

# **Studium mechanických vlastností vstřikovaných stěn vyztužených krátkými vlákny**

Josef Beníček

---

Bakalářská práce  
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

\*\*\*nascannované zadání s. 1\*\*\*

\*\*\*nascannované zadání s. 2\*\*\*

## **ABSTRAKT**

Cílem této bakalářské práce bylo studium mechanických vlastností vstřikovaných stěn vyztužených krátkými vlákny. Zkušební stěny byly vyrobeny vstřikováním z polypropylenu a z polypropylenu plněného krátkými skleněnými vlákny. Takto připravené stěny byly následně rozřezány na zkušební tělíska. Pro stanovení mechanických vlastností byly provedeny zkoušky v tahu a ohybu. Z experimentálních výsledků byla vyhodnocena závislost modulu pružnosti a meze pevnosti na tloušťce stěny.

Klíčová slova:

mechanické vlastnosti, polypropylen, vstřikované stěny, vyztužení

## **ABSTRACT**

The aim of this bachelor thesis was the study of mechanical properties of injection moulded reinforced walls. Testing walls were prepared by injection moulding technology, as a material was used neat polypropylene and reinforced polypropylene with short glass fibres. Thus prepared walls were sliced up on testing specimens. Determination of mechanical properties was proved by tensile testing and single bend testing. Experimental results were analyzed as the dependences of tensile modulus on elasticity and strength for different wall thickness and particular orientation of specimens.

Keywords: Mechanical properties, polypropylene, reinforcing, injection molded walls

Poděkování, motto

Tímto chci poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc za odborné rady a cenné připomínky. Poděkování patří také bratrovi Ing. L. Beníčkoví, Ing. J. Šálkovi, Ing. M. Žaludkovi, PhD, Ing. J. Hrdinovi za jejich pomoc. Také bych rád poděkoval svým rodičům, bratrovi Honzovi a speciálně Bc. Martině Kalkové, která mě neustále podporovala při psaní téhle práce.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>9</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>10</b>
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	10
1.2 SKLENĚNÁ VLÁKNA.....	11
1.3 VÝROBA SKLENĚNÝCH VLÁKEN .....	12
1.4 ROZHRANÍ MEZI MATRICÍ A VLÁKNEM.....	13
1.5 CHARAKTERISTIKA TERMOPLASTICKÉ MATRICE.....	13
1.6 VLÁKNOVÉ KOMPOZITY .....	14
1.7 CHARAKTERISTIKA KRÁTKÝCH VLÁKEN .....	14
1.8 VYZTUŽOVÁNÍ KRÁTKÝMI VLÁKNY .....	15
1.9 VLASTNOSTI POLYMERŮ PLNĚNÝCH KRÁTKÝMI VLÁKNY .....	17
<b>2 MECHANIKA VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ</b> .....	<b>19</b>
2.1 PEVNOST PLASTŮ .....	19
2.2 MODULY PRUŽNOSTI KRÁTKOVLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ .....	23
2.3 PŘENOS NAPĚTÍ NA KRÁTKÁ VLÁKNA .....	24
2.4 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ KRÁTKOVLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ .....	25
2.5 MECHANICKÉ VLASTNOSTI JEDNOSMĚRNĚ VYZTUŽENÉHO PLASTU .....	26
2.6 ANIZOTROPIE VLASTNÍCH VÝSTŘIKŮ.....	29
<b>3 VSTŘIKOVÁNÍ TERMOPLASTŮ VYZTUŽENÝCH KRÁTKÝMI VLÁKNY</b> .....	<b>30</b>
3.1 PRINCIP VSTŘIKOVÁNÍ TERMOPLASTŮ .....	30
3.2 VSTŘIKOVACÍ STROJE.....	30
3.3 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS .....	31
3.4 TOK TAVENINY FORMOU .....	33
3.5 VSTŘIKOVÁNÍ TERMOPLASTŮ VYZTUŽENÝCH KRÁTKÝMI VLÁKNY.....	34
<b>4 STATICKÉ MECHANICKÉ ZKOUŠKY</b> .....	<b>35</b>
4.1 ZKOUŠKA TAHEM .....	35
4.1.1 Tahová křivka.....	36
4.2 ZKOUŠKY V OHYBU .....	38
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>41</b>
<b>5 PŘÍPRAVA ZKUŠENÍCH VZORKŮ</b> .....	<b>42</b>

5.1	POUŽITÝ MATERIÁL.....	42
5.2	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH DESTIČEK.....	42
5.3	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK.....	42
<b>6</b>	<b>STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....</b>	<b>43</b>
6.1	STANOVENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	43
6.2	STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	44
<b>7</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>45</b>
7.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY TAHOVÝCH VELIČIN.....	45
7.2	NAMĚŘENÉ HODNOTY OHYBOVÝCH VELIČIN.....	57
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>70</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>77</b>

## ÚVOD

Polymerní materiály představují nejvýznamnější skupinu ze všech materiálů podle objemu, výroby a spotřeby. Díky svým specifickým vlastnostem, např. pevnosti, trvanlivosti, izolačním či antikorozním vlastnostem, stále více nahrazují klasické materiály - sklo, dřevo, kov nebo papír, i když nedosahují takové tuhosti a pevnosti jako keramika nebo kov. Rostoucí spotřeba a požadavky na jedné straně a tlak na snižování cen na druhé straně činí plněné polymery velmi atraktivní.

Pro zlepšení mechanických vlastností se polymerní materiály vyztužují přidáním částicového plniva nebo vláken. V největším rozsahu jsou používána skleněná vlákna, protože mají velmi dobré mechanické vlastnosti. Materiály vzniklé tímto vyztužením se řadí mezi kompozitní. Jejich nejvýznamnější předností je kombinace snadné tvarovatelnosti, málo pevného polymeru s pevností a tuhostí vyztužujících vláken.

Tyto materiály se na konečný produkt zpracovávají v největší míře vstřikováním, ale také se mohou zpracovávat přetlačováním a lisováním, což je činí použitelné pro masovou produkci, jako je např. automobilový průmysl. Vstřikováním lze velmi efektivně vyrábět rozměrově přesné výrobky při minimálním odpadu, za minimálních nákladů, a tak se v dnešní době s těmito výrobky setkáváme prakticky na každém kroku. Vstřikování se rovněž může použít pro výrobu krátkovláknových kompozitů a lze tak spojit přednosti tohoto způsobu výroby s přednostmi, které nabízejí kompozitní materiály.

Největší vliv na tvorbu uspořádané struktury termoplastu plněného krátkými vlákny má geometrie vstřikovaného dílce. Při jeho daném tvaru určují makrostrukturu hlavně: tloušťka stěny, druh a umístění vtoku. Změna technologických parametrů při vstřikování má rovněž vliv na výslednou strukturu. Orientace vláken, způsobená vstřikováním termoplastů vyztužených krátkými vlákny, je příčinou anizotropie materiálových vlastností a následných deformací vstřikovaných částí. V praxi je stále důležitější predikce orientace vláken a tím i materiálových vlastností pro navrhování a výrobu forem pro vstřikování termoplastů plněných krátkými vlákny.

Tato bakalářská práce se zabývá studiem mechanických vlastností vstřikovaných stěn vyztužených krátkými vlákny, kde se experimentálně hodnotí vliv tloušťky stěny pomocí tahové a ohybové zkoušky na připravených vzorcích.



## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozity jsou složené heterogenní systémy tvořené minimálně dvěma fázemi, obvykle rozdílného chemického složení, které se liší svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi [1].

Tvrší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže se nazývá matrice. K zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály musí být splněny následující podmínky:

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

Nelze za kompozit považovat plast, obsahující malá množství tuhých barviv, např. částic sazí nebo oxidů nebo částic elastomerů [2].

Kompozity mohou být typu kov-kov, keramika-kov, keramika-polymer, keramika-keramika a polymer-polymer. Nejvýznamnější předností kompozitů s organickými maticemi je synergická kombinace snadné tvarovatelnosti s pevností a tuhostí vyztužujících vláken [3].

### 1.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Členění kompozitů:

- a) podle povahy matrice na kompozity s kovovou, polymerní a silikátovou (keramickou) maticí;
- b) podle geometrického tvaru sekundární fáze (plniva) na kompozity s čističovými a vláknovými plnivými

V poslední době nabývají na významu kombinované systémy s různými typy vyztužujících vláken, čističových plniv, včetně kombinace vláknových a částicových plniv. Tyto kompozity se nazývají hybridní [1].

Jedním z nejčastěji používaných dělicích kritérií je prostorová orientace a délka vyztužujících vláken. Z tohoto hlediska je možno dělit vláknové kompozity na:

- *jednosměrné* (vlákna jsou orientována převážně v jednom směru většinou souvisejícím se nejdelším rozměrem kompozitního dílce):
  - *krátkovláknové* (poměr délka/průměr vláken, tzv. aspektní poměr  $L/D < 100$ ),
  - *dlohovláknové* (aspektní poměr  $L/D > 100$ ),  
kompozity s kontinuálními vlákny, (t.j. vlákna s délkou rovnou rozměrům celého dílce),
- *mnohosměrné* (vlákna jsou náhodně nebo pravidelně orientována dvěma či více směry),
  - *krátkovláknové* ( $L/D < 100$ ),
  - *dlohovláknové* ( $L/D > 100$ ), [4].

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů.

*Mikrokompozitní materiály*- největší příčné rozměry výztuže (vláken nebí částic) jsou v rozmezí  $10^0$  až  $10^2$   $\mu\text{m}$ . Oproti kovům a jejich slitinám mají mikrokompozitní materiály menší hustotu a tedy příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě, tj. dosahují velké *měrné pevnosti* ( $\sigma_p/\rho$ ) a *měrného modulu* ( $E/\rho$ ).

*Makrokompozity* obsahují výztuž o velikosti příčného rozměru  $10^0$  až  $10^2$  mm. Jsou používány především ve stavebnictví. Za makrokompozity lze považovat i plátované kovy, vícevrstvé materiály a konstrukce (např. chodník a vozovky).

*Nanokompozity* jsou kompozitní materiály s polymerní matricí, u kterých rozměr částicové výztuže se pohybuje v jednotkách nm [2].

## 1.2 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna se aplikují v laminátech v různé formě.

Jsou to:

- pramenec (roving) - paralelní nekonečná vlákna bez zákrutu
- stříže (chopped strands) – sekané pramence na délku několika cm
- rouno, rohož (mat) – nepravidelně uspořádaná stříž v plošném útvaru, případně místně propojena
- tkanina (fabric, textile) – s různou vazbou (plátnová, keprová, atlasová, kordová)

Mohou se také použít kombinace stříže a tkanin [12].

### 1.3 Výroba skleněných vláken

Skleněná vlákna jsou amorfní, protože roztavená směs oxidů má velmi malou krystalizační rychlost [2]. Nejběžnější skleněná vlákna se ve světě vyrábějí především ze skloviny označované jako sklo E. Nověji se vlákna vyrábějí kontinuální technologií, tzn. na jednom konci pece se sází sklářský kmen a na druhém se z platinových vaniček vytahuje vlákno. Toto vlákno má nejčastěji průměr 3,5 až 20  $\mu\text{m}$  [8]. Jejich pevnost v tahu značně závisí na stavu povrchu. Poškození povrchu vláken při sdružování do pramenů a adsorpce vzdušné vlhkosti snižuje tzv. panenskou pevnost čerstvě vytaženého vlákna až o 50 % [2].

Komerčně se vlákna charakterizují podobně jako textilní vlákna délkovou hmotností (hmotnost na jednotku délky), která se udává v jednotkách [tex], vyjadřující hmotnost jednoho kilometru vláken v gramech. Běžně se používají skleněné rovingy s tex 1000-4000. Důležitý vliv na zvláknování má viskozita a rychlost změny viskozity s teplotou; obojí závisí na chemickém složení skla. Důležitá je taky teplota počátku tuhnutí taveniny, tj. teplota, při níž tekutá fáze a krystalická fáze mohou koexistovat v rovnováze. Struktura skla nemůže být proto definována pouze chemickým složením. Dalším důležitým faktorem je teplotní historie. Najednou je taženo 51 až 408 vláken (či fibril). Vytažený pramenec vláken se navíjí na buben. Ještě před samotným navinutím je vlákno, které je samo o sobě velmi abrazivní a lámavé opatřeno lubrikací a apreturou.

Samotná lubrikace je pro použití v kompozitech nevhodná, protože sice zlepšuje manipulovatelnost s vlákny, vlákna však mají prakticky nulovou adhezi k polymerní

matrici. Proto se již přímo ve výrobě vláken opatřují tzv. apretační vrstvou, která zlepší vazbu mezi vláknem a pryskyřicí [3].

#### 1.4 Rozhraní mezi matricí a vláknem

Rozhraní mezi fázemi má v kompozitech významnou úlohu. Při vzájemném působení fází, které se od sebe liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi, nelze za rozhraní pokládat výhradně plochu vzájemného kontaktu, v níž dochází k různě dokonalé soudržnosti fází chemickými a fyzikálními vazbami (nejčastěji vazbami van der Walsovými). Za součást fázového rozhraní se také považuje tenká vrstva v okolí kontaktní plochy, která bývá lokálně deformována vlivem rozdílných koeficientů teplotní roztažnosti a tuhosti fáze. Vrstva matrice na rozhraní fází má jinou morfologii než vnitřní oblasti matrice (chemické složení je stejné) [5].

#### 1.5 Charakteristika termoplastické matrice

Úlohou matrice je zajišťovat vzájemnou soudržnost vláken a přenášet napětí z konců předčasně porušených vláken na neporušená sousední vlákna [1].

Matrice také chrání výztuž před vlivy okolí. Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních poruchách výztuže a její poměrné prodloužení při přetržení by nemělo být větší než mezní prodloužení výztuže. Tento požadavek splňují pouze polymerní a kovové matrice.

Kompozity se nejjednodušší připravují, jestliže je matrice v kapalném stavu (polymerní, kovová, skleněná a sklokeramická matrice). K základním charakteristikám kapalné matrice patří povrchová energie a viskozita.

Má-li být výztuž dokonale obklopena matricí, je nutné, aby při přípravě kompozitu došlo k dobrému smáčení výztuže, tj. aby při vysoké energii volného povrchu výztuže měla kapalná matrice co nejmenší povrchovou energii [2].

Polotovary s termoplastickou matricí umožňují velmi produktivní výrobu dílů, protože doba výrobního cyklu je kratší než při použití reaktoplastických matric, které je nutno vytvrdit. Termoplastickou matrici může tvořit např. polystyren, polypropylen, polyethylen, polykarbonáty, polyethylentereftalát a další termoplasty. Dražší, pevnější, chemicky a tepelně odolné termoplasty, lze použít i pro značně mechanicky namáhané díly.

Termoplast je většinou houževnatější než reaktoplast, mez kluzu (případně pevnost) při teplotě 20°C je ale také menší než 100 MPa a modul pružnosti se pohybuje od 2 do 4 GPa. Maximální pracovní teplota závisí na nadmolekulární struktuře termoplastu – u amorfních plastů je v průměru o 50°C menší než teplota skelného přechodu  $T_g$ , u semikrystalických termoplastů je o 50 až 100°C menší než teplota tání krystalů  $T_m$  [2].

## 1.6 Vláknové kompozity

Vláknové kompozity dělíme jednak z podle materiálu vláken, jednak z materiálu matrice [2].

*Vlákna mohou být:*

- skleněná
- uhlíková
- polymerní
- keramická
- kovová

*Matrice může být:*

- polymerní
- kovová
- keramická
- uhlíková
- skleněná
- sklokeramická

## 1.7 Charakteristika krátkých vláken

Vlákna jsou vždy mnohem pevnější než stejné materiály v kompaktní podobě (viz. tab. 1).

Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů:

*Tab. 1. Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů.*

Materiál	modul pružnosti $E$ [GPa]	pevnost v tahu $R_m$ [MPa]
skleněné vlákno typu E	72	2100 až 3500
sklovina E	72	100
uhlíkové vlákno	190 až 850	2000 až 7000
polykrystalický grafit	10	20
keramické vlákno SiC	400	3900
polyethylenové vlákno z UHMW PE lineární polyethylen	80 až 120	3000

Pevnost vláken roste se zmenšujícím se průřezem, protože přirozené defekty se také zmenšují. Většina vyráběných vláken má kruhový průřez o průměru od 5 do 20 mm.

Tahová pevnost vlákna závisí na jeho délce. Části vzniklé porušením vlákna mají větší pevnost než původní vlákno, protože k lomu vlákna došlo v místě největšího defektu. Elementární vlákna jsou sdružena do pramenů a ty do pramenců (angl. „roving“). Počet „konců“ znamená z kolika pramenů je roving vyroben. Zákruty (zkroucení pramenů) zlepšují soudržnost rovingů pro textilní zpracování, ale pro kompozity jsou vhodné pouze rovingy s nulovým nebo malým počtem zákrutů, aby bylo co nejlépe využito pevnosti a tuhosti vláken [2].

## 1.8 Vyztužování krátkými vlákny

Nejčastěji používanou výztuží ve vláknových kompozitech vyráběných tažením, navíjením a jinými technikami jsou skleněná vlákna. První zmínka o skleněných vláknech pochází z knihy Antonia Neri, publikované v roce 1612. Už tehdy byli překvapivě jejich neobvyklé vlastnosti, především vysoké pevnosti ve srovnání se sklem tabulkovým, i přes velmi podobné chemické složení. Příčinou vysoké pevnosti skleněných vláken ve srovnání s masivním sklem poprvé interpretoval Griffith, který tak položil základ velmi mladé a perspektivní disciplíny - lineární elastické lomové mechaniky (LEFM). Ve skutečnosti lze Griffithovu interpretaci shrnout tak, že pevnost tuhého tělesa je na rozdíl od modulu pružnosti veličinou stochastickou (náhodnou) a rozhoduje o ní distribuce a velikost defektů. Každý materiál má z tohoto hlediska jakousi kritickou velikost defektu. Je-li v tělese z daného materiálu přítomen defekt kritické velikosti, dojde při působení i velmi malých vnějších napětí ke katastrofickému lomu tělesa v důsledku lokálního překonání meze pevnosti koncentrací napětí na defektu. Je tedy zřejmé, že kromě TD stavu materiálu bude o pevnosti rozhodovat geometrie tělesa a zatěžování (velký vliv tloušťky tělesa).

Pravděpodobnost existence kritického nebo nadkritického defektu snižujícího pevnost je mnohem nižší v tenkých vláknech než ve skleněných tělesech o vyšší tloušťce. V důsledku toho mají vlákna zhruba asi 20 vyšší pevnost v tahu než např. skleněná tyčoviny či tabulové sklo. Skleněná vlákna tvoří v kompozitech součást nesoucí zatížení a dodávají kompozitu tuhost a pevnost (proto termín „výztuž“).

Přes velmi dobré mechanické vlastnosti a nízkou cenu mají skleněná vlákna i některé nedostatky, jako je relativně nízký modul pružnosti a navíc jsou poměrně křehká, což znesnadňuje manipulaci a omezuje některé aplikace (balistická ochrana) [5].

Pro dosažení požadované tuhosti a pevnosti kompozitu je nutné zvolit vhodný typ vlákna a jeho objemový podíl v kompozitu. Podíl vláken se vyjadřuje objemovým zlomkem vlákna  $V_f$ , který vyjadřuje poměr objemu vláken  $v_f$  k celkovému objemu kompozitu [10].

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (1)$$

Z technologického hlediska je výhodné udávat hmotnostní podíl vláken v kompozitu, který lze použít pro dávkování ve výrobě. Mezi objemovým zlomkem  $V_f$ , hmotnostním zlomkem  $w_f$  platí jednoduchý vztah:

$$w_f = \frac{\rho_f}{\rho_m} V_f \quad (2)$$

kde  $\rho_f$  a  $\rho_m$  jsou hustoty materiálu vláken a matrice. Při požadavcích na vysoký modul pružnosti a na vysokou pevnost je snahou dosáhnout co nejvyššího podílu vláken v kompozitu [3].

Při použití krátkých vyztužujících vláken je důležitá správná volba vláken. Délka vláken musí být větší než kritická délka  $l_c$  [5]. Důvodem je to, že konce vláken nepřenášejí tahová napětí. Maximální tahová napětí, shodná s  $R_m$ , jsou dosažena až ve vzdálenosti  $l_c/2$  [1]. Odvození kritické délky vlákna  $l_c$  vychází z rovnováhy působící tahové síly ve střední části vlákna, vyvozené smykovým napětím  $\tau_m$  a síly potřebné pro jeho porušení.



$$\pi d(l_c / 2)\tau_m = \pi(d / 2)^2 R_{mv} \quad (3)$$

Namáhání se přenáší z matrice do vláken smykovým napětím, působícím na povrchu vláken [5].

## 1.9 Vlastnosti polymerů plněných krátkými vlákny

Krátkovláknové kompozity se odlišují jak od kompozitních systémů s jednoparametrickými částicemi, tak od polymerů s kontinuální vláknovou výztuží. Kompozity s krátkými a dlouhými vlákny se odlišují způsobem přenosu vnitřních sil. Krátkovláknová struktura patří mezi čističové kompozity a silový tok prochází z vlákna na vlákno prostřednictvím matice.

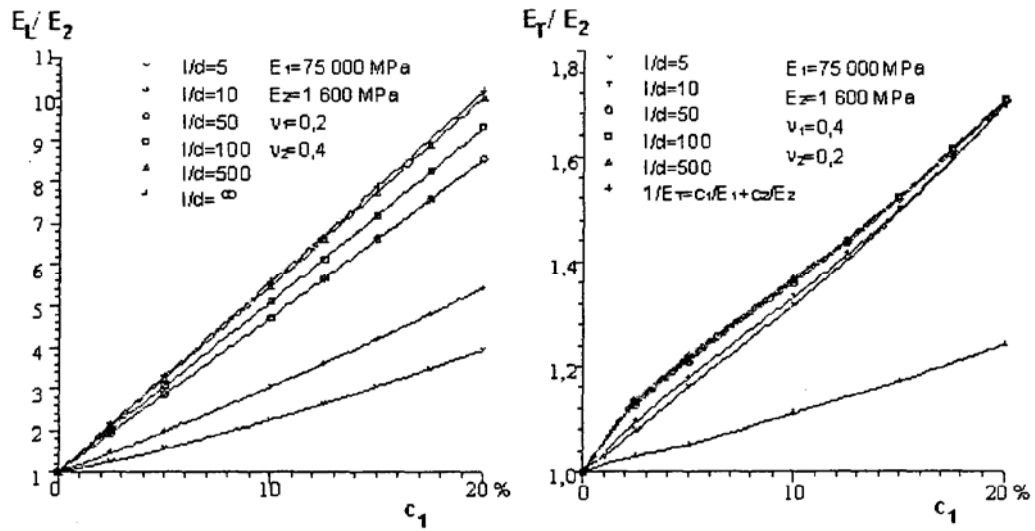
Rozdíl mezi partikulárními (jednoparametrickými) plnivy a krátkými vlákny spočívá ve značné štíhlosti vláken (poměru délky a průměru). Čím vyšší je štíhlost částic plniva, tím větší měrou se na výsledných- makroskopických vlastnostech kompozitu podílí vliv orientace částic. V závistech na stupni orientace krátkých vláken v polymerní matrici se mění jak efektivní elastické konstanty, tak fyzikální makroskopické vlastnosti krátkovláknové struktury. Ta představuje obecně makroskopicky homogenní, ale anizotropní kontinuum. Míra a typ anizotropie závisí na typu technologie a technologických podmínkách výroby.

Základní a limitní strukturu představuje rovinný systém vláken, ideálně orientovaných v jednom směru. V přirozeném (materiálovém) souřadném systému L, T má tato makroskopicky monotropní struktura matrici poddajnosti ve tvaru [6].

$$[C^*] = \begin{bmatrix} 1/E_L & -\nu_T/E_T & 0 \\ -\nu_L/E_L & 1/E_T & 0 \\ 0 & 0 & G_{LT} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Na následujících diagramech jsou uvedeny příklady výsledků modelování elastického chování ideálně usměrněné krátkovláknové struktury. V diagramech na obr.1 jsou

vyneseny závislosti longitudinálního a transverzálního modulu pružnosti v závislosti na objemové koncentraci a štíhlosti vláken.



Obr. 1. Závislost longitudinální a transverzálního modulu pružnosti na objemové koncentraci a štíhlosti vláken

## 2 MECHANIKA VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ

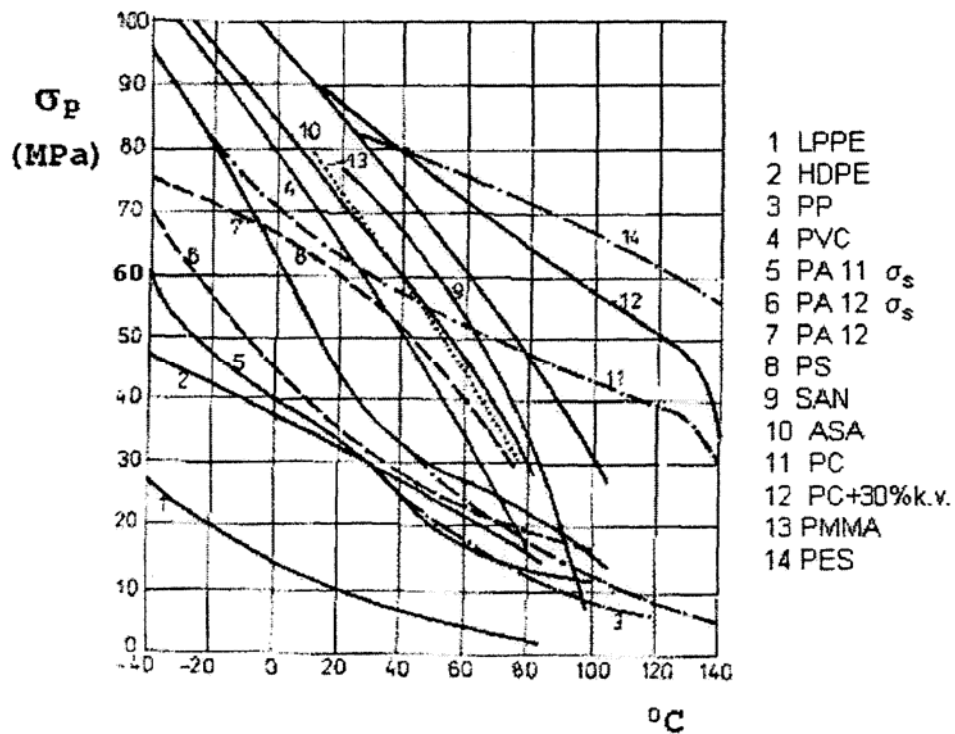
Obrovskou výhodou vláknových kompozitů je možnost měnit jejich elastické vlastnosti a pevnost změnou prostorového uspořádání výztuže jejího druhu (roving, rohož, tkaniny), poměru mezi obsahem výztuže a pojiva a technologií výroby.

Na poli kompozitních materiálů se setkáváme s pojmy, které charakterizují strukturu a symetrii této struktury a které mají zásadní význam pro mechanickou odezvu vláknových kompozitů. Jako homogenní označujeme jednofázovou, jednokomponentní látku, jejíž fyzikální vlastnosti jsou ve všech bodech tělesa stejné. Heterogenní materiál je materiál, který se skládá ze dvou a více komponentů nebo fází. Běžně jsou jednotlivé komponenty kompozitních materiálů tvořeny chemicky odlišnými jednofázovými (homogenními) látkami. Komponenty však mohou být i dvou a vícesložkové, jako je tomu u semikrystalických polymerních matric (PP, PE), kde jednu fázi tvoří krystalické domény a druhou amorfní domény.

Další významnou charakteristikou kompozitů je symetrie jejich fyzikálních vlastností, která je zároveň odlišuje od většiny tradičních konstrukčních materiálů. Termín izotropní indikuje, že materiálové vlastnosti jsou ve všech směrech stejné (nejsou funkci orientace). Jestliže vlastnosti materiálu nevykazují žádné roviny symetrie, hovoříme o anizotropním materiálu [3].

### 2.1 Pevnost plastů

Základním materiálovým parametrem vstupujícím do úvah o spolehlivosti plastového výrobku či konstrukce je časová mez pevnosti při daných vnějších podmínkách. Směrem k nižším teplotám u plastů obecně vzrůstá pevnost a klesá tažnost. Závislosti krátkodobé meze pevnosti resp. kluzu na teplotě jsou pro některé typy plastů vyneseny v obr. 2.



Obr. 2. Závislosti krátkodobé meze pevnosti na teplotě

Pevnost a tažnost jsou ovlivňovány některými technologickými faktory. Orientací struktury při zpracování dochází obecně ke zvýšení pevnosti ve směru orientace a snížení ve směru příčném. Čím je stupeň orientace makromolekulární struktury vyšší, tím jsou vyšší i rozdíly v pevnostech podél směru orientace a napříč.

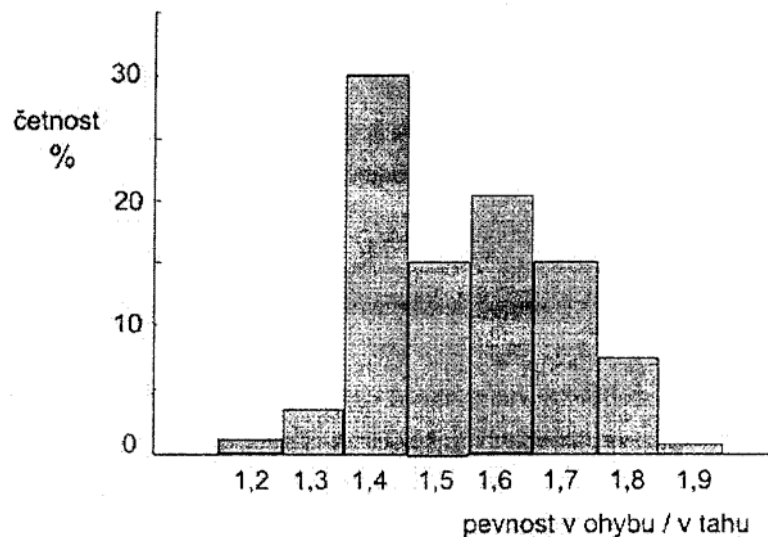
Při vstřikování složitějších tvarů výrobků se nacházejí v dutině formy místa styku čel dvou proudů taveniny nebo místa, kde se proud taveniny po rozdělení při obtékání překážky – např. vloženého jádra opět spojí. Tato místa jsou potenciálními zdroji porušení výrobku. Důležitou částí návrhu výrobku resp. formy je omezení počtu studených spojů resp. jejich umístění do lokalit, které nejsou vystaveny velkým namáháním.

Při mechanickém namáhání působí místa studených spojů do značné míry jako koncentrátoři napětí. Koncentrace napjatosti se pak podílejí na snížení efektivní pevnosti v místě studeného spoje. Toto snížení závisí jak na technologických parametrech vstřikovacího procesu, tak především na typu polymeru. Jednotlivé typy jsou na pevnost studeného spoje různě citlivé a lze je z tohoto hlediska rozdělit na dvě základní skupiny.

U křehkých typů plastů, jako jsou např. PS, PMMA je pevnost studeného spoje i za optimálních technologických podmínek pouze zlomkem základní pevnosti. Proti tomu houževnaté materiály, jako PC, ABS, POM vykazují jen nevýrazný pokles pevnosti vlivem studeného spoje.

V praxi je třeba přistupovat k údajům o hodnotách pevností plastů v materiálových databázích s jistou obezřetností. Tak např. pevnost v tahu a pevnost v ohybu u téhož plastu vykazují často výrazné rozdíly ve prospěch ohybové pevnosti.

Krátkodobé hodnoty tuhosti a pevnosti termoplastů jsou zjišťovány standardními testy v tahu a ohybu. Tahové a ohybové vlastnosti, zejména hodnoty pevnosti v tahu a ohybu, jsou pro každou aplikaci termoplastů základními daty. Použití těchto experimentálních dat pro predikci mechanického chování navrhované konstrukce naráží v technické praxi na problémy, způsobené závislostmi dat na geometrii zkušebních těles a typu zkoušky. Jak ukazuje histogram na obr. 3, porovnávající četnosti výskytu hodnot poměrů ohybové ku tahové pevnosti termoplastů, jsou hodnoty meze pevnosti v tahu a ohybu převážně značně odlišné.

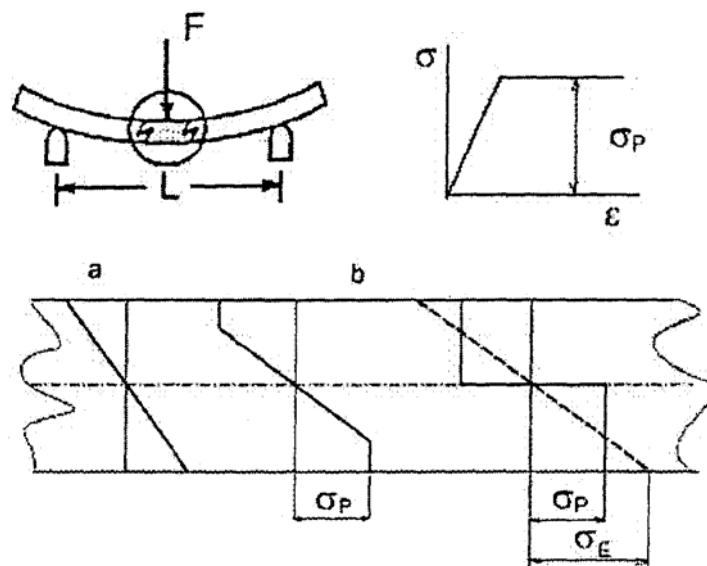


Obr. 3. Četnosti hodnot poměrů ohybové ku tahové pevnosti termoplastů

Jak patrně, je hodnota meze pevnosti v ohybu v průměru více jak 1,5krát vyšší, než hodnota meze pevnosti určená ze zkoušky tahem. Vzniká tak otázka, proč je v obou pevnostech takový rozdíl a kterou z nich můžeme pro návrh konstrukce použít. Jak je znázorněno na obr. 4a, je standardní metoda určení meze pevnosti z ohybové zkoušky založena na klasické představě technické teorie ohybu, tj. lineárním rozložením ohybové deformace a napětí klasické představě technické teorie ohybu, tj. lineárním rozložením ohybové deformace a napětí v průřezech zkušebního vzorku. Maximální hodnota ohybového napětí je tak vyhodnocována vztahem:

$$\sigma_E = \frac{6M}{bh^2} \quad (5)$$

kde  $M$  je ohybový moment,  $b$  – šířka,  $h$  – výška průřezu. Na rozdíl od zkoušky tahem je validní vyhodnocení ohybového napětí podle vztahu (5) podmíněno lineárně elastickým chováním daného materiálu. Idealizujeme-li chování houževnatého termoplastu při tahovém testu pružně plastickým diagramem  $\sigma$ - $\epsilon$  na obr. 4, budou se po dosažení meze  $\sigma_p$  a dalším zvyšování zatížení tvořit



Obr. 4. Pružně plastický diagram

v centrálním řezu a jeho okolí plastické zóny. V idealizovaném mezním případě zasahují plastické zóny celý průřez, takže příslušný ohybový moment na mezi únosnosti vzorku je:

$$M = \sigma_p \frac{1}{4} b h^2 \quad (6)$$

Dosadíme-li tuto hodnotu do vztahu (5), bude:

$$\sigma_E = 1,5 \sigma_p \quad (7)$$

Podle této zjednodušené představy je tak hodnota meze pevnosti, vyhodnocená podle (5) 1,5krát vyšší než skutečná. Odtud vyplývá, že z největších částí jsou rozdíly v pevnostech v tahu a ohybu zapříčiněny neadekvátním použitím elastické teorie ohybu při měření ohybové pevnosti termoplastů, vykazujících plastické chování během ohybového testu [6].

## 2.2 Moduly pružnosti krátkovláknových kompozitů

Na rozdíl od kompozitů s dlouhými vlákny je výpočet modulů u kompozitů s krátkými vlákny, jenom velmi přibližný. Používá se vztah, který navrhli Halpin a Tsai:

$$E_{T,L} = E_m \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (8)$$

Ve kterém se parametr  $\eta$  počítá podle rovnice:

$$\eta_{T,L} = \frac{E_f - E_m}{E_f + \xi E_m} \quad (9)$$

Kde  $E_{T,L}$  jsou moduly pružnosti v příčném a podélném směru a:

$E_f$  je modul pružnosti vláken,

$E_m$  je modul pružnosti matrice.

Rovnice obsahují tvarový parametr  $\xi$ , který je založen na geometrických a materiálových vlastnostech výztuže. U vláknových kompozitů

- pro modul pružnosti v podélném směru  $E_L$  platí  $\xi = 2l/d$
- pro modul pružnosti v příčném směru  $E_T$  platí  $\xi = 2$

Z uvedených vztahů vyplývá že modul pružnosti v podélném směru je ovlivněn štíhlostním poměrem  $l/d$ . Kromě Youngova modulu pružnosti je Halpin- Tsaiovu rovnice použit

pomocí podobných vztahů také k výpočtu smykového pružnosti a jiných elastických konstant

### 2.3 Přenos napětí na krátká vlákna

Při zatěžování krátkovláknového kompozitu nepůsobí zatížení přímo na vlákna, ale přenáší se z matrice do vláken smykovým napětím  $\tau_m$ , působícím na povrchu vlákna. Na obr. 5 je znázorněn charakter průběhu normálového osového napětí po délce vlákna současně s průběhem smykového napětí matrice na povrchu vlákna. Průběh (a) odpovídá lineárně – elastickému chování matrice a tedy nízkým úrovním napětí. Průběh (b) je určen za předpokladu pružně – plastického chování matrice a odpovídá tak stavu napětí při porušení, kdy se napětí ve vláknech blíží mezi pevnosti vlákna. V obou případech platí pro libovolný element vlákna rovnice rovnováhy sil v ose vlákna:

$$\frac{\pi d^2}{4} \sigma_x(x) + \pi d \cdot dx \tau(x) = \frac{\pi d^2}{4} (\sigma_x(x) + d\sigma_x) \quad (10)$$

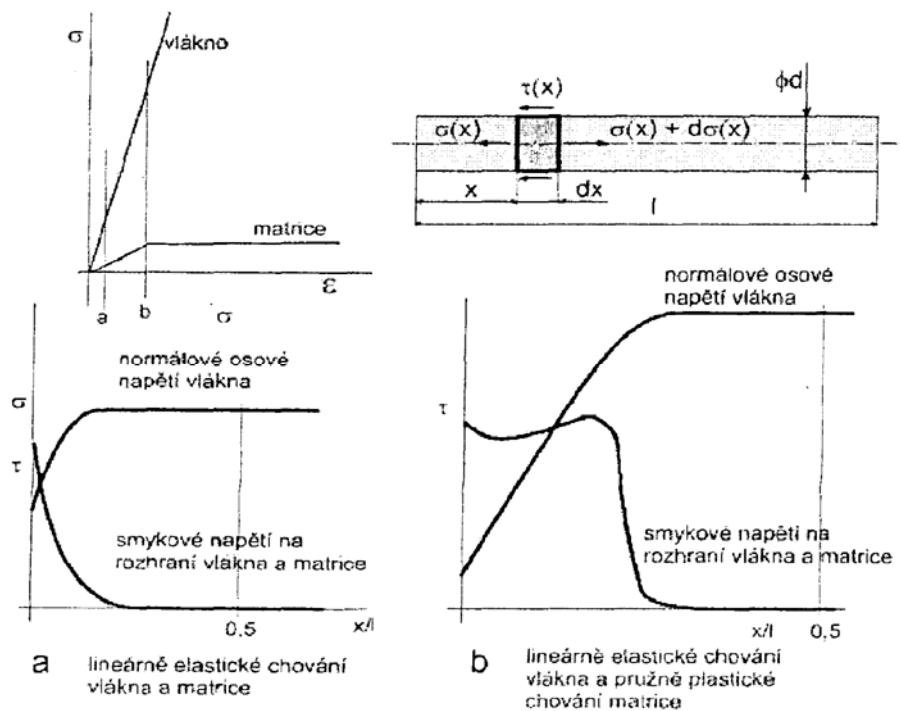
Odtud:

$$\frac{d\sigma_x(x)}{dx} = \frac{4}{d} \tau(x) \quad (11)$$

kde  $d$  je průměr vlákna. Zanedbáme-li osově napětí na koncích vlákna, je průběh  $\sigma_x$  po délce vlákna [6]:

$$\sigma_x(x) = \frac{4}{d} \int_0^x \tau(x) dx \quad (12)$$





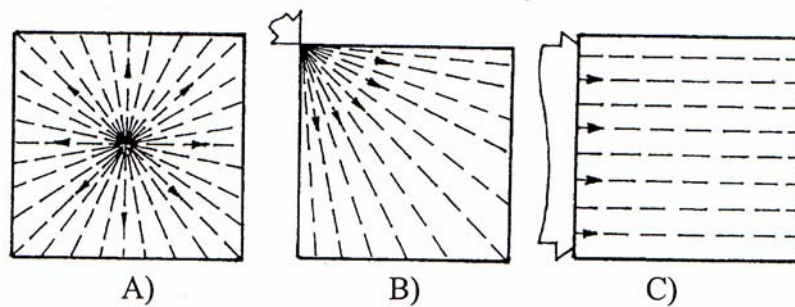
Obr. 5. Rozložení napětí na vlákne

## 2.4 Mechanické chování krátkovláknových kompozitů

Vlákna mohou být v matrici rozptýlena zcela náhodně, nebo mohou mít přednostní orientaci v určitém směru.

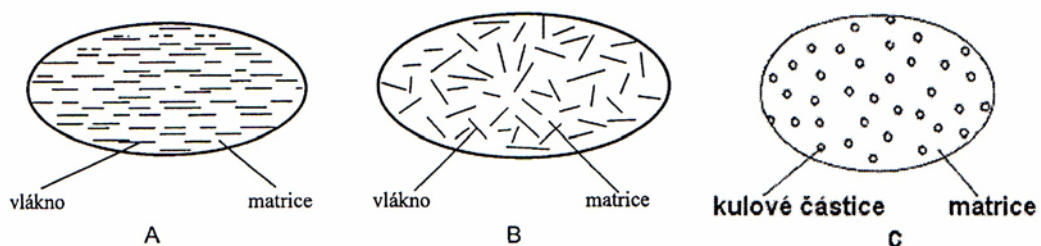
Usměrněná krátkovláknová struktura je schématicky znázorněna na obr. 6.

Jak je patrné, jde o systém s přednostní orientací krátkých vláken v jednom směru, v němž dosáhneme maximálního vyztužení při mechanickém zatížení a maximální rozměrové stability při teplotním zatížení. Takovýto systém nazýváme monotropní. Tato struktura může být základním stavebním prvkem pro vytvoření modelu neusměrněné krátkovláknové struktury na základě tzv. laminátové teorie při vstřikovacím procesu. Příklady možných vznikajících orientací v daném výrobku, které jsou podstatně ovlivněny volbou umístění a typem vtoku znázorňuje obr. 6.



Obr. 6. Případy možných vznikajících krátkovláknových struktur ovlivněných tvarem výrobku a jeho zpracovatelským procesem (A- centrální vtok, B- rohový tok, C- filmový tok).

Neusměrněná krátkovláknová struktury je schématicky znázorněna na obr. 7B. V tomto případě půjde o systém s náhodnou orientací krátkých vláken v rovině. Taková plošná struktura je z hlediska svých materiálových vlastností statisticky izotropní, podobně jako struktura plněná partikulovými částicemi viz. obr. 7C, [11].

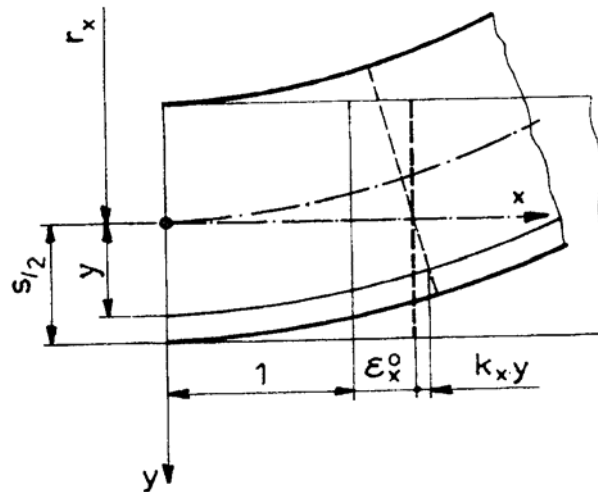


Obr. 7. Schématické znázornění usměrněné (A), neusměrněné (B), krátkovláknové struktury a částicové partikulové struktury (C).

## 2.5 Mechanické vlastnosti jednosměrně vyztuženého plastu

Mechanické vlastnosti jednosměrně vyztuženého plastu jsou ve směru vláken dány v podstatě pouze vlastnostmi vláken, v příčném směru jsou ale rozhodující vlastnosti plastové matrice. V praktických aplikacích by tak byly vlastnosti v příčném směru nedostatečné. Jsou proto lamináty tvořeny z více jednosměrných vrstev s navzájem různou orientací a navzájem spojených tak, aby vytvářely integrální konstrukční prvek s požadovanými vlastnostmi v jednotlivých směrech. Analýzu mechanického chování

plošného laminátového prvku založíme na předpokladech analogických k předpokladům pro vrstevnaté izotropní desky. Uvažovány jsou opět pouze složky deformace v rovinách rovnoběžných se střední plochou obr. 8.



Obr. 8. Znárodnění složek deformace

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

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_z^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{bmatrix} + y \begin{bmatrix} k_x \\ k_z \\ k_{xz} \end{bmatrix} \quad (13)$$

ve zkrácené formě pak

$$[\varepsilon] = [\varepsilon]^0 + y[k] \quad (14)$$

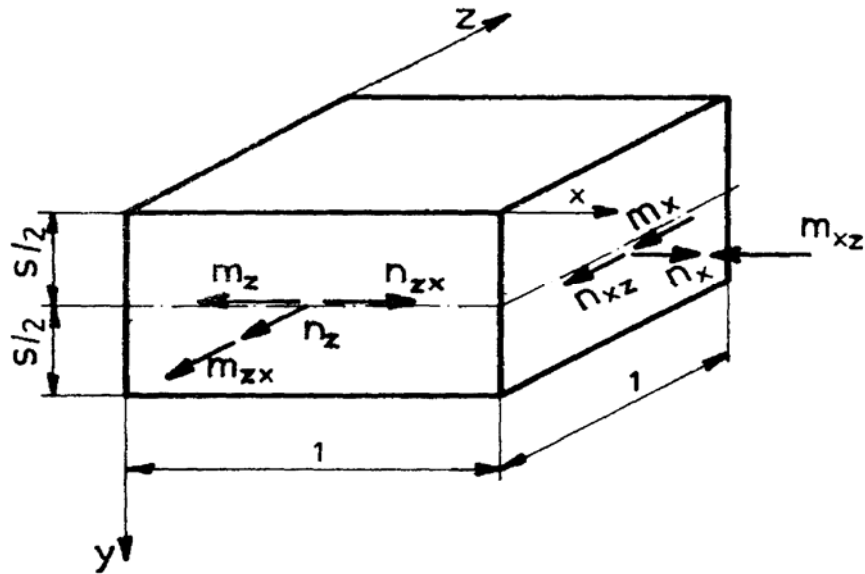
Kde  $[\varepsilon]^0$  jsou deformace ve střední ploše. Analogicky k rovnici  $\varepsilon_i^0(y) = \frac{1}{r_i} y; i = x, z$

představují konstanty  $[k]$  křivosti střední plochy po deformaci. Složky napětí jsou pak:

$$[\sigma] = [S] \cdot [\varepsilon] = [S] \cdot [\varepsilon]^0 + y \cdot [S] \cdot [k] \quad (15)$$

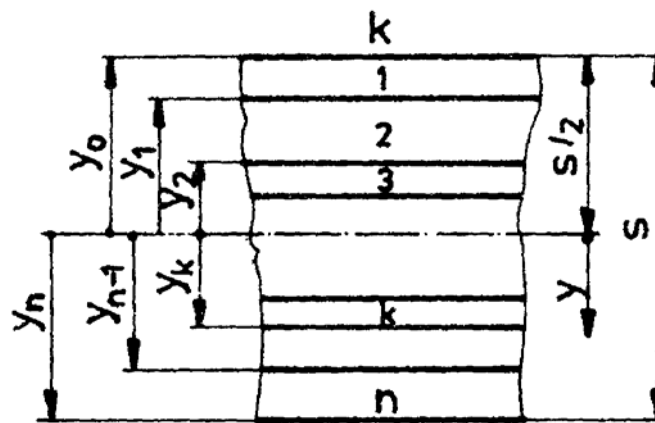
kde  $[S]$  je matice tuhosti v dané rovině.

Ekvivalentní systém sil a momentů vztažených ke střední ploše laminátu je znázorněn na obr. 9.



Obr. 9. Ekvivalentní systém sil a momentů

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



Obr. 10. Označení vrstev laminátu

## 2.6 Anizotropie vlastních výstřiků

Anizotropie mechanických i fyzikálních vlastností výstřiků z vyztužených plastů je daleko větší než u nevyztužených. Navíc přítomnost skleněných vláken někdy zcela mění závislosti platné u nevyztužených polymerů. Příkladem je výrobní smrštění, které je u výstřiků s vláknitým plnivem ve směru toku taveniny menší než ve směru kolmém.

*U desek z PA 6 se 30 % skleněných vláken s tloušťkou stěny 2 mm bylo smrštění ve směru toku rovno 0,25 % a ve směru kolmém 0,65 %, u nevyztuženého ve směru toku 1,5 až 2,0 %, zatímco ve směru kolmém 1,0 %. Jestliže byly ze stejného plastu vyrobeny desky tlusté 4 mm vykazovaly smrštění ve směru toku od 0,35 do 0,55 % a ve směru kolmém 0,8 až 1,2 %. Anizotropii lze pozorovat také na koeficientu teplotní roztažnosti nebo změnách rozměrů způsobených navlháním. Nižší hodnoty jsou vždy ve směru toku taveniny.*

Z příkladů vyplývá, že vlastnosti výstřiků z vyztužených plastů jsou ve směru toku taveniny v rozhodující míře ovlivněny skleněnou výztuží, zatímco ve směru kolmém matricí. Na to je nutno brát zřetel při navrhování a dimenzování tvaru výrobků [4].

### 3 VSTŘIKOVÁNÍ TERMOPLASTŮ VYZTUŽENÝCH KRÁTKÝMI VLÁKNY

Vstřikování patří k nejrozšířenějším a nejdůležitějším technologiím zpracování termoplastů. Při vyztužování polymeru krátkými vlákny se v principu neliší od běžného způsobu vstřikování polymerních materiálů [4].

#### 3.1 Princip vstřikování termoplastů

Vyznačuje se poměrně složitým fyzikálním procesem, na kterém se podílí polymer, vstřikovací stroj a forma [16]. Je to způsob tváření polymerních materiálů, při kterém je plast roztaven v tavicí komoře a tavenina plastu je vstříknuta vysokou rychlostí do uzavřené tvarové dutiny kovové formy, kde hmota ochlazením ztuhne ve finální výrobek [4, 14, 17].

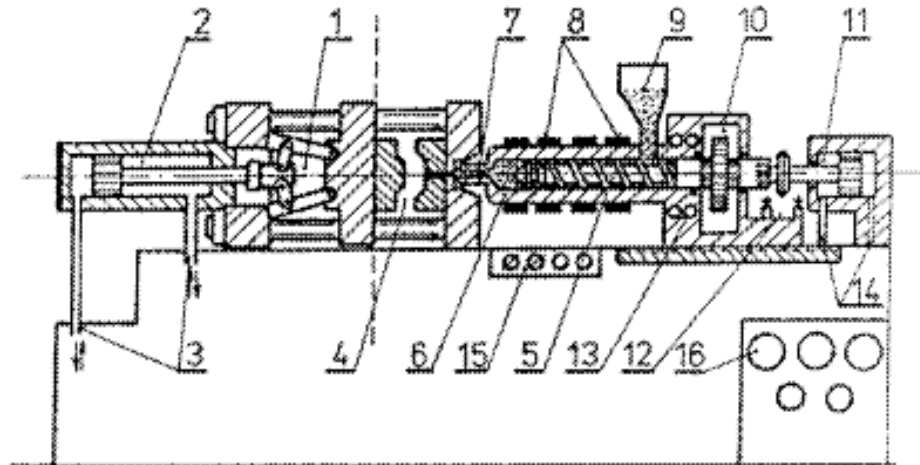
Výrobky zhotovené vstřikováním se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a vysokou reprodukovatelností mechanických a fyzikálních vlastností. Jejich tvar může být velice jednoduchý, ale stejně tak i značně složitý a jejich hmotnost může činit jen zlomky gramu, zatímco nejtěžší výrobky váží až několik desítek kilogramů [4].

#### 3.2 Vstřikovací stroje

První vstřikovací stroje, které byly použity pro vstřikování plastu již z počátku 20. století, byly stroje pístové. Jejich princip byl převzat z lití roztavených kovů pod tlakem. Granulát polymeru je protlačován vstřikovacím pístem tavicí komorou. Přitom je intenzivně zahříván vnějším teplem, až přejde do plastického stavu [4, 14]. Pístové vstřikovací stroje jsou schopny ekonomicky pracovat jen při výrobě menších výstřiků [14]. Neustálá snaha zvyšovat produktivitu práce a zvyšovat kvalitu výstřiku zmenšováním rozptylu jejich vlastností byla jednou z hlavních příčin rychlého rozšíření šnekových vstřikovacích strojů [15].

Hlavní předností šnekových strojů proti pístovým je větší plastikační výkon a výborná teplotní homogenita roztaveného plastu. Ten se v komoře zdrží jen krátkou dobu, a proto je možné pracovat s vyšší teplotou taveniny. Tím se dosahuje lepší tekutosti hmoty, což umožňuje práci s nižšími vstřikovacími tlaky. Protože doba prodlevy hmoty v komoře je

krátká, a to asi třikrát až pětikrát kratší než u pístových strojů, je nebezpečí tepelného rozkladu hmoty minimální [4].



Obr. 11. Šnekový vstříkovací stroj. 1- kloubový vstříkovací mechanismus, 2- hydraulický válec s pístem, ovládající kloubový mechanismus, 3- přívod a odvod kapaliny od čerpadla, 4- vstříkovací forma, 5- šnek, 6- tavicí komora, 7- tryska tavicí komory, 8- odporové topení, 9- násypka, 10- hydraulický motor, 11- hydraulický válec s pístem pro axiální pohyb šneku, 12- koncové spínače, 13- chladičí kanály, 14- přívod hydraulické kapaliny, 15- ovládací panel, 16- regulace hydraulického systému stroje.

### 3.3 Vstříkovací cyklus

Vstříkování je proces přetržitý a cyklický [4]. Základním předpokladem pro správnou funkci vstříkovacího procesu je pravidelný a správně seřízený vstříkovací cyklus [17]. Realizuje se na vstříkovacím stroji [16]. Zahrnuje dvě oblasti. Jedna se vztahuje k plastifikační jednotce, druhá k formě [17].

Jednotlivé úseky vstříkovacího cyklu trvají různě dlouho a jsou mimo jiné ovlivněny např. geometrií výstřiku a technologickými podmínkami vstříkování [4]. Během vstříkovacího cyklu lze vykonávat další operace, jako např. třídění výstřiku, drcení vtokových zbytků a

zmetku apod. Jsou to operace, které mohou probíhat souběžně bez přímého vlivu na vlastní cyklus [17].



Obr. 12. Diagram časového sledu operací ve vstřikovacím cyklu.

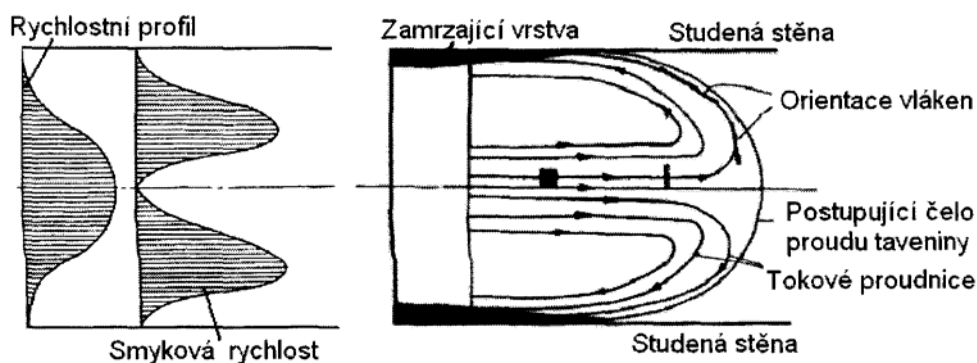
Po uzavření formy dojde k přísunu vstřikovací jednotky, ze které se plastikovaný materiál vstříkne do dutiny formy nastaveným tlakem při určité rychlosti [16, 17]. Doba, po kterou se dutina plní, se nazývá doba doplňování. Tavenina zůstává pod tlakem v uzavřené formě, dokud se nezačne ochlazovat. Hned potom nastoupí dotlak, který skončí zatuhnutím materiálu ve vtokovém systému [17]. Po skončení dotlaku se vstřikovací jednotka od formy oddálí a začne v ní plastikace další dávky hmoty. Po dostatečném ochlazení výstřiku se forma otevře a výstřik se vyhodí. Po očištění a úpravě formy pro další cyklus (prodleva) následuje další cyklus [16].

Ve formě probíhá chlazení. Chladicí čas je doba, po kterou je tavenina v dutině formy ochlazována bez působení vstřikovacího tlaku. Závisí na teplotě zpracovávaného plastu, tloušťce stěny výrobku. Podstatně ovlivňuje celou dobu vstřikovacího cyklu. Nelze ho neomezeně zkracovat, i když je výstřik již ochlazen. V chladícím čase musí proběhnout vracení vstřikovací jednotky od formy, dávkování, plastikace a homogenizace plastu pro další dávku. Po dostatečném ochlazení výstřiku se forma otevře a výstřik se vyhodí. Po očištění a úpravě formy pro další cyklus (prodleva) následuje další cyklus [16].



### 3.4 Tok taveniny formou

Při styku taveniny s formou se plast začne okamžitě rychle ochlazovat, protože kovová forma má oproti němu mnohem vyšší tepelnou vodivost. Pro taveniny je dále typické, že mají velmi vysokou viskozitu, a proto je nutno k jejich tváření vždy použít vnější tlak [4]. U termoplastů vyztužených vlákny, které mají  $l/d$  větší než 10/1 je důležitá orientace během toku. Otáčení vláken ve smykovém poli ovlivňuje fondánový tok při postupu materiálu dutinou formy, viz. obr.10. Jak je z obrázku zřejmé, má tavenina poblíž centrální osy při plnění největší rychlost, ale zanedbatelné smykové pole. To způsobuje, že vlákna a jejich agregáty mají spíše protiproudou orientaci, která se mění formováním postupujícího čela proudu taveniny tím, jak jsou vlákna unášena od osy, v uspořádání vláken ve směru proudnic v důsledku smykového pole. Při kontaktu taveniny se stěnou formy se okamžitě vytvoří nepohyblivá zamrzlá vrstva a proud taveniny se pohybuje uvnitř tohoto obalu [21].



Obr. 13. Zaplňování dutiny formy při vstřikování vyztužených termoplastů.

Stejně jako při vytlačování je povrch výrobku bohatý na matrici a v mnoha případech v podstatě bez vláken. Celkově může mít zaplněná forma strukturu se třemi, pěti a dokonce i devíti vrstvami v příčném směru [21].

Vliv orientace se může projevit i kroucením plněného výstřiku. Bylo zjištěno, že zvýšení teploty taveniny zvětšilo kroucená výstřiku, zatímco celkové zvětšení tloušťky výstřiku kroucení zmenšilo. Je to dáno tím, že smyková rychlost, která podporuje orientaci, se zvyšuje s teplotou a snižuje se zvětšující tloušťkou výstřiku [22].

Vlákna způsobují oděr šneku, tavicí komory, vtokového systému a tvarové dutiny formy, přičemž při jejich interakci s těmito částmi vstřikovacího stroje, taveninou a při vzájemné interakci dochází k jejich zkracování a poškozování. Protože na délce vláken závisí mechanické vlastnosti, snižuje se tak pevnost vyztuženého termoplastu [7].

### **3.5 Vstřikování termoplastů vyztužených krátkými vlákny**

Vstřikování patří k nejrozšířenějším a nejdůležitějším metodám zpracování termoplastů. Vstřikování termoplastů obsahujících krátká vlákna, nejčastěji skleněná, se v principu neliší od běžného způsobu vstřikování.

Vyztužené termoplasty se počítají k tzv. kompozitům. V porovnání se samotnou matricí bez výztuže se vyznačují lepšími mechanickými vlastnostmi, snížením časové závislosti mechanických vlastností projevujících se poklesem pevnostních charakteristik nebo krípem, zvýšením tvarové a rozměrové stability výrobků při vyšších teplotách, zmenšením výrobního smrštění, neomezenou dobou skladovatelnosti a možností recyklace. Na druhé straně mají i určité nevýhodné vlastnosti. Protože tavenina má horší tekutost, musí se počítat s vysokými vstřikovacími tlaky a u některých plastů i s vyšší teplotou taveniny. Tvrdá plniva, zejména skleněná vlákna, způsobují oděr šneku, pracovní komory i trysky, stejně jako vtokových kanálů a vlastní tvarové dutiny formy. Proto je nutno počítat s jejich menší životností. Relativně velké tření v tavenině způsobuje větší ztráty tlaku a větší tlakový spád mezi ústím vtoku a čelem tekoucí taveniny. To vede k větším smykovým napětím, a tedy k výraznější anizotropii vlastností výstřiku. Vlákna na rozdíl od matrice neuvolňují při ochlazování a tuhnutí žádné skupenské teplo, takže vyztužený plast ve formě chladne rychleji a rychleji ztrácí tekutost. To opět vyžaduje úpravy technologických podmínek, konkrétně zvýšení teploty taveniny i zvýšení vstřikovacího tlaku [3].

## 4 STATICKÉ MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Těmito zkouškami se hodnotí chování materiálu za působení stálých nebo pomalu spojitě měnících sil. Zkušební těleso se zatěžuje zpravidla jen jednou, a to až do porušení. Podle druhu namáhání jde o zkoušku tahem, tlakem, ohybem krutem nebo stříhem [1].

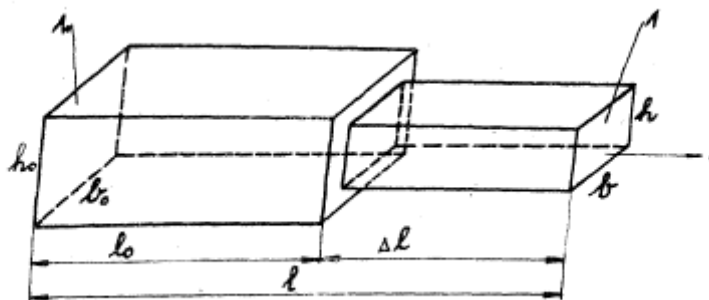
### 4.1 Zkouška tahem

Tahová zkouška je jednou z nejdůležitějších mechanických zkoušek – ČSN EN ISO 527 (ČSN EN 638). Používá se u všech plastových materiálů ke stanovení základních pevnostních charakteristik. Zkušební tělesa se připravují obvykle ve tvaru lopatky [4]. Při zkoušce tahem je materiál namáhán silou tak, že dojde k jeho porušení. Kdyby byl materiál izotropní, bylo by napětí v celém průřezu zkušebního tělesa rozloženo rovnoměrně. V praxi se tento ideální stav nevyskytuje, vlastnosti plastu se v různých místech liší a tahové napětí je rozloženo rovnoměrně. Vznikají tím smyková napětí [19]. Deformaci tahem můžeme znázornit na hranolu v pravoúhlých souřadnicích, jehož původní průřez  $A_0$  je dán součinem šířky  $b_0$  a výšky  $h_0$  [20]:

$$A_0 = b_0 \cdot h_0 \quad (16)$$

Jestliže budeme působit na průřez tělesa  $A_0$  silou  $F$ , bude osově napětí působící v průřezu zkušebního tělesa při tahové zkoušce [19]:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [MPa] \quad (17)$$



Obr. 14. Jednosměrná deformace tělesa tahem.

Průřez tělesa se při zkoušce bude měnit až do okamžiku, kdy se dosáhne rovnováhy mezi deformací a napětím. Při dalším zvětšování síly se dostaneme do okamžiku, kdy se těleso přetrhne [19]. S prodlužováním tělesa se mění jeho původní délka  $l_0$  na  $l$  a vyjadřujeme ji jako poměrné ( relativní ) prodloužení [19], [20]:

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (18)$$

S prodlužováním zkušebního tělesa nastává i zmenšování průřezu, které vyjadřujeme poměrným zkrácením základny nebo výšky hranolu [19], [20] :

$$\varepsilon_b = \frac{b_0 - b}{b_0} = \frac{\Delta b}{b_0} \quad (19)$$

Vztah mezi poměrným zkrácením a poměrným prodloužením je tzv. Poissonův poměr, který charakterizuje relativní změnu průřezu v závislosti na relativní změně délky [19, 20]:

$$\nu = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_l} \quad (20)$$

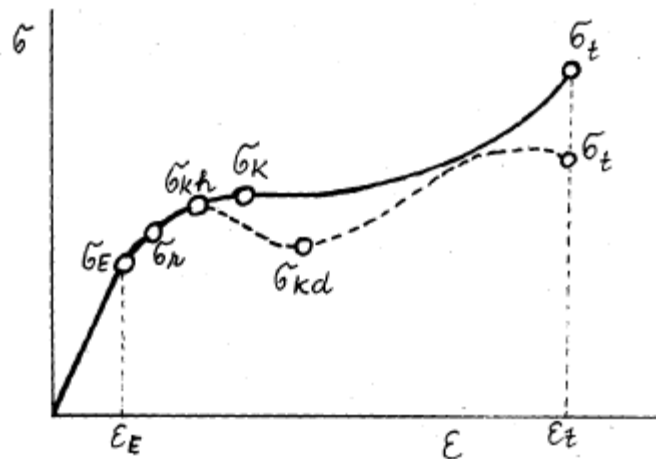
Z hlediska deformačního chování nás především zajímá změna délky zkoušeného tělesa až do stadia jeho přetržení. Abychom nemuseli délkovou změnu vyjadřovat dvěma slovy, tj. poměrným prodloužením, zavedeme pro tento pojem kratší označení, a to „protažení“ [21]

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (21)$$

#### 4.1.1 Tahová křivka

Nejdůležitější mechanické vlastnosti plastu při krátkodobém namáhání se zjišťují tahovou trhací zkouškou. Výsledkem zkoušky je závislost napětí na deformaci a z této závislosti můžeme zjistit meze kluzu a pevnosti, tažnost, modul pružnosti v tahu a celkové chování

materiálu při deformaci včetně typu lomu. Ze získaných hodnot můžeme odvodit dovolené namáhání v tahu a přepočtem i ve smyku [15].



Obr. 15. Obecná tahová křivka.

Bod na křivce, kde končí Hookovské chování, je mez úměrnosti  $\sigma_E$  [20]. Až do meze úměrnosti je průběh tahové křivky prakticky přímkový a v této oblasti platí Hookův zákon [19]. Zakřivení, vznikající v dalším průběhu křivky, zahrnuje již časově závislou elastickou a plastickou deformaci. Místo, do kterého je ještě tato deformace vratná, je mezi pružnosti  $\sigma_r$ . Z tohoto bodu se po uvolnění napětí vrací deformace po celé křivce do původního bodu [20].

Zvětšuje-li se napětí nad mez úměrnosti, obvykle hodnota  $\Delta\sigma/\Delta\epsilon$  klesá. Zatímco napětí stoupá pomalu, deformace se rychleji zvětšuje. Je to úsek za mezí pružnosti, kde nastává převážně nevratná plastická deformace. Tomuto místu říkáme mez kluzu  $\sigma_K$  [20]. Jestliže materiál vykazuje mez kluzu, považujeme tuto mez za horní hranici přípustného napětí při provozu součásti, neboť nad ní vznikají již velké trvalé deformace [15]. Projeví-li se na křivce za tímto bodem snížení napětí, je to horní mez kluzu  $\sigma_{Kh}$ , zatímco na pokračující křivce místo minimálního napětí je dolní mez kluzu  $\sigma_{Kd}$ . Za dolní mezí kluzu vzrůstá opět

napětí do určité maximální hodnoty  $\sigma$ , kde se těleso buď přetrhne, nebo nastává za touto mezí porušením soudržnosti další pokles napětí až k  $\sigma_{destr}$ , kdy dojde k lomu [20].

Mez pevnosti v tahu, krátce nazývaná pevnost v tahu, je definována jako napětí potřebné k přetržení, vztažené na původní průřez, nebo krátce jako smluvní napětí potřebné k přetržení. Pro výpočet se dosazuje vždy hodnota  $F_{max}$ , i když k destrukci došlo později při nižším napětí [19]:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A_0} \quad [MPa] \quad (22)$$

### **Modul pružnosti v tahu**

Modul pružnosti v tahu, nebo také Youngův modul, je směrnice v počátku tahové křivky [18]. Vypočte se jako podíl napětí v tahu  $\sigma$  a poměrného prodloužení  $\varepsilon$  v oblasti, ve které existuje lineární závislost mezi napětím a prodloužením - na mezi kluzu [19].

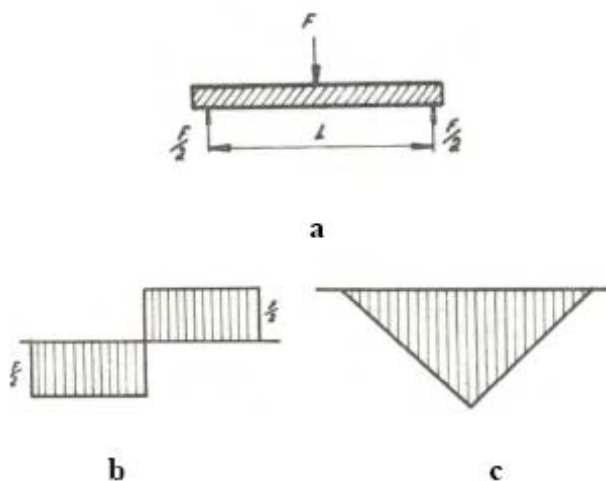
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = tg\alpha \quad [MPa] \quad (23)$$

Čím je přímka strmější, tím je zapotřebí k určitému jednotkovému protažení větší napětí, materiál je soudržnější, tužší.  $E$  je tedy mírou tuhosti pružných materiálů, tvarové stálosti a odolnosti vůči napětí [20]. Plasty vykazují relativně velmi úzké oblasti platnosti Hookova vztahu, neboť modul pružnosti se následkem viskoelastického chování polymeru značně mění a to tak, že  $E$  klesá s rostoucím působícím napětím, s rostoucí teplotou a dobou působení napětí,  $E$  roste s frekvencí zatěžování při dynamickém namáhání [15].

## **4.2 Zkoušky v ohybu**

Ohybová zkouška je velmi důležitá k charakterizaci polymeru z hlediska praktické použitelnosti. Touto zkouškou můžeme dělit polymery na křehké (lámavé) a houževnaté. Křehké materiály při určitém napětí prasknou, houževnaté se při zkoušce stále deformují, až vyklouznou z podpěr přístroje [19].

Nejběžnější způsob uspořádání zkoušky je ten, kdy zkušební těleso je ve tvaru trámce, umístěného na dvou podporách, vzdálených od sebe ve vzdálenosti  $l$ . Síla způsobující průhyb tělesa působí uprostřed mezi podpěrami, nebo je rozdělena na dvě stejné síly  $F/2$  působící v určité vzdálenosti od podpěr [20]. Zkoušce na dvou podporách se také říká tříbodové uspořádání [19]. Je znázorněno na Obr.13.



Obr. 16. Tříbodový systém ohybové zkoušky (a), rozložení průřezového momentu (b), rozložení ohybového momentu (c).

Během zkoušky se horní strana zkušební tyče zkracuje, dolní se prodlužuje. Zkušební tělísko je asi do poloviny namáháno tlakem, v polovině je nulová (neutrální) vrstva a v dolní polovině je tahové namáhání [19]. Ohybový moment je minimální v místě podpěr a maximální uprostřed. Dojde-li při  $M_{max}$  k prolomení, dosazujeme tuto hodnotu pro výpočet pevnosti v ohybu [20]:

$$\sigma_0 = \frac{M_{max}}{W_0} \quad (24)$$

Pro tříbodový systém a těleso obdélníkového průřezu šířky  $b$  a výšky  $h$  platí [20] :

$$M_{\max} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} \quad [Nmm] \quad (25)$$

$$W_0 = \frac{bh^2}{6} \quad [mm^3] \quad (26)$$

a pevnost v ohybu :

$$\sigma_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{\max} \cdot l}{bh^2} \quad [MPa] \quad (27)$$

### ***Modul pružnosti v ohybu***

Způsob výpočtu modulu pružnosti v ohybu je obdobný jako u modulu v tahu. Hodnotu modulu je možno vypočítat z oblasti namáhání, v níž je lineární závislost průhybu na zatížení. Vzorec pro modul pružnosti v ohybu je odvozen za předpokladu zachování rovinnosti průřezu, platnosti Hookova zákona a zanedbání vlivu posouvajících se sil. Tyto předpoklady jsou dostatečně splněny u štíhlých nosníků, je-li průhyb relativně malý [19]. Ohybová zkouška je výhodná pro stanovení modulu pružnosti, zvláště u polymerních materiálů s nepatrnou tažností. V oblasti elastických deformací platí pro třítodový systém, že prohnutí  $y$  je přímo úměrné síle a délce podpěr, nepřímo modulu pružnosti a momentu setrvačnosti [20].

$$y = \frac{Fl^3}{48E_0 \cdot I} \quad [mm] \quad (28)$$

Modul pružnosti se určuje tak, že se stanoví průhyby pro různá zatížení a hodnoty se vynesou do grafu  $F - y$ . Spojnice hodnot má být přímka vycházející z počátku a modul pružnosti se pak vypočítá z přímkové oblasti [20] :

$$E_0 = \frac{l^3}{4bh^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta y} \quad [MPa] \quad (29)$$



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## **5 PŘÍPRAVA ZKUŠENÍCH VZORKŮ**

### **5.1 Použitý materiál**

Pro studium mechanických vlastností byly použity dva typy materiálů. Čistý polypropylen (PP) a polypropylen s obsahem 30 % skleněných vláken (PP + 30 %GF).

### **5.2 Výroba zkušebních destiček**

Všechny zkušební destičky použité k provedení experimentů byly zhotoveny technologií vstřikování (princip vstřikování termoplastů viz. kapitola 3.1.).

### **5.3 Příprava zkušebních tělísek**

Zkušební destičky s filmovým vtokem o rozměrech 50 x 50 mm a tloušťkách 2, 3 a 4 mm se řezaly na univerzální frézce FHV- 50PD. Pro nařezání zkušebních tělísek byl použit pilový kotouč o průměru 50 mm a tloušťce 1 mm. Každá destička byla rozřezána kotoučovou pilou na 4 „přibližně“ stejně široké tělíska. Řezy byly provedeny ve dvou směrech, a to ve směru podélném L (longitudinal), a ve směru příčném T (transversal). Pro určení mechanických vlastností byla použita zkušební tělíska s rozměry (délka  $l$  x šířka  $b$  x tloušťka  $h$ ) 50 x 10 x 4 mm, 50 x 10 x 3 mm, 50 x 10 x 2 mm. Pro měření rozměrů bylo použito posuvné měřítko s přesností 0,05 mm.

## 6 STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Ohybové a tahové zkoušky pro zkoušené materiály byly provedeny na zkušebním stroji Promi pc a na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456.

### 6.1 Stanovení tahových vlastností

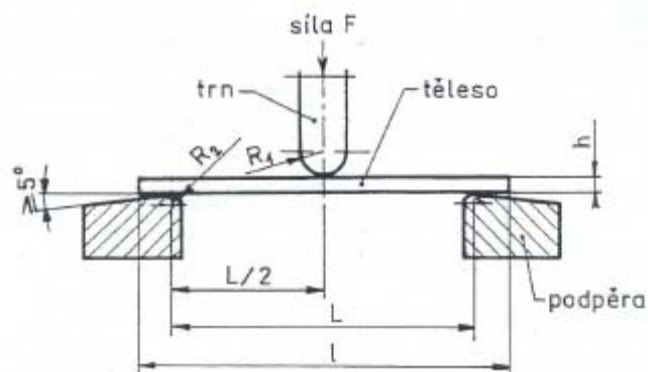
Tahové vlastnosti byly stanoveny dle příslušné normy ČSN EN ISO 527, ačkoli rozměry zkušebních tělísek nejsou v souladu s příslušnou normou. Tahová zkouška pro PP s 30 % GF byla provedena na obou z výše jmenovaných zkušebních strojích, zatímco pro čistý PP byla zkouška provedena pouze na zkušebním stroji ZWICK 1456.

Z každé série pro PP s 30 % GF bylo zkoušeno 24 tělísek na stroji Promi pc a dalších 6 tělísek na stroji ZWICK 1456 pro ověření naměřených hodnot. Pro čistý PP se prováděla zkouška na stroji ZWICK 1456. Počet zkoušených tělísek byl stanoven na hodnotu 6, což je v plném souladu s materiálovou normou. Zkouška probíhala rychlostí 20 mm/min. Z důvodu krátké délky zkušebních tělísek nebylo možné na stroji ZWICK 1456 použít extenzometru pro přesné stanovení Youngova modulu pružnosti. Zkouška probíhala vždy až do úplného přetržení vzorku pro PP s 30 % GF. U čistého PP nedošlo k přetržení.

## 6.2 Stanovení ohybových vlastností

Ohybové vlastnosti byly stanoveny dle příslušné normy ČSN EN ISO 178, ačkoli rozměry zkušebních tělísek nejsou v souladu s příslušnou normou. Ohybová zkouška pro PP s 30 % GF byla provedena na obou z výše jmenovaných zkušebních strojích, zatímco pro čistý PP byla zkouška provedena pouze na zkušebním stroji ZWICK 1456. Rozpětí podpěr bylo zvoleno tak, aby odpovídalo vztahu  $L = (16 \pm 1)h$ , což v našem případě odpovídá hodnotě 32 mm pro tloušťku  $h = 2$  mm. Pro tloušťky  $h = 3$  a 4 mm se ponechala vzdálenost podpěr na hodnotě 32 mm, z důvodu malé délky tělísek.

Z každé série pro PP s 30 % GF bylo zkoušeno 24 tělísek na stroji Promi pc a dalších 6 tělísek na stroji ZWICK 1456 pro ověření naměřených hodnot. Pro čistý PP se prováděla zkouška na stroji ZWICK 1456. Počet zkoušených tělísek byl stanoven na hodnotu 6, což je v plném souladu s materiálovou normou. Zkouška probíhala rychlostí 50 mm/min.



Obr. 17. Poloha tělesa na začátku ohybové zkoušky.

## 7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

### 7.1 Naměřené hodnoty tahových veličin

Sledujeme výsledky meze pevnosti v tahu  $R_m$  [MPa]. Dále se zaměřujeme na výsledky poměrného prodloužení při přetržení  $\varepsilon_{Rm}$  [%] a v poslední řadě nás zajímá modul pružnosti v tahu  $E$  [MPa].

Tab. 2. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro čistý PP, tl. 2 mm, Zwick 1456

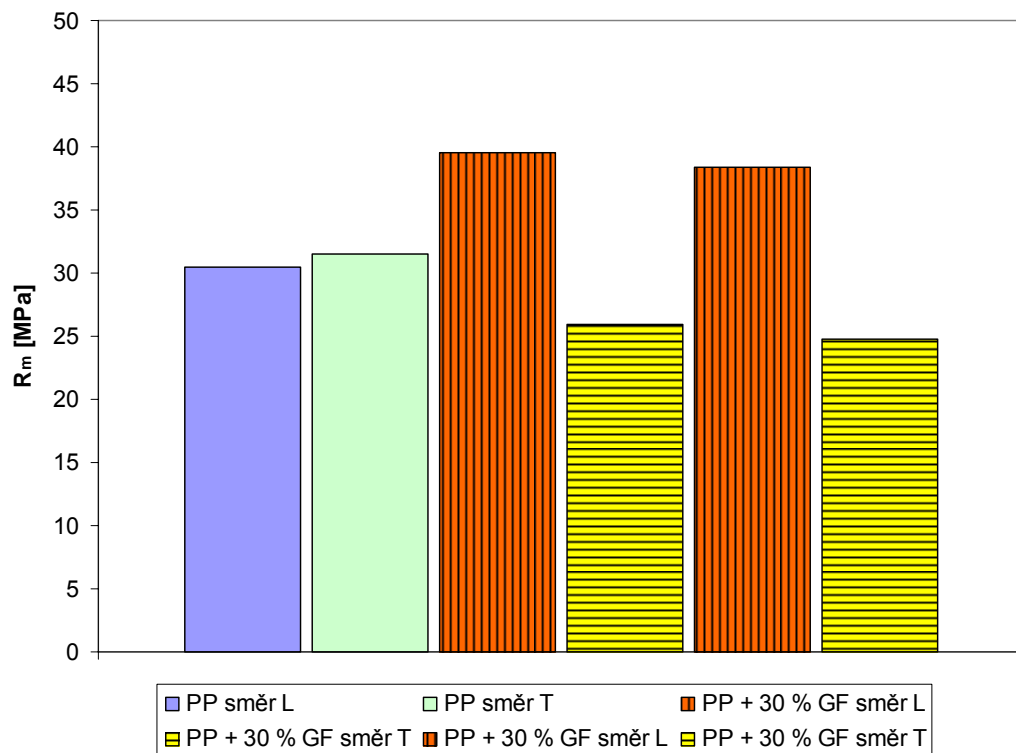
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	$R_m$ [MPa]	$\varepsilon_{Rm}$ [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	2,0	10,02	50,0	30,46	15,74	483,6
s	0,0	0,04	0,0	0,56	0,42	52,59
v	0,0	0,41	0,0	1,82	2,69	10,88
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	$R_m$ [MPa]	$\varepsilon_{Rm}$ [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	2,0	10,0	50,0	31,47	15,05	557,1
s	0,0	0,0	0,0	1,51	0,64	52,19
v	0,0	0,0	0,0	4,79	4,26	9,37

Tab. 3. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, Promi pc

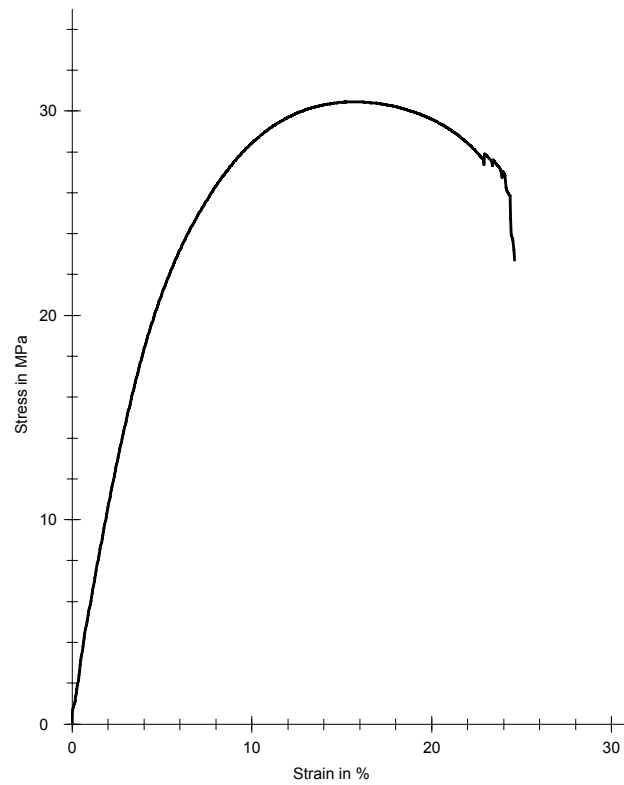
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	$R_m$ [MPa]	$\varepsilon_{Rm}$ [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	2,0	10,2	50,0	39,59	3,78	1505,00
s	0,0	0,36	0,0	2,16	0,366	122,66
v	0,0	3,51	0,0	5,45	10,53	7,49
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	$R_m$ [MPa]	$\varepsilon_{Rm}$ [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	2,0	10,3	50,0	25,91	4,10	833,456
s	0,0	0,24	0,0	1,71	0,51	88,318
v	0,0	2,30	0,0	6,60	12,27	10,597

Tab. 4. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, Zwick 1456

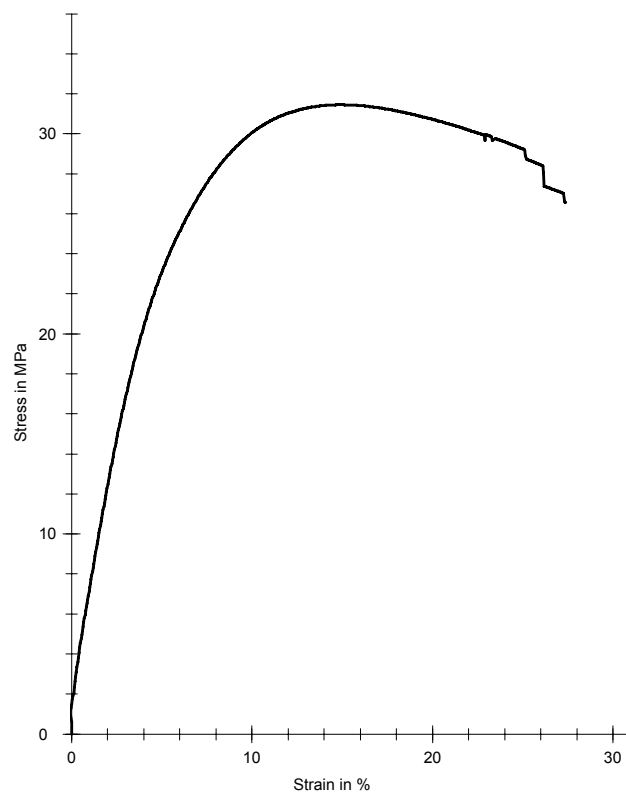
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	$R_m$ [MPa]	$\varepsilon_{Rm}$ [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	2,0	10,02	50,0	38,42	4,49	1400,79
s	0,0	0,12	0,0	1,09	0,75	446,95
v	0,0	1,17	0,0	2,85	16,68	31,91
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	$R_m$ [MPa]	$\varepsilon_{Rm}$ [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	2,0	10,07	50,0	24,73	4,58	1452,87
s	0,0	0,08	0,0	1,46	0,22	362,96
v	0,0	0,81	0,0	5,91	4,84	24,98



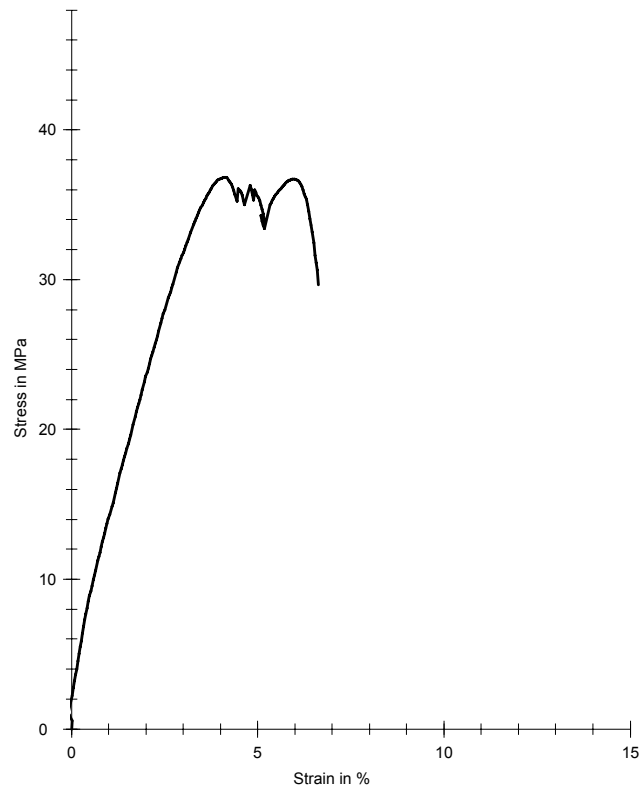
Obr. 18. Vliv směru vláken na mez pevnosti v tahu  $R_m$  [MPa] u tl. tělísek 2 mm.



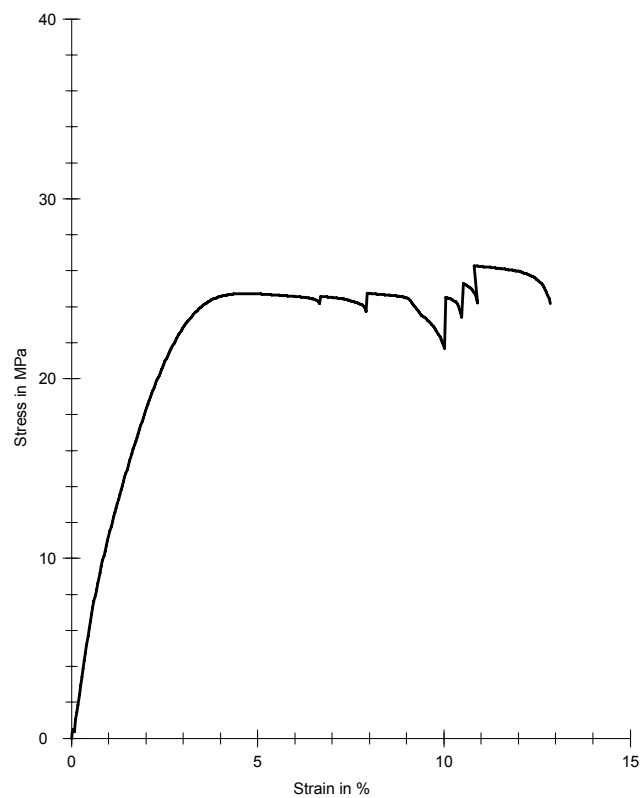
Obr. 19. Průměrná tahová křivka pro PP, tl. 2 mm, směr L



Obr. 20. Průměrná tahová křivka pro PP, tl. 2 mm, směr T



Obr. 21. Průměrná tahová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, směr L



Obr. 22. Průměrná tahová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, směr T



Tab. 5. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro čistý PP, tl. 3 mm, Zwick 1456

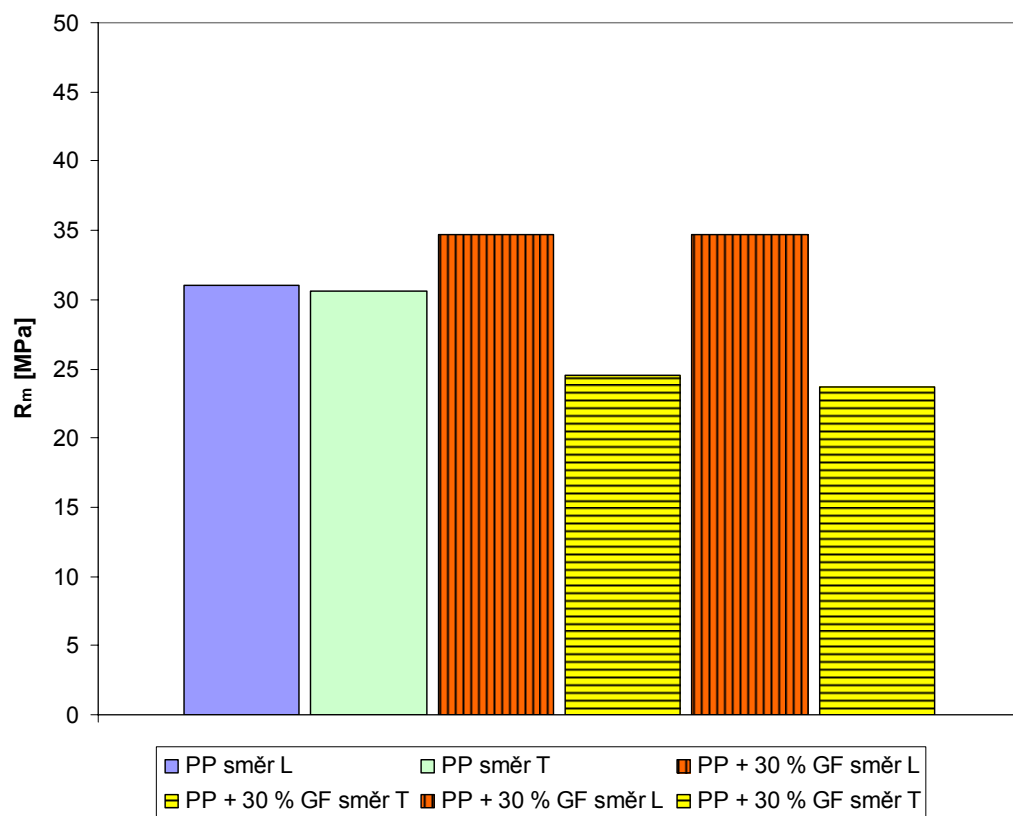
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Rm</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	3,0	10,05	50,0	30,98	19,27	416,63
s	0,0	0,10	0,0	0,55	0,54	44,76
v	0,0	1,04	0,0	1,79	2,78	10,74
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Rm</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	3,0	10,0	50,0	30,61	18,4	445,18
s	0,0	0,0	0,0	0,32	0,29	39,35
v	0,0	0,0	0,0	1,04	1,56	8,84

Tab. 6. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, Promi pc

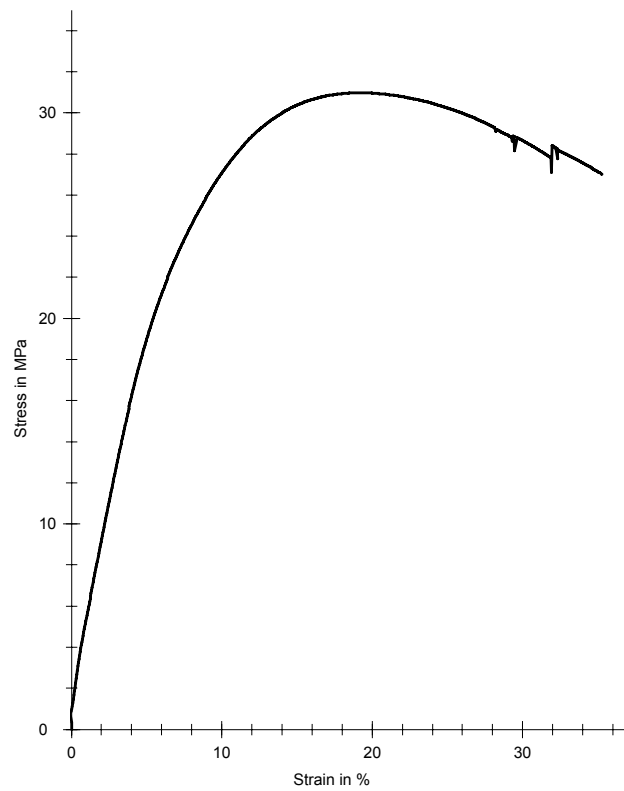
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Rm</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	3,0	10,2	50	34,68	5,55	848,73
s	0,0	0,21	0,0	1,99	0,63	81,65
v	0,0	2,03	0,0	5,75	11,37	9,62
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Rm</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	3,0	10,3	50	24,50	5,59	630,18
s	0,0	0,22	0,0	0,81	0,48	55,85
v	0,0	2,14	0,0	3,31	8,49	8,86

Tab. 7. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, Zwick 1456

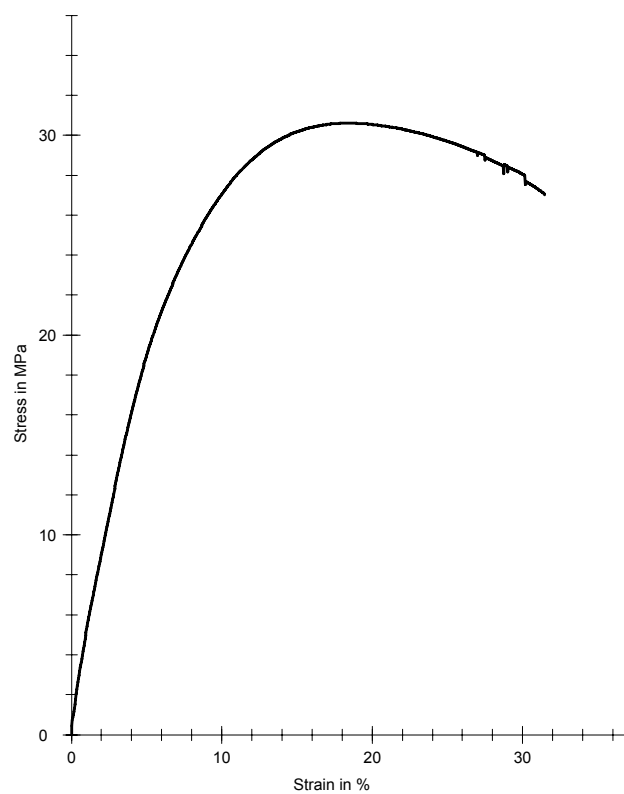
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Rm</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	3,0	10,05	50,0	34,70	6,44	885,12
s	0,0	0,08	0,0	1,38	1,47	349,91
v	0,0	0,83	0,0	3,97	22,82	39,53
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Rm</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	3,0	10,08	50,0	23,68	8,34	368,10
s	0,0	0,08	0,0	0,87	0,34	17,40
v	0,0	0,75	0,0	3,68	4,13	4,73



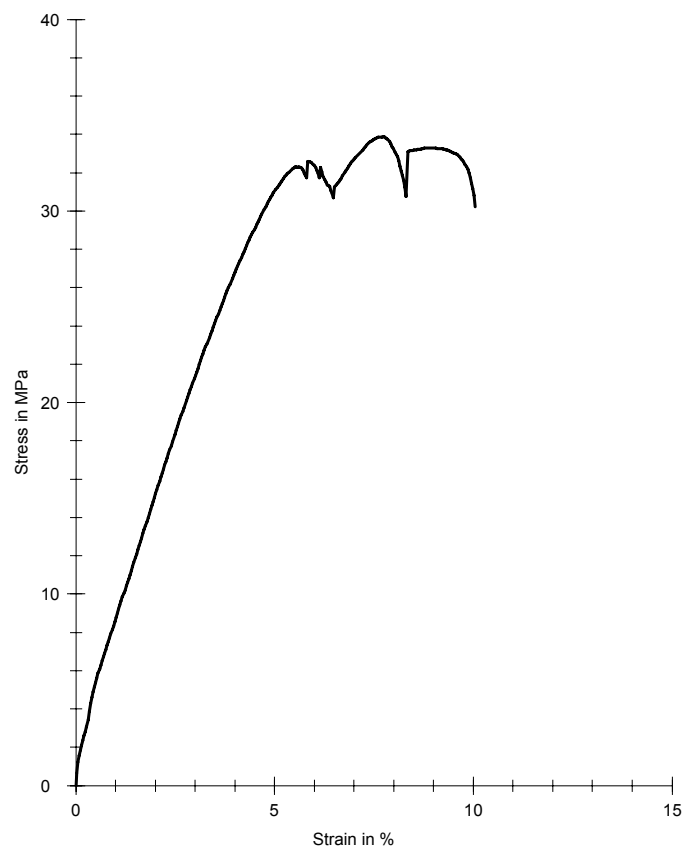
Obr. 23. Vliv směru vláken na mez pevnosti v tahu  $R_m$  [MPa] u tl. tělísek 3 mm.



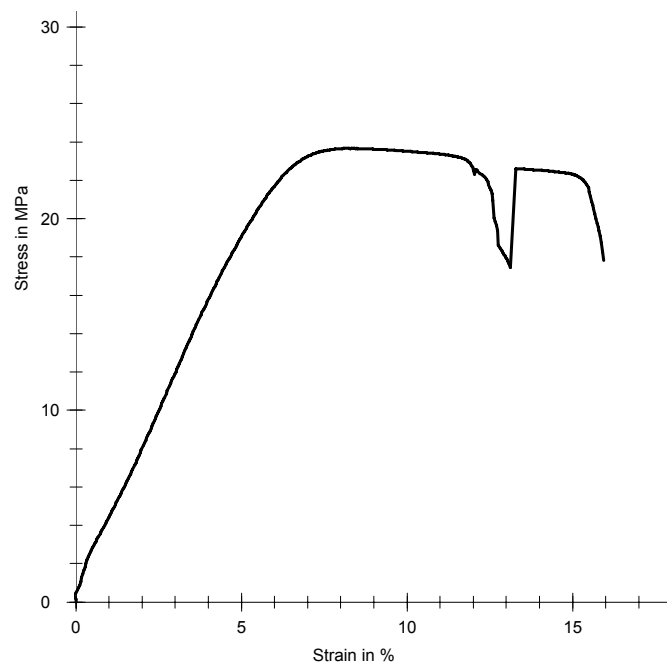
Obr. 24. Průměrná tahová křivka pro PP, tl. 3 mm, směr L



Obr. 25. Průměrná tahová křivka pro PP, tl. 3 mm, směr T



Obr. 26. Průměrná tahová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, směr L



Obr. 27. Průměrná tahová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, směr T

Tab. 8. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro čistý PP, tl. 4 mm, Zwick 1456

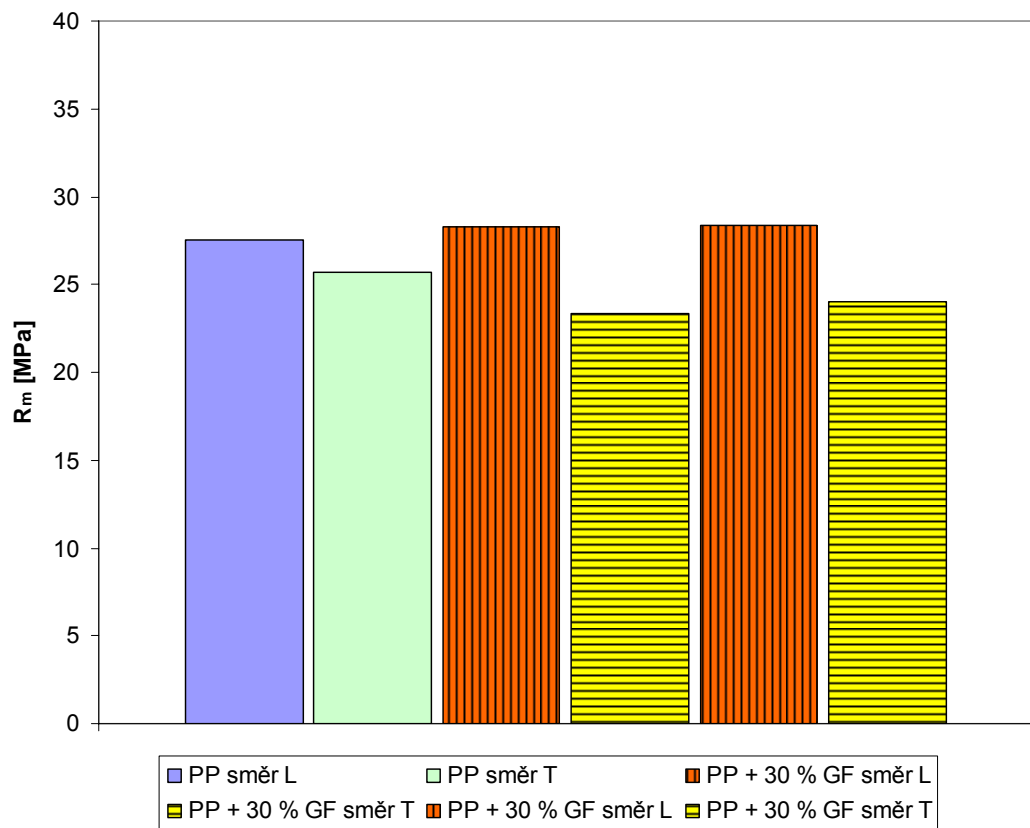
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Rm</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	4,0	10,03	50,0	27,52	30,24	310,27
s	0,0	0,08	0,0	1,26	4,96	67,93
v	0,0	0,81	0,0	4,58	16,39	21,89
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Rm</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	4,0	9,97	50,0	25,69	31,91	331,84
s	0,0	0,08	0,0	1,01	2,49	45,48
v	0,0	0,082	0,0	3,91	7,80	13,71

Tab. 9. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, Promi pc

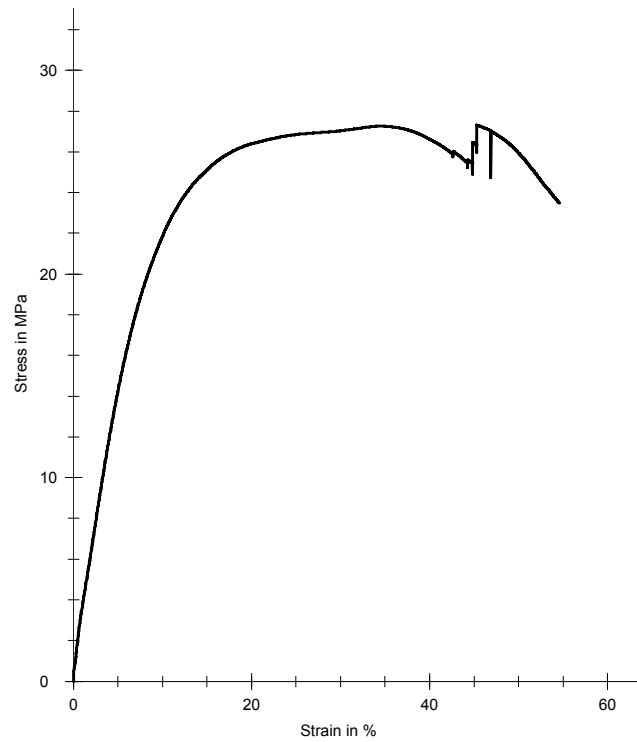
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Rm</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	4,0	10,1	50	28,27	7,98	432,05
s	0,0	0,18	0,0	1,34	0,75	60,47
v	0,0	1,78	0,0	4,75	9,38	14,00
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Rm</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	4,0	10,3	50	23,33	8,28	421,41
s	0,0	0,08	0,0	1,15	0,82	43,42
v	0,0	0,79	0,0	4,91	9,94	10,30

Tab. 10. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, Zwick 1456

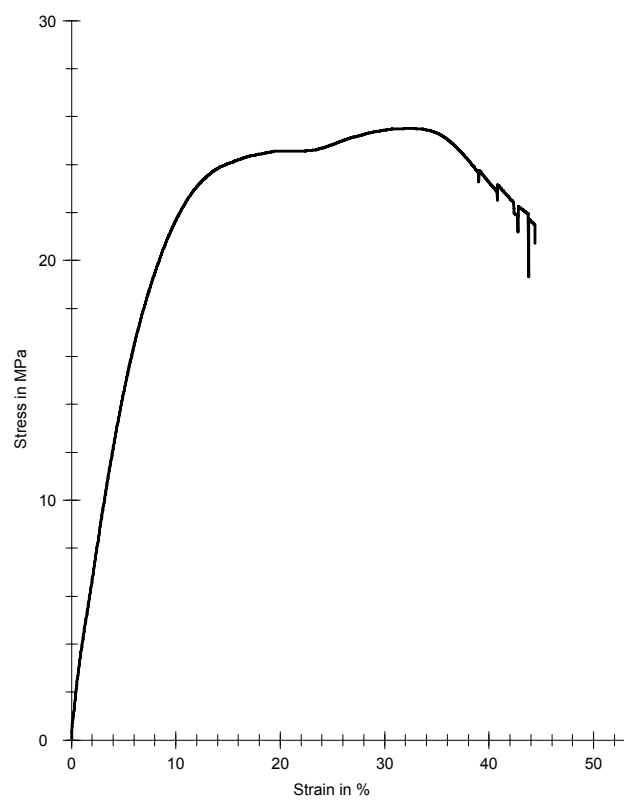
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Rm</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	4,0	10,02	50,0	28,35	10,57	257,68
s	0,0	0,12	0,0	3,01	1,46	6,03
v	0,0	1,17	0,0	10,62	13,82	2,34
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Rm</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	4,0	10,08	50,0	24,04	11,67	236,65
s	0,0	0,08	0,0	0,71	1,52	33,14
v	0,0	0,75	0,0	2,95	13,01	14,00



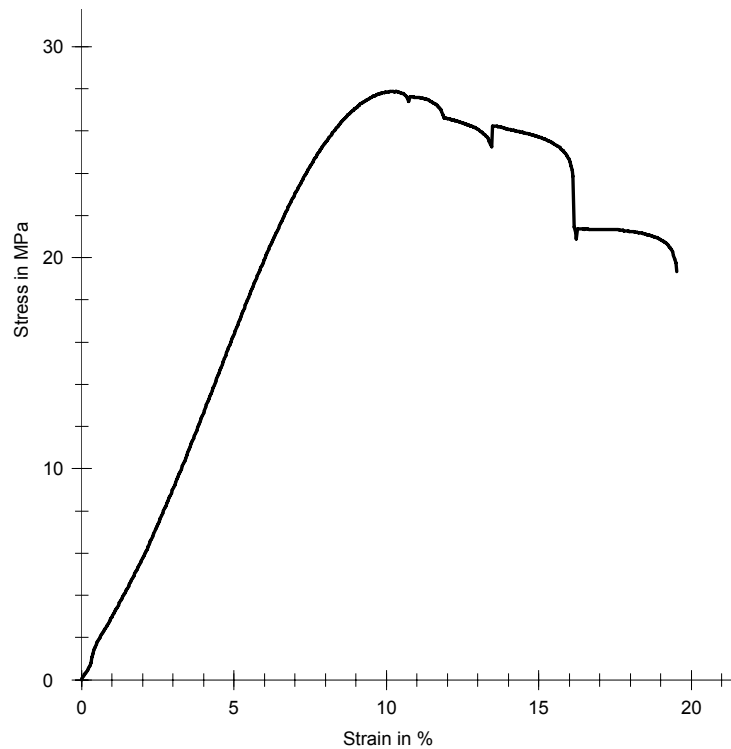
Obr. 28. Vliv směru vláken na mez pevnosti v tahu  $R_m$  [MPa] u tl. tělísek 4 mm.



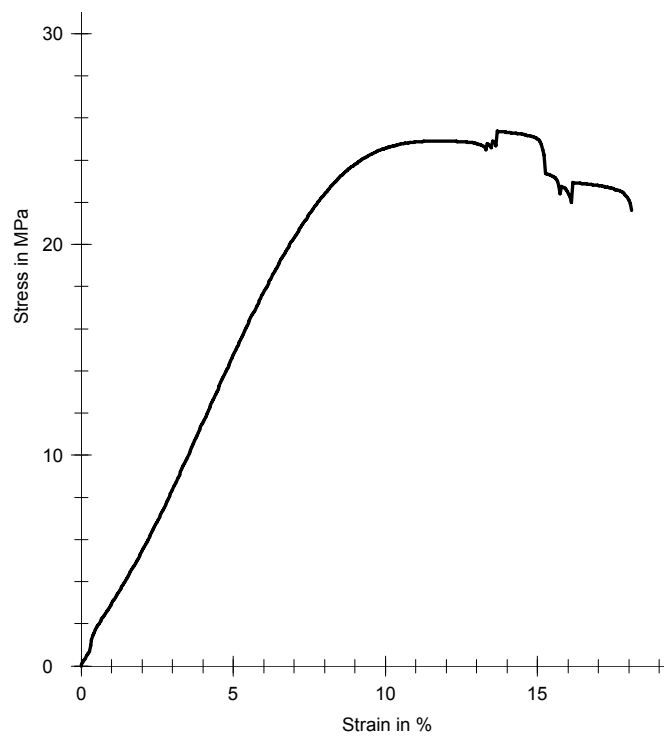
Obr. 29. Průměrná tahová křivka pro PP, tl. 4 mm, směr L



Obr. 30. Průměrná tahová křivka pro PP, tl. 4 mm, směr T



Obr. 31. Průměrná tahová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, směr L



Obr. 32. Průměrná tahová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, směr T



Experimentální tahové zkoušky potvrdily vliv tloušťky tělísek a orientaci vláken na pevnosti laminátových prvků. Značný vliv na pevnost v tahu má orientace vláken. Největší pevnost v tahu byla naměřena u tělísek s PP + 30 % GF, ve směru L a tloušťkou 2 mm. S rostoucí tloušťkou tělísek (PP + 30 % GF) se snižuje pevnost v tahu ve směru L, zatímco pevnost v tahu ve směru T pro tělíska (PP + 30 % GF) je prakticky na stejné hodnotě, jak pro tloušťku 2 mm, tak pro tloušťku 3 a 4 mm.

Hodnoty modulu pružnosti v tahu  $E$  nebyly brány jako věrohodné, protože nebyl použit extenziometr z důvodu malé délky tělísek, a tudíž se graficky nevyhodnocoval.

## 7.2 Naměřené hodnoty ohybových veličin

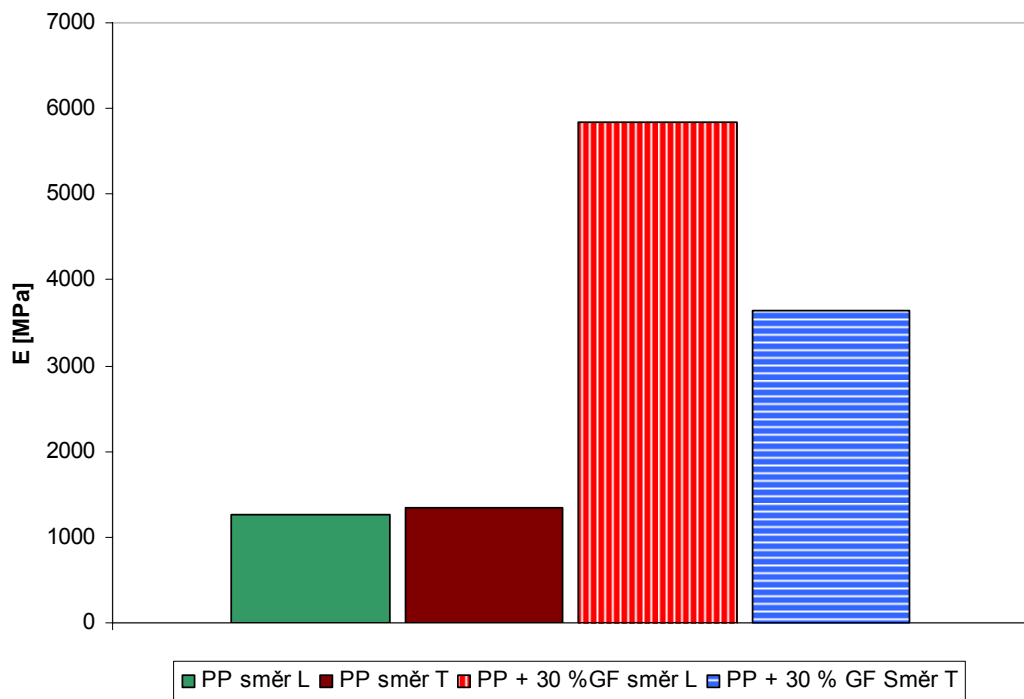
Sledujeme výsledky pevnosti v ohybu  $R_m$  [MPa]. Dále se zaměřujeme na deformaci ohybem na mezi pevnosti v ohybu  $\varepsilon_{Fmax}$  a poslední řadě nás zajímá modul pružnosti v ohybu  $E$  [MPa].

Tab. 11. Naměřené a vyp. hodnoty z ohybové zkoušky pro čistý PP, tl. 2 mm, Zwick 1456

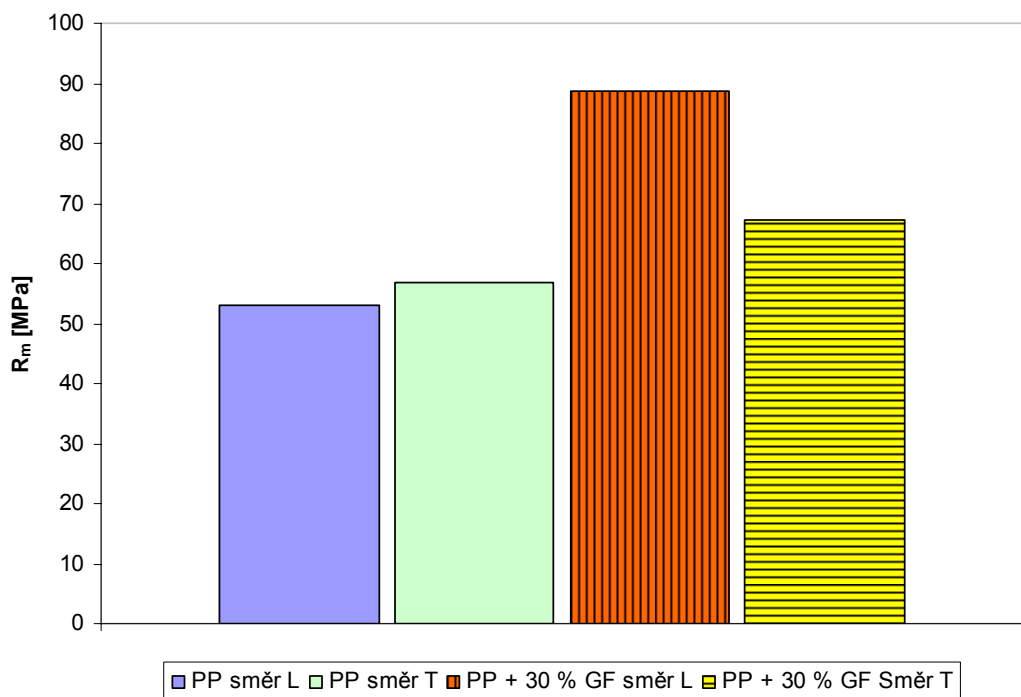
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	$R_m$ [MPa]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$E$ [MPa]
$\bar{X}$	2,0	10,03	50,0	53,04	8,57	1262,98
s	0,0	0,08	0,0	1,14	0,32	191,49
v	0,0	0,81	0,0	2,15	3,79	15,16
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	$R_m$ [MPa]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$E$ [MPa]
$\bar{X}$	2,0	9,97	50,0	56,94	8,27	1346,97
s	0,0	0,08	0,0	5,74	0,11	205,96
v	0,0	0,82	0,0	10,09	1,34	15,29

Tab. 12. Naměřené a vyp. hodnoty z ohybové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, Zwick 1456

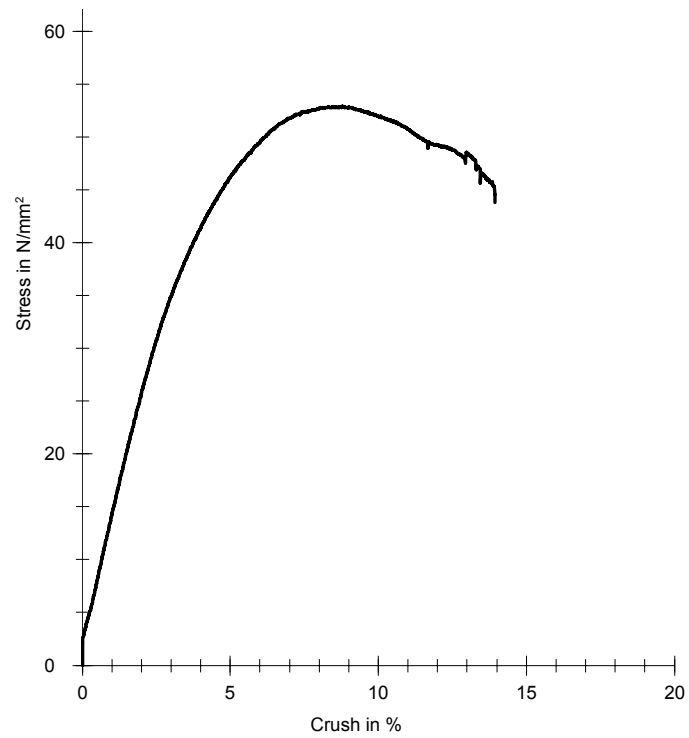
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	$R_m$ [MPa]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$E$ [MPa]
$\bar{X}$	2,0	9,97	50,0	88,69	2,46	5833,75
s	0,0	0,18	0,0	3,84	0,31	970,92
v	0,0	1,76	0,0	4,33	12,59	16,64
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	$R_m$ [MPa]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$E$ [MPa]
$\bar{X}$	2,0	10,05	50,0	67,27	5,27	3649,71
s	0,0	0,10	0,0	3,57	0,42	397,06
v	0,0	1,04	0,0	5,31	7,89	10,88



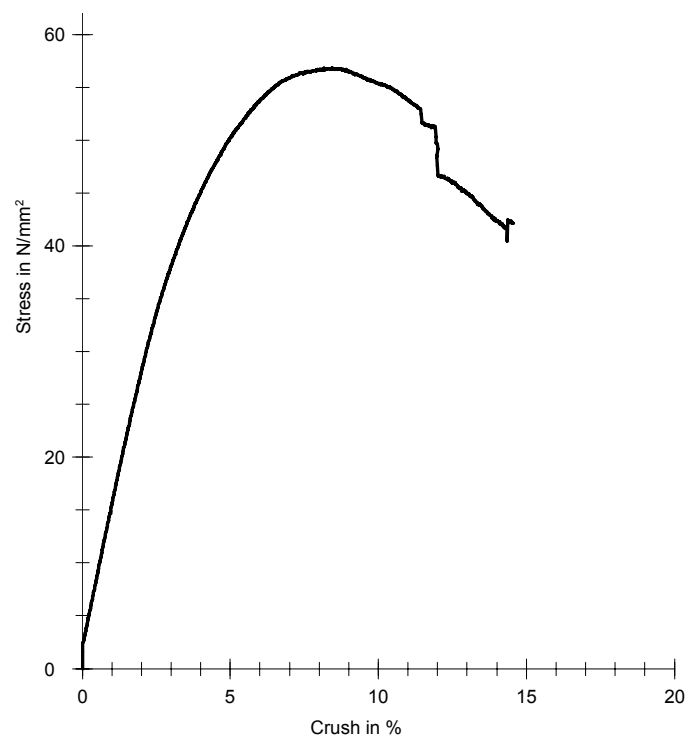
Obr. 33. Vliv směru vláken na modul pružnosti v ohybu  $E$  [MPa] u tl. tělísek 2 mm.



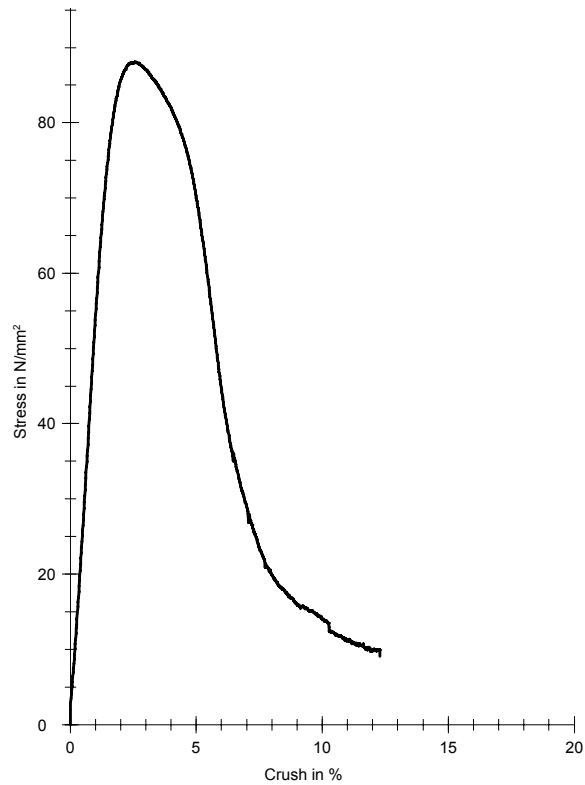
Obr. 34. Vliv směru vláken na mez pevnosti v ohybu  $R_m$  [MPa] u tl. tělísek 2 mm.



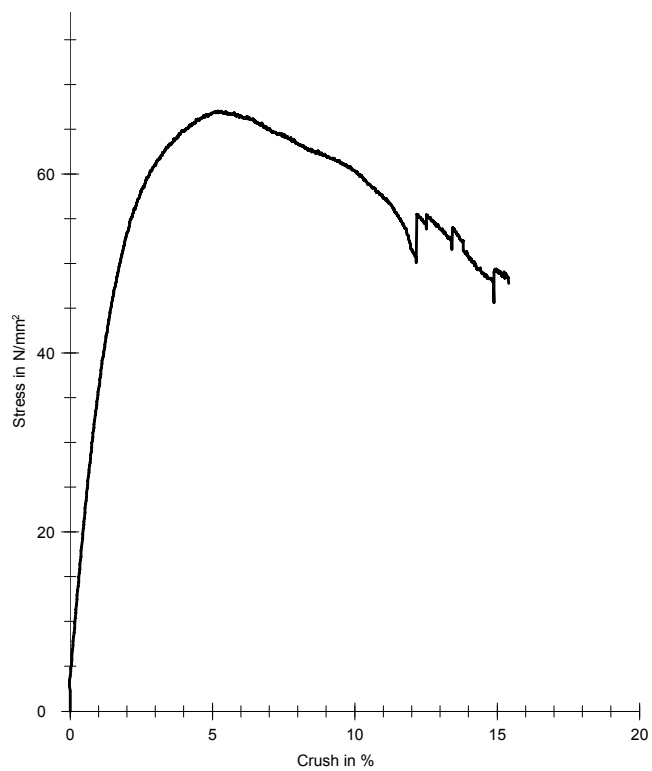
Obr. 35. Průměrná ohybová křivka pro PP, tl. 2 mm, směr L



Obr. 36. Průměrná ohybová křivka pro PP, tl. 2 mm, směr T



Obr. 37. Průměrná ohybová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, směr L



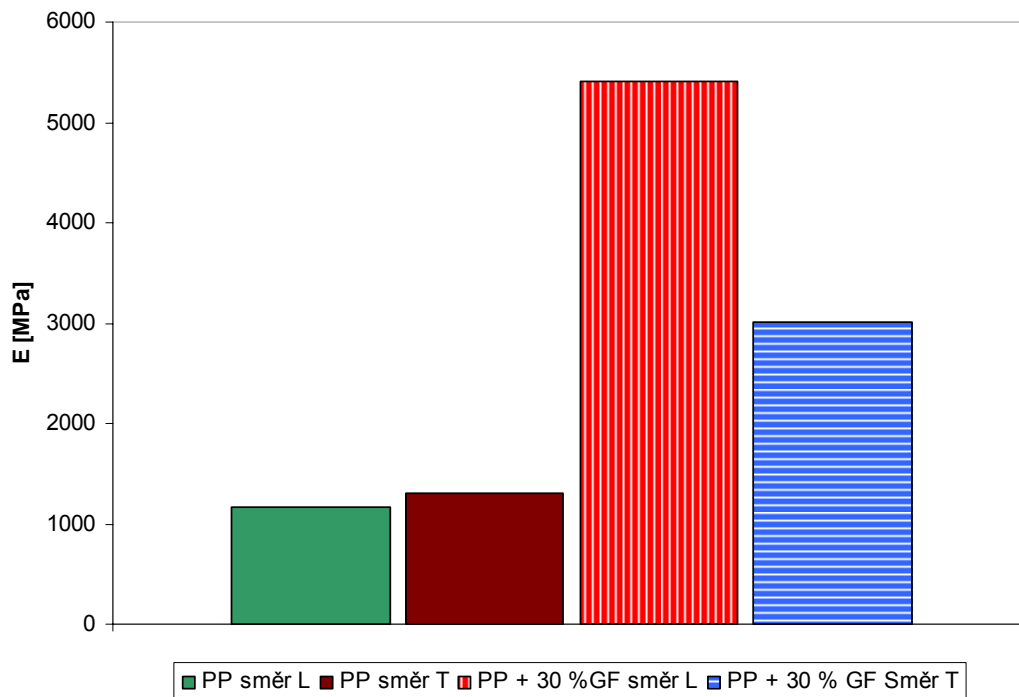
Obr. 38. Průměrná ohybová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, směr T

Tab. 13. Naměřené a vyp. hodnoty z ohybové zkoušky pro čistý PP, tl. 3 mm, Zwick 1456

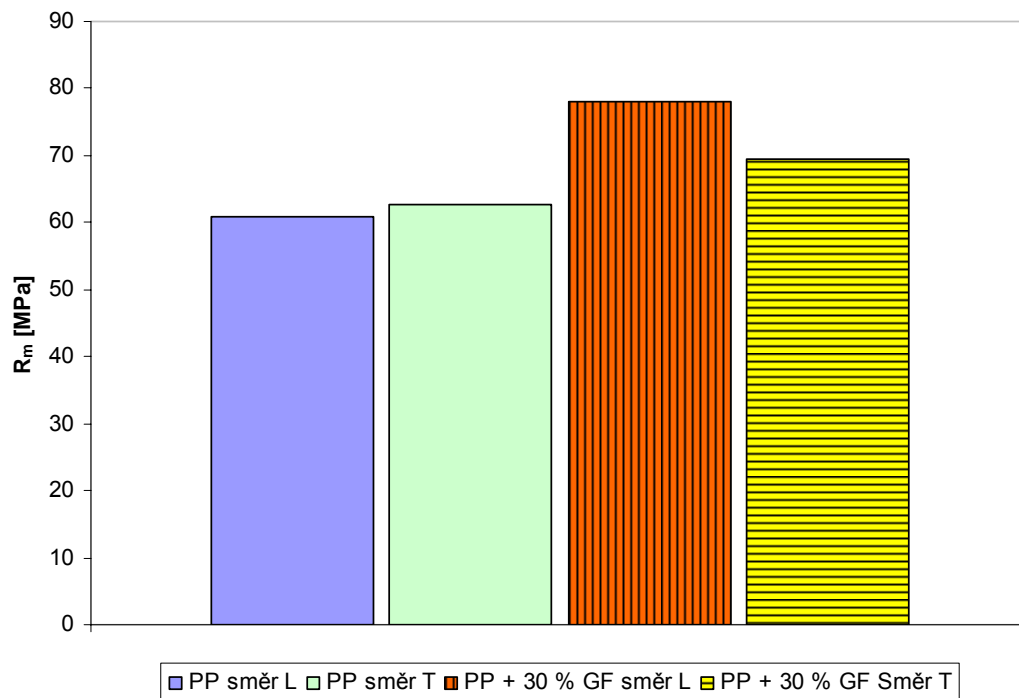
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Fmax</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	3,0	10,05	50,0	60,98	11,58	1157,94
s	0,0	0,08	0,0	1,13	0,33	98,53
v	0,0	0,83	0,0	1,85	2,84	8,51
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Fmax</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	3,0	10,0	50,0	62,73	11,09	1300,73
s	0,0	0,0	0,0	1,87	0,18	88,96
v	0,0	0,0	0,0	3,03	1,60	6,84

Tab. 14. Naměřené a vyp. hodnoty z ohybové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, Zwick 1456

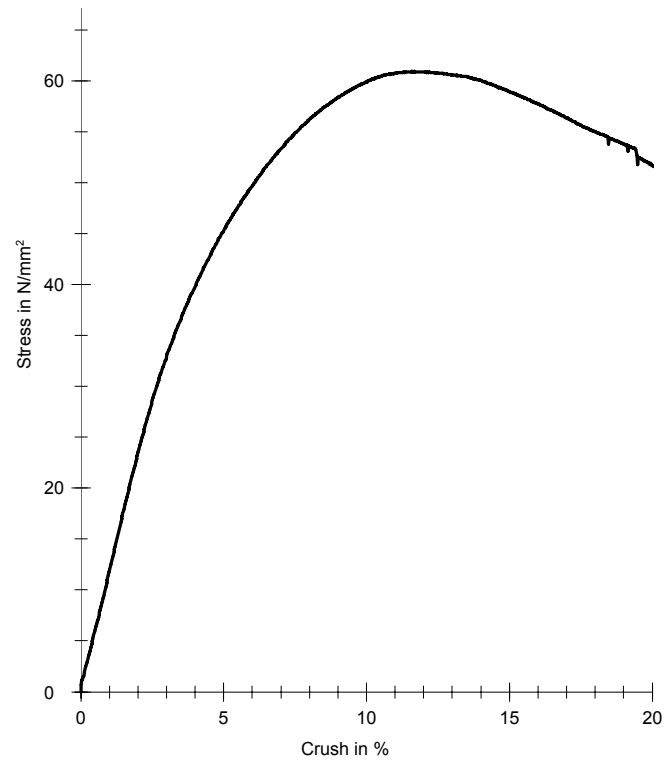
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Fmax</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	3,0	10,03	50,0	77,92	2,36	5409,62
s	0,0	0,14	0,0	3,92	0,35	502,06
v	0,0	1,36	0,0	5,02	14,83	9,28
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Fmax</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	3,0	10,05	50,0	69,37	8,06	3011,44
s	0,0	0,12	0,0	3,49	0,25	173,78
v	0,0	1,22	0,0	5,03	3,13	5,77



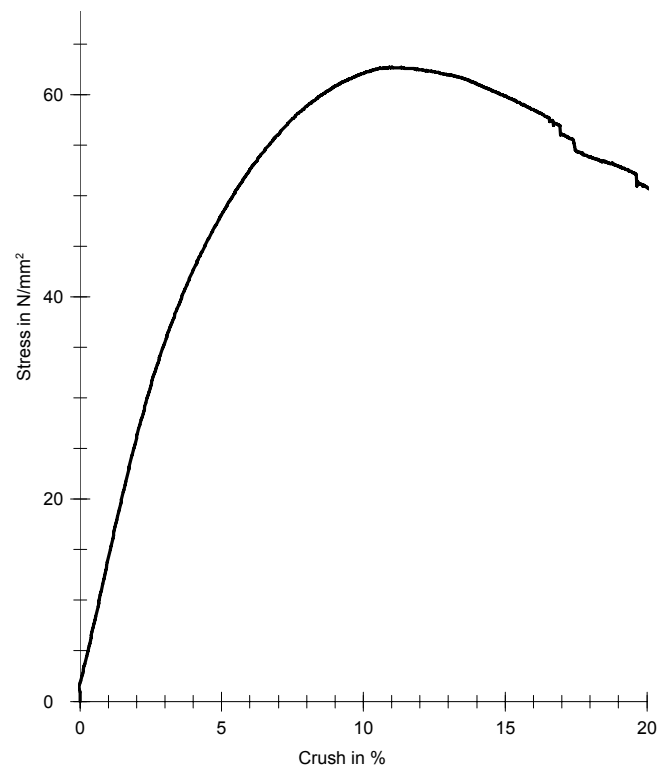
Obr. 39 Vliv směru vláken na modul pružnosti v ohybu  $E$  [MPa] u tl. tělísek 3 mm.



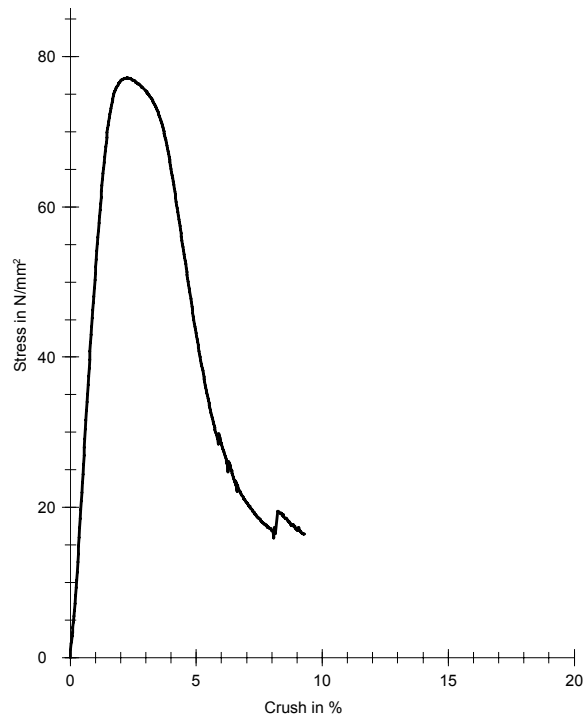
Obr. 40. Vliv směru vláken na mez pevnosti v ohybu  $R_m$  [MPa] u tl. tělísek 3 mm.



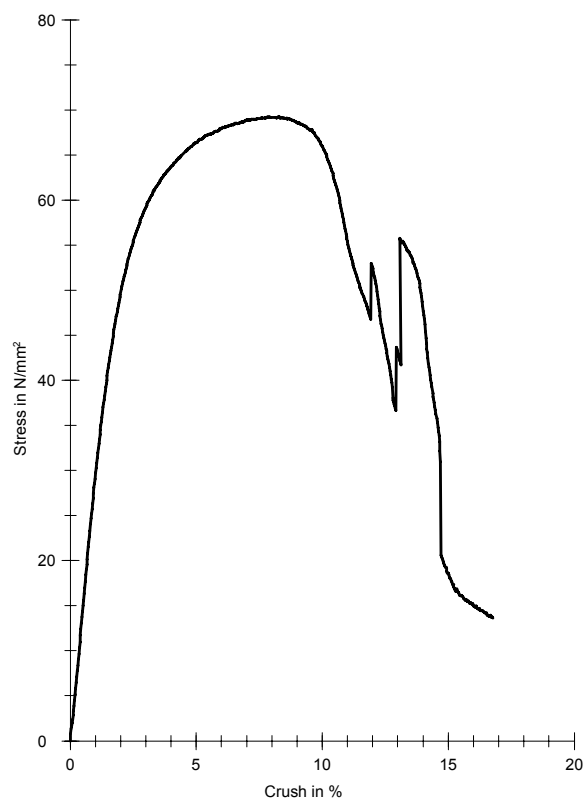
Obr. 41. Průměrná ohybová křivka pro PP, tl. 3 mm, směr L



Obr. 42. Průměrná ohybová křivka pro PP, tl. 3 mm, směr T



Obr. 43. Průměrná ohybová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, směr L



Obr. 44. Průměrná ohybová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, směr T

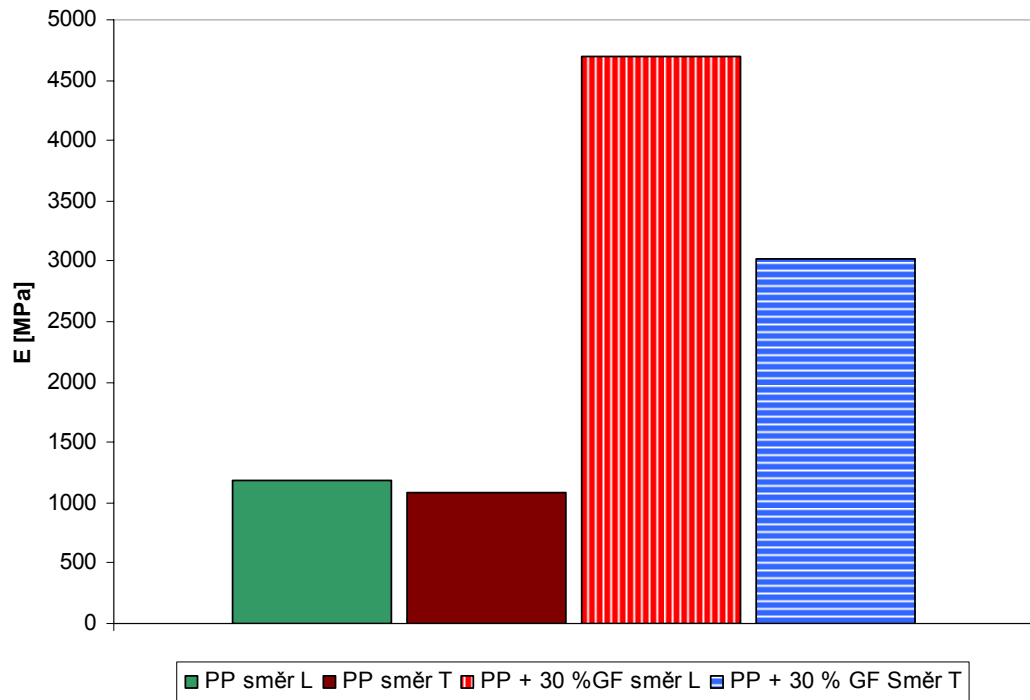


Tab. 15. Naměřené a vyp. hodnoty z ohybové zkoušky pro čistý PP, tl. 4 mm, Zwick 1456

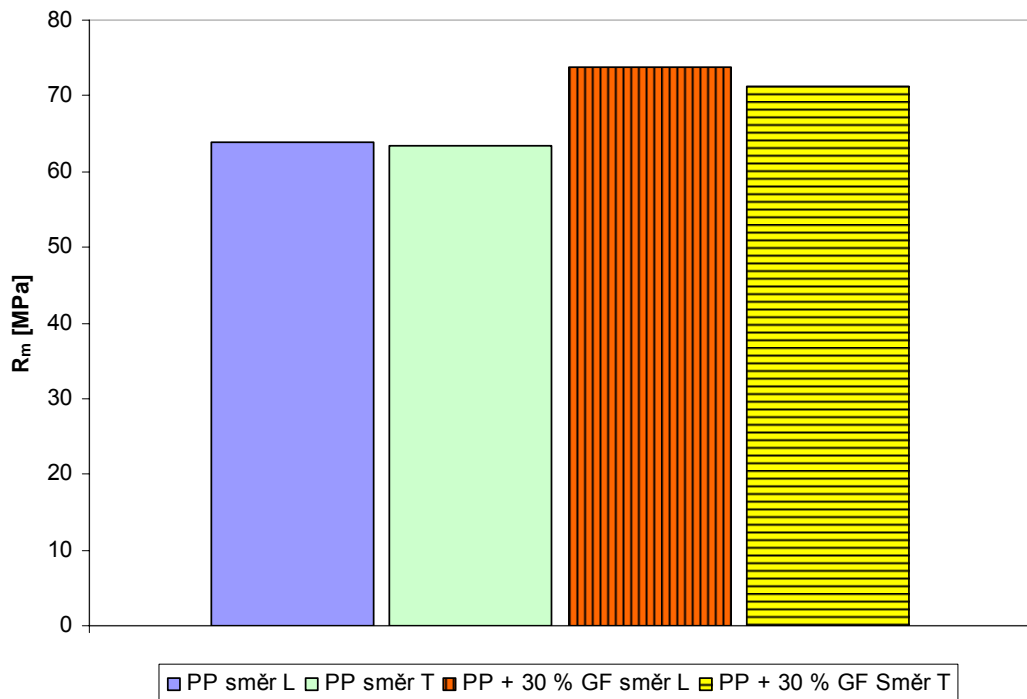
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Fmax</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	4,0	10,02	50,0	63,9	14,54	1180,59
s	0,0	0,04	0,0	0,95	0,18	45,63
v	0,0	0,41	0,0	1,49	1,25	3,87
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Fmax</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	4,0	9,97	50,0	63,37	14,55	1077,07
s	0,0	0,05	0,0	2,09	0,32	145,94
v	0,0	0,52	0,0	3,29	2,20	13,55

Tab. 16. Naměřené a vyp. hodnoty z ohybové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, Zwick 1456

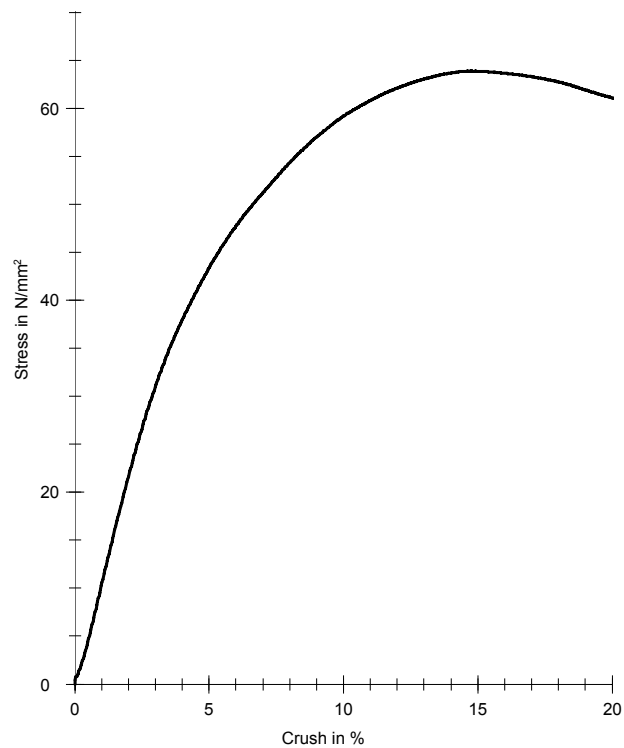
Směr L	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Fmax</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	4,0	10,02	50,0	73,82	2,90	4699,47
s	0,0	0,12	0,0	4,52	0,66	431,63
v	0,0	1,17	0,0	6,12	22,69	9,18
Směr T	h (mm)	b (mm)	l (mm)	R <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>Fmax</sub> [%]	E [MPa]
$\bar{X}$	4,0	10,05	50,0	71,2	8,36	3016,12
s	0,0	0,05	0,0	0,78	1,41	149,24
v	0,0	0,54	0,0	1,09	16,85	4,95



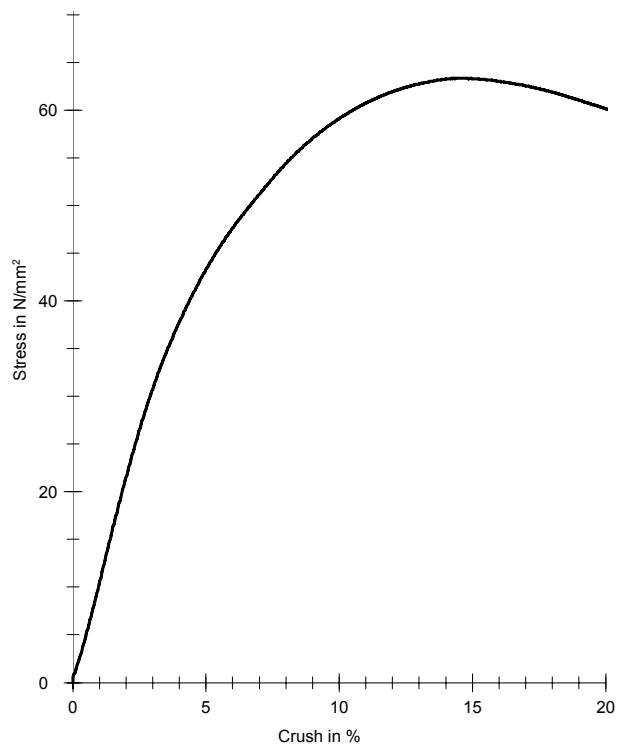
Obr. 45. Vliv směru vláken na modul pružnosti v ohybu  $E$  [MPa] u tl. tělísek 4 mm.



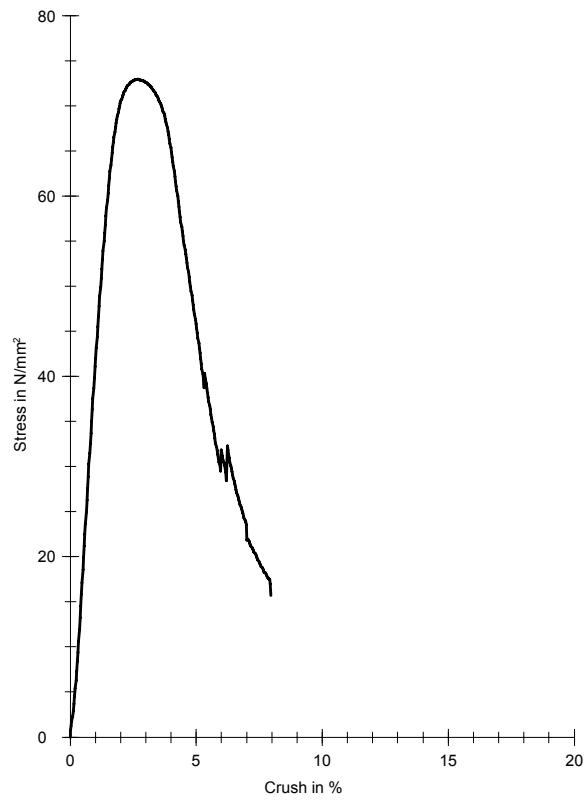
Obr. 46. Vliv směru vláken na mez pevnosti v ohybu  $R_m$  [MPa] u tl. tělísek 4 mm.



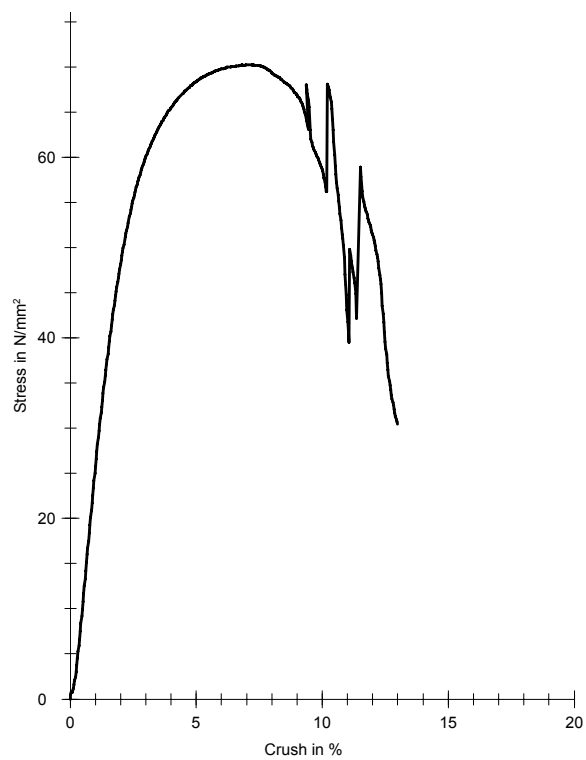
Obr. 47. Průměrná ohybová křivka pro PP, tl. 4 mm, směr L



Obr. 48. Průměrná ohybová křivka pro PP, tl. 4 mm, směr T



Obr. 49. Průměrná ohybová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, směr L



Obr. 50. Průměrná ohybová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, směr T

U experimentální ohybové zkoušky se porovnával modul pružnosti v ohybu a mez pevnosti v ohybu u tělísek z (PP + 30 % GF). Největšího modulu pružnosti bylo dosaženo ve směru L, u tělísek tloušťky 2 mm. S rostoucí tloušťkou tělísek dochází k mírnému poklesu modulu pružnosti ve směru L. Ve směru T je modul pružnosti nejvyšší u tělísek s tloušťkou 2 mm, kde dosahuje hodnoty cca 3600 MPa. U tloušťky 3 a 4 mm je modul prakticky shodný, nabývá hodnoty cca 3000 MPa.

Největší mez pevnosti byla naměřena u tělísek ve směru L z (PP + 30 GF) o tloušťce stěny 2 mm. Se zvyšující se tloušťkou vzorků mez pevnosti klesá. Rozdíly v mezi pevnosti ve směru L a T se nejvíce liší u tloušťky 2 mm. U tělísek s tloušťkou 3 a 4 mm jsou rozdíly pevnosti zanedbatelné.

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá studiem vlivu tloušťky stěny vstříkovaných stěn vyztužených krátkými vlákny na mechanické vlastnosti. Teoretická část poskytuje souhrnnou literární studii o kompozitních materiálech, jejich mechanických vlastnostech a zpracování. Experimentální část zkoumá vliv tloušťky stěny na změnu mechanických vlastností v příčném (T) a podélním (L) směru na zkušebních těliscích z takto rozřezaných vstříkovaných stěn.

Při zkoumání mechanických vlastností plněného polypropylenu krátkými vlákny (PP + 30 % GF) v tahu a v ohybu bylo potvrzeno, že čím lepší bude orientace vláken na stěnách tělíska, tím vyšší bude modul pružnosti i mez pevnosti.

Největší mez pevnosti v tahu vykazoval vzorek tloušťky 2 mm ve směru L. Čím se tloušťka zkoušeného tělíska zvětšovala, tím více se pevnost snižovala. U tloušťky tělíska 4 mm, směru L byla naměřena mez pevnosti srovnatelná jako u neplněného tělíska (čistý PP). Modul pružnosti v tahu byl naměřený u všech zkušebních tělísek, ale hodnoty se nemohly vzít jako věrohodné, protože se z důvodu krátké délky tělísek nedalo použít extenziometru.

U měření modulu pružnosti a meze pevnosti v ohybu byly naměřeny největší hodnoty ve směru L pro tělísko tloušťky 2 mm. Další tloušťky zkušebních tělísek vykazovaly stejné vlastnosti jako při měření meze pevnosti v tahu. Opět došlo k tomu, že čím větší tloušťka zkušebního tělíska byla použita, tím nižší hodnota byla naměřena.

Zkušební tělíska ve směru L vykazovala vždy vyšší hodnoty než tělíska ve směru T. Rozhodující vliv na pevnost tělísek měl směr toku vláken. U tloušťky 2 mm byla vlákna více orientovaná ve směru filmového vtoku než u dalších tělísek. Nižší mez pevnosti i modul pružnosti u tlustších tělísek než 2 mm, byl zapříčiněn nepravidelným uspořádáním vláken v prostřední vrstvě tělíska.

Závěrem lze konstatovat, že rozhodující vliv na pevnost tělísek má stupeň plnění a orientace, která se zvyšuje se snižující se tloušťkou stěny a v poslední řadě má rozhodující vliv směr toku taveniny.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] PLUHAŘ, J. a kolektiv: *Nauka o materiálech*, Praha: SNTL, 1989
- [2] PTÁČEK, L. a kolektiv: *Nauka o materiálu II*, Brno: CERM, 2002
- [3] JANČÁŘ, J.: *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*, Brno: VUT, 2003
- [4] SOVA, M., KREBS, J. a kolektiv: *Termoplasty v praxi (CD ROM)*
- [5] MEISSNER, B., ZILVAR, V.: *Fyzika polymerů- Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*, SNTL/ ALFA, 1987
- [6] ŠUBA, O.: *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001, skripta
- [7] LANGER, P.: *Studium mechanického chování krátkovláknového kompozitu s PP matricí*, diplomová práce, 2002
- [8] BAREŠ, R.A.: *Kompozitní materiály*, Praha: SNTL, 1988
- [9] SUSAN, E.M. SELKE, JOHN D. CULTER, RUBEN J. HERNANDEZ.: *Plastics Packaging - Properties, Processing, Applications and Regulations, (2nd edition)*, HANSER 2004
- [10] CRAWFORD, R. J.: *Plastics Engineering (3 rd edition)*, Oxford: Butterworth – Heinemann, 1998
- [11] ŽALUDEK, M.: *Modelování a studium mechanického a termomechanického chování kompozitních struktur na bázi vstříkované polymerní matrice*, doktorská disertační práce, 2002
- [12] TOMIS, F.: *Plastikářská výroba*, Gottwaldov, 1982
- [13] CAFOUREK, M.: *Vztah mezi lomovou houževnatostí a geometrií vrubu u krátkovláknového kompozitu s PP matricí*, diplomová práce, 2004
- [14] ŠTEPEK, J., ZELINGER, J., KUTA, A. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů. 1. vyd.*, Praha : SNTL, 1989, ISBN : 04-602-89, 637 s.

- [15] KOLOUCH, J. *Strojní součásti z plastů. 1. vyd.*, Praha : SNTL, 1981. ISBN : 04-234-81. 258 s.
- [16] BOBČÍK, L. *Formy pro zpracování plastů. Vstřikování termoplastů. Příručka pro pracovníky v oboru plastů. 2. vyd.*, UNIPLAST Brno, 1999, 133 s.
- [17] TOMIS, F. *Gumárenská a plastikářská technologie - zpracovatelské procesy. 2. vyd.*, VUT Brno, 1987, 289 s
- [18] LAPČÍK, L. RAAB, M. *Nauka o materiálech II. 1. vyd.*, UTB Zlín, 2000. 115 s.
- [19] JARUŠEK, J. *Metody zkoumání polymeru. VŠCHT Pardubice, 1989, 2. vydání*
- [20] SCHATZ, M. VONDRÁČEK, P. *Zkoušení polymerů. 2. vyd.*, Praha, VŠCHT, 1988, 276 s.
- [21] PETERS, S. T.: *Handbook of Composites - second edition*, London: Chapman & Hall, 1998
- [22] HARPER, Ch. A.: *Modern plastics Handbook*, McGraw- Hill, 2000
- [23] ŠUBA, O.: *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*, Brno, VUT v Čs. Redakci VN MON, 1988, s. 104-111.



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$[\varepsilon]$	-	tenzor deformace
$[\varepsilon]^0$	-	tenzor deformace ve střední ploše
$[k]$	-	matice konstant křivosti
$\varepsilon$	%	poměrné prodloužení
$\sigma$	MPa	napětí
$\varepsilon_b$	-	poměrné zkrácení
$\Delta l$	mm	rozdíl délek zkušebního tělíska po a před zatížením
$\varepsilon_l$	-	poměrné prodloužení
$\sigma_0$	MPa	ohybové napětí
$[S]$	-	matice tuhosti
$A_0$	mm <sup>2</sup>	plocha průřezu před zatížením
$b$	mm	šířka zkušebního tělíska
$E$	MPa	modul pružnosti
$F$	N	zatěžující síla
$h$	mm	tloušťka zkušebního tělíska
$k$	-	označení vrstvy laminátu
$l$	mm	délka zkušebního tělíska
$L$	mm	vzdálenost podpor
$l_0$	mm	délka zkušebního tělíska před zatížením
$l_c$	mm	kritická délka vláken
$M$	Nmm	ohybový moment
$n$	-	počet testovaných vzorků
$R_m$	MPa	mez pevnosti v ohybu a ohybu

---

$v_c$	-	objem kompozitu
$V_f$	-	objemový zlomek vlákna
$v_f$	-	objem vláken
$w_f$	-	hmotnostní zlomek vlákna
$W_O$	$\text{mm}^3$	ohybový modul průřezu
$x, z, y$	-	označení os souřadného systému
$\nu$	-	Poissonův poměr
$\rho_f$		hustota vláken
$\rho_m$		hustota matrice

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Závislost longitudinální a transverzálního modulu pružnosti na objemové koncentraci a štíhlosti vláken</i> .....	18
<i>Obr. 2. Závislosti krátkodobé meze pevnosti na teplotě</i> .....	20
<i>Obr. 3. Četnosti hodnot poměrů ohybové ku tahové pevnosti termoplastů</i> .....	21
<i>Obr. 4. Pružně plastický diagram</i> .....	22
<i>Obr. 5. Rozložení napětí na vlákně</i> .....	25
<i>Obr. 6. Případy možných vznikajících krátkovláknových struktur ovlivněných tvarem výrobku a jeho zpracovatelským procesem (A- centrální vtok, B- rohový tok, C- filmový tok)</i> .....	26
<i>Obr. 7. Schématické znázornění usměrněné (A), neusměrněné (B), krátkovláknové struktury a částicové partikulové struktury (C)</i> .....	26
<i>Obr. 8. Znázornění složek deformace</i> .....	27
<i>Obr. 9. Ekvivalentní systém sil a momentů</i> .....	28
<i>Obr. 10. Označení vrstev laminátu</i> .....	28
<i>Obr. 11. Šnekový vstřikovací stroj. 1- kloubový vstřikovací mechanismus, 2- hydraulický válec s pístem, ovládající kloubový mechanismus, 3- přívod a odvod kapaliny od čerpadla, 4- vstřikovací forma, 5- šnek, 6- tavící komora, 7- tryska tavící komory, 8- odporové topení, 9- násypka, 10- hydraulický motor, 11- hydraulický válec s pístem pro axiální pohyb šneku, 12- koncové spínače, 13- chladicí kanály, 14- přívod hydraulické kapaliny, 15- ovládací panel, 16- regulace hydraulického systému stroje</i> .....	31
<i>Obr. 12. Diagram časového sledu operací ve vstřikovacím cyklu</i> .....	32
<i>Obr. 13. Zaplňování dutiny formy při vstřikování vyztužených termoplastů</i> .....	33
<i>Obr. 14. Jednosměrná deformace tělesa tahem</i> .....	35
<i>Obr. 15. Obecná tahová křivka</i> .....	37
<i>Obr. 16. Tříbodový systém ohybové zkoušky (a), rozložení průřezového momentu (b), rozložení ohybového momentu (c)</i> .....	39
<i>Obr. 17. Poloha tělesa na začátku ohybové zkoušky</i> .....	44
<i>Obr. 18. Vliv směru vláken na mez pevnosti v tahu <math>R_m</math> [MPa] u tl. tělísek 2 mm</i> .....	46
<i>Obr. 19. Průměrná tahová křivka pro PP, tl. 2 mm, směr L</i> .....	47

Obr. 20. Průměrná tahová křivka pro PP, tl. 2 mm, směr T .....	47
Obr. 21. Průměrná tahová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, směr L .....	48
Obr. 22. Průměrná tahová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, směr T .....	48
Obr. 23. Vliv směru vláken na mez pevnosti v tahu $R_m$ [MPa] u tl. tělísek 3 mm .....	50
Obr. 24. Průměrná tahová křivka pro PP, tl. 3 mm, směr L .....	51
Obr. 25. Průměrná tahová křivka pro PP, tl. 3 mm, směr T .....	51
Obr. 26. Průměrná tahová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, směr L .....	52
Obr. 27. Průměrná tahová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, směr T .....	52
Obr. 28. Vliv směru vláken na mez pevnosti v tahu $R_m$ [MPa] u tl. tělísek 4 mm .....	54
Obr. 29. Průměrná tahová křivka pro PP, tl. 4 mm, směr L .....	55
Obr. 30. Průměrná tahová křivka pro PP, tl. 4 mm, směr T .....	55
Obr. 31. Průměrná tahová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, směr L .....	56
Obr. 32. Průměrná tahová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, směr T .....	56
Obr. 33. Vliv směru vláken na modul pružnosti v ohybu $E$ [MPa] u tl. tělísek 2 mm .....	58
Obr. 34. Vliv směru vláken na mez pevnosti v ohybu $R_m$ [MPa] u tl. tělísek 2 mm .....	58
Obr. 35. Průměrná ohybová křivka pro PP, tl. 2 mm, směr L .....	59
Obr. 36. Průměrná ohybová křivka pro PP, tl. 2 mm, směr T .....	59
Obr. 37. Průměrná ohybová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, směr L .....	60
Obr. 38. Průměrná ohybová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, směr T .....	60
Obr. 39. Vliv směru vláken na modul pružnosti v ohybu $E$ [MPa] u tl. tělísek 3 mm .....	62
Obr. 40. Vliv směru vláken na mez pevnosti v ohybu $R_m$ [MPa] u tl. tělísek 3 mm .....	62
Obr. 41. Průměrná ohybová křivka pro PP, tl. 3 mm, směr L .....	63
Obr. 42. Průměrná ohybová křivka pro PP, tl. 3 mm, směr T .....	63
Obr. 43. Průměrná ohybová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, směr L .....	64
Obr. 44. Průměrná ohybová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, směr T .....	64
Obr. 45. Vliv směru vláken na modul pružnosti v ohybu $E$ [MPa] u tl. tělísek 4 mm .....	66
Obr. 46. Vliv směru vláken na mez pevnosti v ohybu $R_m$ [MPa] u tl. tělísek 4 mm .....	66
Obr. 47. Průměrná ohybová křivka pro PP, tl. 4 mm, směr L .....	67
Obr. 48. Průměrná ohybová křivka pro PP, tl. 4 mm, směr T .....	67
Obr. 49. Průměrná ohybová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, směr L .....	68
Obr. 50. Průměrná ohybová křivka pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, směr T .....	68

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů.....	14
Tab. 2. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro čistý PP, tl. 2 mm, Zwick 1456.....	45
Tab. 3. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, Promi pc .....	45
Tab. 4. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, Zwick 1456.....	46
Tab. 5. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro čistý PP, tl. 3 mm, Zwick 1456.....	49
Tab. 6. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, Promi pc .....	49
Tab. 7. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, Zwick 1456.....	49
Tab. 8. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro čistý PP, tl. 4 mm, Zwick 1456.....	53
Tab. 9. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, Promi pc .....	53
Tab. 10. Naměřené a vyp. hodnoty z tahové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, Zwick 1456.....	53
Tab. 11. Naměřené a vyp. hodnoty z ohybové zkoušky pro čistý PP, tl. 2 mm, Zwick 1456.....	57
Tab. 12. Naměřené a vyp. hodnoty z ohybové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 2 mm, Zwick 1456.....	57
Tab. 13. Naměřené a vyp. hodnoty z ohybové zkoušky pro čistý PP, tl. 3 mm, Zwick 1456.....	61
Tab. 14. Naměřené a vyp. hodnoty z ohybové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 3 mm, Zwick 1456.....	61
Tab. 15. Naměřené a vyp. hodnoty z ohybové zkoušky pro čistý PP, tl. 4 mm, Zwick 1456.....	65
Tab. 16. Naměřené a vyp. hodnoty z ohybové zkoušky pro PP + 30 % GF, tl. 4 mm, Zwick 1456.....	65