

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEPELNÁ V LIBERCI  
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Obor 23-07-08

Strojírenské technologie

zaměření

tváření kovů a plastických hmot

Katedra tváření a plastů

ANALÝZA ZÁVISLOSTI MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ  
KOMPENZITU NA MAKROSTRUKTUŘE

Jan Jon

KPT - 363

Vedoucí práce: ing. Josef Krebs CSc KPT

Konzultent: -"-

Rozsah práce a příloh:

Počet stran ... 44

Počet příloh ... 0

a tabulek ... 7

Počet obrázků ... 11

Datum 10. 5. 1988

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI  
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní  
Obor 23-07-08

Strojírenská technologie  
zaměření  
tváření kovů a plastických hmot  
Katedra tváření a plastů

ANALÝZA ZÁVISLOSTI MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ  
KOMPCZITU NA MAKROSTRUKTUŘE

Jan Jon

KPT - 363

Vedoucí práce: ing. Josef Krebs CSc KPT  
Konzultant: -"-

Rozsah práce a příloh:

Počet stran ... 44  
Počet příloh ... 0  
a tabulek ... 7  
Počet obrázků ... 11

Datum 10. 5. 1988  
.....

Škola

# ŘADNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROFESNÍ OBOR INŽENÝR DÍLA (MAGISTERSKÝ VÝKON))

A. JANA J. O. N. A.

23. 09. 88 Strojníková technologie

Vážený pane, Vám ve svolání Řádní vlády ČSSR č. 107/1988 Sb. a státních závěrečných zkoušek a státních rigorózních zkoušek, určuje tuto diplomovou práci.

Název práce: **Analýza závislosti mechanických vlastností kompozitů na mikrostruktuře.**

Úkoly pro vypracování:

- 1) Charakterizujte polymerové kompozity s termoplastickou matricí.
- 2) Analyzujte vliv vlastité výstavby na vlastnosti kompozitových materiálů.
- 3) Navrhněte teoretické mechanické výstupy závislosti mechanických vlastností na ohledem na mikrostrukturu makrostrukturu závislosti a technologických parametru a určité vytříkovací metody.
- 4) Teoreticky navrhněte a vyrobte tělesa vyrobená vytříkovaně.

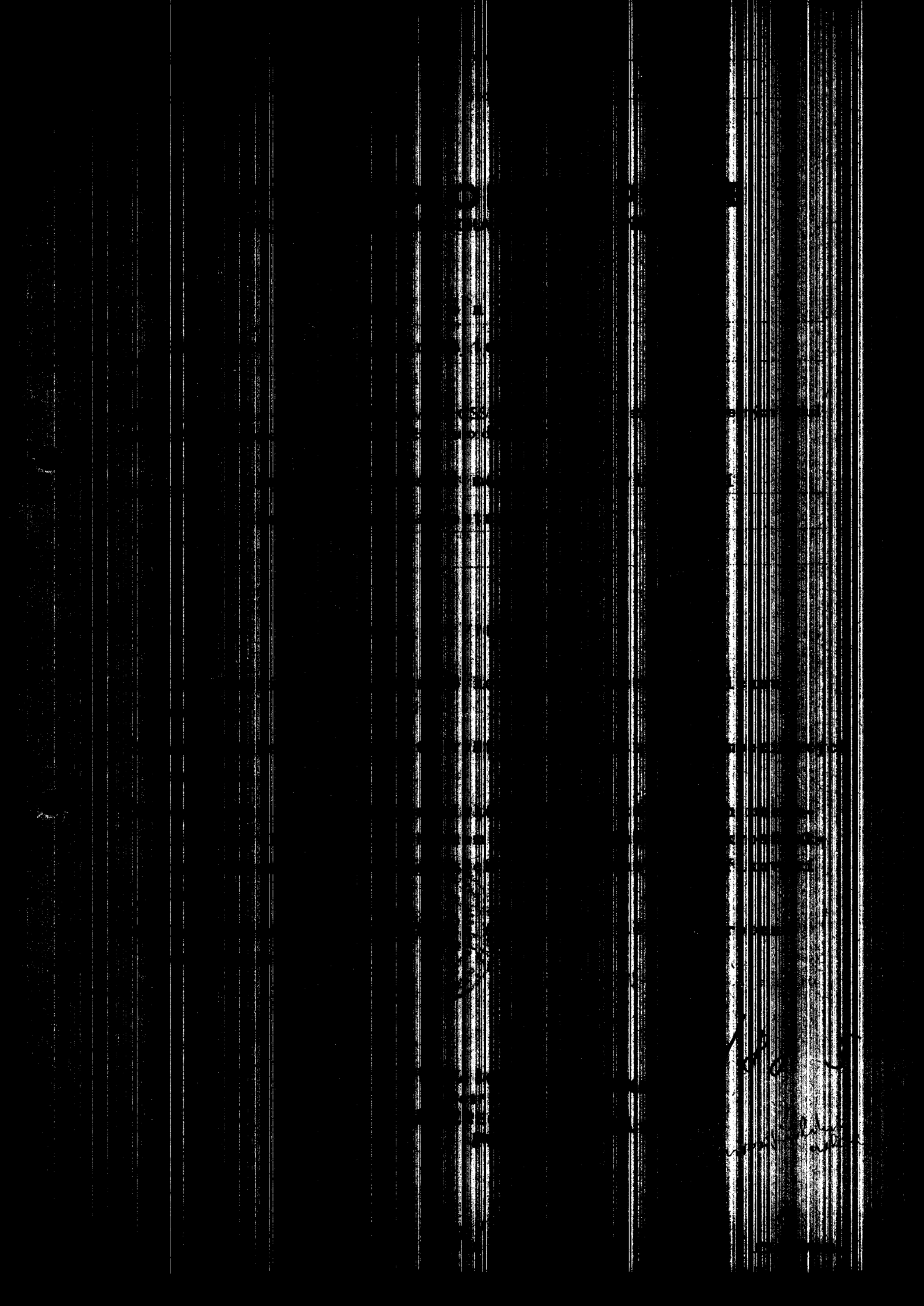
VYKONAL  
 MGR. A. JANA J. O. N. A.  
 ÚSTAV STROJNÍKOVÉ  
 TECHNOLIE  
 ČVUT  
 PRAGUE

210/88 5

Kompozitová technika

OPT/

121 2472/88





Vysoká škola: strojí a textilní Fakulta: strojí  
Katedra: tvářenářství a plastů Školní rok: 1987/88

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro s. Jana Jóna  
obor 23 07 - S Strojářská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: analýza závislosti mechanických vlastností  
kompozitů n. mikrostruktury.

### Zásady pro vypracování:

- 1) Charakterizujte polymerové kompozity s termoplastickou maticí.
- 2) Analyzujte vliv vláknité výtvarné struktury na vlastnosti kompozitů v součinnosti.
- 3) Navrhněte metodiku teoretického výpočtu základních mechanických vlastností s ohledem na předpokládanou mikrostrukturu odvozenou z geometrických poměrů v dutině vstříkací formy.
- 4) Teoretické řešení aplikujte na modelové těleso vpravené vstříkací formou.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 6  
PSČ 461 17

Vysoká škola: strojní a textilní Fakulta: strojní  
Katedra: tváření a plastů Školní rok: 1987/88

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro s. Jana Jóna  
obor 23 07 - 8 Strojírenská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Analýza závislosti mechanických vlastností  
kompozitů na makrostruktuře.

Zásady pro vypracování:

- 1) Charakterizujte polymerové kompozity s termoplastickou maticí.
- 2) Analyzujte vliv vláknité výztuže na vlastnosti kompozitových součástí.
- 3) Navrhněte metodiku teoretického výpočtu základních mechanických vlastností s ohledem na předpokládanou makrostrukturu odvozenou z reologických poměrů v dutině vstříkovací formy.
- 4) Teoretické řešení aplikujte na modelová tělesa vyrobená vstříkovaním.

V 210/88 5

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 8  
PSČ 461 17

Rozsah grafických prací: cca 40 stran

Rozsah průvodní zprávy:

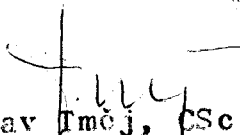
Seznam odborné literatury:

- 1) Gibson, A.G.: Injektion moulding of Lang-fibre reinforced materials. Sborník Fibre reinforced Composites 1984.
- 2) Sborník Kompozitní materiály, ČSAV Praha, 91
- 3) Olaste and Kautschuk, roč. 1974, č. 5 a 1975
- 4) Keebs, J.: Teorie a technologie zpracování plastů. Skripta VŠST, Liberec 1981.


Vedoucí diplomové práce: Ing. J. Krebs CSc.

Datum zadání diplomové práce: 11. 9. 1987

Termín odevzdání diplomové práce: 10. 5. 1988

  
Doc. Ing. Jaroslav Imčej, CSc.

Vedoucí katedry

  
Prof. Ing. Vladimír Prášil, DrSc.

Děkan

V Liberci dne 12. 9. 1987



"Vědomě a svědomě prohlášení, že jsem diplomovou práci  
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury".

V Liberci 10. 5. 1988

Jan Jan

*Jan Jan*

"Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci  
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury".

V Liberci 10. 5. 1988

Jan Jon

*Jan Jon*

## O B S A H

	strana
Seznam zkratek a symbolů	5
1. ÚVOD	6
2. TEORETICKÁ ČÁST	7
2.1. Plněné a vyztužené plasty	7
2.1.1. Vlastnosti vláken	8
2.1.2. Úloha matrice	10
2.2. Makrostruktura vstřikovaných desek	10
2.3. Makrostruktura vstřikovaných dutých vřlcových těles	12
2.4. Makrostruktura vstřikovaných pravouhlých tyčí	13
2.4.1. Popis makrostruktury pravouhlé tyče	13
2.4.2. Vliv makrostruktury na mechanické vlastnosti	17
2.5. Teorie přenosu napětí v krátkovláknových usměrněných kompozitech	23
3. NÁVRH POSTUPU VÝPOČTU	26
3.1. Výpočet eliptického paraboloidu	26
3.2. Výpočet orientačního faktoru vláken	30
3.3. Výpočet mechanických vlastností vstřikovaných tyčí	32
4. APLIKACE NÁVRHU VÝPOČTU	33
4.1. Výsledky výpočtů mechanických vlastností	33
4.2. Vliv délky vlákna na mechanické vlastnosti	39
4.3. Vliv průměru vlákna na mechanické vlastnosti	40
5. ZÁVĚR	42
Literatura	44



## 1. ÚVOD

Plasty nacházejí v současné době uplatnění ve všech oblastech lidské činnosti. Významné místo zaujímají zejména ve strojírenství, které v průmyslově vyspělých státech spotřebuje asi jednu třetinu všech plastů.

V praxi jsou na technické výrobky kladeny z funkčního hlediska nejrůznější požadavky, protože jsou často vystaveny složitému namáhání mechanickému, tepelnému a popřípadě i chemickému. Ve strojírenství se od výrobků zpravidla požaduje určitá pevnost při statickém nebo dynamickém namáhání, elasticita a tuhost, dodržení rozměrových tolerancí a rozměrové i tvarové stability při zvýšené nebo nácek snížené teplotě.

Jedním ze způsobů jak dosáhnout požadovaných vlastností je přidání plniv do polymeru. Jako plniva jsou v současné době nejrozšířenější vlákna skleněná, uhlíková, v menší míře kovová a azbestová. Taveniny termoplastů, obsahující skleněná vlákna, se chovají při vstřikování v některých směrech odlišně než nevyztužené plasty. Situace je komplikována tím, že skutečný výstřik není jednoduchého tvaru.

Při odhadu struktury výstřiku je nutno vycházet z rozboru vstřikovacího cyklu. Z této struktury je potom možno předpovědět základní mechanické vlastnosti daného výrobku. Je však nutno podotknout, že se jedná o problematiku nespírně náročnou a vzhledem k relativně velmi mladému oboru, jakým vstřikování termoplastických kompozitů bezesporu je, nebyla dosud vypracována dostatečně spolehlivá teorie výpočtu. Jedno z možných řešení předkládá i tato práce.

*vstřik. postup. → plast. pl. → mech. vlastnosti*

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1. Plněné a vyztužené plasty

Jedním z nejprogresivnějších směrů současného chemického průmyslu je příprava a zpracování polymerů plněných anorganickými nebo organickými plnivými. Plněné plasty řadíme mezi kompozity. Slovo kompozit znamená vytvořený či skládaný se ze dvou nebo více odlišných částí. Materiál mající dvě nebo více odlišných materiálových složek neboli fází, je podle toho tedy složeným materiálem. Jen tehdy, když mají vytvářející fáze značně rozdílné fyzikální vlastnosti, a tudíž i vlastnosti složeného materiálu jsou zřetelně vyšší než vlastnosti jeho složek, označujeme takový materiál jako kompozit.

V současnosti patří mezi nejvýznamější kompozity vláknitou výztuží a polymerní maticí. Úkolem výztuže je zajistit výslednému materiálu požadovanou pevnost a tuhost, polymerní matrice zajišťuje jeho kompaktnost a tvarovatelnost. Tak je možné využít současně předností vláknitých materiálů, jako je jejich vysoká pevnost a tuhost při relativně nízké měrné hmotnosti, se snadnou zpracovatelností, které je charakteristické pro materiály polymerní.

Vytvářením kompozitních systémů tak mohou být příznivě ovlivňovány vlastnosti jako jsou: mechanická pevnost, tuhost, odolnost proti korozi, odolnost proti opotřebení, únavová pevnost, vrubová citlivost, tepelná odolnost, tepelná vodivost a roztežnost. Kompozitní materiály také často přejímají některé nežádoucí vlastnosti svých složek. Tak pevnost a tuhost kompozitů s vláknitou výztuží závisí na orientaci výztuže. Je-li výztuž uložena v kompozitu v jednom směru, nabývá materiál v tomto směru, díky výztuži, mimořádně vysoké pevnosti a tuhosti, ale ve směru kolmém k vláknům o vlastnostech kompo-

zitu rozhodují vlastnosti matrice, které jsou výrazně nižší. Matrice jako polymerní materiál se vyznačuje tzv. reologickým chováním, tj. její pevnost a deformace závisí nejen na namáhání, ale také na čase. Toto reologické chování přejímají také kompozity.

Kompozitní materiály můžeme klasifikovat z několika hledisek: materiálu výztuže, materiálu matrice, z hlediska technologie zpracování. Nejčastěji se kompozity dělí podle materiálu výztuže na kompozity / lamináty / skleněné, bórové, uhlíkové, beriliové. Méně časté je dělení kompozitů podle typu matrice pro něž se používají termoreaktivní polymery jako epoxidové, polyesterové, fenolické, melamínové, silikonové, apod., ale v poslední době se prudce rozvíjejí i kompozity na bázi termoplastických maticí jako polyamidové, polykarbonátové, polyetylenové. [1]

#### 2.1.1. Vlastnosti vláken

Vlastnosti vláken závisí na dokonalosti jejich struktury a na její orientaci. Ta je tím vyšší, čím menší je průřez vlákna. Teoretické pevnosti se blíží krátká vlákna ve formě monokrystalů, které jsou nazývána whiskery. Nižší reálné pevnost je způsobena nenomogenní a defektní strukturou, nejvýrazněji se projevují defekty povrchové, způsobující lokální koncentrace napětí. Pevnost bude záviset na délce vlákna. Rozdělíme-li dlouhé vlákno na kratší a stanovíme jejich pevnosti, pak průměrná pevnost krátkých vláken bude vyšší než pevnost vlákna dlouhého.

Vlákna jako zpevňující složku kompozitních materiálů je možné rozdělit do následujících skupin:  
Skleněná vlákna představují cenově nízkou složku, které je typické pro zpevňování matic z plastů. Tenká vysokopevná skleněná vlákna se vyrábějí protlačováním kapalného skla otvorem 2,5 mm s následujícím rychlým tahem na průměr asi 0,1mm.

Keramické vlákna. S rozvojem nových oblastí techniky vznikla potřeba vyvinout vlákna s co největší pevností a houževnatostí i při zvýšených teplotách. Dalším požadavkem je nízká měrná hmotnost vláken. Těmto požadavkům vyhovují keramické materiály. Patří sem především uhlíkové a bórové vlákna, vlákna vyrobené z různých karbidů, z nitridu bóru a z oxidů různých prvků. Většina z nich má vysoké fyzikální a chemické vlastnosti, jsou žáruvzdorná.

Whiskery v současné době představují vrchol ve zpevnění. Jsou to monokrystaly průměru asi  $10^{-5}$  mm a délky několika milimetrů s téměř dokonalým uspořádáním atomů. Růst whiskerů je pomalý proces a práce s nimi velmi náročná. Tyto faktory ovlivňují jejich vysokou cenu. [2]

Tab.I. Mechanické vlastnosti vláknitých výztuží [3]

Materiál	Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Mez pevnosti v tahu $\sigma_m$ Rm [GPa]	Hustota [g.cm <sup>-3</sup> ]
Grafit	390,0	2,1	1,9
Bór	385,0	2,8	2,63
Křemen	72,4	5,8	2,19
Wolftram	414,0	4,2	19,30
Kevlar	130,0	2,8	1,5
Ocel	210,0	0,34 až 2,1	7,8
Sklo	70,0	0,14 až 0,62	2,5

C- mlb. 100



## 2.1.2. Úloha matrice

Úloha polymerní matrice v kompozitu spočívá v podstatě v zajištění monolitosti materiálu a jeho schopnosti vytvářet potřebný tvar součásti. Mají-li být vlastnosti kompozitu co nejlepší, musí se vlastnosti výtvaru a matrice vzájemně dobře doplňovat. Pro získání optimálních vlastností musí mít matrice tažnost vždy o něco větší než vyztučující vláknité plnivo, které má mít vysokou pevnost a modul pružnosti. Důležitou roli má též soudržnost mezi polymerní matricí a vlákny. Při mechanickém namáhání je právě toto rozhraní zdrojem nejprve mikroskopických, později makroskopických poruch, které se rozšiřují do trhlin a způsobují lom.

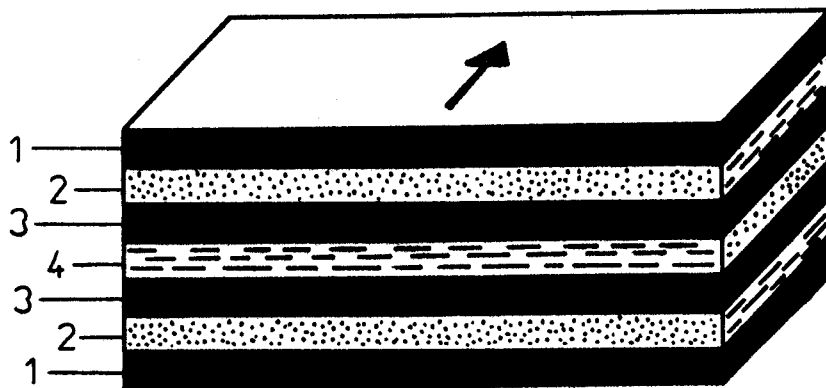
Je tedy nezbytné, aby matrice plnila následující funkce, které lze obecně charakterizovat takto:

- spojuje vlákna v kompaktní celek
- zprostředkuje nahášení vlákna v místě porušení
- odděluje vlákna, a tím zabraňuje spojitému šíření trhlin
- chrání vlákna před vnějšími vlivy
- vytváří dokonalý povrch výrobku.

Jako matrice mohou sloužit nejrůznější materiály, jako jsou termoreaktivní i termoplastické polymery, kovy a jejich slitiny, keramické materiály. [1]

## 2.2. Makrostruktura vstřikovaných desek

Při vstřikování deskového vstřiku s bočním štěrbinovým vtokem se v dostatečné vzdálenosti od vtoku i od bočních stěn vytváří charakteristická makrostruktura složená ze čtyř vrstev. V každé z nich jsou vlákna uspořádána typickým způsobem, odlišujícím se navzájem jednak směrem orientace vláken, jednak stupněm orientace.



Obr. 1: Schéma uložení vrstev ve výstřiku tvaru desky

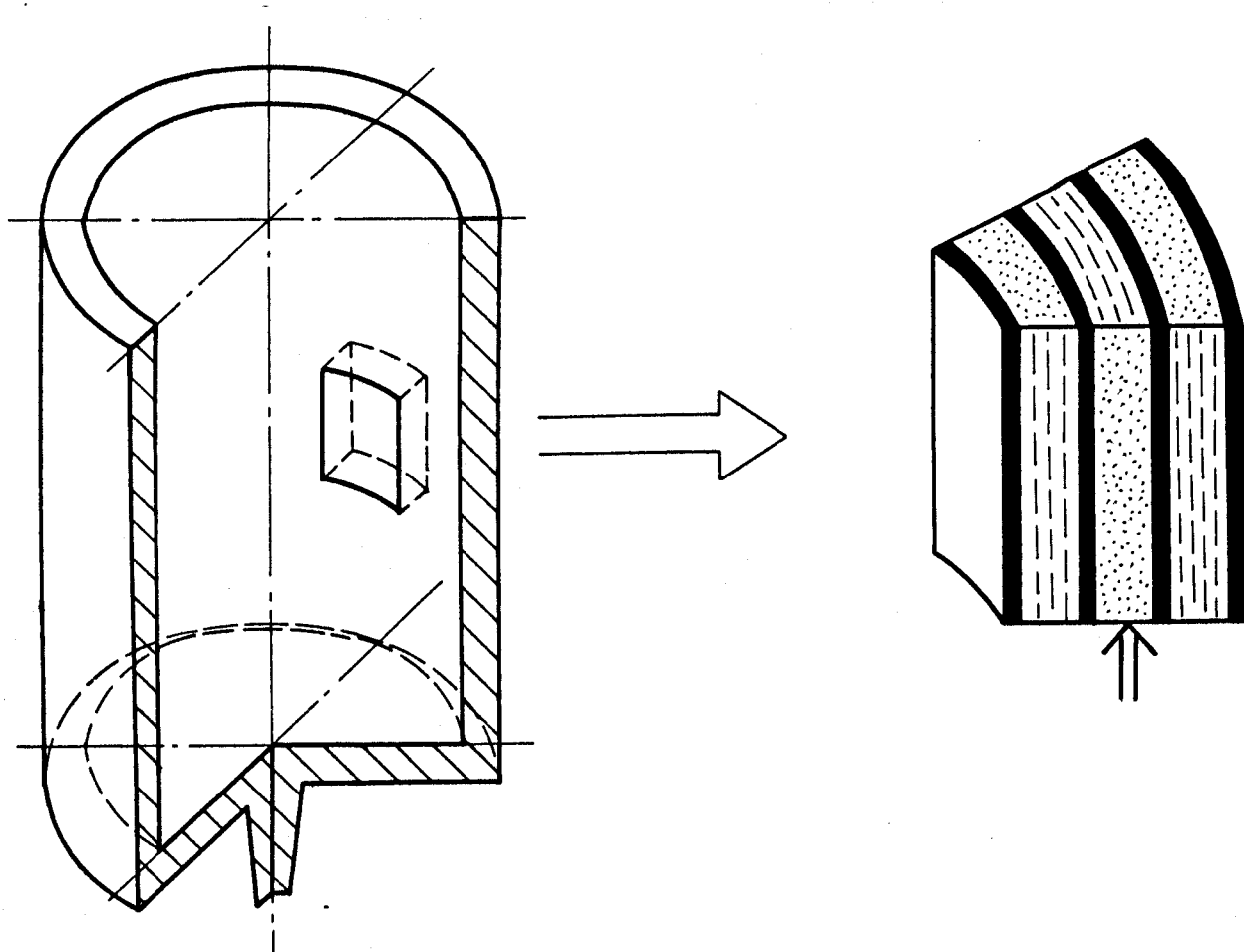
Tenké povrchové vrstvy obsahují vlákna, uložené zcela chaoticky, tedy bez přednostního směru orientace. Ve druhé vrstvě jsou vlákna orientována téměř výhradně do směru toku tečeniny. Tloušťka této vrstvy s podélnou orientací vláken **je přímo** úměrná viskozitě tečeniny polymeru a zvětšuje se např. snížením vstřikovací teploty. Stejný účinek má i snížení rychlosti plnění dutiny formy, např. snížení vstřikovacího tlaku. Třetí vrstva, která je homogenně orientovaná, opět nevykazuje přednostní směr orientace vláken, nýbrž vlákna leží zcela náhodně. Čtvrtá vrstva se nachází uvnitř výstřiku a v ní jsou vlákna přednostně orientována kolmo ke směru toku tečeniny. Tloušťka této vrstvy závisí v rozhodující míře na celkové tloušťce stěny výstřiku, s rostoucí tloušťkou stěny se zvětšuje. Všechny tyto vrstvy jsou symetrické ke středové rovině a směrem ke druhému povrchu stěny se zrcadlově opakuje. Přejítí jedné vrstvy ve druhou ovšem není ostré, nýbrž jedna vrstva přechází ve druhou zcela plynule.

Protože mechanické vlastnosti plastových dílů s vláknitými plnivými jsou jiné ve směru vláken a jiné ve směru kolmém,

je zřejmé, že výsledná vlastnost je určována především poměrem vlastnosti vrstvy 2 a 4. Uspořádanost vláken v jednotlivých vrstvách ovšem není zcela dokonalá. Vedle vláken, jejichž poloha odpovídá přednostnímu směru orientace, jsou přítomna vlákna ležící v jiném směru. To vše způsobuje, že na konečné hodnotě určité mechanické vlastnosti se podílejí všechny vrstvy. [4]

### 2.3. Makrostruktura vstřikovaných dutých válcových těles

Dutý válec vlastně odpovídá stočené desce. Rušivé vlivy, jako důsledek smykových sil na okraji, však odpadají a plnění dutiny formy probíhá po obvodu zcela rovnoměrně. Zkoumání struktury ukázalo, že po krátké náběhové dráze u ústí vtoku probíhají jednotlivé ohrazené vrstvy s ohledem na přednostní směr orientace již dále rovnoměrně po délce válce. Poruchy této orientace se projevují teprve na konci dráhy toku, když tavenina nerazí na okraj dutiny formy. Jestliže však se válec vstřikuje štěrbinovým ústím vtoku, umístěným kolmo k ose válce na jeho boku, vzniká na základě změněného směru toku při plnění dutiny formy místně jiná struktura. Skleněná vlákna jsou uspořádána převážně rovnoběžně s povrchem dílce ve směru toku taveniny nebo kolmo k němu. V náběhové dráze u ústí vtoku a v místě styku dvou dílčích tekoucích proudů proti ústí vtoku se však téměř všechna vlákna orientují kolmo ke směru toku. Taková orientace ruší radiální symetrii makrostruktury a vytváří při odpovídajícím namáhání dílce slabé místo. [5]



Obr. 2: Uspořádání vrstev v dutém válcovém tělese vstříkovaném z PA 6 vyztuženého krátkými skleněnými vlákny

*voříšle*

2.4. Makrostruktura vstříkovaných pravoúhlých tyčí

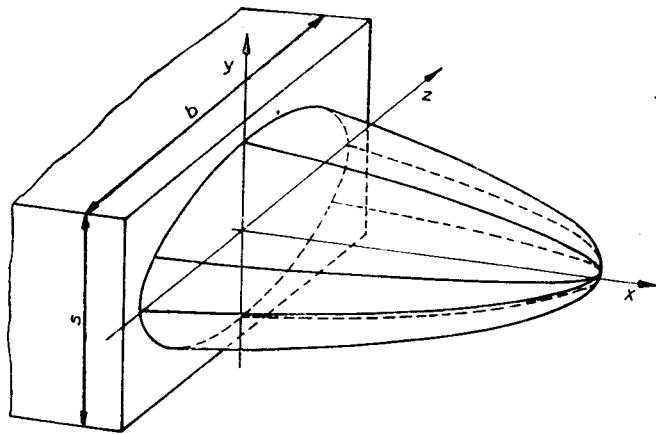
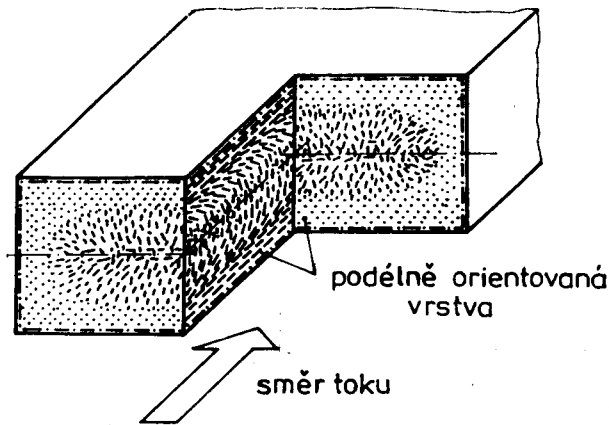
2.4.1. Popis makrostruktury pravoúhlé tyče

Vstříkované desky z termoplastů, vyztužených skleněnými

vlákny, mají charakteristickou makrostrukturu ve tvaru desek, rovnoběžně ležících rovinných vrstev skleněných vláken. Zcela jinou makrostrukturu mají výstřiky ve tvaru pravouhlé tyče, vystřikované štrbinovým vtokem z užší strany, to znamená obecně s obdélníkovým průřezem o šířce  $b$  a tloušťce  $s$ . Jako důsledek nízkého poměru  $b/s$  se vytváří kvalitativně i kvantitativně odlišná makrostruktura než u desky, totiž struktura prostorová. Okrajové vrstva na povrchu obsahuje vlákna jen slabě podélně orientované po ní se nachází vrstva se silnou podélnou orientací a v jádru průřezu pak je uspořádanost vláken prostorová.

Zatímco uspořádanost vláken v obou vnějších vrstvách lze dobře popisat strukturálními charakteristikami shodným způsobem jako u desky, jsou poměry u vnitřní zóny podstatně složitější. Měření na výbrusech ukázala, že poloha vláken dobře odpovídá kvadratickým parabolám, jejichž ortogonální trajektorie jsou elipsy. Zvláštním případem ovšem může být kružnice. Tyto poměry jsou znázorněny na obr. 3.

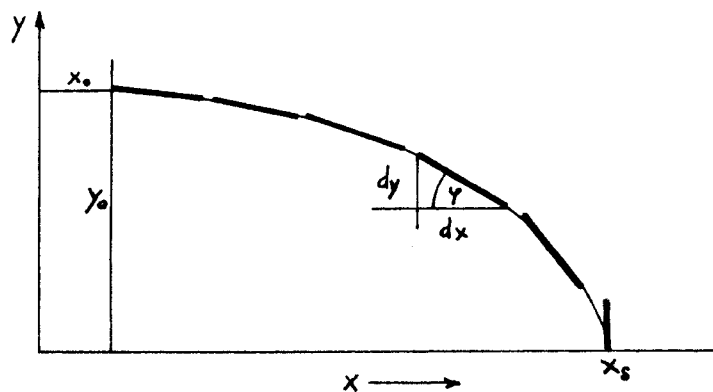
Ideálně vzato, leží vlákna jako prostorový útvar na ploše pláště souboru vzájemně následujících eliptických paraboloidů, zvláštním případem může být rotační paraboloid, který se vytvoří při kruhovém a přibližně i při kvadratickém průřezu tyče. Na obr. 3. dole je znázorněno uspořádání vláken ve střední oblasti pravouhlého průřezu. Uspořádání vláken může být tedy kvantifikováno vhodnými analytickými vztahy a tudíž převedeno na výpočetní model.



Obr. 3: Uspořádanost vláken a schéma eliptického paraboloidu ve střední zóně vstříkované pravouhlé tyče

K analytickému popisu uspořádání skleněných vláken ve střední zóně budeme, na základě vyhodnocení výbrusů, vycházet z toho, že skleněná vlákna vytvářejí kvadratickou parabolu,

Jak je znázorněno na obr. 4. Protože se paraboly musí vytvořit po celém obvodu elipsy, musí být k analytickému popisu použity polární souřadnice.



Obr. 4: Směřovost vláken kvadratické paraboly

Dostatečné platnosť modelu byla potvrzena na výbrusech měřených polacos elipsy  $y_0$  a  $z_0$ , platí pro elipsu v rástě  $x_0$  rovnice:

$$r_0(\alpha) = \frac{1}{\frac{\cos^2 \alpha}{z_0^2} + \frac{\sin^2 \alpha}{y_0^2}} \quad (1)$$

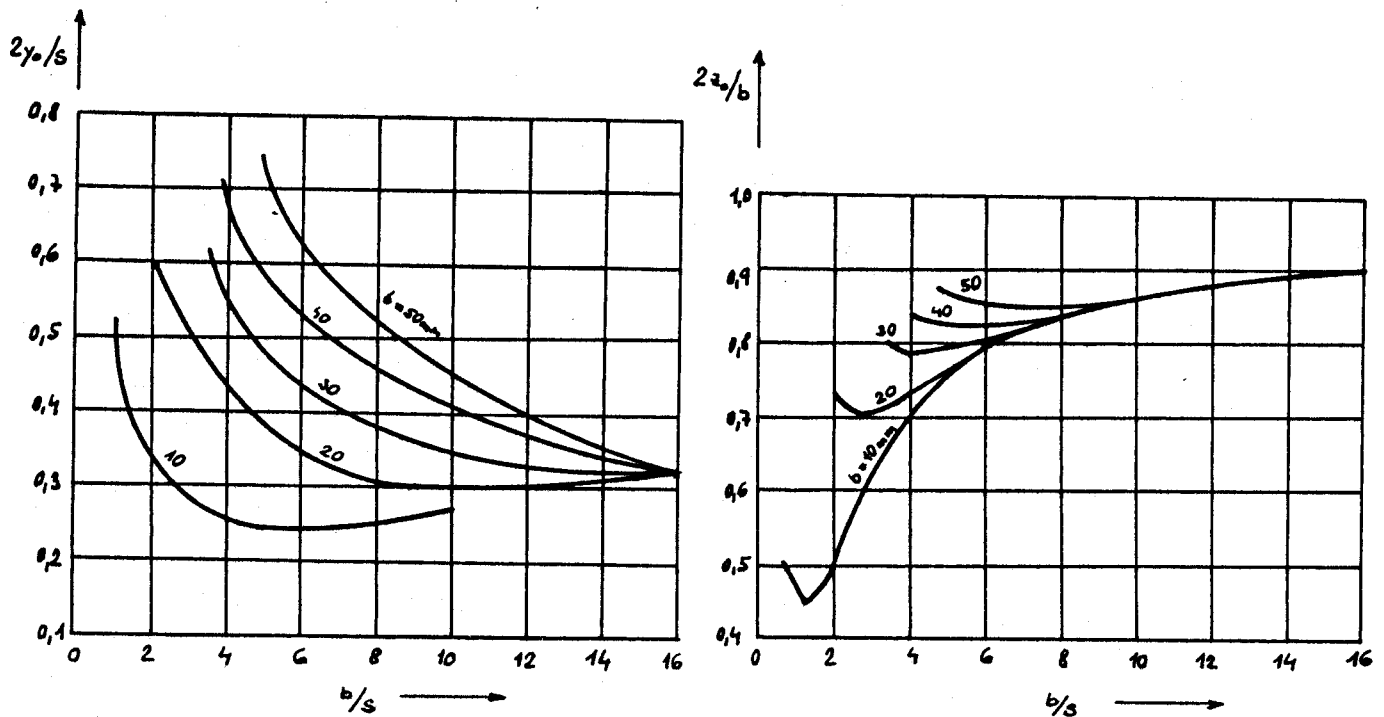
pro parametr paraboly  $2p$ :

$$2p(\alpha) = \frac{r(\alpha, x)^2}{x_s - x} \quad (2)$$

## 2.4.2. Vliv makrostruktury na mechanické vlastnosti

Mezi rozměry pravoúhlých trajektorií eliptických paraboloidů - tedy poloos elipsy, a rozměry příslušného pravoúhlého průřezu existují za konstantních technologických podmínek při vstřikování jedroznačné závislosti. To ukazuje regresní analýza, které dává pro hodnotu  $y_0$  a  $z_0$  míru pravděpodobnosti  $P = 0,99$ .

Získané rovnice jsou v obr. 5. graficky vyhodnoceny. Při tom jsou poloosy elipsy  $y_0$  vztaženy na tloušťku  $s$ ,  $z_0$  na šířku  $b$  pravoúhlého průřezu a vyneseny v závislosti na poměru  $b/s$ . Znárodnění je přitom omezeno na technicky zajímavý rozsah. Jak je dále z obr. 5. patrné, relativní podíl malé poloosy  $2y_0$  na tloušťce stěny tyče v uvažovaném rozsahu s rostoucím poměrem  $b/s$  v podstatě klesá. Podíl velké poloosy  $2z_0$  na šířce tělesa  $b$  naopak vzrůstá při zvětšujícím se poměru  $b/s$ .



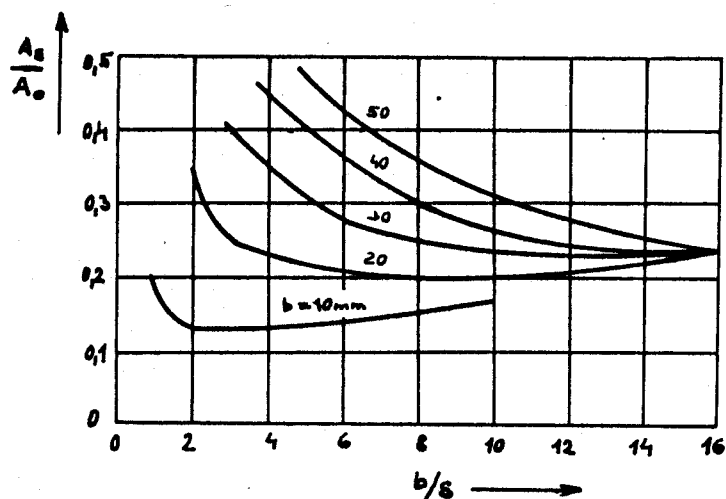
Obr. 5: Závislost mezi rozměry elipsy  $y_0$  a  $z_0$  a geometrickými parametry  $s$  a  $b$  pravoúhlého průřezu.



Z vypočítané plochy elipsy

$$A_E = \pi \cdot \gamma_0 \cdot z_0 \quad (3)$$

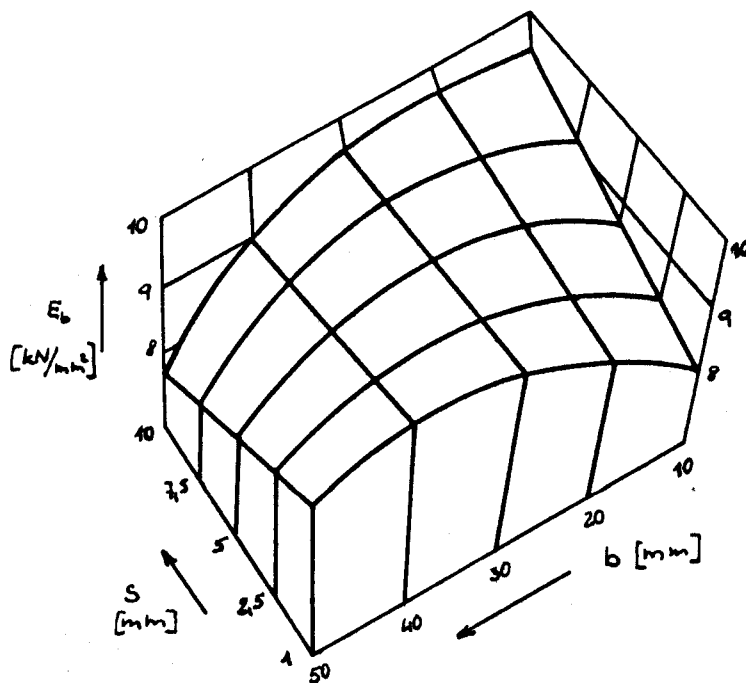
lze určit její podíl z celkové plochy průřezu tělesa  $A_0$ .  
Obr. 6. ukazuje závislost relativního poměru plochy elipsy  $A_E$  a plochy průřezu  $A_0$  na poměru  $b/s$  a na šířce pravoúhlé tyče.



Obr. 6: Závislost relativního podílu plochy elipsy  $A_E$  k ploše průřezu  $A_0$  na poměru šířky  $b$  a tloušťky  $s$  a na šířce  $b$  pravoúhlé tyče.

Orientace vláken ve střední zóně odvozená z geometrie pravoúhlé tyče a podíl této zóny na celkovém průřezu určuje podstatným způsobem mechanické vlastnosti tělesa. To je zřejmé ze závislosti modulu pružnosti v ohybu  $E_b$  na rozměrech průřezu  $s$  a  $b$  tyče. (viz obr. 7.) Vysvětlení závislosti je

možné jen na základě uvažování makrostruktury a při zahrnutí strukturálních veličin do výpočtu.

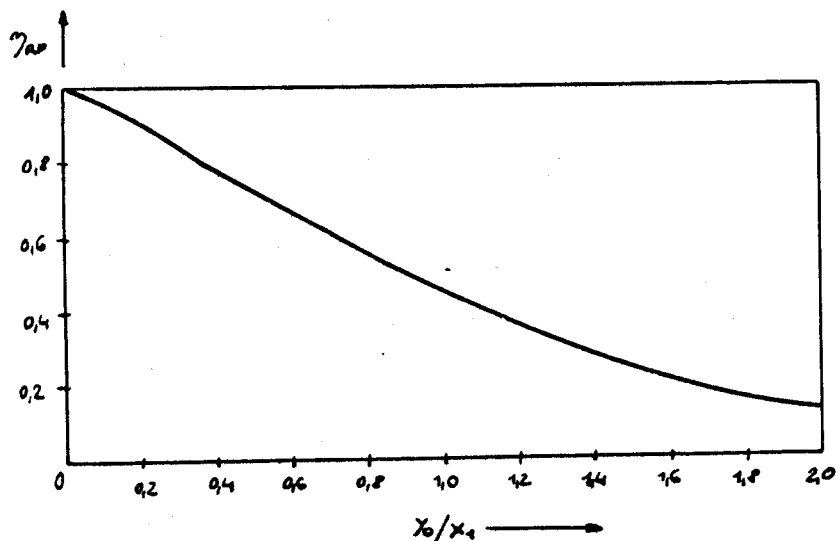


Obr. 7: Závislost modulu pružnosti v ohybu  $E_b$  tyčového vstříku z PA 6 se skleněnými vlákny na šířce  $b$  a tloušťce  $s$ .

Pro výpočet mechanických vlastností termoplastů vyztužených skleněnými vlákny v závislosti na struktuře jímimo jiné potřebné znát orientační faktor vláken. Pro zvláštní případ vláken, prostorově orientovaných ve střední oblasti ve tvaru rotačního paraboloidu udávají Heinrich a Nixdorf vzorec k výpočtu orientačního faktoru  $\eta_{AP}$ .

$$\eta_{AP} = \frac{8}{\left[ (4x_0^2 + y_0^2)^{\frac{3}{2}} - y_0^3 \right] \cdot \left[ y_0^3 - 6x_0^2(4x_0^2 + y_0^2)^{-\frac{1}{2}} + 6x_0^2(4x_0^2 + y_0^2)^{\frac{1}{2}} - (4x_0^2 + y_0^2)^{\frac{3}{2}} \right]} \quad (4)$$

Jestliže se rovnice vyhodnotí graficky a výsledky se vynesou pro různé poměry orientace v závislosti na podílu  $y_0/x_1$ , kde  $x_1 = x_s - x_0$ , získá se závislost dle obr. 8. Z něho vyplývá, že u velmi úzkých paraboloidů, kde mnoho vláken leží paralelně s podélnou osou tyče, se orientační faktor blíží 1. U tupějších paraboloidů je  $0 < \eta_{sp} < 1$ .



Obr. 8: Závislost orientačního faktoru  $\eta_{sp}$  na podílu  $y_0/x_1$  kvadratické paraboly

Pro výpočet orientačního faktoru eliptického paraboloidu lze použít přibližné řešení, které spočívá v tom, že se plocha elipsy převede na ekvivalentní plochu kruhu o poloměru:

$$r_{ekv} = \sqrt{y_0 \cdot z_0} \quad (5)$$

a  $\eta_{sp}$  se spočítá pomocí  $r_{ekv}$ .

Známe-li efekt plniva  $E_0$  a efekt vláken  $E_f$  u hmoty s vlákny, přičemž obě hodnoty lze vypočítat teoreticky anebo stanovit experimentálně, lze přes orientační efekt  $O_f$  vy-

počítat např. modul pružnosti v tahu.

Orientační efekt převrouhlé tyče je dán vztahem:

$$O_F = \frac{A_R}{A_0} (\omega_x + k\omega_x) + \frac{A_L}{A_0} (\hat{\omega}_x + k\hat{\omega}_x) + \frac{A_E}{A_0} \cdot \eta_P \quad (6)$$

kde:

$$A_0 = b \cdot s \quad (7)$$

$$A_R = A_0 - (b - 2s_R) \cdot (s - 2s_R) \quad (8)$$

$$A_L = A_0 - A_R - A_E \quad (9)$$

Orientační faktory  $\omega_x$ ,  $\hat{\omega}_x$ ,  $k\omega_x$ ,  $k\hat{\omega}_x$  se stanoví experimentálně stejným způsobem jako u deskového modelu. Orientační faktor  $\eta_P$  lze stanovit z grafu na obr. 8. po zjištění poloh elipsy a délky paraboly. [6]

Fáze plnění dutiny formy tedy rozhoduje o charakteru makrostruktury, tj. uspořádanosti skleněných vláken u daného tvaru vstříku. Pochopitelně, že vlivem smykových sil, působících v tevenině, dochází i k orientaci makromolekul polymeru. Podíl tohoto jevu na ovlivnění vlastností výrobku je ovšem podstatně menší než je vliv vláknité vztuže. Vyplyvá to i ze skutečnosti, že se orientace makromolekul v další fázi vstříkovacího cyklu snižuje relaxačními procesy. Čím důkladnější relaxace proběhne, tím větší část orientace se zruší.

Rychlost relaxace závisí na teplotě a tlaku. S klesající teplotou hmoty se rychlost zmenšuje, snižováním tlaku se naopak zvyšuje. Pro vstříkování to znamená, že ochlazování hmoty v dutině formy brzdí relaxaci, stejně jako vysoký tlak během doby plnění a dotlaku.

U krystalizujících plastů dochází v oblasti teploty tání-ke krystalizaci polymeru. Jedná se o primární krystalizaci-

zaci. Krystalizace částečně pokračuje i pod teplotou tání, tedy v tuhém stavu jako sekundární krystalizace. Rychlost ochlazení polymeru závisí kromě počáteční teploty taveniny na teplotě vstřikovací formy a na tloušťce stěny vstřiku. Zpomalení rychlosti ochlazení vede k vyššímu stupni krystalinity.

Orientace makromolekul a stupeň krystalinity se zahrnují pod mikrostrukturu vstřiku, které se rovněž podílí na výsledných vlastnostech výrobků. Všeobecně se ovšem považuje vliv mikrostruktury za malý. Toto konstatování bude bezpochyby platit zejména pro takové polymery jako jsou polyamidy, které se vyznačují relativně úzkou oblastí technologických podmínek, v níž lze polyamid vstřikovat. Platí to jak pro rozmezí vstřikovacích teplot tak tlaků.

Shmeme-li tedy získané poznatky, lze konstatovat, že vlastnosti vstřiků z vyztužených termoplastů jsou v rozhodující míře ovlivňovány jejich makrostrukturou, vytvářející se ve fázi plnění dutiny formy taveninou. Na makrostrukturu má vliv reologické poměry v dutině formy, které závisí na geometrii dutiny formy, na geometrii a umístění vtokového systému a na technologických podmínkách. Ty však nejsou konstantní v celé dutině formy, nýbrž se mění jak ve směru podélném, to znamená ve směru toku taveniny od ústí vtoku, tak ve směru příčném.

Přitom se taveniny termoplastů, obsahující skleněné vlákna, chovají při vstřikování v některých směrech odlišně než nevyztužené plasty. Při tuhnutí plastu neuvolňují skleněná vlákna žádné skupenské teplo jako polyamidová matrice a také jejich měrné teplo je menší než u polymerů, takže vyztužený polyamid chladne rychleji než polymer bez vyztuže, což znamená, že i rychleji ztrácí tekutost. To se projevuje větším teplotním spádem ve formě ve směru toku taveniny a může způsobovat potíže při výrobě vstřiků s dlouhou dráhou toku nebo vstřiku s příliš tenkými stěnami. Vlivem velkého

tření, způsobeného skleněnými vlákny, dochází v tavící komoře i ve vtokových kanálech k větším ztrátám tlaku, a rovněž v dutině formy se vytváří větší tlakový spád od ústí vtoku k okraji dutiny formy. Proto v různých místech dutiny formy může být hmota tvářena při zcela rozdílných technologických podmínkách. Dalším rozdílem je vznik vrstevnaté nebo prostorové makrostruktury napříč stěnou výrobku.

V praxi je situace komplikována ještě tím, že skutečný vstřík má jen zřídka jednoduchý geometrický tvar, např. desky nebo tyče. Složitost tvaru způsobuje, že na základní tvar navazují další části v podobě hranolů o různých rozměrech, na výrobku jsou v některých místech umístěna žebra, jinde otvory apod. To všechno způsobuje změny v makrostruktuře v daném místě. Vznikají tak místa s vyššími anebo nižšími mechanickými vlastnostmi. [4]

#### 2.5. Teorie přenosu napětí krátkovláknových usměrněných kompozitů.

Charakteristickým rysem jednosměrových kompozitů je jejich vyšší pevnost a modul pružnosti ve směru osy vláken a naopak nízká pevnost a modul v příčném směru. Je velmi výhodné, když se takové kompozity použijí na aplikace ve kterých lze napjatost pevně určit, takže kompozity mohou být zhotoveny z jednosměrových vrstev s pevností přizpůsobenou potřebám konstrukce. Avšak v aplikacích, kde napjatost nelze předem kvalitativně posoudit, nebo kde je známo, že napětí jsou stejné ve všech směrech, nemohou jednosměrové kompozity vyhovět požadavkům.

V kompozitech nepůsobí zatížení přímo na vlákna, nýbrž je zavedeno do maticového materiálu a přenášeno do vláken jednak prostřednictvím jejich konců, jednak též válcovým povrchem vlákna v okolí jeho konců. Je-li délka vlákna mnohem

větší než délka, přes niž se přenos napětí děje, mohou být koncové účinky zanedbány a vlákno uvažováno jako spojité. U krátkovláknových kompozitů nemohou být účinky konců zanedbány a vlastnosti kompozitu jsou funkcí délky vlákna. [3]

Rovnice Halpina a Tsaie jsou vhodné pro výpočet podélného a příčného modulu pružnosti usměrněných krátkovláknových kompozitů.

Tyto rovnice mohou být psány pro podélný a příčný modul pružnosti ve tvaru:

$$E_L = E_m \frac{1 + 2 \frac{L}{d} \cdot \eta_L \cdot V_v}{1 - \eta_L \cdot V_v} \quad (10)$$

$$E_T = E_m \frac{1 + 2 \eta_T \cdot V_v}{1 - \eta_T \cdot V_v} \quad (11)$$

kde

$$\eta_L = \frac{\frac{E_v}{E_m} - 1}{\frac{E_v}{E_m} + 2 \frac{L}{d}} \quad (12)$$

$$\eta_T = \frac{\frac{E_v}{E_m} - 1}{\frac{E_v}{E_m} + 2} \quad (13)$$

Rovnice ukazují, že příčný modul pružnosti usměrněného krátkovláknového kompozitu není ovlivněn parametrem  $L/d$  a jeho hod-

nota je stejná jako hodnota příčného modulu pružnosti dlouho-  
vláknového kompozitu.

Průměrné podélné napětí usměrněného krátkovláknového kompo-  
zitu lze vypočítat směšovací pravidlem:

$$R_m = \frac{1}{2} (R_{mv})_{max} \cdot V_v + R_{mm} \cdot V_m \quad (14)$$

Objemové procento vláken je dáno tvarem:

$$V_v = \frac{\frac{m_v}{\rho_v}}{\frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_m}{\rho_m}} \cdot 100 \quad (15)$$

a objemové procento matrice:

$$V_m = \frac{\frac{m_m}{\rho_m}}{\frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_m}{\rho_m}} \cdot 100 \quad (16)$$



### 3. NÁVRH POSTUPU VÝPOČTU

#### 3.1. Výpočet eliptického paraboloidu

Eliptický paraboloid vlastně představuje hodnoty okamžité rychlosti toku taveniny pro jednotlivé body průřezu tělesa, zvoleného v určité vzdálenosti od vtoku. Vzorec pro výpočet rychlosti toku taveniny vstříkovaných tyčí lze odvodit následujícím způsobem.

Vztah mezi smykovým napětím  $\tau$  a smykovou rychlostí  $D$  může být vyjádřen různou funkcí. Nejjednodušším vyjádřením je Newtonův zákon, který platí pro laminární tok nízkomolekulárních kapalin. Bývá psán ve tvaru:

$$\tau = \eta \cdot D \quad (17)$$

nebo

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx} \quad (18)$$

Jestliže viskozita klesá se vzrůstajícím smykovým napětím, hovoříme o strukturně viskózních kapalinách, v případě, že viskozita vzrůstá, jedná se o kapaliny dilatantní.

Newtonův zákon dobře platí pro zředěné roztoky polymérů nebo pro tok roztavených plastů ovšem při extrémně nízkých smykových rychlostech. Koncentrovanější roztoky a zvláště taveniny plastů však vykazují od tohoto zákona značné odchylky. Souvisí to s odlišným mechanismem toku polymérních tavenin a nízkomolekulárních kapalin. Zatímco u nízkomolekulárních látek se tak děje přeskokem celých molekul ve směru působení vnější síly, nemohou se makromolekuly přesunout jako celek,

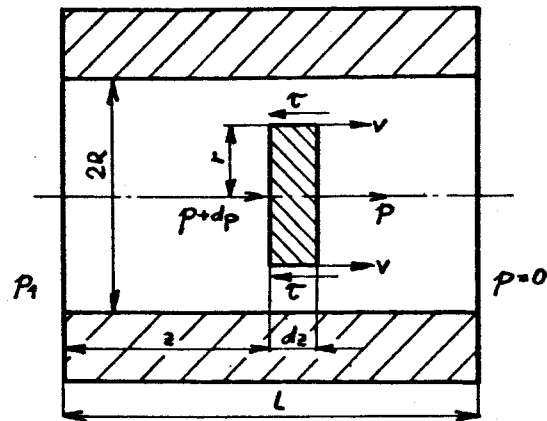
nůbrž pouze po částech. Teprve při dostatečném počtu přeskoků jednotlivých segmentů se těžiště celé makromolekuly přesune do nové polohy, a to se projeví jako tok. Pohyb segmentů se děje postupně a s určitou koordinací.

Chování tavenin polymerů při toku nelze popsat Newtonovým zákonem, protože dynamické viskozity není konstantou, ale závisí na smykové rychlosti. Jak bylo experimentálně nalezeno, že je možno vztah mezi smykovým napětím  $\tau$  a smykovou rychlostí  $dv/dx$  spolehlivě vyjádřit vztahem:

$$\tau^m = \eta \cdot \frac{dv}{dx} \quad (19)$$

Tento vztah se nazývá mocninový zákon. Konstanta mocninového zákona  $m$ , která bývá větší než 1, vyjadřuje velikost odchylky tokového chování od newtonské kapaliny. Čím je jeho hodnota větší, tím větší je odchylka od newtonského chování a pochopitelně tím větší chyba vzniká, jestliže se použije pro výpočet Newtonova zákona.

Tokové vlastnosti roztavených plastů se měří na plastometrech. Základem je válcová dutina, které slouží jako zásobník roztaveného polyméru. Dutina je zakončena tryskou, které má délku 8 mm a průměr otvoru 2,1 mm. Roztavený a zhomogenizovaný polymer je vytlačován ze zásobníku pístem, který je možno zatěžovat závažím o různé hmotnosti k docílení požadovaného tlakového spědu. Měří se objem taveniny, která proteče tryskou za jednotku času. Měření se provede při různém tlakovém spědu. Měření je možno využít i ke stanovení reologických konstant  $\eta$  a  $m$  daného plastu. [7]



Obr. 9: Schéma trysky vytlačovacího plastometru naplněné taveninou

Pro rovnováhu sil působících na vytknutý element platí tato úveha: [8]  
Síla  $F$  je rovna:

$$F = (p + dp) \cdot \pi \cdot r^2 - p \pi \cdot r^2 \quad (20)$$

Tato síla je v rovnováze se silou  $F^s$ , vznikající jako důsledek smykových sil, které působí na povrchu vytknutého elementu:

$$F^s = -2\pi \cdot r \cdot \tau \cdot dz \quad (21)$$

Protože má smykové napětí opačný směr než působící vnější tlak, je nutno psát výraz (21) se záporným znaménkem.

Pro rovnost obou sil tedy platí:

$$dp \cdot \pi \cdot r^2 = -\tau \cdot 2\pi \cdot r \cdot dz \quad (22)$$

Odtud 
$$\tau = -\frac{r}{2} \cdot \frac{dp}{dz} \quad (23)$$

Dosažením do mocninového zákona (19) s nahrazením recipročné hodnoty viskozity hodnotou  $\bar{\mu}$  se obdrží vztah

$$\frac{dv}{dr} = -\bar{\mu} \left(\frac{r}{2}\right)^m \left(\frac{dp}{dz}\right)^m \quad (24)$$

Výraz pro rychlost na libovolném poloměru  $r$  se získá integrováním rovnice (24) v mezích od  $r$  do  $R$ .

$$\int_{v_r}^{v} dv = -\bar{\mu} \left(\frac{dp}{2 \cdot dz}\right)^m \int_R^r r^m dr \quad (25)$$

Na poloměru  $R$  se předpokládá pro laminární proudění rychlost nulová. Dále je možno výraz  $dp/dz$  nahradit tlakovým spádem po celé délce  $L$ , takže po integraci a úpravách se získá vzorec pro výpočet rychlosti kruhového průřezu v následujícím tvaru:

$$w = \frac{\bar{\mu}}{2^m(m+1)} \cdot \left(\frac{\Delta p}{L}\right)^m (R^{m+1} - r^{m+1}) \quad (26)$$

Při výpočtu rychlosti obdélníkového průřezu vstříkovaných tyčí postupujeme stejným způsobem jako při odvození vzorce pro

výpočet rychlosti kruhového průřezu. Obdélníkový průřez tělesa budeme považovat za eliptický s výškou  $2b$  a šířkou  $2a$ .

[9] Rychlost laminárního proudění je dána vztahem:

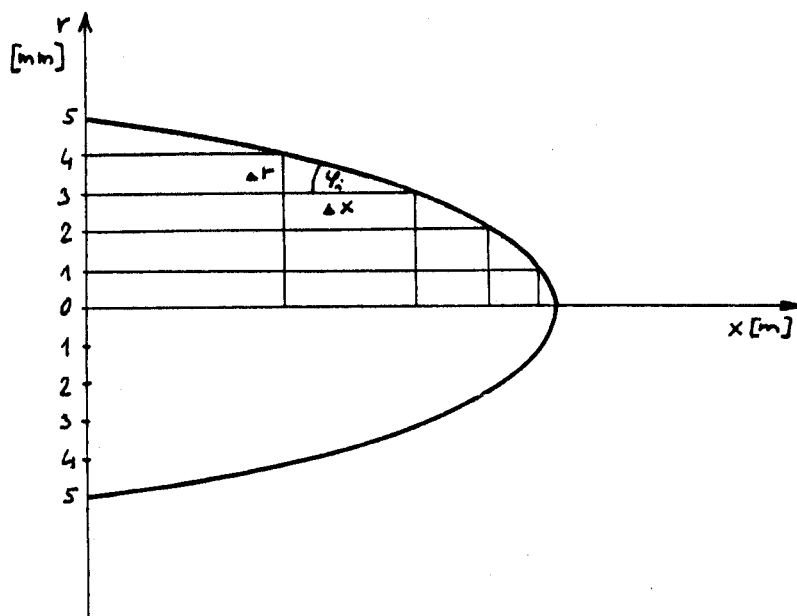
$$w = \frac{\bar{z}}{2} \cdot \frac{\Delta p}{L} \cdot \frac{a^2 \cdot b^2}{a^2 + b^2} \left( 1 - \frac{z^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right) \quad (27)$$

Taveniny plastů se však chovají jako nenewtonské látky, a proto tokové vlastnosti jsou ovlivňovány i hodnotou mocninového součinitele  $m$ . Zavedením tohoto součinitele do vztahu (27) dostaneme následující tvar:

$$w = \frac{\bar{z}}{2^m(m+1)} \cdot \left( \frac{\Delta p}{L} \right)^m \cdot \frac{a^{m+1} \cdot b^{m+1}}{a^{m+1} + b^{m+1}} \left( 1 - \left( \frac{z}{a} \right)^{m+1} - \left( \frac{y}{b} \right)^{m+1} \right) \quad (28)$$

### 3.2. Výpočet orientačního faktoru vláken

Z vypočítaných hodnot rychlostí vstřikovených tyčí kruhového průřezu si nakreslíme tvar paraboloidu. Nákres stačí pouze v jedné rovině, neboť tvar paraboloidu je stejný po celém obvodu tyče. Situace je znázorněna na obr. 10.



Obr.10: Tvar paraboloidu pro kruhovou tyč.

Podle obr. 4., o uspořádání skleněných vláken, toto uspořádání pro jednotlivé elementy paraboloidu si vyjádříme hodnotou  $\cos \gamma$ .

$$\cos \gamma = \frac{\Delta x}{\sqrt{\Delta r^2 + \Delta x^2}} \quad (29)$$

kde  $\Delta r$  je hodnota jednotlivých elementů, na které je průměr tyče rozdělen.

$\Delta x$  je rozdíl rychlostí mezi dvěma po sobě následujícími body tohoto elementu.

Přesnost hodnoty  $\cos \gamma$  závisí na velikosti jednotlivých elementů. Čím bude hodnota menší, tím přesnější hodnotu  $\cos \gamma$  dostaneme. Z těchto vypočítaných hodnot  $\cos \gamma$  stanovíme jeho průměrnou hodnotu, které vlastně představuje orientaci

faktor vyztužujících vláken vztažený na podélnou osu vstříkované tyče.

Podobně budeme stanovovat hodnotu orientačního faktoru vláken u vstříkovaných těles obdélníkového průřezu. Tvar eliptického paraboloиду si znázorníme jako v předchozím případě, avšak v rovině  $zx$  a v rovině  $yx$ . Při popisování rovin znázornění vycházíme z obr. 3. Podle vztahu (29) budeme počítat hodnoty  $\cos \psi$ . Do výrazu  $\psi$  budeme dosazovat hodnoty jednotlivých elementů, na které je šířka, resp. výška, vstříkované tyče rozdělena. Z hodnot  $\cos \psi$  opět stanovíme jeho průměrnou hodnotu. Přesnost této průměrné hodnoty bude záležet mimo jiné na tom, zda hodnoty jednotlivých  $\cos \psi$  vyjádříme i v dalších rovinách, které zavedeme mezi dvěma hlavními rovinami  $zx$  a  $yx$ .

$E_L$        $R_m$

### 3.3. Výpočet mechanických vlastností vstříkovaných tyčí

Z rovnic (10,14) si vypočítáme hodnoty modulu pružnosti a pevnost v tahu pro podélný směr usměrněných krátkovláknových kompozitů. Protože v praxi při vstříkování se těžko dosáhne podélného uspořádání vyztužujících vláken, je třeba do výpočtu mechanických vlastností zahrnout orientační faktor těchto vyztužujících vláken. Jeho velikost vlastně představuje průměrná hodnota  $\cos \psi$ . Rovnice pro výpočet modulu pružnosti a pevnosti v tahu kompozitu můžeme psát v následujícím tvaru:

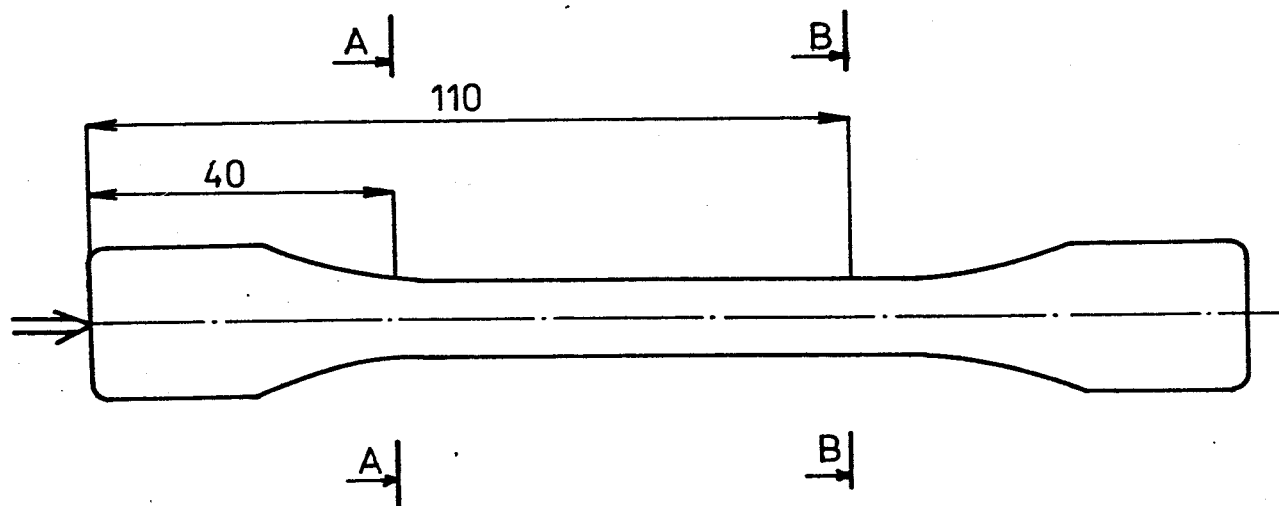
$$E_k = E_L \cdot \cos \bar{\psi} \quad (30)$$

$$R_{mk} = R_m \cdot \cos \bar{\psi} \quad (31)$$

#### 4. APLIKACE NÁVRHU VÝPOČTU

##### 4.1. Výsledky výpočtů mechanických vlastností

Uvedený návrh postupu výpočtu budeme aplikovat na těleso pro tahovou zkoušku dle ČSN 64 0605, typ II. Těleso má v měřené části průřez  $10 \times 4 \text{ mm}$  a celkovou délku cca  $150 \text{ mm}$ . Je vyrobeno z polyamidu 6 obsahujícího 30% hmotnosti skleněných vláken. Pro něj výpočet mechanických vlastností zvolíme vzdálenost od vstupu  $L = 110 \text{ mm}$ . Situace je znázorněna na obr. 11.



Obr. 11: Zkušební těleso s vyznačenými místy zvolených průřezů pro výpočet rychlostí toku taveniny



Počáteční hodnoty složek kompozitů

PA 6:

$$E_m = 600 - 1\ 400 \text{ MPa}$$

$$R_{mm} = 40 - 80 \text{ MPa}$$

$$\rho_m = 1\ 120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$m_m = 0,7$$

$$\bar{E} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

$$m = 1,45$$

Skleněná vlákna:

$$E_v = 70\ 000 \text{ MPa}$$

$$R_{mv} = 700 - 2\ 100 \text{ MPa}$$

$$\rho_v = 2\ 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$m_v = 0,3$$

$$l = 0,9 \text{ mm}$$

$$d = 13 \mu\text{m}$$

Podmínky vstřikování:

$$t_{stav} = 230 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta p = 10 \text{ MPa}$$

Pro vzdálenost od vtoku  $L = 40 \text{ mm}$  předpokládáme, že tloušťka okrajové vrstvy zóny I bude  $0,1 \text{ mm}$ , potom  $a = 4,9 \text{ mm}$ ,  $b = 1,9 \text{ mm}$ . Pro zjednodušení výpočtu dále předpokládáme, že vstřikovací tlak bude konstantní po celé délce toku taveniny. Hodnoty rychlostí v jednotlivých bodech průřezu tělesa jsou uvedeny v tabulce II. Z této tabulky si spočítáme hodnoty cosinu  $\gamma$  v rovině  $zx$ , uvedeny v tabulce III, a hodnoty cosinu  $\gamma$  v rovině  $yx$ , uvedeny v tabulce IV.

tab. III: Hodnoty  $\cos \gamma$  v rovině  $zx$

$z_i \text{ [mm]}$	4,9	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5
$\cos \gamma$	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
$z_i \text{ [mm]}$	2,0	1,5	1,0	0,5	0	
$\cos \gamma$	0,999	0,999	0,998	0,986	0	

Tab. II : Hodnoty rychlostí toku taveniny pro  $L = 40 \text{ mm}$  v  $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

$z$ [mm]	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
0	0,620	0,617	0,607	0,586	0,551	0,501	0,433	0,354	0,243	0,117
0,2	0,617	0,615	0,605	0,583	0,549	0,498	0,431	0,352	0,241	0,115
0,4	0,606	0,604	0,594	0,572	0,538	0,487	0,420	0,340	0,230	0,104
0,6	0,583	0,581	0,574	0,549	0,515	0,464	0,397	0,317	0,206	0,080
0,8	0,546	0,543	0,533	0,512	0,477	0,427	0,359	0,280	0,169	0,042
1,0	0,491	0,489	0,479	0,457	0,422	0,372	0,304	0,225	0,114	-
1,2	0,419	0,417	0,407	0,385	0,350	0,300	0,233	0,153	-	-
1,4	0,327	0,324	0,314	0,293	0,258	0,208	0,140	-	-	-
1,6	0,213	0,211	0,201	0,179	0,144	0,094	-	-	-	-
1,8	0,078	0,075	0,064	0,043	0,008	-	-	-	-	-

Tab. IV : Hodnoty rychlosti toku taveniny pro  $L = 110 \text{ mm}$  v  $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

$\frac{z}{\gamma}$ [mm]	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
0	0,151	0,150	0,148	0,143	0,135	0,123	0,107	0,086	0,061	0,031
0,2	0,150	0,150	0,147	0,142	0,134	0,122	0,106	0,085	0,060	0,030
0,4	0,148	0,147	0,145	0,140	0,132	0,120	0,104	0,083	0,059	0,029
0,6	0,143	0,142	0,140	0,135	0,126	0,114	0,098	0,078	0,053	0,023
0,8	0,134	0,133	0,131	0,126	0,118	0,106	0,090	0,069	0,044	0,014
1,0	0,122	0,121	0,119	0,113	0,105	0,093	0,077	0,057	0,032	-
1,2	0,105	0,104	0,102	0,097	0,089	0,077	0,061	0,040	-	-
1,4	0,084	0,083	0,081	0,076	0,068	0,056	0,040	-	-	-
1,6	0,058	0,057	0,055	0,050	0,042	0,030	-	-	-	-
1,8	0,027	0,026	0,024	0,019	0,010	-	-	-	-	-

Tab. IV: Hodnoty  $\cos \gamma$  v rovině yx.

$y_z$ [mm]	1,9	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0
$\cos \gamma$	1,0	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
$y_z$ [mm]	0,8	0,6	0,4	0,2	0	
$\cos \gamma$	0,999	0,999	0,999	0,986	0	

Z tabulky III. a IV. vypočítáme průměrnou hodnotu cosinu  $\gamma$ .  
 $\cos \bar{\gamma} = 0,907$

Modul pružnosti a pevnost v tahu kompozitu v průřezu AA budou:

$$E_k = 6\,494,3 - 8\,989,1 \text{ MPa}$$

$$R_{m_k} = 81,5 - 214,2 \text{ MPa}$$

pro vzdálenost od vtoku  $L = 110$  mm předpokládáme, že tloušťka okrajové vrstvy zóny I bude 0,05 mm, potom  $a = 4,95$  mm,  $b = 1,95$  mm. Pro zjednodušení výpočtu opět předpokládáme, že vstřikovací tlak bude konstantní po celé délce toku taveniny. Hodnoty rychlostí v jednotlivých bodech průřezu tělesa jsou uvedeny v tabulce V. Z tabulky spočítáme hodnoty cosinu  $\gamma$  v rovině zx, uvedeny v tabulce VI, a hodnoty cosinu  $\gamma$  v rovině yx, uvedeny v tabulce VII.

Tab. VI: Hodnoty  $\cos \gamma$  v rovině zx

$z_x$ [mm]	4,95	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5
$\cos \gamma$	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
$z_x$ [mm]	2,0	1,5	1,0	0,5	0	
$\cos \gamma$	0,999	0,998	0,995	0,970	0	

Tab VII: Hodnoty  $\cos \gamma$  v rovině yx

$y_z$ [mm]	1,95	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0
$\cos \gamma$	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
$y_z$ [mm]	0,8	0,6	0,4	0,2	0	
$\cos \gamma$	0,999	0,999	0,995	0,980	0	

Z tabulky VI. a VII. vypočítáme průměrnou hodnotu eosinu  $\gamma$ .

$$\cos \bar{\gamma} = 0,901$$

Modul pružnosti a pevnost v tahu kompozitu v průřezu BB budou:

$$E_k = 6\,451,3 - 8\,929,6 \text{ MPa}$$

$$R_{mk} = 81,0 - 212,8 \text{ MPa}$$

Dolní hranice meze kluzu a meze pevnosti v tahu kompozitu byly vypočítány pro dolní hranici meze kluzu a meze pevnosti v tahu skleněných vláken a polyamidu. Pro horní hranici meze kluzu a meze pevnosti v tahu byly brány horní hranice meze kluzu a meze pevnosti v tahu.

Vlastnosti PA 6 vyztuženého 30% hmotnosti skleněných vláken, uváděné v literatuře [10], jsou následující: Měrná hmotnost plněním vzrůstá až na  $1\,500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Teplota tání se plněním nemění, protože plnivo je obklopeno polymerem. Zlepšuje se však tvarová stálost při vyšších teplotách. Težnost plněním klesá na 3 - 5 %, teplotní roztažnost se snižuje až na 20 % původní hodnoty, klesá navlhavost a smrštění. Mez pevnosti v tahu ve směru toku materiálu dosahuje 100 až 130 MPa, kolmo na směr toku je mez pevnosti menší. Modul pružnosti dosahuje 7 000 až 9 000 MPa.

Porovnáním vypočítaných hodnot s hodnotami shora uvedenými dospějeme k následujícím závěrům:

Vypočítané hodnoty modulu pružnosti se od uvedených hodnot vcelku neliší. Pouze dolní mez je nižší v průměru o 500 MPa. Maximální vypočítané hodnota meze pevnosti v tahu je asi o 82 - 84 MPa větší než hodnota uvedená. Tato vypočítané hodnota se však vztahuje na maximální pevnost v tahu skleněných vláken a na maximální pevnost v tahu matrice, čili polyamidu. Je třeba brát v úvahu, že všechna vlákna nebudou mít stejnou mez pevnosti v tahu, bylo by třeba stanovit průměrnou hodnotu meze pevnosti v tahu. Dále je nutno uvést, že metoda výpočtu předpokládá konstantní délku skleněných vláken, při plastické hmoty a vstřikování však může dojít k jejich poškození a zmenšení jejich délky.

Porovnáme-li hodnotu orientačního faktoru skleněných vláken v závislosti na vzdálenosti od vtoku, zjistíme, že se vzrůstající vzdáleností, klesá i orientační faktor. V závislosti na tom dochází k poklesu mechanických vlastností kompozitu. Hodnota modulu pružnosti se zmenší o 40 - 60 MPa, mez pevnosti v tahu o 0,5 - 1,5 MPa. Dá se předpokládat, že při mechanickém namáhání takového tělesa dojde k jeho porušení v místě stejného průřezu nejvíce vzdáleného od vtoku.

#### 4.2. Vliv délky vlákna na mechanické vlastnosti.

Budeme snižovat délku vlákna, průměr vláken zachováme konstantní. Změnou délky se bude měnit pouze modul pružnosti v podélném směru, hodnota modulu pružnosti v příčném směru a mez pevnosti v tahu na délce vlákna nezávisí.

Skleněná vlákna:

$$l = 0,5 \text{ mm}$$

$$d = 13 \mu \text{ m}$$

$$E_{\kappa} = 5\ 103,2 - 7\ 825,1 \text{ MPa} \quad \text{pro } L = 40 \text{ mm}$$

$$E_{\kappa} = 5\ 069,5 - 7\ 773,4 \text{ MPa} \quad \text{pro } L = 110 \text{ mm}$$

Skleněné vlákna:

$$l = 0,3 \text{ mm}$$

$$d = 13 \text{ } \mu\text{m}$$

$$E_k = 3\ 886,5 - 6\ 610,9 \text{ MPa} \quad \text{pro } L = 40 \text{ mm}$$

$$E_k = 3\ 860,8 - 6\ 567,1 \text{ MPa} \quad \text{pro } L = 110 \text{ mm}$$

Ve výpočtu modulu pružnosti je zahrnut orientační faktor skleněných vláken.

Pro srovnání uvažujeme jako základ hodnoty pro skleněné vlákna délky 0,9 mm a průměru 13  $\mu\text{m}$ .

U vláken délky 0,5 mm dochází k poklesu modulu pružnosti v průměru o 1 391 až 1 164 MPa, což představuje o 21,5 až 13 %. Ještě výraznější rozdíl je u délky vláken 0,3 mm. Zde je pokles modulu pružnosti v průměru o 2 608 až 2 378 MPa, což představuje o 40 až 26,5 %.

Z těchto výsledků je zřejmé, že při poklesu délky vláken na 1/3 může dojít k poklesu modulu pružnosti až o 40 %. Při zvětšování délky vláken se bude ekvivalentně zvyšovat i hodnota modulu pružnosti.

#### 4.3. Vliv průměru vlákna na mechanické vlastnosti.

Budeme snižovat průměr vlákna, délku zachováme konstantní. Jako při změně délky i teď se bude měnit pouze modul pružnosti podélným směrem, hodnota modulu pružnosti v příčném směru a meze pevnosti v tahu na průměru vlákna nezávisí.

Skleněné vlákna:

$$d = 12 \text{ } \mu\text{m}$$

$$l = 0,9 \text{ mm}$$

$$E_k = 6\ 774,8 - 9\ 148,8 \text{ MPa} \quad \text{pro } L = 40 \text{ mm}$$

$$E_k = 6\ 730,0 - 9\ 088,3 \text{ MPa} \quad \text{pro } L = 110 \text{ mm}$$

*skleněné vlákno 0,9 mm*

Skleněné vlákno:

$$d = 5 \mu\text{m}$$

$$l = 0,9 \text{ mm}$$

$$E_k = 8\,497,9 - 10\,297,2 \text{ MPa} \quad \text{pro } L = 40 \text{ mm}$$

$$E_k = 8\,441,6 - 10\,229,1 \text{ MPa} \quad \text{pro } L = 110 \text{ mm}$$

Ve výpočtu je zahrnut orientační faktor skleněných vláken. Pro srovnání uvažujeme jako základ hodnoty pro skleněné vlákno délky 0,9 mm a průměru 13  $\mu\text{m}$ .

Jestliže snížíme průměr vláken o 1  $\mu\text{m}$ , dochází ke zvýšení modulu pružnosti v průměru o 281 až 160 MPa, což představuje zvýšení o 4,3 až 1,7 %. Pokud bychom měli vlákna průměru 5  $\mu\text{m}$ , pak zvýšíme modul pružnosti v průměru o 2 004 až 1 308 MPa, což představuje zvýšení o 31 až 14,6 %.

Z těchto výsledků je zřejmé, že snižováním průměru vyztužujících vláken, docílíme zvýšení modulu pružnosti. Snižováním průměru vláken stoupají nároky na výrobu, a tím se zvyšuje cena těchto vláken.



## 5. ZÁVĚR

Termoplastické kompozity zaujímají stále významější místo ve výrobě. Nejrozšířenější jsou kompozity s polyamidovou maticí vyztužené skleněnými vlákny. Používají se v nábytkářství, v automobilovém a elektrotechnickém průmyslu, na sportovní potřeby, na díly různých přístrojů.

Ze získaných výsledků lze odvodit, že zvýšení mechanických vlastností kompozitů může ovlivnit:

- a/ Výrobou skleněných vláken s co nejmenším průměrem, alespoň pod 10  $\mu\text{m}$ .
- b/ Prodloužením délky vlákna na několik milimetrů, což však může znamenat zpracovatelské potíže.
- c/ Novými typy skla s vyššími mechanickými vlastnostmi.

Cílem této práce bylo předložení určitého návrhu na výpočet mechanických vlastností kompozitu. Postup výpočtu se hodí pro jednoduché tyčové výrobky, u výrobků složitějších tvarů bude složitější vyjádření orientačního faktoru vláken, který je důležitý pro další výpočty mechanických vlastností.

Při výpočtu je však třeba vzít na zřetel i další faktory /změnu tlaku ve formě při vstřikování/, které jsme pro jednoduchost zanedbali. Dosažené výsledky je třeba brát do jisté míry jako informativní. Při výpočtu je velice vhodné použít počítače.

*kompozit au s aplikací?*

### PODĚKOVÁNÍ

Je milou povinností autora poděkovat inž. Josefu Krebsovi, CSc za cenné rady a připomínky, které mi pomohly snáze proniknout do problematiky a při řešení této diplomové práce.

## Literatura

1. KABELKA J.: Polymerní kompozitní materiály s vláknitou výztuží, Kompozitní materiály, ČSAV, Praha, červen 1981
2. TÁBORSKÝ L., ŠEBO P.: Konštrukčné materiály spevnené vláknami, ALFA, Bratislava, 1982
3. BHAGWAN D. A., LAWRENCE J. B.: Vláknové kompozity, SNTL, Praha, 1987
4. KREBS J. a kol.: Vliv vstřikovacího procesu na makrostrukturu a mechanické vlastnosti modelových těles z polyamidového kompozitu, /závěrečné zpráva/, VŠST, Liberec, 1987
5. KALINSKE G.: Makrostruktura a vlastnosti desek, dutých válců a tyčí, vyráběných vstřikováním termoplastů obsahujících krátká skleněná vlákna, Plasty a kaučuk 19, 1982, s. 101 - 102
6. KALINSKE G., MEYER F.: Glasfaseranordnung in spritzgegossenen Rechteckstäben aus glasfaserverstärktem Polyamid 6, Plaste und Kautschuk 29, 1982, s. 421 - 423
7. KREBS J.: Teorie a technologie zpracování plastů, skriptum VŠST Liberec, 1981
8. KREBS J.: Hodnocení reologických vlastností tevenin termoplastů / Habilitační práce/, VŠST Liberec, 1970
9. CLEHLA J.: Teoretické základy energetických zařízení, I. díl, skriptum VŠST Liberec, 1982, s. 102
10. KOLOUCH J.: Strojírenské výrobky vyráběné vstřikováním, SNTL, Praha, 1986