

# **Studium vlivu umístění ústí vtoku na mechanické chování stěn vyztužených krátkými vlákny**

Bc. Martin Nedoma

---

Diplomová práce  
2007



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2006/2007

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin NEDOMA**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Studium vlivu umístění ústí vtoku na mechanické chování stěn vyztužených krátkými vlákny**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární studii na dané téma**
- 2. Výroba zkušebních vzorků**
- 3. Provedení mechanických zkoušek**
- 4. Vyhodnocení experimentálně získaných dat**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. ŠUBA, O. Dimenzování a navrhování výrobků z plastů. 1. vyd. Zlín :Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005. ISBN 80-7318-287-4.

2. AGARWAL, B. D., BROUTMAN, L. J. Vláknové kompozity. Přeložil L. Sodomka. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987.

3. BAREŠ, R. A. Kompozitní materiály. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988.

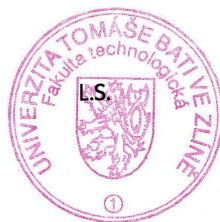
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **13. února 2007**

Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2007**

Ve Zlíně dne 17. ledna 2007

  
prof. Ing. Ignác Hoza, CSc.  
děkan



  
doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
ředitel ústavu

## **ABSTRAKT**

Tato práce je zaměřena na zkoumání vlivu orientace krátkovláknové struktury plošných vstříkovaných prvků na mechanické vlastnosti. Zkoumá vliv stupně a směru orientace na mechanické vlastnosti výrobku při použití různých typů vtokových ústí a s jejich různým umístěním.

Klíčová slova: krátkovláknové kompozity, orientace vláken, mechanické vlastnosti.

## **ABSTRACT**

Mechanical properties and their dependence on short fibre orientation of injection-moulded short-glass fibre-reinforced polypropylen were examined. Different types of sprue were used to find dependence between the type and position of sprue and mechanical properties of injection – moulded short glass fibre reinforced polypropylen.

Keywords: short-fibre composites, orientation of fibres, mechanical properties.

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc. za cenné rady, odborné vedení a obětavý přístup při řešení problematiky spojené se zpracováním této diplomové práce.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>12</b>
1.1 DĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	14
1.1.1 Partikulové kompozity .....	14
1.1.2 Vláknové kompozity .....	15
<b>2 KRÁTKOVLÁKNOVÉ KOMPOZITY</b> .....	<b>17</b>
2.1 TERMOPLASTICKÁ MATRICE .....	18
2.2 SKLENĚNÁ VLÁKNA .....	19
2.3 ROZHRANÍ MEZI MATRICÍ A VLÁKEN .....	19
2.4 ORIENTACE VLÁKEN V LIVEM TOKU TAVENINY .....	20
2.5 CHARAKTERISTIKA MAKROSTRUKTURY ZVOLENÉHO PRVKU .....	24
2.6 POUŽITÝ MATERIÁL - POLYPROPYLEN.....	25
<b>3 MECHANIKA KOMPOZITŮ</b> .....	<b>26</b>
3.1 MECHANIKA KRÁTKOVLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ.....	26
3.1.1 Teorie přenosu napětí .....	27
3.1.2 Modul pružnosti a pevnost krátkovláknových kompozitů .....	30
3.2 TECHNOLOGICKÉ ASPEKTY OVLIVŇUJÍCÍ MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	31
3.2.1 Studený spoj .....	32
3.2.2 Poškození vláken v průběhu zpracování .....	33
3.2.3 Anizotropie vlastností výstřiku .....	33
3.2.4 Ztuhlá vrstva a orientace .....	33
<b>4 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ</b> .....	<b>35</b>
4.1 POPIS VSTŘIKOVACÍHO CYKLU.....	35
4.2 VTKOVÝ SYSTÉM.....	36
4.2.1 Horký vtokový systém.....	37
4.2.2 Studený vtokový systém.....	37
4.2.3 Vtoková ústí .....	37
4.2.3.1 Bodový vtok.....	38
4.2.3.2 Tunelový vtok .....	39
4.2.3.3 Boční vtok.....	39
4.2.3.4 Filmový vtok.....	39
4.2.3.5 Plný kuželový vtok.....	40
4.3 ŘEŠENÍ UMÍSTĚNÍ VTKOVÉHO ÚSTÍ .....	41
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>42</b>
<b>5 ÚVOD PRAKTICKÉ ČÁSTI</b> .....	<b>43</b>
<b>6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ</b> .....	<b>44</b>

6.1	MATERIÁL .....	44
6.2	ZKUŠEBNÍ VZORKY .....	44
6.2.1	Vzorek č. 1 .....	45
6.2.2	Vzorek č. 2 .....	45
6.2.3	Vzorek č. 3 .....	46
6.2.4	Vzorek č. 4 .....	46
6.3	VSTŘIKOVACÍ STROJ .....	46
6.4	FORMA .....	47
6.5	TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY PŘI VSTŘIKOVÁNÍ.....	48
<b>7</b>	<b>POUŽITÉ METODY .....</b>	<b>49</b>
7.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	49
7.2	TŘÍBODOVÝ OHYB .....	49
7.3	2D ZKOUŠKA ČTVERCOVÉ DESKY .....	49
7.4	POLARIZAČNÍ MIKROSKOPIE .....	50
7.5	FEM MODELOVÁNÍ.....	50
<b>8</b>	<b>DOSAŽENÉ VÝSLEDKY .....</b>	<b>51</b>
8.1	TAHOVÉ VLASTNOSTI .....	51
8.2	OHYBOVÉ VLASTNOSTI.....	52
8.3	2D ZKOUŠKA ČTVERCOVÉ DESKY .....	54
<b>9</b>	<b>PREDIKCE CHOVÁNÍ NA ZÁKLADĚ STRUKTURNÍCH MODELŮ.....</b>	<b>58</b>
9.1	TAHOVÁ TUHOST .....	58
9.1.1	Efektivní modul plně usměrněných struktur a,b .....	59
9.1.2	Efektivní modul vrstevnatých struktur c, d .....	59
9.1.3	Srovnání efektivních modulů .....	61
9.2	OHYBOVÁ TUHOST .....	62
9.2.1	Ohybová tuhost struktur a, b. ....	62
9.2.2	Ohybová tuhosti struktur c, d. ....	63
9.2.3	Experimentálně získané hodnoty ohybové tuhosti .....	64
9.2.4	Srovnání ohybových tuhostí .....	64
<b>10</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ ORIENTACE.....</b>	<b>65</b>
<b>11</b>	<b>FEM MODELOVÁNÍ.....</b>	<b>67</b>
11.1	MODEL A Ø 20MM.....	68
11.2	MODEL A Ø 50 MM .....	69
11.3	MODEL B Ø 20 MM .....	70
11.4	MODEL B Ø 50 MM .....	71
11.5	IZOTROPNÍ MODEL Ø 50MM.....	72
11.6	SROVNÁNÍ HODNOT TUHOSTÍ.....	72
<b>12</b>	<b>ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>74</b>

12.1	EXPERIMENTÁLNĚ ZÍSKANÁ DATA .....	74
12.2	PREDIKCE CHOVÁNÍ STRUKTUR NA ZÁKLADĚ STRUKTURNÍCH MODELŮ .....	74
12.3	FEM MODELOVÁNÍ.....	75
<b>ZÁVĚR</b>	.....	<b>76</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	.....	<b>78</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b>	.....	<b>80</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	.....	<b>82</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>	.....	<b>84</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	.....	<b>85</b>



## ÚVOD

Minulé století a zejména jeho druhá polovina přinesla obrovský rozmach použití plastů v nejrůznějších aplikacích. Je to způsobeno tím, že nabízejí mnoho výhod oproti jiným materiálům. Jde zejména o jejich snadnou zpracovatelnost a nízkou cenu v poměru k užitečným vlastnostem.

V minulosti vycházelo použití plastů a kompozitů ve strojírenství zejména ze snahy ( často i neopodstatněné ) nahrazovat ocel a jiné kovové materiály. Mezi hlavními argumenty se téměř vždy zmiňovalo snižování hmotnosti, někdy i korozní odolnost nebo elektrické izolační vlastnosti. Zřídka byly uváděny jiné důvody a s tímto přístupem se řešily individuální případy strojírenských součástí a dílů. V posledních letech se ukazuje, že stále náročnější požadavky lidské společnosti na strojírenské výrobky je možno splnit mnohem intenzivnějším využitím plastů a kompozitů a jejich dalším vývojem s cílem dosáhnout vlastností žádaných ve strojírenství.

Podle údajů *Plastics Europe, BASF a K 2004* bylo v roce 2003 ve světě vyrobeno kolem 221 mil. tun plastů a kaučuku (z toho 176 mil. tun materiálů) včetně 19 mil. tun kaučuku na technickou pryž a pneumatiky. Pro srovnání: světová výroba surové oceli v roce 2003 dle údajů IISI představovala 965 mil. tun. Za 15 let se výroba plastů celosvětově zdvojnásobila, ocel k tomu potřebovala 35 let.

Naopak mezi obecné nevýhody plastů patří malá tuhost a pevnost v porovnání s jinými materiály. Zde se otevírá prostor pro vyztužování plastů tuhými částicemi a tím zlepšení jejich mechanických vlastností. Velmi dobrých výsledků se dosahuje při plnění skleněnými vlákny. Vznikají tím materiály, které jsou díky polymerní matici snadno tvarovatelné, ale zároveň vykazují zvýšenou tuhost a pevnost při porovnání s plasty neplněnými. Takto vzniklé materiály se nazývají kompozitními materiály.

Jedním z nejrozšířenějších způsobů zpracování plastů obecně je vstřikování. Tato technologie nám dovoluje poměrně rychle a efektivně vyrábět velké série kvalitních a rozměrově přesných výrobků. Sortiment vstřikovaných výrobků je velmi široký a takovéto výrobky jsou používány od automobilového přes elektrotechnický průmysl až po výrobky pro domácnost.

Součásti vyráběné vstřikováním a plněné krátkými vlákny vykazují kromě orientace molekul a krystalů (mikrostruktura) také orientaci vyztužujícího materiálu. (makrostruktura)

ra). Procesy vedoucí k vytváření makrostruktury jsou velmi komplikované a jsou ovlivňovány tvarem a typem rozvodných kanálů, dále typem a polohou vtokového ústí. Mimo to je vytváření makrostruktury ovlivněno reologickými a termodynamickými vlastnostmi při vstřikování.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Jako kompozity se označují materiály, které jsou složeny ze dvou nebo více složek, které se výrazně liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Spojením těchto složek vznikne zcela nový materiál s unikátními vlastnostmi, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou samostatně, ani prostou sumací. Je však třeba podotknout, že do takto položené definice se „schovají“ i materiály, které nemají výlučné vlastnosti kompozitů. Například použití plniv, za účelem zlevnění daného materiálu, nepřináší takové vlastnosti, aby bylo možné hovořit o kompozitních materiálech v pravém slova smyslu. Proto materiály, jejichž fyzikální vlastnosti nejsou podstatně ovlivněny použitím plniva, nesmí být považovány za kompozitní. Významnými typy kompozitů jsou plasty vyztužené různými druhy vláken. Podle délky vláken je lze rozdělit do dvou skupin. Syntetické materiály vyztužené krátkými vlákny tzv. krátkovláknové (poměr délka/průměr  $L/D < 100$ ) a syntetické materiály vyztužené dlouhými vlákny tzv. dlouhovláknové ( $L/D > 100$  tj. vlákna s délkou rovnou rozměrům celého dílce).

U moderních strojírenských výrobků jsou často požadovány takové kombinace vlastností, kterých nelze pomocí kovových materiálů vůbec dosáhnout. K těmto požadavkům přistupují nároky na zpracovatelské technologie, např. rychlost výroby, kombinace materiálů (plasty, kompozity a kovy, možnost výroby integrovaných modulů s kovovými základy apod.)

Plasty a kompozitní materiály splňují následující soubor vlastností:

- pevností a modulem pružnosti se přibližují kovovým materiálům
- odolnost proti únavě je lepší než u kovů
- mají vysokou rázovou a vrubovou houževnatost
- jsou odolné proti šíření trhlin
- schopnost tlumení vibrací
- recyklovatelnost
- korozní odolnost proti vysoce agresivním prostředím

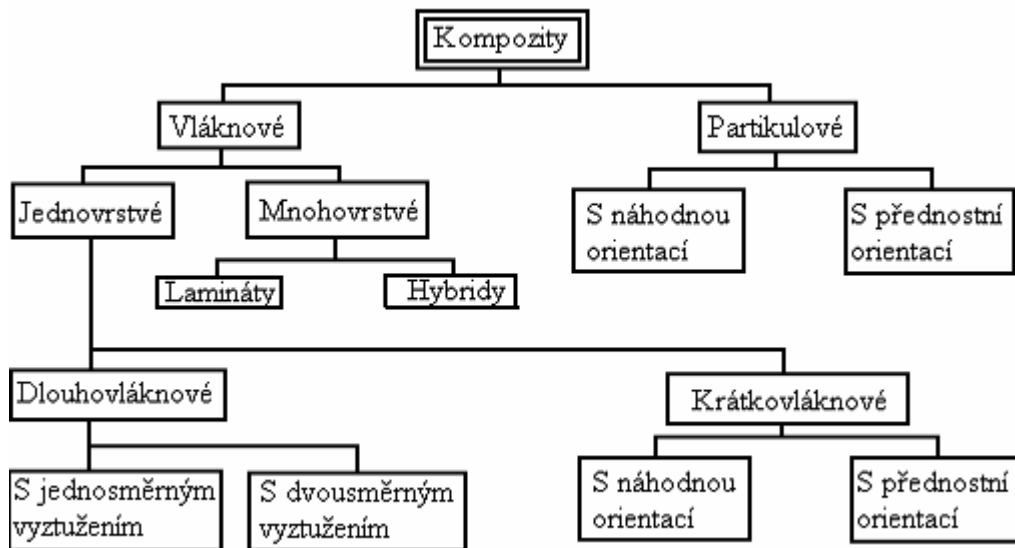
Krátkovláknové kompozity se používají především pro injektované výlisky nebo pro extrudované plastové výrobky. Dlouhovláknové kompozity se často používají u velkých konstrukcí jako jsou lodě, tlakové nádoby, křídla větrných turbín. Principem vlastního vláknového vyztužení je skutečnost, že vyztužující vlákna, mající o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s pojivem ( polymerní matricí ), se při vnějším namáhání deformují méně než polymer. Dochází tak ke vzniku smykových sil na rozhraní vlákno/polymer, které v případě adheze mezi oběma částmi umožňují přenos veškerého napětí z nepevné matrice do vláken. Ta jsou schopna nést veškerá napětí působící na kompozitní dílec, takže nepevné ale deformovatelné pojivo je prakticky bez napětí.

Použitím kompozitu místo tradičního materiálu, jako je například ocel, dochází k značnému snížení hmotnosti. To je dáno nízkou hmotností vlastního kompozitu, specifickými vlastnostmi jednotlivých složek a možností vytvořit kompozit přímo pro daný účel. Protože jde o kombinaci materiálů, mohou se kompozity navrhovat s ohledem na specifické vlastnosti, které přinášejí řadu výhod v porovnání s tradičními materiály, např. odolnost proti chemikáliím, elektrické a tepelně izolační vlastnosti atd.

Ve srovnání s ostatními materiály je u kompozitů jedním ze základních problémů materiálová standardizace. Vlastnosti kompozitů jsou totiž při daném složení silně závislé na způsobu uložení výztuže v matrici, což přímo souvisí s technologií výroby kompozitních dílů. Uživatelé potřebují získat alespoň hrubou představu o tom, jaké vlastnosti má určitý typ kompozitu. V zahraniční literatuře se takové údaje objevují, v Ústavu materiálového inženýrství bylo započato s tvorbou materiálových listů a základní databáze. K základnímu specifikačnímu označení vytvořenému na základě normy ISO 8604 "Prepregs-Symbols-Definitions" jsou přiřazeny průřezové vlastnosti získané buď z různých údajů v literatuře, nebo na základě vlastních výpočtů. Nezbytné je postupné korigování a doplňování těchto základních informací. Pro konkrétní výrobky je přirozeně nutné vlastnosti vypočítat. Modelování se tak stává jednou ze základních součástí kompozitního inženýrství.

## 1.1 Dělení kompozitních materiálů

Jednotlivé kompozity lze dělit dle geometrie vyztužujících složek. Toto dělení je výhodné, protože nám umožňuje zkoumat kompozity, které mají společný mechanismus pevnostního chování.



Obr. 1. Rozdělení kompozitních materiálů

Základní dělení kompozitů, a tím i vyztužných částic, rozlišuje kompozity na vláknové a partikulární. U vláknových mohou být částice různého průřezu ( kruhového, čtvercového... ), ale jsou přibližně rovnoosé a charakterizovány svoji délkou, která je mnohem větší, než ostatní rozměry částice.

### 1.1.1 Partikulové kompozity

Jak už bylo uvedeno, jde o kompozit, jehož plnění je klasifikováno jako částicové. Částice jsou definovány jako nevláknitý útvar, což znamená, že nemají žádný rozměr význačně větší než ostatní.

Částice sice nejsou příliš účinné při zlepšování lomové odolnosti, ale částice povahy kaučukovité zlepšují v křehkých maticích odolnost lomu vyvoláním a pak bržděním krezování. Jiné typy partikulárních částic, zejména keramické nebo anorganické, vyvolávají vyztužovací účinek v kovových maticích díky odlišnému způsobu zpevnování. Dále

tyto částice pomáhají omezovat rozvoj plastických deformací vlivem své tvrdosti vzhledem k matici a v neposlední řadě se také podílejí na přenosu namáhání, i když v mnohem menším měřítku než vlákna uložená ve směru zatížení.

Z uvedeného vyplývá, že tyto částice jsou účinné při zvětšování tuhosti kompozitních materiálů, ale v podstatě nezvyšují tahovou pevnost.

Tento typ plniva se velmi často užívá k zlepšení vlastností matricových materiálů. Například pro úpravu elektrické a tepelné vodivosti, zvýšení odolnosti vůči opotřebení a otěru, zlepšení chování materiálů za zvýšených teplot a v mnoha případech pouze ke snížení nákladů.

### 1.1.2 Vláknové kompozity

Často se setkáváme s faktem, že naměřené hodnoty pevnosti většiny materiálů jsou mnohem menší, než teoreticky zjištěné hodnoty. Tento rozpor mezi předpokladem a skutečností je přičítán vadám a nedokonalostem materiálů. Proto je určitá část pokusů o zvyšování pevností materiálů zaměřen na tyto nedostatky a jejich vyloučení. Největší vliv na pevnost mají zejména trhliny kolmé ke směru namáhání. Proto vlákna vykazují daleko vyšších hodnot pevností ve směru délky než kompaktní materiál, a to díky tomu, že nehomogenity a nečistoty často obsažené v kompaktním materiálu jsou u vláken vyloučeny díky malým průřezovým rozměrům vláken. U polymerních materiálů je také příčinou vyšší pevnosti orientace molekul.



Obr. 2. Skleněná vlákna

Mezi nejpoužívanější vlákna patří skelná, protože jsou poměrně levná. Velmi pozoruhodné vlastnosti mají vlákna bórová a aramidová ( polymerová vlákna známá pod názvem kevlar ).

Z důvodů malých průřezových rozměrů není možné používat vlákna samostatně. Proto se vlákna vkládají do polymerní matrice a vytváří tak vláknové kompozity. Matrice spojuje vlákna dohromady, chrání je proti narušení a slouží k přenosu namáhání do vláken. Funkce přenosu namáhání do vláken je důležitá zejména u kompozitů s krátkými vlákny.

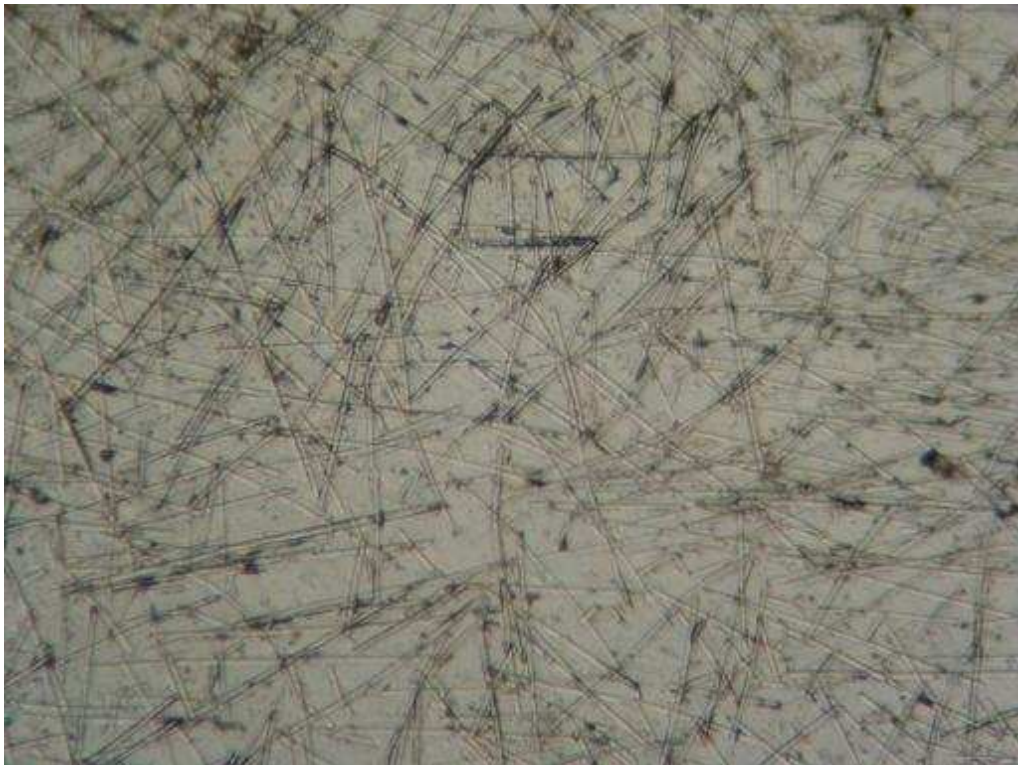
Na základě studia vlastností lze rozdělit vláknové kompozity na jednovrstvé a mnohovrstvé. Za jednovrstvé kompozity lze považovat i materiály vytvořené z několika stejně orientovaných vrstev s týmiž vlastnostmi. Takový kompozit se potom chová, jako by byl utvořen z jedné vrstvy. U kompozitů vyráběných litím do forem nedochází k vytváření zřetelných vrstev ( ačkoliv planární orientace nemusí být ve všech vrstvách stejná ). Kompozity používané v konstrukčních aplikacích bývají často vícevrstvé. Skládají se z několika tenkých vrstev ( lamin ). Tyto vrstvy, stejné nebo odlišné, se spojují dohromady do vícevrstevých kompozitů.

Vyztužovací vlákna v jednovrstvém kompozitu mohou být krátká nebo dlouhá vzhledem k jejich průřezu.



## 2 KRÁTKOVLÁKNOVÉ KOMPOZITY

Jedním z charakteristických rysů jednosměrných kompozitů je vyšší pevnost ve směru orientace vláken, ale nízká pevnost ve směru příčném. Užití takovýchto kompozitů je velmi vhodné tam, kde lze napjatost přesně určit. V takových případech lze lamináty zhotovit z jednotlivých vrstev přesně podle konkrétních potřeb. Jsou však aplikace, kde nelze napjatost kvalitativně posoudit, nebo aplikace, kde je známo, že napětí působí ve všech směrech stejně. Takové aplikace vyžadují použití kompozitů, které mají vlastnosti ve všech směrech alespoň přibližně stejné. Vícevrstvé kompozity mohou být sestaveny z jednotlivých vrstev tak, že se docílí stejných vlastností ve všech směrech, ale problémem zůstávají povrchové vrstvy. V povrchové vrstvě vzniká lom nejčastěji a právě u takto konstruovaných laminátů zůstává povrchová vrstva velmi slabá v příčném směru.



*Obr. 3. Mikroskopický pohled na krátká vlákna*

Řešením takovýchto aplikací mohou být právě krátkovláknové kompozity s náhodnou orientací vláken. Takový kompozit má každou svou vrstvu izotropní. Tvářecí

směsi obsahující krátká vlákna mohou být snadno zpracována vstříkáním nebo vlačováním do formy.

## 2.1 Termoplastická matrice

Úlohou matrice je vzájemně spojovat vyztužující fázi a přenášet do ní zatížení. Matrice také slouží k ochraně vláken před poškozením a vlivy okolí. Matrice by proto měla mít dobré mechanické vlastnosti, adhezi k výztuži, dobrou odolnost proti okolnímu prostředí a měla by být houževnatá. Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních poruchách výztuže a její poměrné prodloužení při přetržení by mělo být větší než mezní prodloužení výztuže. Tento požadavek splňují pouze polymerní a kovové matrice. Polymerní matrice jsou nejdostupnější a rozdělují se na termoplastické a reaktoplastické .

Termoplastická matrice může být opakovaně přetvářena, protože její strukturu tvoří dlouhé lineární řetězce spojené mezimolekulárními silami a fyzikálním zaplacením řetězců. Reaktoplastickou maticí tvoří většinou viskózní tekutiny s relativně malými molekulami, které jsou vytvrzeny chemickou reakcí po dodání katalyzátoru a iniciátoru. Protože dochází ke vzniku chemických vazeb a třídimenzionální polymerní sítě, neumožňují reaktoplasty další přetváření.

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 polymerních materiálů 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  $T_m$ . Ačkoliv jsou reaktoplasty při výrobě stále dominantní, použití termoplastické matrice stále vzrůstá.

Polotovary s termoplastickou maticí umožňují velmi produktivní výrobu dílů, protože doba výrobního cyklu je kratší než při použití reaktoplastických matic, které je nutno tvrdit. Termoplastickou maticí může tvořit například PP, PE, PS, PA, POM, PC, ABS, PET a další termoplasty. Z materiálových, ekonomických i zpracovatelských aspektů jsou pro takové ztužování jako maticové polymerní materiály nejvhodnější PE, PP a kopolymer EVA. Mezi nejlevnější matrice patří PP. Dražší, pevnější, chemicky a tepelně odolné termoplasty lze použít pro značně mechanicky a tepelně namáhané díly.

## 2.2 Skleněná vlákna

Většina skelných vláken je vyráběna rychlým tažením z taveniny. Rychlost tažení dosahuje až  $400 \text{ m min}^{-1}$ . Tato struktura je následně velmi rychle fixována, asi za  $10^{-5}$  s. Průměr vláken se obvykle pohybuje v rozmezí 3,5 až 20  $\mu\text{m}$ . Důležitou úlohu při zvlákňování skla hraje viskozita (50 – 100 Pa s) a také rychlost změny viskozity s teplotou. Obojí je závislé na chemickém složení skla. Dalšími důležitými parametry jsou například teplota počátku tuhnutí taveniny (teplota při níž tavenina a tuhá fáze mohou koexistovat v rovnováze). Je tedy jasné, že struktura skla nemůže být definována pouze chemicky. Dalším důležitým faktorem je tedy teplotní historie taveniny. Najednou bývá taženo 51 až 408 vláken zvaných fibril. Tato vlákna vytváří pramence, která jsou základními jednotkami pro výroby z vláken.

Vzájemné působení vláken je silně abrazivní, což vede k degradaci původní pevnosti vláken. Proto je každé vlákno před vytvářením pramence lubrikováno. Lubrikace může být dočasná nebo trvalá. V prvním případě se odstraní po vytvoření požadované struktury a nahradí se povrchovou úpravou zajišťující dobré spojení mezi matricí a vlákny. V případě trvalé lubrikace plní tato vrstva jak ochrannou funkci tak funkci vazebního činidla mezi matricí a vlákny.

Jednotlivé pramence vytváří provazce (roving). Počet pramenců se pohybuje od 12 do 120. Takovýto provazec je definován buď počtem pramenců, nebo konců, případně tzv. výtěžkem. Provazce se využívají pro přímé vyztužování nebo pro přípravu sekaného vlákna.

## 2.3 Rozhraní mezi matricí a vlákny

Rozhraní mezi jednotlivými složkami hraje v termoplastech plněných krátkými vlákny významnou úlohu. Za rozhraní nelze považovat pouze plochu vzájemného styku složek, ale také tenkou vrstvu v okolí kontaktní plochy patřící k rozhraní. Tato vrstva v okolí stykové plochy bývá také deformována vlivem nestejných materiálových vlastností, zejména tuhosti. Tato vrstva má na rozhraní také jinou morfologii než vnitřní oblasti matrice.

K tomu, aby byla výztuž dokonale obklopena matricí je potřeba, aby došlo k dobrému smáčení při přípravě plněného termoplastu. Jinak řečeno, musí mít při vysoké energii volného povrchu výztuže kapalná matrice energii co nejmenší.

Tzv. kontaktní úhel  $\theta$  (úhel smáčení) je dán vztahem:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{tp} - \gamma_{tk}}{\gamma_{kp}}$$

kde  $\gamma_{tp}$  je povrchová energie napětí na rozhraní tuhé a plynné fáze,

$\gamma_{tk}$  je povrchová energie rozhraní tuhé a kapalné fáze,

$\gamma_{kp}$  je povrchová energie rozhraní kapaliny a plynu.

Jestliže je kontaktní úhel velmi malý, tj. hodnota  $\cos \theta$  se blíží 1, kapalná fáze dobře smáčí podklad.

K matricím s nejmenší povrchovou energií patří matrice, které jsou v tuhém stavu málo pevné. Jedná se o matrice s tzv. malou kohezní energií. K takovým matricím patří všechny polymerní matrice, a proto budou dobře smáčet materiály s vysokou hodnotou povrchové energie.

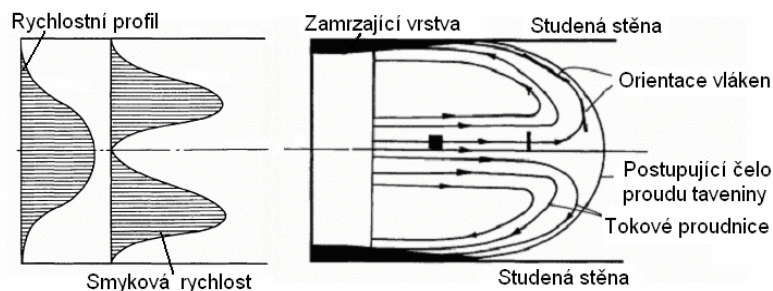
Aby došlo ke zvýšení vzájemné soudržnosti jednotlivých složek je potřeba povrch výtzuže upravovat. Tato úprava se nazývá apretace a spočívá v nanesení vhodné chemické látky na povrch vláken. Nejčastějšími apretacemi jsou různé typy silanů a organické sloučeniny titanu.

## 2.4 Orientace vláken vlivem toku taveniny

V průběhu vstřikovacího procesu může docházet k orientaci vláken různým způsobem. V samotném výrobku je často pozorována charakteristická vrstevnatá struktura s vlákny orientovanými ve zcela jiných směrech v závislosti polohy vrstvy po tloušťce výrobku. Pro kompozity plněné krátkými skleněnými vlákny bylo prokázáno, že tok taveniny, respektive geometrie toku taveniny, je hlavním činitelem ovlivňujícím orientaci vláken. Viskozita a rychlost toku mohou ovlivnit proporce orientovaných oblastí. Nevhodná orientace může vést až k selhání výrobku. Zvláště u tokové geometrie existuje mnoho proměnných, které mohou ovlivnit orientaci vláken. Mezi hlavní činitele patří teplota taveniny, teplota formy a rychlost vstřikování.

Při zaplňování dutiny formy v průběhu vstřikování dochází k tzv. fontánovému toku. Při něm nedochází ke skluzu taveniny po stěnách formy, ale k valení taveniny. Právě tento laminární fontánový tok má veliký vliv na orientaci vláken a tím i na vlastnosti výrobku.

Orientace během toku má zejména vliv na polymery plněné krátkými vlákny se štíhlostí  $L/D$  větší než 10. Při fontánovém toku se na povrchu dutiny formy vytváří zamrzající vrstva a proud taveniny se pohybuje právě uvnitř těchto vrstev. Z obrázku je patrné, že v okolí centrální osy má tavenina při fontánovém toku nejvyšší rychlost, ale působení smykových sil je zanedbatelné. Právě působením rychlosti toku taveniny a smykovým polem je určována budoucí orientace vláken ve výrobku. Z tohoto důvodu mají vlákna poblíž centrální osy orientaci spíše kolmou na směr toku, která se mění díky formování se postupujícího čela taveniny. Tím se dostávají vlákna až do orientace směru toku taveniny.

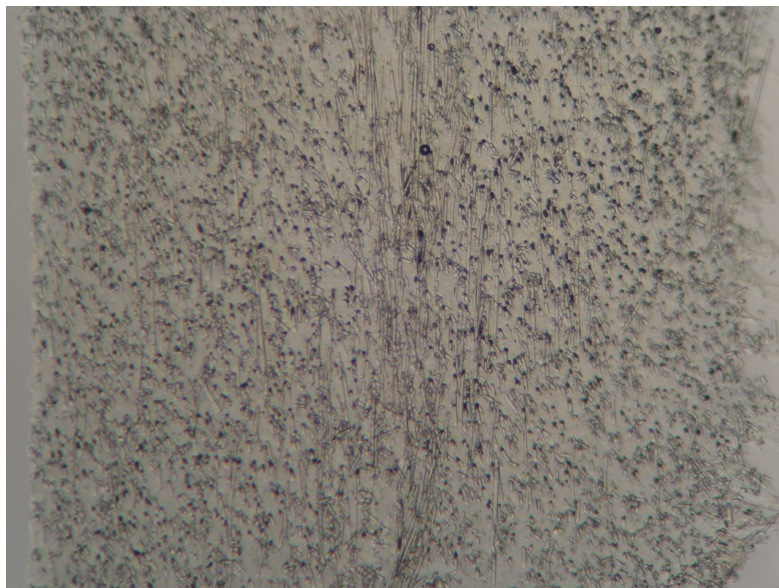


Obr. 4. Schématické znázornění fontánového toku

Z uvedeného vyplývá, že vstřikované díly z polymerů plněných krátkými vlákny mají jistou vrstevnatou strukturu. Různá orientace vláken po tloušťce výstřiku závisí zejména na geometrii toku uvnitř formy, dále na druhu použitého materiálu a samozřejmě na technologických parametrech. Přesto však lze vysledovat všeobecná pravidla, kterými se orientace vláken řídí.

Většina vstřikovaných dílců z polymerů plněných krátkými vlákny vykazuje třívrstvou strukturu. Tato struktura se skládá z povrchové vrstvy, vrstvy v okolí centrální osy a mezivrstvy, která spojuje povrchovou a střední část. Byly nalezeny tři činitelé způsobující orientaci vláken ve směru toku taveniny. Těmito činiteli jsou elongační tok, sbíhavý tok a smykový tok. Naopak orientaci kolmou na směr toku vláken způsobuje rozbíhavý tok.

V povrchové vrstvě mají vlákna tendenci orientovat se vlivem elongačního toku ve směru toku taveniny. Také v mezivrstvě je orientace vláken ve směru toku, přičemž nejvyšší stupeň orientace se předpokládá v určité hloubce pod povrchem. Tato vrstva maximální orientace se nachází v místě, kde se nacházelo rozhraní mezi zamrzlou povrchovou vrstvou a tekoucí vrstvou v průběhu vstřikování. Toto ovšem platí pro neizotermální tok. Jedná-li se o tok rozbíhavý, je převažující orientace v mezivrstvě příčná na směr toku.



*Obr. 5. Orientace vláken po tloušťce desky*

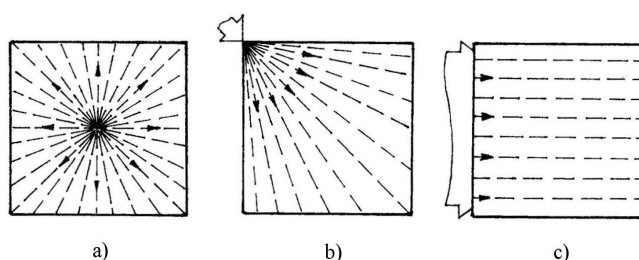
Protože skutečně vyráběné díly mají obvykle tenké stěny, lze říci, že většinu oblastí zabírá rozbíhavý a sbíhavý tok. Předpokládá se, že orientace vláken v prostřední vrstvě je většinou stejná jako v jádře. Při zanedbání povrchové vrstvy, která má malou tloušťku, se dá očekávat, že vlastnosti materiálu závisí hlavně na orientaci vláken v jádře.

Jiné zdroje hovoří o tom, že orientace v jednotlivých vrstvách výstřiku je ovlivněna zejména gradientem teploty, viskozitou taveniny a geometrií dutiny vstřikovací formy. Proto zvýšení teploty taveniny a průřezu dutiny vede ke snížení orientace a tloušťky podpovrchové vrstvy. Vliv tohoto jevu však není tak významný jako jev předchozí.

Orientace vláken nemusí být jediným důvodem různých vlastností v různých místech výrobku. I v případě neplněných polymerů se setkáváme s proměnlivými vlastnostmi výrobku. Mezi příčiny rozdílných vlastností patří např. orientace makromolekulárních řetězců polymerního materiálu nebo v případě krystalických materiálů má vliv na vlastnosti materiálu koncentrace krystalů, případně jejich orientace.

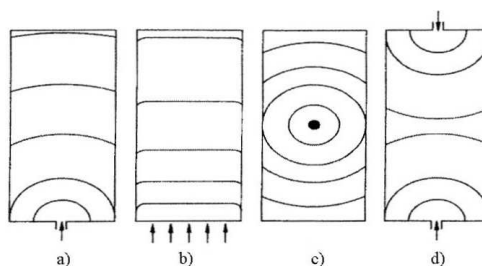
Právě přítomnost částic plniva má velký vliv na morfologii matrice. Tuhé částice svojí přítomností v matrici velmi významně ovlivňují orientaci jednotlivých řetězců u amorfních polymerů. U krystalických polymerů vytvářejí pevné částice na svém povrchu velké množství nukleačních míst, ze kterých mohou vyrůstat krystaly.

Předpokládanou orientaci krátkých vláken v polymerní matrici v závislosti na použitém vtokovém ústí lze zjednodušeně znázornit. Na obrázku jsou znázorněny předpokládané orientace vláken při použití a) centrálně umístěného vtoků, b) v rohu umístěného vtoků, c) filmového vtoků.



Obr. 6. Vliv polohy vtoků na směr vláken

Abychom mohli lépe odhadnout orientaci vláken v matrici je třeba znát mimo reologických vlastností taveniny také způsob, jakým tavenina zaplňuje formu. Na následujícím obrázku je znázorněn postup zaplňování dutiny formy pro několik základních případů umístění vtoků: a) bodový vtok umístěný z boku, b) filmový vtok, c) centrálně umístěný bodový vtok, d) dva protilehle umístěné bodové vtoky.

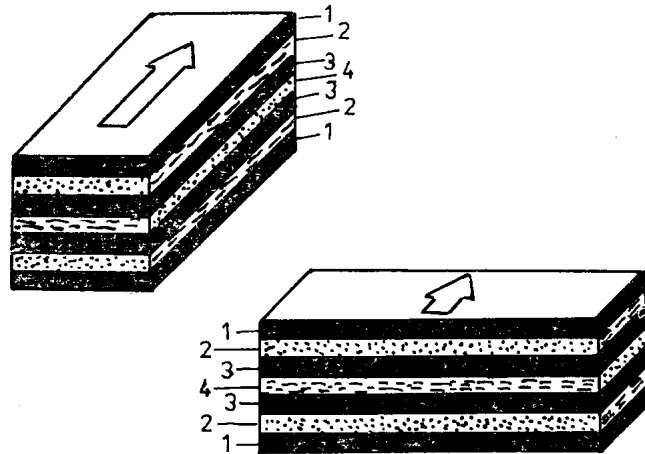


Obr. 7. Postup zaplňování dutiny formy

Z těchto důvodů je prakticky nemožné získat elastické konstanty pro monotropně plně usměrněnou krátkovláknovou strukturu pouze za pomoci experimentálních měření. Zde hrají svoji úlohu teoretické modely takovýchto struktur.

## 2.5 Charakteristika makrostruktury zvoleného prvku

U plochých výstřiků tvaru desky se, jak už bylo řečeno, vytváří uspořádání jednotlivých vrstev s různou orientací.

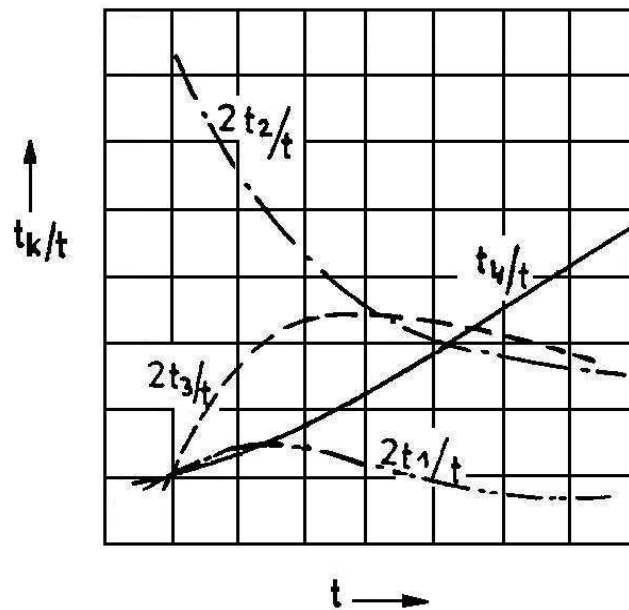


Obr. 8. Znáznornění předpokládané „vrstevnatosti“

Orientace se v jednotlivých vrstvách liší jak směrem, tak i stupněm orientace. Kolem centrální vrstvy s orientací vláken kolmou ke směru toku se na obou stranách střídají homogenní ortotropní i podélně orientované vrstvy.

Na dalším obrázku je znázorněn vliv celkové tloušťky stěny na podíl jednotlivých vrstev. Z grafu je patrné, že se zvyšující se tloušťkou stěny se zvyšuje podíl střední vrstvy s kolmou orientací vláken vzhledem ke směru toku taveniny. Naopak podíl tloušťek vrstev s převládající orientací vláken ve směru toku materiálu se zmenšuje. Tyto změny v geometrii mají samozřejmě velký vliv na změnu mechanických vlastností.





Obr. 9. Vliv podílu tloušťky stěny  $t$  na podíl tloušťek  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  a  $t_4$  jednotlivých vrstev u deskového výstřiku

## 2.6 Použitý materiál - polypropylen

Polypropylen patří mezi polyolefiny. Molekulová hmotnost se pohybuje v rozmezí 100 000 až 600 000 g/mol. Krátkodobě odolává vysokým teplotám do 140 °C. Má dobré elektroizolační vlastnosti, relativně vysokou odolnost proti opotřebení, vyšší tvrdost a pevnost v ohybu, ale nižší rázovou houževnatost.

Zpracovává se vstřikováním při teplotě 200 až 280 °C a vytlačováním na trubky, desky, fólie a profily při teplotě 200 až 270 °C. Desky a bloky lze také lisovat z granulí při teplotě 180 až 250 °C. Bod tání leží v intervalu 160 až 170 °C.

Použití polypropylenu je velmi široké. Je vhodný zejména tam, kde se žádá vysoká tuhost, mechanická odolnost a elektroizolační vlastnosti.

### 3 MECHANIKA KOMPOZITŮ

Plněné a lehčené plasty – částicové kompozity na polymerní bázi jsou sice látkami nehomogenními, ale charakteristický rozměr nehomogenit je dostatečně malý ve srovnání s charakteristickými rozměry výrobku. Díky tomu lze tyto materiály považovat za efektivně homogenní a jejich vlastnosti lze popisovat pomocí makroskopických ( středních ) materiálových charakteristik. Výsledné vlastnosti takového částicového kompozitu jsou závislé na fyzikálních vlastnostech jednotlivých složek a také na geometrii struktury.

V praxi je nutno při řešení problematiky chování takovýchto materiálů kombinovat experimenty s teoretickou predikcí. Právě pro krátkovláknové usměrněné struktury se často v tabulkách udává pouze modul pružnosti ve směru vláken vždy pro danou koncentraci a štíhlost vláken. Ovšem pro popis takovéto statisticky monotropní struktury je třeba pěti elastických konstant. Komplexní experimentální vyšetření těchto dalších konstant by bylo v praxi velmi těžko proveditelné.

Pro řešení problematiky plněných případně lehčených plastů byl vytvořen určitý obecný postup. Ten spočívá v sestavení modelu struktury a následném určení jeho vlastností. Takovýto model musí vystihovat všechny základní vlastnosti této struktury. Model je určitým zjednodušením, chceme – li zidealizováním dané reálné struktury. Je tedy jasné, že nemůže vystihnout všechny zvláštnosti reálné struktury.

#### 3.1 Mechanika krátkovláknových kompozitů

Krátkovláknové částicové kompozity se odlišují od kompozitů s jednoparametrickými částicemi právě vlivem geometrie plniva. Krátkovláknové plnivo oproti jednoparametrickému se vyznačuje značnou štíhlostí vláken. Čím je tato štíhlost vyšší, tím vyšší je vliv orientace vláken na makroskopické vlastnosti kompozitů. V závislosti na stupni orientace vláken v polymerní matici se mění jak efektivní elastické konstanty, tak ostatní fyzikální makroskopické vlastnosti struktury. Taková struktura představuje obecně makroskopické homogenní, ale anizotropní kontinuum. Míra anizotropie takové struktury závisí zejména na typu technologie a na technologických podmínkách při výrobě.

Pokud se vlákna orientují ideálně v jednom směru, jedná se o základní limitní strukturu. V přirozeném (materiálovém) souřadném systému L,T má tato struktura takovou matici poddajnosti:

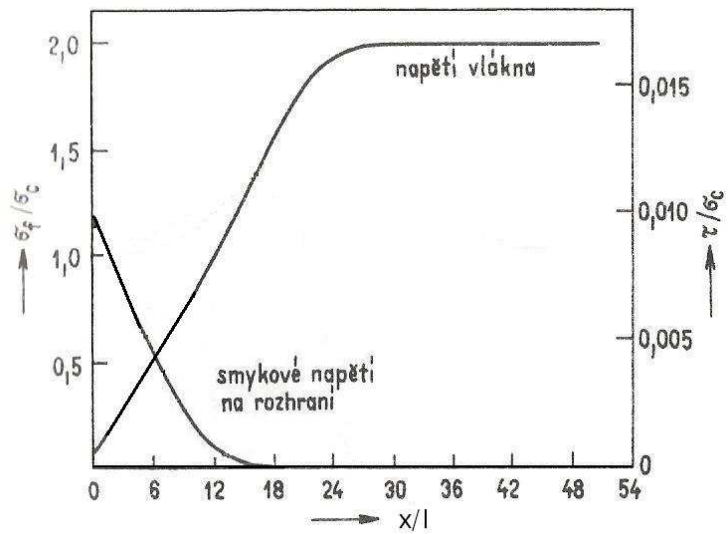
$$[C^*] = \begin{bmatrix} 1/E_L & -\nu_T/E_T & 0 \\ -\nu_L/E_L & 1/E_T & 0 \\ 0 & 0 & G_{LT} \end{bmatrix}$$

Z výsledků experimentů je patrné, že se zvyšující se štíhlostí vláken se modul ve směru orientace blíží hodnotě udávané pro kontinuální výztuž. Naopak se snižující se štíhlostí vláken se hodnota modulu blíží hodnotám udávaným pro jednoparametrické částice. Dále je z výsledků experimentů patrné, že hodnoty příčného modulu  $E_T$  prakticky nezávisí na štíhlosti vláken.

### 3.1.1 Teorie přenosu napětí

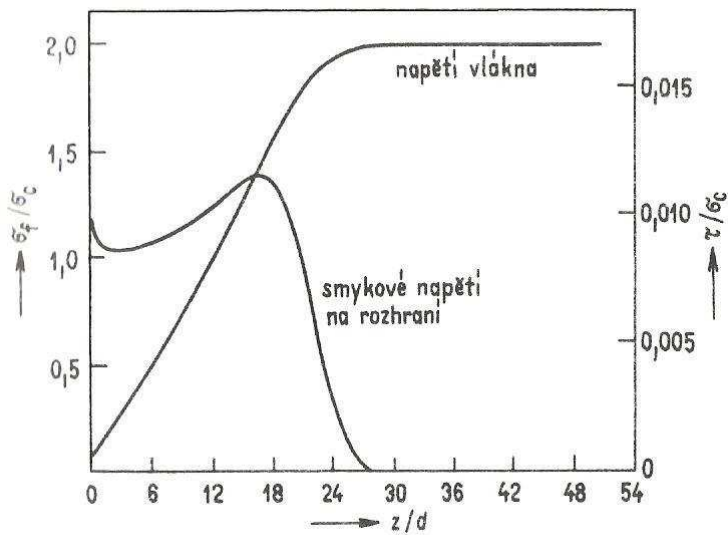
U kompozitních materiálů nepůsobí zatížení na vlákna přímo, ale je zaváděno do matrice a odtud přenášeno do vlákna. Přenos zatížení do vlákna se děje jednak prostřednictvím konců vláken, ale také jejich válcovým povrchem. V případě, že je délka vlákna větší než délka, přes kterou se přenos děje, můžeme koncové efekty zanedbat. U krátkovláknových kompozitů ovšem délka vlákna není dostatečně velká, a proto koncové jevy zanedbat nemůžeme.

Na obrázku je znázorněn charakter průběhu osového normálového napětí po délce vlákna současně s průběhem smykového napětí matrice na povrchu vlákna. Průběh na obrázku (a) odpovídá lineární – elastickému chování matrice.



Obr. 10. Lineárně elastické chování vlákna a matrice

Tento případ odpovídá nízkým úrovním napětí. V druhém případě, na obrázku (b) je znázorněn průběh za předpokladu pružně – plastického chování matrice.



Obr. 11. Lineárně elastické chování vlákna a pružně plastické chování matrice

Tento případ odpovídá stavu napětí při porušení. V tomto případě se napětí ve vláknech blíží mezi pevnosti vlákna.

Pro oba tyto případy platí pro libovolný element vlákna stejná rovnice rovnováhy sil v ose vlákna:

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

Odtud vyplývá:

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

Tato rovnice ukazuje, že u vlákna konstantního průměru  $d$  je přírůstek napětí vlákna přímo úměrný smykovému napětí na rozhraní vlákno matrice. Osové napětí se zanedbává, neboť dochází ke kluzu matrice přiléhající ke konci vlákna nebo dochází k separaci konce vlákna a matrice kvůli velkým koncentracím napětí. Pokud zanedbáme osové napětí na koncích vlákna je průběh  $\sigma_x$  po délce vlákna:

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

Podle průběhů napětí  $\sigma_x$  a  $\tau$  můžeme vlákno po délce rozdělit na tři části. Střední část, kde napětí  $\tau$  je nulové a napětí  $\sigma_x$  je konstantní se nazývá tzv. činnou délkou vlákna. V této části vlákna je tahová pevnost vlákna plně využita. Krajiní úseky, kde napětí  $\tau$  je nenulové, představují tzv. přenosovou délku.

Průběh obou napětí lze schematizovat pro úroveň napjatosti na mezi únosnosti vlákna a rozhraní matrice – vlákno. Předpokladem je ideálně tuho-plastické chování matrice na povrchu vlákna, tj.  $\tau = \text{konst.} = \tau_p$ . V přenosových částech vlákna je průběh osových napětí v takovém případě lineární, daný rovnicí:

$$\sigma_x(x) = \frac{4}{d} \cdot \tau_p \cdot x$$

Z meze pevnosti, již je dosaženo na konci vlákna pak pro přenosovou délku platí:

$$L_p \cong \frac{\sigma_{p1}}{4 \cdot \tau_p} d$$

Z uvedeného vyplývá, že lze definovat tzv. kritickou délku vlákna. Ta je definována jako nejmenší délka vlákna, pro kterou dosáhne osového napětí meze pevnosti vlákna. Kritická délka vlákna je tedy maximální hodnota přenosové délky. Tato hodnota je jedním

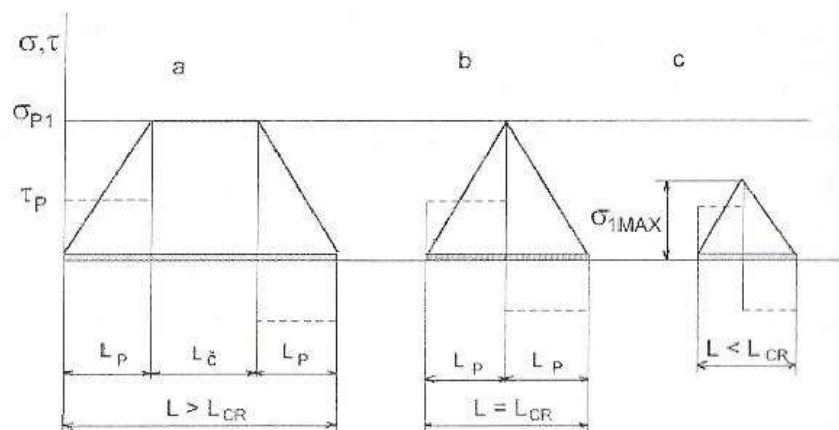
z důležitých parametrů systému a ovlivňuje mezní vlastnosti kompozitu. V některých případech se kritickou délkou rozumí nečinná délka. Na tuto vzdálenost totiž vlákno přebírá menší zatížení, než jaká je jeho maximální možná hodnota napětí vlákna. Tato skutečnost ovlivňuje jak pevnost, tak modul pružnosti kompozitu. Pokud je ovšem délka vláken mnohem větší než kritická, blíží se chování krátkovláknového kompozitu chování kompozitu vyztuženého spojitými vlákny. Kritickou délku lze vyjádřit:

$$L_{CR} = 2L_P = \frac{\sigma_{P1}}{2 \cdot \tau_P} d$$

Kritickou délku lze vyjádřit také pomocí kritické štíhlosti vlákna:

$$\left(\frac{L}{d}\right)_{CR} = \frac{\sigma_{P1}}{2 \cdot \tau_P}$$

Se zvyšující se štíhlostí vláken vzrůstá jejich činná délka a tím i vliv vláknité výztuže na efektivní tuhost struktury.



Obr. 12. Zjednodušeně znázorněné napětí na mezi únosnosti vlákna

Vlákna, jejichž štíhlost je vyšší než hodnota kritická, se při porušení kompozitu zpřetrhají. Vlákna podkritické délky se při porušení kompozitu neporuší, pouze dojde k jejich povytažení.

### 3.1.2 Modul pružnosti a pevnost krátkovláknových kompozitů

Hodnoty pevnosti a modulu se často uvádějí ve formě křivek pro určité hodnoty systémových proměnných. Mezi tyto proměnné patří například štíhlost vláken, objemový

podíl vláken a vlastnosti jednotlivých složek kompozitu. Z tohoto důvodu je při změně jakékoliv hodnoty potřeba získat novou sadu výsledků. Takové výsledky mají ovšem velmi omezené použití pro konstrukční účely. Tyto konstrukční účely vyžadují jednoduché a snadno vypočitatelné postupy pro zhodnocení vlastností daného kompozitu a to i za cenu toho, že jsou takové hodnoty pouze přibližné.

V případě usměrněných krátkovláknových kompozitů je možno použít pro určení podélného i příčného modulu Halpin-Tsaiovy rovnice:

$$\frac{E_L}{E_m} = \frac{1 + \frac{2l}{d} \cdot \eta_L \cdot V_f}{1 - \eta_L \cdot V_f} \quad \frac{E_T}{E_m} = \frac{1 + 2 \cdot \eta_T \cdot V_f}{1 - \eta_T \cdot V_f}$$

Kde:

$$\eta_L = \frac{(E_f / E_m) - 1}{(E_f / E_m) + 2(l / d)} \quad \text{a} \quad \eta_T = \frac{(E_f / E_m) - 1}{(E_f / E_m) + 2}$$

Halpin-Tsaiovy rovnice poukazují na to, že příčný modul usměrněného krátkovláknového kompozitu není závislý na štíhlosti vláken a jeho hodnota je stejná jako u dlouhovláknových kompozitů.

Neusměrněné krátkovláknové kompozity, jak již bylo zmíněno, jsou vyráběny proto, abychom získali v podstatě izotropní kompozity. Problém s určením vlastností takového kompozitu s náhodnou orientací vláken je podstatně složitější. Literatura uvádí empirický vzorec k určení modulu kompozitů obsahujících náhodně orientovaná vlákna v rovině:

$$E_N = \frac{3}{8} E_L + \frac{5}{8} E_T$$

kde  $E_L$  a  $E_T$  jsou moduly v podélném a příčném směru pro usměrněný kompozit se stejnou štíhlostí vláken a stejným objemovým podílem vláken. Moduly  $E_L$  a  $E_T$  je možné zjistit jak výpočtem, tak experimentálně.

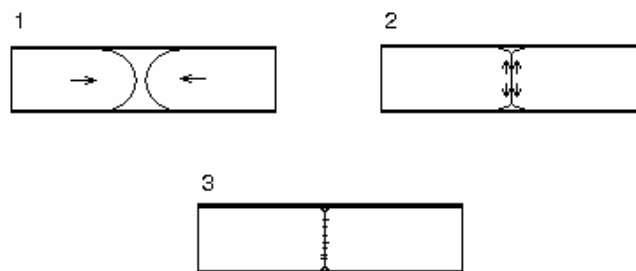
### 3.2 Technologické aspekty ovlivňující mechanické vlastnosti

Technologické aspekty ovlivňují pevnost a tažnost materiálů. Také orientace struktury vede ke zvyšování pevnosti ve směru orientace, ale také ke snížení pevnosti ve směru příčném. Se zvyšujícím se stupněm orientace vláken se logicky zvyšuje i rozdíl v pevnosti

podél vláken a ve směru kolmém na vlákna. Zatímco pevnost ve směru orientace vykazuje obecně značný vzrůst, ve směru příčném zůstává pevnost na úrovni neplněných polymerů nebo dokonce může dojít k určitému poklesu pevnosti.

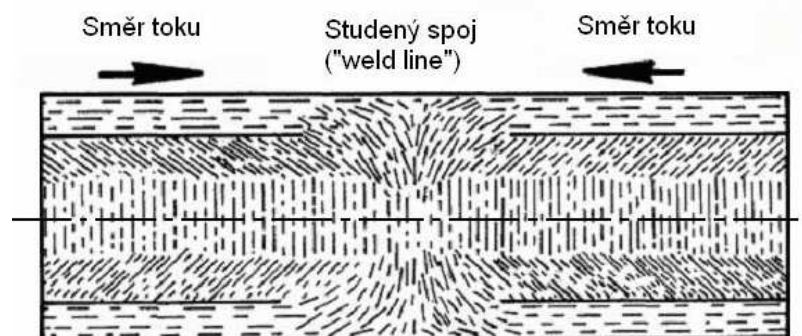
### 3.2.1 Studený spoj

Důležitou součástí návrhu vstřikovaných výrobků je omezení tzv. studených spojů. Ty vznikají zejména při vstřikování složitějších výrobků tam, kde se stýkají dvě čela taveniny, například při obtékání překážky ve formě. Studené spoje jsou místem potenciálního porušení výrobku a značně nám snižují pevnost takového výrobku. Vyvarovat se studených spojů není vždy možné. Tavenina má téci vysokou rychlostí o vysoké teplotě a tlaku s nízkou viskozitou tak, aby byl spoj co možná nejdokonalejší. Další možností je umístění studeného spoje tam, kde jeho vliv na pevnost bude co nejmenší.



Obr. 13. Princip vzniku studeného spoje

Jak už bylo řečeno, studené spoje vznikají tam, kde se stýkají dvě čela taveniny. Jedním z důvodů vzniku studeného spoje je částečné ochlazení povrchu obou čel taveniny. To způsobuje méně dokonalé spojení. Při srážce obou čel dochází k uzavírání vzduchu v dutině formy a tím se na povrchu výrobku vytvoří mikroskopické vruby tvaru v.



Obr. 14. Řez studeným spojem



V místě těchto vrubů poté při namáhání dochází ke koncentraci napětí a tím ke snížení hodnoty základní pevnosti v místě studeného spoje.

### 3.2.2 Poškození vláken v průběhu zpracování

Mechanické vlastnosti vstříkovaných polymerů plněných krátkými vlákny závisí na délce vláken. Při plastikaci a toku taveniny dochází ke zkracování vláken. Toto zkracování vláken je způsobeno nejen plastikací, ale také geometrií dílce a závisí na technologických parametrech procesu.

Za poškození zodpovídá jedna nebo více z následujících tří interakcí:

- interakce vlákno – vlákno (dochází k překrývání a skluzu vláken, což vede k napěťovým koncentracím, které způsobují lámání vláken)
- interakce vlákno – vstříkovací stroj (zde dochází k poškozování vláken vlivem jejich obroušování ve vstříkovací trysce, vtoku, v dutině vstříkovací formy a při plastikaci)
- interakce vlákno – tavenina (ke zlomení vláken dochází vlivem sdílení viskózních sil)

### 3.2.3 Anizotropie vlastností výstřiku

U polymerů plněných krátkými vlákny je anizotropie mechanických vlastností daleko výraznější, než u neplněných výstřiků, u nichž je anizotropie dána pouze orientací molekul. Anizotropie v případě krátkovláknové výztuže je samozřejmě dána orientací vláken a její význam roste s rostoucí štihlostí vláken. S rostoucím stupněm orientace vláken se mění nejen mechanické, ale i fyzikální vlastnosti dané krátkovláknové struktury.

Vlastnosti výstřiků plněných polymerních materiálů jsou ve směru toku taveniny v rozhodující míře ovlivněny plněním a ve směru kolmém maticí, protože většina vláken (70 %) je orientována ve směru toku. Na anizotropii vlastností je nutno brát zřetel při navrhování a dimenzování výrobků.

### 3.2.4 Ztuhlá vrstva a orientace

Při toku taveniny uvnitř dutiny formy se vlivem ochlazování při kontaktu taveniny s chladnější stěnou vytváří na stěně ztuhlá vrstva. Orientace vláken i makromolekulárních řetězců v této vrstvě je převážně ve směru toku taveniny. Tloušťka ztuhlé vrstvy postupně roste v průběhu fáze plnění. Ze sledování tloušťky této vrstvy podél dráhy toku lze vysle-

dovat, že za vtokem dochází ke skokovému růstu tloušťky ztuhlé vrstvy. Dále už se přírůstek tloušťky snižuje.

Stupeň orientace, což je uspořádání částic plniva (popř. řetězců makromolekul) způsobené tokem, je vyšší v této ztuhlé vrstvě než v jakémkoliv jiném bodě průřezu. Mechanické vlastnosti výstřiku jsou velmi silně závislé na stupni a směru orientace. Ve směru orientace jsou mechanické vlastnosti vyšší než ve směru kolmém.

## 4 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování polymerů je diskontinuální pružná výrobní metoda pro výrobu tenkostěnných plastových dílů. Tato metoda umožňuje v automatických cyklech výrobu komplexní geometrie dílu při nízké energetické spotřebě a krátkém časovém cyklu. Vstřikování polymerů umožňuje nejenom výrobu jednotlivých dílů, ale také sdružování několika dílů do jednoho celku. Tento postup nám umožňuje minimalizovat vady vznikající při montáži a minimalizovat náklady na výrobu.

Vstřikování polymerů zahrnuje celou řadu technologických variant, které umožňují výrobu plastových dílů vstřikovaných z několika typů polymerů o různých vlastnostech, kombinaci polymeru s kovovými díly nebo anorganickými materiály. Základní požadavky na metodu vstřikování polymerů jsou nulové dokončovací operace a automatický výrobní cyklus, případně montáž s maximálním využitím automatizace a robotizace. Aby mohly být splněny tyto základní požadavky, je nutno klást důraz na moderní nástroje umožňující komplexní analýzu jak plastového dílu samotného, tak také analýzu výrobního procesu.

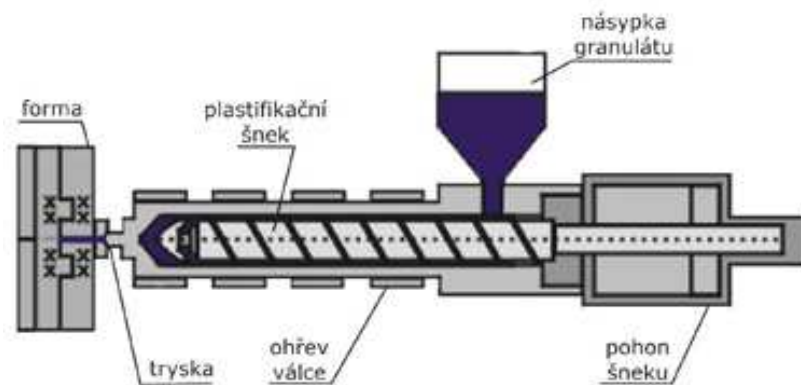
Z technologického hlediska má pro plastové díly ve strojírenství největší význam vstřikování. Vzhledem k požadavkům aplikační sféry vývoj této technologie doznává značného pokroku. Jedná se např. o vícekomponentní vstřikování (jeden výrobek z více druhů materiálu), plynem nebo vodou podporované vstřikování (duté díly), mikrovstřikování (miligramové výstřiky), vstřikování strukturně lehčených plastů, vstřikování hybridních dílů z kovů a plastů (PA, POM, PBT) aj. Základním trendem v této oblasti je přesné vstřikování s tolerancemi srovnatelnými s kovovými součástkami a vstřikování složitých modulů (sací modul, palivový modul apod.).

### 4.1 Popis vstřikovacího cyklu

Z násypky vstřikovacího stroje se materiál dávkuje do plastikační jednotky, v níž se přivádí do plastického stavu účinkem tepla. Po přisunutí plastikační jednotky k formě se tavenina pod tlakem doplní vtokovým systémem do dutiny formy. Doba, po kterou trvá tento proces, se nazývá doba plnění. Po zaplnění dutiny formy se působí na materiál dotlakem. Tato doba se nazývá doba doplňování. Dotlak má za účel částečně vyrovnat vliv smrštění a zabránit unikání materiálu z dutiny formy. V další fázi zůstává zaplněná forma

ještě určitou dobu uzavřena - probíhá chlazení výstřiku. Po zatuhnutí výrobku se forma v dělicí rovině otevře a výstřik lze vyjmout, obvykle pomocí automatických vyhazovačů. Během chlazení a vyjímání výrobku připravuje plastikační jednotka novou dávku roztaveného materiálu, tak aby vstřikovací stroj mohl po uzavření formy zahájit další pracovní cyklus.

Vstřikovací formy svou velikostí a počtem otisků ( počet dílů, které vypadávají při jednom zdvihu formy ) odpovídají požadavkům na budoucí výrobek a na požadovanou kapacitu výroby. Zvyšováním počtu otisků roste kapacita výroby a klesá cena výrobku, je však nákladnější výroba formy.



Obr. 15. Schematické znázornění vstřikovacího stroje

Tato technologie je nejvíce rozšířenou pro zpracování plastů, vyžaduje však velké série výrobků ( řádově desítky tisíc ). Jen při takových sériích je možné vyšší náklady na výrobu formy rozpočítat do jednotlivých výrobků. Vstřikováním je možné zpracovat většinu běžných plastů.

## 4.2 Vtokový systém

Úlohou vtokového systému formy je dopravit taveninu z trysky stroje do dutiny formy. Ztuhlý materiál ve vtokovém systému se nazývá vtokový zbytek. Minimalizací tohoto vtokového zbytku lze dosahovat značných úspor materiálu. V rámci minimalizace vtokového zbytku se vyvinulo několik vtokových systémů. Lze je rozdělit do dvou základních skupin:

- horký vtokový systém
- studený vtokový systém

Volba vtokového systému závisí na požadavcích kladených na konkrétní výrobek. Dále lze volbou vtokového systému ovlivnit například reziduální napětí, vytvoření nebo polohu studeného spoje.

#### 4.2.1 Horký vtokový systém

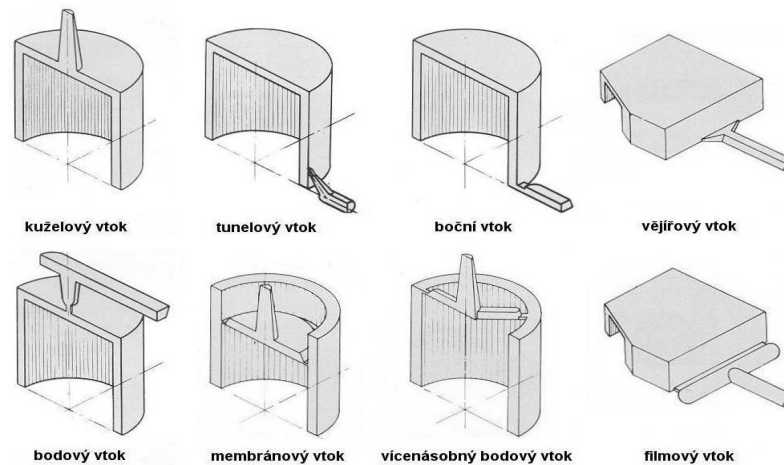
Horký vtokový systém se realizuje pomocí vyhřívaných vtokových soustav. Tento způsob vstřikování nám umožňuje zcela odstranit vtokový zbytek. Nejobvyklejším řešením je uložení rozváděcích kanálů do ohřivaného rozváděcího bloku nebo do desky. Vytápění rozváděcího bloku je možné realizovat jako ohřev externí ( teplo je přiváděno topnými elementy na povrchu rozváděcího bloku ) nebo jako interní ohřev ( rozváděcí blok je vyhříván zevnitř pomocí tzv. topných patrol ).

#### 4.2.2 Studený vtokový systém

Během průtoku studeným vtokovým systémem viskozita taveniny na vnějším povrchu prudce roste, nejnižší je uprostřed. Ztuhlá povrchová vrstva taveniny vytváří tepelnou izolaci vnitřnímu proudu taveniny. Za tohoto stavu se zaplní celá dutina. V okamžiku zaplnění vzroste prudce odpor a poklesne průtok. V dutině vstřikovací formy nastává postupné tuhnutí taveniny odvodem tepla do stěn. Další doplňování taveniny může nastat jen jejím elastickým stlačením. Ve vtokových ústích ještě v tomto okamžiku dochází k vývinu tepla vlivem tlaku a tím oddálení ztuhnutí taveniny. V případě, že již stroj není schopen překonat tlakové ztráty, dochází k poklesu rychlosti vstřiku a celkovému ochlazení polymeru ve vtokovém systému i v dutině vstřikovací formy

#### 4.2.3 Vtoková ústí

Volba typu vtokových ústí a také samozřejmě jejich poloha má zásadní vliv na orientaci vláken u krátkovláknových kompozitních materiálů. V naprosté většině případů je vtokové ústí vytvořeno zúžením rozváděcího kanálu. Jen ve výjimečných případech dochází k použití plného nezúženého vtoku a to zejména u velkých výrobců pro potlačení lunkrů a propadlin.

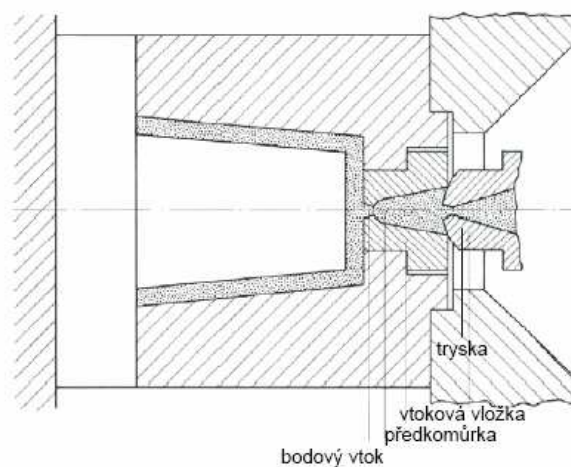


Obr. 16. Typy vtokových ústí

Naopak zúžením vtokového ústí docílíme zvýšení teploty taveniny před vstupem do dutiny formy a omezí se strhávání chladných vrstev taveniny do dutiny formy, což by vedlo k vytváření povrchových vad výrobku. Základní typy vtokových ústí jsou uvedeny na obrázku.

#### 4.2.3.1 Bodový vtok

Jde o nejznámější typ zúženého vtokového ústí. Má kruhový průřez a je možno jej umístit do dělicí roviny i mimo ni.

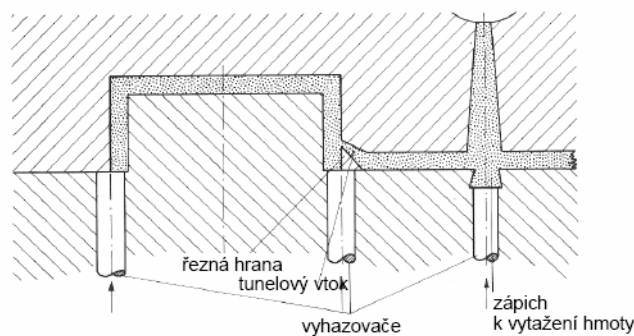


Obr. 17. Bodový vtok

Tento typ vtokového ústí může vycházet buď přímo z vtokového kanálu, z rozváděcích kanálů, nebo z předkomůrky. Je nutné, aby u bodového vtoku bylo zajištěno odtržení vtoku před otevřením formy.

#### 4.2.3.2 Tunelový vtok

Tento typ vtokového ústí je zvláštním případem bodového vtoku. Má tu výhodu, že vtokový zbytek může ležet v téže dělicí rovině jako výstřík.



Obr. 18. Tunelový vtok

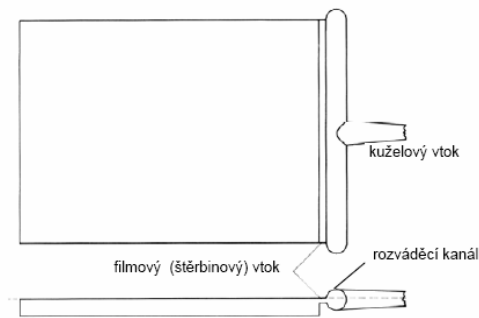
Umístění může být v pevné i pohyblivé části formy. Předpokladem dobré funkce tunelových vtoků je existence ostré hrany, která odděluje při odformování vtokový zbytek od výstříku.

#### 4.2.3.3 Boční vtok

Jde také o typ se zúženým vtokovým ústím. Jeho průřez může být kruhový, lichoběžníkový, nejčastější však je obdélníkový. Při odformování zůstává zpravidla výstřík od vtokového zbytku neoddělený. Jeho oddělení se řeší pomocí odřezávacího zařízení. To bývá součástí formy. Jedná se o jeden z nejčastěji používaný typ vtokového ústí.

#### 4.2.3.4 Filmový vtok

Filmový vtok je nejpoužívanější ze skupiny bočních vtokových ústí a slouží hlavně k plnění tenkých plošných kruhových a trubicových dutin nebo materiálů plněných skleněnými vlákny s vyššími požadavky na kvalitu.

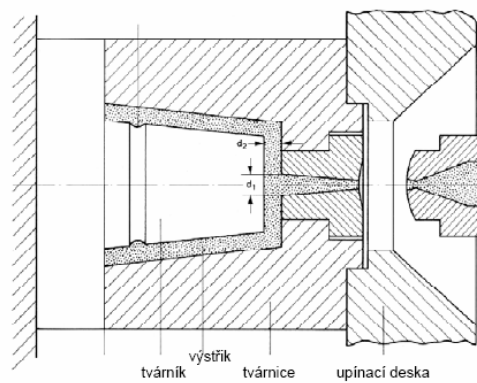


Obr. 19. Filmový vtok

Nevýhodou je nutnost oddělení vtokového zbytku mimo formu. Naopak oproti plnění dutiny více vtoky nezanechává filmový vtok ostré stopy po odtržení vtokových zbytků a je výhodný z hlediska dotlaku.

#### 4.2.3.5 Plný kuželový vtok

Tento typ vtokového ústí přivádí taveninu do tvarové dutiny vstřikovací formy bez zúženého vtoku.



Obr. 20. Plný kuželový vtok

Nejvhodnějším umístěním je umístění do středu výstřiku. Je vhodný pro jednonásobné formy se symetricky uloženou dutinou. Je vhodný především pro tlustostěnné výstřiky. Z hlediska působení dotlaku je velmi účinný, protože vtok tuhne ve vstřikovací formě poslední.



### 4.3 Řešení umístění vtokového ústí

Stejně jako typ použitého vtokového ústí má velký vliv na výsledné vlastnosti poloha vtokového ústí. Poloha ústí má rozhodující vliv na kvalitu a vzhled výrobku. Volba vtokového systému, vtokového ústí a jeho polohy má také zásadní vliv na složitost formy a tím i na její cenu. Pro snížení nedostatků na výrobku je třeba respektovat několik základních zásad umístění ústí vtoků.

- Tavenina má téci vždy z místa většího průřezu do místa menšího průřezu, proto se vtokové ústí umísťuje do nejtlustšího místa výstřiku.
- Aby taveniny zatékala do všech míst rovnoměrně, je nutné umístit vtok do geometrického středu dutiny.
- U výstřiku se žebry má tavenina proudit ve směru jejich orientace mimo místa velkého namáhání nebo opticky činných ploch výstřiku.
- U obdélníkových tvarů je potřeba umístit ústí tak, aby byl zajištěn tok ve směru delší strany.
- U výstřiku s otvory se umísťuje ústí do těchto otvorů nebo v jejich blízkosti.

Dále je potřeba dbát na umístění studených spojů na místa, která nejsou na pohledové straně a nejsou mechanicky namáhána. Dále je nutné volit umístění vtoku tak, aby stopa vzniklá po odstranění vtoku nesnižovala estetickou kvalitu výrobku.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 ÚVOD PRAKTICKÉ ČÁSTI

V experimentální části této diplomové práce se budu zabývat zjišťováním mechanických vlastností vstřikovaných destiček z polypropylenu plněného krátkými vlákny. U mechanických vlastností budu zjišťovat závislost na typu a umístění vtokového ústí. V této práci je kombinována teoretická predikce chování vzniklé struktury s prakticky provedenými měřeními.

První a zároveň nejjednodušší způsob predikce chování krátkovláknové vstřikované struktury spočívá v sestavení strukturních modelů vstřikovaných vzorků. Ze známých, již dříve modelovaných plně usměrněných struktur, byly sestaveny modely pro vrstevnatou strukturu, která vzniká při vstřikování tenkostěnných plněných výrobků. Pomocí takto sestavených modelů byl vypočítán efektivní modul ve směrech L a T.

Výše uvedený způsob predikce chování vstřikovaných plněných výrobků je založen na značném zjednodušení a zidealizování struktury. Pomůže nám ovšem velmi rychle si utvořit představu o vlastnostech takové struktury, i když je nutné brát v potaz, že jde pouze o jakési hraniční hodnoty, v jejichž rozmezí by se měly pohybovat hodnoty skutečné. Proto je další metodou použitou k predikci chování vstřikovaných plněných struktur modelování v konečně prvkovém programu *COSMOS/M*<sup>®</sup>. Model sestavený v tomto programu je samozřejmě mnohem sofistikovanější a hodnoty z takto vzešlého modelu by se měly více blížit skutečnosti.

Třetím způsobem zjišťování mechanických vlastností je experimentální. Experimentální v tomto případě znamená, že jde o hodnoty zjištěné na trhacím stroji. Výsledky zjištěné experimentálně jsou porovnány s hodnotami obou předchozích metod.

Další kapitola praktické části této diplomové práce se zabývá pozorováním makrostruktury. Středem zájmu je pozorování změny orientace vláken po tloušťce vzorku, jež bylo prováděno na optickém mikroskopu.

## 6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

### 6.1 Materiál

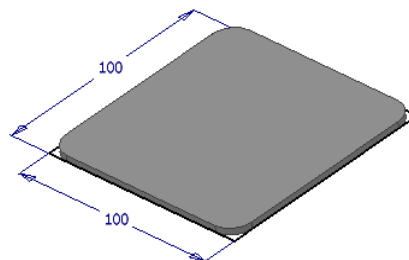
Pro studium mechanických vlastností byly zvoleny dva základní typy polymerních materiálů. Neplněný PP typ *Dow PP C767-07* a PP s obsahem 30 % GF typ *Scolefin 53G10-07*. Granulát použitých polymerních materiálů je znázorněn na obr. 56.



Obr. 21. Granulát polymerních materiálů *Dow PP C767-07* a *Scolefin 53G1*

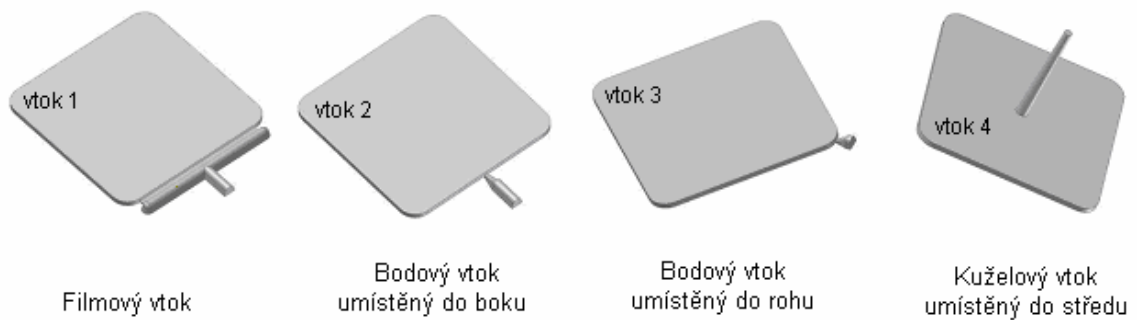
### 6.2 Zkušební vzorky

Jako zkušební těleso byla zvolena destička o rozměrech 100 x 100 mm o tloušťce 3 mm. Destičky byly vyrobeny pro různé typy a různá umístění vtoků.



Obr. 22. Zkušební tělísko

Tato destička byla použita pro zkoušku ohybu do kulové plochy popsané níže. Pro tříbodovou ohybovou i tahovou zkoušku byly z této destičky řezány vzorky o rozměrech 80 x 10 x 3 mm. Tyto vzorky vyřezala firma *TT Klávesnice Jihlava* ( [www.ttklavesnice.cz](http://www.ttklavesnice.cz) ) na laserovém řezacím plotteru *EuroLaser M-800* o výkonu 100W. U každého použitého vtoku bylo nutné odebrat vzorky v jiných směrech tak, aby směr řezání odpovídal směru toku taveniny.

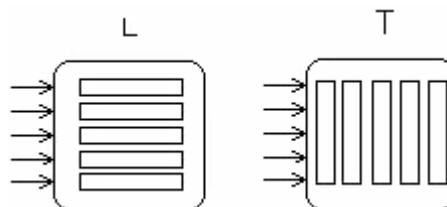


Obr. 23. Značení vzorků

Dále jsou popsány směry řezu u jednotlivých vtoků a také značení jednotlivých vzorků, které je dále používané při práci s výsledky.

### 6.2.1 Vzorek č. 1

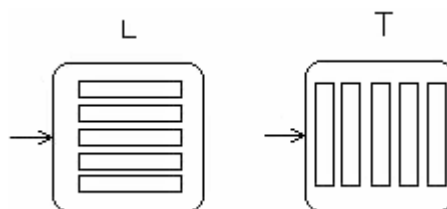
Vzorek č. 1 byl vyroben pomocí filmového vtokového ústí. Situace u takového vtoku je v podstatě velmi jednoduchá a vzorky jsou řezané z destičky rovnoběžně s obvodovými stěnami tak, jak naznačuje obrázek. Šipkou je označeno umístění vtoku.



Obr. 24. Směr řezání vzorků

### 6.2.2 Vzorek č. 2

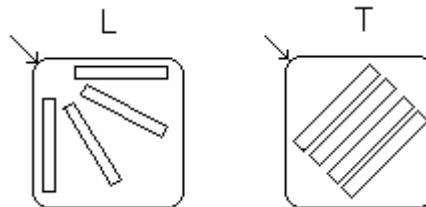
Tento vzorek byl vyroben pomocí bodového vtoku umístěného uprostřed jedné z bočních stěn. Odběr vzorků pro tahovou a ohybovou zkoušku je stejný jako u vzorku č. 1.



Obr. 25. Směr řezání vzorků

### 6.2.3 Vzorek č. 3

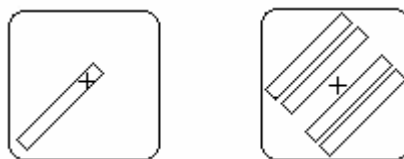
V tomto případě se jedná o bodový vtok umístěný do jednoho z rohů vzorku. Zde už je situace s odebráním vzorků pro tah a ohyb odlišná, jak je patrné z obrázku.



Obr. 26. Směr řezání vzorků

### 6.2.4 Vzorek č. 4

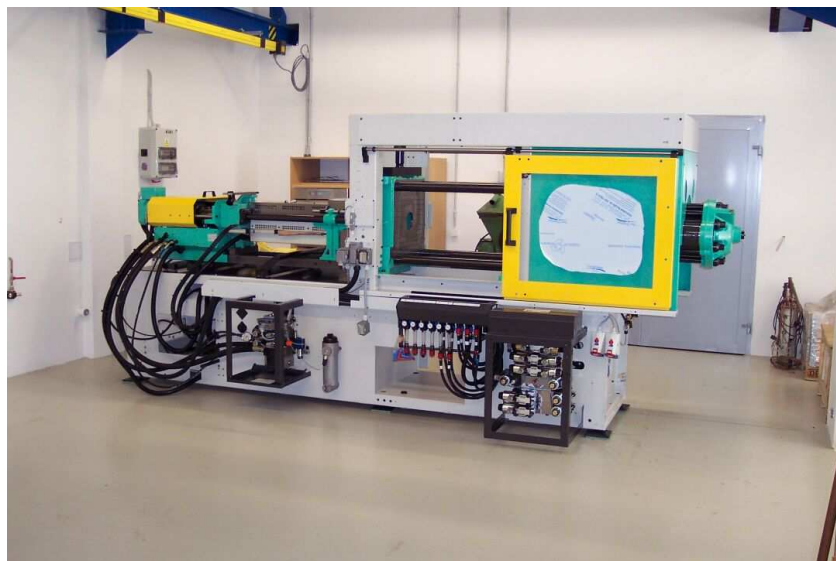
V tomto případě se jedná o centrální kuželový vtok, jde tedy o kuželový vtok umístěný do středu zkušební vzorku. Zde je umístění vtoku označeno značkou +.



Obr. 27. Směr řezání vzorků

## 6.3 Vstřikovací stroj

K výrobě zkušebních vzorků byl použit vstřikovací stroj *ARBURG 420 C Allrounder Advanced*.

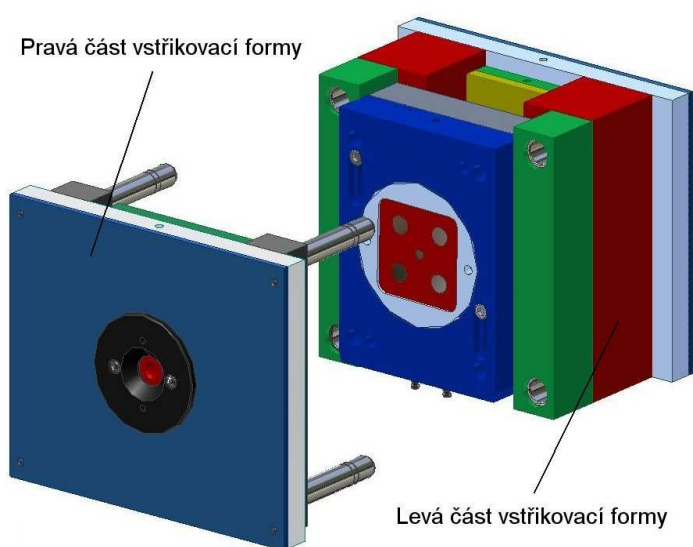


Obr. 28. Vstřikovací stroj ARBURG 420 C

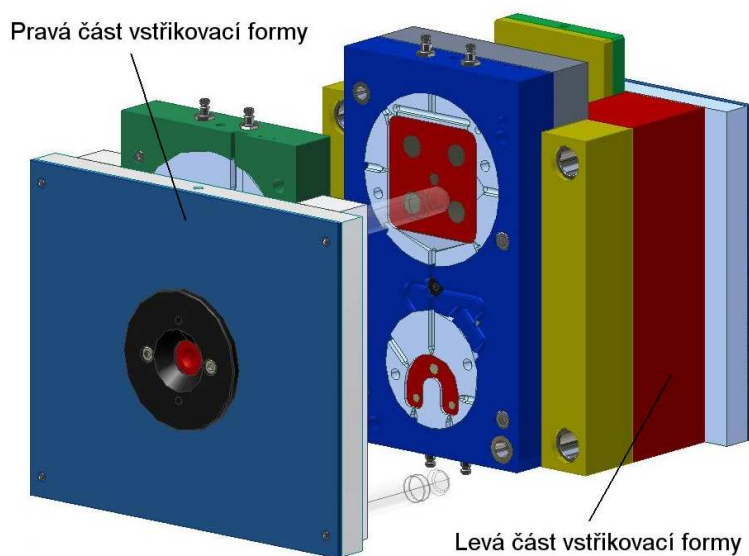
Tento stroj je vybaven řídicím systémem *SELOGICA*, který umožňuje velmi jednoduše ovládat proces vstřikování. Tento stroj je určen pro univerzální řešení všech úkolů v oblasti vstřikování.

## 6.4 Forma

K výrobě zkušebních vzorků bylo použito již existující formy. Forma se skládá z univerzálního rámu a výměnných částí I a II. Výměnné části byly navrženy tak, aby bylo možno použít různá vtoková ústí a zároveň měnit jejich umístění.



Obr. 29. Vstřikovací forma s výměnnou částí I



Obr. 30. Vstřikovací forma s výměnnou částí II

## 6.5 Technologické parametry při vstřikování

Technologické parametry při vstřikování zkušebních vzorků z plněného i neplněného polypropylenu jsou popsány v následujících tabulkách. Jako první jsou uvedeny teploty v jednotlivých pásmech pracovního válce vstřikovacího stroje a také teplota formy.

*Tab. 1. Teplota formy*

Teplota vstřikovací formy [°C]	
PP neplněné	PP + 30 % GF
40 - 80	40 - 60

*Tab. 2. Teploty pásem šneku*

Teploty jednotlivých pásem [°C]				
Tryska	Výstupní	Přechodové	Vstupní	Násypka
240	220	200	170	30

Další důležité technologické parametry vstřikovacího procesu jsou: vstřikovací tlak, hodnota dotlaku nebo časy jednotlivých fází vstřikovacího procesu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

*Tab. 3. Technologické parametry*

Čas cyklu	Čas chlazení	Čas dotlaku	Vstřikovací tlak	Dotlak	Vstřikovací rychlost
[ s ]	[ s ]	[ s ]	[ MPa ]	[ MPa ]	[ cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
<b>80</b>	<b>45</b>	<b>6</b>	<b>170</b>	<b>100</b>	<b>55</b>



## 7 POUŽITÉ METODY

### 7.1 Tahová zkouška

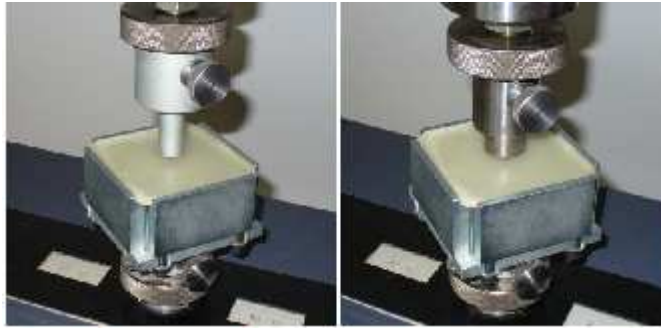
Jednalo se o normalizovanou tahovou zkoušku dle ČSN EN ISO 527-1, zkušební vzorky s rozměry dle ČSN EN ISO 527-1. Tato zkouška patří k základním statickým metodám hodnocení pevnosti materiálu. Na zkoušený vzorek se působí postupně se zvyšující silou, dokud nedojde k porušení vzorku. Jde pravděpodobně o nejjednodušší a nejobvyklejší mechanickou zkoušku. Tato zkouška slouží ke zjištění modulu pružnosti, pevnosti v tahu a Poissonova čísla materiálu. Zkušební vzorky byly pevně upnuty do kleštin stroje ZWICK a bylo na ně působeno silou. Vzdálenost kleštin byla 50 mm a rychlost zkoušky 10 mm/min.

### 7.2 Tříbodový ohyb

Jednalo se o normalizovanou tříbodovou ohybovou zkoušku dle ČSN EN ISO 178. Tříbodový ohyb spočívá nejčastěji v umístění vzorku na dvě podpory a zatěžování silou uprostřed vzorku. Tato zkouška nám určuje chování a vlastnosti materiálů při namáhání ohybem. Mimo jiné nám pomáhá rozdělit materiály na křehké, u kterých při určitém zatížení dojde k porušení, a na materiály houževnaté, u kterých je vzorek stále deformován a vyklouzne z podpěr. Vzdálenost podpěr byla 48 mm, rychlost zkoušky byla 10 mm/min.

### 7.3 2D zkouška čtvercové desky

Tato zkouška na rozdíl od tahové zkoušky a tříbodového ohybu nepatří mezi normalizované zkoušky. V případě této zkoušky je deska po obvodu prostě podepřena a symetricky zatěžována dutým válcovým trnem. Uspořádání této zkoušky je podobné zkoušce pevnosti křehkých plastů při dvouosé napjatosti, ale rozdíl spočívá v tom, že tato zkouška je založena na měření deformace v oblasti vymezené průměrem trnu. Jde o oblast homogenní napjatosti. Zkouška bude provedena různými průměry dutého válcového trnu.



Obr. 31. 2D zkouška čtvercové desky

Vzorek byl volně podepřen pomocí speciální podpěry vyrobené pro tuto zkoušku. Vzdálenost podpěr byla 100 mm, rychlost byla 10 mm/min. Použité průměry zkušebních trnů byly 20, 30 a 50 mm.

#### 7.4 Polarizační mikroskopie

Ke stanovení orientace vláken byly připraveny ze vzorků pro tahovou a ohybovou zkoušku řezy tak, aby bylo možno pozorovat změnu orientace vláken po tloušťce a tím potvrdit nebo vyvrátit naši představu o vzniku vrstevnaté struktury. Vzorky o tloušťce 30-50 $\mu$ m byly připraveny na mikrotonovém noži. Takto připravené vzorky byly pozorovány pomocí polarizační mikroskopie na optickém mikroskopu *Zeiss NU* a fotografovány digitálním fotoaparátem *Sony F-717*.

#### 7.5 FEM modelování

Použitý software *COSMOS/M*<sup>®</sup> pochází od firmy *Structural Research and Analysis Corporation* ( USA – California ). Tento software slouží k řešení rozsáhlých úloh v oboru technické analýzy. Obsahuje 2D a 3D modelář, umožňuje import geometrie z CAD.

Rychlé „řešiče“ systému *COSMOS/M*<sup>®</sup> umožňují počítat na běžných strojích třídy PC reálné úlohy nejenom z oblasti lineární statiky, vlastních frekvencí, stability a stacionárních i nestacionárních teplotních polí, ale i odezvu na vnější buzení, kontaktní úlohy, geometrické a materiálové nelinearity a únavu.

## 8 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

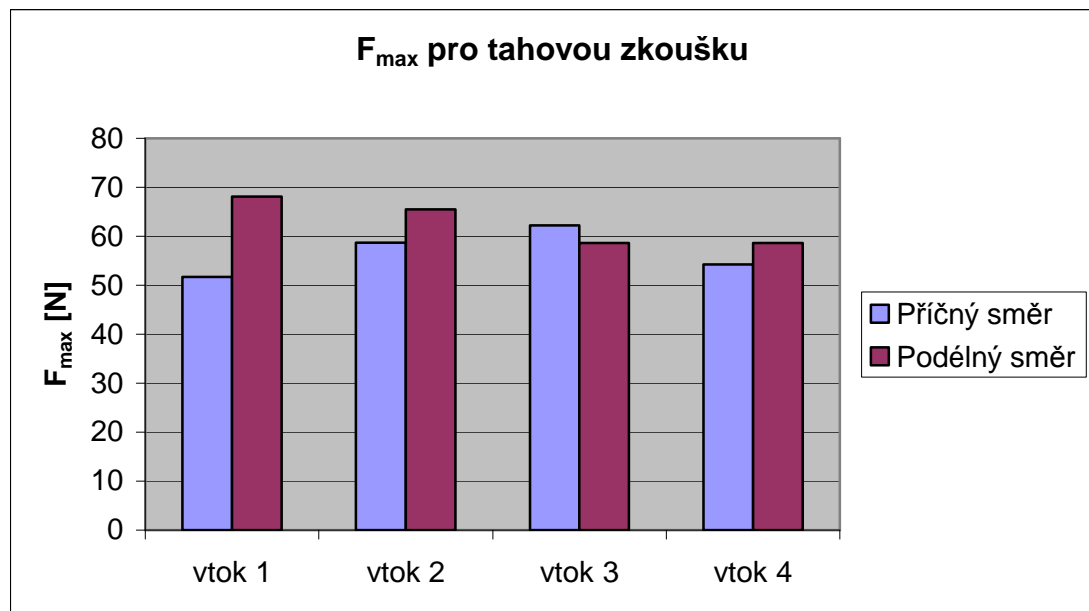
Tato kapitola obsahuje naměřené výsledky ze tří mechanických zkoušek, které jsou popsány výše. Z naměřených hodnot byly vypočteny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky.

### 8.1 Tahové vlastnosti

Tab. 4. Maximální síla pro jednotlivé vzorky – tah

Polypropylen + 30% GF	vtok 1	vtok 2	vtok 2	vtok 4
příčný směr T [N]	51,71	58,72	62,25	54,24
Odchylka	1,37	2,27	0,49	1,87
podélný směr L [N]	68,11	65,52	58,63	58,66
Odchylka	1,73	6,1	1,19	2,21

Následující graf ukazuje porovnání výsledků tahové zkoušky pro polypropylen plněný 30 % skleněných vláken v příčném a podélném směru.

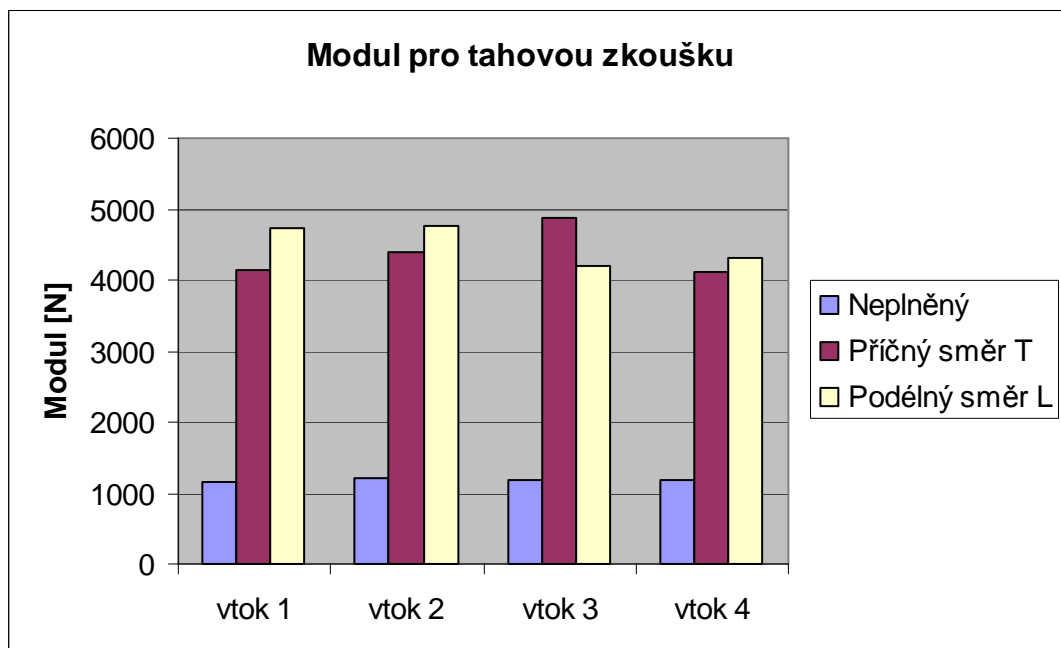


Obr. 32. Graf maximální síly pro tahovou zkoušku

Následuje tabulka a graf hodnot modulu pružnosti v tahu pro různé typy vtokových ústí pro plněný i neplněný polypropylen.

Tab. 5. Modul pružnosti pro jednotlivé vzorky – tah

PP 30% GF	vtok 1	vtok 2	vtok 3	vtok 4
příčný směr T	4143,77	4391,49	4873,51	4117,59
Odchylka	139,72	97,53	119,38	102,38
podélný směr L	4732,34	4771,42	4193,61	4311
Odchylka	7,66	268,85	93,1	184,46
Polypropylen + 0% GF	1155,845	1200,42	1189,075	1193,245

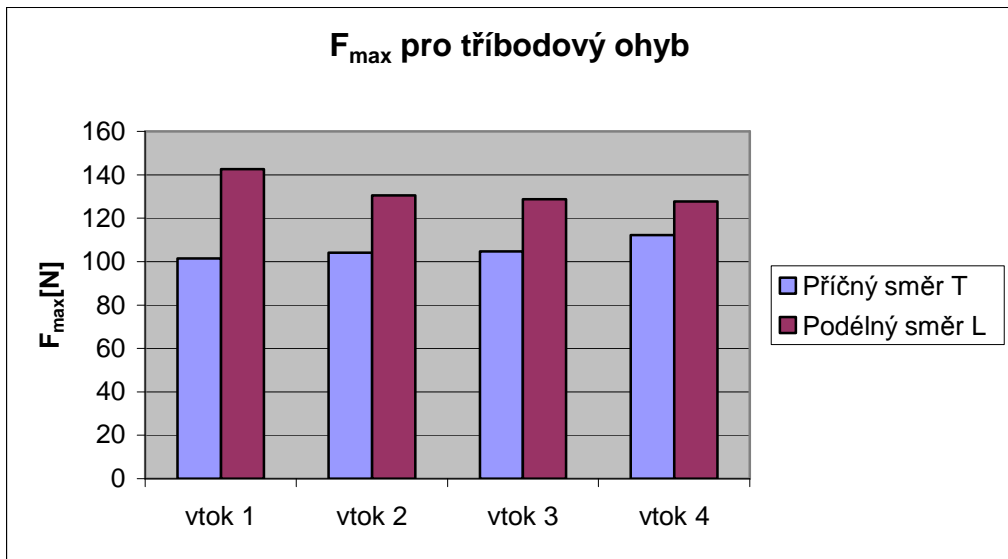


Obr. 33. Graf modulů pro tahovou zkoušku

## 8.2 Ohybové vlastnosti

Tab. 6. Maximální síla pro jednotlivé vzorky – tříbodový ohyb

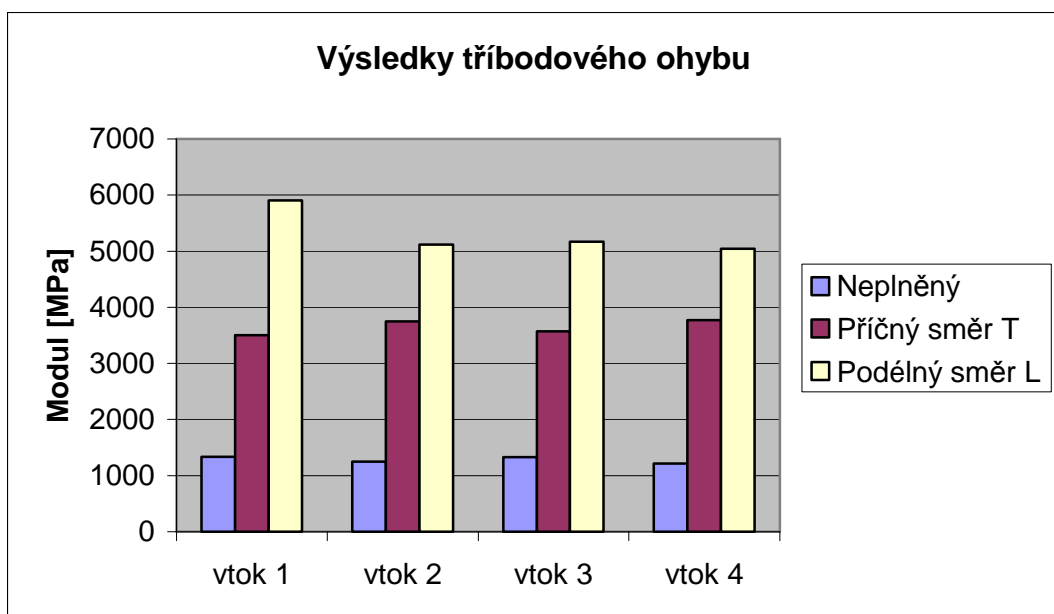
Polypropylen 30% GF	vtok 1	vtok 2	vtok 3	vtok 4
Příčný směr T [N]	101,47	104,05	104,71	112,25
Odchylka	4,67	7,34	1,8	3,52
Podélný směr L [N]	142,54	130,51	128,69	127,66
Odchylka	8,56	4,13	2,51	4,69



Obr. 34. F<sub>max</sub> pro třibodový ohyb

Tab. 7. Modul pružnosti pro jednotlivé vzorky - třibodový ohyb

Polypropylen + 30% GF	vtok 1	vtok 4	vtok 6	vtok 8
příčný směr T [Mpa]	3502,02	3745,83	3570,95	3767,92
Odchylka	210,40	278,01	120,66	176,22
podélný směr L [Mpa]	5907,75	5119,33	5167,77	5043,40
Odchylka	289,62	226,76	171,72	188,55
Polypropylen + 0% GF [Mpa]	1335,28	1249,78	1326,32	1216,33



Obr. 35. Graf modulů pro třibodovou ohybovou zkoušku

### 8.3 2D zkouška čtvercové desky

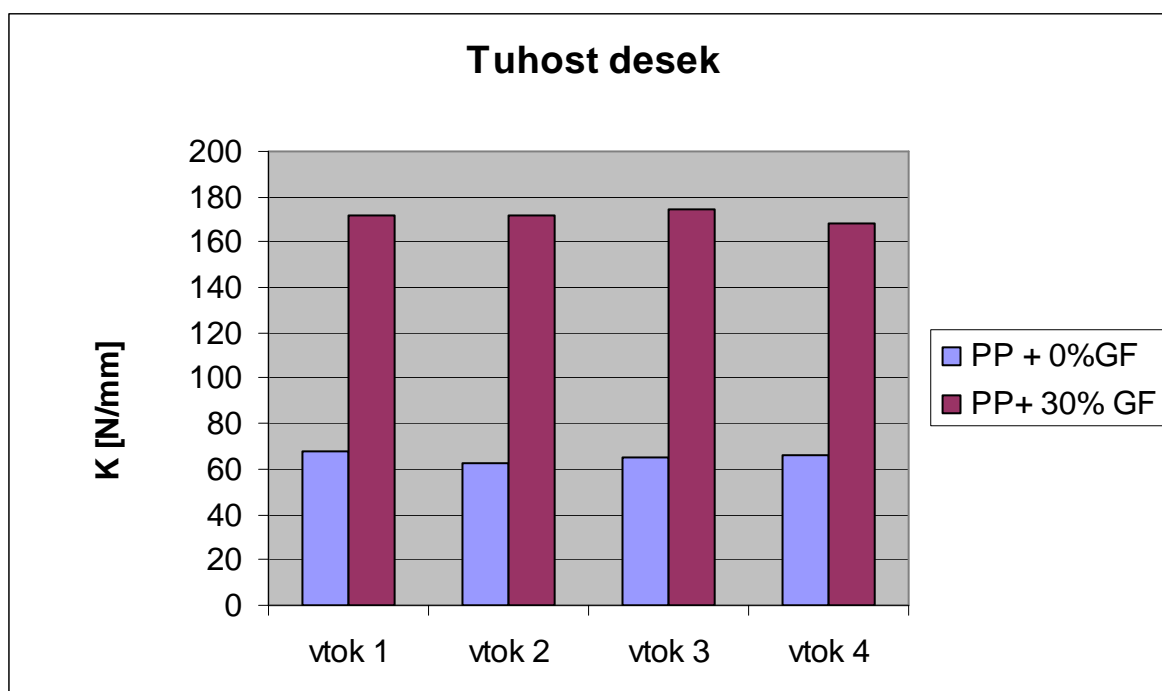
Měření byla prováděna trny o vnějším průměru 20, 30 a 50 mm. Výsledkem z technických důvodů není v tomto případě modul, ale z naměřených hodnot maximální zatěžující síly a maximálního průhybu byly vypočteny hodnoty tuhosti pro každý vzorek.

Tab. 8. Výsledky pro PP+ 30% GF– 2D zkouška desky  $\phi$  20 mm

Polypropylen+ 30% GF [N]	vtok 1	vtok 2	vtok 3	vtok 4
F max [ N ]	1698,53	1731,11	1793,71	1801,31
y [ mm ]	9,87	10,10	10,27	10,68
K [ N/mm ]	172,09	171,41	174,66	168,66

Tab. 9. Výsledky pro PP+ 0% GF– 2D zkouška desky  $\phi$  20 mm

Polypropylen + 0%GF [N]	vtok 1	vtok 2	vtok 3	vtok 4
F max [ N ]	1546,80	1395,56	1498,09	1655,57
y [ mm ]	22,85	22,34	23,04	25,13
K [ N/mm ]	67,69	62,47	65,02	65,88



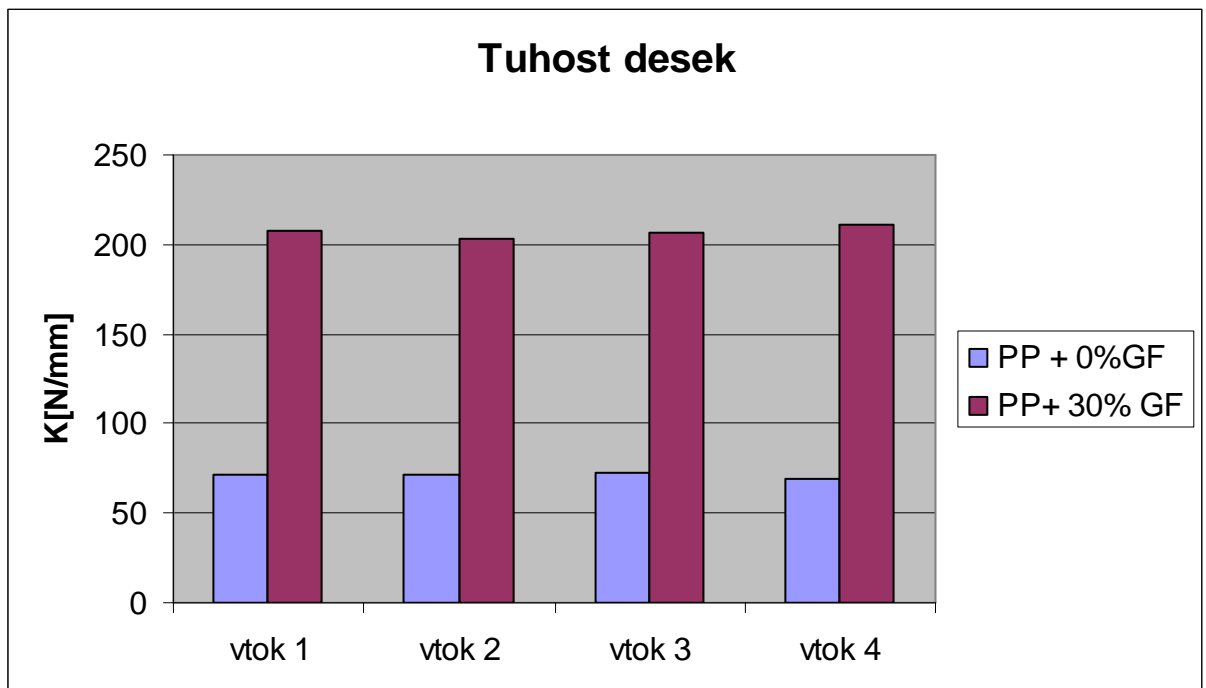
Obr. 36. Tuhost desek pro kulový ohyb  $\phi$  20 mm.

Tab. 10. Výsledky pro PP+30% GF – 2D zkouška desky  $\phi$  30 mm

Polypropylen+ 30% GF [N]	vtok 1	vtok 2	vtok 3	vtok 4
F max [ N ]	2304,86	2189,29	2328,25	2446,55
y [ mm ]	11,09	10,80	11,29	11,57
K [ N/mm ]	207,93	202,71	206,22	211,46

Tab. 11. Výsledky pro PP+0% GF – 2D zkouška desky  $\phi$  30 mm

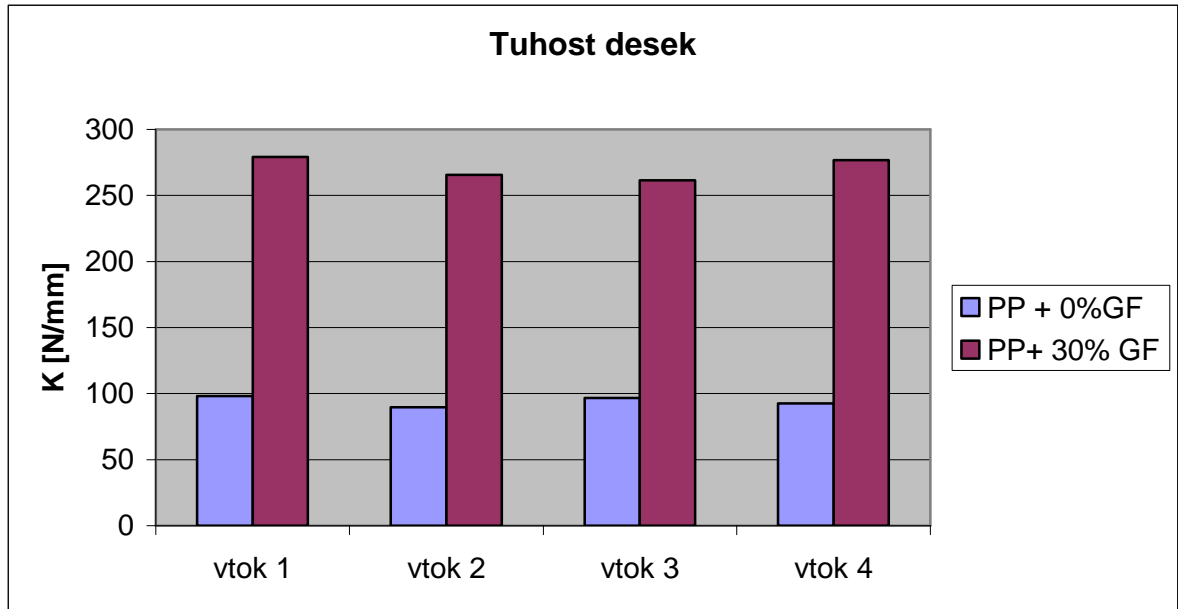
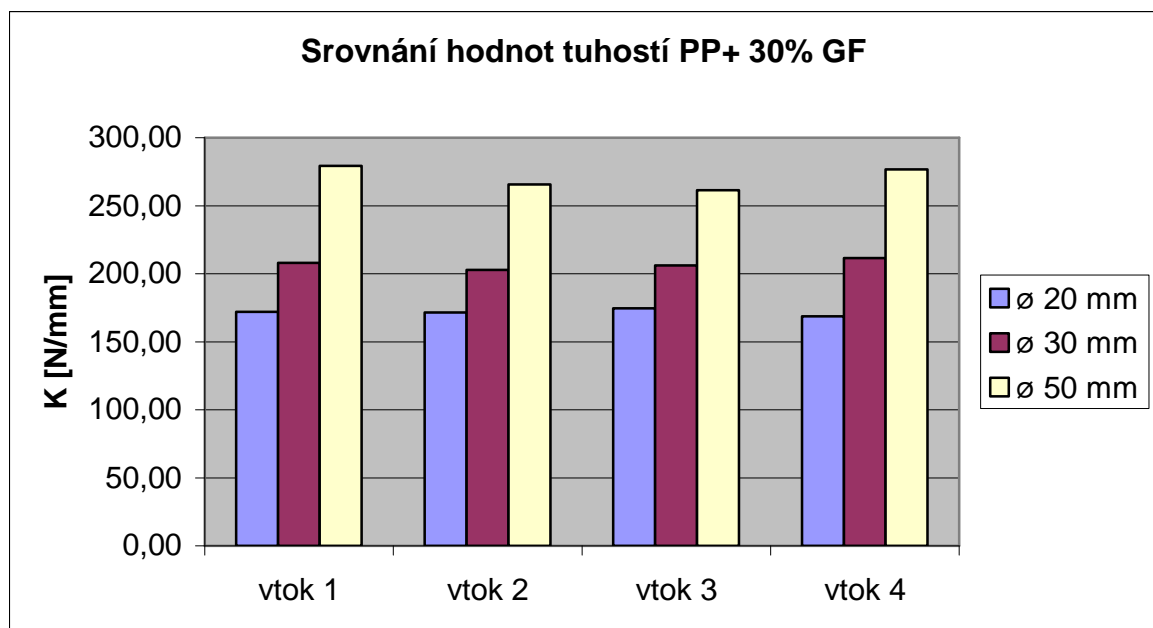
Polypropylen + 0%GF [N]	vtok 1	vtok 2	vtok 3	vtok 4
F max [ N ]	1563,36	1526,60	1589,87	1674,25
y [ mm ]	21,84	21,51	21,94	24,06
K [ N/mm ]	71,58	70,97	72,46	69,59

Obr. 37. Tuhost desek pro kulový ohyb  $\phi$  30 mmTab. 12. Výsledky pro PP+30% GF – 2D zkouška desky  $\phi$  50mm

Polypropylen+ 30% GF [N]	vtok 1	vtok 2	vtok 3	vtok 4
F max [ N ]	2945,78	2882,79	2927,53	3178,58
y [ mm ]	10,55	10,85	11,20	11,49
K [ N/mm ]	279,22	265,69	261,39	276,64

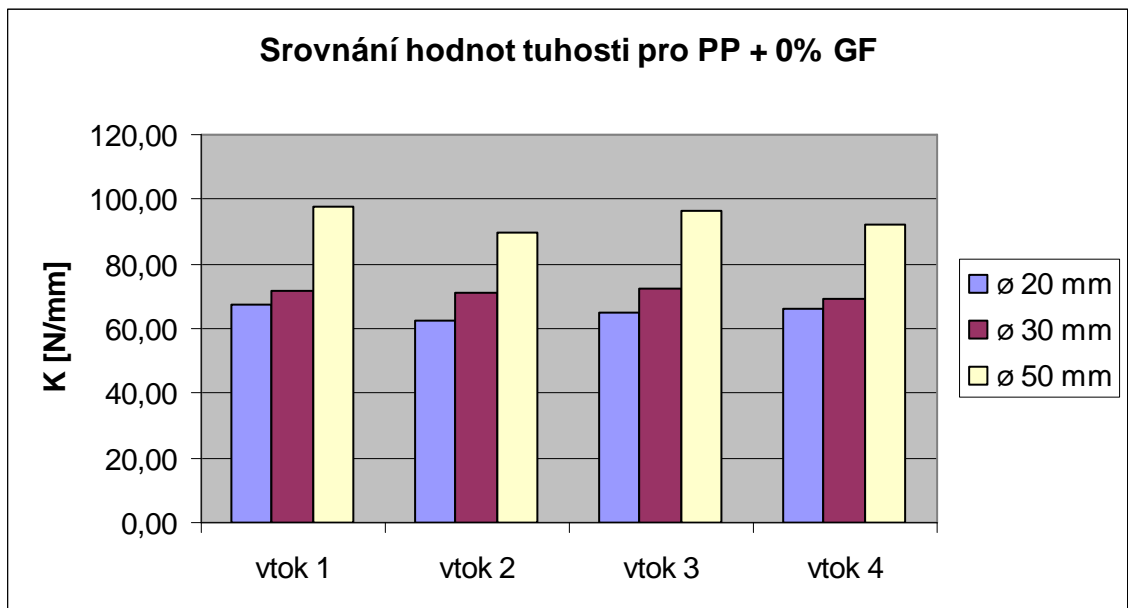
Tab. 13. Výsledky pro PP+0% GF – 2D zkouška desky  $\phi$  50mm

Polypropylen + 0%GF [N]	vtok 1	vtok 2	vtok 3	vtok 4
F max [ N ]	1884,28	1826,29	1893,71	1958,36
y [ mm ]	19,22	20,39	19,61	21,18
K [ N/mm ]	98,04	89,57	96,57	92,46

Obr. 38. Tuhost desek pro kulový ohyb  $\phi$  50 mm

Obr. 39. Srovnání tuhosti desek změřených pro různé průměry trnů





Obr. 40. Srovnání tuhosti desek změřených pro různé průměry trnů

## 9 PREDIKCE CHOVÁNÍ NA ZÁKLADĚ STRUKTURNÍCH MODELŮ

### 9.1 Tahová tuhost

K výpočtu efektivních modulů byly sestaveny modely základních struktur. První dvě struktury ( *a*, *b* ) jsou jednoduché modely plně usměrněných struktur. *Struktura a*) má vlákna usměrněná v longitudinálním směru, *model b*) má vlákna usměrněná v transversálním směru.



Obr. 41. Modely struktur

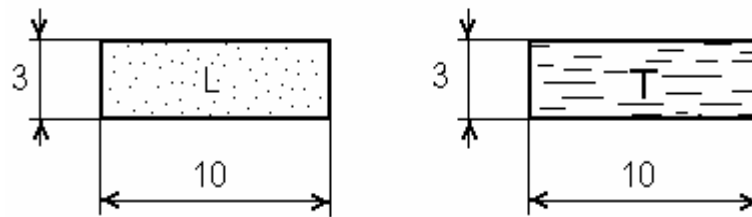
Další dvě struktury ( *c*, *d* ) vycházejí z předchozích pozorování a obecné představě o orientaci vláken vzniklých při vstřikování tenkých stěn plněných krátkými vlákny. V obou případech se jedná o třívrstvou strukturu skládající se z plně usměrněných vrstev, kde mají vždy dvě vedlejší vrstvy vzájemně pootočenou orientaci vláken o úhel  $\pi/2$ . Poměr tloušťek jednotlivých vrstev je vždy 2:1. U *modelu c*) převládá orientace longitudinální, u *modelu d*) převládá orientace transversální. Je zřejmé, že takto sestavený model ukazuje značně zjednodušenou a idealizovanou strukturu, která je v praxi téměř nedosažitelná. Hodnoty efektivních modulů vypočtené na základě takového modelu je tedy třeba brát jako určité hranice, ve kterých se budou pohybovat hodnoty skutečných struktur. A to je také důvod, proč byly tyto modely sestaveny. Vypočtené hodnoty efektivních modulů budou porovnány s hodnotami zjištěnými experimentálně. Pro porovnání byl vybrán vzorek vyrobený s použitím filmového vtoku. U takto vyrobeného vzorku se předpokládá, že se bude nejvíce blížit idealizované struktuře.

Pozn: Značení efektivního vypočteného modulu je  $E_{x/y}$ , kde *index x* udává počet vrstev s longitudinální orientací vláken a *index y* udává počet vrstev s transversální orientací

vláken. Hodnoty zjištěné experimentálně jsou označeny  $E_{Ex}$ , kde index  $x$  označuje směr L, nebo T.

### 9.1.1 Efektivní modul plně usměrněných struktur a, b

Jak již bylo uvedeno, jde o modely s plně usměrněnou strukturou. Hodnoty modulů těchto struktur byly zjištěny experimentálně a slouží pro výpočet efektivních modulů dalších struktur.



Obr. 42. Modely a, b

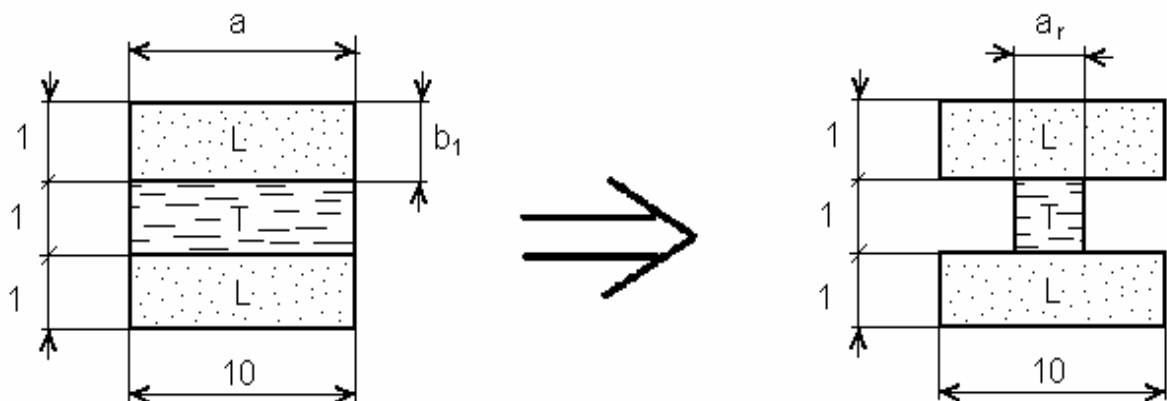
Hodnoty modulů jsou:

$$E_L = 7320 \text{ MPa}$$

$$E_T = 1773 \text{ MPa}$$

### 9.1.2 Efektivní modul vrstevnatých struktur c, d

Předpokládáme strukturu o třech vrstvách. V první případě jde o model struktury vzorku odebraného ve směru toku taveniny. Proto budou mít povrchové vrstvy převažující orientaci vláken ve směru toku a střední vrstva bude mít převažující orientaci vláken kolmou na tok. Poměr tloušťek vrstev je tedy 2:1.



Obr. 43. Redukce šířek modelu c

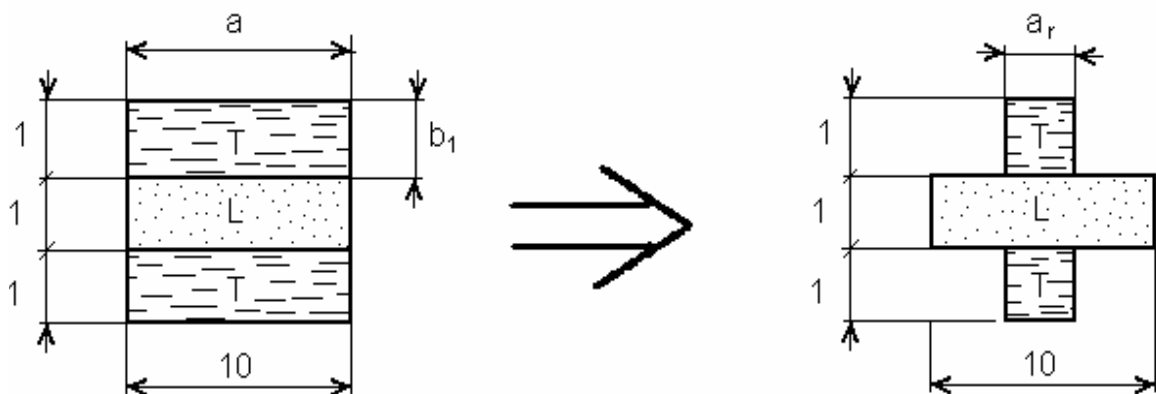
U takto sestaveného modelu je potřeba provést redukci šířek na nejvyšší modul a spočítat redukovanou plochu  $S_r$ . V tomto případě jde o redukci na modul  $E_L$ .

$$a_r = \frac{E_T}{E_L} \cdot a = \frac{1773}{7320} \cdot 10 = 2,42 \text{ mm} \quad S_r = 2(a \cdot b_1) + a_r \cdot b_1 = 2(10 \cdot 1) + 2,42 \cdot 1 = 22,42 \text{ mm}^2$$

$$E_{2/1} = \frac{E_L \cdot S_r}{S} = \frac{7320 \cdot 22,42}{30} = 5470,48 \text{ MPa}$$

Efektivní modul takovéto struktury je 5470,48 MPa.

V druhém případě půjde o model struktury vzorku odebraného ve směru kolmém na směr toku taveniny. Proto bude orientace vláken v jednotlivých vrstvách opačná než v prvním případě.



Obr. 44. Redukce šířek modelu  $d$

Postup výpočtu je stejný jako pro první model struktury.

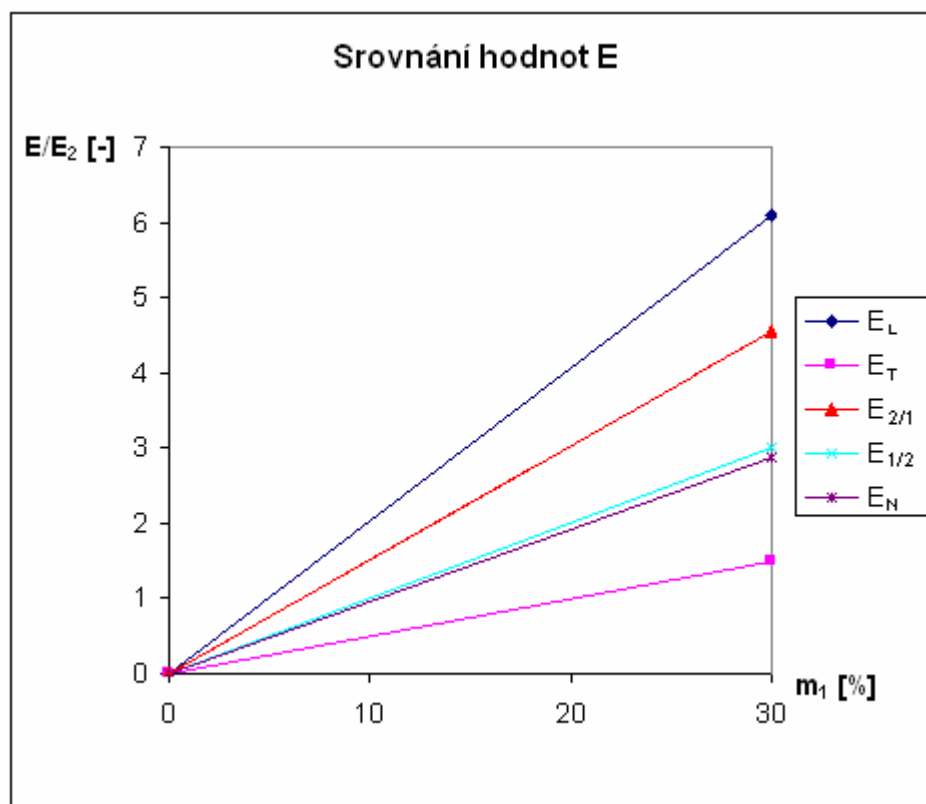
$$a_r = \frac{E_T}{E_L} \cdot a = \frac{1773}{7320} \cdot 10 = 2,42 \text{ mm} \quad S_r = 2(a \cdot b_1) + a_r \cdot b_1 = 2(2,42 \cdot 1) + 10 \cdot 1 = 14,84 \text{ mm}^2$$

$$E_{1/2} = \frac{E_L \cdot S_r}{S} = \frac{7320 \cdot 14,84}{30} = 3620,96 \text{ MPa}$$

Efektivní modul takovéto struktury je 3620,96 MPa.

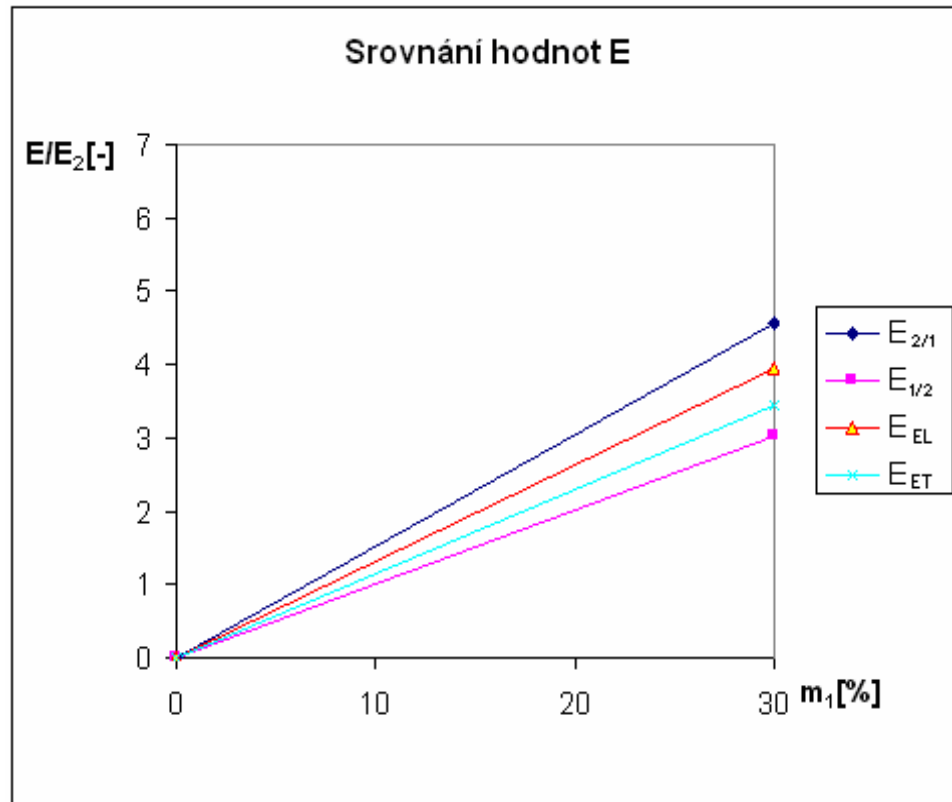
### 9.1.3 Srovnání efektivních modulů

Pro přehlednost je porovnání uvedeno ve dvou grafech. Hodnoty modulů jsou zobrazeny v závislosti  $E/E_2$  ( poměr modulu k modulu matrice ) na hmotnostním zastoupení vláken ve struktuře. Vypočtené hodnoty pro oba modely vrstevnaté struktury byly porovnány s experimentálně získanými hodnotami pro plně usměrněnou strukturu v obou směrech L a T i s neuspořádanou strukturou. Dále byly tyto hodnoty porovnány s experimentálně získanými hodnotami modulů vrstevnaté struktury.



Obr. 45. Graf srovnání hodnot E

$E_L$	modul plně usměrněné struktury s vlákny v longitudinálním směru
$E_T$	modul plně usměrněné struktury s vlákny v transversálním směru
$E_N$	modul neusměrněné struktury
$E_{2/1}, E_{1/2}$	moduly vypočtené pro vrstevnatou strukturu

Obr. 46. Graf srovnání hodnot  $E$ 

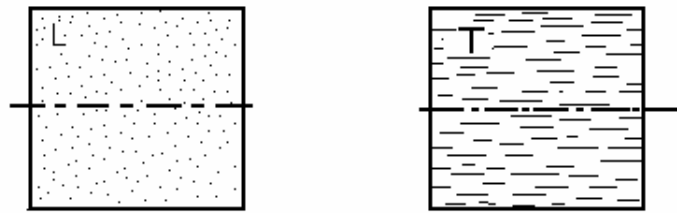
- $E_{2/1}$ ,  $E_{1/2}$       moduly vypočtené pro vrstevnatou strukturu  
 $E_{EL}$                 experimentálně získaný modul v longitudinálním směru  
 $E_{ET}$                 experimentálně získaný modul v transversálním směru

## 9.2 Ohybová tuhost

Pro výpočet ohybové tuhosti struktury byly použity stejné modely jako pro výpočet tahové tuhosti struktury v předchozí kapitole. Jedná se o *modely a), b)*, s plně usměrněnou strukturou a *modely c), d)*, s vrstevnatou strukturou. Bližší popis struktur je uveden v předchozí kapitole. Vypočtené hodnoty jsou porovnány s hodnotami zjištěnými experimentálně. Stejně jako v předchozí kapitole byly použity hodnoty pro filmový vtok.

### 9.2.1 Ohybová tuhost struktur a, b.

Jak již bylo uvedeno, jde o modely s plně usměrněnou strukturou. Hodnoty modulů těchto struktur byly zjištěny experimentálně. Hodnoty modulů slouží pro výpočet tuhostí jednotlivých modelů.

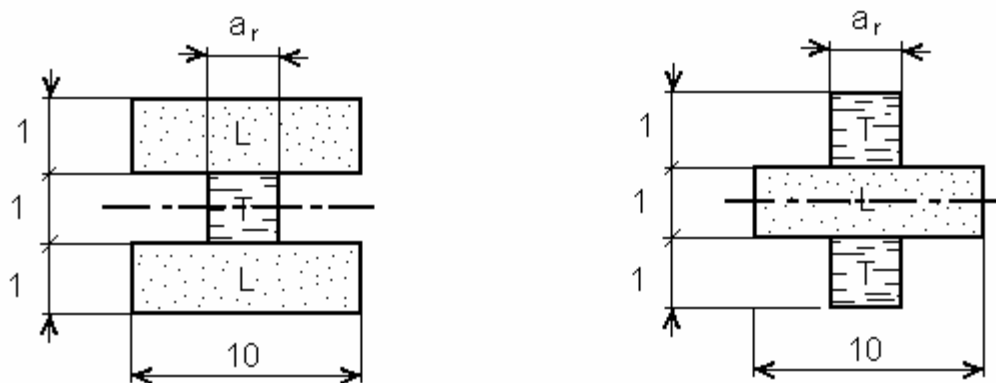


Obr. 47. Modely a, b

$$J_R = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 10 \cdot 3^3 = 22,5 \text{ mm}^4$$

$$K_L = E \cdot J_R = 7320 \cdot 22,5 = 164,7 \text{ N/mm} \quad K_T = E \cdot J_R = 1773 \cdot 22,5 = 39,89 \text{ N/mm}$$

### 9.2.2 Ohybová tuhosti struktur c, d.



Obr. 48. Redukce šířek modelů c, d

$$J_{R2/1} = \frac{1}{12} \cdot a_r \cdot h^3 + 2 \left( \frac{1}{12} \cdot a \cdot h^3 + y^2 \cdot a \cdot h \right) = \frac{1}{12} \cdot 2,42 \cdot 1^3 + 2 \left( \frac{1}{12} \cdot 10 \cdot 1^3 + 1^2 \cdot 10 \cdot 1 \right) = 21,87 \text{ mm}^4$$

$$K_{2/1} = J_{Rc} \cdot E = 21,87 \cdot 7320 = 160,09 \text{ N/mm}$$

$$J_{R1/2} = \frac{1}{12} \cdot a_r \cdot h^3 + 2 \left( \frac{1}{12} \cdot a \cdot h^3 + y^2 \cdot a \cdot h \right) = \frac{1}{12} \cdot 10 \cdot 1^3 + 2 \left( \frac{1}{12} \cdot 2,42 \cdot 1^3 + 1^2 \cdot 2,42 \cdot 1 \right) = 6,07 \text{ mm}^4$$

$$K_{1/2} = J_{Rc} \cdot E = 6,07 \cdot 7320 = 44,43 \text{ N/mm}$$

### 9.2.3 Experimentálně získané hodnoty ohybové tuhosti

Tyto hodnoty byl vypočteny z hodnot modulů naměřených při tříbodové ohybové zkoušce.

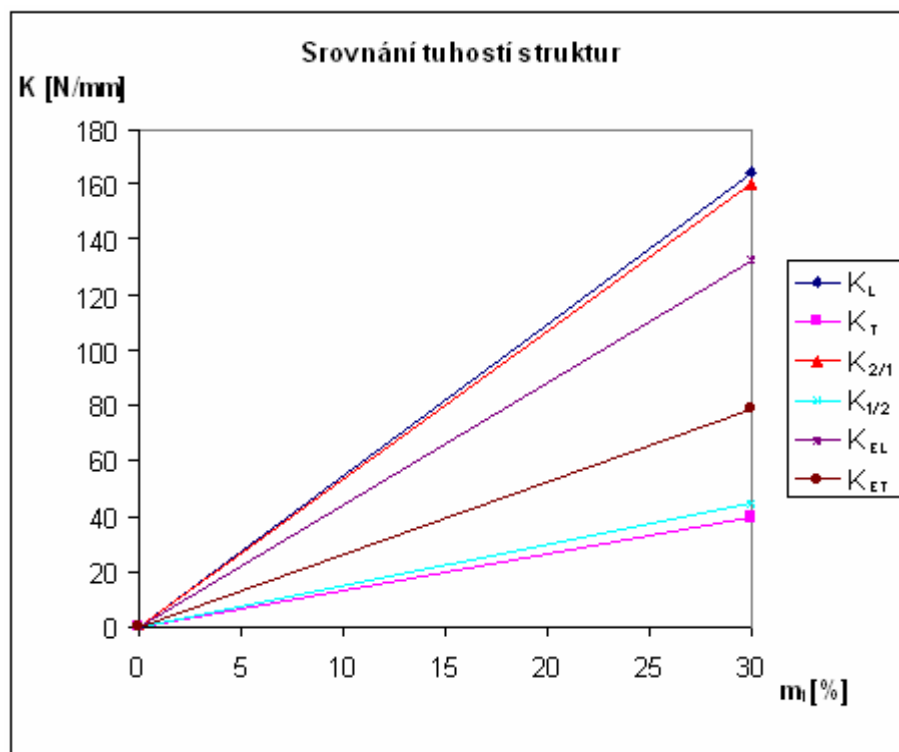
$$J_R = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 10 \cdot 3^3 = 22,5 \text{ mm}^4$$

$$K_{EL} = J_R \cdot E_L = 22,5 \cdot 5907,75 = 132,92 \text{ N/mm}$$

$$K_{ET} = J_R \cdot E_T = 22,5 \cdot 3502,02 = 78,80 \text{ N/mm}$$

### 9.2.4 Srovnání ohybových tuhostí

Vypočtené tuhosti pro jednotlivé struktury jsou znázorněny v grafu. Jde o srovnání hodnot vypočtených na základě modelu vrstevnaté struktury s hodnotami vypočtenými pro plně usměrněnou strukturu a s hodnotami zjištěnými experimentálně.



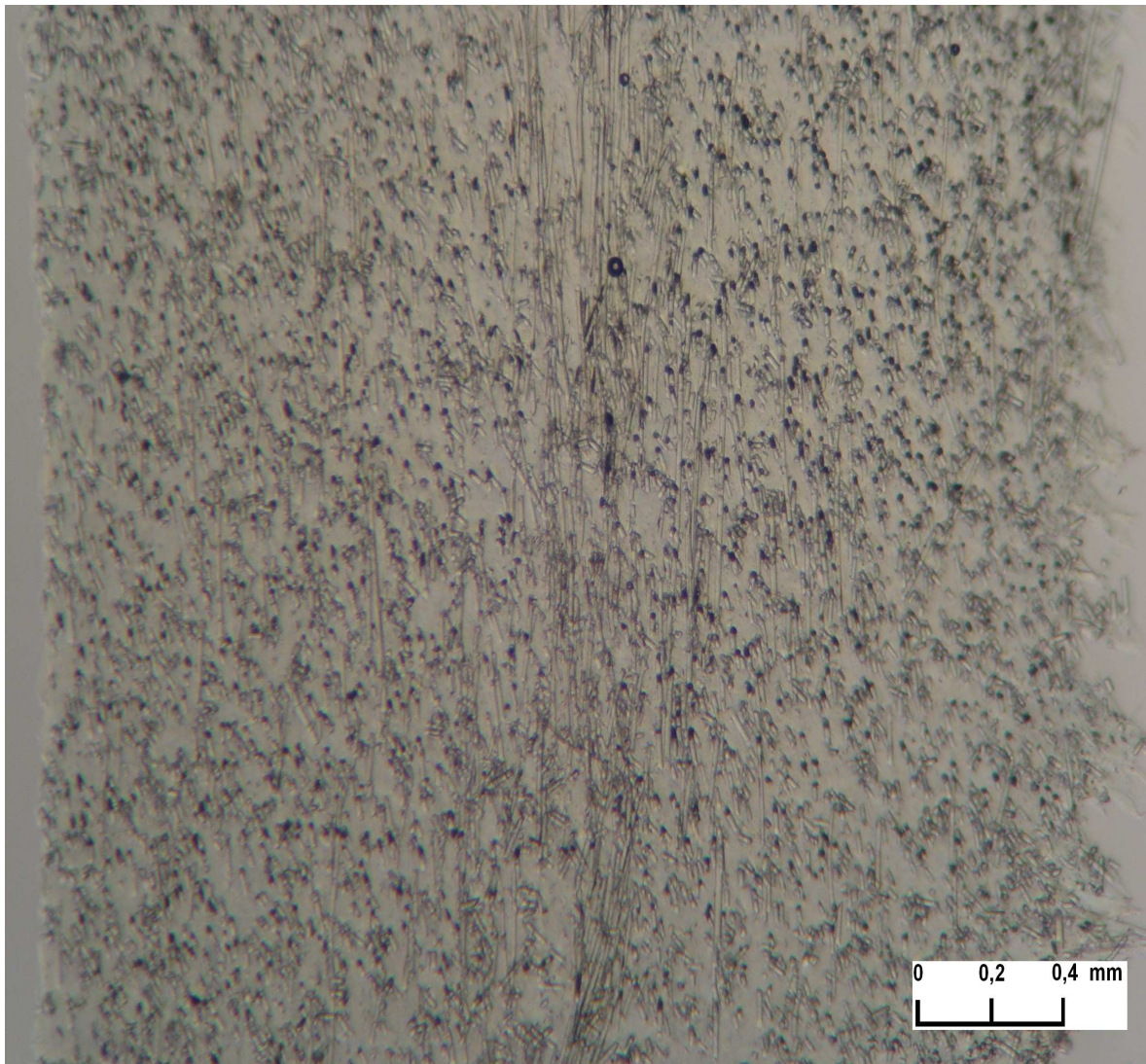
Obr. 49. Srovnání ohybových tuhostí struktur

K <sub>L</sub> , K <sub>T</sub>	Tuhosti plně usměrněných struktur.
K <sub>2/1</sub>	Tuhost struktury podle modelu c).
K <sub>1/2</sub>	Tuhost struktury podle modelu d).
K <sub>EL</sub> , K <sub>ET</sub>	Tuhosti vypočtené z experimentálně zjištěných hodnot E pro směr L a T.



## 10 EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ ORIENTACE

Smyslem této kapitoly diplomové práce je pouze potvrdit naši představu o orientaci krátkých vláken plošných vstřikovaných prvků. Experimentální stanovení orientace vláken bylo prováděno pomocí optického mikroskopu. Ze vzorků pro tahovou zkoušku a ohyb do válcové plochy byly řezány vzorky o přibližné tloušťce v rozmezí 30 – 50  $\mu\text{m}$  a na těchto vzorcích byla pozorována struktura vznikající při vstřikování. Vzorky byly řezány z boční stěny vzorku tak, aby bylo možno pozorovat změnu orientace po tloušťce vzorku. Vzorky byly odebrány pro každý typ použitého vtokového ústí.



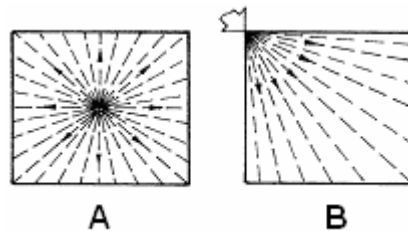
Obr. 50. Řez vzorkem PP-4 L

Na zobrazeném snímku je jasně patrná vrstevnatá struktura. Vlákna kolem střednice vzorku vykazují silnou orientaci. Protože jde o snímek vzorku odebraného ve směru L, pak je zřejmé, že vlákna ve střední vrstvě mají orientaci pootočenou o úhel  $\pi/2$ , tedy orientaci kolmou na směr toku taveniny.

Zbylé snímky ( jeden pro každé použité vtokové ústí ) jsou uloženy na CD-romu přiloženém k této diplomové práci. I z ostatních snímků je patrné, že dochází ke vzniku třívrstvé struktury, kdy střední vrstva má vždy převažující orientaci vláken pootočenou o úhel  $\pi/2$  oproti povrchovým vrstvám. Tato střední vrstva je však mnohem tenčí než vrstvy povrchové.

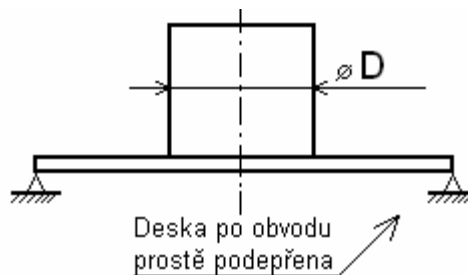
## 11 FEM MODELOVÁNÍ

V programu *COSMOS/M*<sup>®</sup> byly sestaveny dva různé modely struktur a ty byly zatíženy. Zatížení modelu odpovídá zatížení při námi prováděné zkoušce ohybu do kulové plochy. Jde tedy o zatížení dutými trny o průměrech 20 a 50 mm.



Obr. 51. Modelové struktury

Modelována byla struktura vznikající při použití centrálně umístěného vtokového ústí ( *model A* ) a struktura vznikající při použití bodového vtoku umístěného do rohu vzorku ( *model B* ). Dá se tedy říci, že *model A* odpovídá vzorku č. 4 a *model B* odpovídá vzorku č. 3. Pro srovnání byl také vytvořen model neplněného vzorku. U vytvořených modelů se na rozdíl od skutečnosti nemění orientace vláken po tloušťce.



Obr. 52. Schéma 2D zkoušky desky

Vzorky byly zatěžovány silou 108 N působící na průměru 20 a 50 mm. Byly sledovány průhyby v místech působení zatěžující síly a také maximální průhyb uprostřed. Dále jsou velmi zajímavé průběhy napětí ve směrech L a T.

Pozn: Naměřené hodnoty deformací jsou označeny:

$y_T$  = deformace trnu

$y_{\max}$  = deformace maximální

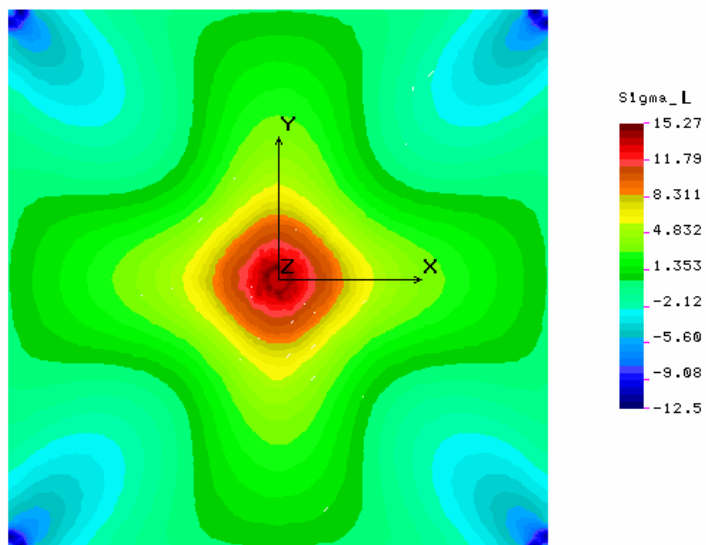
### 11.1 Model A $\phi$ 20mm

Z naměřené hodnoty „deformace trnu“ byla vypočtena tuhost modelu.

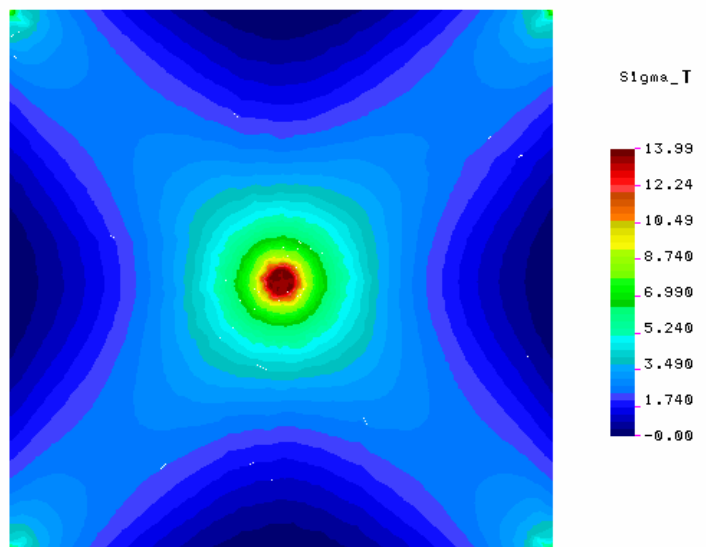
$$y_T = 0,7505 \text{ mm}$$

$$y_{\max} = 0,8475 \text{ mm}$$

$$K = \frac{F}{y_T} = \frac{108.8}{0,7505} = 144,97 \text{ Nmm}^{-1}$$



Obr. 53. Napětí ve směru L modelu A  $\phi$  20 mm



Obr. 54. Napětí ve směru T modelu A  $\phi$  20 mm

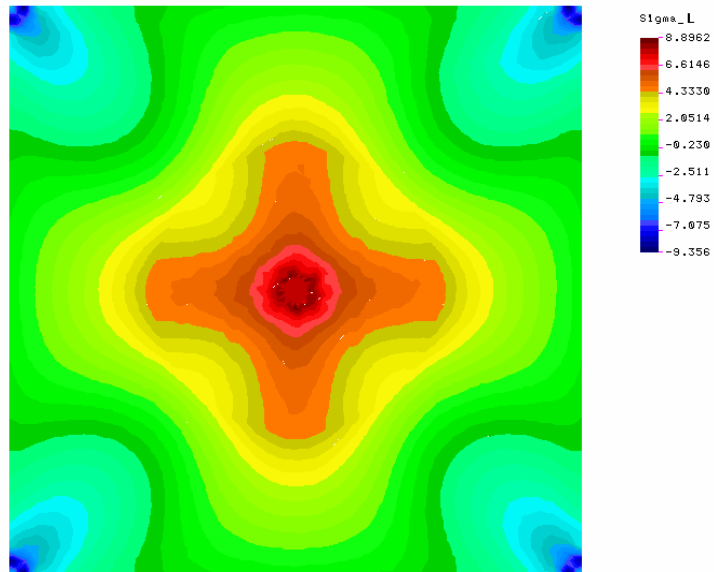
## 11.2 Model A $\phi$ 50 mm

Z naměřené hodnoty „deformace trnu“ byla vypočtena tuhost modelu.

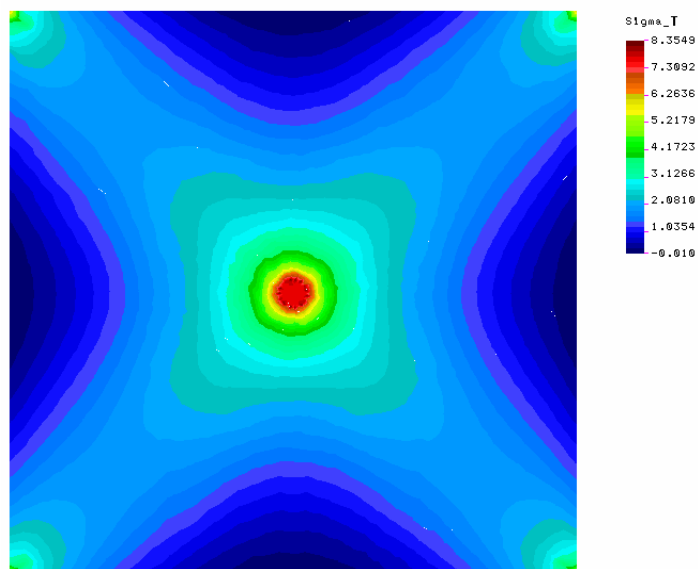
$$y_T = 0,365 \text{ mm}$$

$$y_{\max} = 0,5613 \text{ mm}$$

$$K = \frac{F}{y_T} = \frac{108}{0,365} = 295,9 \text{ Nmm}^{-1}$$



Obr. 55. Napětí ve směru L modelu A  $\phi$  50 mm



Obr. 56. Napětí ve směru T modelu A  $\phi$  50 mm

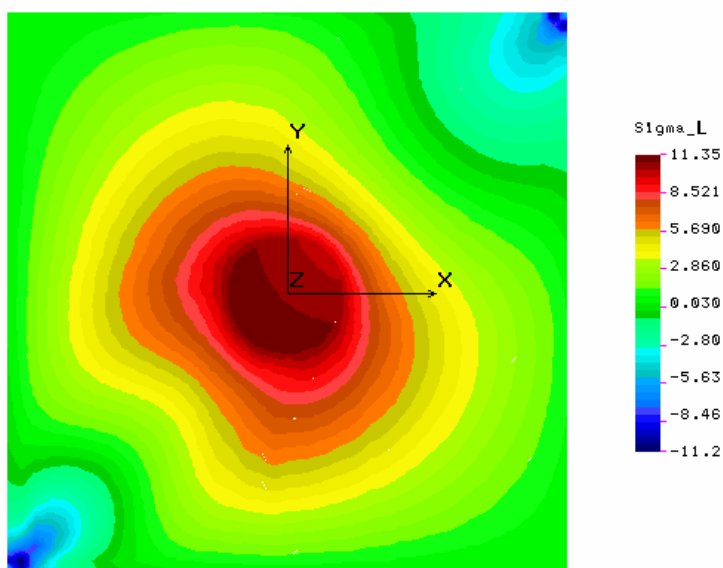
### 11.3 Model B $\phi$ 20 mm

Z naměřené hodnoty „deformace trnu“ byla vypočtena tuhost modelu.

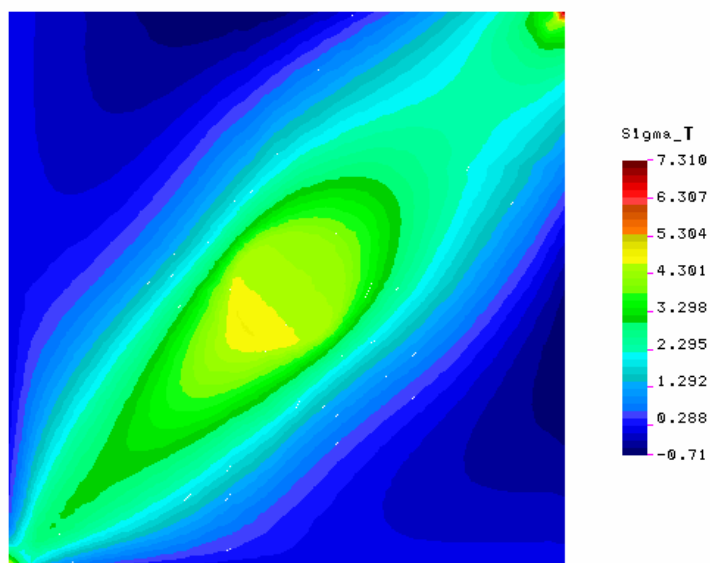
$$y_T = 0,577 \text{ mm}$$

$$y_{\max} = 0,623 \text{ mm}$$

$$K = \frac{F}{y_T} = \frac{108}{0,577} = 187,16 \text{ Nmm}^{-1}$$



Obr. 57. Napětí ve směru L modelu B  $\phi$  20 mm



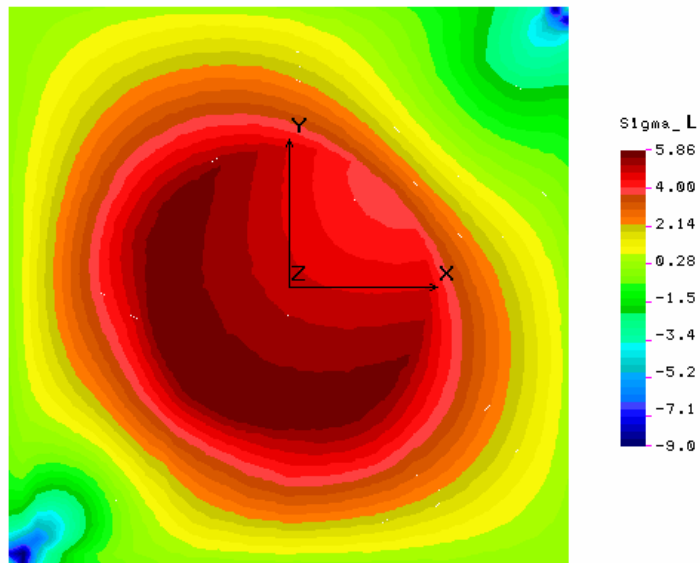
Obr. 58. Napětí ve směru T modelu B  $\phi$  20 mm

### 11.4 Model B $\phi$ 50 mm

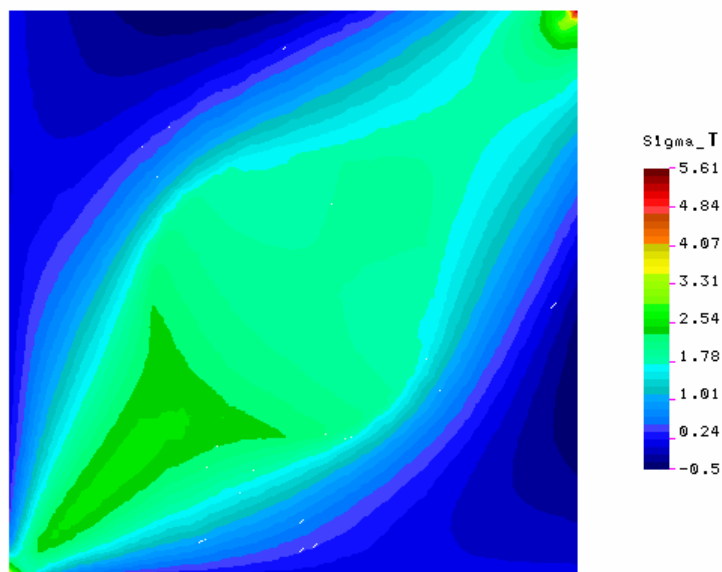
$$y_T = 0,30 \text{ mm}$$

$$y_{\max} = 0,4232 \text{ mm}$$

$$K = \frac{F}{y_T} = \frac{108}{0,3} = 360 \text{ Nmm}^{-1}$$



Obr. 59. Napětí ve směru L modelu B  $\phi$  50 mm



Obr. 60. Napětí ve směru T modelu B  $\phi$  50 mm

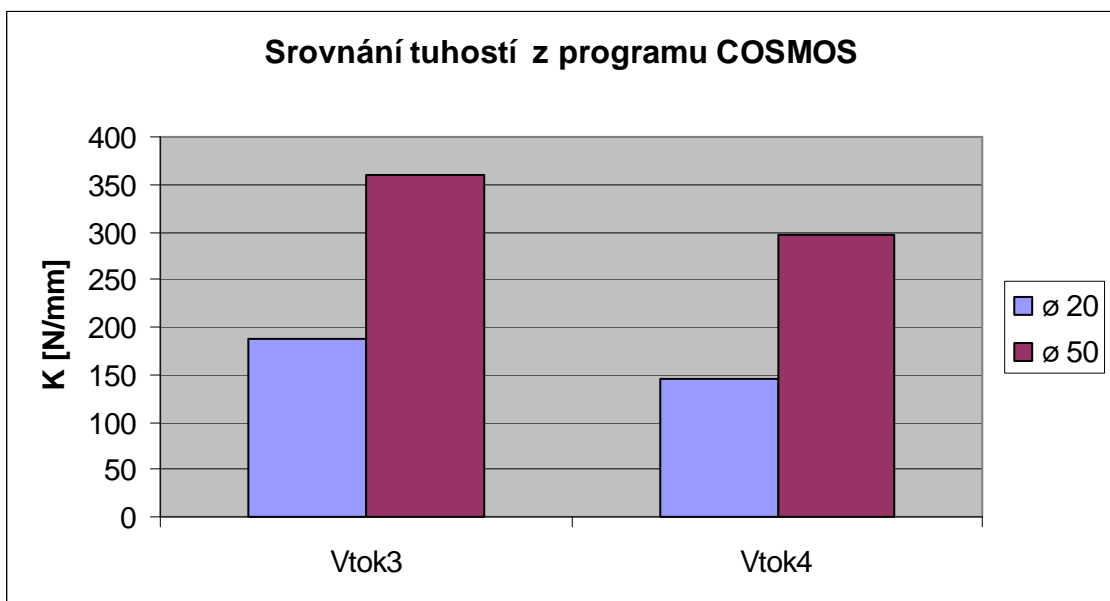
### 11.5 Izotropní model $\varnothing 50\text{mm}$

$$y_T = 0,79 \text{ mm}$$

$$y_{\max} = 1,0667 \text{ mm}$$

$$K = \frac{F}{y_T} = \frac{108}{0,79} = 136,71 \text{ Nmm}^{-1}$$

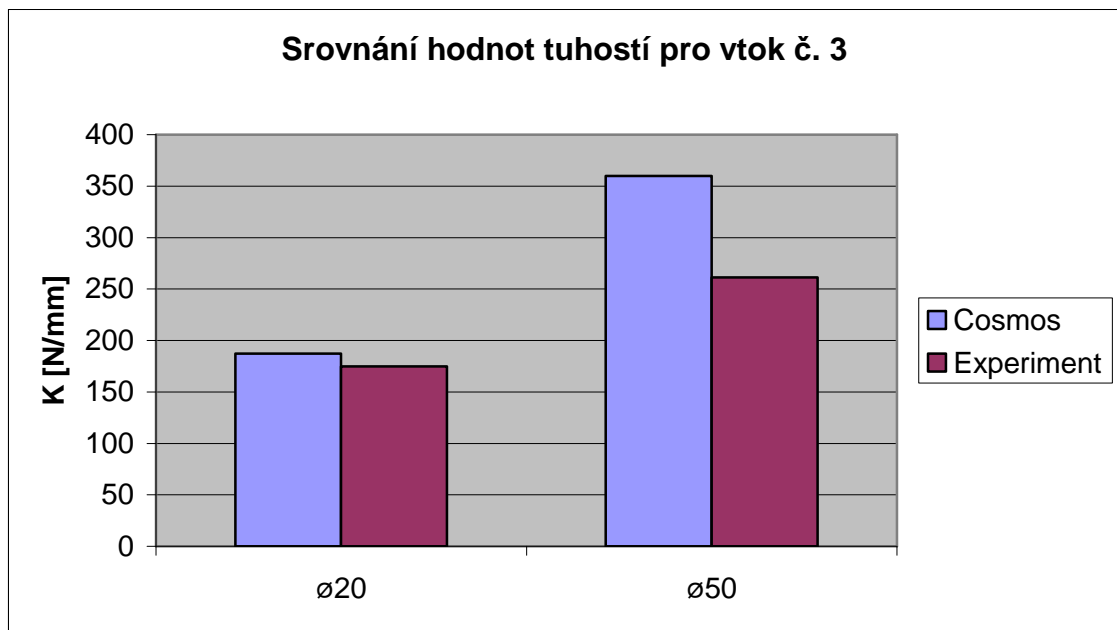
### 11.6 Srovnání hodnot tuhostí



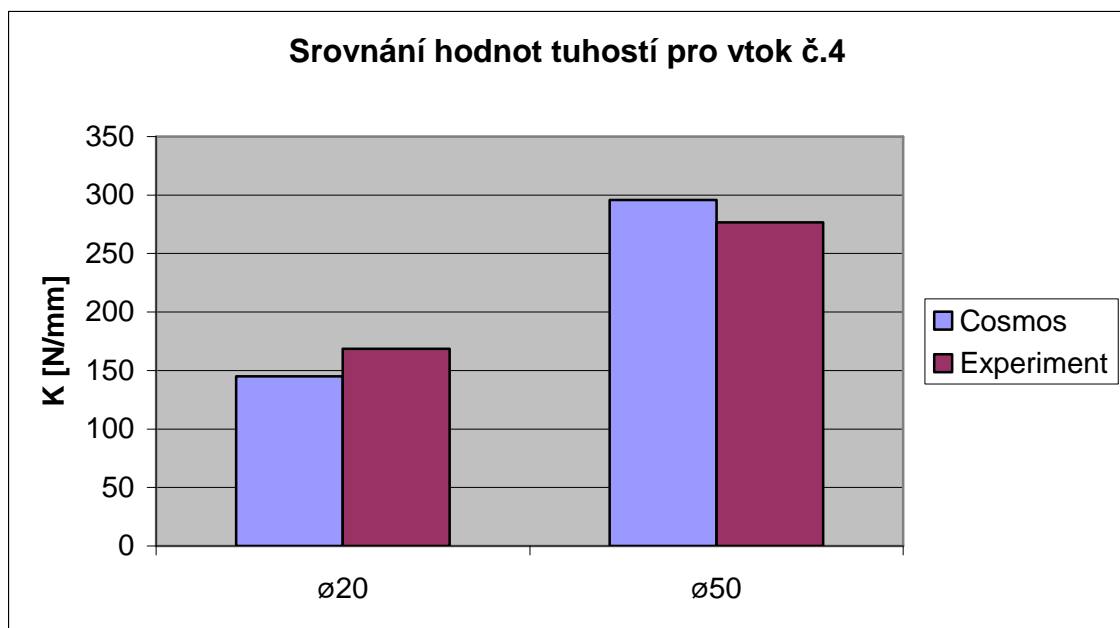
Obr. 61. Srovnání hodnot tuhostí z programu COSMOS

Na následujícím grafu je znázorněno porovnání hodnot tuhostí zjištěných programem COSMOS/M<sup>®</sup> s hodnotami vypočtenými z experimentálně zjištěných hodnot. srovnání je z důvodu přehlednosti rozděleno do dvou grafů. V grafu na obrázku číslo 62 jsou srovnány hodnoty *modelu B* s hodnotami *vtoku 3*. Na následujícím grafu na obrázku číslo 63 jsou srovnány hodnoty *modelu A* s hodnotami *vtoku 4*.





Obr. 62. Srovnání hodnot tuhostí pro vtok č.3



Obr. 63. Srovnání tuhostí pro vtok č. 4

## 12 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

### 12.1 Experimentálně získaná data

U tahové zkoušky se prokázal vliv orientace vláken na mechanické vlastnosti struktury. Rozdíly však nenabývají nijak významných hodnot. Obecně lze, tak jak se předpokládalo, říci, že vyšší modul je ve směru toku taveniny, tedy ve směru L. Nejvíce patrný je tento rozdíl u filmového vtoku, ale i zde je modul ve směru L pouze o 14 % vyšší, než ve směru T. Lze tedy říci, že při namáhání na tah u našich vzorků nebyly zjištěny významnější rozdíly které by bylo potřeba brát v úvahu.

Jiná situace je ovšem u tříbodové ohybové zkoušky. Zde byl opět nejvyšší rozdíl modulů ve směru L a T zjištěn u filmového vtoku. Hodnota modulu ve směru L byla u filmového vtoku o téměř 70 % vyšší, než hodnota modulu ve směru T. U ostatních použitých vtokových ústí byla vždy hodnota modulu ve směru L vyšší alespoň o 1/3 než hodnota modulu ve směru T. Takovýto výsledek už je potřeba brát v potaz při navrhování vstříkovaných výrobků plněných krátkými vlákny.

Třetí z prováděných mechanických zkoušek, ohyb do kulové plochy, je zkouškou nenormalizovanou a v tomto případě se jedná o hledání další z cest, jak zkoušet mechanické vlastnosti polymerů plněných krátkými vlákny. U této zkoušky se zejména u neplněných vzorků vyskytoval problém s velkými deformacemi vzorků. U žádného vzorku nedošlo ke klasickému porušení, ale byly zdeformovány do té míry, že vzorky vyklouzly z podpěr a tím byla zkouška ukončena. Také docházelo k velkým plastickým deformacím. Zejména u menších průměrů docházelo k jakémusi vytahování materiálu kolem zkušebního trnu.

### 12.2 Predikce chování struktur na základě strukturních modelů

V této části byly porovnány hodnoty zjištěné experimentálně s hodnotami vypočtenými na základě sestavených strukturních modelů. Srovnání hodnot ukazuje, že i přes značné zjednodušení struktury při tvorbě modelu nám mohou takto získané hodnoty pomoci vytvořit představu o mechanických vlastnostech plošných vstříkovaných prvků plněných krátkými vlákny. Hodnoty vypočtené lze brát jako určité hranice, mezi nimiž se pohybují hodnoty skutečné. Výhodou této metody je rychlost a jednoduchost, i když je potřeba si být vědom pouhé přibližnosti vypočtených výsledků.

### 12.3 FEM modelování

Výsledky získané modelováním v konečně prvkovém programu COSMOS/M<sup>®</sup> v podstatě nevykazují větší odchylky od hodnot zjištěných experimentálně a to i přes zjednodušení struktury. Model byl vytvořen tak, že se orientace vláken po tloušťce neměnila. To je v rozporu se skutečností. V případě takového způsobu zatěžování ovšem nehraje změna orientace po tloušťce nijak významnou roli. Tuto skutečnost lze vyvodit z porovnání hodnot tuhostí zjištěných experimentálně s hodnotami zjištěnými programem COSMOS/M<sup>®</sup>. Hodnoty vycházející z numerického modelování jsou nepatrně vyšší než hodnoty experimentální. Vzhledem k tomu lze říci, že pracnější sestavení přesnějšího modelu je v podstatě zbytečné. Tyto skutečnosti potvrzují pozici výpočetní techniky ve spojení s konečně prvkovými programy při vývoji výrobků.

## ZÁVĚR

Z experimentálně naměřených výsledků lze vyvodit, že vliv použitého vtokového ústí a tím i orientace vláken na mechanické vlastnosti vstřikovaných plošných výrobků plněných krátkými vlákny je při namáhání na tah zanedbatelný. Tahová zkouška prokázala rozdíly v hodnotách modulu pružnosti  $E$  ve směrech L a T u jednotlivých vtoků. Rozdíl se však pohyboval v rozmezí do 15%. Větší rozdíly se neprojeví ani při použití odlišných typů a umístění vtokových ústí. Zde činil rozdíl maximálně 20%. Naopak při namáhání ohybovém se ukázaly rozdíly velmi významné. Rozdíly v hodnotách naměřených modulů pružnosti  $E$  ve směrech L a T se pohybovaly od 30 do 60 %. Rozdíly mezi použitými vtoky opět nenabývaly významnějších hodnot a pohybovaly se do 20%. Z dosažených výsledků vyplývá, že vliv použitého vtokového ústí není nijak významný ve srovnání s tím, v jakém směru je výrobek namáhán. Zdáli jde o namáhání ve směru L, nebo namáhání ve směru T. Také je samozřejmě důležitý způsob namáhání. Jak již bylo uvedeno projevil se významný rozdíl při ohybové zkoušce, zatímco u zkoušky tahové byly naměřené rozdíly méně významné.

Tato diplomová práce srovnává tři metody, kterými je možno zjistit mechanické vlastnosti plošných vstřikovaných prvků plněných krátkými vlákny. Každá z těchto metod je odlišná od ostatních zejména co do pracnosti a časové náročnosti. Výpočtová metoda na základě zjednodušených modelů struktur podle očekávání byla sice metodou „nejjednodušší“, ale k jejím výsledkům je potřeba přistupovat, jako k přibližným hodnotám. Tato metoda je vhodná pro vytvoření si určité představy o mechanických vlastnostech dané struktury, ale její výsledky nejsou dostatečně přesné, aby na jejich základě mohly být výrobky dimenzovány.

Experimentální zjišťování mechanických vlastností plošných vstřikovaných prvků plněných krátkými vlákny je naopak velmi přesnou, ale zároveň velmi časově náročnou metodou. Přesné výsledky jsou v tomto případě vykoupeny celkovou náročností této metody. Jde nejen o časovou náročnost, ale také o náročnost na strojní vybavení ( vstřikovací stroj, zkušební stroj, ... ).

Daleko nejvhodnějším přístupem se podle očekávání stalo modelování v konečně prvkovém programu. Moderní konečně prvkové programy umožňují rychlé a přesné zjiš-

řování mechanických vlastností vstřikovaných prvků plněných krátkými vlákny. Při správně sestaveném modelu jsou výsledky této metody až překvapivě přesné.

Při experimentálním stanovení orientace vláken došlo k potvrzení předpokladu o vzniku vrstevnaté struktury u plošných vstřikovaných výrobků plněných krátkými vlákny. Tento výsledek potvrzuje správnost sestavených strukturních modelů.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] AGARWAL, B. D., BROUTMAN, L. J. *Vláknové kompozity*. Přeložil L. Sodomka. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987.
- [2] AKAY, M., BARKLEY, D. *Flow-aberrations and weld lines in glass-fibre reinforced thermoplastic injection moulding*. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 1993, roč. 20, č. 3.
- [3] BAREŠ, R. A. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988.
- [4] CHARRIER, J. M., DOSHI, S. R. *Structure-property relationships for short fiber-reinforced thermoplastics*. Antec, 1985.
- [5] FOLKES, M. J. *Short fibre reinforced thermoplastics*. Uxbridge: Brunel University, 1982. ISBN 0 471 10209 1.
- [6] HORÁKOVÁ, J. *Distribuce směrů a délek v kompozitech s krátkými vlákny*. Diplomová práce. Zlín: UTB ve Zlíně, 1995.
- [7] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [8] KOLAŘÍK, J. *Vysokomodulová polymerní vlákna a vláknové kompozity*. Praha: Academia, 1984.
- [9] LOUGHLIN, P. T., CHEN, CH., TUCKER, CH., L. *Properties of short fiber reinforced polymers*. Urbana: University of Illinois, 1981.
- [10] MAHESH, G., WANG, K, K. *Fiber orientation and mechanical properties of short – fibre – reinforced injection – molded composites: simulated and experimental results*. *Polymer Composites*, 1993, roč. 14, č.5.
- [11] MAREK, B. *Poruchy vstříkovaných výrobků studené spoje – vznik a vliv na kvalitě vylisků*. Zlín: UTB ve Zlíně, 2000.
- [12] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [13] PLUHAŘ, J. a kol. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL, 1989

- [14]SIDERIDIS, E. *The transverse elastic modulu sof fiber – reinforced composites as defined by the koncept of interphase*. Journal of Applied Polymer Science, 1993, roč. 48, č. 2.
- [15]ŠTĚPEK, J., ZELINGER, J., KUTA, A. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů*. Praha: SNTL / Alfa, 1989.
- [16]ŠUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*. 1. vyd. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005. ISBN 80-7318-287-4.
- [17]ŠUBA, O. *Modelování mechanických vlastností částicových kompozitů I. typu*. Disertační práce. Zlín: FT VUT, 1986.
- [18]ŠUBA, O., ŽALUDEK, M. *Stiffness Comparison of the Short Fibre Injection Moulded Specimen With Modelling Results*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [19]TALANDA, P. *Studium mechanických vlastností vstříkovaných polymerů plněných krátkými vlákny*. Diplomová práce. Zlín: UTB ve Zlíně, 2000.
- [20]TOMIS, F., HELFŠTÝN, J. *Formy a přípravky*. Praha: SNTL , 1985. skripta.
- [21]VALENDIN, M.. *Mechanické chování těles II*. UTB Zlín, 1999.
- [22]ŽALUDEK, M. *Modelování a studium mechanického a termomechanického chování kompozitních struktur na bázi vstříkované polymerní matrice*. Disertační práce. Zlín: FT UTB, 2002.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

a	Šířka vzorku.
ar	Redukovaná šířka.
d	Průměr vlákna.
$E_L$	Modul v tahu plně usměrněné struktury s vlákny v longitudinálním směru.
$E_T$	Modul v tahu plně usměrněné struktury s vlákny v transversálním směru.
$E_M$	Modul v tahu matrice
$E_N$	Modul v tahu neusměrněné struktury.
$E_{1/2}$	Modul v tahu struktury dle modelu d.
$E_{2/1}$	Modul v tahu struktury dle modelu c.
$E_{EL}$	Experimentálně získaný tahový modul v longitudinálním směru.
$E_{ET}$	Experimentálně získaný tahový modul v transversálním směru.
$G_{LT}$	Smykový modul.
h	Výška vzorku.
$J_R$	Kvadratický moment redukované plochy.
$K_{EL}$	Tuhost vypočtená z experimentálně zjištěných hodnot směr L..
$K_{ET}$	Tuhost vypočtená z experimentálně zjištěných hodnot směr T.
$K_L$	Tuhost plně usměrněné struktury směr L.
$K_T$	Tuhost plně usměrněné struktury směr T.
$K_{1/2}$	Tuhost modelu d.
$K_{2/1}$	Tuhost modelu c.
L	Označení směru toku taveniny.
L/D	Štíhlost vláken.
$L_{CR}$	Kritická délka vlákna.
S	Plocha průřezu vzorku.



---

$S_R$	Redukovaná plocha průřezu vzorku.
$T$	Označení směru kolmého na směr toku taveniny.
$y$	Vzdálenost těžiště plochy od neutrální osy.
$y_T$	Deformace ( průhyb ) v místě trnu.
$y_{max}$	Maximální deformace ( průhyb ).
$\sigma_x$	Napětí v ose x.
$\sigma_{p1}$	Osové napětí vlákna na mezi pevnosti.
$\gamma_{tp}$	Povrchová energie napětí na rozhraní tuhé a plynné fáze.
$\gamma_{tk}$	Povrchová energie rozhraní tuhé a kapalné fáze.
$\gamma_{kp}$	Povrchová energie rozhraní kapaliny a plynu.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Rozdělení kompozitních materiálů .....</i>	14
<i>Obr. 2. Skleněná vlákna .....</i>	15
<i>Obr. 3. Mikroskopický pohled na krátká vlákna .....</i>	17
<i>Obr. 4. Schématické znázornění fontánového toku .....</i>	21
<i>Obr. 5. Orientace vláken po tloušťce desky .....</i>	22
<i>Obr. 6. Vliv polohy vtoku na směr vláken .....</i>	23
<i>Obr. 7. Postup zaplňování dutiny formy .....</i>	23
<i>Obr. 8. Znázornění předpokládané „ vrstevnatosti“ .....</i>	24
<i>Obr. 9. Vliv podílu tloušťky stěny t na podíl tloušťek <math>t_1</math>, <math>t_2</math>, <math>t_3</math> a <math>t_4</math> jednotlivých vrstev u deskového výstřiku .....</i>	25
<i>Obr. 10. Lineárně elastické chování vlákna a matrice .....</i>	28
<i>Obr. 11. Lineárně elastické chování vlákna a pružně plastické chování matrice .....</i>	28
<i>Obr. 12. Zjednodušeně znázorněné napětí na mezi únosnosti vlákna .....</i>	30
<i>Obr. 13. Princip vzniku studeného spoje .....</i>	32
<i>Obr. 14. Řez studeným spojem .....</i>	32
<i>Obr. 15. Schematické znázornění vstřikovacího stroje .....</i>	36
<i>Obr. 16. Typy vtokových ústí .....</i>	38
<i>Obr. 17. Bodový vtok .....</i>	38
<i>Obr. 18. Tunelový vtok .....</i>	39
<i>Obr. 19. Filmový vtok .....</i>	40
<i>Obr. 20. Plný kuželový vtok .....</i>	40
<i>Obr. 21. Granulát polymerních materiálů Dow PP C767-07 a Scolefin 53G1 .....</i>	44
<i>Obr. 22. Zkušební tělísko .....</i>	44
<i>Obr. 23. Značení vzorků .....</i>	45
<i>Obr. 24. Směr řezání vzorků .....</i>	45
<i>Obr. 25. Směr řezání vzorků .....</i>	45
<i>Obr. 26. Směr řezání vzorků .....</i>	46
<i>Obr. 27. Směr řezání vzorků .....</i>	46
<i>Obr. 28. Vstřikovací stroj ARBURG 420 C .....</i>	46
<i>Obr. 29. Vstřikovací forma s výměnnou částí I .....</i>	47
<i>Obr. 30. Vstřikovací forma s výměnnou částí II .....</i>	47

Obr. 31. 2D zkouška čtvercové desky .....	50
Obr. 32. Graf maximální síly pro tahovou zkoušku .....	51
Obr. 33. Graf modulů pro tahovou zkoušku .....	52
Obr. 34. $F_{max}$ pro tříbodový ohyb .....	53
Obr. 35. Graf modulů pro tříbodovou ohybovou zkoušku .....	53
Obr. 36. Tuhost desek pro kulový ohyb $\phi$ 20 mm .....	54
Obr. 37. Tuhost desek pro kulový ohyb $\phi$ 30 mm .....	55
Obr. 38. Tuhost desek pro kulový ohyb $\phi$ 50 mm .....	56
Obr. 39. Srovnání tuhosti desek změřených pro různé průměry trnů .....	56
Obr. 40. Srovnání tuhosti desek změřených pro různé průměry trnů .....	57
Obr. 41. Modely struktur .....	58
Obr. 42. Modely a, b .....	59
Obr. 43. Redukce šířek modelu c .....	59
Obr. 44. Redukce šířek modelu d .....	60
Obr. 45. Graf srovnání hodnot E .....	61
Obr. 46. Graf srovnání hodnot E .....	62
Obr. 47. Modely a, b .....	63
Obr. 48. Redukce šířek modelů c, d .....	63
Obr. 49. Srovnání ohybových tuhostí struktur .....	64
Obr. 50. Řez vzorkem PP-4 L .....	65
Obr. 51. Modelové struktury .....	67
Obr. 52. Schéma 2D zkoušky desky .....	67
Obr. 53. Napětí ve směru L modelu A $\phi$ 20 mm .....	68
Obr. 54. Napětí ve směru T modelu A $\phi$ 20 mm .....	68
Obr. 55. Napětí ve směru L modelu A $\phi$ 50 mm .....	69
Obr. 56. Napětí ve směru T modelu A $\phi$ 50 mm .....	69
Obr. 57. Napětí ve směru L modelu B $\phi$ 20 mm .....	70
Obr. 58. Napětí ve směru T modelu B $\phi$ 20 mm .....	70
Obr. 59. Napětí ve směru L modelu B $\phi$ 50 mm .....	71
Obr. 60. Napětí ve směru T modelu B $\phi$ 50 mm .....	71
Obr. 61. Srovnání hodnot tuhostí z programu COSMOS .....	72
Obr. 62. Srovnání hodnot tuhostí pro vtok č.3 .....	73
Obr. 63. Srovnání tuhostí pro vtok č. 4 .....	73

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Teplota formy</i> .....	48
<i>Tab. 2. Teploty pásem šneku</i> .....	48
<i>Tab. 3. Technologické parametry</i> .....	48
<i>Tab. 4. Maximální síla pro jednotlivé vzorky – tah</i> .....	51
<i>Tab. 5. Modul pružnosti pro jednotlivé vzorky – tah</i> .....	52
<i>Tab. 6. Maximální síla pro jednotlivé vzorky – tříbodový ohyb</i> .....	52
<i>Tab. 7. Modul pružnosti pro jednotlivé vzorky - tříbodový ohyb</i> .....	53
<i>Tab. 8. Výsledky pro PP+ 30% GF– 2D zkouška desky <math>\phi</math> 20 mm</i> .....	54
<i>Tab. 9. Výsledky pro PP+ 0% GF– 2D zkouška desky <math>\phi</math> 20 mm</i> .....	54
<i>Tab. 10. Výsledky pro PP+30% GF – 2D zkouška desky <math>\phi</math> 30 mm</i> .....	55
<i>Tab. 11. Výsledky pro PP+0% GF – 2D zkouška desky <math>\phi</math> 30 mm</i> .....	55
<i>Tab. 12. Výsledky pro PP+30% GF – 2D zkouška desky <math>\phi</math> 50mm</i> .....	55
<i>Tab. 13. Výsledky pro PP+0% GF – 2D zkouška desky <math>\phi</math> 50mm</i> .....	56

## SEZNAM PŘÍLOH

**P I.** Materiálové listy.

# PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÉ LISTY

MATERIÁLOVÝ LIST

výrobce:  
RP COMPOUNDS

## SCOLEFIN PP 53G10-0

### Charakteristika:

PP homopolymer s 30% skl. vláken vhodný pro vstřikování (ideální pro tenkostěnné díly);  
v natural odstínu.

Tento typ se vyznačuje:

- vysokou tekutostí
- vysokou tepel. odolností
- vysokou rázovou pevností i při nižších teplotách
- vysokou pevností v tahu

### Aplikace:

Mezi hlavní aplikace patří např. tenkostěnné mechanické díly či díly pro automobilový průmysl.

VLASTNOSTI		NORMA	JEDNOTKA	HODNOTA
Hustota		ISO 1183B	g/cm <sup>3</sup>	1,12
Index toku taveniny	230°C/2,16 kg	ISO 1133	g/10 min	15
Popel	625°C	DIN EN 60	%	30
<b>Mechanické</b>				
Pevnost v tahu	5 mm/min	ISO 527	MPa	90
Modul pružnosti v tahu		ISO 527	MPa	6800
Tvrdość vlačováním kuličky		DIN ISO 2039/1	MPa	115
Rázová houževnatost Charpy	+23°C	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	42
Vrubová houževnatost Charpy	+23°C	ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	10
<b>Tepelné</b>				
Teplota průhybu při zatížení	1,82 MPa	DIN EN ISO 75	°C	145
<b>Zpracovatelské</b>				
Teplota taveniny			°C	200-240
Teplota formy			°C	40-60
Sušení			°C	není nutné

### Poznámka:

Tyto hodnoty jsou prezentovány jako průměrné laboratorně změřené hodnoty materiálu. Jsou určeny pouze jako informativní hodnoty a ne jako prodejní specifikace. Nedílnou součástí tohoto překladu materiálového listu je originální materiálový list firmy RP Compounds (výrobce PP compounds SCOLEFIN\*), který je v případě odlišností směrodatný.

\* Obchodní značka RP Compounds GmbH



**C767-07****PP****Charakteristika:**

DOW PP C767-07 je rázuvzdorný kopolymer polypropylenu pro vstřikování, který se vyznačuje excelentní vyvážeností mechanických a zpracovatelských vlastností.

**Aplikace:**

- hračky, zavazadla
- výrobky pro domácnost, nábytek
- technické výlisky
- bedny, krabice

VLASTNOSTI		NORMA	JEDNOTKA	HODNOTA
<b>Fyzikální</b>				
Index toku taveniny	230°C / 2,16 kg	ISO 1133	g/10 m in	7
Hustota		ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	0,9
<b>Mechanické</b>				
Pevnost v tahu na mezi kluzu		ISO 527	MPa	26
Prodloužení na mezi kluzu		ISO 527	%	10
Modul pružnosti v ohybu		ISO 178	MPa	1200
Vrubová houževnatost CHARPY	+23°C	ISO 179-1/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	13
Vrubová houževnatost CHARPY	-20°C	ISO 179-1/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	4,5
<b>Tepelné</b>				
Teplota průhybu při zatížení	0,46 MPa	ISO 75B	°C	88
Teplota měknutí Vicat	10 N	ISO 306A	°C	151

**Poznámka:**

Tyto hodnoty jsou prezentovány jako průměrné laboratorně změřené hodnoty materiálu. Jsou určeny pouze jako informativní hodnoty a ne jako prodejní specifikace. Nedílnou součástí tohoto překladu materiálového listu je originální materiálový list firmy Dow, který je v případě odlišností směrodatný.

**Zdravotní nezávadnost:**

Tento materiál splňuje požadavky pro styk s poživatiny EU a jejich členských států stejně jako normu FDA, jsou-li dodrženy standardní zpracovatelské podmínky a materiál není zpracovatelem modifikován. Prosíme kontaktujte prodejce tohoto materiálu pro získání certifikátu o zdravotní nezávadnosti.

\* Obchodní značka The Dow Chemical Company

