

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

**Kvalitativní trojdimensionální model toku taveniny při
vstřikování zaměřený na polyamid vyztužený skelnými
vláknami**

Diplomová práce



Autor:	Bc. et Bc. Tomáš Picka
Studijní program:	Výrobní a materiálové inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Druhý vedoucí práce:	Ing. Stefan Krebs

Praha 2020

ANOTAČNÍ LIST:

Autor:	Bc. et Bc. Tomáš Picka	
Název DP:	Kvalitativní trojdimensionální model toku taveniny při vstřikování zaměřený na polyamid vyztužený skelnými vlákny	
Rok:	2020	
Studijní program:	Strojní inženýrství	
Obor studia:	Výrobní a materiálové inženýrství	
Ústav:	Ústav strojírenské technologie	
Vedoucí DP:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.	
Druhý vedoucí DP:	Ing. Stefan Krebs	
Bibliografické údaje:	počet stran	82
	počet obrázků	43
	počet tabulek	12
	Počet grafů	30
	počet příloh	2

Bibliografická citace

Picka, Tomáš. Kvalitativní trojdimensionální model toku taveniny při vstřikování zaměřený na polyamid vyztužený skelnými vlákny. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.

Vedoucí práce Ing. Stefan Krebs

Abstrakt:

Práce se zabývá natočením vláken v polymerního kompozitu vyztuženého krátkými sklenými vlákny. Natočení vláken má rozhodující vlivy na konečné mechanické vlastnosti výrobku. Hlubší znalosti okolností, které způsobují natočení vlákna, by mělo vést ke zlepšení práce s odolnějšími kompozity právě v těch směrech, kde je toho zapotřebí. Zároveň by to mělo vést ke zmenšení množství potřebných průřezů, úspore materiálu apod.

V první části se práce zajímá o teoretické poznatky již popsané v odborné literatuře. Předpokládá hlavní vlivy, které budou určující pro natočení vláken v konkrétním výrobku. Ve druhé části jsou zkoumány nařezané vzorky pod mikroskopem. Pro experiment je určeno standardní těleso určené pro trhací zkoušky. Vyhodnocení snímků je provedeno programem Image_J. Celkem je zpracováno šedesát snímků, což představuje vyhodnocení natočení zhruba osmi tisíc vláken v různých částech vzorků. Následná analýza dat popisuje mimo jiné ovlivnění struktury kompozitu průchodem čela toku a také se zabývá vlivy tuhnutí taveniny po stěnách toku. Dále je zjišťováno, jaký přínos pro natočení vláken představuje rozdílné smykové napětí a zároveň je zhodnocen vliv geometrie tělesa. Následně jsou v práci podrobně popsány zkoumané vlivy a je prokázáno, že struktura vláken je nehomogenní a vykazuje signifikantní anizotropii. Celkový počet vláken s odklonem větším než 25° od směru toku je přibližně padesáti procentní.

Klíčová slova:

kompozit, polymerní kompozit, polyamid, skleněná vlákna, natočení vlákna, vstřikování taveniny, smyková rychlost, smykové napětí

ANNOTATION:

Author:	Bc. et Bc. Tomáš Picka	
Title:	Qualitative 3D Model of The Melt Flow of Glass Fiber Reinforced Polyamide in Injection Molding	
Year:	2020	
Study program:	Mechanical engineering	
Field of study:	Manufacturing and Material Engineering	
Department:	Department of Manufacturing Technology	
Superior:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.	
Second Superior:	Ing. Stefan Krebs	
Bibliographic data:	number of pages:	82
	number of images:	43
	number of tables:	12
	number of graphs:	30
	number of attachments:	2

Abstract:

The thesis deals with positioning of fibres in a polymer composite reinforced by short glass fibres. The orientation of fibres has a crucial impact to final mechanical properties of product. Deeper understanding of conditions which lead to the differences in positioning of fibres should result in an improvement in handling with more strength resistant composite where needed. Moreover, it should result in reduction of necessary cross-sections, material savings etc.

Firstly, the thesis focuses on theoretical knowledge described in the technical literature and anticipates major factors which determine the positioning of fibres in a particular product. Secondly, sawed samples are examined under the microscope by SEM method. A standard sample for tear resistance test is used in the experiment. An assessment of these sample pictures is carried out by Image J programme. In overall, sixty sample pictures are assessed and therefore approximately eight thousand fibres in different parts of the samples are covered by this assessment. The follow-up analysis describes changes in the structure of the composite influenced by passing through the head of the flow and inquires impacts of the edge effect. Furthermore, the impact for the positioning of the fibres regarding the different shear stress is evaluated. On the top of that, the influence of the shape of the solid is included into the analysis. Eventually, the analysed influences are described in detail and it is demonstrated that the structure of the fibres is inhomogeneous with significant anisotropy. Total number of fibres with deflection more than 25° from the direction of the flow is approximately fifty percent.

Keywords:

composite, polymer composite, polyamide, glass fiber, position of fiber, injection of melt, shear stress, shear rate

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: *Kvalitativní trojdimensionální model toku taveniny při vstřikování zaměřený na polyamid vyztužený skelnými vlákny*. vypracoval samostatně pod vedením Ing. Stefana Krebse s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Bc. et Bc. Tomáš Picka

1 Obsah

1	Obsah	7
2	Seznam použitých symbolů a zkratk	9
3	Úvod	10
4	Teoretická část	10
4.1	Vymezení problematiky kompozitu s polymerní matricí vyztuženou krátkými vlákny	10
4.2	Technické termoplasty vyztužené skelnými vlákny	12
4.2.1	Polymery	12
4.2.2	Výroba polymerů.....	13
4.2.3	Polyamidy.....	14
4.2.4	Značení materiálu podle normy	16
4.2.5	Kompozity s polymerní matricí	16
4.2.6	Výztuže polymerních matric.....	17
4.2.7	Skleněná vlákna.....	18
4.2.8	Funkčnost vláken, vlastnosti vláken.....	19
4.2.9	Teorie přenosu zatížení vlákna.....	20
4.3	Reologie toku polymerního materiálu	22
4.3.1	Newtonův zákon	22
4.3.2	Toková křivka ne-Newtonských – polymerních materiálů.....	23
4.3.3	Carreau model toku taveniny.....	25
4.4	Modely toků taveniny kompozitu	27
4.4.1	Konstrukce toku materiálů do formy	27
4.4.2	Analýza chování toku taveniny kompozitu	28
4.4.3	Orientace vláken	31
4.4.4	Model plnění kavity taveninou	33
4.4.5	Namrzání taveniny na stěnách kavity	34
4.4.6	Efekt prodloužení mikrostruktury	35
4.4.7	Shrnutí poznatků o toku taveniny.....	36
4.5	Metody analýzy orientace vláken (přímé a nepřímé metody).....	37
4.5.1	Popis metody.....	38
5	Praktická část	39
5.1	Jaký je efekt Natočeného vlákna.....	39
5.1.1	Pevnost rovinného ortotropního kompozitu	39
5.1.2	Úvaha nad efektivitou přenášeného zatížení vlákna	40

5.2	Zkoumaný vzorek	41
5.2.1	Příprava vzorků.....	43
5.3	Předpoklady modelu trojdimensionálního toku taveniny termoplastů vyztužených skelnými vlákny	44
5.3.1	Efekt fontánového toku	45
5.3.2	Efekt mrznoucí vrstvy na stěnách	46
5.3.3	Efekt rozdílného tření v toku.....	47
5.3.4	Ovlivnění toku geometrií vstřikovaného dílu	48
5.4	Formulace experiment	49
5.5	Metoda analýzy vzorku	51
5.5.1	Vyhodnocení rozměru.....	51
5.5.2	Program vyhodnocování mikroskopických snímků Image_J FIJI.....	53
5.5.3	Revize výsledků	54
5.6	Naměřené hodnoty	56
5.6.1	Stanovení hodnotících parametrů	56
5.6.2	Hodnocení míry natočení vláken (AR) pomocí ENV a PENV	57
5.6.3	Hodnocení efektivity rozložení a natočení vláken	59
5.6.4	Hodnocení trendu pohybu vláken pomocí úhlu natočení (Angle)	62
5.6.5	Hodnocení snímků 1.....	67
5.7	Analýza dat.....	68
5.7.1	Efekt fontánového toku	68
5.7.2	Efekt mrznoucí vrstvy na stěnách	69
5.7.3	Efekt rozdílného tření v toku.....	72
5.7.4	Ovlivnění toku geometrií vstřikovaného dílu	73
6	Závěr.....	75
6.1	Shrnutí hlavních poznatků.....	75
6.2	Navržené pokračování ve výzkumu.....	76
6.2.1	Závěrečné zhodnocení	77
7	Seznam použité literatury	79
8	Seznam obrázků, grafů a tabulek	1

2 Seznam použitých symbolů a zkratek

AR	Poměr stran (Aspect ratio)
ENV	Efektivita natočení stran
EP	epoxidové pryskyřice
GF	Glass Fiber
GF	skleněná vlákna
HDPE	Polyethylen s vysokou hustotou
ITT	index toku taveniny
ld	dávka
LDPE	Polyethylen s nízkou hustotou
LFRT	Long Fiber Reinforcement Thermoplastic
LGF	Long Glass Fiber
Obr.	obrázek
PA	polyamid
PA 11	polyamid 11
PA 12	polyamid 12
PA 66	polyamid 66
PA6	polyamid 6
PA-GF	polyamid se skelnými vlákny
PENV	Poměrná efektivita natočení stran
PF	fenolformaldehydové pryskyři
Pos.	pozice
PP	polypropylen
PS	polystyren
PVC	polyvinylchlorid
SV	skleněná vlákna
UP	polyesterové pryskyřice
VE	vinylesterové pryskyřice
$\sigma_{Pd, L}$	Podélná mez pevnosti v tlaku
$\sigma_{Pd, T}$	Příčná mez pevnosti v tlaku
$\sigma_{Pt, L}$	Podélná mez pevnosti v tahu
$\sigma_{Pt, T}$	Příčná mez pevnosti v tahu
$\tau_{P, LT}$	Smyková mez pevnosti

3 Úvod

Tato práce se zabývá zkoumáním orientace vláken, konkrétně v polymerní matrici vyztužené krátkými skleněnými vlákny. V práci jsou zkoumány jevy, které ovlivňují natočení vláken v kompozitu jako rozhodujícího jevu pro konkrétní vlastnosti výrobku. Polymerní kompozit jsou materiály, které již delší dobu získávají na důležitosti díky svým výhodným vlastnostem. Jejich zpevnování vlákny jim dává mechanické vlastnosti, které jim umožňují nahrazovat materiály na specifických místech v konstrukcích. Díky kombinaci skleněných vláken s polymerní matricí je možné využít výhodných vlastností polymeru, ať je to jeho nízká hmotnost či chemická odolnost a další jevy a síly v tahu u skleněných vláken. V tomto ohledu je výroba polymerních matricí s krátkými vlákny specifická tím, že je méně technologicky náročná pro běžnou průmyslovou výrobu a také výrobky z nich jsou více tvarově variabilnější.

Konečné natočení vláken ve výrobku rozhoduje o jeho mechanických vlastnostech. Dosavadní vědecké práce na toto téma poukazují na mnohé faktory ovlivňující natočení vláken. Z variability vlivů plyne, že jejich konečné natočení je dílem souhrnu více faktorů najednou. Výsledná orientace vláken pak není natočená předpokládaným směrem. Cílem práce je určit faktory, které nejvíce ovlivňují natočení vláken na základě teoretické přípravy a praktického zkoumání definovaných jevů na konkrétním výrobku.

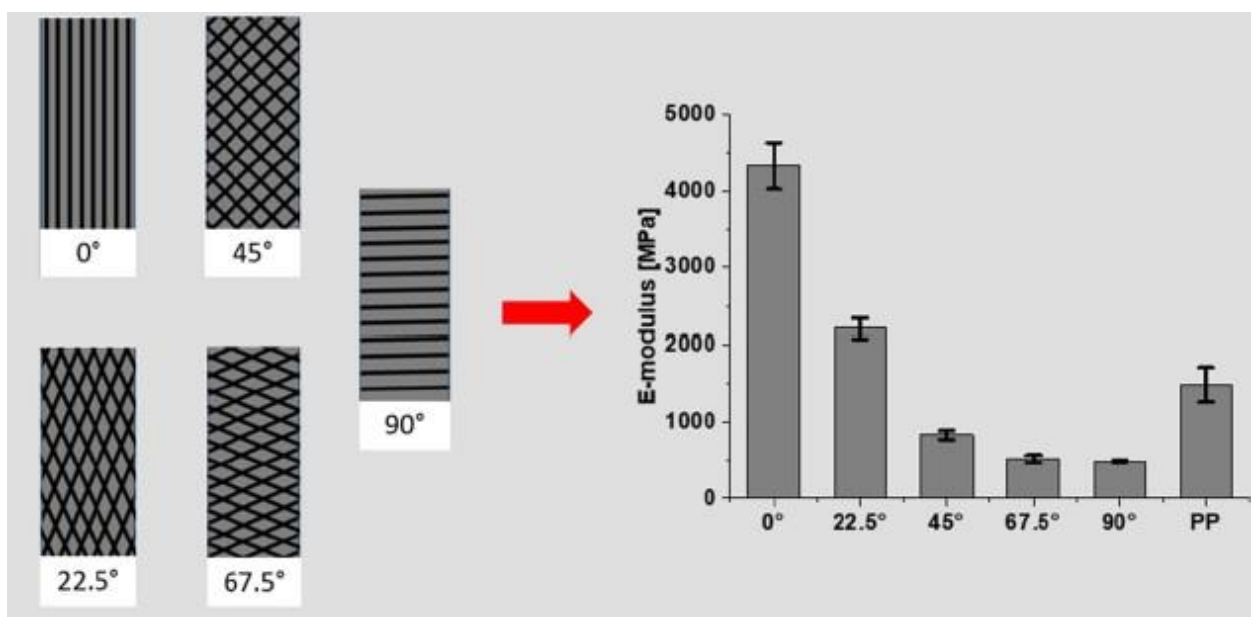
4 Teoretická část

4.1 Vymezení problematiky kompozitu s polymerní matricí vyztuženou krátkými vlákny

Je obecně známou věcí, že kompozitní materiály využívají výhodných vlastností nejčastěji dvou, ale někdy i více materiálů. U kompozitu s polymerní matricí jsou to zajímavé vlastnosti, jako je jejich nízká hmotnost, pružnost, stejně jako jejich chemické odolnosti a mnohé další. K tomu, aby se polymery daly více využívat v technické praxi je nutné zlepšit jejich pevnostní charakteristiky, a k tomu je zapotřebí vybavit je odolnou výztuží. Výhodným tvarem pro zpevnění jsou vlákna. Vlákna mohou být krátká i dlouhá.

Nicméně zásadní pro výsledný kompozit, ať už pro vlákna krátká nebo dlouhá, je jejich natočení. Tato práce se zabývá konkrétně krátkými vlákny, která mají větší perspektivu využití v průmyslové výrobě.

Natočení vlákna do směru zatížení je rozhodující faktor pro funkčnost výrobku. Pro výsledné vlastnosti produktu je samozřejmě nutné vzít v úvahu mnoho dalších doprovodných jevů u použití krátkých vláken, jako jsou například dostatečná délka vláken nebo hustota vláken v polymerní matici. Nicméně jejich natočení i tak hraje zásadní roli. Představu funkčnosti vláken v kompozitu vysvětluje následující obrázek č.1 s ilustrací natočení vláken v kompozitu, který byl podroben zatížení. Konkrétně polymerní matrice Lyocellu Polypropylenu a závislost natočení vláken na modulu pružnosti.



Obr. 1 Vliv natočení vláken na modulu pružnosti [17]

Natočení vláken ve směru namáhání je zásadní pro schopnost výsledného tvaru kompozitu přenášet zatížení. U výztuží s krátkými vlákny je nutné dodat, že při natočení 90° bude odolnost kompozitu teoreticky odpovídat odolnosti polymerní matrice. Pro natočení 0° bude odolnost kompozitu odpovídat odolnosti vláken.

Nicméně je tu ještě jeden aspekt. Pokud bude natočení vláken různé v různých částech materiálu, pak sílu budou přenášet pouze některá vlákna a tím pádem se efekt použité

výztuže zmenšuje.

4.2 Technické termoplasty vyztužené skelnými vlákny

4.2.1 Polymery

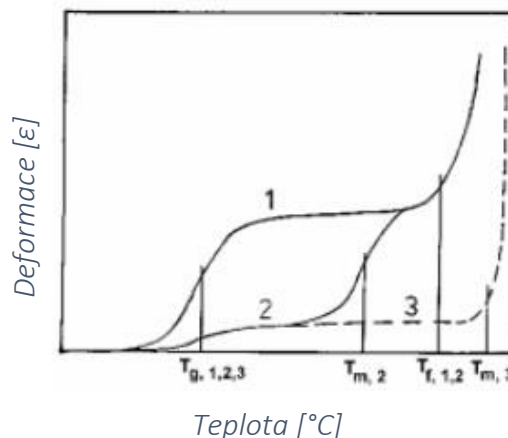
Polymer je látka s velkými molekulami, které obsahují většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku a často i dusíku, chlóru a jiných prvků. V určitém stádiu zpracování se nacházejí v kapalném stavu, který umožňuje udělit tvar budoucímu výrobku, jenž slouží v prakticky tuhém stavu. [2]

Polymery mohou existovat ve čtyřech fázích:

- Krystalické
- Amorní
 - kaučukové
 - sklovité
- Plastické

Z hlediska chování látek za různých teplot lze polymery charakterizovat:

- Teplotou zesklenní T_g (z angl. glass – sklo)
- Teplotou tání T_m (z angl. melt – tát)
- Teplotou toku T_f (z angl. flow – téct)



Obr. 2 Ukázka termomechanické křivky amorfního (1) a dvou krystalických polymerů [2]

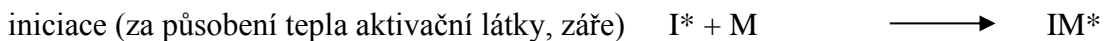
Práce s polymerním materiálem za tepla je složitá v tom, že teplotní interval pro vstříkovaní taveniny je poměrně úzký. Charakteristiky jednotlivých materiálů se výrazně liší, jak je naznačeno na obrázku č. 2.

4.2.2 Výroba polymerů

Polymery vznikají třemi základními chemickými reakcemi – polymerací, polykondenzací a polyadící.

1) Polymerace

Jedná se o řetězení monomerů (M) do konečné délky makromolekulárního řetězce. Probíhají zde děje za pomoci reaktivity (*), která se přesouvá z aktivačního prvku (I) na molekulu.



terminace:



V rámci propagace může ještě docházet k přenosu (transferu), při němž se aktivita může přenést na jinou molekulu monomeru, makromolekulu nebo na molekulu, jinou spolu-reagující složku či na činidlo. Přenosem se nemění množství aktivních částí, ale ovlivňuje délku vznikajících makromolekul.

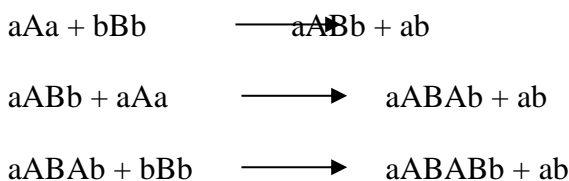
Polymerace dvou či více monomerů nazýváme kopolymerací. Ta je možná u monomerů, jejichž polymerace se energeticky příliš neliší.

2) Polykondenzace

Jde o reakci, ve které reagují složky, jež mají dvě (lineární polymer) nebo více (síťovaný polymer) funkčních složek. Jde o sled opakujících se reakcí, ve kterých ze dvou

nízkomolekulárních látek vzniká polymer a nízkomolekulární látka, nejčastěji voda.

Schematicky to lze znázornit následovně:



3) Polyadiace

Je způsob výroby, který využívá schopností materiálů uskutečnit adiční reakci, čehož jsou schopny molekuly obsahující násobné vazby.

Mimo tyto tři reakce existují ještě další způsoby přípravy polymerů, které se nedají přímo zařadit ani do jedné z těchto reakcí.

4.2.3 Polyamidy

Polyamidy (PA) jsou lineární polymery, jejichž řetězce obsahují pravidelně se střídající skupiny -CO-NH- a methylen CH₂. Výroba probíhá třemi způsoby:

- 1) Polykondenzací ω-aminokarboxylové kyseliny nebo polymerací jejich cyklických amidů.
 - Rerezentanty jsou polykaprolaktam neboli polyamid 6 (nylon 6, PA-6)
- 2) Polykondenzací poly ω-aminoundekanová kyseliny
 - Rerezentatem je polyamid 11 (nylon 11, PA-11)
- 3) Polykondenzace diaminů s dikarboxylovými kyselinami nebo jejich dichloridy.
 - Rerezentantem je polykondenzát hexamethyldiaminu s kyselinou adipovou neboli polyamid 66 (nylon 66, PA-66)
 - polykondenzát hexamethyldiaminu s kyselinou sebakovou značený jako polyamid 610 (nylon 610, PA-610)

Čísla značená v názvech polymerů značí počet atomů uhlíku v jejich molekulách. PA-6 získáme polymerací kaprolaktamu, což je cyklická sloučenina se šesti atomy uhlíku. PA-

66 získáme polykondenzací lineárních monomerů hexamethyldiaminu a kyseliny adipové, z nichž každý nese po 6 atomech uhlíku (6 + 6)

- Polykaprolaktam Polyamid 6

Polykaprolaktam Polyamid 6 – výroba probíhá při teplotách nad 150 °C. K iniciaci se používá alkalických kovů, jejich hydridů, alkoholátu a hydroxydů. Při výrobě se používá katalýza reakce komplexní sloučeniny jako jsou Sinhydridy, jejichž reakcí s laktamem vzniká iniciátor bez vedlejších spodin (vodík, voda, alkohol).

Vlastnosti – vysoký polymerační stupeň (300–500), stupeň krystalinity je okolo 45 %, obsah nízkomolekulárních látek extrahovatelných vodou pod 5 %, malá hořlavost, vysoká odolnost proti oděru a značná houževnatost. Lze utužovat anorganickými plnivými včetně použití skleněných vláken v koncentraci 6 až 60 %.

- Polyhexamethylenadlpamid polyamid 66

Výroba probíhá v autoklávu nejprve vznikem soli z ekvimolárních množství diaminu a kyseliny, dále se zahříváním roztoku soli v methanolu (220 °C až 230 °C) vytvoří oligomer rozpustný ve vodě a po odstranění vody dojde za teplot (270 °C až 280 °C) k dokončení polykondenzace. Produkt se pak vytlačuje dusíkem jako granulát. Polyamid 66 má výhodu oproti polyamidu 6, že v něm nezůstává žádný monomer a odpadá tak nutnost jeho odstranění.

PA66 je nejrozšířenějším vyráběným polyamidem kondenzací, a to také díky snadné dostupnosti vstupujících surovin.

Vlastnosti	PA-6	PA-66	PA-610
Hustota [kg.m-3]	1120	1130	1070
Teplota tání [°C]	215 - 220	250 - 260	210 - 215
Modul pružnosti v tahu [MPa]	1300	1700	1250
Navlhavost [hmot. %]	11	10	4
Teplotní odolnost [°C] (krátkodobá)	140 - 180	170 - 200	210 - 220
Relativní permitivita [1 kHz]	5	4	3

Tab. 1 Tabulka srovnání vlastností některých polyamidů, Polymery [2]

4.2.4 Značení materiálu podle normy

K značení materiálů polyamidů plněných skelnými vlákny se používá norma ISO 1874-1:2010(E).

Description block (optional)	International Standard number block	Individual-item block				
		1	2	3	4	5
Thermoplastics	ISO 1874 - PA 6T/6I,	M F,	X - 080 - X	G F 33,	ASTM D5336	PPA 0121FL34

Obr. 3 Výtazek z normy ISO 1874-1:2010(E)

Konkrétně označení materiálu znamená:

- ISO 1874 Použitá norma
- PA T/6I Značka – označení materiálu
- M F Vstřikovaný plast, speciální spalovací charakteristika
- X Nejsou uvedeny informace o viskozitě
- 080 Modul pružnosti v tahu
- X Žádný nukleační prostředek
- G Skelná výplň
- F Výplně ve formě vláken
- 33 Velký obsah výplně
- 5. blok Splnění požadavků ASTM

4.2.5 Kompozity s polymerní maticí

Většina kompozitu s polymerní maticí má v dnešní době výztuž tvořenou vlákny. Vlastnosti, které dělají tyto materiály přitažlivé jsou vysoké hodnoty poměru modulu pružnosti k hustotě – měrný modul (E/ρ_k) a pevnosti v tahu k hustotě (R_m/ρ_k) [18]. Dalšími užitnými vlastnostmi jsou odolnost proti chemické i pudní korozi, dobré dielektrické vlastnosti a matrice se skelnými vlákny jsou nevodivé.

Ve výrobách byly dříve nejvíce používané jako matrice reaktoplasty (UP, VE, EP, PF). Termoplastické matrice mají však výhodu kratšího vytvrzovacího času, což s sebou přináší i kratší výrobní cyklus, a tím i vyšší produktivitu. Po vstřiku materiálu (termoplastů s krátkými vlákny) nebo tvarovaných kompozitních desek, je třeba „pouze“ ochladit pod teplotou tvarové stálosti.

Skelná vlákna jsou amorfní – předpokládané vlastnosti v příčném a podélném směru se předpokládají stejné. Pevnost v tahu je značně závislá na stavu povrchu. Vzájemné poškozování vláken při sdružování do pramenů a absorpce vzdušné vlhkosti při výrobě značně snižuje pevnost čerstvě vytaženého vlákna, což může být až o 50 % [18]. Z toho důvodu se na vlákna nanášejí ochranné povlaky. Pro lepší adhezi vláken s kompozitem se dále opatřují vazebnými prostředky – organické silany.

4.2.6 Výztuže polymerních matic

Rozdělení výztuží nejenom pro polymerní matrice je možné rozdělit z mnoha hledisek, například:

- **Dle tvaru výztuže:**

- 1) Částicová, nevyztužující

- Izometrický tvar – sférický tvar, stejný rozměr ve všech rozměrech charakterizuje velikost částice d (např. CaCO_3)
- Neizometrický tvar – nesférický tvar s náhodnou nebo preferovanou orientací, mohou to být vrstvené segmenty s charakteristickým rozměrem k tloušťce d/h

- 2) Vlákniťá – vyztužující materiál, jsou charakterizována délkou vlákna k průměrem l/d .

- 3) Hybridní – kombinace obou typů plniv

- **Tvarový (aspektivní) poměr:**

Dalším aspektem jsou morfologické rozdíly mezi částicemi – daný tzv. tvarovým asertivním poměrem mezi jednotlivými částicemi. U krátkých vláken je toto číslo v řádu desítek, u dlouhých vláken v řádu stovek.

- Krátká vlákna mají poměr mezi délkou a průměrem menší než 100
- Dlouhá vlákna mají tvarový asertivní poměre větší než 100

- **Materiály vhodné pro vyztužující vlákna:**

Pro použití je vhodných mnoho typů materiálu – naprostou většinu aplikací pokryje následující výčet vláken: skleněná, uhlíková, borová, beryliová, wolframová, ocelová, polymerní, keramická, kovová, organická, čedičová, azbestová, proteinová atd.

Důležitou vlastností vláken je fakt, že vlákna jsou vždy pevnější než materiály v kompaktní podobě. V malých rozměrech mají jednotlivá vlákna menší poruchovost, jelikož zde dochází k minimalizaci rozměrů přirozených vad materiálu, včetně vad povrchových.

4.2.7 Skleněná vlákna

Výztuž dodává kompozitu zejména tuhost a pevnost, matrice zajišťuje vzájemnou soudržnost vláken až do lomu kompozitu. Skelná vlákna jsou nejčastěji používanou výztuží u termoplastů. Jejich průměr je 3,5 - 24 μ m. Jsou vyráběná tažením z roztavené skloviny – směs oxidů Si (s příměsí oxidů – Ca, Mg, Pb a B a malým podílem alkalických kovů Na a K. Po tažení přichází rychlé ochlazení, čímž získávají vlákna amorfní strukturu.

Tři základní typy skloviny pro výrobu vláken:

- E sklovina - 90 % všech použitých skelných vláken. Vápenaté – aluminium borosilikátové sklo s výbornými elektroizolačními vlastnostmi.
- S sklovina – má vyšší obsah oxidů Si, Al, Mg než typ E – má o 40 - 70 % větší pevnost.
- C sklovina – speciální vlákna s využitím pro vysokou chemickou odolnost.

Skelná vlákna jsou izotropní a jejich vlastnosti jsou neměnné ani při dlouhodobém namáhání, a to i při teplotě okolo 250 °C.

Obsah plniva v kompozitech s částečně krystalickou maticí může být až 70 % obsahu. Nicméně nejčastěji se obsah plniva pohybuje kolem 30 % a to z důvodu, že u částečně krystalizujících polymerů, které mají sami o sobě horší tekutost, nelze z technologických důvodů vysoké plnění aplikovat.

4.2.8 Funkčnost vláken, vlastnosti vláken

Základním předpokladem pro funkčnost vláken je správně fungující rozhraní mezi vláknem a kompozitem. Jedná se o docílení co největší plochy mezi vláknem a matricí, ale i o tenké vrstvy kolem vlákna, které mají za úkol zvýšit soudržnost vláken. Toho je dosahováno pomocí apretace.

Při dobré adhezi jsou vlákna schopná přenést veškeré napětí a matrice tak není zatížená.

Synergie vlastností – dobrá adheze mezi vláknem a materiálem je základem pro dobrý přenos síly pomocí třecí síly z matrice na vlákno. Řízená adheze na povrchu vlákna se docílí adhezí mezifází zprostředkovanou Organosilanovými vazebními činidly typu R-Si-X₃, která vytvářejí pevné vazby mezi oxidy na povrchu vláken a molekulami polymeru matrice. X představuje hydroxylové skupiny, uhlovodíkový zbytek odpovídá matrici, u níž je zásadní přítomnost funkční skupiny, která je schopna reagovat s funkčními skupinami organosilanů [6].

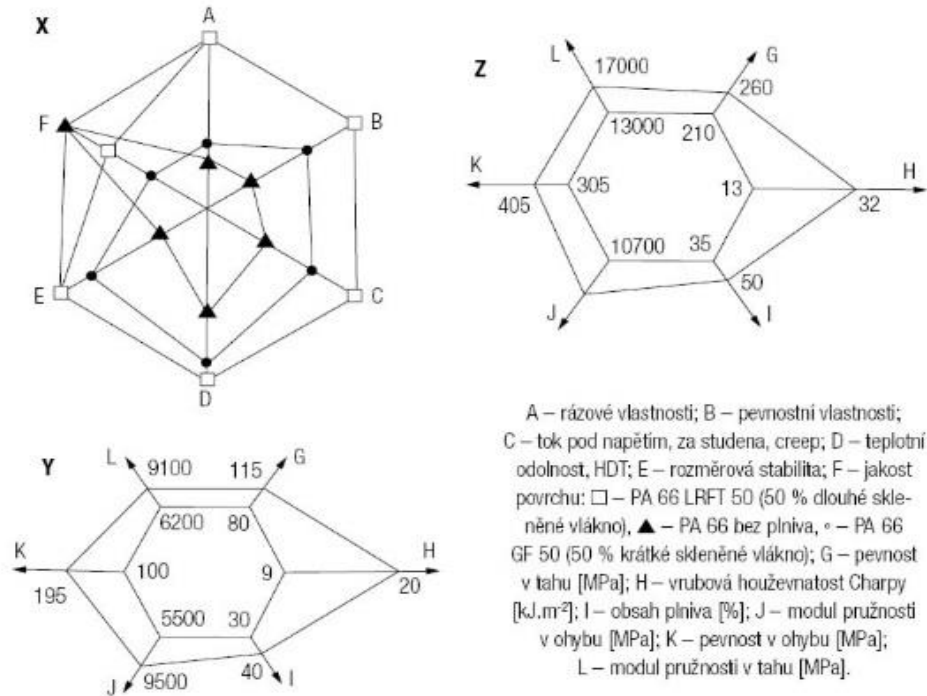
Další možnosti pro zlepšení adheze jsou úprava povrchu vláken reaktivními činidly, například pomocí chloridu křemičitého SiCl₄. Použití kopolymerů, které zvýší adhezi k plnivům roubováním řetězců ahydridem kyseliny maleinové. Adhezi ovlivňují i chemické vazby mezi vlákny a matricí [6].

Zakončení vláken:

Při zatěžování se zátěž přenáší na vlákno třením – smykovým napětím. Konce vlákna zatížení nepřenášejí. S prodlužujícím se vláknem roste hodnota přenášeného napětí až dosahuje svého maxima, pak již více nepřenáší, je konstantní. Když je vlákno příliš krátké, dojde k jeho vytažení. Jako kritická hodnota se považuje poměr $d/l = 10$.

Polymery s krátkými vlákny mají nevýhodu, jsou anizotropní. Teoreticky tedy ve směru toku jsou vlastnosti jiné než kolmo na tok, kde jsou vlastnosti podobné s matricí. Navíc tuto vlastnost mohou ovlivnit různé objemové podíly plniva v různých místech.

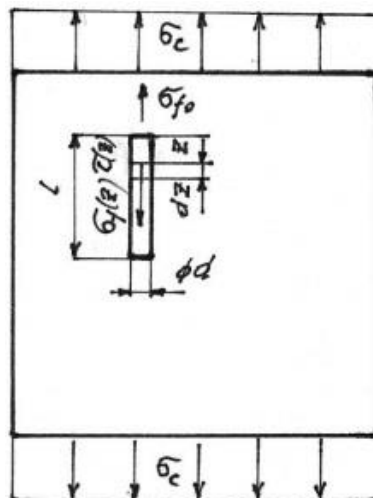
Větší délka vláken LFRT – zvyšuje v materiálu modul pružnosti zejména při vyšších teplotách a zvyšuje rázovou houževnatost při nižších teplotách.



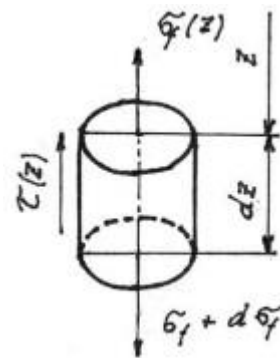
Obr. 4 Porovnání kompozitu s dlouhými a krátkými vlákny s polymerní matricí bez výztuže. [14]

4.2.9 Teorie přenosu zatížení vlákna

Pro mechanické odvození přenosu zatížení mezi vláknem a matricí se používá následující model – vlákno je usměrněno do směru zatížení matrice.



Obr. 6 Geometrický výpočtový model přenosu zatížení v krátkém vlákně [23]



Obr. 5 Uvolněný prvek vlákna [23]

Podmínka rovnováhy ve směru osy:

$$\pi \cdot r^2 \cdot (\sigma_f + d\sigma_f) - \pi \cdot r^2 \cdot \sigma_f - \tau \cdot 2\pi \cdot r \cdot dz \quad 4.1$$

r – poloměr vlákna

σ_f - zatížení ve vláknu

τ – smykové napětí na rozhraní vlákna a matrice

Po úpravě dostáváme:

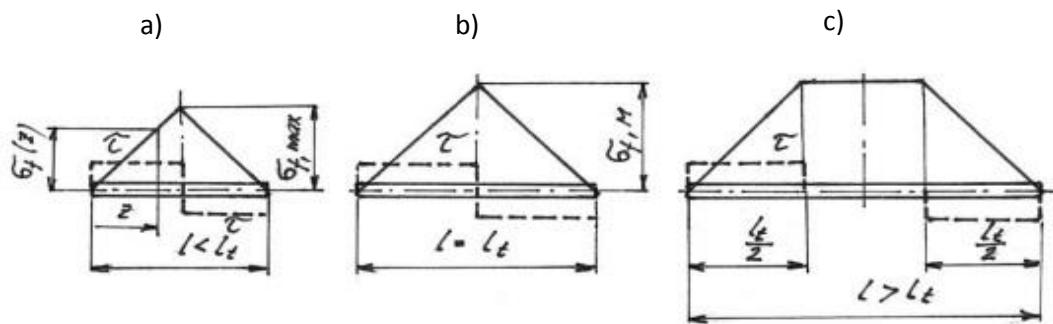
$$d\sigma_f(z) = \frac{2\tau(z) \cdot dz}{r} \quad 4.2$$

Předpokládáme, že smykové napětí je po celé délce konstantní. Po integraci na pravé a levé straně pak dostáváme vztah pro napětí ve vláknu:

$$\sigma_f(z) = \frac{2\tau \cdot z}{r} \quad 4.3$$

Ze vzorce se dá vyvodit kritická délka vlákna l_k , taková délka vlákna, která přenese maximální zatížení vlákna:

$$l_k = \frac{\sigma_{Pf} \cdot r}{\tau_k} \quad 4.4$$



Obr. 7 Průběh napětí ve vláknu σ_z a smykového napětí na hranici vlákno-matrice v závislosti na délce vlákna [24]

Z grafu se dá usuzovat, že pro přenos maximálního zatížení, které vlákno dokáže přenést, musí být vlákno dostatečně dlouhé. Na obrázku č. 7 tomu odpovídají případy b) a c). Pokud je vlákno kratší než jeho kritická délka, pak vlákno dokáže přenést menší zatížení a při překročení mezního zatížení, které je schopná délka vlákna přenést, se vytrhne.

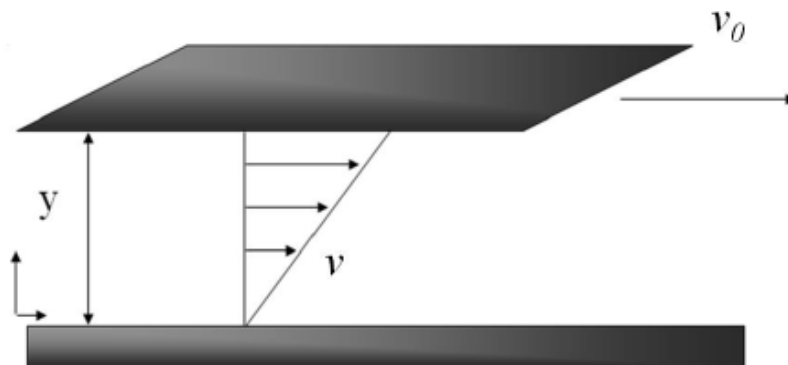
Způsob porušení kompozitu/vlákna je tedy indikátorem správnosti navrženého kompozitu.

4.3 Reologie toku polymerního materiálu

4.3.1 Newtonův zákon

Popisem chování materiálů při toku se zabývá obor reologie. Reologie přitom řeší vztah mezi napětím, deformací a časem. Materiály lze z tohoto úhlu pohledu dělit podle hledisek, zda u nich viskozita závisí na smykové rychlosti, zda prokazuje elastickou či neelastickou závislost, výskyt prahového napětí, které je nutné překonávat pro možnost deformace, nebo zda viskozita závisí na čase při konstantní smykové rychlosti.

Základním modelem popisujícím chování toku taveniny je Newtonův popis chování toku kapaliny, který vychází z úvahy toku kapaliny mezi deskami, viz obrázek č. 4. Horní deska se v tomto modelu pohybuje a spodní deska je nepohyblivá. Mezi deskami proudí kapalina. Mezi kapalinami a deskami probíhá tření, které rozpohybuje horní desku rychlostí v_0 .



Obr. 8 Model reologického chování během smykového namáhání [1]

Rychlost horní desky vyvolává smyková síla/tření mezi taveninou a deskou. Relativní posunutí vyjadřuje smykovou deformaci a rychlost deformace je tedy dána vzorcem:

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dy} = \frac{dx}{dy} \quad 4.5$$

Z toho se dá odvodit zajímavé srovnání, že viskozita je mírou úměrnosti mezi napětím a rychlostí smykové deformace.

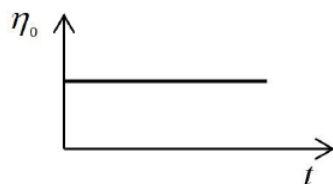
Smykové napětí pak lze vyjádřit vzorcem:

$$\tau_{xy} = \eta \cdot \dot{\gamma}_{xy} \quad 4.6$$

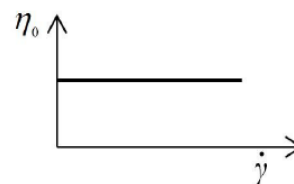
kde:

- τ_{xy} smykové napětí
- $\dot{\gamma}_{xy}$ rychlost smykové deformace
- η_0 Newtonská (limitní) viskozita

Pro látky, jejichž chování se dá popsat dle Newtonovského modelu, jsou hodnoty viskozity materiálovou konstantou, nazývají se Newtonské látky a hodnoty konstant je možné dohledat v tabulkách. Díky tomu není viskozita závislá na čase, ani na rychlosti smykového napětí.



Graf 1 Viskozita Newtonských látek jako veličina nezávislá na čase



Graf 2 Viskozita Newtonských látek jako veličina nezávislá na rychlosti smykové deformace

4.3.2 Toková křivka ne-Newtonských – polymerních materiálů

Viskozita se u polymerů mění s teplotou, tlakem, a závisí na molekulárních parametrech (molekulární hmotnost, distribuce molekulárních hmotností, větvení řetězců a dalších).

Pro Ne-Newtonské látky je viskozita funkcí rychlosti smykového tření.

$$\eta = f(\dot{\gamma}) \quad [\text{Pa}\cdot\text{s}] \quad 4.7$$

Závislost smykové rychlosti na viskozitě se dá vyjádřit následujícím vztahem:

$$\eta(\dot{\gamma}) = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad 4.8$$

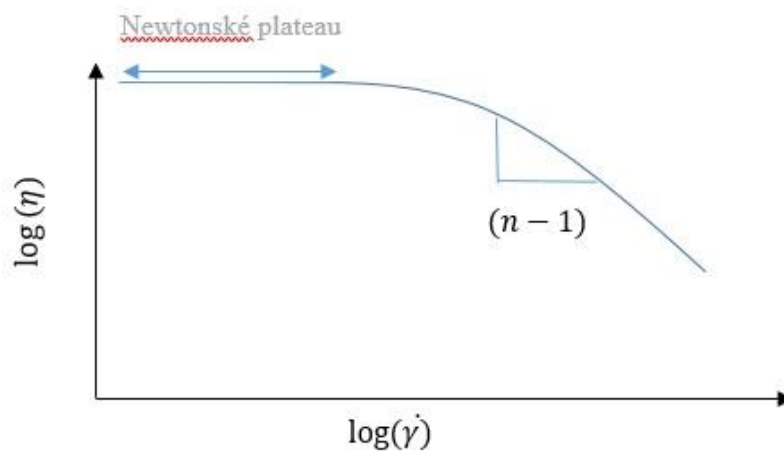
Kde:

- n je záporná hodnota, je to sklon křivky, tzv. power low index, který nejčastěji u ne-Newtonských látek bývá 0,5
- k časová konstanta

Pro logaritmické hodnoty viskozity a smykové rychlosti dostaneme charakteristický tvar křivky závislosti viskozity na třecí rychlosti, viz graf č. 3.

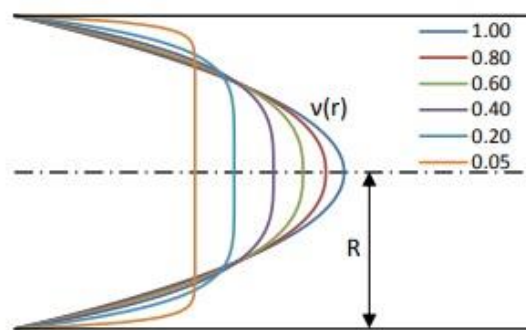
$$\log \eta = \log k + (n - 1) \log \dot{\gamma}$$

4.9



Graf 3: Charakteristika logaritmických hodnot viskozity a smykové rychlosti

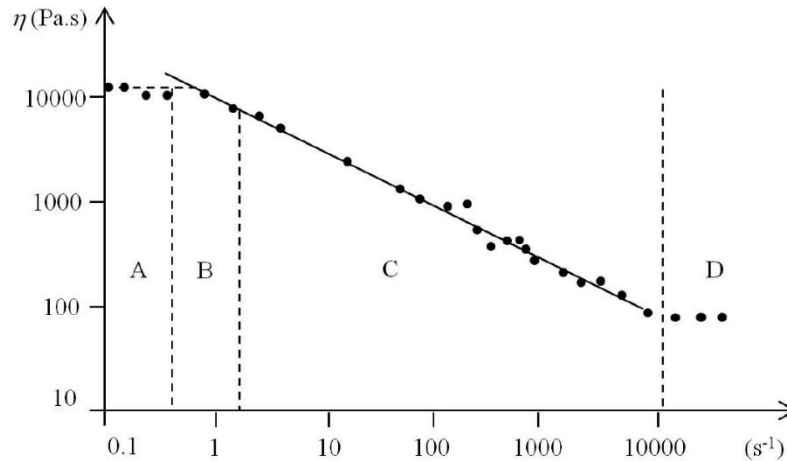
Závislosti průběhu čela tokové křivky na Power low indexu se projevují zakřivením křivky, tak jak je ukázáno na obrázku č. 6



Obrázek 6: Rychlostní profily (pro různá n) toku suspenzí splňujících mocninný zákon [3]

Charakteristická křivka ještě jednou, tentokrát rozdělená na důležité oblasti. Matematické popsání chování toku polymerního materiálu vystihuje následující závislost viskozity na

smykové deformaci. Vycházející křivka je rozdělena do čtyř částí.



Graf 4: Schématická vtoková křivka polymerních látek

- Zóna A** Pro malé plnicí rychlosti se polymery chovají jako Newtonské látky. Působí zde malé smykové napětí a látky nemají tendenci přetvářet svojí vnitřní strukturu.
- Zóna B** Při dalším zvyšování rychlosti přestává být smyková deformace na viskozitě nezávislá. U polymerních materiálů tato závislost klesá. Směrnice se postupně mění až se ustálí. Dá se to vysvětlit tím, že vnitřní mikrostruktura se postupně díky vnitřnímu smykovému napětí přizpůsobuje směru toku.
- Zóna C** Zde je již směrnice ustálená a kontinuálně klesá až k poslední fázi. Je nejčastěji popisována tzv. Mocninovým zákonem, který má své přednosti v jednoduchosti, protože je to dvouparametrový model, jehož vstupy lze získat z experimentálních dat. Nicméně se tento zákon nehodí k popisu zbylých částí křivky A, B, D.
- Zóna D** Je také označována jako druhé Newtonské plateau. V této zóně se znovu stává viskozita nezávislým parametrem. Hodnoty v této oblasti jsou špatně měřitelné.

4.3.3 Carreau model toku taveniny

Celou tuto problematiku věci vhodně popisuje Carreau model. Tento model je častou součástí vyhodnocovacích softwarů reologických přístrojů. Model je velmi oblíbený pro různé aplikace, protože má pouze tři parametry. Vychází z fenomenologické teorie, v generalizované formě ho lze použít i pro popis elastické odezvy polymerních látek během toku. Je používán i pro popis průběhu viskozity při nízkých smykových rychlostech.

Matematické vyjádření modelu je:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{(n-1)}{2}} \quad 4.10$$

Kde:

- η_0, η_{∞} - jsou viskozity při velmi nízkých a velmi vysokých smykových rychlostech
- λ – je časová konstanta

Smyková rychlost:

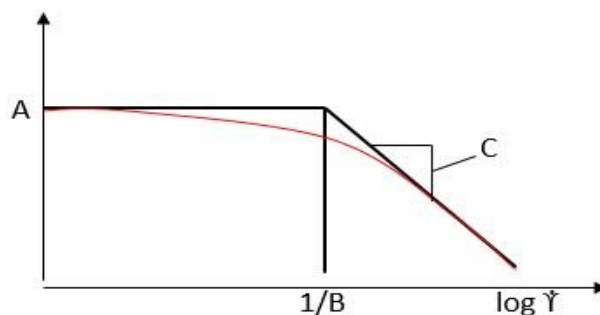
$$\dot{\gamma} = \frac{dV_x}{dy} \quad 4.11$$

Přístup Carreau může mít také následující podobu:

$$\tau = \frac{a_T \cdot A \cdot \dot{\gamma}}{(1 + a_T \cdot B \cdot \dot{\gamma})^C} \quad 4.12$$

Kde:

- a_T – Faktor posunu teploty
- A, B, C – jsou empiricky určené látkové konstanty, které mohou být určeny z experimentálně stanoveného průběhu $\log \tau$ nad $\log \dot{\gamma}$



Graf 5: Konstanty v Carreau modelu – Kunststoffprüfung [13]

4.4 Modely toků taveniny kompozitu

4.4.1 Konstrukce toku materiálů do formy

Vyhotovení technologického postupu vytvoření odlitku vstřikem polymerního materiálu do formy je ve všech ohledech komplexní proces. Do procesu vstupuje mnoho faktorů na straně technologie, materiálu a specifického tvaru výrobku, možností použití strojového parku, rozpočtu, který je možný použít, očekávaných výsledných výrobních časech a zkušeností toho kterého technologa. Pro specifické zadání zkoumání orientace vláken ve výrobku jsou důležité zejména tyto faktory:

Teplota taveniny způsobující vady toku taveniny. Příliš vysokého teplota může vést k degradaci materiálu nebo k prodloužení výrobního času. Nízké teploty taveniny zase vedou ke vzniku vad, např. studeným spojům [6].

Plnicí rychlost může vždy způsobovat potíže s vedením taveniny, pokud je malá, pak bude docházet k velkému tření a kvalitativním problémům s kvalitou povrchu. Velká rychlost může způsobovat turbulentní proudění taveniny.

Dochází zde k rozporu, aby nedocházelo k tuhnutí materiálu na stranách formy při průchodu taveniny, musí být vyladěné následující věci:

- Teplota taveniny
- Plnicí rychlost
- Teplota povrchu vtokové soustavy

Především teplota je ale v přímém rozporu se snahou o efektivní výrobu, kde vyšší teploty prodlužující cyklový čas výroby každého kusu. Prodloužená délka toku může vést k tomu, že čelo toku se zataví.

Pokud dochází k tuhnutí taveniny na stěnách, dochází k omezení vyplňování, jejímu zpomalení a také to má dopad na stav dříve ztuhnutého materiálu na stěnách. Sníženou viskozitu může způsobovat i vlhkost. Vlhkost a nedostatečně připravený materiál způsobují vady před litím i po lití.

Množství plniva

Více plniva do materiálu působí spíše problémy, vyšší plnění bude působit vyšší viskozitu. Vlákna mohou také vyplout na povrch taveniny a tím ovlivňovat její tok.

Vlákna na povrchu taveniny způsobuje:

- Plnicí proces – snižují plnicí rychlost, snižují teplotu taveniny, snižují teplotu formy [6]
- Tavenina – snižují schopnost odvzdušnění, zvyšují délku toku, tzv. gating (urychlení toku materiálu v zúženém místě) [6]
- Stroj – způsobilost stroje, výkon stroje
- Materiál – obsah vlhkosti, viskozity, obsah vláken [15]

4.4.2 Analýza chování toku taveniny kompozitu

Téma orientace vláken je zkoumáno z mnoha různých pohledů. Jin Kom KIM a Ju Ho SONG [22] se zabývají reologickým modelem z pohledu komplexní viskozity vyjádřené smykovým napětím, elastickým napětím a viskozitním napětím. Dále predikují stupeň natočení vláken, která jsou zpracovávána smykovým oscilátorem a poté je ověřují experimentem. Dokazují zde, že reologická data jsou silně ovlivněna orientací vláken ve vzorcích, což se ještě více projevuje při vyšších koncentracích vláken.

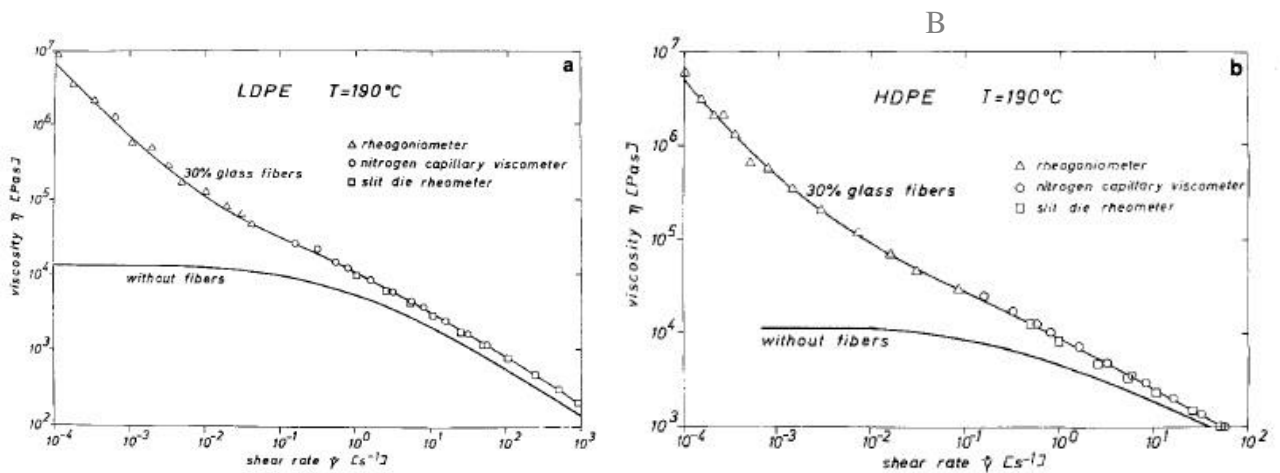
Crowso, Folkes a Bright [20] dokázali ve své práci, že natočení vláken ve směru toku pro malé vstřikovací rychlosti, a tedy i pro malé smykové rychlosti není uspořádané s tokem, zatímco ve vysoké smykové rychlosti jsou vlákna uspořádaná ve směru s tokem. Také uvádí, že podíl natočených vláken s tokem se zhoršuje s délkou plněné kavity.

H. M. Launa [16] zkoumá vliv vláken na základní ukazatele reologie. Měřením na kapilárním reometru byla naměřena závislost viskozity na smykové rychlosti u LDPE ($0,918 \text{ g/cm}^3$) a HDPE ($0,960 \text{ g/cm}^3$) pro vlákna $d = 14\mu\text{m}$ s tvarovým poměrem 31:1, obsah vláken je 30 %. Výsledek je vidět na grafu č. 6 A, B.

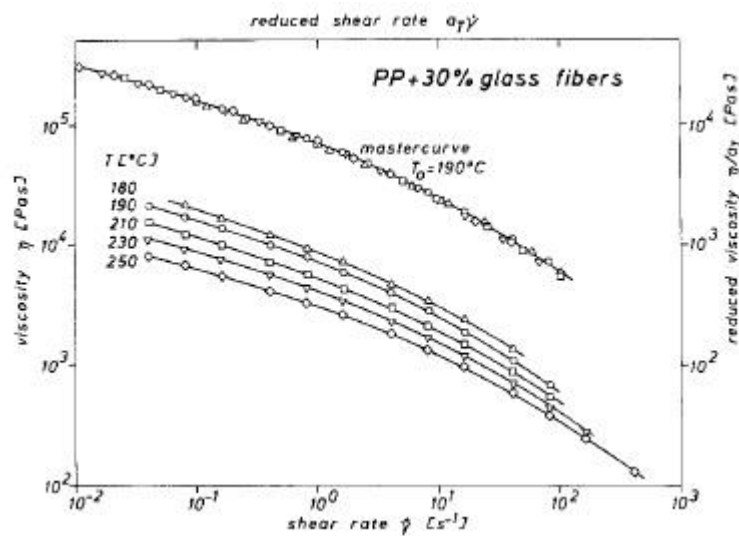
Z experimentu plyne, že při nízkých smykových rychlostech je viskozita kompozitu velmi vysoká, neexistuje zde tzv. Newtonské plateau, tak jako u materiálu, který není plněn vlákny. Ve vysokých smykových rychlostech je naopak tření nezávislé na plnivu – křivka

kompozitu kopíruje křivku polymeru ve srovnatelných hodnotách.

Na grafu č. 7 je vidět další experiment, který zkoumá závislost viskozity na smykové rychlosti pro různé teploty materiálu. Tvar závislostí se pro různé teploty nemění nicméně výsledky ukazují, že se zvyšující se teplotou viskozita klesá. Tato závislost byla naměřena pro polypropylen. Stejných výsledků však bylo dosaženo i pro další materiály s vyztuženými vlákny LDPE HDPE a PP 6.



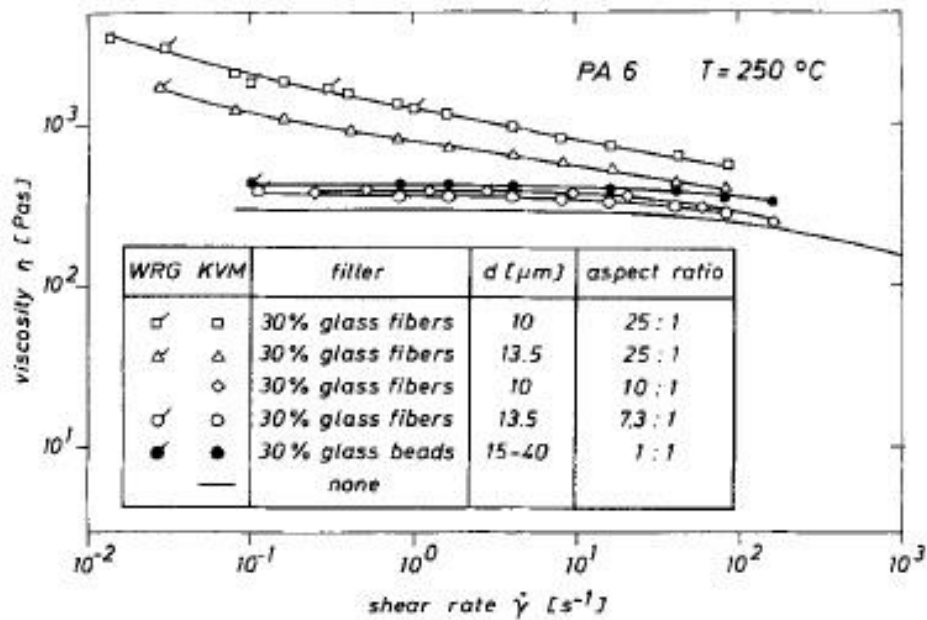
Graf 6: Závislost smykové rychlosti a viskozity pro LDPE (A) a HDPE (B) plněné vlákny a neplněné vlákny [15]



Graf 7: Závislost teploty na viskozitě u polypropylenu plněného 30 % vláken [15]

Závislosti viskozity na tvarových aspektivních poměrech vláken l/d plněných pro materiál PA 6 jsou vidět v grafu č. 8. Zde je vidět, že křivky mají charakteristický

tvár pro Netonské plateau pouze pro menší poměry než 10:1, přičemž maximální průměr vlákna je zde 25 μ m. Pro tvarové poměry větší než 10:1 pak dochází k efektu velké počáteční viskozity pro malé smykové rychlosti. Pokud se porovnají poloměry vláken, poté vlákna s menším poloměrem mají větší viskozitu při zachování stejného průběhu funkce.



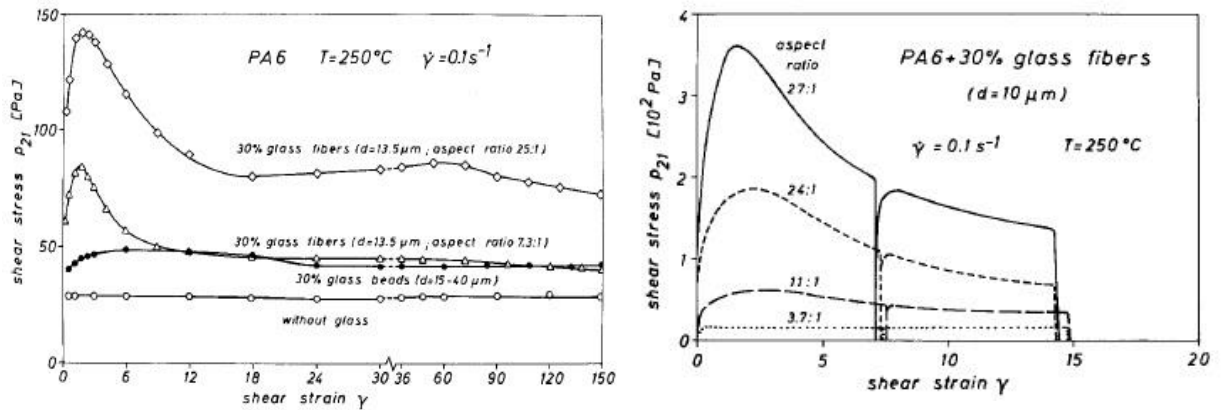
Graf 8: Porovnání závislosti viskozity na rychlosti deformace podle tvarového poměru vláken l/d pro materiál PA 6 [15]

Na grafech č. 9 A, B je vidět výsledek experimentu, kdy materiál byl podroben smykovému namáhání při konstantní smykové rychlosti. Výsledkem je zde průběh smykového napětí. Počáteční nárůst je zřejmý u kompozitu plněných vlákny. U kompozitu plněných kuličkovým plnivem je nárůst zanedbatelný, minimální.

V grafu B jsou ukázány rozdíly mezi různými tvarovými poměry vláken. Vysoké počáteční hodnoty jsou evidovány u vyšších poměrů vláken l/d . Zajímavé je, že u kompozitu s tvarovým poměrem 3,7:1 je tvar smykového napětí podobný jako u polymeru s kuličkovou výplní. U polymeru s kuličkovou výplní je vidět pouze mírné maximum smykového napětí, způsobené tím, že i kuličková výplň se musí srovnat se směrem toku.

V pokusu, který je zde prezentován je znázorněno, že po ukončení a znovu obnovení

smýkového napětí se materiál vrací svým průběhem do původní křivky. Z toho lze usuzovat, že přizpůsobení^A matrice průběhu toku a přizpůsobení výz^B směru toku je oddělitelné, materiál se na začátku přizpůsobil a po odeznění zatěžující síly se natočení vláken nemění [16].

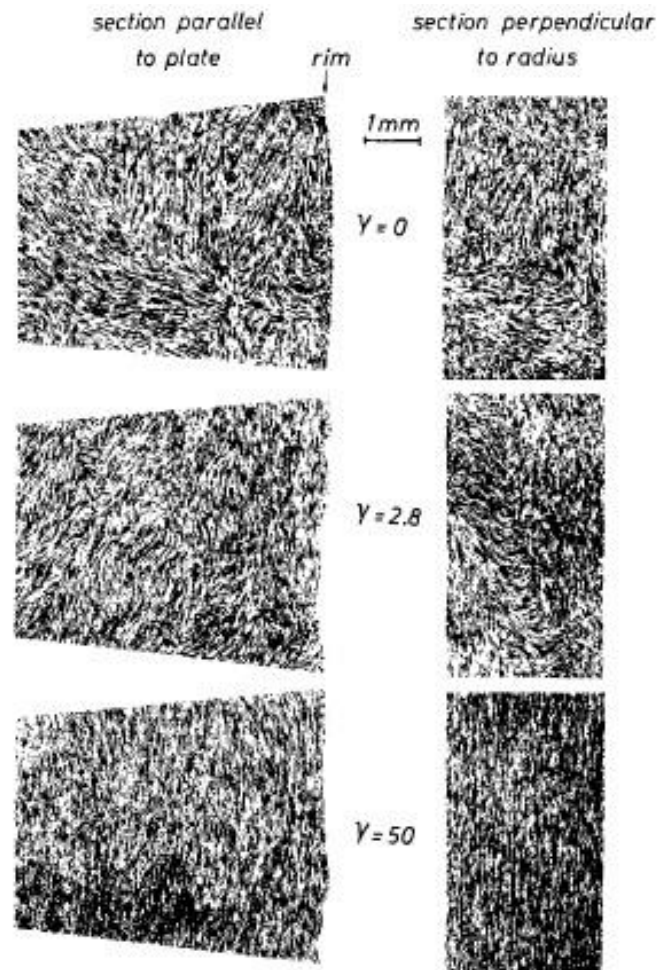


Graf 9: (A, B) Závislost smykového napětí u deformovaného materiálu při konstantní smykové deformaci. Na (A) je porovnání polymeru a kompozitu s kuličkovou výplní a výplní vláknny [15]

4.4.3 Orientace vláken

Orientace vláken je určována silou smykových sil v toku taveniny. Síly vyvolává vysoká viskozita polymerního materiálu reagujícího se stěnou formy. Vláknna jsou orientována ve směru toku, pokud je tření vysoké. Tento úkaz je pozorován po stranách toku materiálu. V místech, kde nepůsobí velké smykové napětí, není tento jev pozorován, a naopak natočení vláken je zde až náhodné.

V práci LAUN, H. M. je tento efekt vidět velmi názorně. Na obrázku č. 9 jsou vidět cíleně ztuhlé stavy vyztuženého polymeru při průchodu Weissenbergovým rheogoniometrem a to pro tři různé smykové rychlosti: $\dot{\gamma} = 0 \text{ s}^{-1}$ a $\dot{\gamma} = 25 \text{ s}^{-1}$, které odpovídá maximum dosaženého smykového napětí a dále pak pro rychlost $\dot{\gamma} = 50 \text{ s}^{-1}$, která odpovídá již ustálenému stavu smykového napětí. Závislost smykového napětí na smykové rychlosti je vidět na grafu č. 6. Natočení vláken je názorně ukázáno na řezech vodorovných se stěnou a kolmých se stěnou. Smyková rychlost určuje natočení vláken, orientace se smykovou rychlostí je zcela náhodná pro nulovou smykovou rychlost, pro smykovou rychlost $2,8 \text{ s}^{-1}$ se již orientace částečně projevuje, zde odpovídá maximálnímu smyslovému napětí dosaženému ve vzorku, proto vlákna ještě nejsou uspořádána ve směru tečení. Smyková rychlost 50 s^{-1} odpovídá ustálenému stavu smykového tečení – orientace vláken je na vzorku již zcela názorně viditelná.



Obr. 9: Natočení vláken ve dvou směrech – rovnoběžně se stěnou a kolmo na stěnu pro různé třecí deformace.

Tyto jevy můžeme sledovat v toku materiálu. Vláknko je narovnááno v toku smykovým napětím a dostává se tím to rotace. Případná změna směru toku znova narovnáává vlákno jiným směrem, nicméně vlákno se musí nejdříve zastavit z dřívější rotace.



Obr. 10: natočení vláken při efektu natahování struktury matrice a působení smykové deformace

Vlákno se může natáčet, když není ovlivňováno jinými vlákny, proto je důležitá hustota přísadových vláken a zároveň jejich tvarový poměr. Toto je potřeba mít na paměti, v technicky používaných kompozitech bývá hustota vláken velká a ovlivnění natáčení vláken je tím pádem vysoké [16].

Jak vlákna ovlivňují tok. Jelikož jsou vlákna neohebná, objem polymerní taveniny nemůže jednoduše protékat kolem vláken a je vystaven vyšší mikroskopické smykové rychlosti než makroskopické rychlosti. Tok kolem vláken, která se nedeformují, musí být kompenzován. [16].

Teplota není považována za zásadně důležitou pro orientaci vláken, pokud není hraniční pro jiné omezující efekty toku materiálu nebo jeho degradace [16].

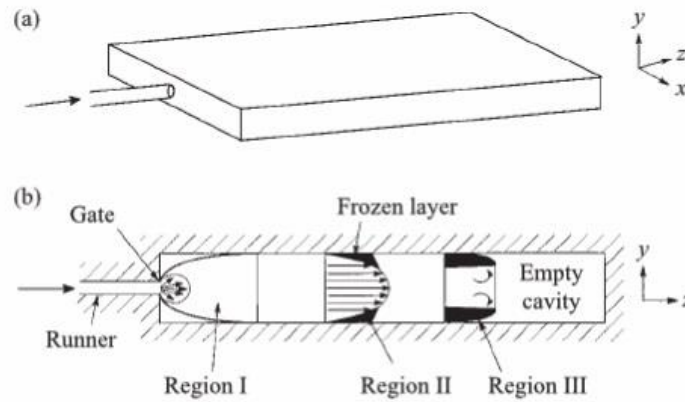
Ve vysoké smykové rychlosti jsou vlákna efektivně zarovnávana ve směru toku. Viskozita je nejvíce ovlivněna hustotou vláken a málo ovlivněna asertivním poměrem. Křivka funkce viskozity bude mít stejný tvar jako má křivka matrice bez výztuže, nicméně viskozitu silně ovlivňuje smykové tření na mikroskopické úrovni [16].

Při nízké smykové rychlosti je zarovnání vláken ve směru toku méně výrazné, normálové síly v materiálu jsou nižší. Stejně zde však probíhají děje narovnání vláken, a proto je viskozita vyšší než u neplněné matrice. Viskozita bude záležet jak na rozměrovém poměru, tak na hustotě výztuže v matrici [16].

Teplota ovlivňuje časový rozsah pohybů, nicméně by neměla ovlivňovat natočení vláken při dané smykové rychlosti [16].

4.4.4 Model plnění kavity taveninou

Plnění kavity taveninou je zajisté vždy závislé na tvaru plněné kavity. Nicméně některé efekty jsou platné obecně. Na obr. č. 11 je vyobrazena kavita tvaru kvádru, která je plněna přes plnicí otvor. Pokud není forma řádně navržena, plnicí otvor je řádově nižší než průřez kavity, může docházet při vysokých rychlostech k toku, který se nedotýká stěn, tavenina se v takovém případě vrací od zadní stěny kavity a zpětně vyplňuje kavitu při stěnách. Obecně by tedy mělo platit, že tavenina plní celý profil kavity.



Obr. 11: ukázka modelu plnění kavity taveninou [17]

Dříve než se tavenina dostane na teplotu skelného přechodu T_g , tavenina začíná tuhnout na studené stěně formy. Tato vrstva se zvětšuje v závislosti na čase a tvoří se průběžně tam, kde se tavenina při zaplňování formy stěn dotýká [17].

V případě nízkých plnicích rychlostí 10 s^{-1} již plnění bude probíhat bez fontánového toku.

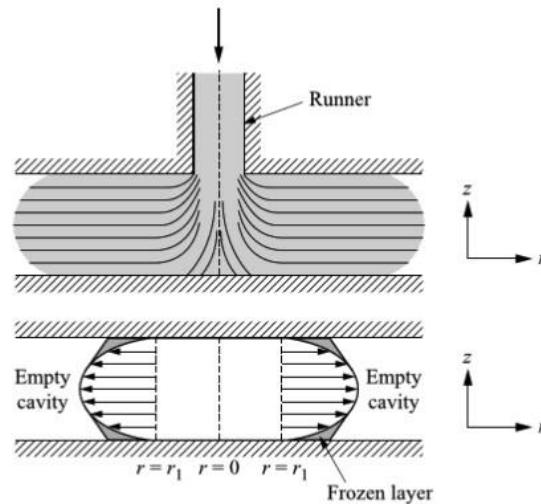
4.4.5 Namrzání taveniny na stěnách kavity

Při vstřikování dochází k tomu, že při nevratné deformaci hmoty vzniká teplo – přeskupováním materiálu do nových poloh, práce s tímto spojená se mění na tepelnou energii. K těmto jevům dochází při tečení materiálu spontánně a záleží na kvantizačním poloměru, kdy se projeví dodatečným zvýšením teploty v daném místě. Tento děj – disipační děj je úměrný součinu smykového napětí a smykové rychlosti. K ohřevu tedy dochází v místech nejrychlejšího proudění, tedy tam, kde je profil toku nejvíce zúžen. Tento jev může docílit až teploty T_c a tepelnou degradaci materiálu [14].

Teplota stěny je při vstřikování nižší než je T_m . Díky tomu dochází při toku polymerního materiálu k neustálenému procesu v čase, kdy na „studené“ stěně dochází k tuhnutí materiálu ve vrstvách – dochází k namrzání taveniny na stěnách kavity [14].

Kolem tuhnoucí vrstvy tavenina teče, ale profil toku není na povrchu nulový, tento jev nazýváme fontánovým tokem, který kompenzuje pomalejší tok u stěn. Tento tok je pro plnění tvarových forem nejvýhodnější způsob plnění [14].

Parametry pro přechodové teploty se mění u plastů skokově – kolem T_g modulu pružnosti o tři řády, koeficient teplotní roztažnosti o 100 procent. Největší přechody jsou u T_m [14].

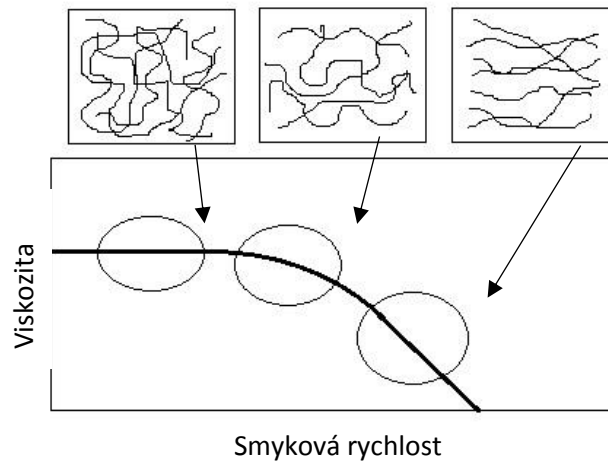


Obr. 12: Model plnění taveninou rotační kavity

Tok obecně závisí na mnoha parametrech – na geometrickém tvaru kavity, rychlosti plnění kavity (smyslové rychlosti na hraně plnicího ústrojí a plnění kavity), který také určuje, zda se bude jev fontánového plnění vyskytovat, množství normálového napětí, které je naakumulováno v tavenině, jež opouští vstřikovací otvor a je nastřádáno v momentu plnění kavity. Teplotní rozdíl mezi taveninou a stěnou kavity, který určuje, jak velká vnitřní stěna ztuhlé taveniny se bude vytvářet, a jak bude tok omezovat a usměrňovat.

4.4.6 Efekt prodloužení mikrostruktury

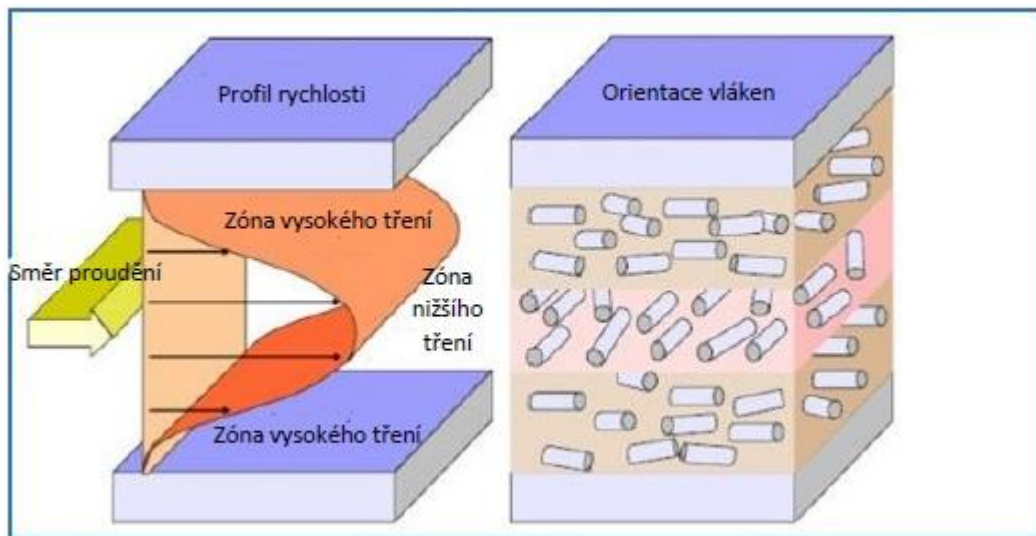
Během toku probíhá efekt tzv. prodloužení vláken, což je typickým efektem polymerních materiálů, u kterých trvá odezva na zatěžující sílu. Touto odezvou je narovnávání mikrostruktury polymeru do směru toku.



Graf 10: Efekt prodloužených makromolekul polymerního materiálu při tečení

4.4.7 Shrnutí poznatků o toku taveniny

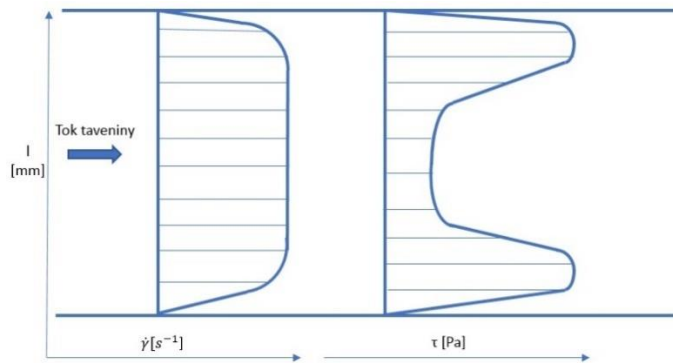
V roce 1982 byl vyvinut model taveniny Menges obr. 13, který udává orientaci vláken v toku polymerního kompozitu. Je založen na analytickém řešení rovnice pro Newtonovu tekutinu ve štěrbině.



Obr. 13: Model Menges: profil rychlosti a orientace vláken během procesu vstřikování (Menges, 1982) [1]

Na základě tření rozděluje tok do kategorie vysokého a nízkého tření a podle toho uvažuje natočení vláken v toku taveniny. Nicméně tento model nebere v úvah zvýšené tření na stranách kavity na základě tuhnutí taveniny na stěnách. Tření bude daleko vyšší. Dále model nezvažuje fontánový tok, který také může ovlivňovat natočení vláken.

Teoretický model průběhu smykového napětí a smykové rychlosti, který zohledňuje efekt tuhnutí taveniny na stěnách, je možné vidět na následujícím grafu.



Graf 11: Dvojdímenzionální popis průběhu smykového napětí a smykové rychlosti

4.5 Metody analýzy orientace vláken (přímé a nepřímé metody)

Z metod, které jsou aktuálně k dispozici lze zkoumat přímo orientaci vláken v zásadě dvěma způsoby, rentgenovou počítačovou tomografií (CT – Computed Tomography, X-Ray) anebo za použití mikroskopu metodou SEM.

Natočení vláken se dá provádět porovnáním teoretických vstupů a výdrže vzorků s reálným výsledkem například trhací zkoušky. Nicméně není možné tímto způsobem přímo zkoumat rozložení orientace vláken v jednotlivých částech profilu.

1) Rentgenová počítačová tomografie

Tato metoda je založena na prozáření objektu rentgenovým zářením. Při tomto procesu dochází k zaznamenání poměru mezi vstupní a prošlou intenzitou. Objekt je možné snímat z několika stran. Data, která jsou takto získaná se zpracovávají připraveným počítačovým algoritmem, který byl vytvořen speciálně pro potřeby tvorby virtuálních řezů v objektu. Takto je možné zkonstruovat 3D model. CT technika se v současnosti rozšiřuje z lékařské oblasti, kde je silně využívána, do dalších odvětví, především průmyslového a vědeckého prostředí. Moderní přístroje využívané pro průmyslové účely umožňují dosáhnout rozlišení až na úroveň jednotek mikrometrů [7].

2) Skenovací elektronová mikroskopie SEM

Druhou možnou metodou pro zkoumání vláken ve vzorku je mikroskopická metoda. Tato metoda byla použita i pro přípravu vzorků v této práci.

4.5.1 Popis metody

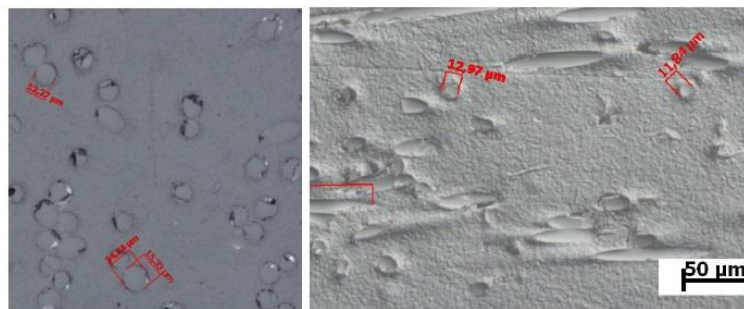
a) První část metody spočívá v přípravě vzorků:

- Pro řezání je použita přesná metalografická pila s chlazením vodou.
- Preparace vzorku – zalisování vzorků do vosku
- Při přípravě nesmí být překročena teplota pro měknutí materiálu
- Minimalizovat dobu působení vody na vzorek – vzhledem k nasákavosti polyamidu vodou je nutné vzorky v nejkratší možné době řádně osušit
- Brusný papír – použitý SiC se zrnitostí 320–1200 dle normy FEPA

b) Mikroskopické sledování

Vzhledem k tomu, že polymerní materiály jsou více transparentní, lze je s výhodou sledovat optickou mikroskopií, a to jednak ve standardním režimu – světelného pole, a také v režimu interference – polarizovaného světla.

Srovnání obou pokusů provedl inženýr Krebs ve své disertační práci s výsledným stanoviskem:



Obr. 14: Porovnání mikroskopických metod získaného obrazu – vlevo: Světlé pole, vpravo: DIC Nomarski

Pro účely studie orientace vláken na konkrétních vzorcích lépe vyhovuje vzorek vyrobený interferenčním kontrastem – DIC Nomarski (obr. č. 14). Ve srovnání se světelným polem nelze sice na vzorku vidět rozbití vláken či hranice fází, nicméně metoda světelného pole

se ukazuje pro analýzu natočení vláken jako horší.

5 Praktická část

5.1 Jaký je efekt Natočeného vlákna

Zdrojů, které by se zabývaly tím, jakým způsobem se přenáší zatížení přes vlákno, když je vlákno natočené, je málo. Obecně mechanika v tomto ohledu vypočítává účinky natočení vlákna pro dlouhé vláknové kompozity, kde je předem jasné, jak budou vlákna natočená a jaký efekt pro mechanické vlastnosti celkové struktury kompozitu toto bude znamenat.

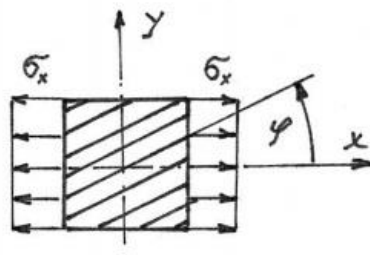
U kompozitu s krátkými vlákny, ale i u kompozitu s delšími vlákny (cca 7 mm) se předpokládá náhodné uspořádání vláken. Tedy že výsledná struktura matrice-výztuž bude mít amorfní strukturu.

Pokud je pro různé aplikace nutné získat v jistých směrech potřebnou pevnost a bude možné minimálně částečně řídit natočení vláken v konečném výstřiku, pak je také nutné získat představu o tom, jak jednotlivá vlákna ovlivňují výsledné vlastnosti kompozitu.

U polymerů obecně platí a v této práci to bylo i dokázané, že větší objem vláken v polymerní matrici zhoršuje vlastnosti taveniny, jako je například tření, zhoršují se kvalitativní parametry výsledného produktu a v neposlední řadě u větších objemů vláken dochází i k ovlivňování vláken navzájem.

5.1.1 Pevnost rovinného ortotropního kompozitu

Zde je model, kterým lze počítat efekt natočení vlákna u laminového kompozitu. Pro výpočet pevnosti rovinného ortotropního materiálu je určen následující element:



Pro znalost mechanického chování materiálu je v tomto modelu potřeba znát následující charakteristiky:

- $\sigma_{Pt, L}$ Podélnou mez pevnosti v tahu

- $\sigma_{Pt, T}$ Příčnou mez pevnosti v tahu
- $\sigma_{Pd, L}$ Podélná mez pevnosti v tlaku
- $\sigma_{Pd, T}$ Příčná mez pevnosti v tlaku
- $\tau_{P, LT}$ Smyková mez pevnosti

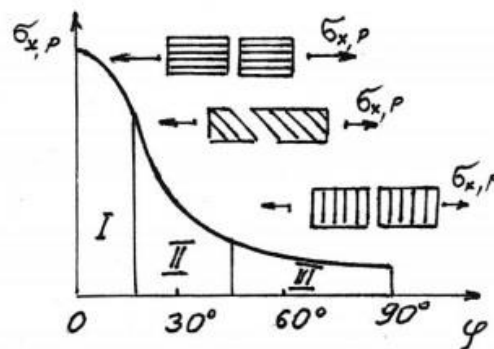
Pak lze v souladu s podmínkami pevnosti a na základě výpočtu dospět k následujícím rovnicím.

$$\sigma_L = \sigma_x \cdot \cos^2 \varphi \leq \sigma_{P,L} \quad 5.1$$

$$\sigma_T = \sigma_x \cdot \sin^2 \varphi \leq \sigma_{P,T} \quad 5.2$$

$$\tau_{LT} = \sigma_x \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \leq \tau_{P,LT} \quad 5.3$$

Jednotlivé maximální pevnosti pro různé úhly natočení vláken poté splňuje ta podmínka, která je v daném natočení nejmenší, tedy taková podmínka, která se rovná dovolenému napětí. Výsledná závislost natočení vlákna na porušení kompozitního materiálu je následující.



Graf 12

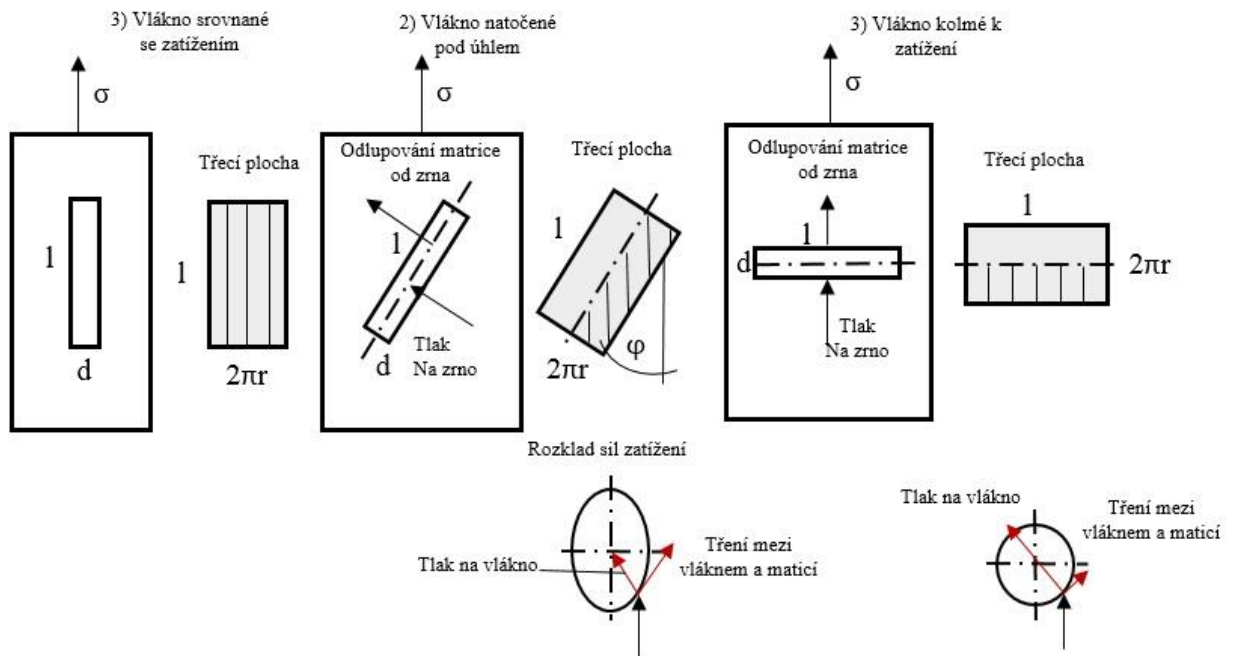
U oblasti I se jedná o podélné porušování tahové, respektive tlakové. V oblasti II se jedná o porušování příčné – tlakové nebo tahové. Ve třetí oblasti dochází ke smykovému porušování kompozitu.

5.1.2 Úvaha nad efektivitou přenášeného zatížení vlákna

Otázkou je, jak moc je takový model přenositelný na úvahu o natočení jednoho vlákna. Dalo by se pak na základě rozložení orientace vláken určit výsledné vlastnosti materiálu?

Co se dá předpokládat v systému vlákno – matrice je naznačeno na následujícím obrázku. Vlákno narovnané s osou zatížení má maximální plochu pro přenos zatížení z matrice na vlákno a z vlákna zpět na matici, odpovídá tedy teorii popsané v kapitole 4.2.9.

Natočené vlákno o úhel φ vchází do systému s jinými předpoklady. Vlákno je rozdělené na spodní a horní polovinu. Horní polovina vlákna zatížení nepřenáší, protože zatížení od ní vlákno odtrhává. Zde je pak otázkou, jak moc velké síly působí mezi vláknem a maticí. Okolo spodní poloviny vlákna se snaží obtéct matrice. Zde působí tření, nicméně díky zakřivení vlákna a jeho natočení se část síly přenáší do samotného vlákna a zatěžuje ho tak tlakovou silou. Přenášenou tlakovou silou a třecí silou určuje natočení vlákna a zároveň rozložení síly dopadající v různých bodech na elipsu. Jednotlivé body na vlákně tedy nepřenášejí stejné síly.



Obr. 15: Naznačení teoretických předpokladů přenosu síly pro různé natočení vláken

Plocha, která přenáší zatížení, může být větší, pokud je vlákno delší, než jsou dvě délky kritického zatížení.

Vlákno, které je kolmé k zatížení, přenáší pouze malé třecí síly, díky rozkladu sil na kružnici. Je to nejvíce nevýhodná orientace vláken. Vlákna v takovém případě mají spíše vytvrzovací efekt, tím, že brání tečení matrice. Nicméně tato úvaha nebere ohled na případné napětí, které se může tvořit na hranicích vláken.

Obecně se dá ale předpokládat, že graf č. 12 nebude daleko od pravdy se svým průběhem maximálního přenášeného zatížení v závislosti na úhlu natočení vlákna ani pro teoretický model natočení jednoho – krátkého vlákna v polymerní maticí.

5.2 Zkoumaný vzorek

Tato práce má možnost zkoumat popisované jevy na zkušebním tělese dle normy ČSN EN ISO 527, která je součástí normy ČSN EN ISO 527-2 2012- týkající se stanovení tahových vlastností plastů a je popsána v pod bodě 2 – zkušební podmínky pro tvášené plasty.

$$l_1 = 80 \pm 2 \text{ mm}$$

$$l_2 = 109,3 \pm 3,2 \text{ mm}$$

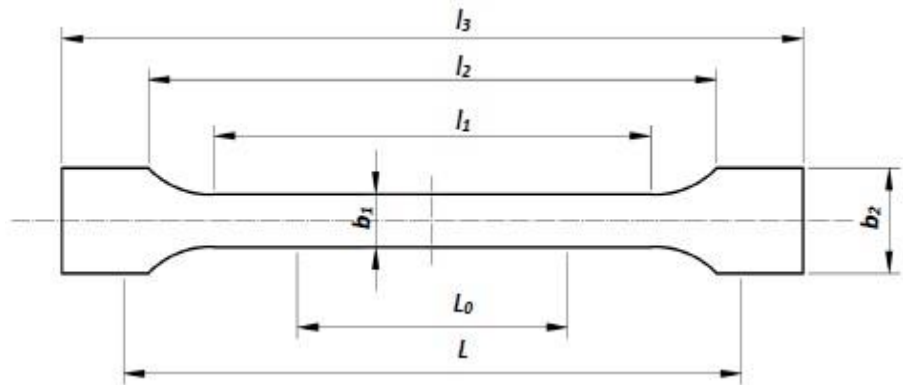
$$l_3 = 170 \text{ mm}$$

$$b_2 = 20,0 \pm 0,2 \text{ mm}$$

$$b_1 = 10,0 \pm 0,2 \text{ mm}$$

$$h = 4,0 \pm 0,2 \text{ mm}$$

(h = tloušťka)



- Materiál

Jako materiál pro těleso byl použit GRILON TSG-30/4. Výrobce udává, že je tepelně stabilní s normálním stupněm viskozity. Skládá se z PA66 + PA6 jako matrice a je dále složen z 30 % skelných vláken [27].

Dalšími jeho výhodnými vlastnostmi jsou – dobrá vlastnosti tečení, dobrá kvalita povrchu, snadné zpracování. Příklady použití jsou kola, elektrické cívky, kliky a páky [27].

- Vstřikovací parametry:

Pro výrobu tělesa byly použity následující vstřikovací parametry:

Parametr Pokus 2 – doporučení od společnosti EMS

- Teplota sušení max 80 °C
- Doba sušení 12 hodin
- Teplota komory sušárny [°C] 80
- Teplotní zóna 1–2–3 – tryska [°C] 280–285–300–300
- Teplota formy [°C] 80
- Zpětný odpor [bar] 15
- Dotlak [bar] (časové pásmo 1–2–3) 200–180–60
- Rychlost injekce 11 cm³/s

5.2.1 Příprava vzorků

Vzorek byl očištěn a byly načrtnuty řezy, viz obrázek č. 11. Zpracování proběhlo viz Kapitola 3.5.1. Vyhotovené vzorky jsou vidět na obr č. 16.



Obr. 17: Příprava řezů

Obr. 16: Připravené vzorky ke zpracování

Metodou SEM na mikroskopu byly vyhotovené snímky jednotlivých částí řezů a celých průřezů jednotlivých zkoumaných částí, viz obrázek č. 18.



Obr. 18: Výsledný snímek z mikroskopu

5.3 Předpoklady modelu trojdimensionálního toku taveniny termoplastů vyztužených skelnými vlákny

Na základě získaných informací v teoretické části jsou zde vytyčeny předpoklady, které v průběhu vstřikování materiálu do formy ovlivňují natočení vláken ve zkoumaném vzorku. Na základě získaných poznatků jsem určil 4 základní jevy, které ovlivňují natočení skelných vláken v polymerním materiálu.

- 1) Efekt fontánového toku materiálu
- 2) Tuhnutí taveniny na stěnách vzorků
- 3) Efekt rozdílného tření v toku
- 4) Vliv geometrie vstřikovaného dílu

Všechny tyto jevy jsou dále ovlivňovány dalšími parametry procesu vstřiku.

Teplota taveniny:

Teplota taveniny má svá omezení, protože nesmí překročit teplotu degradace materiálu v horních mezích a zároveň nesmí být příliš nízká pro dosažení kvality výrobku (například studené spoje, nedotečení materiálu všude, povrch vyráběného tělesa).

Teplota formy

Teplota formy má vliv zejména v porovnání s teplotou taveniny, pokud je forma příliš „studená“, pak se bude projevovat zvýšený efekt namrzání taveniny na stěnách. Opačně má ale teplota formy vliv na cyklový čas.

Vstřikovací rychlost a vstřikovací tlak:

Obecně platí, že tyto hodnoty mají za cíl co nejlépe naplnit formu taveninou při co nejmenším smykovém namáhání taveniny. Toto ovlivňuje i pevnostní namáhání formy. Hodnoty by měly být nastaveny na nejnižší možné při přihlédnutí k vlastnostem povrchu materiálu. Při příliš nízkých nastaveních těchto hodnot dochází v materiálu k efektu studeného čela toku taveniny, což má následně odezvu v kvalitě povrchu apod.

Smrštění a dotlak

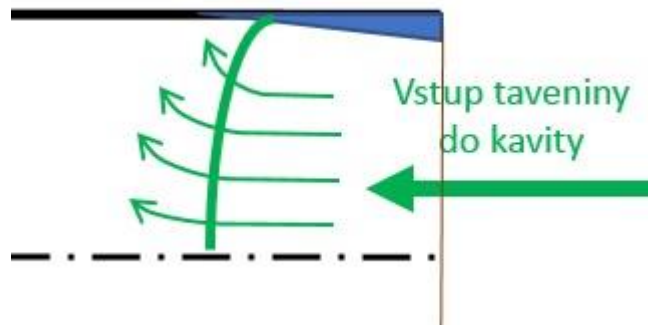
Smrštění a dotlak se volí na základě modelu vstřikování a chladnutí materiálu ve formě. Teoreticky by neměly tyto děje hrát zásadní role pro orientaci vláken, která byla daná naplněním kavity taveninou.

Natočení vláken před vstupem do runneru není podstatné – konečná orientace vláken je vždy funkcí dosaženého tvaru toku materiálu, dosažené smykové deformace a s tím

spojené dosažení smykového napětí v toku, který je jedním z hlavních příčin natočení vláken do směru toku.

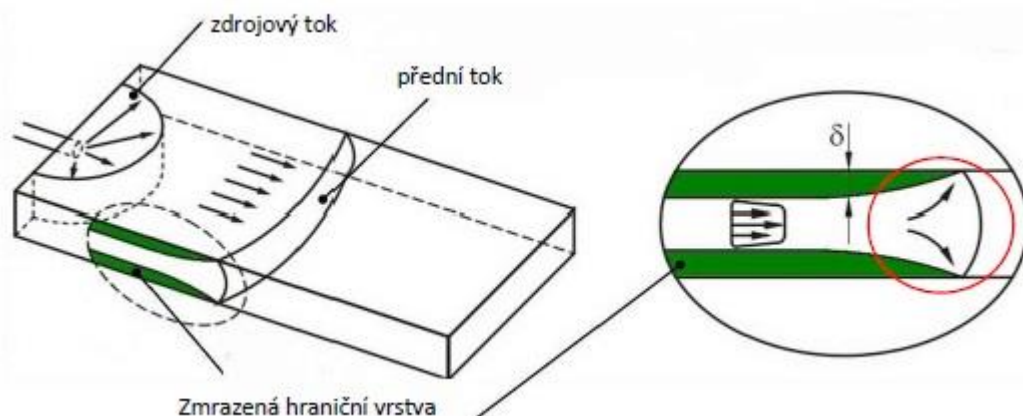
5.3.1 Efekt fontánového toku

Je zde předpoklad, že děj fontánového toku, tření na stěnách a efekt rozdílného tření v toku jsou na sobě vzájemně závislé. Fontánový tok je první jev, který se objeví při vstupu taveniny do kavity. Distribuuje vlákna po stranách toku ze středu toku vzhledem ke tření – zpomalení toku u stěn kavity, viz obr. č. 19.



Obr. 19: Fontánový efekt u vstupu taveniny do kavity

Zde je zajímavé si povšimnout, že rychlosti jednotlivých částí profilu čela toku nejsou stejné. Díky tření u krajů molekuly, které jsou uprostřed toku, eliminují ztráty přisunu materiálu u krajů, a proto jsou zrychlovány a jejich směr je ovlivňován právě do toku, který tak nápadně připomíná fontánu. Po vstupu do kavity fontánový tok na čele kavity prochází délkou celé kavity, což je částečně vidět na obrázku č. 20.

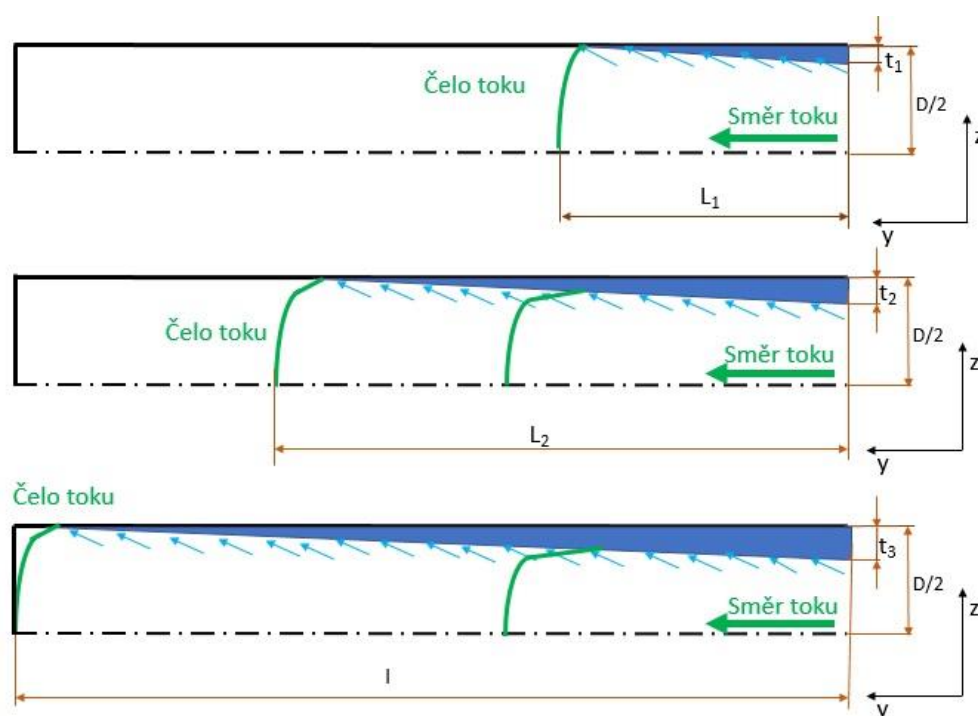


Obr. 20: Zdrojový tok (Universita Ilmenau, 2018) [1]

5.3.2 Efekt mrznoucí vrstvy na stěnách

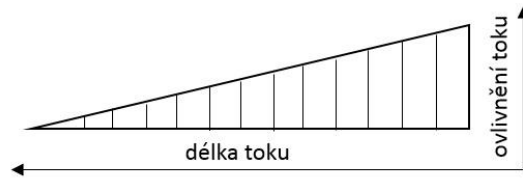
Jak bylo popsáno během plnění kavity, dochází k namrzání taveniny na stěně. Základním předpokladem pro tento děj je ne-newtoské chování taveniny polymeru, který je navíc ovlivněn, jak bylo dokázáno v kapitole 4.4.2, i přítomností vyztužujících vláken. Dále tento jev závisí na teplotě taveniny a teplotě stěny formy, která má teplotu stěny pod teplotou T_g .

Předpokladem je, že k ovlivnění toku dochází ihned po začátku vyplňování formy. Místem na začátku formy projde všechna tavenina vyplňující zbytek formy. Ztuhlá vrstva na stěně dále ovlivňuje vrstvy pod sebou, tím, jak se forma plní. Efekt tuhnutí by měl být tedy největší na začátku a s délkou se zmenšovat, tak jak je ukázáno na obrázku č. 21 a grafu 13. Tím, že je na krajích toku omezována rychlost, dochází k zvyšování rychlosti uprostřed taveniny.



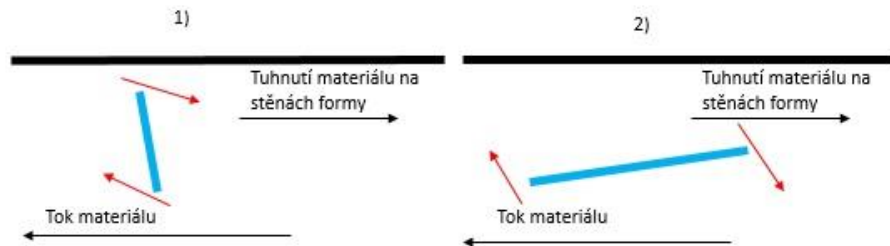
Obr. 21: Průběh Efektu tuhnutí materiálu na stěnách při plnění celé délky kavity

V místech označených modrými šipkami na obr. 21 dochází díky smykovým silám k deformaci mikrostruktury nataženého toku, což má za následek neuspořádané natažení vláken. Tento efekt bude mít hlubší vrstvu na začátku toku než na konci toku, viz graf.:



Graf 13: Očekávaná lineární závislost síly efektu tuhnutí taveniny u stěn

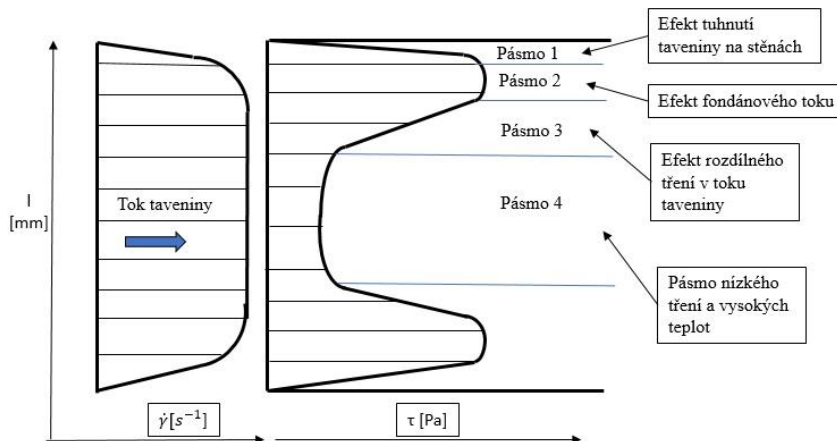
Očekávaným efektem tuhnutí materiálu u stěny jsou silné třecí síly působící na vlákno. Podle obrázku 22 je vlákno natáčeno u stěny silným třením a v místech dál ke středu zase rychlejším tokem taveniny. Vlákno se tak snaží dostat do polohy nejmenšího odporu vůči těmto silám – po směru toku.



Obr. 22: Efekt narovnání vlákna u stěny kavity

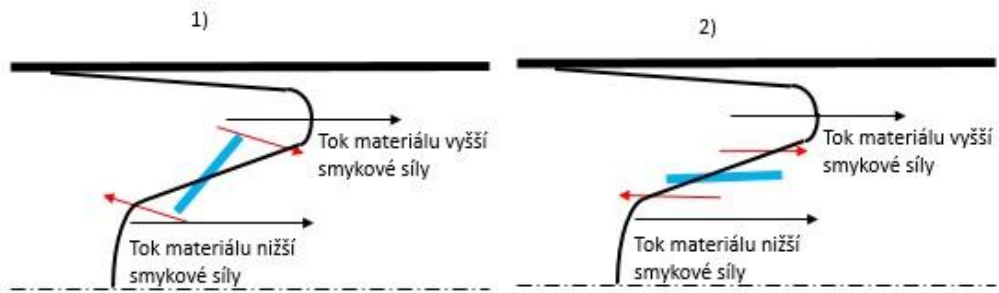
5.3.3 Efekt rozdílného tření v toku

Podle obrázku č. 23 je možné sledovat rozdělení smykového napětí v toku na jednotlivá pásma. Pásmo jedna ovlivňuje především fontánový tok. Pásmo dvě pak tuhnutí taveniny na stěnách formy. V pásmu 3 pak probíhá razantní snížení smykového napětí v toku směrem ke středu toku. Tento jev zajisté ovlivňuje natočení vláken, která by měl díky tomu vyrovnávat do směru toku.



Obr. 23: Rozdělení pásem toku na oblasti ovlivněné různými jevy

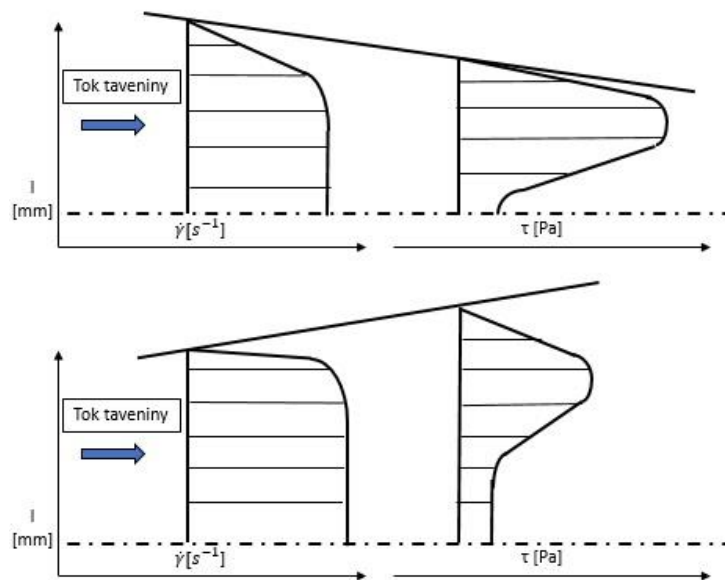
Stejně jako u stěny se předpokládá, že vlákno je narovnáváno různou intenzitou smykových sil působících v průřezu kavity, viz obr. č. 24



Obr. 24: Narovnání vlákna různou intenzitou smykového napětí v průřezu kavitou

5.3.4 Ovlivnění toku geometrií vstřikovaného dílu

U zkoumaného vzoru máme možnost sledovat dvě zajímavé změny geometrie, na kterých lze prezentovat natočení toku a jeho vliv na orientaci vláken ve výlisku. Rozšíření a zúžení toku. Toto natočení bude zkoumáno z hlediska efektu tuhneoucí vrstvy na stěně a z hlediska fontánového toku. Předpokládaný průběh smykové rychlosti a smykového tření jsou znázorněny pro oba případy na grafu č. 14. Zatím co při zúžení profilu se bude rychlost deformace ve směru ke středu zvětšovat méně, v rozšiřujícím se profilu bude naopak stoupat rychleji. Smykové síly budou také mnohem větší v zužujícím se profilu, naopak v rozšiřujícím se profilu budou třecí síly menší.



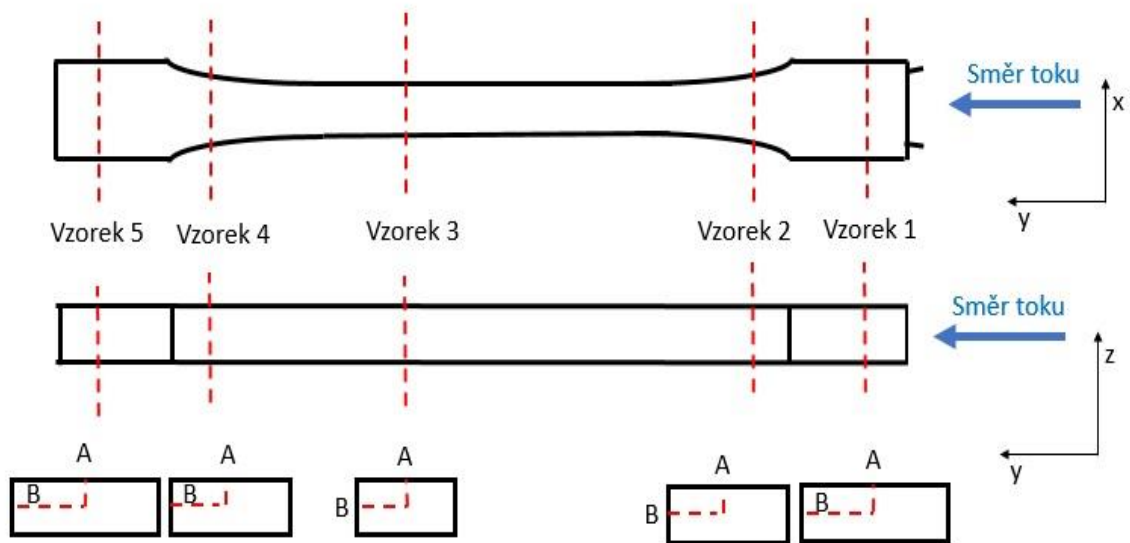
Graf 14: Rozdílné průběhy smykových napětí pro různé profily průřezu kavity

U zužujícího profilu se dá na základě tohoto schématu předpokládat, že na orientace

vláken by měl mít velký vliv efekt stěny, zároveň bude docházet k velkému vyrovnávání taveniny podél stěny fontánovým tokem. U rozšiřujícího profilu bude naopak efekt stěny kompenzován rozšiřujícím se profilem. Díky tomu bude i rozložení toku „ideální“ – vlákna narovnána ve směru rozstříku taveniny do rozšiřujícího se profilu.

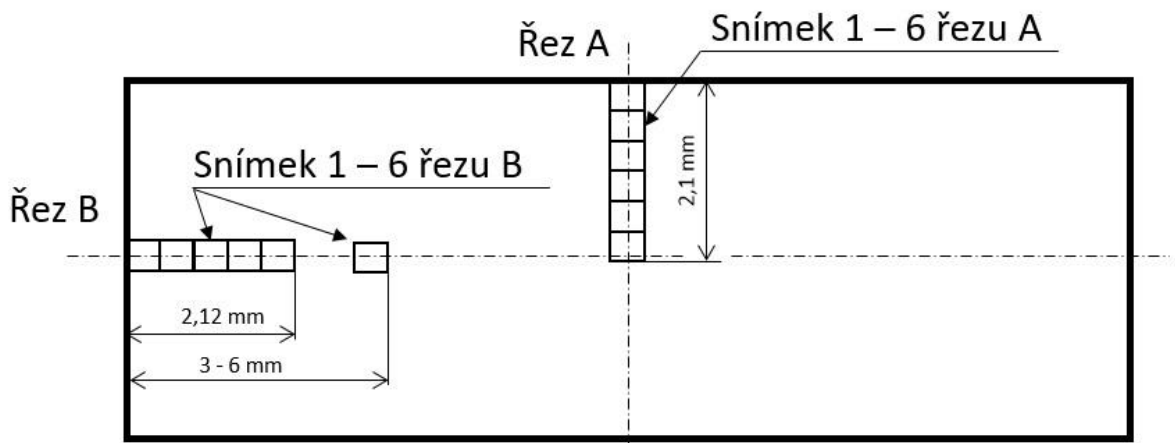
5.4 Formulace experiment

Řezy budou provedeny na pěti místech. U jednotlivých vzorků pak bude zkoumána orientace na jednotlivých snímcích, tak jak je ukázáno na obr. č. 26.



Obr. 25: Zobrazení jednotlivých vzorků a řezů

::

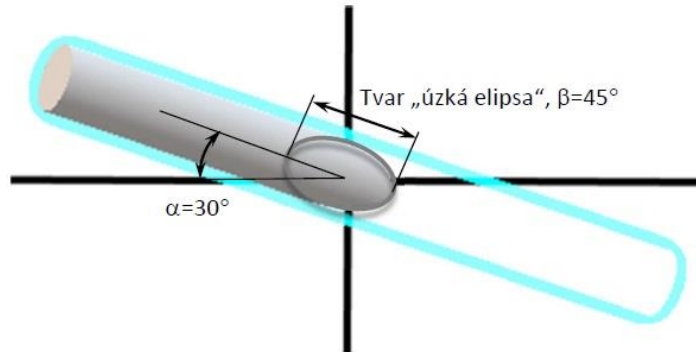


Obr. 26: Zobrazení jednotlivých focených snímků na konkrétním řezu

- 1) Efekty zamrzání taveniny na stěnách jsou zkoumány ve všech řezech – 1A, 2A, 3A, 4A, 5A
 - Řez 1 Tavenina je v malém průřezu vstřikována do kavity. Působí zde vysoké smykové rychlosti a vysoké smykové napětí, zároveň teplota taveniny je na vstupu stále vysoká – projev tvoření vnitřní stěny se zde neprojevuje.
 - Řezy 2, 3, 4, 5 – Ověření zmenšujícího ovlivnění tloušťky zamrznuté vrstvy v z-ové souřadnici
- 2) Efekt fontánového toku taveniny
 - Řezy 1B, 3B, 5B – porovnání toku materiálu v prostředním pásmu – teoretické místo s nejmenším ovlivněním od ostatních efektů
- 3) Efekt rozdílných smykových napětí v toku
 - Řezy 1A, 2A, 3A, 4A, 5A – Porovnání efektu distribuce toku v řezech celé délky s přihlédnutím na geometrické změny v z-ové souřadnici a stálém průřezu v x-ové souřadnici.
- 4) Vliv geometrie vstřikovaného dílu
 - Řezy 1B, 2B, 3B, 4B – Porovnání efektu distribuce toku v řezech celé délky s přihlédnutím na geometrické změny v z-ové souřadnici a stálém průřezu v x-ové

5.5 Metoda analýzy vzorku

Pro možnost zkoumat homogenitu a orientaci vlákna byla použita myšlenka inženýra Stefana Krebse vyhodnocovat příčný řez vzorku tam, kde jsou vidět natočení jednotlivých vláken. Proto je možné odečíst jakým způsobem je vlákno natočené ve třech souřadnicích.



Obr. 27: Natočení vlákna v matrici

5.5.1 Vyhodnocení rozměru

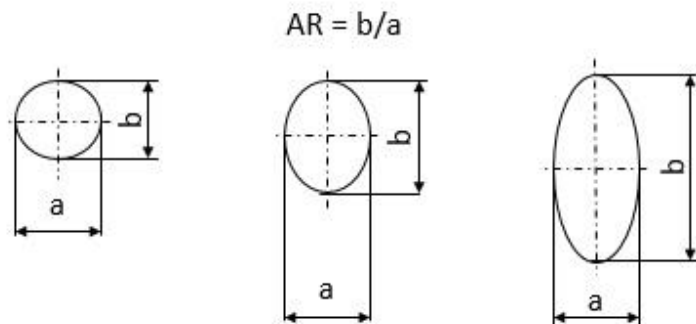
Pro určení natočení vlákna jsem zvolil dva hodnotící parametry:

- 1) Míru natočení vlákna

Je určena poměrem stran elipsy. Vlákno kolmé k toku má poměr stran 1:1, natočení vlákna pak zvětšuje poměr.

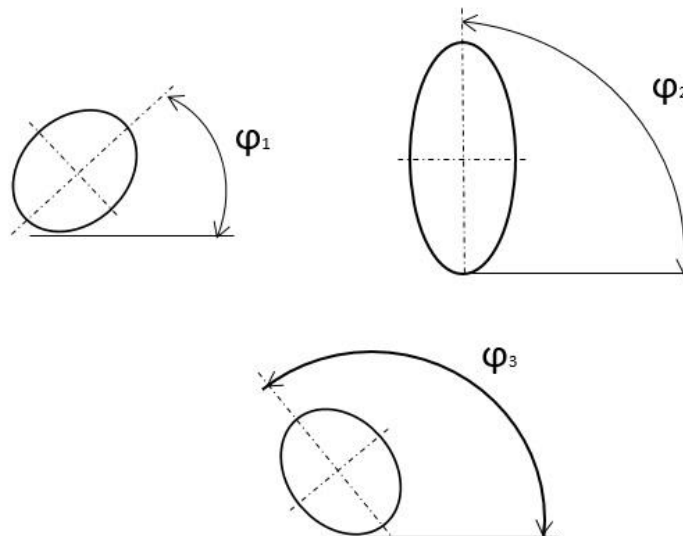
- 2) Úhel natočení vlákna

Míra natočení vlákna určuje v 3D prostoru jen 2D pohled. Dalším pohledem je úhel natočení, který udává, jakým směrem se to které vlákno pohybuje v rámci toku taveniny kavitou.



Obr. 28: Princip měření parametru Míry natočení vlákna

$$\varphi = 0^\circ - 180^\circ$$



Obr. 29: Princip měření úhlu natočení vlákna

Při vyhodnocování rozměrů je třeba brát v úvahu fakt, že natočení vlákna se projevuje v malých úhlech pouze malou změnou velikosti elipsy, respektive poměru dlouhé a krátké strany elipsy, viz tabulka č. 2. V tabulce je vidět příklad velikosti elipsy pro zástupce pěti rozsahů úhlů od 0 do 90 stupňů. Je možné sledovat vysokou citlivost určujícího rozměru až do velikosti 25° natočení. Naopak velká natočení jsou pro přesnost měření příznivá.

	stupeň natočení	Určující rozměr (a)	aspect ratio
	0	15.00	1.000
	5	15.06	1.004
	10	15.23	1.015
	15	15.53	1.035
	20	15.96	1.064
	25	16.55	1.103
	30	17.32	1.155
	35	18.31	1.221
	40	19.58	1.305
	45	21.21	1.414
	50	23.34	1.556
	55	26.15	1.743
	60	30.00	2.000
	65	35.49	2.366
	70	43.86	2.924
	75	57.96	3.864
	80	86.38	5.759
	85	172.11	11.474
	89	859.48	57.299

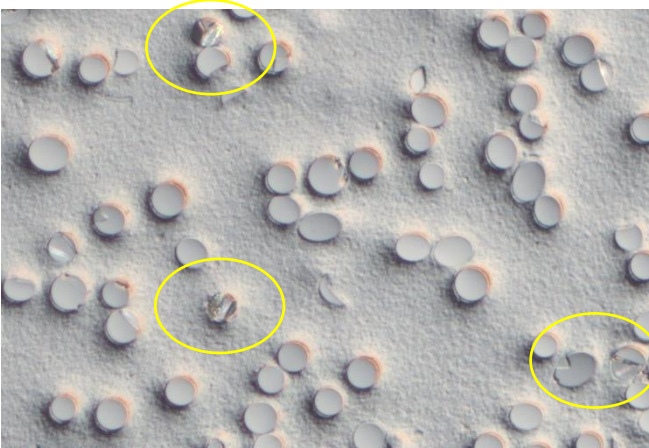
Tab. 2: Porovnání tvaru elipsy pro různé stupně míry natočení vlákna

5.5.2 Program vyhodnocování mikroskopických snímků Image_J FIJI

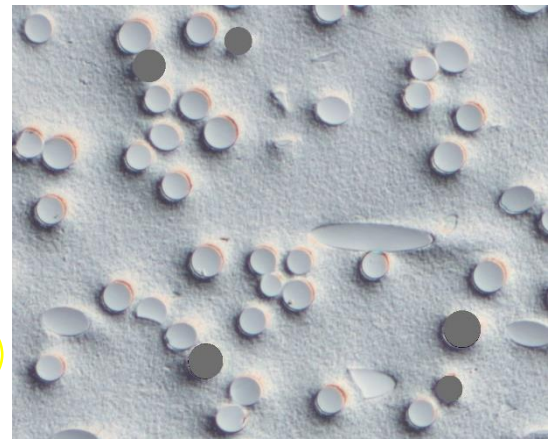
Pro vyhodnocení obrázků získaných na mikroskopu byl použit program Image J, verze FIJI, který je volně dostupný na internetu pro rozsáhlé použití napříč všemi vědními či průmyslovými obory. Pro tento program existuje mnoho aplikací – pluginů, které rozšiřují jeho možnosti a je možné je vkládat bez omezení.

Popis procesu získání dat z mikroskopických snímků

Získané obrázky musely být nejdříve v programu upraveny. Program není schopný



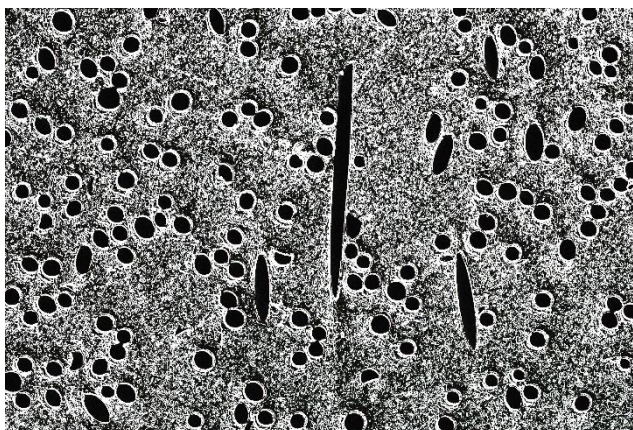
Obr. 31: Rozbitá vlákna na snímku, který nafotil mikroskop



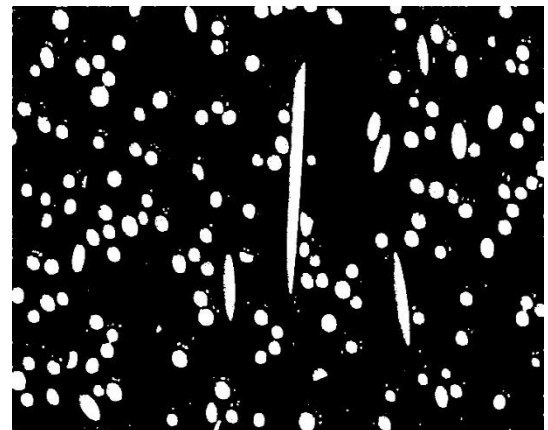
Obr. 30: Úprava vláken a nečistot jako příprava pro následující měření

správně

vyhodnotit neúplná zrna, nebo zrna, která jsou různě poničena (obr. č. 30). Aby tato zrna posléze nezneškodila statistiku, je nutné taková zrna nejdříve překrýt elipsou a vymalovat je stejnou barvou (obr. č. 31). Program je pak schopný vyhodnotit hranice



Obr. 33: Zpracování pozadí – matrice kompozitu, oddělení vlákna a polymeru



Obr. 32: Zpracování snímku v konečné fázi před vyhodnocením

v rámci celého obrazu. Nicméně díky struktuře získaných mikroskopických snímků je nutné ještě dále zarovnat pozadí – oblast mezi zrna a následně pak získat černobílou siluetu jednotlivých zrn (obr. 32, 33).

V rámci programu bylo vyzkoušeno mnoho funkcí, jimiž bylo docíleno pouze částečných úspěchů v získání černobílého obrazu, který by se co nejvíce blížil originálu. Nakonec byl vypořádan postup použití funkcí programu pro získání maximálně přesného výsledku.

Program následně vyhodnotí jednotlivé parametry zrn. Mezi zásadní parametry vyhodnocování patří největší a nejmenší rozměr zrna, na jehož základě se vyhodnotí parametr aspekt ratio, tedy poměr mezi naměřenými délkami. Dále je vyhodnocena plocha vyhodnocovaného zrna a kruhovitost. Plocha je důležitá proto, že je možné eliminovat šum. Menší plochy, než jsou plochy nejmenších zrn jsou odstraněny. Dalším důležitým parametrem je úhel natočení největšího rozměru. Úhel natočení se počítá pro největší rozměr, tedy pro určující rozměr elipsy a díky tomu nám dává přehled o natočení os.

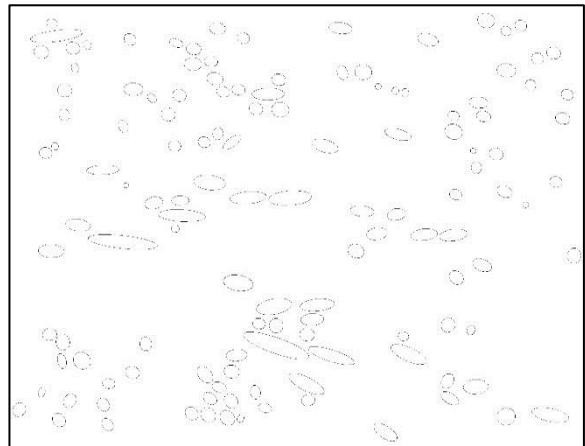


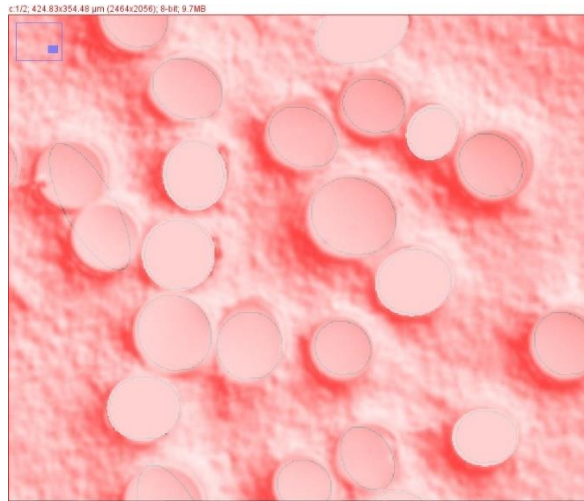
Image J pak nakonec pro možnost porovnání původního a vyhodnoceného snímku ukáže vyhodnocené elipsy (obr. č. 34).

Obr. 34: Výsledné zobrazení naměřených elips

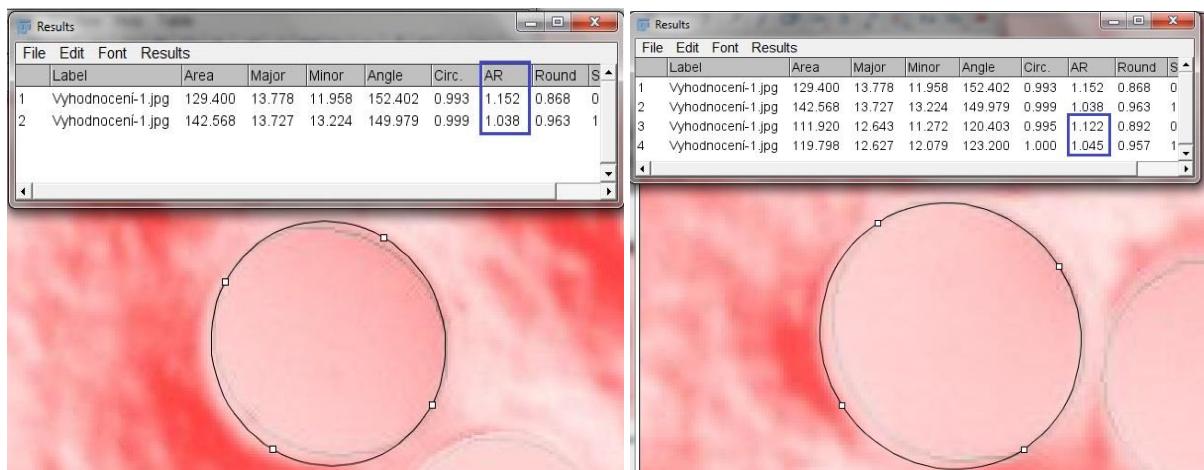
Pro větší přesnost výsledku nejsou vyhodnocována zrna, která překrývají kraj snímku.

5.5.3 Revize výsledků

Pro účely zjištění chyby ve vyhodnocení jsem překryl výsledné hodnoty s původním snímkem. Jak je vidět na obrázku č. 35, některé překrytí zrna a vypočítané elipsy se úplně neshodují.



Obr. 35: Překrytí výsledného naměření elips s původním snímkem



Obr. 37: Zjištěná odchylka_01

Obr. 36: Zjištěná odchylka_02

Počítač vyhodnotil zrno v AR 1,152 (30°) – obr. 36, naměřená, zadaná hodnota zrna se však pohybuje v 1,038 (15,5°). Počítač vyhodnotil zrno v AR 1,122 (27°) – obr. 33, naměřená, zadaná hodnota zrna se však pohybuje v 1,045 (17°).

Pro získání bližší představy o výsledné chybě byla provedena 3 kontrolní měření. V programu Image_J byla na třech vybraných snímcích provedena „ruční měření“, každé vlákno bylo obkrouženo pomocí nástroje – vložit elipsu. Takto získaná plocha byla následně změřena. Výsledné náměry byly následně porovnány s náměry získanými pomocí standartního procesu vyhodnocování v programu Image_J.

Takto bylo zjištěno, že zkreslené jsou výsledky náměrů v rozmezí 0° až 25°, vyšší hodnoty míry natočení vlákna již byly srovnatelné. V rozmezí do 25° dochází ke zkreslení elipsy vlákna kvůli odleskům na hranici mezi vláknem a prostředím nebo nevýrazným změnám v obrazu na hranicích vlákna ve vyhodnocovaném snímku, které vedou následně k

nevýrazným kontrastům a zkreslením při vyhodnocování.

Byl tedy stanoven rozsah AR (aspekt ratio), při kterém srovnání standartního a kontrolního měření dosahuje stejných hodnot. Pro měření míry natočení vláken byly tedy zvoleny tyto hranice: $0^\circ - 25^\circ$, $25^\circ - 40^\circ$, $40^\circ - 55^\circ$, $55^\circ - 70^\circ$, $70^\circ - 90^\circ$.

Navíc bylo zjištěno, že v rozsahu ($0^\circ - 25^\circ$) je cca 35 % vláken, která se vejdu do rozsahu $0^\circ - 15^\circ$ a 65 % vláken, která jsou v rozmezí $15^\circ - 25^\circ$.

5.6 Naměřené hodnoty

5.6.1 Stanovení hodnotících parametrů

Data získaná z vyhodnocení programu Image_J byla v programu Excel zpracována do tabulek, kde byly určeny počty vláken podle jejich míry natočení a úhel natočení vláken. Míra natočení zrn byla získána podle měřené hodnoty Aspekt ratio (AR) a natočení zrn bylo získáno podle parametru Angle, který měří úhly nejdelsí osy elipsy vzhledem k ose x.

Vzorek	Řez	část od kraje	Míra natočení	Úhel natočení elipsy					SUMA
				$0^\circ - 180^\circ$	$0-45^\circ$	$45-90^\circ$	$90^\circ - 135^\circ$	$135^\circ - 180$	
4	B	SN_1	Elipsa	$0^\circ - 180^\circ$	$0-45^\circ$	$45-90^\circ$	$90^\circ - 135^\circ$	$135^\circ - 180$	SUMA
			$0^\circ - 25^\circ$	61	8	4	20	29	61
			$25^\circ \pm 40^\circ$	42	0	8	21	13	42
			$40^\circ \pm 55^\circ$	18	1	2	11	4	18
			$55^\circ \pm 70^\circ$	12	1	2	4	5	12
			$70^\circ \pm 90^\circ$	0	0	0	0	0	0

Tab. 3: Příklad tabulky naměřených hodnot jednoho snímku

Takto bylo získáno 12 setů hodnot pro řezy A a B u pěti vzorků, tedy celkem 60 setů hodnot.

Vyhodnocovací parametry:

Pro možnost vyhodnocení dat napříč všemi snímky a vzorky byly stanoveny následující parametry:

Efektivita natočení vláken – ENV

ENV je parametr, který hodnotí míru natočených vláken a přitom jednotliv rozsahy míry natočení hodnotí příslušným koeficient, který reflektuje negativní příspěvek natočení

vlákna od ideální pozice. Tato hodnota se měří pro příslušnou vyhodnocovanou oblast. Maximální hodnota parametru může nabýt velikosti počtu vyhodnocovaných zrn (každé zrno je násobeno koeficientem $k = 1$). Hodnota se určí podle vzorce:

$$ENV_x = \sum k_i \cdot z_i \quad [-] \quad 5.4$$

- z počet vláken naměřených pro jednotlivá rozmezí AR
- k koeficient přínosu vlákna k přenesení síly

Míra natočení vlákna	Koeficient
0° - 15°	$k_1 = 1$
15° - 25°	$k_2 = 0.85$
25° - 40°	$k_3 = 0.75$
40° - 55°	$k_4 = 0.6$
55° - 70°	$k_5 = 0.45$
70° - 90°	$k_6 = 0.3$

Tab. 4: Tabulka hodnot koeficientu k – přínosu vlákna k přenesení síly

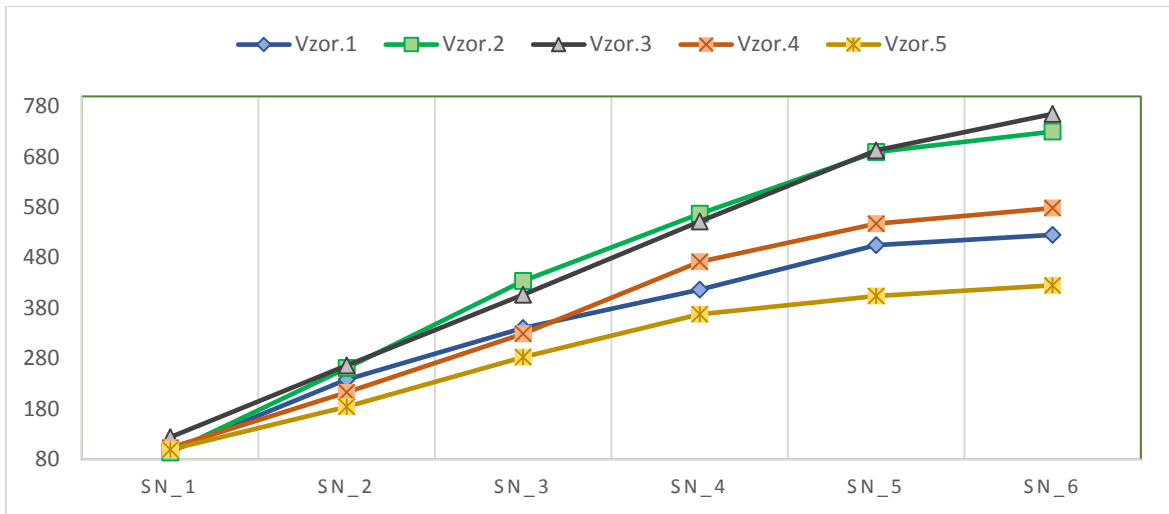
Poměrná efektivita natočení vláken – PENV

Je hodnota, která udává efektivitu natočení vláken v dané zkoumané oblasti bez ohledu na to, kolik vláken se v oblasti nachází. Je to tedy podíl vláken - násobených příslušným koeficientem v jednotlivých kategoriích rozsahu míry natočení vlákna – k celkovému počtu vláken ve vzorku.

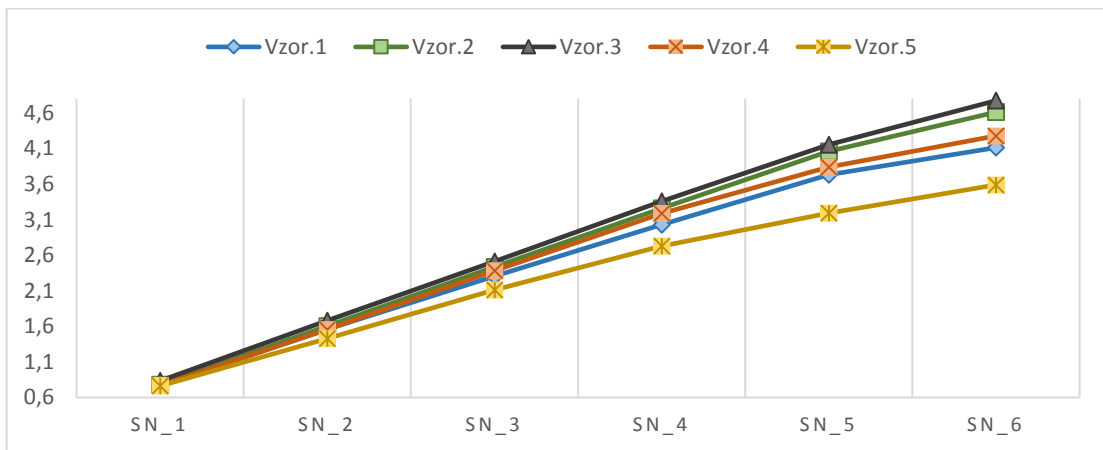
$$PENV_x = \sum \frac{k_i \cdot z_i}{\sum z_i} \quad [\%] \quad 5.5$$

5.6.2 Hodnocení míry natočení vláken (AR) pomocí ENV a PENV

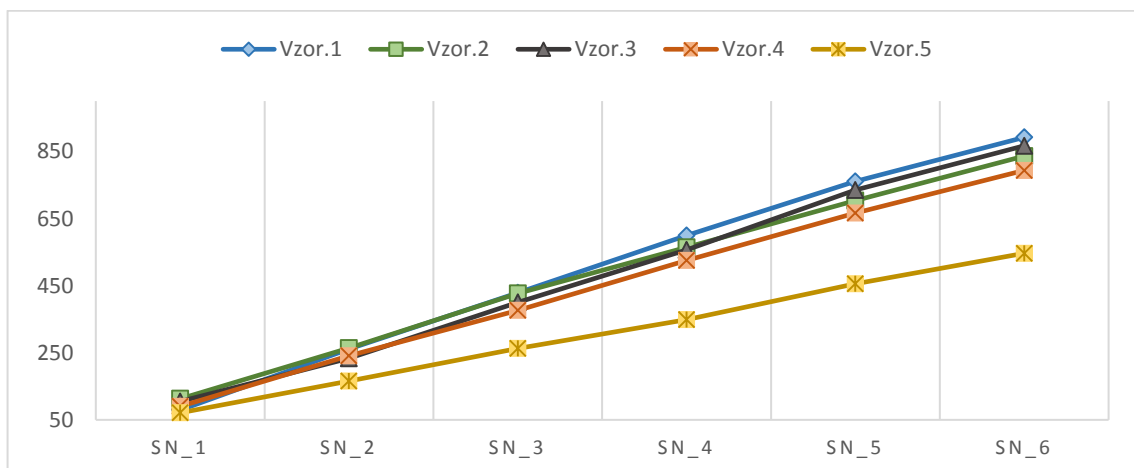
Pro srovnání hodnot míry natočení vláken v celém řezu jsou hodnoty snímků k sobě přičítány, čímž je možné porovnat celkové průběhy ve všech vzorcích i konečnou hodnotu „síly“ řezu, která by se v ideálním případě měla rovnat počtu vláken v řezu. Na grafech 15 a 17 je možné vidět srovnání vzorků v řezu A, respektive v řezu B. Průběhy hodnot nám ukazují, že zcela mimo u obou řezů vybočuje vzorek 5, tedy ten, který je na konci toku taveniny. Zatímco řez B má průběhy vzorků 1–4 srovnatelné, v řezu A se tyto snímky liší. Vzorky 2 a 3 v řezu A jsou svou silou srovnatelné s řezem B. Vzorky 1 a 4 jsou významně slabší. Hodnoty PENV vyrovnávají trendy, které jsou vidět z grafů u ENV. Jelikož graf ENV u řezu B je i tak vyrovnaný, hodnoty PENV u grafu zde nejsou zobrazeny.



Graf 15: ENV efektivita natočení vláken v řezu "A" – součet snímků



Graf 16: PENV Poměrná efektivita natočení vláken -řez "A" – součet snímků



Graf 17: Síla natočení vláken v řezu "B" - dle míry natočení

5.6.3 Hodnocení efektivity rozložení a natočení vláken

Pro hodnocení efektivity rozložení a natočení vláken byl použit podíl ENV k počtu vláken. Dále pak byl zhodnocený ENV jako podíl k počtu vláken u nejlepšího snímku.

Měření vzorků ukázalo, že v řezech A se nachází o 10–30 % méně vláken. Dále je uspořádání vláken v řezu A o několik procent horší než v řezu B. Výsledné hodnoty jsou vidět v následující tabulce.

Řez A	Celkový počet vláken	Efektivita rozložení vláken ENV / poč. vláken	Síla řezu ENV / počet vláken u nejlepšího vzorku
Vzorek 1	726	72 %	50 %
Vzorek 2	919	79 %	69 %
Vzorek 3	951	80 %	72 %
Vzorek 4	778	74 %	55 %
Vzorek 5	671	63 %	40 %

Tab. 5 Efektivita natočení vláken v řez A

Řez B	Počet vláken	Efektivita rozložení vláken ENV / poč. vláken	Síla řezu ENV / počet vláken u nejlepšího snímku
Vzorek 1	1064	84 %	84 %
Vzorek 2	1017	82 %	79 %
Vzorek 3	1042	83 %	81 %
Vzorek 4	991	80 %	75 %
Vzorek 5	789	69 %	51 %

Tab. 6: Efektivita natočení vláken v řezu B

Pokud budeme řezy A a B sčítat v jednotlivých vzorcích, pak dostaneme obrázek takový že, Vzorek 1 má 1790 vláken v hodnocených řezech, Vzorek 2 a 3 mají 1936 a 1993 vláken, vzorek 4 má 1769 a vzorek 5 jen 1460.

Pro představu o rozložení počtu vláken na snímcích jsou zde uvedeny počty vláken pro jednotlivé snímky, řezy a vzorky. Zajímavé je sledovat porovnání u jednotlivých snímků, jaký podíl vláken mají ve srovnání s nejlépe hodnoceným snímkem co se počtu vláken týče.

Počet vláken Řez A						
	Sn_1	Sn_2	Sn_3	Sn_4	Sn_5	Sn_6
Vzorek 1	124	181	136	106	125	54
Vzorek 2	120	203	208	161	154	73
Vzorek 3	148	169	168	172	177	117
Vzorek 4	133	140	141	177	116	71
Vzorek 4	130	127	145	137	79	53

Tab. 7: Počty zrn pro jednotlivé snímky, řezy a vzorky – řez A

Barevné rozlišení podílu vláken na snímku – srovnání s počtem vláken na nejlepším snímku:

- 100 % - 80%
- 79 % - 60%
- 59 % a níž

Řez A						
	Sn_1	Sn_2	Sn_3	Sn_4	Sn_5	Sn_6
Vzorek 1	57.9 %	84.6 %	63.6 %	49.5 %	58.4 %	25.2 %
Vzorek 2	56.1 %	94.9 %	97.2 %	75.2 %	72.0 %	34.1 %
Vzorek 3	69.2 %	79.0 %	78.5 %	80.4 %	82.7 %	54.7 %
Vzorek 4	62.1 %	65.4 %	65.9 %	82.7 %	54.2 %	33.2 %
Vzorek 4	60.7 %	59.3 %	67.8 %	64.0 %	36.9 %	24.8 %

Tab. 8: Podíl počtu vláken k počtu vláken u nejlepšího snímku – Řez A

Z tabulek je zcela zřejmé, že snímky u kraje mají menší podíl vláken než snímky 2, 3 a 4. Řez A potvrzuje malou hustotu vláken ve středu kavity. U řezu B je zajímavé sledovat další jev, u vzorku 2, 3 a 5 dochází na snímku 6 ke zmenšení hustoty vláken. Tento jev by mohl být společný se snímky v řezu A u vzorků 1, 2, 4 a 5, kde rovněž dochází ke zmenšení hustoty vláken oproti předchozím vzorkům. Tyto děje by mohly naznačovat, že hustota vláken je největší v krajních částech vzorků s výjimkou zóny od úplného kraje široké cca 0,2 mm.

Řez B						
	Sn_1	Sn_2	Sn_3	Sn_4	Sn_5	Sn_6
Vzorek 1	98	214	196	201	190	165
Vzorek 2	139	181	195	165	167	170
Vzorek 3	133	156	201	184	211	157
Vzorek 4	117	183	169	187	175	160
Vzorek 4	104	133	147	116	149	140

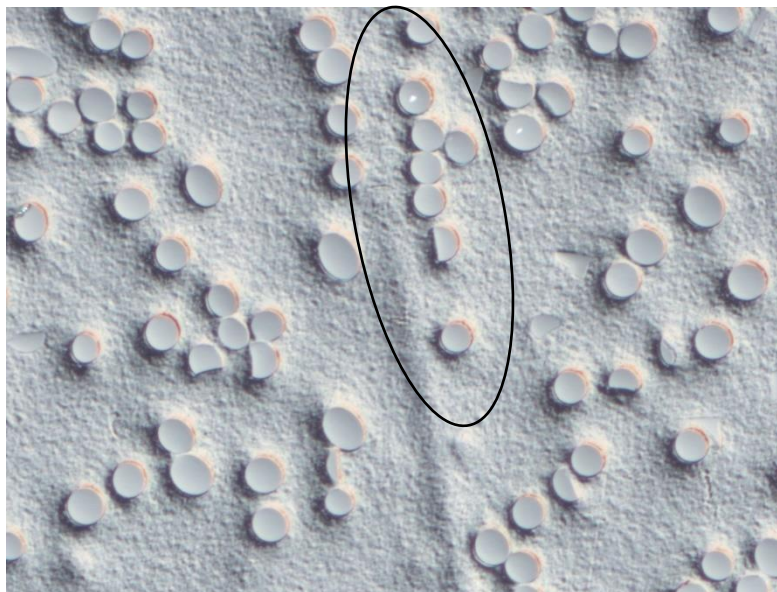
Tab. 9: Počty zrn pro jednotlivé snímky, řezy vzorky – řez B

Řez B						
	Sn_1	Sn_2	Sn_3	Sn_4	Sn_5	Sn_6
Vzorek 1	45.8 %	100.0 %	91.6 %	93.9 %	88.8 %	77.1 %
Vzorek 2	65.0 %	84.6 %	91.1 %	77.1 %	78.0 %	79.4 %
Vzorek 3	62.1 %	72.9 %	93.9 %	86.0 %	98.6 %	73.4 %
Vzorek 4	54.7 %	85.5 %	79.0 %	87.4 %	81.8 %	74.8 %
Vzorek 4	48.6 %	62.1 %	68.7 %	54.2 %	69.6 %	65.4 %

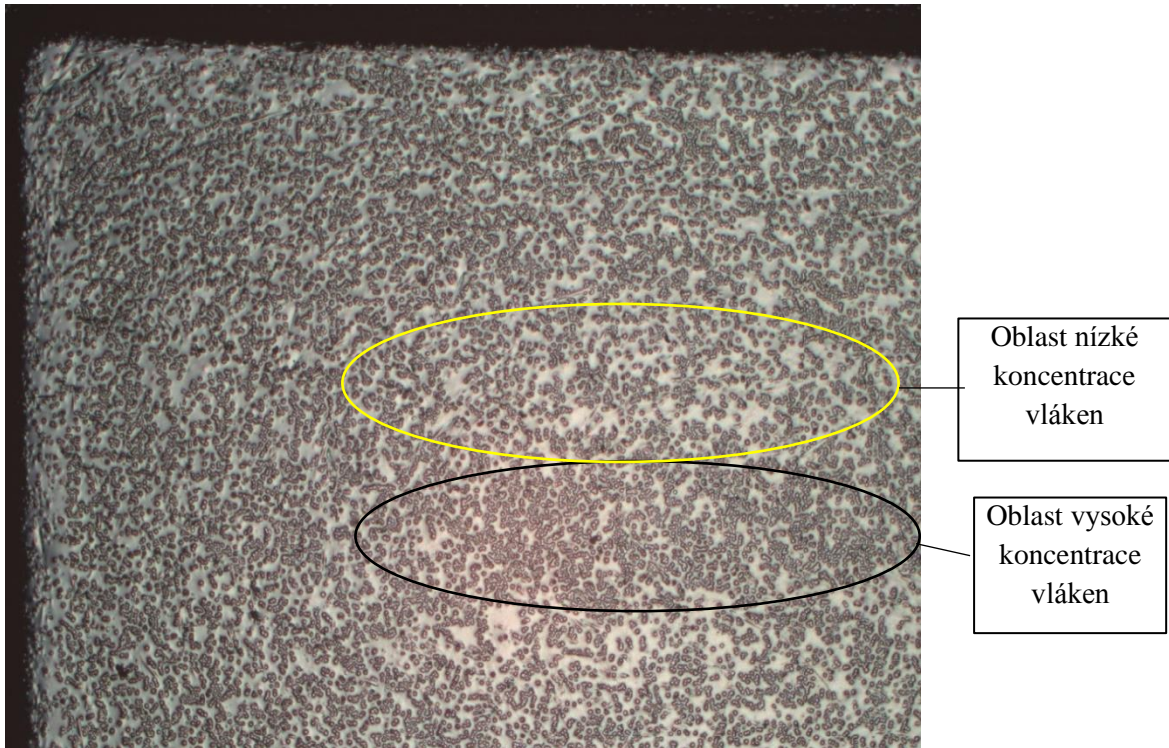
Tab. 10: Podíl počtu vláken k počtu vláken u nejlepšího snímku – Řez B

V příloze 1 této práce je možné také vidět celkové snímky jednotlivých řezů, na kterých jsou vidět oblasti uprostřed kavit, jež jsou ovlivněny vysokou nehomogenitou vláken natočených v různých směrech. Je zde možné vyčíst, že oblasti korespondují s hodnotami ENV, či počty vláken a jejich natočení.

Menší a větší koncentrace vláken – jevy nacházející se na všech vzorcích je možné sledovat na obrázku č. 38. Dalším jevem, který je možné sledovat, je lokalizace vláken kolem zpříčeného vlákna, viz obr. č. 39. Tyto jevy dokazují, že se vlákna mezi sebou ovlivňují a kolem zpříčeného vlákna dochází ke shlukování vláken.



Obr. 38: Oblast lokalizace vláken kolem zpříčeného vlákna



Obr. 39: Oblasti menších a větších hustot vláken v materiálu.

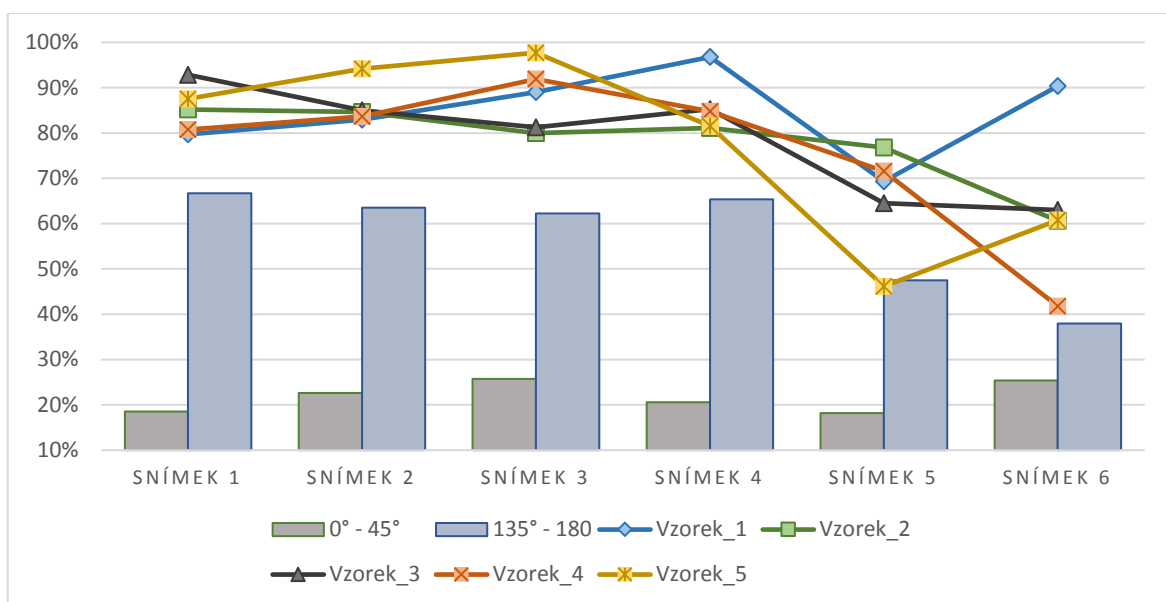
5.6.4 Hodnocení trendu pohybu vláken pomocí úhlu natočení (Angle)

Pro zhodnocení trendů natočení vláken byla z dat eliminována skupina $0-25^\circ$, u které může docházet k částečnému znehodnocení dat. To se děje u dvou dějů – na základě malého poměru os jednotlivých elips a skutečnosti, že snímky jsou osvětlovány dvojitým světlem, což má ten efekt, že dochází k přesvětlení vlákna vždy z jedné strany. Přesvětlení hrany vlákna je tak velké, jak moc vlákno ční nad povrchem. Negativním jevem pak je skutečnost, že přesvětlená část může zkreslovat trend natočení vláken.

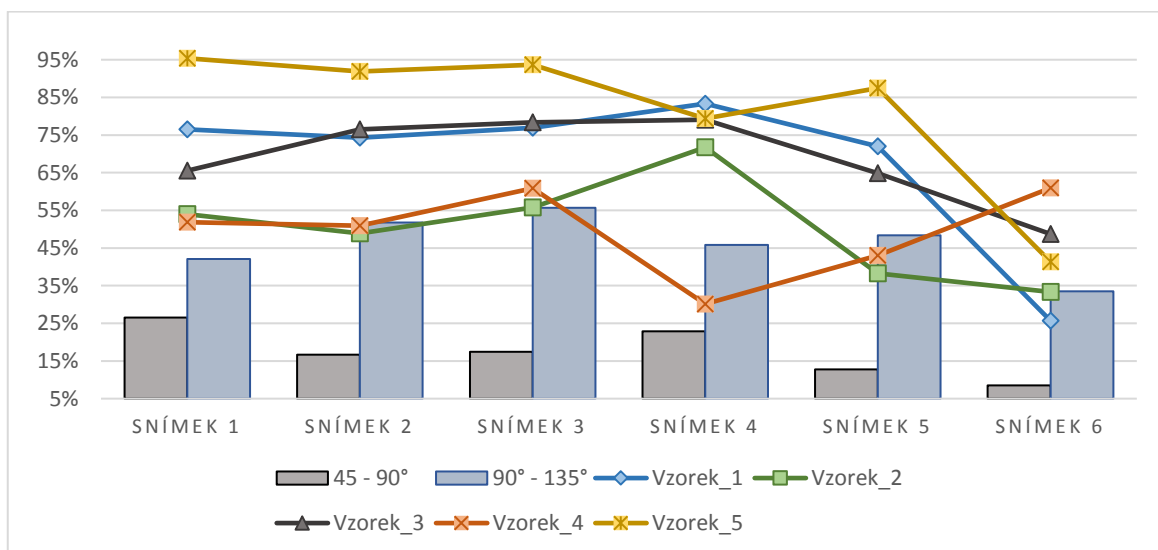
Hodnocená vlákna jsou rozdělena do dvou hlavních logických skupin:

- natočení v rozmezích $0^\circ-45^\circ$ a $135^\circ-180^\circ$ - natočení spíše podél stěny kavity
- natočení v rozmezích $45^\circ-90^\circ$ a $90^\circ-135^\circ$ - natočení spíše ke stěně kavity

Pro vzorky řezů A a B vychází trendy podle následujících grafů. Barevně jsou sloučené trendy vláken, které se pohybují v úhlech podél stěny kavity a těch vláken, které se pohybují v úhlech k a od stěny vláken. Tedy pro řezy A a B jsou to opačné úhly. V grafech je dále vidět poměr jednotlivých natočení mezi sebou.

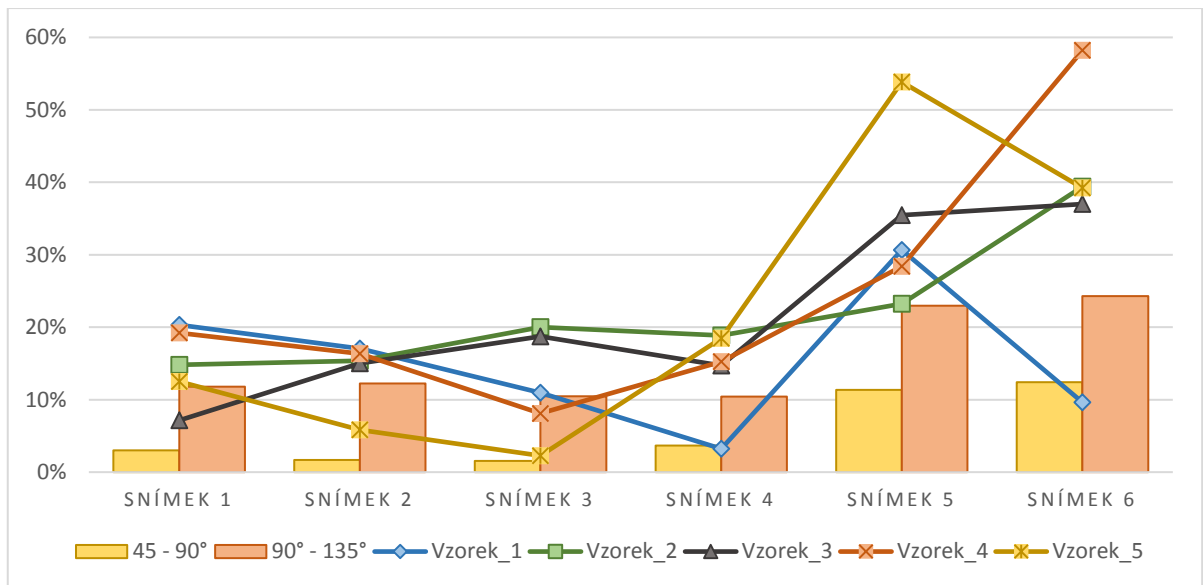


Graf 18: Podíl úhlu natočení vláken u řez "A " pro rozmezích - (0°-45°) a (135°-180°)

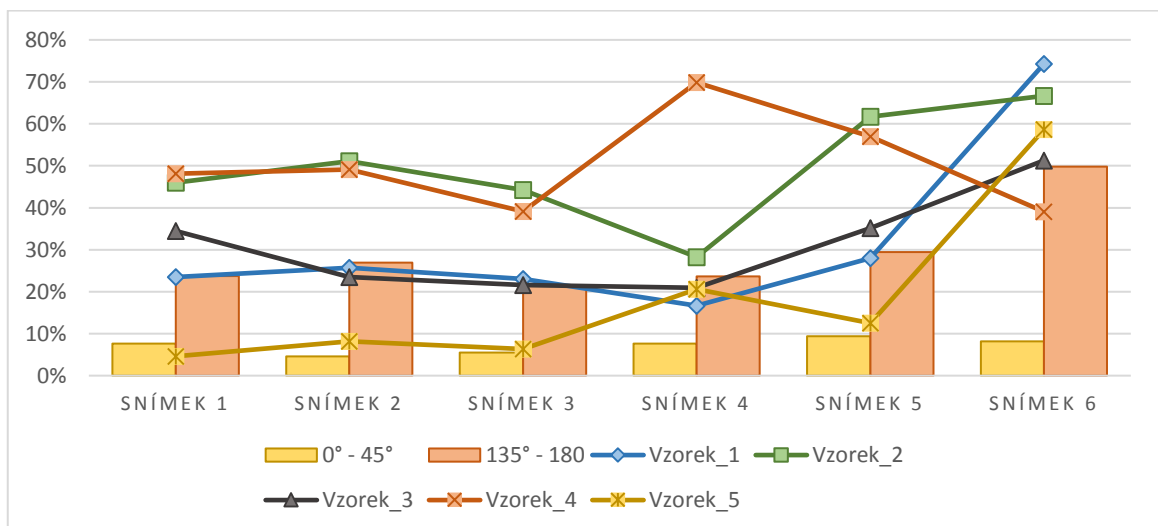


Graf 19: Podíl úhlu natočení vláken u řezu "B " pro rozmezí - (45°-90°) a (90°-135°)

Hodnocení: je zajímavé sledovat, že natočení podél stěny je u řezů A srovnatelné, řezy B jsou odlišné. Nejmenší je v místech, kde dochází ke kompresi a dekompresi u vzorků 2 a 4, což koresponduje se změnu geometrie tělesa. Potvrzením jsou grafy ukazující vlákna spíše směřující ke stěně, kde naopak vzorky 2 a 4 mají tento samý podíl největší.



Graf 20: Podíl úhlu natočení vláken u řezu "A" pro rozmezí - (45°-90°) a (90°-135°)



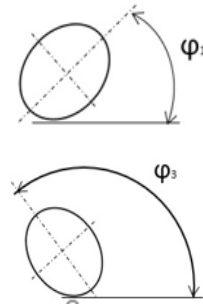
Graf 21: Podíl úhlu natočení vláken u řezu "B" pro rozmezí - (0°-45°) a (135°-180°)

Pokud jde o řezy A, křivky jsou srovnatelné, viditelné jsou změny na snímcích 5 a 6, které již zasahují do středního pásma „chaosu“.

Grafické zpracování natočení vláken

Následující zpracování udává trendy, kterými směry jsou natočeny největší skupiny vláken. Jednotlivá natočení jsou srovnána po řezech. Grafické znázornění je vysvětleno na grafech 11 a 12.

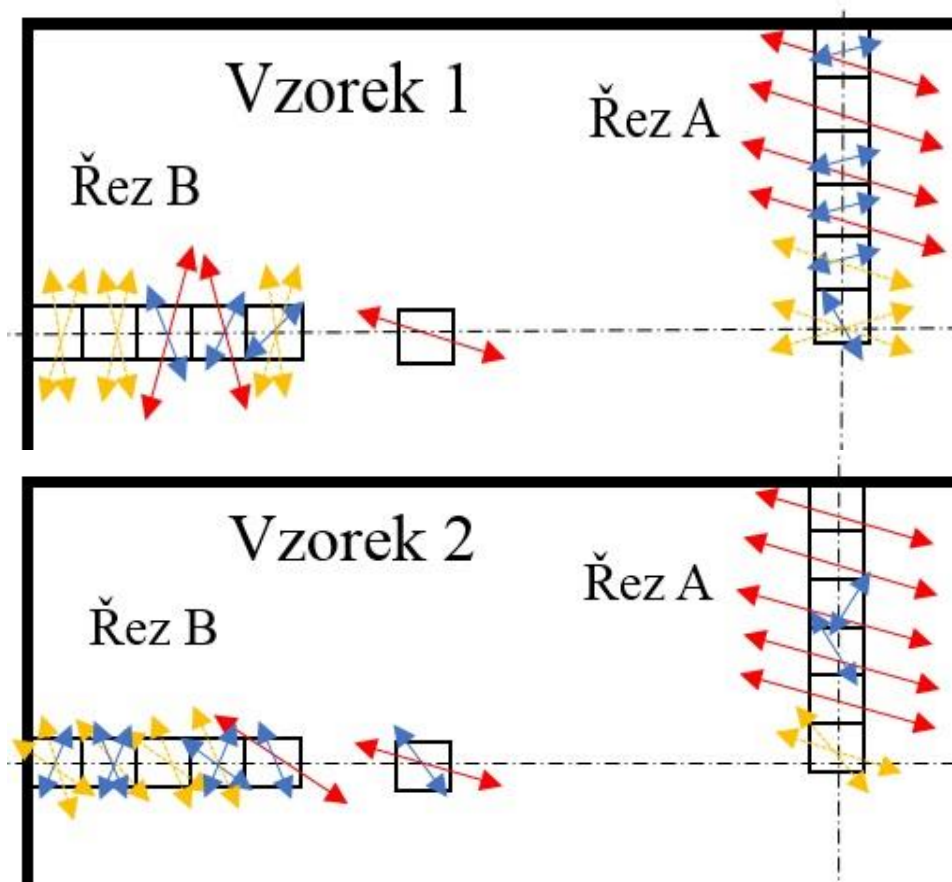
Úhel natočení vláken	
0° - 45°	
45° - 90°	
90° - 135°	
135° - 180°	

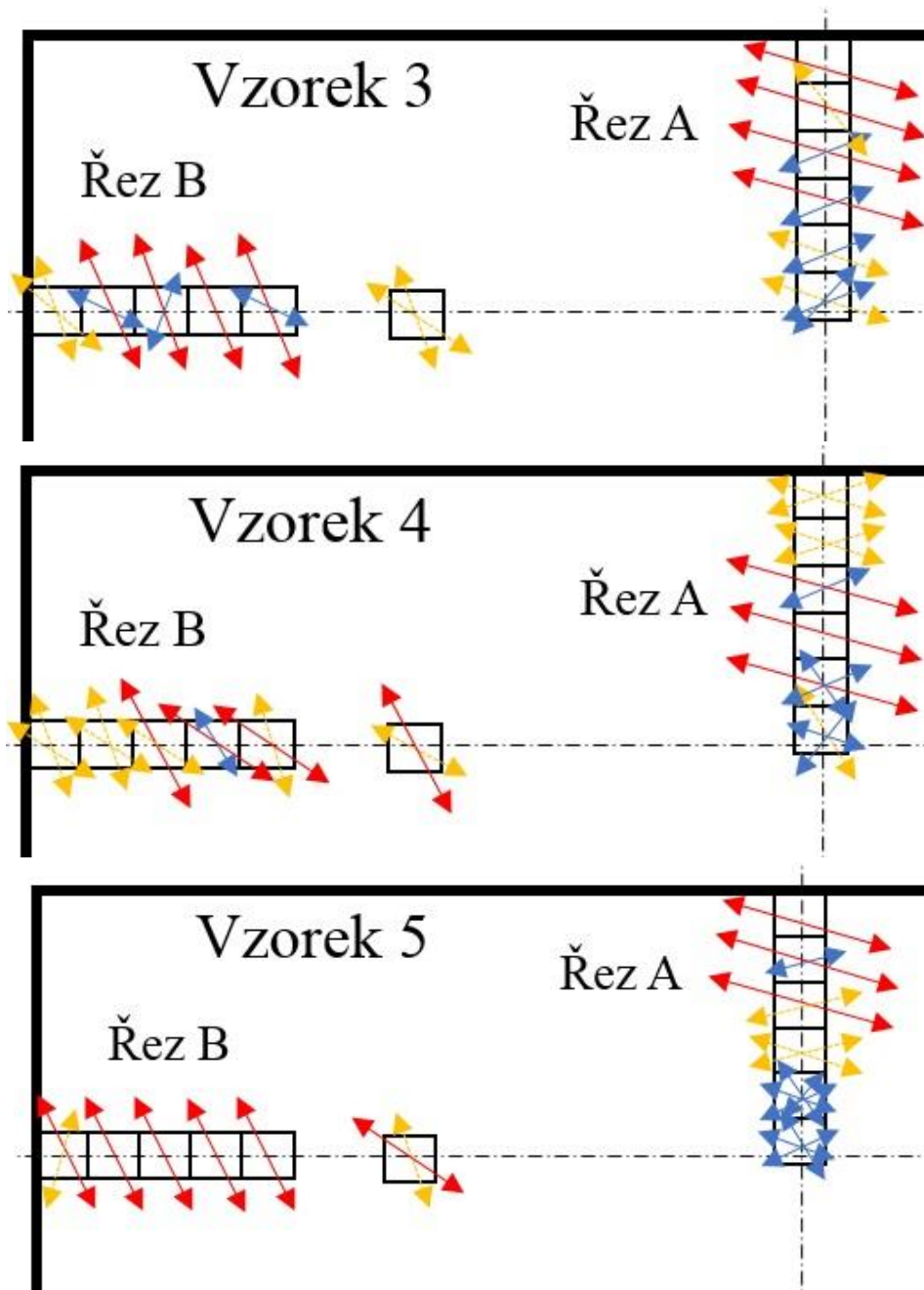


Podíl vláken ve směru	
50% a více	
30 - 50%	
20 - 30%	

Tab. 12: Grafické znázornění natočení vláken pro míru natočení vlákna větší než 25 %

Tab. 11: Podíl vláken ve směru pro jednotlivé snímky a pro míru natočení vlákna větší než 25 %





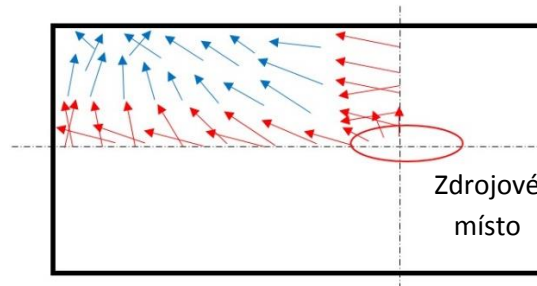
Obr. 40: Trendy natočení vláken v jednotlivých vzorcích 1-5 – pro vlákna s mírou natočení větší než 25°

Z dat je vidět, že natočení vláken má silnou tendenci směřovat do levého horního rohu vzorku, a to jak u řezu A, tak i u řezu B. To může odkazovat na to, že řezy nebyly udělány přímo v osách souměrnosti kavity. Druhým možným vysvětlením je možnost, že skutečné dělicí osy pro chování materiálu nekopírují osy souměrnosti.

Na snímku 6 u všech řezů A je vidět oblast chaotického natočení vláken, vlákna jsou natočená do všech směrů. Vzorek 5 má podíly vláken směřujících do všech stran nejvíce vyrovnané.

Očekávaný trend natočení vláken ve zbylém profilu vzorku.

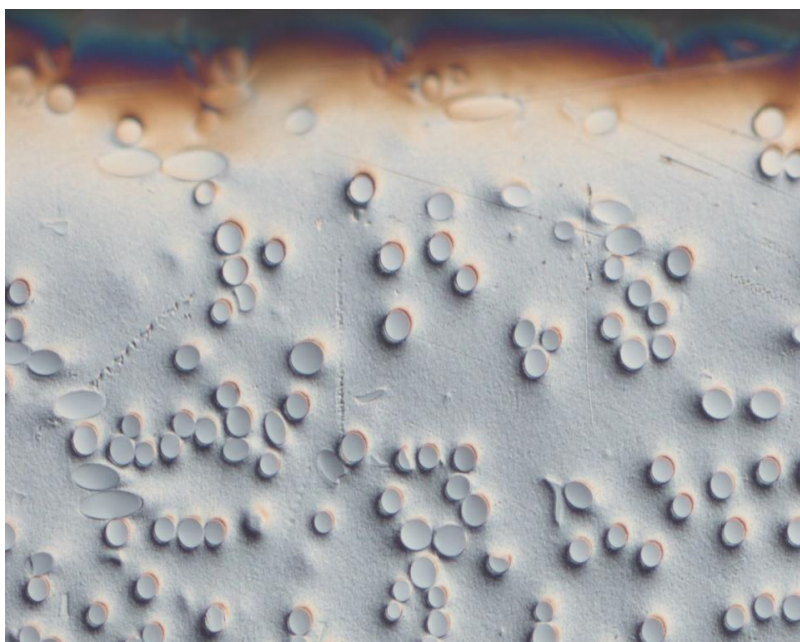
Lze očekávat, že tok pro kavitu obdélníkového tvaru bude vypadat stejně jako na obr. 41, přičemž červená část je potvrzená náměry. Modrá část je předpokládaný průběh odvozený z dat v červené části a domyšlený pomocí logické úvahy. Tok by pak měl být souměrný podle obou os.






Obr. 41 Předpokládaný průběh fontánového toku na čele toku taveniny

5.6.5 Hodnocení snímků 1

Ve všech řezech je snímek 1 výrazně „slabší“ v hodnocení ENV oproti ostatním snímkům. V zásadě je možné snímek rozdělit na tři pásma. V prvním pásmu dlouhém zhruba 0,1 mm dochází k tunutí vláken tak, jak se dostávají ke kraji. V tomto pásmu je malý počet vláken. Následuje prostřední pásmo, které se nachází kvalitativně mezi pásmy 1 a 3. Třetí pásmo je srovnatelné se snímkem 2, 3 atd. v počtu a natočení vláken.



-  Pásmo malé hustoty vláken a velké variability orientace a natočení vlákna
-  Přechodné pásmo
Střední hustota vláken
-  Pásmo srovnatelné se snímkem 2, 3 atd. – vysoká hustota vláken

Obr. 42 naznačení pásem ovlivnění pro snímky

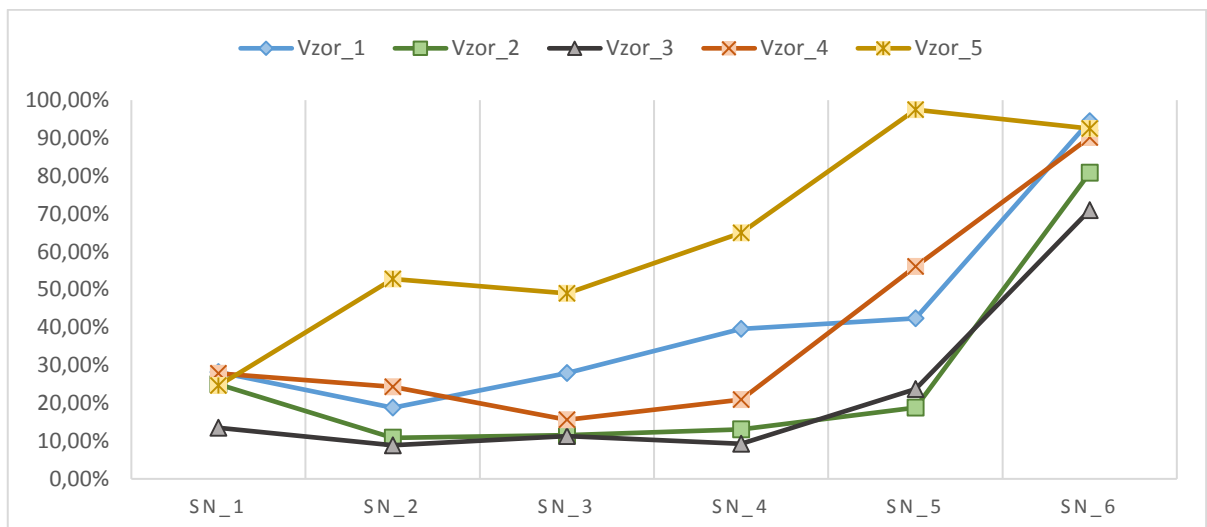
5.7 Analýza dat

5.7.1 Efekt fontánového toku

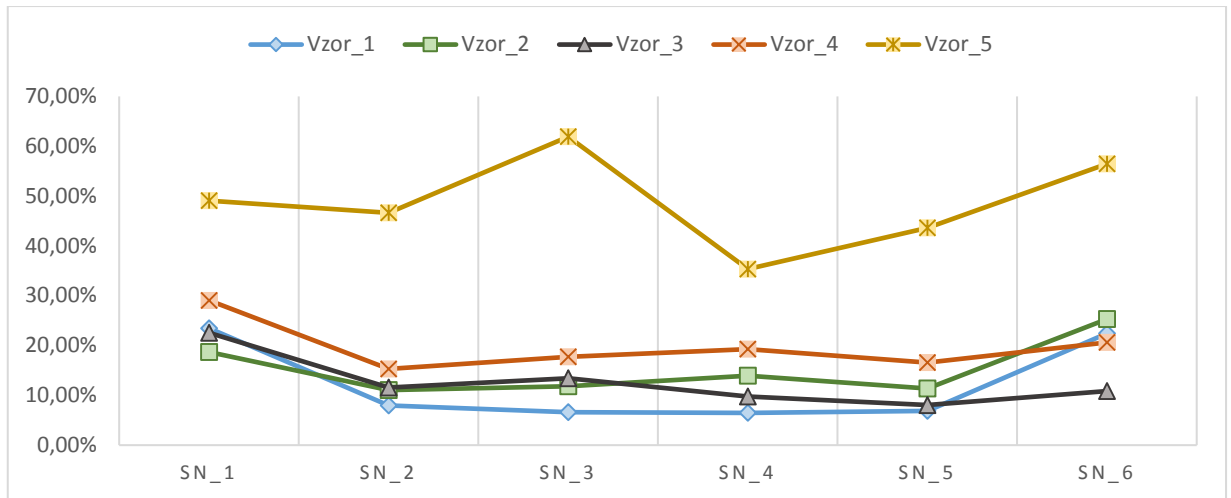
Získaná data překvapivě věrohodně zdokumentovala přítomnost fontánového efektu na čele toku. Tuto teorii potvrzuje vzorek č 5, který má rozdílné charakteristiky viditelné na grafech ENV 15 nebo 17. Pro další analýzu rozdílů v jednotlivých vzorcích jsou uvažovány podíly vláken s mírou natočení větším než 40°. Tyto údaje lze vidět z grafů 25 a 26. V jednotlivých řezech A a B je vidět, že podílem takto natočených vláken vzorek 5 zcela vybočuje od ostatních vzorků. Jeho poloha na konci kavity říká, že zde právě prošlo čelo toku.

Víme, že čelo toku prošlo celou kavitou. Chování na čele toku říká, že vlákna jsou distribuována ze středu do krajů přesně tak, jako průběh toku taveniny na čele. Z toho důvodu lze předpokládat, že jsou všechny oblasti ovlivněné tímto trendem. Natočená vlákna odpovídající směřům od středu do kraje jsou potomky průchodu čela toku. Dle obrázku 40 (1-5) je vidět, že majoritní natočení vláken odpovídá těmto trendům ve všech řezech.

V tomto ohledu je zajímavé sledovat, že jsou řezy, které mají tyto tendence, viditelně slabší. Týká se to především vzorku 2 a 3. Jedná se o řez částí tělesa, kde proud taveniny prochází kompresí materiálu díky zužujícímu se profilu, a o vzorek 3, kde je průřez nejmenší. V těchto vzorcích dochází k omezení efektu čela toku.



Graf 22 Podíl vláken v řezu "A" s mírou natočení 40°-90°



Graf 23 Podíl vláken v řezu "B" s mírou natočení 40°-90°

Vzorek 1 má excelentní charakteristiku v řezu B a průměrnou charakteristiku v řezu A. Tedy čelo toku ovlivňuje krátké strany obdélníkového průřezu kavity méně než krátké.

5.7.2 Efekt mrznoucí vrstvy na stěnách

Na základě analýzy dat u řezu „A“ lze říct, že natočení vláken je zde ovlivněno několika důležitými aspekty.

1) Ovlivnění vstupem taveniny do formy

Vzorek 1 je ovlivněn vstupem taveniny do formy. Na rozdíl od vzorků 2 a 3, které vycházejí v porovnání natočení zrn a množství zrn nejlépe, má vzorek 1 srovnatelné hodnoty poměrné síly natočení vláken pouze u 1. a 2. snímku. Poté nabírá křivka větší sklon a v končeném pořadí vychází jako 4. nejhorší vzorek ze všech.

2) Ovlivnění obdélníkovým tvarem formy

Jak je možné vidět z výsledných dat, v analyzovaném řezu „A“ je ve většině případů více jak 70 % vláken natočených v nějakém smyslu ve směru delších stran obdélníku, tj. průřezu formy. V případě měřených vzorků řezu „A“ dle obr. č. 38 a podle naměřených dat je více jak 70 % vláken natočeno ve směru podél stěny 0°-45° a 135°-180° z důvodu vysokého podílu vláken.

Pokud budeme uvažovat vlákna, která mají míru natočení větší než 25°, pak je tento trend ještě patrnější. Lze tedy uvažovat, že velkou roli v dějích uvnitř kavity hraje obdélníkový tvar kavity, kde v užším rozměru tloušťky kavity působí větší smyková napětí než podél její delší strany.

3) Ovlivnění rozdílným tvarem průřezu kavity

Jak již bylo naznačeno, zásadní roli pro distribuci vláken hraje aktuální průřez kavity. Zde je možné sledovat dva fenomény. Nejlepších výsledků hodnocení poměrné síly natočení vláken dosahuje vzorek 3, který má nejmenší prořez – nejmenší poměr stran obdélníku. U tohoto vzorku lze sledovat nejvyrovnanější podíl natočených vláken mezi skupinami 0-45, 135-180 a 0,45-135. Nicméně i zde podíl neklesá pod 60 %.

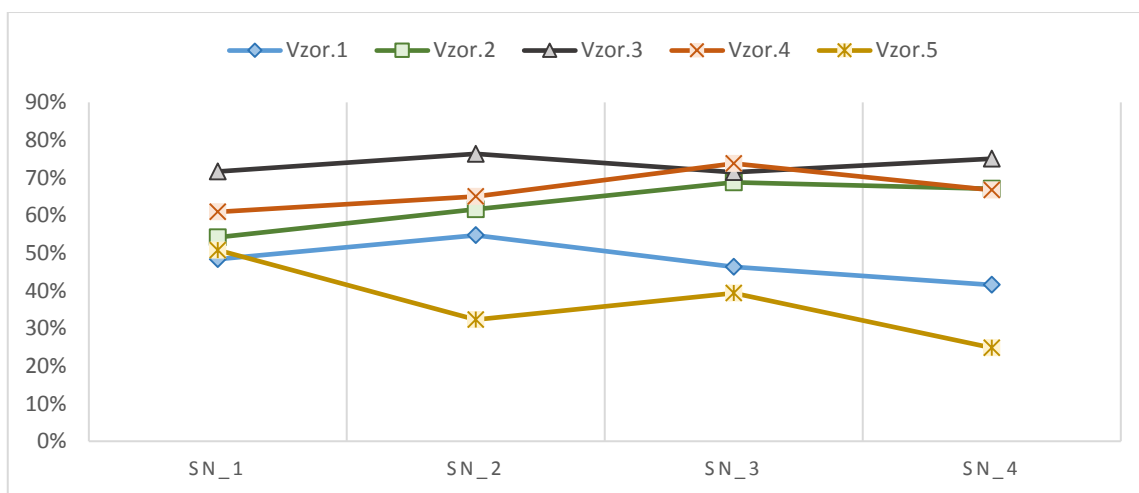
Dalším úkazem je srovnání vzorku 2 a 4. Vzorek 2 má druhé nejlepší hodnocení síly natočení vláken a ve srovnání se vzorkem 4 se zde nabízí analogie se sužujícím a rozšiřujícím se profilem kavity.

4) Ovlivněno čelem toku

Zcela nejhorší výsledky vykazuje vzorek 5, který již od prvního snímku vykazuje nejnižší hodnoty množství vláken a vláken, která by byla usměrněna ve směru toku. Tento efekt se dá přisuzovat dvěma okolnostem, jednak je kavita zásobovaná taveninou z užšího místa, což může způsobovat turbulence, a jednak zde může být stále vliv čela toku, které postupně prochází celou kavitou, což nutně zanechává vlákna v neuspořádaném stavu.

Závěr k řezu A

Efekt mrznoucí vrstvy u kraje kavity by měl zanechávat efekt klesajícího množství vláken srovnaných ve směru toku.



Graf 24 PENV - MÍRA NATOČENÍ VLÁKEN ŘEZ A (0° - 25°)

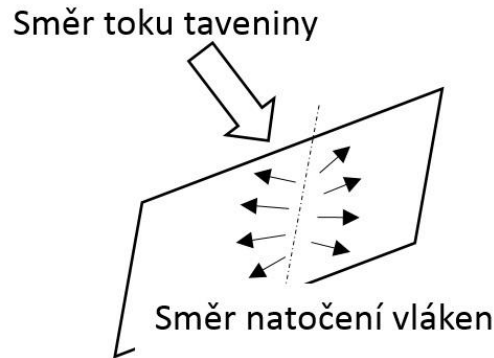
Výsledné hodnoty snímků zanechávají rozdílný obraz. Snímek 1 je vždy ovlivněn samotným krajem, kde jsou vlákna spíše deformována a celkový počet zrn na snímku 1 je vždy menší. Snímky 2 až 4 mají větší množství zrn, ale nevykazují změnu počtu orientovaných zrn ve směru toku.

U vzorku 1 není nejlepší orientace zrn, nejlepší je sledována až u vzorku 3. Díky tomu lze říct, že sledování ovlivnění toku mrznoucí taveninou na stěně není u řezu A v celé

délce průkazné.

Důvody nevhodnosti řezu pro hodnocení kritéria:

- 1) Čelo toku, tedy fontánový jev ovlivňuje více střed kavity v řezu A. Tok je zde zdrojovým místem toku čela viz obr. č. 43.

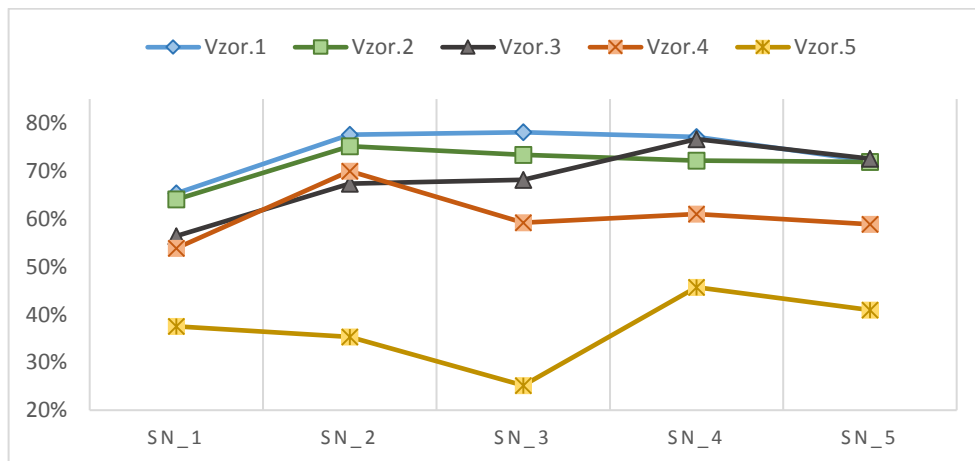


Obr. 43 řez A jako zdrojové místo pro plnění kavity na čele toku

- 2) Vzorek A je ovlivněn vstupem taveniny do kavity, navíc zde působí nejvíce dotlak taveniny při procesu tuhnutí, který za sebou zanechává očividně ovlivnění především snímků 3–5.
- 3) Díky rozdílným prořezům měřených kavít je střed „deformován“ vždy trochu jinak.

Závěr k řezu B

- 4) V této části analýzy je zajímavé povšimnout si rozborů řezů B. Vzorek 1 není ovlivněn vstupem taveniny do kavity. Kromě vzorku 5 mají všechny řezy srovnatelné hodnoty síly natočení vláken. Nicméně podíl vláken v úhlu 0° - 25° k celkovému počtu vláken ve vyšetřovaných vzorcích kopíruje jednotlivé vzorky v pořadí tak, jak jimi prochází tok taveniny. Takto se dají v jednotlivých řezech hodnotit snímky 1 až 3 viz graf 24.

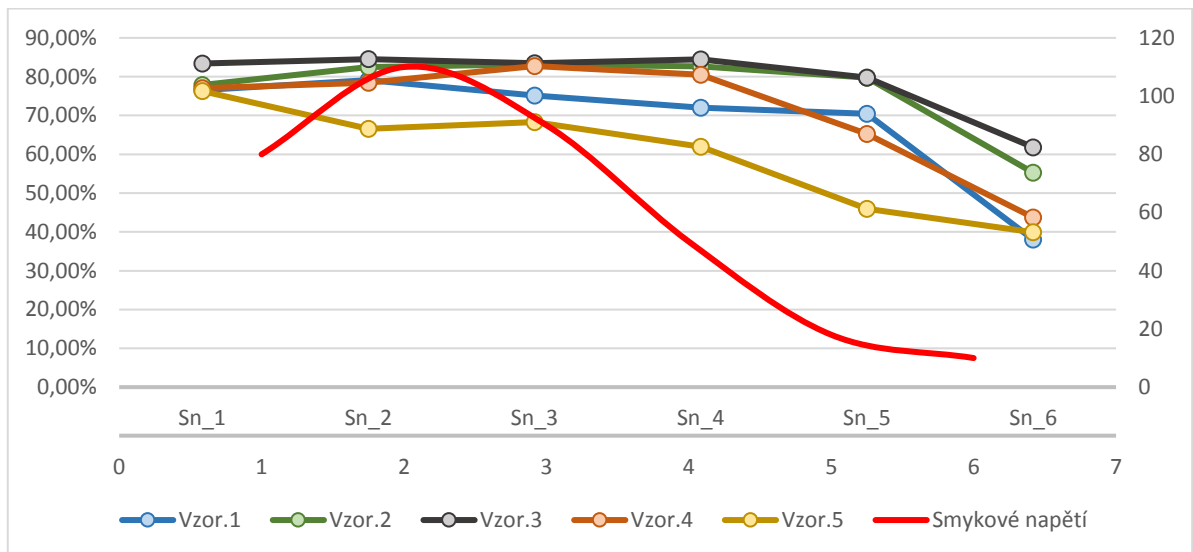


Graf 25 PODÍL MÍRY NATOČENÍ VLÁKEN ŘEZ B - (0° - 25°)

5.7.3 Efekt rozdílného tření v toku

Z naměřených hodnot je zajímavé vyzdvihnout fakt, že u vzorků 2, 3 a 4 jsou snímky 2, 3 a 4 lépe hodnoceny než snímek 1. Při přímém kontaktu se stěnou dochází k deformacím a vlákna, která se toho účastní, jsou vychylována ze směru toku taveniny. Další důvod, proč je snímek 1 horší, spočívá v tom, že u kraje je obecně méně zrn. Naopak snímky 2, 3 a 4 jsou vlákna lépe zásobena a zejména u vzorků 2 a 3 jsou vlákna i excelentně narovnaná s tokem taveniny. Pro hodnocení tohoto efektu se dá držet teorie, že je zde ovlivnění z jedné strany tuhnoucí vrstvou u stěny, která zpomaluje tok. Ke středu se tření zmenšuje, dochází tedy k poklesu napětí a tím i efektu rozdílného tření v toku. Tato kombinace tedy způsobuje narovnání vláken ve snímkách 2 – 4.

Pro zhodnocení byl vybrán parametr PENV, tentokrát však jednotlivé hodnoty nebyly k sobě přičítány. Byl vybrán řez A, který ukazuje průběh natočení vláken až ke středu kavity. Výsledek je vidět v grafu č.: 27.



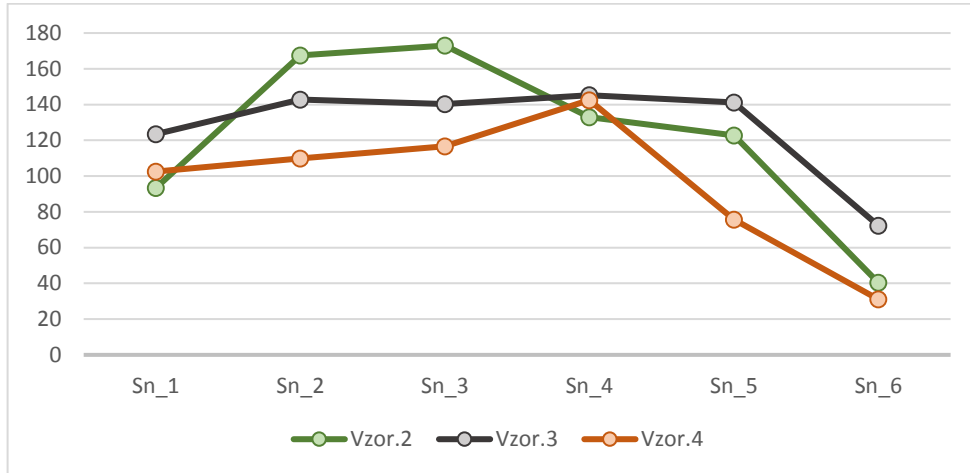
Graf 26 PENV - Předpokládaný průběh smykové napětí v závislosti na síle míry natočení vlákna u řez A

V grafu byl dále vytvořen předpokládaný průběh smykového napětí v kavité od stěny ke středu kavity. Na základě měřeného míry síly natočení vlákna je vidět, že změna smykového napětí má vliv na snímky 3, 4 a částečně i na pátý. Dle vývoje grafu lze předpokládat jednotlivé průběhy smykového napětí v jednotlivých vzorcích.

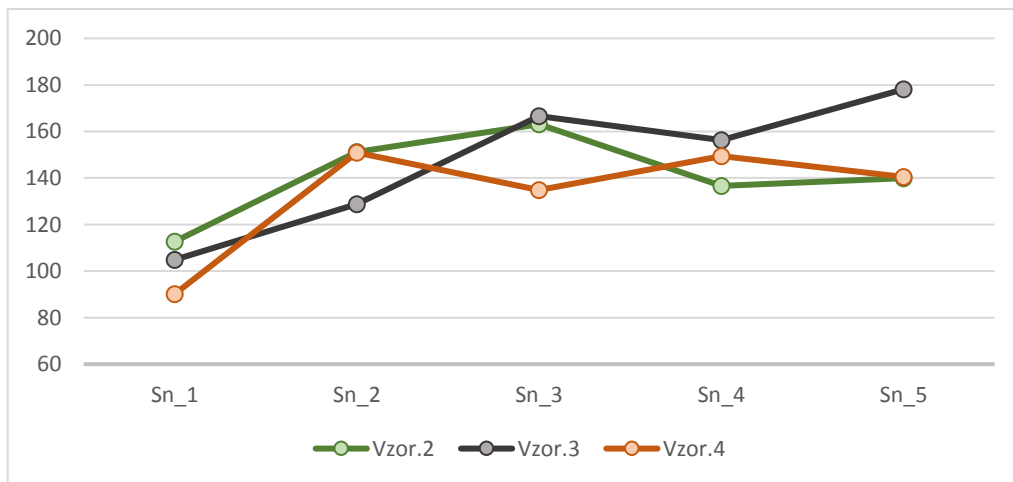
Z dat je možné říct, že tento efekt byl ověřen. Otázkou je, zda je to efekt sám o sobě, nebo, zda je přímo spojen s efektem tuhnoucí vrstvy u stěny kavity. Nicméně pokud vezmeme v úvahu časové hledisko, pak nejdříve dochází k tuhnutí u stěny a pak dochází k rozdílnému napětí v toku mezi stěnou a středem kavity.

5.7.4 Ovlivnění toku geometrií vstřikovaného dílu

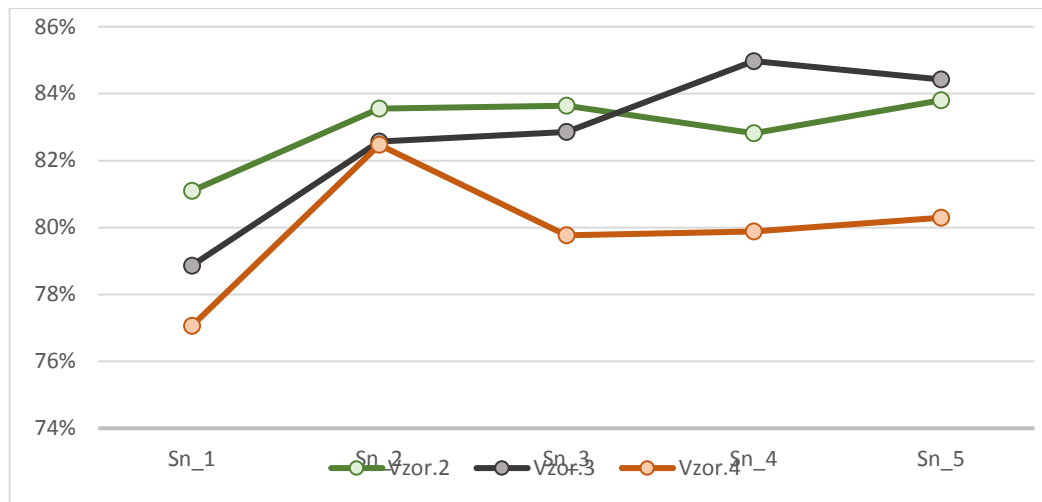
V této kategorii je důležité porovnání vzorku 2, kde se profil zužuje a vzorku 4, kde se naopak profil rozšiřuje. Oba vzorky budou porovnány s referenčním vzorkem 3.



Graf 27 ENV Porovnání Síly natočení vláken ve vzorcích 2, 3 a 4 v řezu A



Graf 28 ENV Porovnání síly natočení vláken ve vzorcích 2, 3 a 4 v řezu B



Graf 29 PENV Porovnání podílu síly natočení vláken ve vzorcích 2, 3 a 4 v řezu B

Co se týče úhlu natočení vláken, nelze ze zjištěných hodnot usuzovat nic mimořádného, kromě toho, že oba vzorky 2 i 4 si udržují předpokládané natočení vláken, viz kapitola o čele toku.

Při porovnání síly natočení vláken lze dojít k několika závěrům. Dekomprese u vzorku 4 má vliv na celý proud taveniny v tom smyslu, že smykové průběhy napětí jsou nižší. Toto potvrzuje porovnání v řezu A, který by neměl být přímo ovlivněn geometrií těles, nicméně vzorek 4 zde vychází o řád hůře než vzorek 2 a také než referenční vzorek.

Když porovnáváme řez B, který je přímo ovlivněn geometrií kavity, pak je vidět velmi zajímavý jev. Rozdíl mezi grafem 29 a 30 spočívá v tom, že graf 30 bere v potaz i počet vláken. Graf 30 uvažuje čistě jen míru narovnání vláken ve směru toku. V tomto ohledu se vzorek 2 se vzorkem 4 protínají v průběhu, nicméně graf 30 ukazuje, že vzorek 4 má hůře natočená vlákna, respektive komprese lépe rovná vlákna do směru toku.

Graf mimo jiné ukazuje, že množství vláken a jejich rozložení je ve vzorku 4 vyrovnané. Kompresí srovnaná vlákna na trase zúženého místa profilu kavity prochází dekompresí – vlákna jsou rovnoměrně distribuována do rozšiřujícího profilu.

6 Závěr

6.1 Shrnutí hlavních poznatků

V práci byla provedena analýza literatury týkající se zkoumání kompozitního materiálu, konkrétně polymeru s příměsí skelných vláken a jejich natočení. Je možné vyčlenit tyto hlavní závěry:

- Potvrzení hypotéz:

V práci se podařilo potvrdit hypotézy zásadní úlohy čela toku. Efekt tuhnutí vrstvy nebyl díky čelu taveniny průkazně prokázán v předpokládaném řezu A. Částečně ho lze vidět u řezu B. To mohlo být způsobeno také specifickým tvarem výrobku. Nicméně tuhnutí po stranách vyvolává vysoké třecí napětí, které ustupuje směrem ke středu. Tento efekt, který má rovnat vlákna do směru toku, je z dat viditelný. Rozdílná geometrie průřezu je z naměřených dat také patrná. Komprese a dekomprese vykazují rozdílné kvality natočení vláken.

- Signifikantní anizotropie kompozitu

Z výsledků lze konstatovat, že v polymeru byla nalezena signifikantní anizotropie natočení vláken, cca 45 % vláken je natočené v nějakém směru více jak 25° od směru toku taveniny. Ve středu profilu se po celé délce tvoří významná oblast chaoticky natočených vláken. Tato oblast prostupuje celým výrobkem. Její velikost je závislá na smykových silách působících v daném profilu. Ve vzorku 3 (nejmenší profil – největší smykové síly) je tato oblast nejmenší.

- Dehomogenizace kompozitu

Při procesu vstříknutí taveniny dochází k dehomogenizaci materiálu. Ve srovnání nejhoršího a nejlepšího vzorku je rozdíl počtu vláken u součtu řezů A a B více jak 20 %. Stejně tak i v rámci měřených snímků dochází k výrazným změnám počtu vláken na stejně velikých plochách. U snímku 6 je i 3x méně vláken než u nejsilnějšího snímku. Snímky 1 mají 50 % až 70 % vláken oproti snímku 2. Rozdíly až 20 % jsou však i mezi snímky 2–5.

- Průchod čela toku

V práci bylo ukázáno, že významným fenoménem majícím vliv na rozložení vláken je čelo toku, které svým fontánovým tokem zanechává natočení vláken v kavitě především u krajů kavit.

Tam, kde je možné snížit účinek fontánového toku – úzkým profilem, kompresí taveniny – je efekt nižší. Nejhůře postižený je konec kavity, kde následný tok nemá možnost

srovnat vlákna.

- Dotlak taveniny

Očividné ovlivnění vstupu do kavity po sobě zanechává dotlak taveniny při procesu chladnutí. Tento jev identifikuje porovnání řezu A a B u vzorku „1“.

- Trojdimensionální tok

Tavenina nemá jen jednodimenzionální tok. Především na čele toku je nutné uvažovat rozdílné rychlosti v průřezu plněné kavity. Vláknem sleduje tok taveniny. Vláknem se dále vzájemně ovlivňují.

- Možnosti, jak srovnat vlákna do směru toku

V práci bylo dokázáno, že komprese materiálu u vzorku 2 a rychlý tok u vzorku 3 mají příznivý vliv na srovnání vláken do směru toku materiálu.

- Vliv velikosti průřezu na tok taveniny

V práci je dokázáno, že vzorek 3 má, co se týká natočení vláken, nejlepší parametry, a to společně se vzorkem 2, kde probíhá komprese taveniny. V obou průřezích probíhají vysoká napětí. Otázkou zůstává, zda jsou v těchto bodech vlákna rovnána díky aktuální situaci proudu taveniny, čímž je myšlen zužující se profil, který vyvolává vysoký odpor od stěny zpět do taveniny, nebo úzký profil vzorku 3, kde je větší rychlost průchodu materiálu při stálém tlaku a díky tomu i větší napětí. Nebo je nutné položit také otázku, zda dochází u vzorku 3 k tomu, že materiálová charakteristika (jako je tření, schopnost téct, množství vláken v materiálu) dosáhla hranice, při které omezený průřez kavity znamená razantní omezení efektu čela toku. Naopak je zde materiál rovnán vysokými smykovými silami od stěny až ke středu. Vzorek 3 disponuje minimální oblastí chaotického středu, což lze vidět v příloze 1.

- Potvrzení teorie Mendes

Tato práce dále potvrzuje předpoklad u modelu Mendes, že AR je u stěny menší, ale uprostřed je AR velké. Nicméně je nutné podotknout, že u úplného kraje dochází spíše k chaosu. Zde je možné předpokládat, že vlákna tuhnou přímo u stěny v takovém natočení, ve kterém se ke stěně dostanou. V dalším průběhu vstříku už se nerovnaj. Toto lze sledovat na všech snímcích 1 u všech vzorků a řezů.

6.2 Navržené pokračování ve výzkumu

V práci byl použit způsob vyhodnocování kvalitativní i kvantitativní způsobnosti rozložení vláken v kompozitním materiálu. Byla navržena metoda zkoumání. V rámci

zkušeností s vyhodnocováním vzorků by bylo možné udělat zlepšení.

- Práce s tvořením a vyhodnocením snímků

Pro lepší vyhodnocení na mikroskopu a následně pomocí programu by bylo vhodné zvolit jiné rozlišení a způsob snímání vzorku. Způsob by měl lépe oddělit kontrastně hodnocená vlákna od matrice. V takovém případě by bylo možné dosáhnout lepších výsledků v hodnocení míry natočení pro úhly $0^\circ - 25^\circ$ a menší náročnosti se zpracováním snímků a dat.

- Jiný tvar zkoumaného vzorku

Obecně je možné říct, že pro daný vzorek byly popsány trendy natočení vláken. Některé fenomény v tomto ohledu byly průkazně dokázány – fontánový efekt na čele toku, vliv geometrie kavity (komprese, dekomprese), či změna smykových sil v rámci profilu kavity.

Vzhledem k tomu, že bylo zkoumáno těleso se specifickým tvarem, některé efekty by bylo vhodné zkoumat i na jinak definovaných tělesech. Efekt mrznoucí stěny by bylo vhodné zkoumat na konstantním průřezu ideálně čtvrťového nebo kulatého profilu. V případě pokusu o eliminaci negativních příspěvků fontánového toku by byl vhodný konstantě se zužující profil.

- Rozdílné procesní parametry

Pro obecné použití je samozřejmě vhodné zkoumat rozdílné parametry vstřikovacího procesu. Především vliv teploty tlaku na zlepšení orientace vláken v matrici, na němž by bylo možné ukázat, jestli vzorek plněný vyšší/nížší rychlostí/tlakem bude mít lépe/hůře uspořádaná vlákna v jednotlivých řezech.

6.2.1 Závěrečné zhodnocení

Práce se zabývá jevy, které určují natočení vláken ve výrobku. Bylo dokázáno, že podíl vláken, které jsou ideálně natočeny, je relativně malý. Bylo také ukázáno, že neexistuje uspokojivá teorie, která by popisovala vliv natočeného vlákna na schopnosti přenášet zatížení.

Práce popsala přesvědčivě jev čela toku, které průchodem distribuuje především po stranách zpříčená vlákna. Vlákna, která jsou přímo v kontaktu se stěnou kavity, jsou očividně zatuhlá a jejich koncentrace je malá. Malá koncentrace se projevuje cca do 0,2 mm od kraje. Dále od kraje se projevují silná smyková napětí, která se mění se vzdáleností ke středu. Tato napětí přesvědčivě rovnají vlákna. Střed vzorku má vysoké úhly natočení vláken a je chaotický, což je dáno nízkými třecími silami, které zde působí. Na začátku vstřiku je forma ovlivněna dotlakem při chladnutí a konec kavity je zase ovlivněn

doznívajícím čelem toku. Kompresi materiálu v důsledku zmenšujícího se průřezu má pozitivní vliv na srovnání vláken.

Práce se teoreticky zabývala vlivy, které určují natočení vláken ve zkoumaném kompozitu. Přesto, že byl zkoumán polyamid plněný skelnými vlákny, výsledky práce by měly být použitelné v širší oblasti polymerních kompozitů. Teoreticky byly určeny hlavní vlivy při procesu vstřikování, které pak byly v praktické části ověřeny. Na základě dat bylo popsáno celkové chování vláken a jejich koncentrace v definovaných řezech. Byl položen základ pro další zkoumání těchto fenoménů a byly naznačeny další možné cesty ve výzkumu. Schopnost předpovídat a tím i ovlivňovat natočení vláken by mohla mít za následek vytváření přesných charakteristik chování materiálu při vstřikování do formy. Možný vývod by mohla mít práce i jako forma doporučení pro konstruování, na co se zaměřit u polymerního kompozitu pro dosažení výhodnějších průmyslových aplikací.

7 Seznam použité literatury

- [1] KREBS, Stefan. *Vstřikování vyztužených termoplastů – Analýza homogenizace a orientace při plastifikaci v nástroji*. PRAHA, 2018. STUDIE DOKTORSKÉ PRÁCE. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE.
- [2] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [3] MAREŠ, Dominik. *Vstřikování plastů vyztužených skleněnými vlákny a jejich použití v automobilovém průmyslu*. PRAHA, 2019. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Štefan Krebs.
- [4] LENFELD, prof. Dr. Ing. Petr. *Technologie vstřikování* [online]. 1. Liberec: Publi, 2015 [cit. 2017-12-16]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>
- [5] LUKÁŠ, Jiří. *Parametry procesu vstřikování plastů*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze
- [6] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů*. Praha: BEN, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Skripta předmětu Přenos hybnosti, tepla a hmoty
- [7] BLAŽEK, Pavel, Tomáš ZIKMUND, Pavel GAJDOŠ, Jiří KOUŘIL a Jasef KAISER. *Inspekce vnitřní struktury polymerů tvrzených skelnými vlákny*. Newsletter technického týdeníku: Technický portál [online]. Vysoké učení technické v Brně: CEITEC – Central European Institute of Technology, 2018 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/inspekce-vnitri-struktury-polymeru-tvrzenych-skelnymi-vlakny_43890.html
- [8] CHAND, Navin a M. FAHIM. *An Introduction to Tribology of FRP MATERIALS*. New Delhi: Allied Publishers, 2000. ISBN 81-7023-982-6.
- [9] *2 Tokové chování polymerních tavenin – reologické modely: Stránky pro výuku UMFI*. Ústav Fyziky a materiálového inženýrství: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_02.pdf
- [10] TECHNIK, Jiří. *Úprava geometrie vtokového systému pro PC/ABS*. Liberec, 2015.
Disertační práce. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI.
- [11] KAŠTYL, JAROSLAV. *VRSTEVNATÉ KERAMIKY PŘIPRAVENÉ METODOU TERMOPLASTICKÉ KOEXTRUZE*. Brno, 2015. Disertační práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [12] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. Přeložil Lubomír SODOMKA. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.

- [13] GRELLMANN, Wolfgang a Sabine SEIDLER. Kunststoffprüfung. 3. vydání. Munchen, 2015. ISBN 978-3446220867.
- [14] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: Teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 970-80-241-0614-1.
- [15] KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. Injection Molding Advanced Troubleshooting Guide. Munchen: Hanse Publishers, 2018. ISBN 978-1-56990-645-3.
- [16] LAUN, H.M. Orientation effects and rheology of short glass fiber-reinforced thermoplastic. Colloid & Polymer Science. 1984, , 13.
- [17] HAN, Chang Dea, Carolin M. YOUSSEF a Chang Dea HAN. Rheology and Processing of Polymeric Material. United Kindom: Oxford University Press, Incorporated, 2007. ISBN 9780195187830.
- [18] CORDIN, Michael, Thomas BECHTOLD a Tung PHAM. Effect of Fibre orientation on the mechanical properties of polypropylen-lyocell composites. Innsbruck, 2018. Scientific article. University of Innsbruck.
- [19] MACEK, Karel a Petr ZUNA. Nauka o materiálu. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01507-6.
- [20] CROWSON, F.J., M.J. FOLKES a P.F. BRIGHT. Rheology of short Glass Fiber-Reinforced Thermoplastics and its Application to injection Molding: 1. Fiber Motion and Viscosity Measurement. Cranfield, 1980. Cranfield Institute of Technology.
- [21] FARRIS, R.J. Prediction of the Viscosity of Multimodal Suspensions from Unimodal Viscosity Data. Sacramento, 1968. Vědecká práce. The University of Utah.
- [22] KIM, Jin Kom a Ju Ho SONG. Rheological properties and fiber orientations of short fiber-reinforced plastics. Pohang, 1997. Pohang University of Science and Technology.
- [23] VRBKA, J. Mechanika kompozitů, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008. 4 s
- [24] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. Vláknové kompozity. Přeložil Lubomír SODOMKA. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [25] ISO 1874-1 Plastics - Polyamide (PA) moulding and extrusion materials: Designation system and basis for specification. 4. Switzerland, 2012.
- [26] ČSN EN ISO 527-2 Plasty- Stanovení tahových vlastnost: Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. Praha: úrad pro technickou normalizaci, metrologii a slátnl zkušebnictví, 2012.
- [27] Grilon: Premium polyamide [online]. Švýcarsko: Grilon, 2017 [cit. 2020-08-14]. Dostupné z: <https://www.emsgrivory.com>

8 Seznam obrázků, grafů a tabulek

Obr. 1 Vliv natočení vláken na modulu pružnosti [17]	11
Obr. 2 Ukázka termomechanická křivka amorfního (1) a dvou krystalických polymerů [2]	12
Obr. 3 Výtažek z normy ISO 1874-1:2010(E).....	16
Obr. 4 Porovnání kompozitu s dlouhými a krátkými vlákny s polymerní matricí bez výztuže.[14]	20
Obr. 5 Uvolněný prvek vlákna [23].....	20
Obr. 6 Geometrický výpočtový model přenosu zatížení v krátkém vláknu [23].....	20
Obr. 7 Průběh napětí ve vláknu σ_z a smykového napětí na hranici vlákno-matrice v závislosti na délce vlákna [24]	
21	
Obr. 8 Model reologického chování během smykového namáhání [1]	22
Obr. 9 Natočené vláken ve dvou směrech – rovnoběžně se stěnou a kolmo na stěnu pro různé třecí deformace.	32
Obr. 10 natočení vláken při efektu natahování struktury matrice a působení smykové deformace	32
Obr. 11 ukázka modelu plnění kavity taveninou [17]	34
Obr. 12 Model plnění taveninou rotační kavity	35
Obr. 13 Model Menges: profil rychlosti a orientace vláken během procesu vstřikování (Menges, 1982) [1].....	36
Obr. 14 Porovnání mikroskopických metod získaného obrazu – vlevo: Světlé pole, vpravo: DIC Nomarski	38
Obr. 15 Naznačení teoretických předpokladů přenosu síly pro různé natočení vláken	41
Obr. 16 Připravené vzorky ke zpracování	43
Obr. 17 Příprava řezů	43
Obr. 18 Výsledný snímek z mikroskopu	43
Obr. 19 Fontánový efekt u vstupu taveniny do kavity.....	45
Obr. 20 Zdrojový tok (Universita Ilmenau, 2018) [1].....	45
Obr. 21 Průběh Efekt tuhnutí materiálu na stěnách při plnění celé délky kavity.....	46
Obr. 22 Efekt narovnání vlákna u stěny kavity	47
Obr. 23 Rozdělení pásem toku na oblasti ovlivněné různými jevy	47
Obr. 24 Narovnání vlákna různou intenzitou smykového napětí v průřezu kavitou	48
Obr. 25 Zobrazení jednotlivých vzorků a řezů	49
Obr. 26 Zobrazení jednotlivých focených snímků na konkrétním řezu.....	49
Obr. 27 Natočení vlákna v matrici.....	51
Obr. 28 Princip měření parametru Míry natočení vlákna	51
Obr. 29 Princip měření úhlu natočení vlákna	52
Obr. 30 Rozbitá vlákna na snímku, který nafotil mikroskop.....	53
Obr. 31 Úprava vláken a nečistot jako příprava pro následující měření.....	53
Obr. 32 zpracování pozadí – matrice kompozitu, oddělení vlákna a polymeru.....	53
Obr. 33 Zpracování snímku v konečné fázi před vyhodnocením	53
Obr. 34 výsledné zobrazení naměřených elips	54
Obr. 35 Překrytí výsledného naměření elips s původním snímkem	55
Obr. 36 Zjištěná odchylka_02	55
Obr. 37 Zjištěná odchylka_01	55
Obr. 38 Oblastí menších a větších hustot vláken v materiálu.....	62
Obr. 39 oblast lokalizace vláken kolem vlákna zpřičeného vlákna	62
Obr. 40 Trendy natočení vláken v jednotlivých vzorcích 1-5 – pro vlákna s mírou natočení větší než 25°.....	66
Obr. 41 naznačení pásem ovlivnění pro snímky.....	67
Obr. 42 Předpokládaný průběh fontánového toku na čele toku taveniny	67
Obr. 43 řez A jako zdrojové místo pro plnění kavity na čele toku	71

Graf 1	Viskozita Newtonských látek jako veličina nezávislá na čase	23
Graf 2	Viskozita Newtonských látek jako veličina nezávislá na rychlosti smykové deformace	23
Graf 3	Charakteristika logaritmických hodnot viskozity a smykové rychlosti	24
Graf 4	Schématická vtoková křivka polymerních látek	25
Graf 5	Konstanty v Carreau modelu – Kunststoffprüfung [13]	26
Graf 6	Závislost smykové rychlosti a viskozity pro LDPE (A) a HDPE (B) plněné vlákny a neplněné vlákny [15]	29
Graf 7	Závislost teploty na viskozitě u polypropylenu plněného 30% vláken [15]	29
Graf 8	Porovnání závislosti viskozity na rychlosti deformace dle tvarového poměrem vláken l/d pro materiál PA 6 [15]	30
Graf 9 (A, B)	Závislost smykového napětí u deformovaného materiálu při konstantní smykové deformaci. Na (A) je porovnání polymeru a kompozitu s kuličkovou výplní a výplní vláknů [15]	31
Graf 10	Efekt prodloužených makromolekul polymerního materiálu při tečení	36
Graf 11	Dvojdímní popis průběhu smykového napětí a smykové rychlosti	37
Graf 12	40	
Graf 13	Očekávaná lineární závislost síly efektu tuhnutí taveniny u stěn	47
Graf 14	Rozdílné průběhy smykových napětí pro různé profily průřezu kavity	48
Graf 15	ENV efektivita natočení vláken v řezu "A" – součet snímků	58
Graf 16	PENV Poměrná efektivita natočení vláken -řez "A" – součet snímků	58
Graf 17	Síla natočení vláken v řezu "B" - dle míry natočení	58
Graf 18	Podíl úhlu natočení vláken u řez "A" pro rozmezích - (0°-45°) a (135°-180°)	63
Graf 19	Podíl úhlu natočení vláken u řezu "B" pro rozmezí - (45°-90°) a (90°-135°)	63
Graf 20	Podíl úhlu natočení vláken u řezu "A" pro rozmezích - (45°-90°) a (90°-135°)	64
Graf 21	Podíl úhlu natočení vláken u řez "B" pro rozmezích - (0°-45°) a (135 -180°)	64
Graf 25	Podíl vláken v řezu "A" s mírou natočení 40°-90°	68
Graf 26	Podíl vláken v řezu "B" s mírou natočení 40°-90°	69
Graf 23	PENV - MÍRA NATOČENÍ VLÁKEN ŘEZ A (0° - 25°)	70
Graf 24	PODÍL MÍRY NATOČENÍ VLÁKEN ŘEZ B - (0° - 25°)	71
Graf 27	PENV - Předpokládaný průběh smykové napětí v závislosti na síle míry natočení vlákna u řez A	72
Graf 28	ENV Porovnání Síly natočení vláken ve vzorkách 2, 3 a 4 v řezu A	73
Graf 29	ENV Porovnání Síly natočení vláken ve vzorkách 2, 3 a 4 v řezu B	73
Graf 30	PENV Porovnání podílu Síly natočení vláken ve vzorkách 2, 3 a 4 v řezu B	74
Tab. 1	Tabulka srovnání vlastností některých polyamidů, Polymery [2]	15
Tab. 2	Porovnání tvaru elipsy pro různé stupně míry natočení vlákna	52
Tab. 3	příklad tabulky naměřených hodnot jednoho snímku	56
Tab. 4	tabulka hodnot koeficientu k - přínosu vlákna k přenesení síly	57
Tab. 5	Efektivita natočení vláken v řez A	59
Tab. 6	Efektivita natočení vláken v řez B	59
Tab. 7	Počty zrn pro jednotlivé snímky, řezy a vzorky – řez A	59
Tab. 8	Podíl počtu vláken k počtu vláken u nejlepšího snímku – Řez A	60
Tab. 9	Počty zrn pro jednotlivé snímky, řezy vzorky – řez B	60
Tab. 10	Podíl počtu vláken k počtu vláken u nejlepšího snímku – Řez B	60
Tab. 11	Podíl vláken ve směru pro jednotlivé snímky a pro míru natočení vlákna větší než 25%	65
Tab. 12	Grafické znázornění natočení vlákna pro míru natočení vlákna větší než 25%	65