda je změna trvalá nebo dočasná. Nesušili jsme laminát na původní hmotnost, a proto smíme tvrdit, že laminát při dlouhodobém kontaktu s vodou ztrácí své původní hodnoty. Nemáme prokázáno, zda po vysušení nenabude své původní vlastnosti zpět. Velké změny v chování laminátu lze pozorovat na Obrázek 29, Obrázek 30.



Obrázek 29. Ohyb\_7mm, Etalon – 2000+4000hodin ve vodě





Obrázek 30. Tah\_7mm, Etalon – 2000+4000hodin ve vodě

### 4.3.3 500 hodin v 30% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

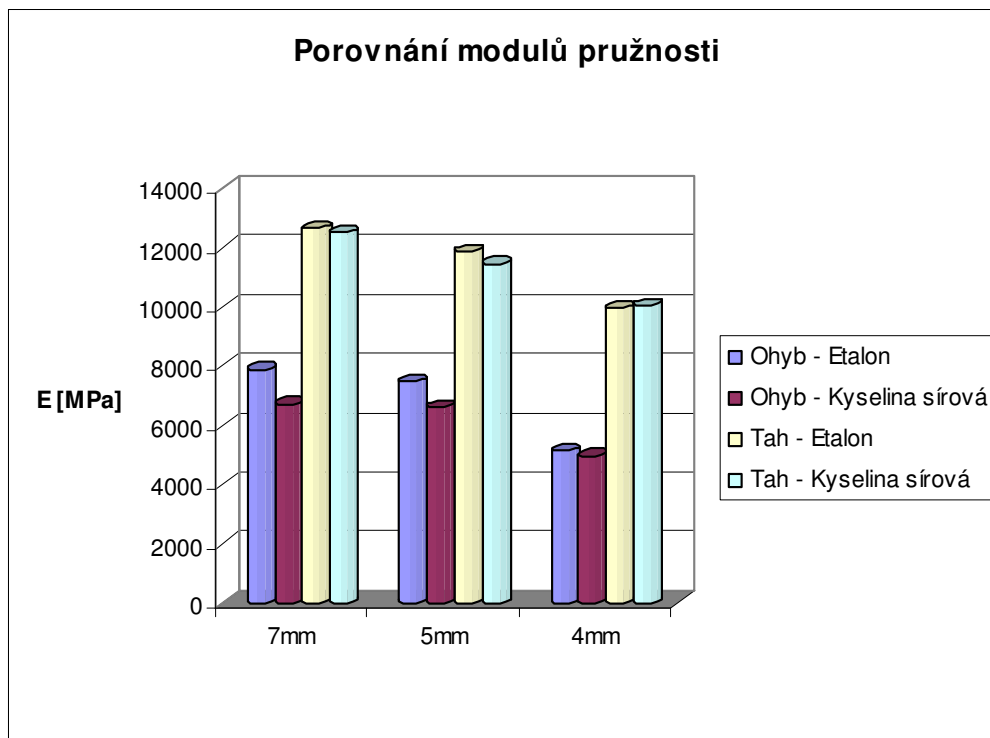
#### a) Porovnání modulů pružnosti v tahu a ohybu s etalonem:

Tabulka 45. Porovnání modulů pružnosti, Etalon – kyselina sírová

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb - Kyselina sírová	Tah - Etalon	Tah - Kyselina sírová
7mm	7874,6	6703,03	12644,52	12478,52
5mm	7472,57	6621,6	11856,41	11441,59
4mm	5138,18	4955,68	9932,47	10035,89

Tabulka 46. Procentuální vyjádření, Tabulka 45

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb - Kyselina sírová	Tah - Etalon	Tah - Kyselina sírová
7mm	100%	-14,88%	100%	-1,31%
5mm	100%	-11,39%	100%	-3,50%
4mm	100%	-3,55%	100%	1,04%



Obrázek 31. Porovnání modulů pružnosti v tahu a ohybu, Tabulka 45

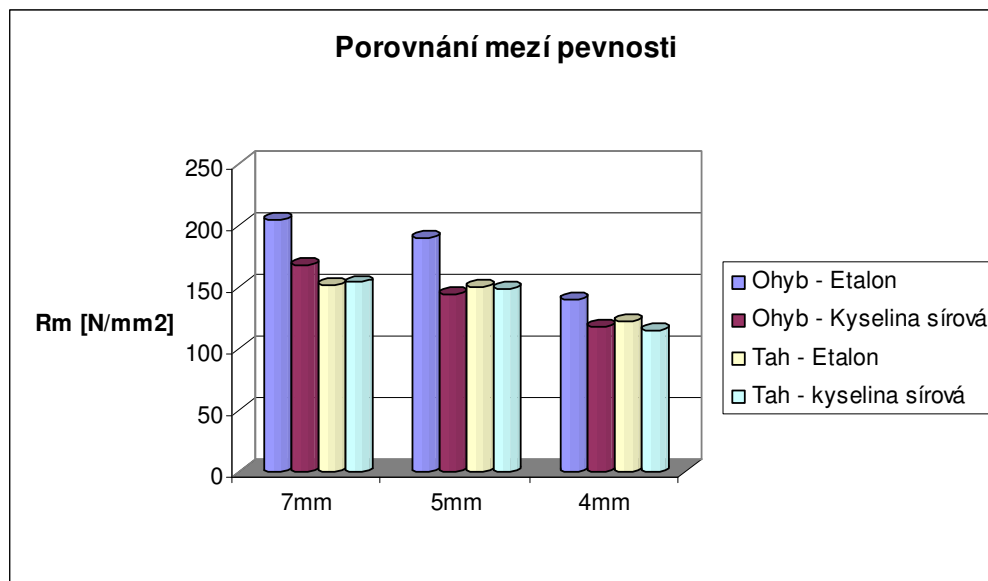
**b) Porovnání mezi pevností v tahu a ohybu s etalonem:**

Tabulka 47. Porovnání mezi pevností, etalon – kyselina sírová

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb - Kyselina sírová	Tah - Etalon	Tah - kyselina sírová
7mm	203,91	167,84	151,93	153,55
5mm	189,12	143,64	149,44	148,4
4mm	139,65	118,16	122,47	114,27

Tabulka 48. Procentuální vyjádření, Tabulka 47

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb - Kyselina sírová	Tah - Etalon	Tah - Kyselina sírová
7mm	100	-17,69	100	1,07
5mm	100	-24,05	100	-0,70
4mm	100	-15,39	100	-6,70



Obrázek 32. Porovnání mezi pevnosti v tahu a ohybu, Tabulka 47

**c) Porovnání modulu pružnosti a meze pevnosti v tlaku:**

Tabulka 49. Modul pružnosti v tlaku, etalon – kyselina sírová

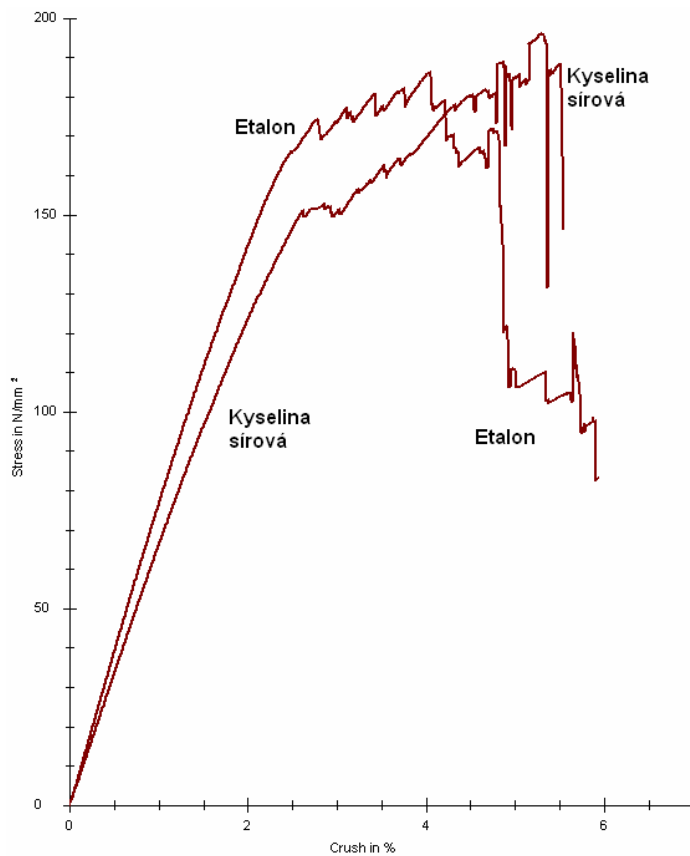
Tloušťka	Tlak - Etalon	Tlak - Kyselina sírová
7mm	5640,74	6129,24
v %	100%	8,66%

Tabulka 50. Mez pevnosti v tlaku, etalon – kyselina sírová

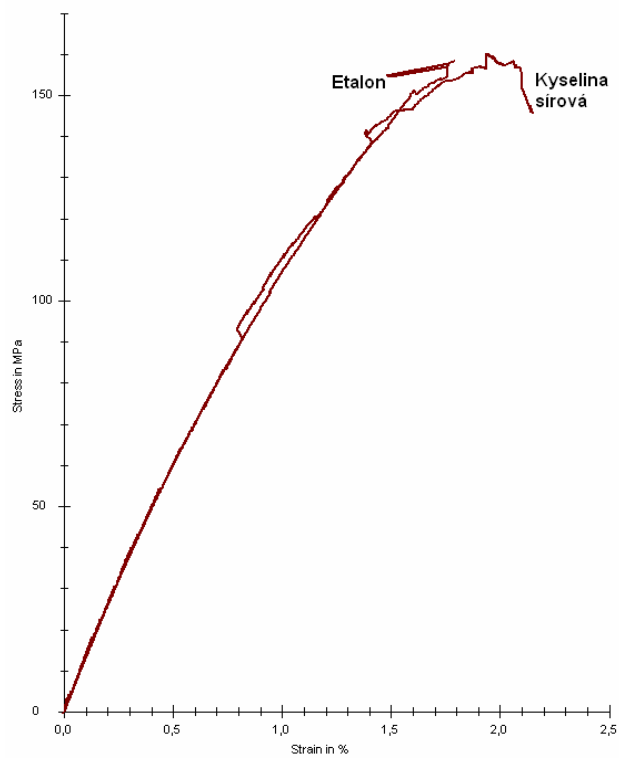
Tloušťka	Tlak - Etalon	Tlak - Kyselina sírová
7mm	102,77	101,69
v %	100%	-1,05%

**d) Porovnání výsledků**

Ohybové vlastnosti laminátu se snížily vlivem působení kyseliny sírové do 24%. Tahové a tlakové vlastnosti laminátu se téměř nezměnily. Laminát má relativně dobrou odolnost vůči agresivnímu prostředí ale jen při krátkodobém kontaktu.



Obrázek 33. Ohyb\_7mm, Etalon – Kyselina sírová



Obrázek 34. Tah\_7mm, Etalon Kyselina sírová

## 4.3.4 8 hodin při 150°C

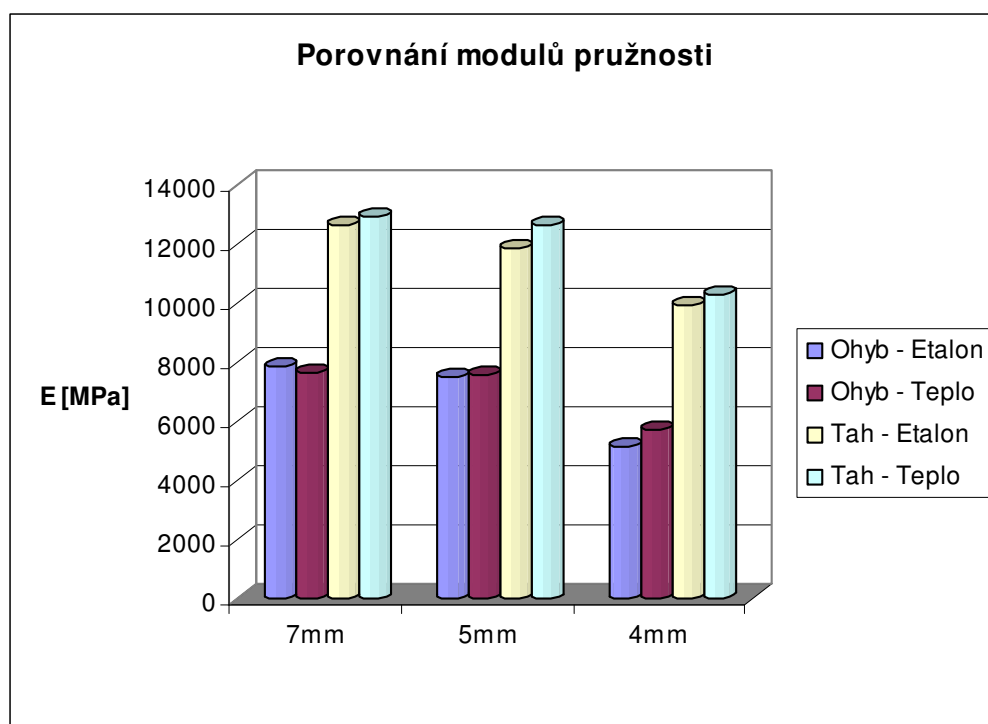
## a) Porovnání modulů pružnosti v tahu a ohybu s etalonem:

Tabulka 51. Porovnání modulů pružnosti, Etalon – teplo

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb - Teplo	Tah - Etalon	Tah - Teplo
7mm	7874,6	7672,34	12644,52	12944,15
5mm	7472,57	7551,99	11856,41	12645,97
4mm	5138,18	5736,99	9932,47	10304,01

Tabulka 52. Procentuální vyjádření, Tabulka 51

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb - Teplo	Tah - Etalon	Tah - Teplo
7mm	100	-2,57	100	2,37
5mm	100	1,06	100	6,66
4mm	100	11,65	100	3,74



Obrázek 35. Porovnání modulů pružnosti v tahu a ohybu, Tabulka 51

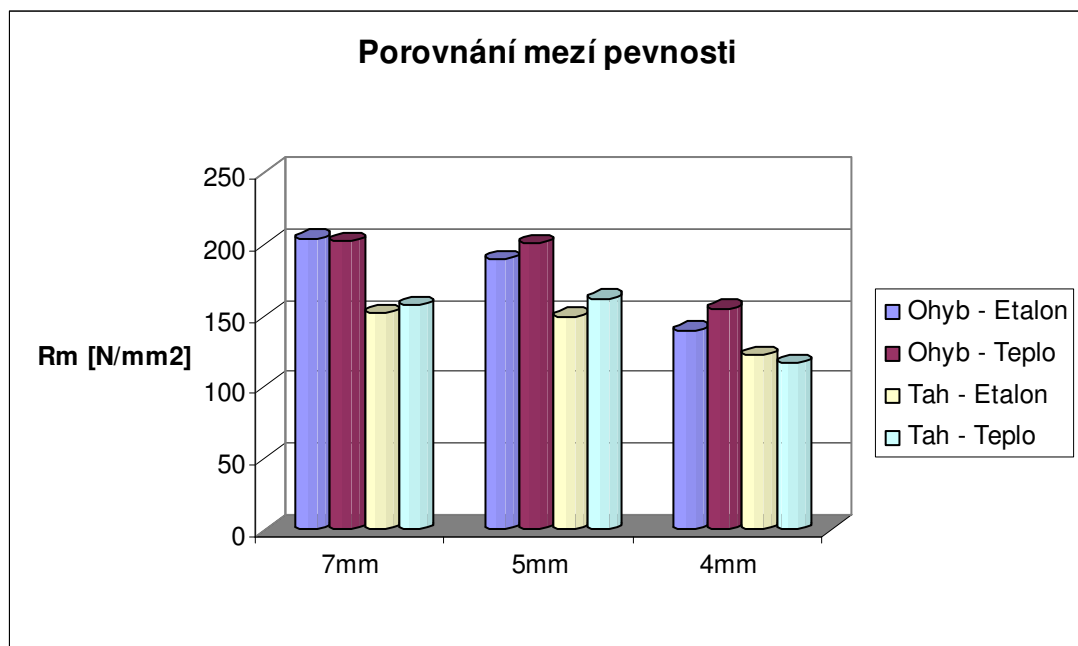
## b) Porovnání mezi pevnosti v tahu a ohybu s etalonem:

Tabulka 53. Porovnání mezi pevnosti, Etalon – teplo

Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb - Teplo	Tah - Etalon	Tah - Teplo
7mm	203,91	202,06	151,93	156,89
5mm	189,12	200,49	149,44	161,92
4mm	139,65	154,92	122,47	116,68

Tabulka 54. Procentuální vyjádření, Tabulka 53

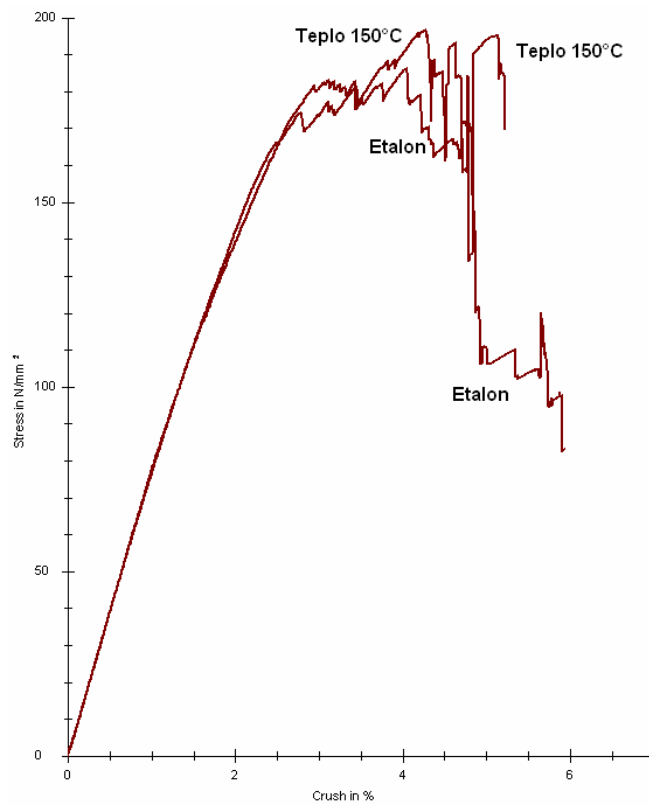
Tloušťka	Ohyb - Etalon	Ohyb - Teplo	Tah - Etalon	Tah - Teplo
7mm	100	-0,91	100	3,26
5mm	100	6,01	100	8,35
4mm	100	10,93	100	-4,73



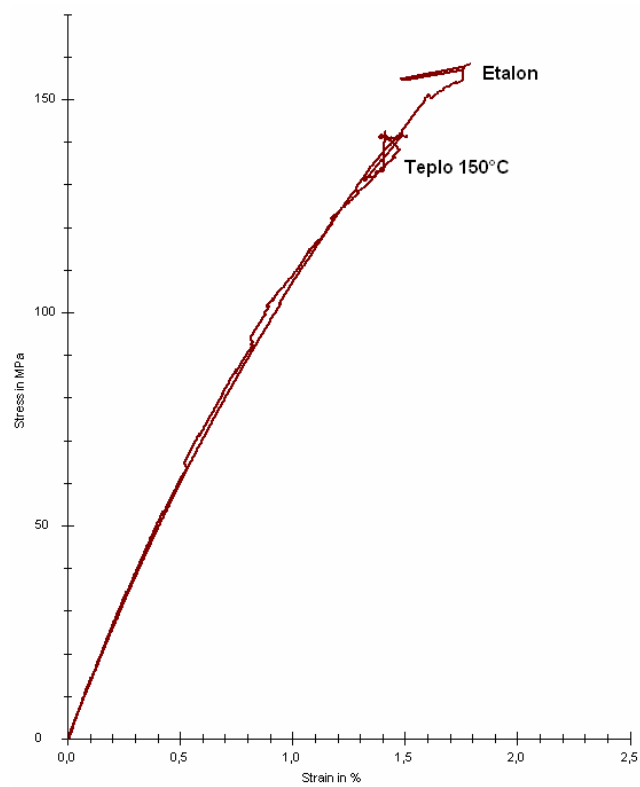
Obrázek 36. Porovnání mezi pevnosti v tahu a ohybu, Tabulka 53

## c) Porovnání výsledků

Působením tepla na laminát jsme prokázali změny vlastností, co se týká hodnot modulů pružnosti a mezí pevnosti v tahu a ohybu. U tloušťky laminátu 4mm došlo k 10% zlepšení vlastností.



Obrázek 37. Ohyb\_7mm, Etalon – Teplo 150°C



Obrázek 38. Tah\_7mm, Etalon – Teplo 150°C

## 5 ANALYTICKÉ VÝPOČTY PRO LAMINÁTOVOU STRUKTURU

### 5.1 Součinitele $\alpha$ a $\beta$

Pro stanovení součinitelů  $\alpha$  a  $\beta$  vycházím z normy ČSN EN 978 Podzemní sklolaminátové nádrže – Stanovení součinitelů  $\alpha$  a  $\beta$ .

#### 5.1.1 Definice postupů a prostředků ke stanovení součinitelů

**Součinitel  $\alpha$ :** poměr počáteční deformace zatěžovaného materiálu a deformace vyvolané stejným konstantním zatížením, extrapolované pro dané období

**Součinitel  $\beta$ :** poměr mezi tuhostí nosníku po skladování ve vodě a teplotě 50 °C po dobu 1000 hodin a počáteční tuhostí nosníku stanovenou v suchých podmínkách při teplotě 23 °C po dodatečném vytvrzení vzorku.

#### Zkušební přístroj

Je to zařízení, které je schopné vyvozovat řízenou intenzitu stlačování tak, aby příkládaná síla působila bez rázů. Přesnost zatěžování musí být v rozmezí  $\pm 0,5$  % největšího zaznamenaného zatížení.

#### Čtyřbodový zkušební přípravek

Dvě podpěrné tyče, jedna pevná a jedna s otočnými kuličkovými ložisky a zatěžující vačka se dvěma zatěžujícími tyčemi opatřenými otočnými kuličkovými ložisky tvoří zkušební čtyřbodový přípravek. Podpěrné a zatěžovací tyče musí mít průměr 30 mm. Podpěrná délka  $L_1$ , je 0,5.D, zaokrouhlená na nejbližší vyšších 100 mm a podpěrná délka  $L_2$  je 0,25.D, zaokrouhlená na nejbližší vyšších 50 mm. Rozpětí podpěrných a zatěžovacích tyčí musí být nejméně rovno šířce zkušebního vzorku. Při zkoušení konstrukce se žebry se musí tvar zatěžovacích tyčí přizpůsobit šířce vzorku.

#### Měřicí zařízení

Pro měření průhybu může být použit přídavek přizpůsobený k zatěžovací vačce nebo upevněný samostatně tak, aby body při klidovém zatížení byly co možno nejbližší zatěžovacím tyčím vačky. Zařízení musí být schopno měřit s přesností na nejbližší 0,01 mm.

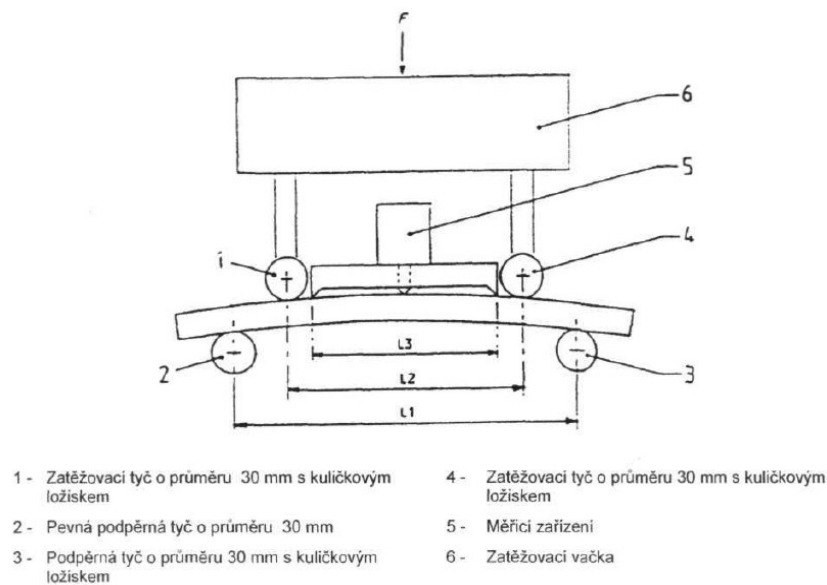


## Pec pro vytvrzování vzorků

Pec s řízenou teplotou a nucenou cirkulací vzduchu, mající dostatečně velký objem, aby pojala zkušební vzorky a se schopností udržovat teplotu.

## Vodní lázeň

Vodní lázeň takových rozměrů, aby pojala zkušební vzorky a byla schopná udržovat teplotu vody na hodnotě  $(50 \pm 2) ^\circ\text{C}$ .



Obrázek 39. Čtyřbodový zkušební přípravek se samostatným měřícím zařízením

### 5.1.2 Stanovení součinitele $\alpha$

Zkouška se čtyřbodovým ohýbacím přípravkem – postup zkoušky

- Číselník měřidla se nastaví na nulu při působení zatížení pouze od hmotnosti měřícího zařízení a zatěžovací vačky.
- Opatrně se přikládá zatížení  $F$  (od kterého se odečetla hmotnost zatěžovací vačky) na zatěžovací vačku s přibližně stejnou rychlostí, jako je rychlost pro stanovení tuhosti zkušebních vzorků v ohýbacím přípravku.
- Při plném klidovém zatížení působícím na zkušební vzorek se měří deformace po 6 min. (= 0,1 h), 24 h, 50 h, 100 h, 200 h, 500 h a 1000 h.
- Ze série změřených deformací začínajících při 24 h a odpovídajících časech se vypočte průhyb s použitím metody nejmenších čtverců.

- Pro každý vzorek se vypočte součinitel  $\alpha$ .
- Vypočte se průměrná hodnota součinitele  $\alpha$  pro dva zkušební segmenty ze stejného vzorku.

### 5.1.3 Stanovení součinitele $\beta$

#### a) Postup zkoušky

- Použijí se dva zkušební segmenty pro které byla stanovena počáteční nosníková tuhost.
- Vytvrzování vzorků

*Nádrže se sendvičovou stěnou* - v závislosti na materiálu jádra sendviče 4 hodiny při  $80 \pm 2$  °C nebo 16 hodin při  $60 \pm 2$  °C.

*Nádrže všech ostatních konstrukcí* - doba a teplota musí být odsouhlasená mezi zainteresovanými partnery podle použitého materiálu.

- Před dalším zkoušením mohou být všechny řezné hrany na segmentech izolovány elastickým povlakem odolávajícím vodě o teplotě 50 °C.
- Pro každý zkušební segment se stanoví nosníková tuhost ( $S_1$ ) v  $N.mm^2$ .
- Zkušební segmenty se vystaví působení vody o teplotě  $(50 \pm 2)$  °C po dobu 1000 hodin. Po této době se zkušební segmenty osuší.
- Pro každý zkušební segment se stanoví nosníková tuhost ( $S_2$ ) v  $N.mm^2$ .
- Pro každý zkušební segment se vypočte součinitel  $\beta$  s použitím vztahu:

$$\beta = S_2/S_1, \text{ kde}$$

$S_1$  je nosníková tuhost po vytvrzení v  $N.mm^2$ ;

$S_2$  je nosníková tuhost po 1000 h ve vodě teplé 50 °C v  $N.mm^2$ . Vypočte se průměrná hodnota součinitele  $\beta$  pro dva segmenty ze stejného vzorku.

#### b) Stanovení koeficientu $\beta$ pro testovaný laminát dle 4.2

Při stanovování koeficientu  $\beta$ , jsme nebyli schopni dodržet přesné znění normy ČSN EN 978. Norma požaduje exponovat vzorky ve vodě po dobu 1000 hodin, naše vzorky byly exponovány ve vodě po dobu 2000 hodin. Proto si volíme modifikovaný koeficient  $\beta^*$ .

Stanovení součinitele  $\beta^*$ :

Vztah pro stanovení  $\beta^*$ :

$$\beta^* = E_2/E_1 \quad (25)$$

$E_1$  – modul pružnosti v ohybu pro Etalon : 7mm - Tabulka 5, 5mm – Tabulka 6, 4mm – Tabulka 7

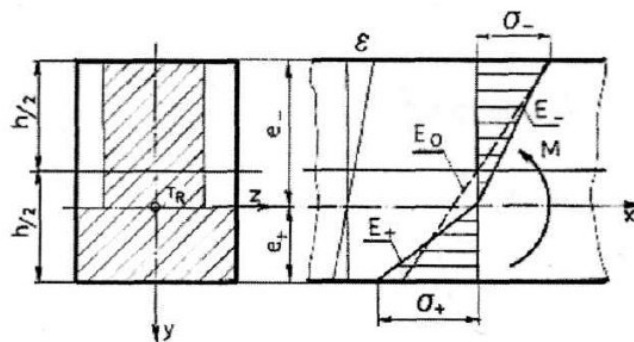
$E_2$  - modul pružnosti v ohybu pro 2000 hodin ve vodě: 7mm – Tabulka 8, 5mm – Tabulka 9, 4mm – Tabulka 10

Tabulka 55. Stanovení koeficientu  $\beta^*$

Tloušťka	Ohyb – Etalon ( $E_1$ ) [MPa]	Ohyb - 2000 hodin ve vodě( $E_2$ ) [MPa]	$\beta^*$
7mm	7874,6	7384,08	0,94
5mm	7472,57	6281,26	0,84
4mm	5138,18	4849,79	0,95

## 5.2 Návrh strukturního modelu mechanického chování laminátu

Při zjišťování strukturního modelu, vycházíme z bimodulárního chování laminátu. To znamená, že vykazuje výrazně odlišné hodnoty v tahu a tlaku. Tento fakt jsme prokázali u tloušťky laminátu 7mm, kde jsme provedli u etalonu tlakovou a tahovou zkoušku. Pokusíme se dokázat možnost aplikace vztahů bimodulárního ohybu prutů vyztužených dlouhými vlákny na testovaný laminát. Pro zjednodušení výpočtu bereme 3 vrstvy lamin jako homogenní materiál s bimodulárním chováním.[8]



Obrázek 40. Princip bimodulárního ohybu

Tabulka 56. Tah, Tlak, Ohyb – etalon 7mm

	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
<b>Tlak</b>	$E^- = 5640,74$	$\sigma^- = 102,77$
<b>Ohyb</b>	$E_0 = 7874,6$	$\sigma_0 = 203,91$
<b>Tah</b>	$E^+ = 11856,41$	$\sigma^+ = 151,93$

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

$$k^2 = \frac{E_0}{E^+} = \frac{7874,6}{11856,41} = 0,664 \quad (26)$$

$$k = \underline{\underline{0,81496254}}$$

$$\eta = \frac{k}{2-k} = \frac{0,81496254}{2-0,81496254} = 0,687710361 \quad (27)$$

$$\eta^2 = \underline{\underline{0,472945541}}$$

Vztah pro modul pružnosti v tlaku je v našem případě:

$$\eta^2 = \frac{E^-}{E^+} \Rightarrow E^- = \eta^2 \cdot E^+ \quad (28)$$

$$E^- = 0,472945541 \cdot 11856,41$$

$$\underline{\underline{E^- = 5607,43MPa}}$$

Modul pružnosti v tahu byl naměřen  $E^- = 5640,74MPa$ . Modul pružnosti v tahu analyticky vypočten  $E^- = 5607,43MPa$ . Rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami činí 0,6%. Prokázali jsme možnou aplikaci teorie bimodulárního ohybu prutu vyztužených dlouhými vlákny na testovaný laminát.

## ZÁVĚR

Úkolem diplomové práce bylo zjistit chování laminátu plněného skelnými vlákny v různém prostředí. Provedli jsme zatěžování laminátu vlivem vody, 30% kyseliny sírové a vysoké teploty. Souhrnné statistiky měření jsou v části 4.2. Porovnané charakteristiky zatíženého a výchozího stavu se nacházejí v části 4.3. Porovnávali jsme moduly pružnosti a meze pevnosti v tahu, tlaku a ohybu. Problematikou stanovení součinitelů  $\alpha$  a  $\beta$  jsem se zabýval v části 5.1. V poslední části práce jsme se pokusil aplikovat teorii bimodulárního ohybu pro danou laminátovou strukturu. Ta se nachází v části 5.2.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Šuba, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů, VUT v Čs. Redakci VN MON, 1988
- [2] Lukovics, I.: Konstrukční materiály a technologie, VUT v Brně, 1992
- [3] Šternschuss, A. – Zvonař, V. – Slezák, O. – Kučera, M.: Polyesterové skelné lamináty, SNTL, 1961
- [4] Rejman, M.: Co a jak s polyesterovými skelnými lamináty, SNTL, 1972
- [5] Zwick PC software 7092.105 (manuál), 1992
- [6] Kovářová, M.: Modelování elastických vlastností polymerů vyztužených krátkými vlákny, Disertační práce, 1998
- [7] Maceška, T.: Studium ohybového chování laminátových stěn na bázi skelných rohoží, Diplomová práce 1999
- [8] Šuba, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů, UTB, 2005
- [9] Maňas, M. – Tomis, F.: Výrobní stroje a zařízení, VUT v Čs. Redakci VN MON, 1987

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

[B]	-	matice vazebné tuhosti
[C]	-	matice poddajnosti
[D]	-	matice ohybové tuhosti
[S]	-	matice tuhosti
[T]	-	transformační matice
[ $\varepsilon$ ]	-	tenzor deformace
$a_0$	mm	střední tloušťka
$b_0$	mm	střední šířka
D	mm	průměr
E	MPa	modul pružnosti v ohybu
$E^-$	MPa	modul pružnosti v tlaku
e.	mm	vzdálenost od neutrální osy
$E^{**}$	MPa	válcový modul pružnosti
$E^+$	MPa	modul pružnosti v tahu
$e_+$	mm	vzdálenost od neutrální osy
$E_0$	MPa	modul pružnosti v ohybu
F	N	síla
$F_{\max}$	N	maximální síla při které došlo k potušení materiálu
h	mm	délka (výška)
k	-	označení vrstvy laminátu
$L_1$	mm	podpěrná délka
$L_2$	mm	podpěrná délka
P26	MPa	dolní limit určení E - modulu 1
P27	MPa	horní limit určení E - modulu 1

P29	MPa	dolní limit určení E - modulu 2
P30	MPa	horní limit určení E - modulu 2
s	-	rozptyl
S <sub>1</sub>	-	nosníková tuhost
S <sub>2</sub>	-	nosníková tuhost
v	mm/min	rychlost
x	-	aritmetický průměr – v tabulkách
x,y,z	-	označení os souřadného systému
y	mm	průhyb
α	-	součinitel
β	-	součinitel
β*	-	modifikovaný součinitel
ΔL	mm	prodloužení na délce
ε <sub>ext</sub>	%	protažení na extenzometru
ε <sub>ext</sub>	mm	protažení na extenzometru
ε <sub>Pkr</sub>	%	prodloužení při kritickém napětí
ν	-	Poissonovo číslo
σ	MPa	napětí
σ <sup>-</sup>	MPa	kritické napětí v tlaku
σ <sub>+</sub>	MPa	kritické napětí v tahu
σ <sub>O</sub>	MPa	kritické napětí v ohybu
σ <sub>Pkr</sub>	MPa	kritické napětí, mez pevnosti
σ <sub>x</sub>	MPa	napětí normálové ve směru x
σ <sub>z</sub>	MPa	napětí normálové ve směru z
τ <sub>xz</sub>	MPa	napětí smykové v rovině xz



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Mechanické chování a) izotropního, b) ortotropního, c) obecně anizotropního plošného prvku .....	14
Obrázek 2. Příklad dvouosé napjatosti.....	15
Obrázek 3. Mechanické chování ortotropní laminy vzhledem k libovolným osám .....	18
Obrázek 4. Příklad deformace.....	20
Obrázek 5. Ekvivalentní systém sil a momentů.....	21
Obrázek 6. Označení vrstev .....	22
Obrázek 7. Jednodílná forma pro beztlakové tváření a) pozitivní b) negativní.....	35
Obrázek 8. Lisování pryžovou plenou a) vakuem, b) vakuem a přetlakem.....	37
Obrázek 9. Lisování pružným lisovníkem a) otevřená forma, b) forma po uzavření .....	38
Obrázek 10. Schéma činnosti předformovacího stroje .....	39
Obrázek 11. Schéma předformování v otevřeném prostoru .....	39
Obrázek 12. Předformování „za mokra“ .....	40
Obrázek 13. Schéma kontinuální výroby předimpregnovaného textilu.....	42
Obrázek 14. Laminát tloušťky 7mm .....	52
Obrázek 15. Laminát tloušťky 5mm .....	52
Obrázek 16. Laminát tloušťky 4mm .....	52
Obrázek 17. Složení jednotlivých vrstev laminátu .....	53
Obrázek 18. Určení modulu pružnosti .....	54
Obrázek 19. Princip podpěr při zkoušce ohybem .....	55
Obrázek 20. Uchopení vzorku při ohybové zkoušce .....	56
Obrázek 21. Schéma k tahové zkoušce.....	56
Obrázek 22. Schéma k tlakové zkoušce.....	57
Obrázek 23. Porovnání modulů pružnosti v tahu a ohybu, Tabulka 37.....	67
Obrázek 24. Porovnání mezí pevnosti v tahu a ohybu, Tabulka 39.....	68
Obrázek 25. Ohyb_7mm, Etalon – Po dodání .....	69
Obrázek 26. Tah_7mm, Etalon – Po dodání.....	69
Obrázek 27. Porovnání modulů pružnosti v tahu a ohybu, Tabulka 41 .....	70
Obrázek 28. Porovnání mezí pevnosti v tahu a ohybu, Tabulka 43.....	71
Obrázek 29. Ohyb_7mm, Etalon – 2000+4000hodin ve vodě.....	72
Obrázek 30. Tah_7mm, Etalon – 2000+4000hodin ve vodě .....	73

---

Obrázek 31. Porovnání modulů pružnosti v tahu a ohybu, Tabulka 45.....	74
Obrázek 32. Porovnání mezí pevnosti v tahu a ohybu, Tabulka 47.....	75
Obrázek 33. Ohyb_7mm, Etalon – Kyselina sírová.....	76
Obrázek 34. Tah_7mm, Etalon Kyselina sírová .....	76
Obrázek 35. Porovnání modulů pružnosti v tahu a ohybu, Tabulka 51.....	77
Obrázek 36. Porovnání mezí pevnosti v tahu a ohybu, Tabulka 53.....	78
Obrázek 37. Ohyb_7mm, Etalon – Teplo 150°C.....	79
Obrázek 38. Tah_7mm, Etalon – Teplo 150°C .....	79
Obrázek 39. Čtyřbodový zkušební přípravek se samostatným měřícím zařízením .....	81
Obrázek 40. Princip bimodulárního ohybu .....	83

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1. Složení jednotlivých vrstev laminátu.....	53
Tabulka 2. Přehled prováděných zkoušek v tahu a ohybu .....	57
Tabulka 3. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 57. Ohyb_7mm_po dodání.....	58
Tabulka 4. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 58. Ohyb_5mm_po dodání.....	58
Tabulka 5. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 59. Ohyb_7mm_etalon.....	59
Tabulka 6. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 60. Ohyb_5mm_etalon.....	59
Tabulka 7. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 61. Ohyb_4mm_etalon.....	59
Tabulka 8. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 62. Ohyb_7mm_2000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	59
Tabulka 9. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 63. Ohyb_5mm_2000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	60
Tabulka 10. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 64. Ohyb_4mm_2000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	60
Tabulka 11. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 65. Ohyb_7mm_4000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	60
Tabulka 12. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 66. Ohyb_5mm_4000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	60
Tabulka 13. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 67. Ohyb_7mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	61
Tabulka 14. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 68. Ohyb_5mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	61
Tabulka 15. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 69. Ohyb_4mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	61
Tabulka 16. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 70. Ohyb_7mm_8hodin při 150°C.....	61
Tabulka 17. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 71. Ohyb_5mm_8hodin při 150°C.....	62
Tabulka 18. Statistika, viz. Příloha 1 - Tabulka 72. Ohyb_4mm_8hodin při 150°C.....	62
Tabulka 19. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 73. Tah_7mm_Po dodání.....	62
Tabulka 20. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 74. Tah_5mm_Po dodání.....	62
Tabulka 21. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 75. Tah_7mm_etalon .....	63
Tabulka 22. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 76. Tah_5mm_etalon .....	63
Tabulka 23. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 77. Tah_4mm_etalon .....	63
Tabulka 24. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 78. Tah_7mm_2000 hodin v H <sub>2</sub> O.....	63
Tabulka 25. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 79. Tah_5mm_2000 hodin v H <sub>2</sub> O.....	64
Tabulka 26. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 80. Tah_4mm_2000 hodin v H <sub>2</sub> O.....	64
Tabulka 27. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 81. Tah_7mm_4000 hodin v H <sub>2</sub> O.....	64
Tabulka 28. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 82. Tah_5mm_4000 hodin v H <sub>2</sub> O.....	64

Tabulka 29 Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 83. Tah_7mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	65
Tabulka 30. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 84. Tah_5mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	65
Tabulka 31. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 85. Tah_4mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	65
Tabulka 32. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 86. Tah_7mm_8 hodin při 150°C .....	65
Tabulka 33. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 87. Tah_5mm_8 hodin při 150°C .....	66
Tabulka 34. Statistika, viz. Příloha 2 - Tabulka 88. Tah_4mm_8 hodin při 150°C .....	66
Tabulka 35. Statistika, viz. Příloha 3 - Tabulka 89. Tlak_7mm_etalon .....	66
Tabulka 36. Statistika, viz. Příloha 3 - Tabulka 90. Tlak_7mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	66
Tabulka 37. Porovnání modulů pružnosti, Etalon – Po dodání .....	67
Tabulka 38. Procentuální vyjádření, Tabulka 37 .....	67
Tabulka 39. Porovnání mezí pevnosti, Etalon –Po dodání .....	68
Tabulka 40. Procentuální vyjádření, Tabulka 39 .....	68
Tabulka 41. Porovnání modulů pružnosti, Etalon – voda.....	70
Tabulka 42. Procentuální vyjádření, Tabulka 41 .....	70
Tabulka 43. Porovnání mezí pevnosti, Etalon - voda .....	71
Tabulka 44. Procentuální vyjádření, Tabulka 43 .....	71
Tabulka 45. Porovnání modulů pružnosti, Etalon – kyselina sírová .....	73
Tabulka 46. Procentuální vyjádření, Tabulka 45 .....	73
Tabulka 47. Porovnání mezí pevnosti, etalon – kyselina sírová.....	74
Tabulka 48. Procentuální vyjádření, Tabulka 47 .....	74
Tabulka 49. Modul pružnosti v tlaku, etalon – kyselina sírová .....	75
Tabulka 50. Mez pevnosti v tlaku, etalon – kyselina sírová.....	75
Tabulka 51. Porovnání modulů pružnosti, Etalon – teplo .....	77
Tabulka 52. Procentuální vyjádření, Tabulka 51 .....	77
Tabulka 53. Porovnání mezí pevnosti, Etalon – teplo .....	78
Tabulka 54. Procentuální vyjádření, Tabulka 53 .....	78
Tabulka 55. Stanovení koeficientu $\beta^*$ .....	83
Tabulka 56. Tah, Tlak, Ohyb – etalon 7mm .....	84
Tabulka 57. Ohyb_7mm_po dodání .....	95

Tabulka 58. Ohyb_5mm_po dodání .....	95
Tabulka 59. Ohyb_7mm_etalon.....	95
Tabulka 60. Ohyb_5mm_etalon.....	96
Tabulka 61. Ohyb_4mm_etalon.....	96
Tabulka 62. Ohyb_7mm_2000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	96
Tabulka 63. Ohyb_5mm_2000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	97
Tabulka 64. Ohyb_4mm_2000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	97
Tabulka 65. Ohyb_7mm_4000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	97
Tabulka 66. Ohyb_5mm_4000 hodin v H <sub>2</sub> O .....	97
Tabulka 67. Ohyb_7mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	98
Tabulka 68. Ohyb_5mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	98
Tabulka 69. Ohyb_4mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	98
Tabulka 70. Ohyb_7mm_8hodin při 150°C.....	99
Tabulka 71. Ohyb_5mm_8hodin při 150°C.....	99
Tabulka 72. Ohyb_4mm_8hodin při 150°C.....	99
Tabulka 73. Tah_7mm_Po dodání.....	100
Tabulka 74. Tah_5mm_Po dodání.....	100
Tabulka 75. Tah_7mm_etalon .....	100
Tabulka 76. Tah_5mm_etalon .....	101
Tabulka 77. Tah_4mm_etalon .....	101
Tabulka 78. Tah_7mm_2000 hodin v H <sub>2</sub> O.....	101
Tabulka 79. Tah_5mm_2000 hodin v H <sub>2</sub> O.....	102
Tabulka 80. Tah_4mm_2000 hodin v H <sub>2</sub> O.....	102
Tabulka 81. Tah_7mm_4000 hodin v H <sub>2</sub> O.....	102
Tabulka 82. Tah_5mm_4000 hodin v H <sub>2</sub> O.....	102
Tabulka 83. Tah_7mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	103
Tabulka 84. Tah_5mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	103
Tabulka 85. Tah_4mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	103
Tabulka 86. Tah_7mm_8 hodin při 150°C .....	104
Tabulka 87. Tah_5mm_8 hodin při 150°C .....	104
Tabulka 88. Tah_4mm_8 hodin při 150°C .....	104
Tabulka 89. Tlak_7mm_etalon .....	105
Tabulka 90. Tlak_7mm_500 hodin v 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	105

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha P I: Zkouška ohybem - jednotlivá měření

Příloha P II: Zkouška Tahem - jednotlivá měření

Příloha P III: Zkouška Tlakem - jednotlivá měření

## PŘÍLOHA P I: ZKOUŠKA OHYBEM - JEDNOTLIVÁ MĚŘENÍ

Tabulka 57. Ohyb\_7mm\_po dodání

	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	$\epsilon_{pkr}$	y
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
1	6,8	11,52	193,03	8360,48	3,63	12,81
2	7,56	11,62	201,73	7430,34	4,24	13,46
3	6,99	11,6	179,70	7513,57	3,93	13,51
4	7,25	11,8	179,75	7782,26	3,47	11,49
5	7,01	11,49	202,64	7466,36	3,06	10,48
6	7,16	11,4	210,89	8057,00	4,08	13,67
7	7,27	11,68	209,76	7304,16	4,78	15,78
8	6,95	11,75	192,97	6747,09	4,47	15,43
9	7,1	11,56	216,00	7209,60	5,12	17,30
10	7,01	11,65	192,04	7997,32	2,71	9,27

Tabulka 58. Ohyb\_5mm\_po dodání

	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	$\epsilon_{pkr}$	y
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
1	5,6	11,63	178,24	6449,56	3,03	7,31
2	5,5	11,59	158,55	6419,23	5,35	13,14
3	5,26	11,5	154,42	6936,92	5,27	13,53
4	5,28	11,51	179,32	6960,11	4,54	11,60
5	5,25	11,5	193,82	6727,63	3,45	8,88
6	5,88	11,5	210,62	6846,96	4,39	10,08
7	5,23	11,57	188,77	7512,59	4,97	12,83
8	5,34	11,55	187,46	6681,44	4,16	10,52
9	5,48	11,54	184,03	6874,92	4,36	10,75
10	5,04	11,6	200,45	6830,99	3,41	9,14

Tabulka 59. Ohyb\_7mm\_etalon

	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	$\epsilon_{pkr}$	y
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	mm
1	6,81	11,45	243,79	8351,96	4,84	16,23
2	7,12	11,65	187,38	8069,28	4,07	13,72
3	7,45	11,74	193,22	7778,31	3,67	11,83
4	7,03	11,47	189,23	7798,13	3,07	10,50
5	7,05	11,51	178,14	8007,25	2,77	9,45
6	7,42	11,74	230,01	7508,72	4,78	15,47
7	7,43	11,49	206,35	7671,99	4,76	15,37
8	7,05	11,57	214,99	7643,19	4,69	15,96
9	7,5	11,56	192,08	8042,55	5,57	17,83

Tabulka 60. Ohyb\_5mm\_etalon

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pk</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pk</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
1	5,8	11,53	192,43	7474,50	5,24	12,20
2	5,63	11,46	183,60	7628,65	4,44	10,64
3	5,4	11,46	164,82	7222,37	2,84	7,11
4	5,24	11,56	198,20	7366,67	2,88	7,42
5	5,25	11,44	188,72	7706,56	5,12	13,17
6	5,37	11,47	178,59	7146,56	4,76	11,97
7	5,27	11,38	194,86	7151,57	5,14	13,16
8	5,61	11,48	195,89	7993,07	3,93	9,47
9	5,47	11,68	204,98	7563,15	3,04	7,51

Tabulka 61. Ohyb\_4mm\_etalon

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pk</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pk</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
1	4,09	11,02	159,59	5410,19	5,75	9,60
2	4,35	11,25	149,29	5496,89	3,51	5,51
3	4,01	11,12	155,68	5408,95	5,31	9,04
4	4,09	11,22	120,51	5329,63	3,03	5,06
5	4,5	11,09	139,20	4501,36	3,75	5,69
6	3,97	10,86	150,07	5083,64	3,69	6,34
7	4,49	11,19	103,21	4736,56	2,66	4,05

Tabulka 62. Ohyb\_7mm\_2000 hodin v H<sub>2</sub>O

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pk</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pk</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
1	7,18	11,75	148,78	7212,63	3,10	10,02
2	7,43	11,96	184,16	7256,07	4,13	12,90
3	6,94	11,68	176,79	7448,69	3,50	11,72
4	7,07	11,57	136,33	7356,15	2,30	7,56
5	7,29	11,89	174,53	7377,53	3,51	11,17
6	7,27	11,77	198,58	7754,87	3,96	12,63
7	7,58	11,85	179,95	7372,07	3,51	10,76
8	7,28	11,82	143,61	7294,65	3,38	10,78



Tabulka 63. Ohyb\_5mm\_2000 hodin v H<sub>2</sub>O

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pk</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pk</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
<b>1</b>	5,76	11,76	124,53	5874,96	3,87	9,06
<b>2</b>	5,58	11,48	142,82	6521,12	2,62	6,34
<b>3</b>	5,34	11,49	156,87	6243,13	4,08	10,32
<b>4</b>	5,46	11,52	148,33	6122,26	4,11	10,16
<b>5</b>	5,28	11,68	150,14	5855,27	3,65	9,33
<b>6</b>	5,78	11,53	139,13	7070,83	2,56	5,98

Tabulka 64. Ohyb\_4mm\_2000 hodin v H<sub>2</sub>O

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pk</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pk</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
<b>1</b>	4,26	11,17	120,66	4866,80	4,60	7,36
<b>2</b>	4,22	11,31	125,15	4787,51	4,93	7,97
<b>3</b>	3,86	11,29	128,51	5271,24	4,16	7,36
<b>4</b>	4,22	11,24	136,39	4432,33	4,39	7,11
<b>5</b>	4,08	11,27	124,65	5065,39	4,53	7,58
<b>6</b>	4,02	11,51	115,20	4924,56	4,11	6,98
<b>7</b>	4,16	11,37	76,57	4600,72	2,39	3,93

Tabulka 65. Ohyb\_7mm\_4000 hodin v H<sub>2</sub>O

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pk</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pk</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
<b>1</b>	7,29	11,58	159,58	7349,33	2,90	9,23
<b>2</b>	7,09	11,49	146,33	6947,45	2,74	8,98
<b>3</b>	7,02	11,65	159,28	7667,02	2,86	9,47
<b>4</b>	7,42	11,96	168,33	7394,93	3,34	10,44
<b>5</b>	7,5	11,94	148,50	7176,12	2,79	8,65
<b>6</b>	7,36	11,9	146,57	7399,72	2,60	8,19
<b>7</b>	7,5	11,58	151,48	6748,24	3,00	9,29

Tabulka 66. Ohyb\_5mm\_4000 hodin v H<sub>2</sub>O

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pk</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pk</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
<b>1</b>	5,58	11,63	145,24	6662,77	3,08	7,45
<b>2</b>	5,81	11,46	151,37	6623,32	3,43	7,96
<b>3</b>	5,79	11,69	131,04	5034,68	3,04	7,09
<b>4</b>	5,66	11,65	135,16	6525,57	3,27	7,79
<b>5</b>	5,05	11,48	152,86	6291,87	3,02	8,07

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pkř</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pkř</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
<b>6</b>	5,09	11,6	157,81	7076,83	3,34	8,85
<b>7</b>	5,53	11,68	131,34	6091,44	3,28	8,00
<b>8</b>	5,48	11,66	158,76	6634,45	3,93	9,69

Tabulka 67. Ohyb\_7mm\_500 hodin v 30% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pkř</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pkř</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
<b>1</b>	7,04	11,67	196,44	6938,16	4,64	15,30
<b>2</b>	7,01	11,64	188,34	6391,71	5,50	18,20
<b>3</b>	7,25	11,85	197,92	7154,58	4,81	15,38
<b>4</b>	7,13	11,58	188,95	6517,73	4,48	14,59
<b>5</b>	7,15	11,69	157,24	6461,68	4,48	14,53
<b>6</b>	7,25	11,44	206,91	7010,42	5,29	16,93
<b>7</b>	7,05	11,44	170,23	6446,91	5,12	16,85

Tabulka 68. Ohyb\_5mm\_500 hodin v 30% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pkř</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pkř</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
<b>1</b>	5,37	11,71	189,56	6925,49	4,81	12,09
<b>2</b>	5,49	11,58	139,82	6374,53	5,37	13,22
<b>3</b>	5,6	11,65	167,50	6399,92	5,79	13,96
<b>4</b>	5,63	11,81	188,96	6228,41	6,22	14,91
<b>5</b>	5,64	11,62	161,33	6437,53	2,90	6,95
<b>6</b>	5,48	11,61	203,82	6750,93	5,04	12,42
<b>7</b>	5,61	11,72	176,99	7234,37	2,79	6,71

Tabulka 69. Ohyb\_4mm\_500 hodin v 30% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pkř</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pkř</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
<b>1</b>	4,13	10,7	148,81	4686,05	3,46	5,72
<b>2</b>	4,21	11,15	129,30	4848,62	3,11	5,04
<b>3</b>	4,2	10,95	164,41	5014,44	4,15	6,74
<b>4</b>	4,14	11,25	155,92	5375,84	3,32	5,48
<b>5</b>	3,95	10,96	160,37	5736,01	4,71	8,13
<b>6</b>	4,3	11,08	136,36	4397,48	3,60	5,71
<b>7</b>	4,25	11,1	92,38	4631,33	5,89	9,46

Tabulka 70. Ohyb\_7mm\_8hodin při 150°C

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pkř</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pkř</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
<b>1</b>	7,05	11,59	207,02	7770,90	4,63	15,23
<b>2</b>	7,25	11,74	206,98	7736,02	4,24	13,58
<b>3</b>	7,19	11,63	188,66	6864,09	4,63	14,94
<b>4</b>	7,54	11,91	184,11	7935,18	4,19	12,89
<b>5</b>	7,27	11,7	226,69	8453,44	4,32	13,79
<b>6</b>	7,15	11,66	205,53	7684,11	4,24	13,76
<b>7</b>	7,37	11,71	195,39	7262,68	5,13	16,15

Tabulka 71. Ohyb\_5mm\_8hodin při 150°C

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pkř</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pkř</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
<b>1</b>	5,49	11,71	197,95	7749,23	4,67	11,49
<b>2</b>	5,94	11,43	200,09	7740,17	4,35	9,89
<b>3</b>	5,53	11,72	197,57	7671,98	3,40	8,30
<b>4</b>	5,5	11,6	202,89	7768,07	3,38	8,30
<b>5</b>	5,84	11,7	211,11	6240,45	5,13	11,86
<b>6</b>	5,52	11,75	214,20	7744,58	4,50	11,02
<b>7</b>	5,57	11,33	179,66	7949,41	2,57	6,23

Tabulka 72. Ohyb\_4mm\_8hodin při 150°C

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pkř</sub></b>	<b>E</b>	<b>ε<sub>pkř</sub></b>	<b>y</b>
<b>Nr</b>	<b>Mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>
<b>1</b>	4,2	11,12	132,59	5792,81	5,46	8,87
<b>2</b>	4,35	11,17	167,08	5602,05	6,04	9,48
<b>3</b>	3,81	11,25	175,20	5358,54	5,96	10,68
<b>4</b>	3,9	11,11	166,88	5689,68	3,86	6,76
<b>5</b>	3,93	11,05	165,44	5895,13	3,89	6,76
<b>6</b>	4,13	10,7	122,35	6083,71	2,80	4,62

## PŘÍLOHA P II: ZKOUŠKA TAHEM - JEDNOTLIVÁ MĚŘENÍ

Tabulka 73. Tah\_7mm\_Po dodání

	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
1	7,41	11,79	142,80	12778,65	7,85	1,47	0,29	12475,26
2	7,05	11,67	161,19	11456,40	8,01	1,84	0,37	13261,65
3	7,01	11,42	162,98	10459,24	8,41	2,07	0,41	13047,44
4	6,96	11,52	157,25	12402,66	8,28	1,78	0,36	12608,34
5	7,05	11,57	158,76	11932,70	8,70	1,88	0,38	12949,59
6	7,25	11,46	154,64	11885,80	7,92	1,70	0,34	12848,52
7	6,93	11,39	173,17	12215,22	8,41	1,85	0,37	13669,08
8	7,26	11,64	161,28	11567,78	7,96	1,83	0,37	13629,56
9	7,36	11,63	161,65	12206,80	8,44	1,66	0,33	13836,75

Tabulka 74. Tah\_5mm\_Po dodání

	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
1	5,25	11,37	150,56	11828,50	7,35	1,71	0,34	8987,05
2	5,27	11,57	147,13	12614,79	6,94	1,56	0,31	8971,01
3	5,59	11,65	140,51	11053,42	7,20	1,61	0,32	9150,67
4	5,84	11,63	145,19	10879,99	7,58	1,85	0,37	9861,17
5	5,77	11,72	134,38	10836,34	7,23	1,57	0,32	9087,43
6	5,17	11,45	169,64	12442,06	7,23	1,71	0,34	10042,15
7	5,5	11,51	156,65	12138,04	7,52	1,70	0,34	9916,57
8	5,68	11,46	157,68	10869,78	7,70	1,91	0,38	10263,65
9	5,4	11,53	150,65	11451,36	7,20	1,76	0,35	9379,85
10	5,33	11,56	149,75	12461,84	6,96	1,51	0,30	9227,04

Tabulka 75. Tah\_7mm\_etalon

	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
1	6,98	11,44	151,34	12015,71	7,81	1,64	0,33	12084,83
2	7,01	11,5	158,74	12091,26	8,05	1,80	0,36	12796,93
3	7,02	11,44	153,19	11946,15	7,99	1,55	0,31	12302,41
4	7,23	11,75	152,42	13386,62	8,08	1,62	0,32	12948,77
5	7,16	11,52	144,80	12948,32	7,29	1,47	0,29	11943,76
6	7,15	11,54	147,81	12655,31	7,79	1,51	0,30	12354,53
7	6,95	11,48	139,74	12940,07	7,24	1,43	0,29	11149,00
8	7,2	11,56	162,48	12634,23	7,99	1,76	0,35	13523,14
9	7,44	11,65	156,83	13182,99	7,95	1,60	0,32	13593,75

Tabulka 76. Tah\_5mm\_etalon

	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	Celkové protažení	$\epsilon_{ext}$	$\epsilon_{ext}$	$F_{max}$
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
1	5,53	11,8	134,71	10745,99	6,74	1,80	0,36	8790,59
2	5,43	11,52	136,49	11673,92	6,61	1,55	0,31	8538,18
3	5,51	11,65	153,72	11076,95	7,55	2,22	0,44	9867,77
4	5,71	11,66	134,78	13675,14	6,89	1,31	0,26	8973,56
5	5,22	11,51	158,07	12366,11	7,40	1,75	0,35	9497,00
6	5,09	11,54	167,88	12630,49	7,20	1,77	0,35	9861,21
7	5,46	11,4	143,19	10798,08	6,71	1,71	0,34	8912,58
8	5,25	11,56	166,08	12439,06	7,42	1,71	0,34	10079,39
9	5,47	11,52	150,00	11301,93	7,25	1,80	0,36	9452,03

Tabulka 77. Tah\_4mm\_etalon

	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	Celkové protažení	$\epsilon_{ext}$	$\epsilon_{ext}$	$F_{max}$
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
1	3,9	11,07	134,80	10157,03	4,52	1,59	0,32	5819,61
2	3,89	11,15	126,52	10012,24	4,36	1,71	0,34	5487,76
3	3,9	10,88	124,24	9175,18	4,44	1,80	0,36	5271,74
4	3,92	10,97	137,37	10541,87	4,38	1,56	0,31	5907,24
5	4,28	11,29	113,85	9615,80	4,17	1,37	0,28	5501,45
6	3,94	11,23	117,49	9844,66	3,97	1,42	0,29	5198,59
7	4,31	11,31	112,97	10308,05	4,46	1,45	0,29	5506,94
8	4,09	11	117,34	9374,61	4,29	2,18	0,44	5279,22
9	4,6	10,88	105,01	9380,04	4,03	1,31	0,26	5255,65
10	3,9	10,93	150,79	8485,70	4,68	2,19	0,44	6427,66
11	3,85	10,81	131,03	10677,28	4,58	1,44	0,29	5453,17
12	4,34	11,08	112,71	10034,77	4,46	2,48	0,50	5420,00
13	4,18	10,87	96,65	10631,44	3,73	1,10	0,22	4391,47
14	3,78	11,09	121,35	10469,49	5,05	1,36	0,27	5087,16
15	4	11,09	136,58	10205,33	4,95	1,57	0,32	6058,90
16	4,3	11,21	120,74	10005,95	4,50	1,57	0,31	5820,02

Tabulka 78. Tah\_7mm\_2000 hodin v H<sub>2</sub>O

	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	Celkové protažení	$\epsilon_{ext}$	$\epsilon_{ext}$	$F_{max}$
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
1	7,14	11,37	125,85	11078,03	6,48	1,47	0,29	10216,75
2	6,9	11,52	136,75	11330,67	7,08	1,36	0,27	10870,26
3	7,35	11,22	124,62	11246,92	6,77	1,34	0,27	10276,77
4	7,14	11,67	129,82	11118,39	6,92	1,72	0,34	10817,03
5	7,1	11,54	132,04	10322,38	6,99	1,73	0,35	10818,42
6	7,38	11,83	124,65	12228,54	6,39	1,15	0,23	10882,83

Tabulka 79. Tah\_5mm\_2000 hodin v H<sub>2</sub>O

	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
1	5,53	11,5	125,75	10300,46	6,43	1,63	0,33	7997,37
2	5,57	11,39	112,62	10881,28	6,27	1,28	0,26	7144,89
3	5,63	11,54	100,58	11046,00	5,25	1,05	0,21	6534,39
4	5,32	11,46	121,73	10003,23	5,79	1,29	0,26	7421,42
5	5,23	11,55	137,46	12331,27	6,38	1,37	0,28	8303,68
6	5,44	11,5	116,48	10664,80	5,63	1,43	0,29	7286,76

Tabulka 80. Tah\_4mm\_2000 hodin v H<sub>2</sub>O

	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
1	4,35	11,42	84,68	7773,27	3,94	1,31	0,26	4206,71
2	4,11	11,13	88,87	7874,66	4,02	1,49	0,30	4065,32
3	4,09	10,76	82,74	8494,36	3,49	1,24	0,25	3641,12
4	3,9	10,93	96,77	8831,63	4,28	1,61	0,32	4124,83
5	3,9	11	96,31	8901,32	3,97	1,30	0,26	4131,49
6	3,95	11,49	81,32	8168,99	3,74	1,07	0,21	3690,58
7	4,14	11,26	90,82	8143,10	3,81	1,41	0,28	4233,51
8	4,38	10,99	96,70	9010,18	4,21	1,14	0,23	4654,58

Tabulka 81. Tah\_7mm\_4000 hodin v H<sub>2</sub>O

	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
1	7,35	11,8	109,62	11370,08	5,46	1,19	0,24	9507,28
2	7,7	11,84	112,19	10603,77	5,55	1,30	0,26	10227,89
3	7,7	11,82	108,00	10869,03	5,50	1,19	0,24	9829,81
4	7,73	11,81	103,32	10166,86	5,39	1,21	0,24	9432,45
5	7,21	11,3	124,98	11183,88	5,85	1,32	0,26	10182,09
6	7,4	11,81	127,09	12023,12	6,18	1,21	0,25	11106,67
7	7,31	11,78	105,31	10920,60	5,17	1,10	0,22	9068,23
8	7,31	11,83	128,79	10845,29	6,01	1,48	0,30	11137,10

Tabulka 82. Tah\_5mm\_4000 hodin v H<sub>2</sub>O

	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	σ <sub>pkř</sub>	E	Celkové protažení	ε <sub>ext</sub>	ε <sub>ext</sub>	F <sub>max</sub>
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
1	5,47	11,54	119,56	9816,85	5,22	1,29	0,26	7546,92
2	5,43	11,59	110,04	11798,95	4,63	1,08	0,22	6925,17
3	5,56	11,52	109,29	10056,04	4,49	1,42	0,29	6999,85
4	5,67	11,66	109,94	10079,03	4,61	1,31	0,26	7268,58

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pkř</sub></b>	<b>E</b>	<b>Celkové protažení</b>	<b>ε<sub>ext</sub></b>	<b>ε<sub>ext</sub></b>	<b>F<sub>max</sub></b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>mm</b>	<b>%</b>	<b>mm</b>	<b>N</b>
<b>5</b>	5,32	11,87	119,56	8506,35	4,85	1,56	0,31	7550,25
<b>6</b>	5,42	11,64	116,41	10660,17	4,86	1,13	0,23	7343,88

Tabulka 83. Tah\_7mm\_500 hodin v 30% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pkř</sub></b>	<b>E</b>	<b>Celkové protažení</b>	<b>ε<sub>ext</sub></b>	<b>ε<sub>ext</sub></b>	<b>F<sub>max</sub></b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>mm</b>	<b>%</b>	<b>mm</b>	<b>N</b>
<b>1</b>	7,38	11,3	150,76	12796,53	6,28	1,38	0,27	12572,57
<b>2</b>	7,13	11,5	150,87	12091,79	6,16	1,89	0,38	12370,47
<b>3</b>	7,17	11,7	163,36	12491,99	6,77	1,79	0,36	13703,92
<b>4</b>	7,15	11,67	162,08	12466,74	6,42	1,86	0,37	13523,93
<b>5</b>	7,37	11,34	146,63	11867,07	6,14	1,96	0,40	12255,12
<b>6</b>	6,95	11,8	157,24	12496,76	6,55	1,94	0,39	12895,62
<b>7</b>	7,35	11,25	143,88	13138,73	6,12	1,53	0,31	11897,44

Tabulka 84. Tah\_5mm\_500 hodin v 30% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pkř</sub></b>	<b>E</b>	<b>Celkové protažení</b>	<b>ε<sub>ext</sub></b>	<b>ε<sub>ext</sub></b>	<b>F<sub>max</sub></b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>mm</b>	<b>%</b>	<b>mm</b>	<b>N</b>
<b>1</b>	5,43	11,58	145,60	11471,90	4,84	1,62	0,32	9155,32
<b>2</b>	5,75	11,57	129,02	10976,64	4,42	1,32	0,26	8583,45
<b>3</b>	5,38	11,63	145,35	10131,32	4,80	2,49	0,50	9094,34
<b>4</b>	5,32	11,35	158,98	11406,95	5,10	1,71	0,34	9599,28
<b>5</b>	5,52	11,47	141,83	10834,49	4,59	1,69	0,34	8980,06
<b>6</b>	5,29	11,66	162,33	12136,98	4,88	2,69	0,54	10012,79
<b>7</b>	5,4	11,51	155,72	13132,81	5,45	2,04	0,41	9678,58

Tabulka 85. Tah\_4mm\_500 hodin v 30% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pkř</sub></b>	<b>E</b>	<b>Celkové protažení</b>	<b>ε<sub>ext</sub></b>	<b>ε<sub>ext</sub></b>	<b>F<sub>max</sub></b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>mm</b>	<b>%</b>	<b>mm</b>	<b>N</b>
<b>1</b>	4,25	10,98	113,94	10195,04	3,50	1,60	0,32	5316,86
<b>2</b>	4,21	11,45	120,46	9363,52	3,77	1,91	0,38	5806,75
<b>3</b>	4,41	11,43	114,15	9941,96	3,82	1,56	0,31	5753,68
<b>4</b>	4,26	11,05	111,22	8213,83	3,63	1,59	0,32	5235,25
<b>5</b>	3,95	11,1	129,29	10656,90	3,75	1,65	0,33	5668,75
<b>6</b>	4,18	11,22	110,14	11215,63	3,68	1,31	0,26	5165,50
<b>7</b>	4,08	10,95	100,73	10664,34	3,03	1,24	0,25	4500,17

Tabulka 86. Tah\_7mm\_8 hodin při 150°C

	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	Celkové protažení	$\epsilon_{ext}$	$\epsilon_{ext}$	$F_{max}$
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
1	7,32	11,67	143,50	13413,85	7,68	1,84	0,37	12258,69
2	7,19	11,27	174,51	14204,65	6,63	1,54	0,31	14140,57
3	7,3	11,2	153,85	12239,89	6,39	1,67	0,34	12578,47
4	7,22	11,45	161,17	11966,11	6,47	2,12	0,43	13324,07
5	7,28	11,6	165,80	13273,84	6,96	1,61	0,32	14001,76
6	7,15	11,48	154,61	12159,49	6,65	1,98	0,40	12691,06
7	7,61	11,33	144,81	13351,18	6,90	1,55	0,31	12486,09

Tabulka 87. Tah\_5mm\_8 hodin při 150°C

	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	Celkové protažení	$\epsilon_{ext}$	$\epsilon_{ext}$	$F_{max}$
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
1	5,39	11,6	160,19	12259,53	7,00	1,95	0,39	10015,46
2	5,55	11,62	151,97	14440,21	5,82	1,23	0,24	9800,48
3	5,48	11,41	160,06	13075,36	5,63	1,65	0,33	10007,78
4	5,78	11,72	160,16	12040,49	5,79	2,06	0,41	10849,60
5	5,7	11,56	169,58	11204,59	6,05	2,31	0,46	11174,12
6	5,4	11,42	169,54	12855,61	5,24	1,89	0,38	10455,38

Tabulka 88. Tah\_4mm\_8 hodin při 150°C

	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{pkr}$	E	Celkové protažení	$\epsilon_{ext}$	$\epsilon_{ext}$	$F_{max}$
Nr	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm	N
1	4,02	10,45	117,49	10539,97	4,01	1,57	0,31	4935,73
2	3,92	10,98	125,30	10118,40	3,93	1,70	0,34	5393,05
3	4,23	11,26	105,81	10076,01	3,95	1,76	0,35	5039,55
4	4,05	11,37	112,84	9240,40	3,83	1,67	0,33	5195,92
5	3,91	11,07	126,67	11004,11	4,18	1,87	0,37	5482,96
6	3,75	11,18	111,99	10845,16	4,01	1,48	0,30	4695,29



## PŘÍLOHA P III: ZKOUŠKA TLAKEM - JEDNOTLIVÁ MĚŘENÍ

Tabulka 89. Tlak\_7mm\_etalon

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pkř</sub></b>	<b>ε<sub>pkř</sub></b>	<b>y</b>	<b>E</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>
1	7,05	11,57	101,64	1,89	1,86	5739,74
2	7,25	11,62	95,51	1,91	1,90	5393,28
3	7,27	11,61	105,67	2,17	2,14	4835,10
4	7,16	11,6	118,19	2,05	2,02	5889,01
5	7,12	11,42	91,37	1,75	1,72	5690,79
6	7,17	11,16	111,79	1,99	1,96	5772,81
7	7,33	11,17	106,67	1,82	1,79	6176,05
8	7,41	11,82	99,41	1,93	1,89	5540,96
9	7,38	11,28	94,71	1,80	1,76	5728,95

Tabulka 90. Tlak\_7mm\_500 hodin v 30% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>σ<sub>pkř</sub></b>	<b>ε<sub>pkř</sub></b>	<b>y</b>	<b>E</b>
<b>Nr</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>mm</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>
1	7,02	11,73	93,30	1,63	1,65	6071,97
2	7,18	11,83	113,58	1,80	1,81	6515,67
3	7,12	11,92	94,74	1,69	1,71	6003,92
4	7,23	11,25	119,91	1,93	1,95	6292,35
5	6,85	11,82	80,79	1,64	1,68	5164,29
6	6,7	11,61	107,79	1,71	1,71	6727,24

