

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



Fakulta strojní
Ústav strojírenské technologie

Vstřikování termoplastů
vyztužených krátkými skleněnými vlákny -
Analýza orientace a homogenizace vláken ve výstřiku

DISERTAČNÍ PRÁCE

*Injection moulding of
short glass-fibre reinforced thermoplastics –
Analysis of fibre orientation and homogenization in the moulding*

PhD Thesis

Autor: Ing. Stefan Krebs
Studijní obor: Strojírenská technologie
Studijní program: Strojní inženýrství
Školitel: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Praha 2022

Anotace

Disertační práce se zabývá tématem vstřikování termoplastů vyztužených krátkými skleněnými vlákny. Zaměřuje se na analýzu a vyhodnocení orientace a homogenizace vláken ve výstřiku. Ačkoli výraz „krátká skleněná vlákna“ budí dojem, že orientace a homogenita vláken ve složce nehrají zvláštní roli, předložená disertační práce ukazuje, že tyto faktory jsou pro mechanické vlastnosti výrobků vyrobených vstřikováním velmi důležité.

Disertační práce se zabývá příčinami praskání zkušebních těles při axiálním zatížení na příkladu polyamidu PA66+PA6, který je vyztužen krátkými skleněnými vlákny (s 30 hmot. %). Ke praskáním dochází opakovaně na atypickém místě. Toto pozorování je dříve nezdokumentované a neprozkoumané. Je to dobrý příklad důležitosti orientace vláken a homogenity ve výlisku. Pro tento účel byly v práci definovány koeficienty pevnosti a použity vhodné zkušební metody: zkouška tahem, plastografie, analýza spalování plastu (tzv. "ash test") a konfokální laserová mikroskopie.

Disertační práce dále se zabývá stávajícími analytickými modely pro tok taveniny v dutině a pokouší se je prokázat analýzou orientace vláken. Analytické modely, zkušební metody a počítačová simulace shromážděné v práci mohou být příspěvkem pro průmyslovou praxi a přispět k optimalizaci mechanických vlastností a řešení chyb v návrhu vstřikovaných součástí.

Klíčová slova

vstřikování termoplastů

vyztužené termoplasty

plasty vyztužené vlákny

PA6

orientace vláken

homogenita vláken

tokové chování

zkouška tahem

Summary

This dissertation deals with the injection moulding of thermoplastics reinforced with short glass fibres. It focuses on the analysis and investigation of the orientation and homogenization of fibres in the moulding. Although the term "short glass fibres" gives the impression that the orientation and homogeneity of the fibres in the component do not play a special role, this dissertation shows that these factors are very important for the mechanical properties.

The dissertation deals with the causes of cracking of test specimens under axial load on the example of polyamide PA66 + PA6, which is reinforced with short glass fibres (with 30% by weight). Cracks occur repeatedly in an atypical location. This observation is previously undocumented and unexplored. This is a good example of the importance of fibre orientation and homogeneity in the moulding. For this purpose, coefficients for tensile strength were defined and suitable test methods were used: tensile test, plastography, analysis of plastic combustion (so-called "ash test") and confocal laser microscopy.

This dissertation deals with existing analytical models for melt flow in the cavity and tries to prove them by analytical methods. Analytical models, test methods and computer simulation collected in the dissertation can be a contribution to further investigation of complex phenomena or in practice contribute to the solution of errors in components.

Keywords

injection molding of thermoplastics

reinforced thermoplastics

fibre reinforced plastics

PA6

Fibre orientation

homogeneity of fibres

flow behaviour

tensile test

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE za důvěru, poskytnutý čas a podnětné rady a návrhy při zpracování mé disertační práce.

Dále bych chtěl poděkovat:

- ústavu procesní a zpracovatelské techniky za poskytnutí vstřikovacího lisu a za pomoc s výrobou zkušebních těles,
- doc. Ing. Alešovi Hermanovi, Ph.D. za podporu při numerické simulaci v sw CADMould,
- Ing. Davidu Bricínovi, Ph.D. za analýzu vzorků pomocí konfokální laserové mikroskopie,

V mé práci mě podporovali následující studenti:

- Bc. Tomáš Minařík
- Ing. Dominik Mareš
- Ing. Tomáš Picka

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mojí rodině za podporu během celého studia.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	7
1 ÚVOD.....	8
2 SRHNUTÍ POZNATKU.....	9
2.1 LOMOVÁ MECHANIKA VÝSTŘIKU	9
2.1.1 Čtyři mechanismy lomu kompozitu	9
2.1.2 Více informací o mechanismu vytahování vláken.....	10
2.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI VÝSTŘIKU	11
2.2.1 Závislost pevnosti na podílu vláknin	11
2.2.2 Závislost pružnosti na podílu vláknin.....	11
2.3 TEPelnÉ VLASTNOSTI VÝSTŘIKU	12
2.3.1 Tepelná stabilita	12
2.3.2 Pružnost při vyšších teplotách	12
2.4 ÚČINKY ORIENTACE VLÁKEN NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI VÝSTŘIKU	12
2.5 ANALYTICKÉ MODELÝ TOKOVÉHO CHOVÁNÍ TAVENINY VYZTUŽENÝCH PLASTŮ	14
2.5.1 Smykový tok viskózní taveniny ve šterbině	14
2.5.2 Vliv smykového toku na orientaci vláken a orientace vláken blízko stěny formy.....	16
2.5.3 Expanzní tok taveniny na celém toku („fontánový tok“)	17
2.5.4 Ztuhnutí taveniny v okrajových vrstvách.....	17
2.5.5 Vliv extenzního toku na orientaci vláken a orientace vláken v případě, kdy je zmenšen průřez proudění	18
2.5.6 Narušení homogenity shlukováním vláken	18
2.5.7 Segregace prostřednictvím tvorby vírů	19
2.5.8 Vliv svarů na orientaci vláken	20
2.5.9 Volný proud taveniny u zvětšeného průřezu proudění.....	20
2.5.10 Poškození vláken v PA-GF během výroby materiálu a zpracování	20
2.6 TERMOPLASTICKÉ KOMPOZITY: CÍLENÉ ZAVEDENÍ ORIENTACE VLÁKEN DO VÝROBKU	20
2.7 ZKOUŠKA TAHEM: SYMETRICKÁ DEFORMACE VÝSTŘIKU Z HOUŽEVNATÝCH PLASTŮ (PE, PP).....	21
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	22
4 MATERIÁL.....	23
4.1 DEFINICE POJMU "KOMPOZIT"	23
4.2 VLIV MATERIÁLU NA VLASTNOSTI VÝSTŘIKU	23
4.3 TERMOPLASTICKÁ MATRICE	23
4.3.1 Polyamidy (PA).....	23
4.3.2 Polypropyleny.....	24
4.3.3 Trendy ve výrobě plastů.....	25
4.4 VÝZTUŽ	25
4.4.1 Tvar výztuže	25
4.4.2 Tvarový poměr	26
4.4.3 Vláknové výztuže.....	26
4.5 SYSTÉM PRO ZNAČENÍ A IDENTIFIKACI VYZTUŽENÝCH A NEVYZTUŽENÝCH PA	28
4.6 VLASTNOSTI TAVENINY TERMOPLASTŮ VYZTUŽENÝCH VLÁKNY PŘI ZPRACOVÁNÍM	29
4.7 MATEMATICKÉ MODELÝ TOKOVÉHO CHOVÁNÍ TAVENINY VYZTUŽENÝCH PLASTŮ	30
4.7.1 Modely viskozity	30
4.7.2 Model visko-elasticity taveniny plastů	33
4.7.3 Modely suspenze z vláken v tavenině	34
4.7.4 Anizotropie taveniny termoplastů vyztužených vláknou při zpracování.....	35
4.8 VÝBĚR MATERIÁLU TĚTO DISERTAČNÍ PRÁCE.....	35
4.9 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES PODLE NORMY ČSN EN ISO 527	35
5 ZAŘÍZENÍ A NASTAVENÉ PARAMETRY.....	37
5.1 VSTŘIKOVACÍ LIS	37
5.2 TRHACÍ STROJ	40
5.3 OPTICKÝ MIKROSKOP.....	42
5.4 PROGRAM VYHODNOCOVÁNÍ MIKROSKOPICKÝCH SNÍMKŮ	42
5.5 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ A VÝSLEDKY LIKVIDACE MATRICE ÚPLNÝM SPALOVÁNÍM "ASH TEST"	43
5.6 KONFOKÁLNÍ LASEROVÁ MIKROSKOPIE.....	44

6	METODIKY	46
6.1	ANALÝZY	46
6.1.1	<i>Orientace vláken v kompozitu</i>	46
6.1.2	<i>Homogenita kompozitu</i>	46
6.1.3	<i>Termíny pro určitá místa ve výstřiku, které jsou používány v analýzách, experimentech a diskusích</i>	46
6.1.4	<i>Kvalitativních podmínky pro prasknutí výstřiků kompozitních částí z polyamidu vyztužené krátkými skleněnými vlákny</i>	47
6.2	EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM	47
6.2.1	<i>Hodnocení analytických metod nalezených v literatuře</i>	47
6.2.2	<i>Experiment 1: Zkouška tahem</i>	49
6.2.3	<i>Experiment 2: Plastografie</i>	52
6.2.4	<i>Experiment 2a</i>	58
6.2.5	<i>Experiment 2b: Měření orientace vláken v různých řezech výstřiku a výpočet lokálních hodnot efektivity natočení vláken (PENV)</i>	59
6.2.6	<i>Experiment 3: Likvidace matrice úplným spalováním („ash test“)</i>	60
6.2.7	<i>Experiment 4: Konfokální laserová mikroskopie</i>	63
6.3	EXPERIMENTÁLNÍ METODY, KTERÉ NEBYLY VYBRANÉ	64
6.3.1	<i>Likvidace matrice pomocí rozpouštědel</i>	64
6.3.2	<i>SEM a CT</i>	64
6.3.3	<i>Měření tepelné roztažnosti</i>	65
6.3.4	<i>Rentgenová refraktometrie</i>	65
6.3.5	<i>Ultrazvukový dvojloň</i>	65
6.3.6	<i>Měření na mikrovlnách (lomu a útlumu)</i>	65
6.4	VÝPOČTY	66
6.4.1	<i>Výpočet pohyblivosti vláken v kompozitu</i>	66
6.4.2	<i>Vývoj koeficientu pro statistické vyhodnocení orientace (natočení vláken)</i>	66
6.4.3	<i>Numerická simulace</i>	67
7	VÝSLEDKY A DISKUSE VÝSLEDKŮ	69
7.1	VÝSLEDKY EXPERIMENTU 1: ZKOUŠKA TAHEM	70
7.2	DISKUSE VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU 1: ZKOUŠKA TAHEM	72
7.3	VÝSLEDKY EXPERIMENTU 2: PLASTOGRAFIE	73
7.3.1	<i>Výsledky experimentu 2a:</i>	81
7.3.2	<i>Diskuse výsledků experimentu 2a:</i>	81
7.3.3	<i>Výsledky experimentu 2b:</i>	81
7.3.4	<i>Diskuse výsledků experimentu 2b</i>	83
7.4	VÝSLEDKY EXPERIMENTU 3: ASH TEST	84
7.5	DISKUSE VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU 3: ASH TEST	86
7.6	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU 3 PRO STANOVENÍ ODCHYLEK VE SMĚRU TOKU	86
7.7	VÝSLEDKY EXPERIMENTU 4: KONFOKÁLNÍ LASEROVÁ MIKROSKOPIE	87
7.8	DISKUSE VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU 4	89
7.9	VÝSLEDKY NUMERICKÉ SIMULACE	90
7.10	DISKUSE VÝSLEDKU NUMERICKÉ SIMULACE	91
8	ZÁVĚREČNÁ DISKUSE K VÝSLEDKŮM	92
9	DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ POSTUP	93
10	ZÁVĚR	94
10.1	ZÁVĚRY PODLE CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	94
10.2	PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE PRO PRAXI	94
10.3	PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE PRO VĚDU	95
11	SEZNAM PUŽITÝCH LITERÁRNÍCH ZDROJŮ	96
12	PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA SOUVISEJÍCÍ S DISERTAČNÍ PRACÍ	101
13	SEZNAM OBRÁZKŮ	102
14	SEZNAM TABULEK	105

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam
AR	míra natočení vlákna (Aspect Ratio)
CT	rentgenová mikro tomografie (Computer Tomography)
DSV	dlouhá skleněná vlákna
EP	epoxidové pryskyřice
ENV	efektivita natočení vláken
PENV	poměrná efektivita natočení vláken
FDM	metoda konečných diferencí (Finite Difference Method)
FTE	diferenciálně-algebraická rovnice podle Folgara a Tuckera
HDPE	polyetylen s vysokou hustotou (High Density Polyethylene)
HDT	stanovení teploty průhybu plastů při zatížení (Heat Deflection Temperature)
KSV	krátká skleněná vlákna
MKP	metoda konečných prvků
LDPE	polyetylen s nízkou hustotou (Low Density Polyethylene)
PA	polyamid
PA-GF 30	polyamid vyztužený krátkými skleněnými vlákny (30 hmotnostních %) (polyamide short Glass Fibre reinforced (30 weight %))
PP	polypropylen
SEM	řádkovací elektronová mikroskopie (Scanning Electron Microscope)
TKSV	termoplast vyztužený krátkými skleněnými vlákny
TPU	termoplastický polyuretan
UMI	ústav materiálového inženýrství
ÚST	ústav strojírenské technologie
UP	polyesterové pryskyřice (Unsaturated Polyester)

1 ÚVOD

Termoplastickým kompozitům je věnována stále vyšší pozornost v dopravních, zejména automobilových a leteckých, vojenských, námořních a sportovních aplikacích. Použití termoplastů vyztužených krátkými skleněnými vlákny (TKSV) stále roste, a stále častěji nahrazují kovové nebo termosetové kompozitní díly v určitých nosných aplikacích a konstrukčních prvcích. Není proto překvapením, že vyztužené polyamidy (vyztužené vlákny a minerály) mezitím tvoří 41 % tržního podílu celkové výroby polyamidů [1].

Hlavními vlastnostmi polyamidů vyztužených skleněnými vlákny jsou: velmi vysoká tuhost, vysoká mechanická pevnost, vysoký stupeň tvrdosti a houževnatosti a rovněž vysoká mez tečení. Mají rovněž velmi vysokou rozměrovou stabilitu, dobrou únavovou pevnost a výborné vlastnosti z hlediska mechanického tlumení [2].

Na následujících snímcích na obrázku č. 1 [3] jsou znázorněny příklady dílů a součástí používaných v automobilovém průmyslu. Tyto díly jsou vyrobeny z polyamidů vyztuženými skleněnými vlákny. Jako příklad lze uvést alespoň některé z nich: olejové vany, různé kryty, moduly a pouzdra, pedály, potrubí, rukojeti dveří, zrcátka a mnoho dalších komponent.



a) Vzduchový a olejový sací modul



b) Olejová vana



c) Kryt olejového filtru



d) Olejový senzor



e) Rukojeť dveří



f) Podpěra momentové tyče



g) Vedení řetězu pro pohon ventilů automobilového motoru



h) Rozdělovač pro horké kapaliny

Obr. 1 – Příklady použití termoplastů vyztužených krátkými skleněnými vlákny (TKSV) [3]

Jak ukazují tyto příklady, termoplasty vyztužené krátkými skleněnými vlákny (TKSV) se používají také pro součásti motoru, protože díky vyztužení minerálními, zejména skleněnými vlákny, se termoplast stává velmi odolný vůči teplotám.

Další možnou aplikací TKSv v automobilovém průmyslu jsou lehké součásti v hybridní karoserii (ocel a TKSv). Zde však nastává problém, jak spojit v hybridní karoserii efektivně a bezpečně plastovou součást s dalšími kovovými složkami. Pro tento účel byly vyvinuty speciální spojovací prvky [4]. Navzdory vývoji spojovacího prvku se TKSv v karoserii vyskytuje jen zřídka. V současné době se používají konstrukce z různých druhů oceli, protože součásti lze snadněji spojovat.

Pozoruhodná aplikace TKSv je používána ve střelných zbraních. Zde byly použity vysoce kvalitní speciální typy polyamidu se skleněnými vlákny: PA12+GF20; PA66/PPA+GF50 [8]. Plasty a kompozity se staly nedílnou součástí palných zbraní, ale nelze je použít na všechny části zbraně. Z toho důvodu je kov stále nenahraditelnou složkou pro výrobu zbraní, hlavně při výrobě hlavní, závěrů a systémů automatické střelby. Na těchto komponentech při výstřelu působí veličiny, jako jsou tlak, teplota a rázy, kterým je daný materiál intenzivně vystaven.

2 SRHNUTÍ POZNATKU

2.1 Lomová mechanika výstřiku

2.1.1 Čtyři mechanismy lomu kompozitu

Koncept lineárně elastické lomové mechaniky se obvykle používá k popisu a výpočtu lomových procesů [6] [7]. Toto zohledňuje energii potřebnou k šíření trhliny před špičkou zářezu v homogenním materiálu.

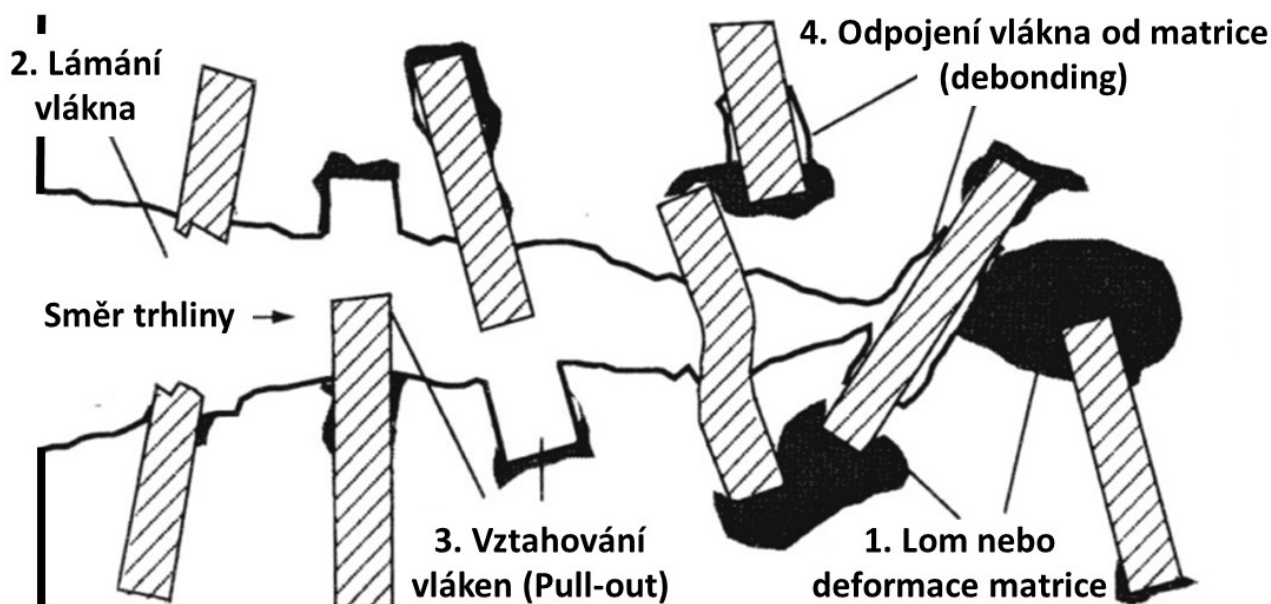
V případě plastů vyztužených vlákny však tento koncept není dostačující, protože existuje několik různých mikro-mechanických příčin rozlomení.

Plasty vyztužené skleněnými vlákny vykazují chování při přetržení při příliš vysokém zatížení, při kterém je vazba mezi dvěma fázemi porušena různými způsoby.

Publikace [8] se komplexně zabývá lomovou mechanikou kompozitů. Byly identifikovány čtyři různé mechanismy pro vznik a šíření trhlin ve výstřiku:

1. Lom nebo deformace matrice (Matrix fracture):
materiál matrice podléhá zatížení, láme se nebo se deformuje.
2. Lámání vlákna (Fibre fracture):
vlákno, které je pevnější než matrice, ale také křehčí, se láme
3. Vztahování vláken (Pull-out):
konec vlákna se oddělí od matrice a vyčnívá z povrchu lomu
4. Odpojení vlákna od matrice (De-bonding):
vlákno se odděluje od matrice podél povrchu vlákna

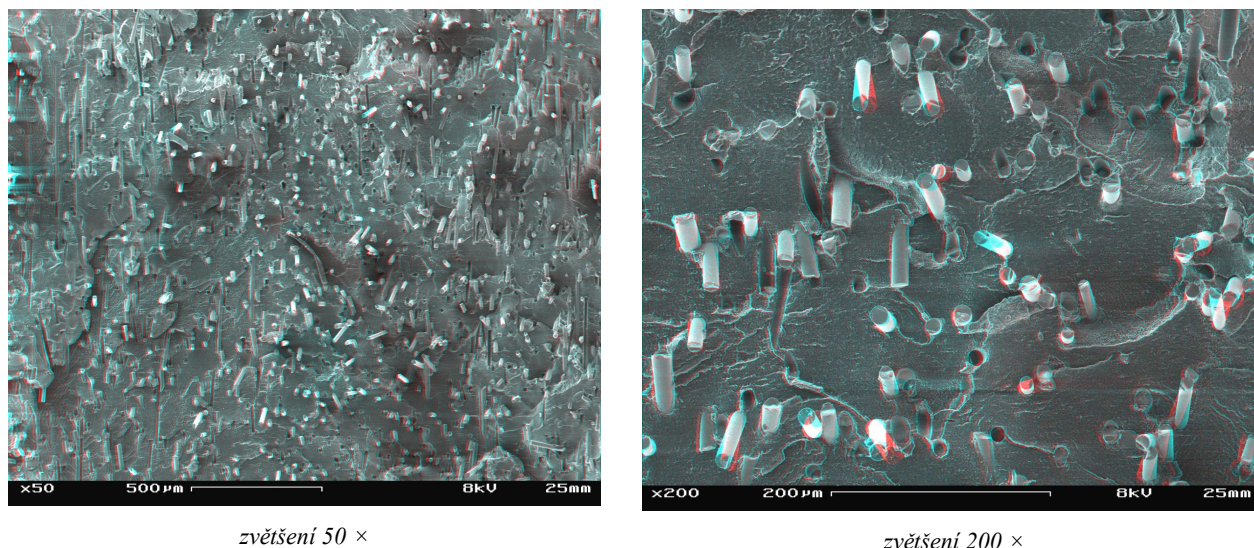
Obr. 2 ukazuje schematické znázornění uvedených mechanismů porušení.



Obr. 2 - Schematické znázornění čtyř mechanismů, které mohou vést k prasknutí kompozitu [8]

2.1.2 Více informací o mechanismu vytahování vláken

Důležitým mechanismem poruchy termoplastů vyztužených krátkými skleněnými vlákny je tzv. „pull-out-efekt“, tj. vytažení vláken na povrchu lomu [9], viz Obr. 9. V literatuře [10] jsou vlákna s poměrem menším než 10: 1 považována za (v tomto smyslu) nebezpečná. Díky malému poměru délky k průměru není zatížení přenášeno vláknem, ale vlákno může být vytaženo z matrice.



zvětšení 50 ×

zvětšení 200 ×

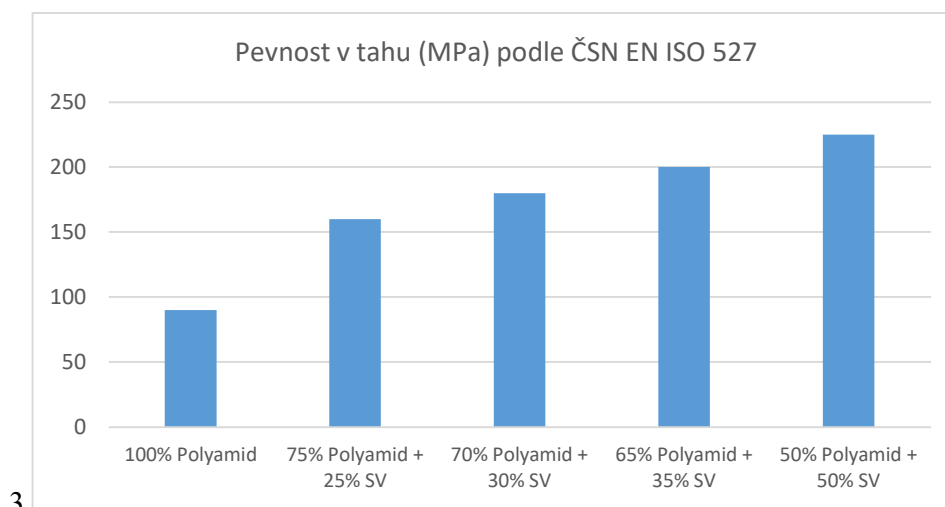
Obr. 3 - Vytažení vláken na povrchu lomu „Pull-out-efekt“

Snímky pořízené rádkovací elektronovou mikroskopií (SEM - scanning electron microscope) ve stereoskopickém zobrazení [11]

2.2 Mechanické vlastnosti výstřiku

2.2.1 Závislost pevnosti na podílu vláknin

Obr. 4 ukazuje vliv podílu přidaného skleněného vlákna na pevnost kompozitu. (Podíly skleněného vlákna jsou uvedeny v hmotnostních procentech).



3

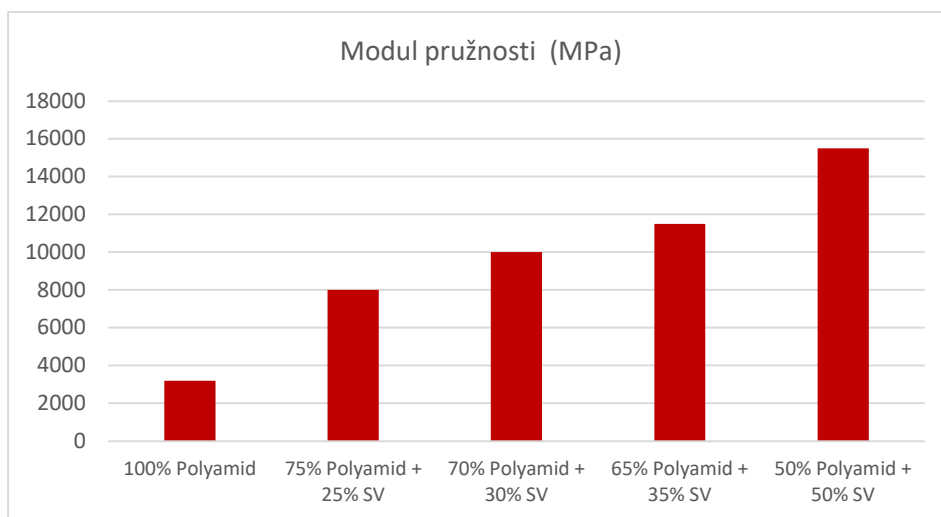
Obr. 4 - Pevnost v tahu polyamidu¹ pro různá složení kompozitů vyztužených skleněnými vlákny [3]

Přesné informace o vztahu mezi hmotnostním obsahem vláken a modulem pružnosti, mezí kluzu, pevností v tahu, rázovou houževnatostí Izod a houževnatostí jsou uvedeny v literatuře, např.: [12].

2.2.2 Závislost pružnosti na podílu vláknin

Obr. 5 [3] ukazuje vliv podílu přidaného skleněného vlákna na modul pružnosti kompozitu.

¹ Za standardních podmínek prostředí, tj. za normální vlhkosti vzduchu



Obr. 5 – Modul pružnosti pro různá složení kompozitů vyztužených skleněnými vlákny [3]

2.3 Tepelné vlastnosti výstřiku

PA-GF má vynikající vlastnosti při tepelném namáhání. V následujících podkapitolách bude ukázáno použití tepelné stability a modulu pružnosti při vyšších teplotách.

2.3.1 Tepelná stabilita

Rozměrová stabilita při vyšších teplotách je důležitá v mnoha technických aplikacích, např. v motorovém prostoru, v elektrických strojích nebo v součástech chladicích okruhů.

Tepelná stabilita se měří pomocí metody HDT [13].

Údaje se liší, pravděpodobně také z důvodu různých typů polyamidů, různých naměřených hodnot. Čistý polyamid je odolný vůči vysokému mechanickému zatížení až do 64 °C [14]. S vyztužením 30 % krátkých skleněných vláken se hodnota zvyšuje nejméně o 65 °C [15].

Tím je zcela jasné, proč se PA-GF používá ve výše uvedených oblastech.

2.3.2 Pružnost při vyšších teplotách

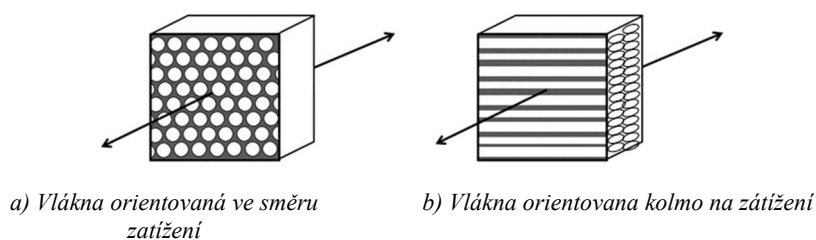
Tepelná degradace čistého vyztuženého polyamidu byla zkoumána např. v [16]. Čistý polyamid 6.6 vykázal 20 % nárůst modulu pružnosti v ohybu během prvního období stárnutí, což bylo přičítáno kombinovanému štěpení řetězce a síťování reakce. Poté po 1 000 hodinách bylo zjištěno snížení vlastnosti, které jsou připisovány převládajícímu mechanismu štěpení řetězce; tepelné zatížení dosahuje po 5 000 hodinách až do 5 %.

V případě vyztuženého polyamidu 6.6 se vlastnosti v ohybu projeví až po 2 000 h expozici (nárůst o 6,5 %).

2.4 Účinky orientace vláken na mechanické vlastnosti výstřiku

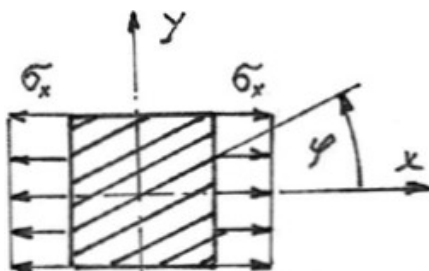
V této části je uvažována nosnost vláken v závislosti na jejich orientaci. Orientace vláken je velmi důležitá pro pevnost kompozitu. Vlastnosti výstřiků ve směru toku matrice, její taveniny při zpracování jsou v rozhodující míře ovlivněny vyztužujícími vlákny, zatímco ve směru kolmém na tok taveniny jsou ovlivněny použitou maticí [10].

To je znázorněno na schématu (Obr. 6). Vlákna v podélném směru tahového zatížení (Obr. 6 a) absorbují zatížení a působí jako výtuž. Naopak vlákna, která jsou kolmá na tahové zatížení, nemají žádnou nosnou funkci (Obr. 6 b). Samotná matrice musí absorbovat sílu mezi příčnými vlákny. V takovém případě mohou mechanismy selhání fungovat bez překážek.



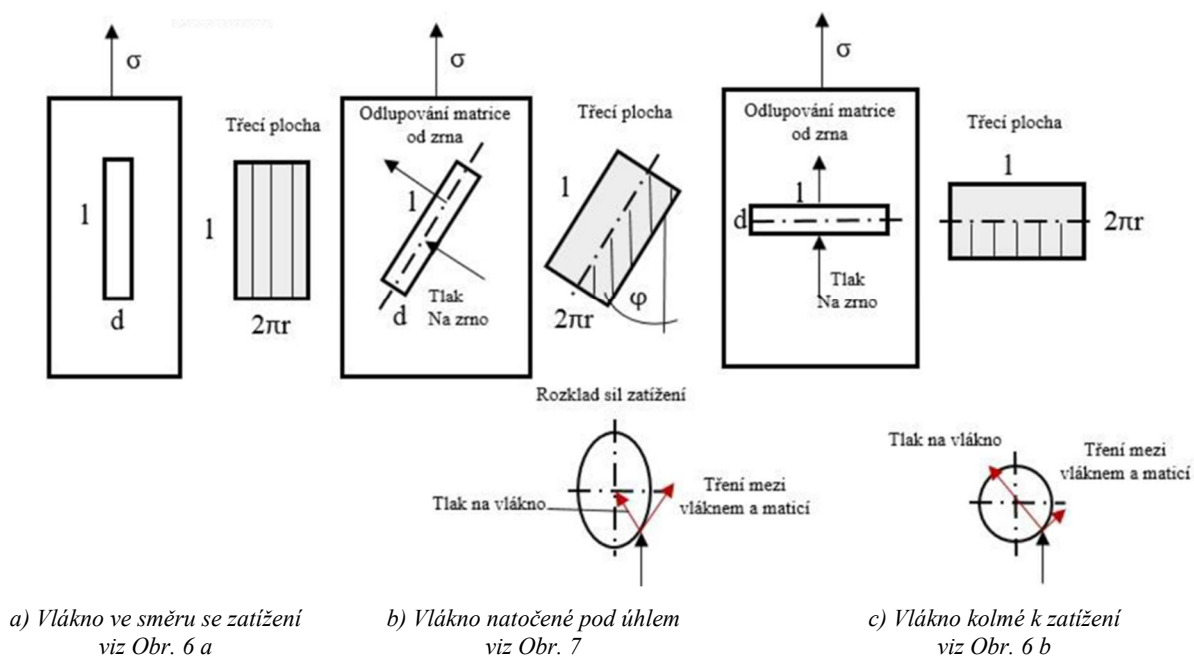
Obr. 6 - Průřez zatíženého elementu

V mnoha případech však nebude vlákno vyrovnáno (orientováno) ani ve směru zatížení, ani kolmo k němu (Obr. 7).



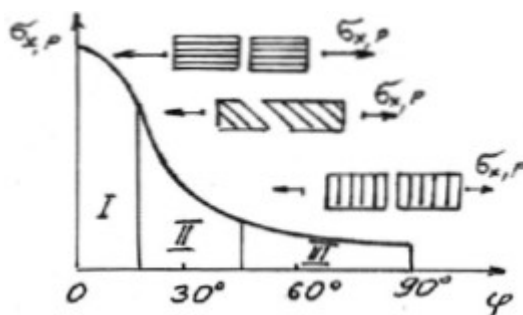
Obr. 7 - Zatížený element kompozitu - příklad $\varphi=30^\circ$ [17]

Následující Obr. 8 ilustruje orientaci vláken, působení síly na vlákno a ukazuje řez vláknem, ve směru, kterým působí silové zatížení.



Obr. 8 - Naznačení teoretických předpokladů přenosu síly pro různé natočení vláken

Z výše uvedeného je možné odhadnout mez napětí, do kterého úhlu φ může být zatížena součástka s různou orientací vláken.



Obr. 9 - Závislost mezního napětí $\sigma_{x,p}$ na poloze hlavního směru 1, určené úhlem φ [17]

Tato úvaha ukazuje jasně, jak silný je vliv orientace vláken na pevnost součásti. K zajištění kvality takové součásti je nutné porozumět a kontrolovat mechanismy během procesu vstřikování. Disertační práce věnuje právě této problematice.

2.5 Analytické modely tokového chování taveniny vyztužených plastů

Znalost vlastností taveniny, toku a formy lze použít k analytické předpovědi možného chování taveniny. Je třeba zvážit jevy, které by mohly být relevantní pro orientaci vláken v matrici.

2.5.1 Smykový tok viskózní taveniny ve štěrbině

V následujícím textu je představen model, který popisuje tokové chování plastových ohřivačů v jednoduché nekonečné mezeře. Používá se k pochopení toho, jak se vyvíjí smyková rychlost v tavenině kolmo ke stěně formy.

Jedná se o proudění mezi dvěma rovnoběžnými nepohyblivými deskami. Pro zjednodušení lze zvolit počátek souřadného systému uprostřed štěrbině. Osa z je umístěna do osy toku. Výška štěrbině ve směru osy y je označena jako H , šířka ve směru osy x je označena jako W a délka ve směru osy z je označena jako L (viz Obr. 10).

Předpoklady:

- $H \ll W; L$
- Tekutina proudí jen ve směru osy z

$$u_x = u_y = 0 \tag{2.1}$$

kde:

u_x rychlost ve směru x

u_y rychlost ve směru y

u_z rychlost ve směru z

kde:

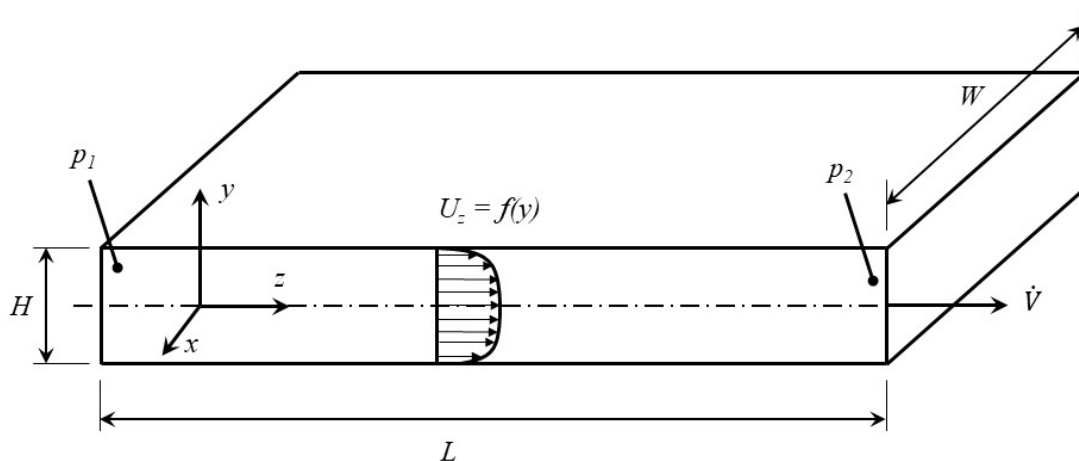
$$u_z \ll 0 = f(y) \tag{2.2}$$

- Jedná se o stacionární proudění – rychlost se s časem nemění

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = 0 \tag{2.3}$$

a

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = 0 \tag{2.4}$$



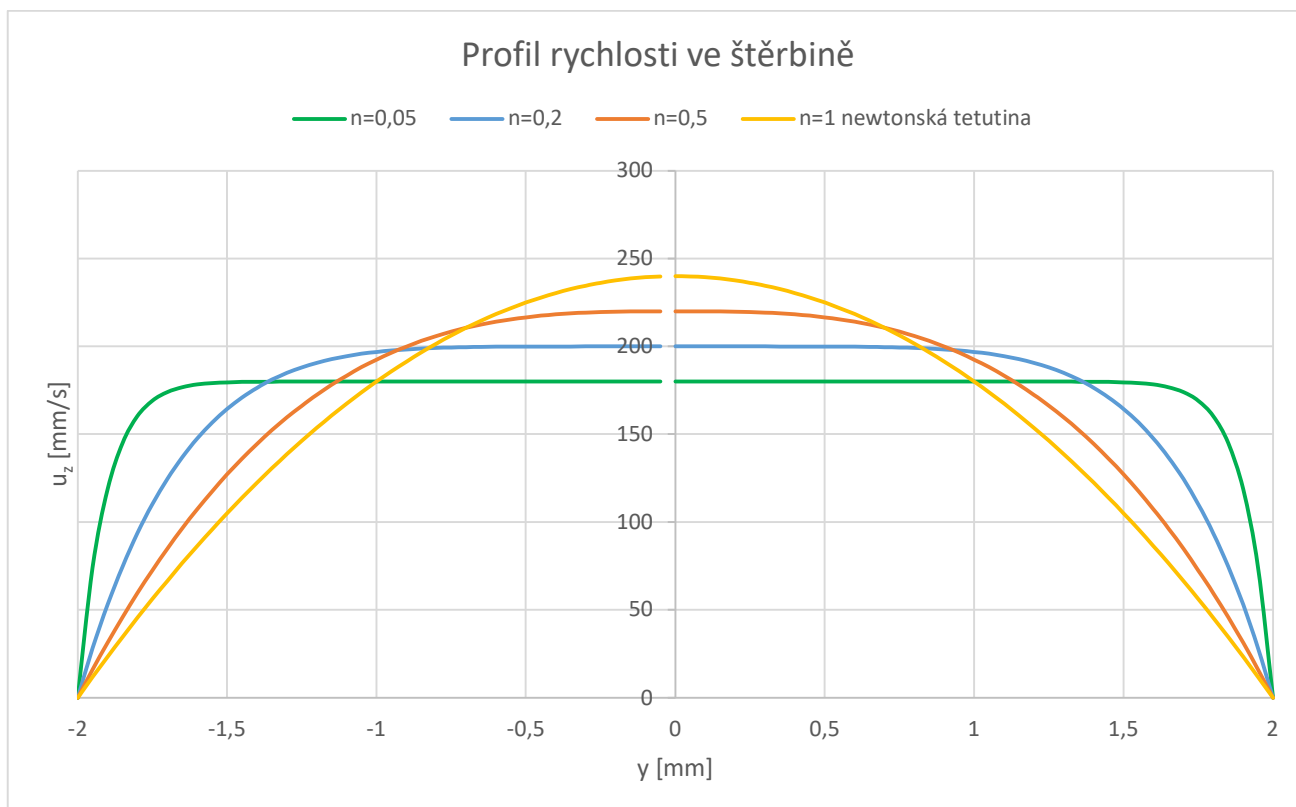
Obr. 10 - Znáznornění štěrbině s vyznačeným souřadným systémem

Pro tuto jednoduchou geometrii existují analytická řešení fluidních mechanických diferenciálních rovnic: bilance hmotnosti, bilance hybnosti a konstitutivní rovnice pro mocninovou kapalinu:

$$u_z = \left(-\frac{\Delta p}{KL}\right)^{1-n} \frac{n}{n+1} \left(\left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{n+1}{n}} - y^{\frac{n+1}{n}}\right) \tag{2.5}$$

kde:

- u_z rychlost ve směru z [-]
- n Index toku [-]
- $\frac{\Delta p}{L}$ tlaková ztráta na 1m délky [-]
- K koeficient konzistence [Pa sⁿ]
- H výška štěrbině ve směru osy y [-]

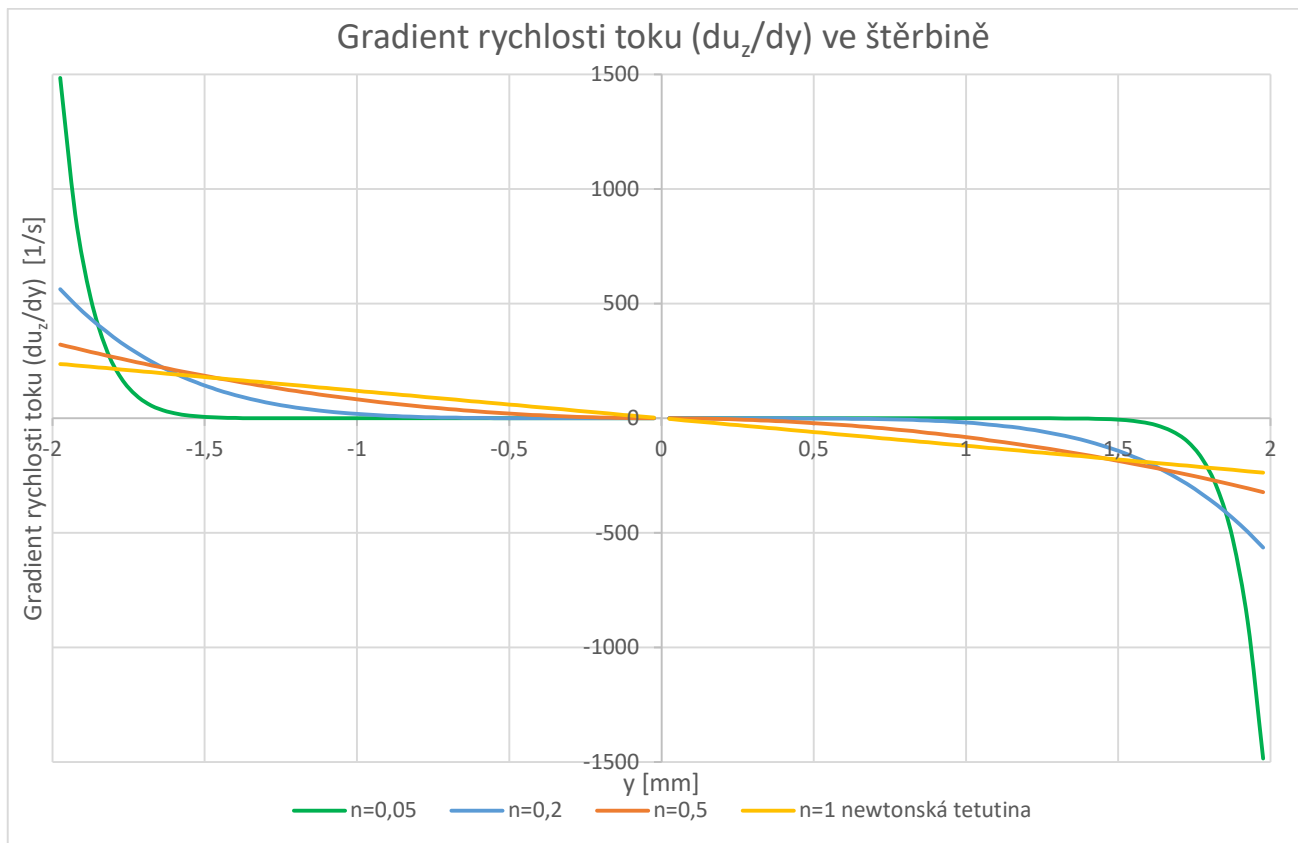


Obr. 11 - Profil rychlosti toku ve štěrbině pro různé indexy toku n

Obr. 11 ukazuje rychlostní profil pro Newtonovu tekutinu ($n = 1$) a pseudoplastické tekutiny ($n < 1$).

Rychlostní profil newtonovské tekutiny ($n = 1$) je parabolický. Maximální pseudoplastická tekutina ($n = 0,05$) má tvar bloku: tekutina proudí stejnou rychlostí, s výjimkou okrajů. Kapalina se drží na stěně, uprostřed proudí maximální rychlostí.

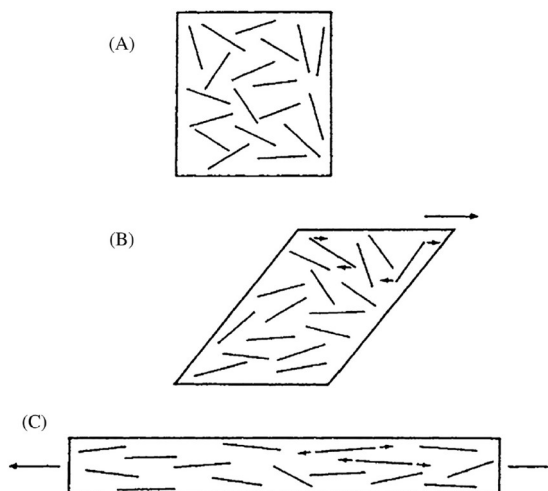
Gradient rychlosti toku du_z/dy , který je také známý jako smyková rychlost $\dot{\gamma}$, je znázorněn na obrázce 12. Tento gradient rychlostí toku znamená, že kapalina je vystavena silnému smykovému napětí. Čím více tekutina má pseudoplastický charakter, tím větší je gradient rychlosti a smykové napětí.



Obr. 12 - Profil smykové rychlosti pro různé indexy toku n

2.5.2 Vliv smykového toku na orientaci vláken a orientace vláken blízko stěny formy

Jak již bylo ukázáno (viz Obr. 13), je tření na stěně nejintenzivnější, kde je tavenina posunuta proti sobě. Pokud je tavenina naplněna vlákny, vlákna se vyrovnávají ve směru toku (viz Obr. 13 A-C).



Obr. 13 - Schématický diagram změn v orientaci vláken během toku: (A) počáteční náhodné rozdělení; (B) rotace během smykového toku; (C) zarovnání během elongačního toku [18] (směr toku je naznačen šipkami)

2.5.3 Expanzní tok taveniny na celém toku („fontánový tok“)

Matematické modely uvedené v kapitole 4.7 se úspěšně používají k výpočtu tlakových ztrát a maximálních smykových napětí během plnění formy.

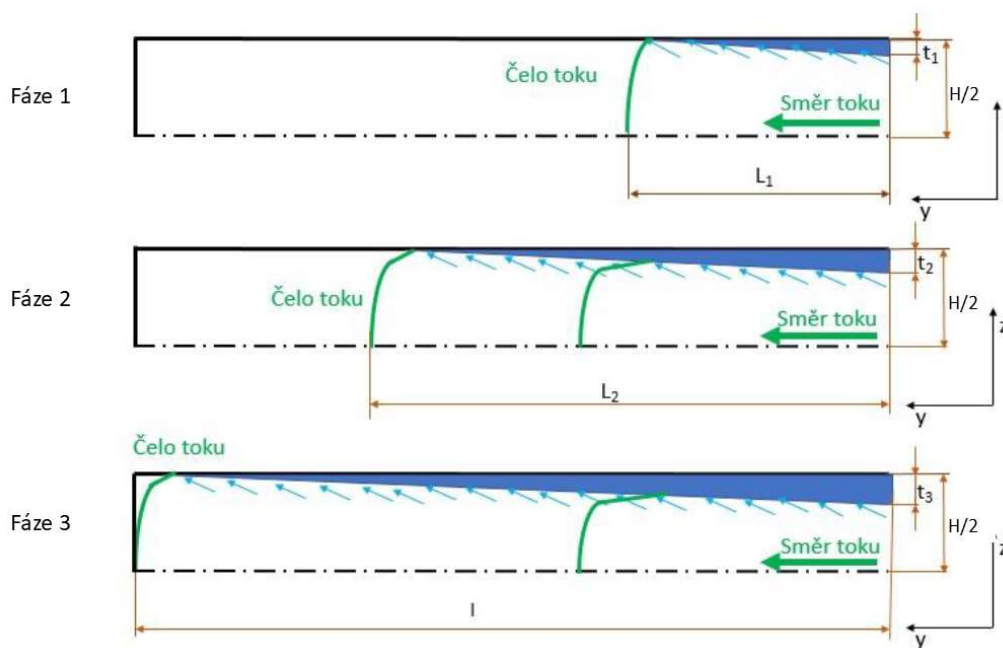
Neodráží však skutečné chování toku, zejména čele taveniny.

Obr. 14 schematicky ukazuje, chování taveniny po vstupu do kavity. Tok má směr, který distribuuje taveninu ze středu do stran a tavenina teče lokálně a jen krátce do strany až ke stěně formy. Tento lokální tok ve směru z je důležitý pro orientaci vláken, ale bohužel není uvažován ve všech matematických modelech (např. 4.7.1.2).

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.



Obr. 14 - Fontánový efekt u vstupu taveniny do kavity



Obr. 15 - Trojrozměrný tok na přední straně toku a ztuhlá vrstva na stěně formy [19]

Tavenina, která se vynoří uprostřed toku, se natahuje na cestě ke stěně štěrbině (expanzní tok).

2.5.4 Ztuhnutí taveniny v okrajových vrstvách

Tento jev závisí na teplotě taveniny a teplotě stěny formy, zejména když teplota stěny formy je nižší než teplota taveniny (viz Obr. 15 štěrbině, tloušťka H).

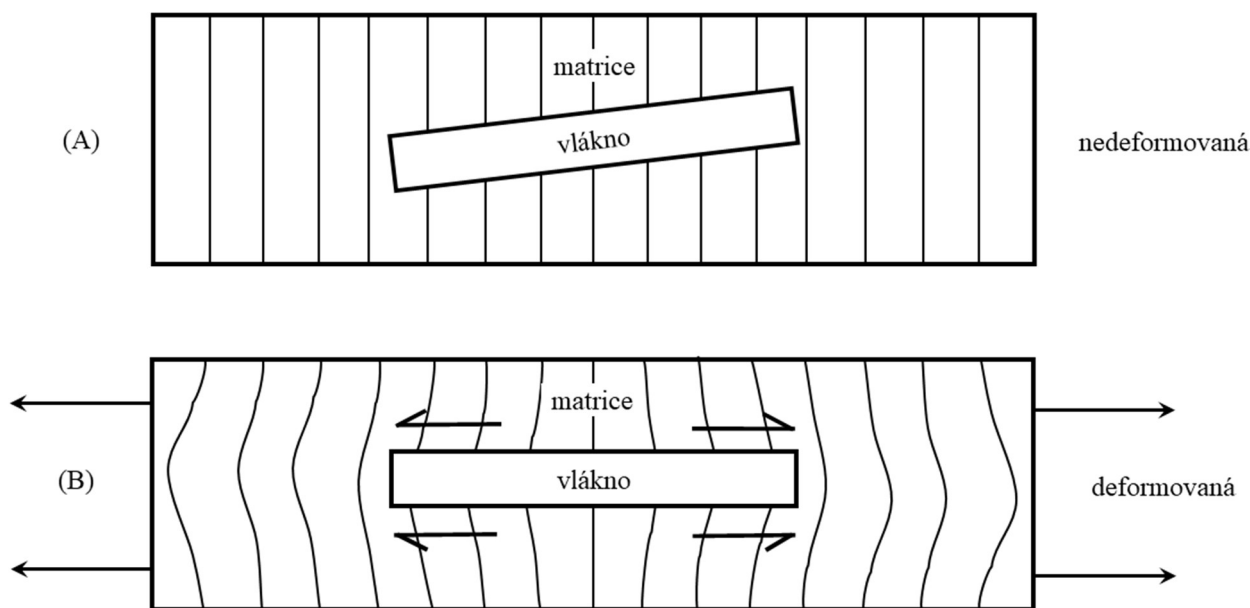
Předpokladem je, že k ovlivnění toku dochází ihned po začátku (fáze 1, L_1) vyplňování formy. Místem na začátku formy projde všechna tavenina vyplňující zbytek formy (ve fázi 1 do fáze 3). Ztuhlá vrstva na stěně dále ovlivňuje vrstvy pod sebou, tím, jak se forma plní (t_1 do t_3). Ztuhlý plast na stěnách formy zmenšuje průřez kanálu ($H/2-t_3$), čímž zvyšuje rychlost ve středu taveniny.

Je nesporné, že k tomuto efektu dochází a je závislý na následujících parametrech procesu:

- Rozdíl mezi teplotou taveniny a teplotou stěny formy,
- Rychlost vstřikování,
- Tepelná kapacita taveniny,
- Tepelná vodivost pevného plastu,
- Chlazení a vodivost formy.

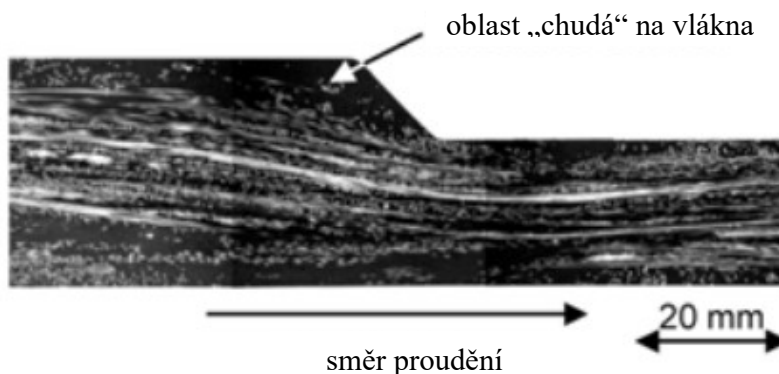
2.5.5 Vliv extenzního toku na orientaci vláken a orientace vláken v případě, kdy je zmenšen průřez proudění

Publikace [20] vysvětluje procesy v extenzním toku. V expanzním proudu se tavenina táhne do délky, ale vlákno, které má vysoký modul v tahu, se takto nechová. Vzhledem k tomu, že matrice je natažena na délku působí expanzní tok (šipky na obrázku 16 B) na každou stranu vlákna, tahem vlákna z obou stran a vyrovnáním ve směru toku vlákna. To je znázorněno v Obr. 16.



Obr. 16 – Analytický model chování orientovaného vlákna v expanzním toku

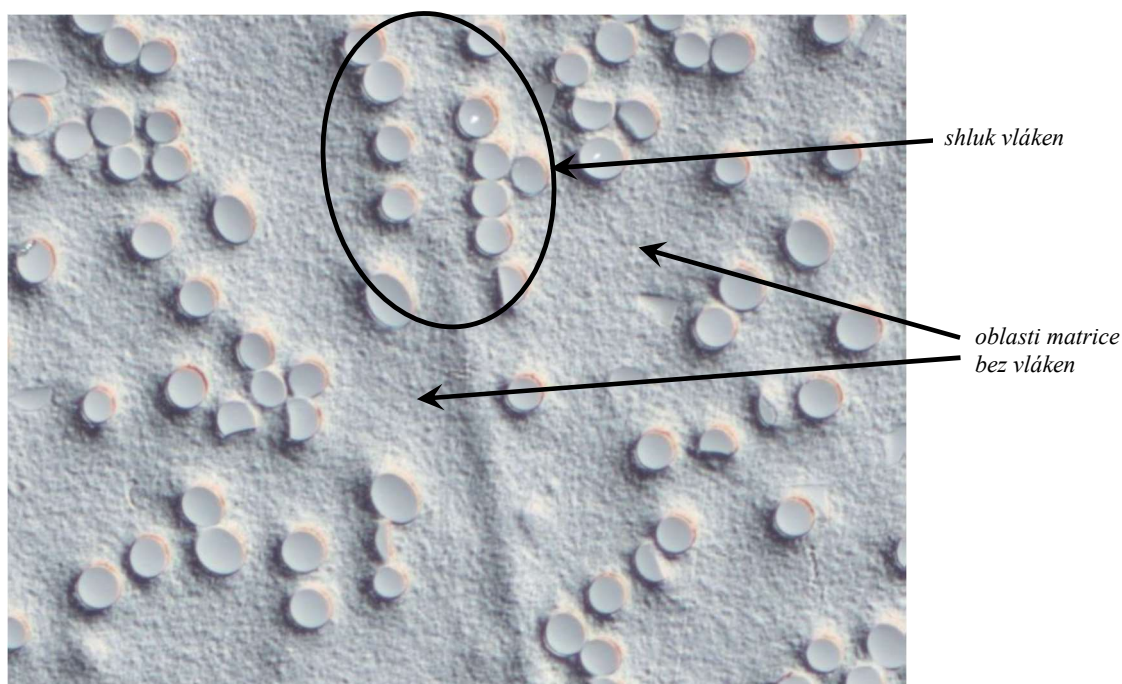
V publikaci o vytlačování plastů vyztužených vlákny [21] byla experimentálně stanovena segregace vláken při přechodu z většího na menší průřez.



Obr. 17 - segregace vláken při přechodu z většího na menší průřez [21]

2.5.6 Narušení homogenity shlukováním vláken

V experimentu uvedeném se prokázal, že v tavenině existují účinky shlukování vláken. Obr. 18 ukazuje takovou oblast.



Obr. 18 - Oblast lokalizace vláken kolem zpráhenného vlákna – příčný řez materiálem PA-GF

Modelový přístup Richarda Kerekese [22] popisuje tvorbu shluků nebo vloček. Pro tento účel je řídicí objem definován jako koule, ve které lze předem určit počet kontaktů vláken a tvorbu shluků.

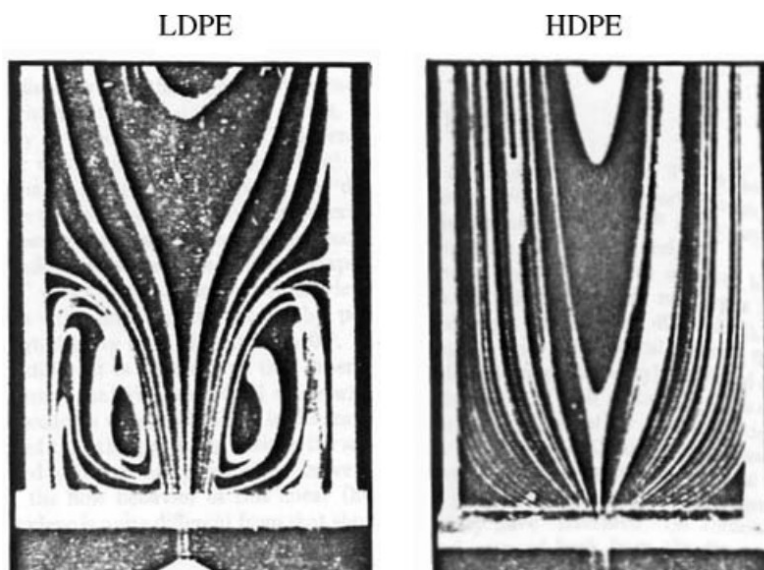
Matematický model byl původně vyvinut pro celulózová vlákna. Není jasné, do jaké míry byly do vzorců začleněny vlastnosti specifické pro danou látku. Model je atraktivní pro aplikaci na skleněná vlákna v tavenině plastů, protože tyto jevy zřejmě existují.

2.5.7 Segregace prostřednictvím tvorby vírů

Taveniny plastů vždy proudí laminárním způsobem za normálních podmínek zpracování. Turbulentní proudění se vyskytuje pouze ve výjimečných případech, například při volném proudu, který nekontrolovaně proudí do široce otevřené dutiny.

Vír je turbulentní proudění. To vyvolává otázku, zda taveniny plastů netvoří také víry, pokud geometrie průtokového kanálu jejich tvorbu nepodporuje.

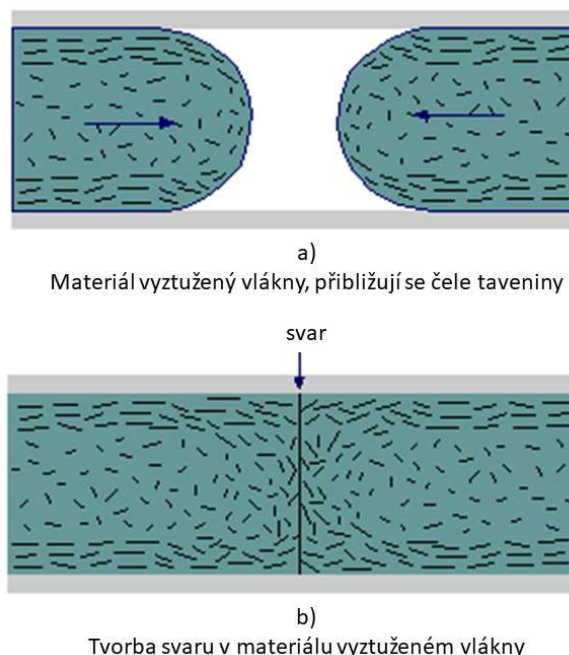
V [23] byla tavenina LDPE a HDPE vstřikována úzkou tryskou. Obr. 19 ukazuje velký vír u LDPE ve srovnání s laminárním tokem u HDPE.



Obr. 19 - Turbulentní tok taveniny LDPE protékající úzkou tryskou, za kterou se její průměr 20x rozšíří [23]

2.5.8 Vliv svarů na orientaci vláken

Svarům obvykle nelze u vstříkovaných výstřiků zabránit. U neplněného materiálu jsou často kritické. Obr. 20 [23] schematicky ukazuje, proč může být svarový šev v plastu vyztuženém vlákny obzvláště problematický kvůli nehomogennímu vyrovnání vláken.



Obr. 20 - Schematické znázornění vytvoření svarové linie a orientace vláken

Tvorba svarů v nevyztužených termoplastech je známý fenomén. V případě termoplastů vyztužených vlákny přibližují se průtočná čela, a jejich vlákna jsou zarovnána jinak (Obr. 20 a). Pokud se tyto průtočná čela setkají, nespojí se dobře, protože orientace vláken je odlišná (Obr. 20 b).

2.5.9 Volný proud taveniny u zvětšeného průřezu proudění

Tento jev je opakem výše uvedeného fenoménu expanzního toku. Vyplývá ze silného zpomalení toku, který je způsoben rozšířením průřezu kavity.

Pokud tavenina vstupuje do dutiny (z užšího průřezu do širšího průřezu), tavenina nemusí přilnout ke stěně formy, jak je uvedeno v kapitole 2.6.3, takže se ztratí adheze [24]. V těchto případech vstupuje tavenina do většího objemu bez vedení, nemůže vytvářet rovnoměrný tok a teče náhodně.

2.5.10 Poškození vláken v PA-GF během výroby materiálu a zpracování

Studie [25] ukazuje, že během procesu vstříkování je poškozeno 5 až 60 hmot. % vláken. K tomu dochází hlavně při plastifikaci, kdy se neroztavený granulát otírá o válec vstříkovací jednotky.

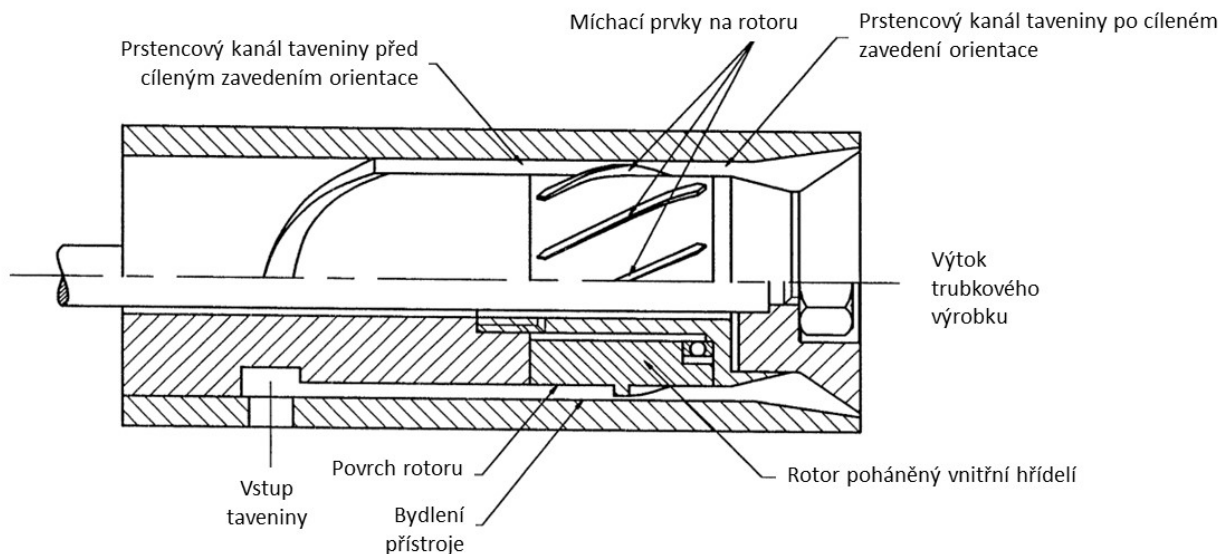
Použití granulátu z recyklovaného plastu by vedlo k dalšímu poškození vláken. Proto se ve většině případů takový materiál nepoužívá.

Pokud pevná fáze suspenze (tavenina PA-GF) není homogenní, významně se tím změní tokové chování. Avšak zohlednění těchto účinků by mělo být velmi obtížné, protože je individuálně závislé na vybavení stroje a parametrech procesu.

2.6 Termoplastické kompozity: cílené zavedení orientace vláken do výrobku

Pokud se tok taveniny termoplastických kompozitních materiálů neprovádí cíleně při zpracování, se vlákna náhodně uspořádají v souladu s tokem taveniny. To představuje riziko s ohledem na různé procesy toku popsané v analytických modelech v kapitole 2.5. Pevnost výrobku je závislá na různých místních koncentracích a směru vláken, ta je ovlivněna např. smykovým tokem (2.5.2), extenzním tokem (2.5.5) a zdrojovým tokem (2.5.3).

Cílem kvalitního zpracování taveniny však musí být ovlivnění orientace vláken v materiálu. Z tohoto důvodu byla konstruována zařízení, která prostřednictvím specifických aktivních mechanických prvků ovlivňuje tok v nástroji a zaručuje tak orientaci v hotovém výrobku. Jedno z těchto zařízení je znázorněno na Obr. 21.

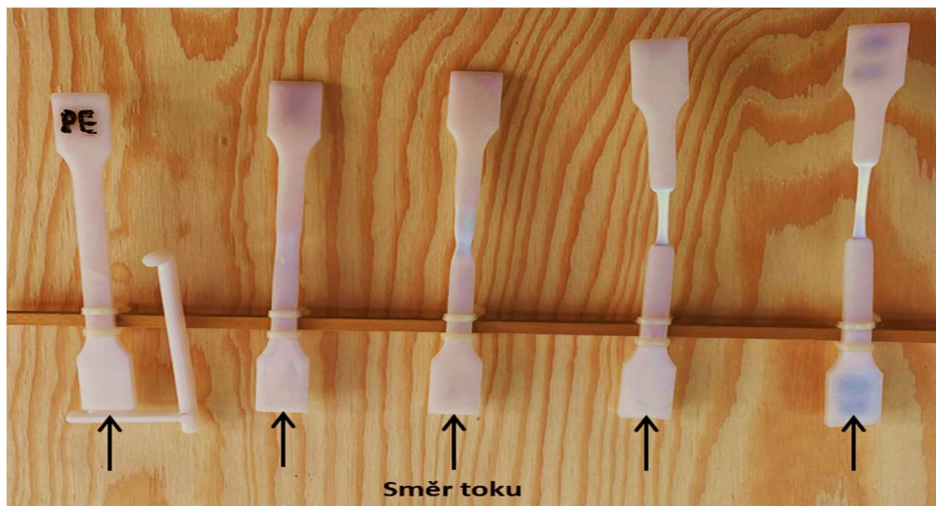


Obr. 21 – Patent: zařízení na neaxiální orientace vláken v trubkovém výrobku z kompozitního materiálu [83]

Znázorněné zařízení umožňuje zavedení tangenciální orientace do trubkových výrobků pomocí jednoho nebo více rotorů.

2.7 Zkouška tahem: symetrická deformace výstřiku z houževnatých plastů (PE, PP)

Předchozí publikace o tahových zkouškách termoplastů ukazují symetrickou tvární lom (tzv. krk) u houževnatých termoplastů, která je uprostřed zkušebních těles [42]. Tažná síla, která je aplikována rovnoměrně z obou stran, vede k deformaci ve středu zkušebního tělesa.



Obr. 22 – Zkouška tahem: symetrická deformace výstřiku z houževnatých plastů (PE, PP)

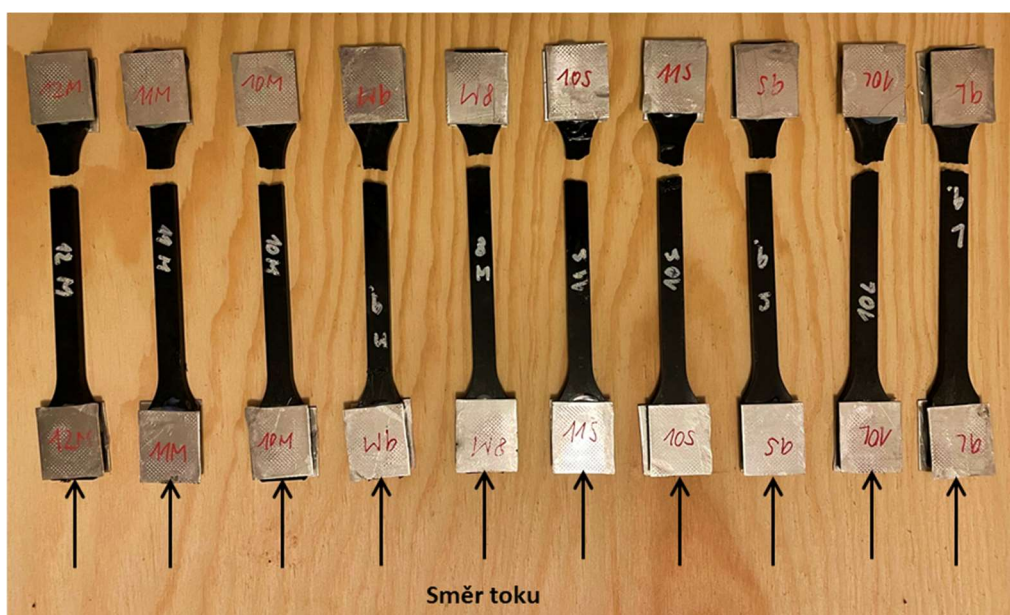
To však není případ termoplastů vyztužených skelnými vlákny. V rámci disertační práce byly provedeny tahové zkoušky s různými plasty za účelem pochopení lomového chování.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Polyamid vyztužený krátkými skelnými vlákny (PA-GF) je křehký materiál, který podléhá křehkému lomu. Zkoušky tahem s tímto materiálem, které byly provedeny v rámci disertační práce, však ukázaly neočekávaný výsledek, který nebyl doložen v předchozí literatuře. Při pohledu ze směru toku taveniny zkušební tělesa vždy na konci úzké části praskla.

Vzhledem k tomu, že tahová síla je i zde aplikována rovnoměrně z obou stran, by se dalo očekávat přerušení na středu nebo na dalších různých místech zkušebních těles. To však není tento případ, jak Obr. 23 ukazuje. K praskání dochází opakovaně na konci úzké části zkušebních těles. To platí pro různé rychlosti tahu a pro zkušební tělesa, která byla vyrobena různými vstřikovacími rychlostmi.

Tento jev (viz Obr. 23) a souvislost s orientací a homogenitou vláken v materiálu je předmětem disertační práce.



Obr. 23 - Zkušební tělesa z materiálu PA-GF, které jsou přerušena mezi segmentem č. 5 a č. 6

Hlavním cílem disertační práce je tedy vysvětlit příčinu praskání výstřiku kompozitu z polyamidu a krátkých skleněných vláken.

Dílčí cíle:

1. Nalezení kvalitativních podmínek pro prasknutí výstřiků kompozitních částí z polyamidu vyztuženého krátkými skleněnými vlákny.
2. Druhý dílčí cíl řešení disertační práce je experimentální analýza stavů výstřiků při nalezených podmínkách prasknutí.
3. Návrh výpočetního postupu pro určení podmínek stavů výstřiků z dílčího cíle 1, které vedou k prasknutí.
4. Určení velikosti významu podmínek z dílčího cíle 1 pro prasknutí kompozitních výstřiků z polyamidu a krátkých skleněných vláken.

Disertační práce v následujících kapitolách ukazuje, že orientace a homogenita vláken v kompozitu má převládající vliv na praskání výstřiku kompozitu z polyamidu a krátkých skleněných vláken.

4 MATERIÁL

4.1 Definice pojmu "kompozit"

Mezinárodní norma ČSN EN ISO 472:2013 „*Plasty – Slovník*“ [N1] definuje kompozit v kontextu plastů :

kompozit

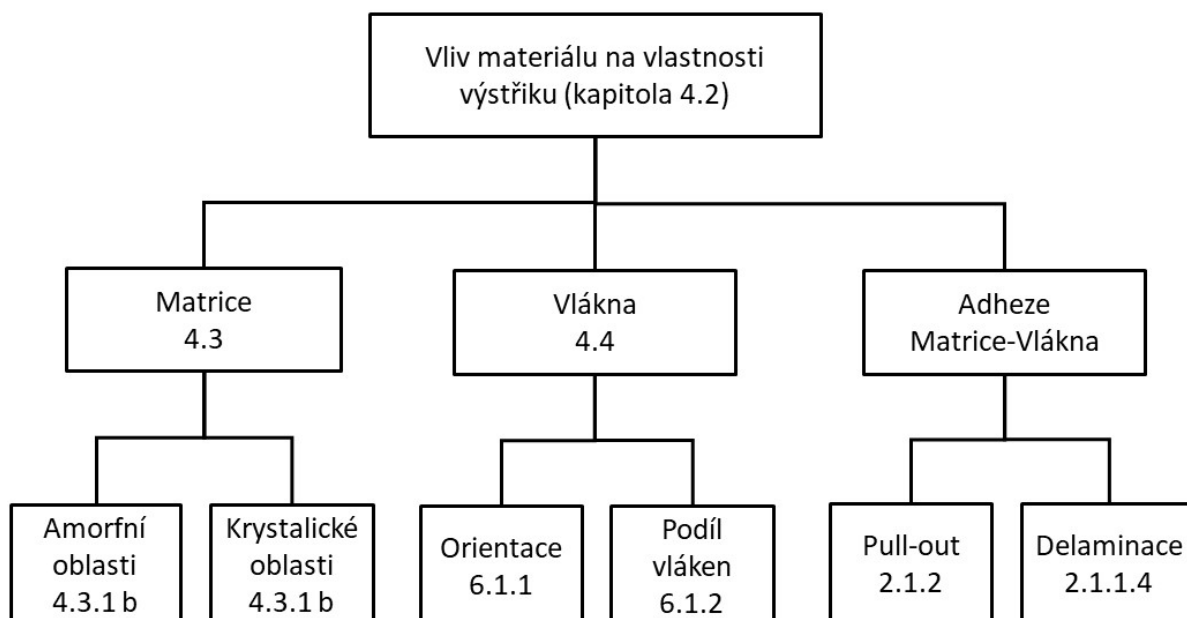
„<vyztužování vlákný> *pevný výrobek složený ze dvou nebo více odlišných fází, které zahrnují pojivo (matrici) a částicový nebo vláknitý materiál*

PŘÍKLAD: Materiál pro tváření obsahující vyztužující vlákna, částicová plniva nebo duté kuličky.

V souladu s výše uvedeným, je materiál, kterému je disertační práce věnována, kompozit z termoplastické matrice a částicového nebo vláknitého materiálu (výztuže).

4.2 Vliv materiálu na vlastnosti výstřiku

Následující schéma na obrázku č. 4 ukazuje různé vlastnosti kompozitu, například semi-krystalického termoplastu vyztuženého vláknou (např. PA-GF), které ovlivňují vlastnosti výstřiku. Následující schéma také poskytuje křížové odkazy na kapitoly disertační práce, kde jsou tyto jednotlivé vlastnosti podrobněji diskutovány. Schéma je tak „průvodcem“ po kapitolách této práce.



Obr. 24 - Vliv materiálu na vlastnosti výstřiku

4.3 Termoplastická matrice

Plasty vyztužené vlákny jsou komplexní materiály, které v praxi musí splňovat vysoké požadavky na mechanické vlastnosti atd. Skupina polyamidů má na trhu vedoucí úlohu.

4.3.1 Polyamidy² (PA)

Existují tři důvody, proč polyamidy hrají důležitou roli jako matrice v plastech vyztužených vlákny:

a) Rozsáhlé pozitivní zkušenosti se vstřikováním nevyztuženého PA.

Od padesátých let 20. století se polyamid stále častěji používal pro technické aplikace. S tímto materiálem bylo dosaženo mnoho pozitivních zkušeností, zejména v automobilovém průmyslu. To bylo pravděpodobně motivací v 90. letech pro výběr tohoto materiálu jako matrici pro nejběžnější technický termoplast.

² Polyamid se také nazývá „nylon“, což je obchodní název společnosti DuPont.

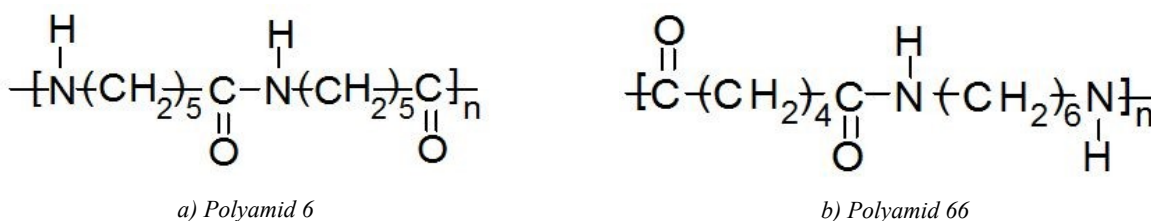
I když se polyamid v minulosti používal pro vlákna a textilie (a stále se používá), podíl, který se používá pro technické aplikace, se neustále zvyšuje: v roce 2011 bylo 77 % spotřeby polyamidu 6 a 66 spotřebováno na technické použití v automobilovém a elektrotechnickém průmyslu [1].

b) Vynikající vlastnosti nevyztužených PA v technických aplikacích:

- Široká škála aplikací při různých teplotách: Protože polyamidy jsou semikrystalické materiály, vyskytují se v rozmezí provozních teplot jako amorfní materiál s krystalitami, tzv. sferolity. V závislosti na materiálu se podíl sferolitů pohybuje mezi 5 % a 100 %. Tvorba krystalů v polyamidu je velmi složitá a závisí na vlhkosti materiálu, obsahu plniva a teplotě. Podrobné informace jsou uvedeny v prezentaci "Polyamidové krystalizační struktury" od Teda Brinka [9]
- Vysoká odolnost proti otěru: vyšší úroveň odolnosti proti opotřebení mechanickým působením. Polyamidy mají nízký koeficient statického a kluzného tření.
- Dobrá tepelná odolnost: speciální druhy nylonu mohou mít teplotu tání téměř 300 °C.
- Dobrá odolnost proti únavě: díky tomu je ideální pro součásti v neustálém cyklickém pohybu, jako jsou ozubená kola.
- Vysoká obrobitelnost: odlévané sochory lze obrobit na různé součásti, které by byly příliš nákladné na odlévání do složitých tvarů.
- Tlumení hluku: PA je velmi účinný tlumič hluku.

POZNÁMKA: I když je polyamid zdaleka nejběžnější matricí, existuje celá řada materiálů, které lze použít jako matrici pro speciální kompozity, např. Polypropylen (PP), tuhý termoplastický polyuretan (TPU) a další.

Z chemického hlediska polyamid není jeden jednotlivý plast, ale celá třída plastů, které obsahují skupinu -CO-NH- a methylen CH₂., např. PA 6, PA 66, PA 610 a PA 12. Polyamidy PA 6 a PA 66 jsou nejčastěji používanými typy:



Obr. 25 - Strukturní vzorce PA 6 a PA 66

Výroba uvedených polyamidů probíhá následujícími způsoby:

- Polyamid 6 (nylon 6, PA-6): polykondenzací ω-aminokarboxylové kyseliny nebo polymerací jejich cyklických amidů. Jedná se potom o polykaprolaktam, viz Obr. 25 a)
- Polyamid 66 (nylon 66, PA-66): polykondenzace diaminů s dikarboxylovými kyselinami nebo jejich dichloridy. Reprezentantem je polykondenzát hexamethyldiaminu s kyselinou adipovou, viz Obr. 25 b)

4.3.2 Polypropyleny

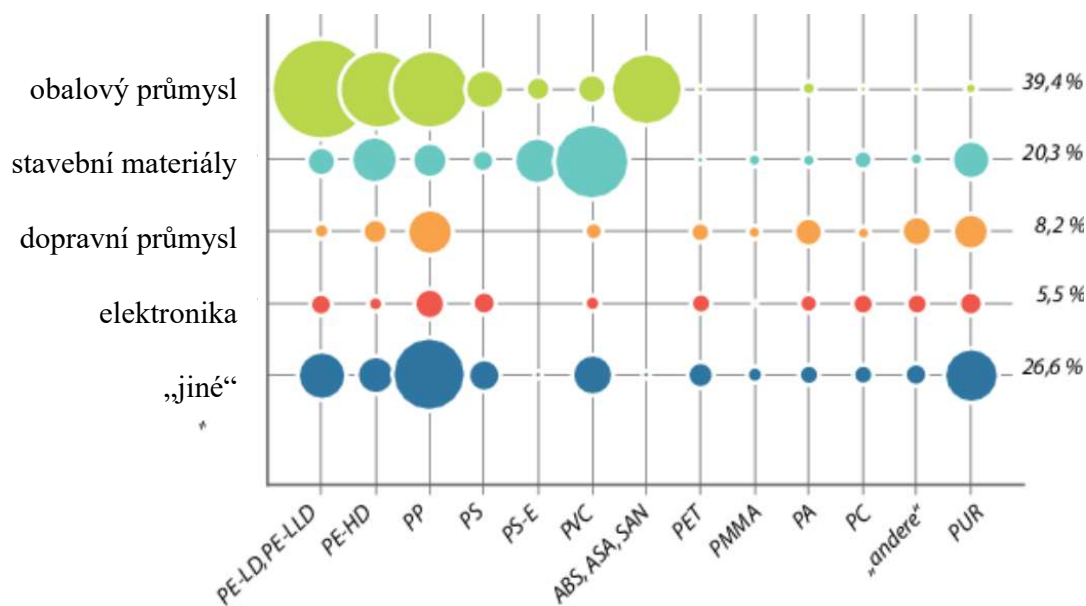
Polyamid je již dlouho nejvíce užívanou matricí v oblasti termoplastů vyztužených vlákny. Ukázalo se však, že lze použít i jiné matrice: např. polypropylen [27]. Srovnání těchto dvou materiálů je následující:

- Polyamidy nebo nylony (PA):
PA je lepší než PP v pevnosti a tuhosti, ale zachovává přiměřenou tažnost a pružnost. Polyamidy mají vynikající teplotní vlastnosti až do 200 °C, a teplota tání je v rozmezí 215 - 220°C. Polyamid je hygroskopický a potřebuje před zpracováním řádně vysušit granulát. Mechanické vlastnosti PA závisí do značné míry na vlhkosti při skladování.

- Polypropylen (PP):
PP je komoditní polymer. Je nepropustný pro většinu rozpouštědel a chemikálií. Polypropylen vykazuje vysokou houževnatost, střední tuhost a pevnost. Polypropylen umožňuje použití jednoduchých výrobních technik kvůli jeho relativně nízké teplotě tání (180 °C). Polypropylen je nepolární materiál, není hygroskopický. Jeho mechanické vlastnosti jsou konstantní při různých úrovních vlhkosti.

4.3.3 Trendy ve výrobě plastů

Následující Obr. 26 ukazuje spotřebu jednotlivých druhů plastů. Největší objem spotřeby mají tzv. komoditní plasty: PE, PP, PS a PVC. Tento obrat však nedosahují v technických aplikacích. V technických aplikacích je nejpoužívanější termoplast polyamid, následovaný polypropylenem.



Obr. 26 - Celková spotřeba plastů podle typů v roce 2012 [28]

Za posledních 40 let stoupla výroba plastů 20krát. Celosvětová roční produkce plastů přesáhla 320 milionů tun (r. 2019), z toho nejvíce – 141 milionů tun – připadá na obaly. Hlavní surovinou pro výrobu plastů jsou ropa a zemní plyn. V roce 2016 průmysl výroby plastů spotřeboval 6 % světové produkce ropy a předpokládaná spotřeba má stoupnout až na 20 % v roce 2050 [29].

4.4 Výztuž

Výztuže je možné rozdělit podle různých kritérií:

4.4.1 Tvar výztuže

a) Částicová, nevyztužující

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

b) Vlákenná – vyztužující materiál, jsou charakterizována délkou vlákna v závislosti na průměru l/d .

c) Hybridní – kombinace obou předchozích typů plniv.

Disertační práce se zabývá orientací v TKSV, proto se zaměřím na plniva, která tvoří významnou orientaci, a to jsou **vláknové výztuže**.

4.4.2 Tvarový poměr

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

- Krátká vlákna mají poměr mezi délkou a průměrem menší než 100 [10].
- Dlouhá vlákna mají poměr mezi délkou a průměrem rovno nebo více než 100.

4.4.3 Vláknové výztuže

Jako materiál vláken lze použít řadu typů materiálů – naprostou většinu aplikací však 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 matrice. V malých rozměrech mají jednotlivá vlákna menší poruchovost, jelikož zde dochází k minimalizaci rozměrů přirozených vad materiálu, včetně vad povrchových.

4.4.3.1 Skleněná vlákna

Výztuž obecně dodává kompozitu zejména tuhost a pevnost, zatímco matrice zajišťuje vzájemnou soudržnost vláken až do lomu kompozitu. Skelná resp. skleněná vlákna jsou nejčastěji používanou výztuží u termoplastů. Jsou vyráběna tažením z roztavené skloviny. Pro výztuže termoplastů se využívá tzv. E sklo, to je sklo, které je vhodné jako elektroizolační materiál. E sklo obsahuje 55 % SiO_2 , 18 % CaO , 8 % Al_2O_3 , 4,6 % MgO a jiné prvky s podílem <5 % [30] a jsou vysoce tuhé.

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

Obsah výztuže v kompozitech s částečně krystalickou maticí může být až 70 % hmotnostního obsahu. Nicméně nejčastěji se hmotnostní obsah plniva pohybuje kolem 30 % hmotnosti výrobku, a to z důvodu, že u částečně krystalizujících polymerů, které mají samy o sobě horší tekutost, nelze z technologických důvodů vyšší plnění uplatnit.

4.4.3.2 Porovnání vlastností termoplastů vyztužených krátkými nebo dlouhými vlákny

Tab. 1 - Porovnání základních vlastností termoplastů vyztužených krátkými a dlouhými vlákny

	Termoplasty vyztužené krátkými skleněnými vlákny	Termoplasty vyztužené dlouhými skleněnými vlákny
Způsob výroby granulátu	Skleněná vlákna jsou nejprve řezána a poté zabudována do termoplastické matrice	Nekonečná vlákna z cívky jsou nepřetržitě přiváděna do speciální vytlačovací hlavy, kde jsou spojena s matricí (Pultrusion). Po ochlazení se řezají
Poměr mezi délkou a průměrem [10]	menší než 100	větší než 100
Tvar granulátu	válcový granulát, cca. 3 mm	tyčinkovitý granulát o délce 10 až 20 mm
Mechanické a tepelné vlastnosti ve srovnání s nevyztuženým PA [3]	vysoké	velmi vysoké

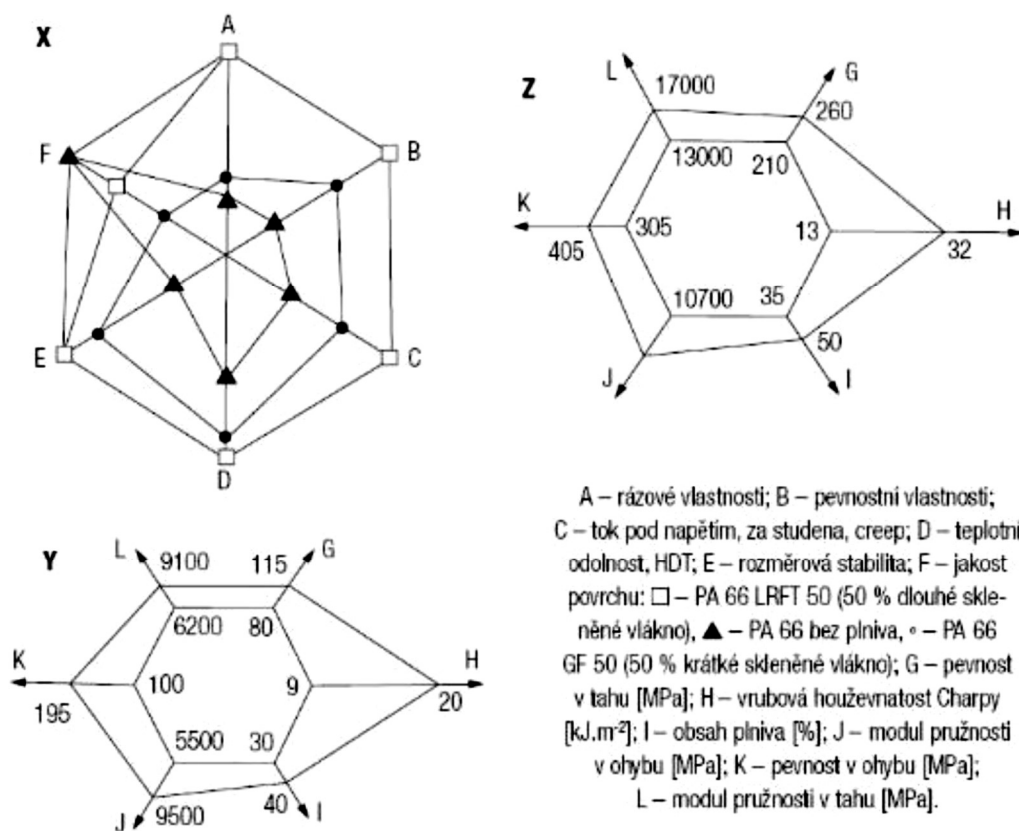
Dále je uveden souhrn výše zmíněných faktů a dalších údajů.

Tab. 2 - Příklad značení PA vlastností termoplastů vyztužených krátkými a dlouhými vlákny

	Termoplasty vyztužené krátkými skleněnými vlákny	Termoplasty vyztužené dlouhými skleněnými vlákny
Natočení vláken v tavenině	možné [32]	omezené
Orientace vláken dává údaj o toku taveniny	více	méně
Vlákna se během zpracování ohýbají a tato deformace zůstává po ochlazení v součásti	ne	ano [22]
Poškození vlákna při plastifikaci [20]	nízké	větší

Obr. 27 ukazuje ve třech diagramech účinky vláknové výztuže:

- První diagram „X“ ukazuje PA 66 s různými výztužemi (bez výztuže, 50 % KSV, 50 % DSV), jak obsah výztuže mění rázové a pevnostní vlastnosti, creep (tečení), teplotní odolnost, rozměrovou stabilitu a kvalitu povrchu.
- Druhý diagram „Y“ ukazuje PP, jak se mění pevnost v tahu, vrubová houževnatost (Charpy-V), modul pružnosti v ohybu, pevnost v ohybu a modul pružnosti v tahu v závislosti na výztuži (30 % KSV, 40 % DSV).
- Třetí diagram „Z“ ukazuje PA 66, jak se mění pevnost v tahu, vrubová houževnatost (Charpy-V), modul pružnosti v ohybu, pevnost v ohybu a modul pružnosti v tahu v závislosti na výztuži (35 % KSV, 50 % DSV).



Obr. 27 - Porovnání kompozitů s dlouhými a krátkými vlákny s polymerní matricí bez výztuže [10]

4.4.3.3 Adhese Matrice-Vlákna

Polyamidy mají v zásadě velmi dobré předpoklady pro dobré spojení se skleněnými vlákny. Důvodem je, že polyamidy mají planární amidové (-CO-NH-) skupiny uprostřed na Obr. 25 a) a 25 b), které jsou velmi polární, takže Polyamid vytváří více vodíkových vazeb mezi sousedními vlákny.

Výrobci termoplastických kompozitů navíc používají primery pro lepší spojení povrchů vláken s materiálem matrice. Než výrobce kompozitu spojí matricový materiál s vlákny (extruzí nebo pultruzí), potáhne vlákna určitým nátěrem. Primer je druh laku, který se chemicky dobře váže s vláknem a snadno vytváří dobré van der Waalsovy vazby s matricovým materiálem.

Informace o předúpravě vláken nátěrem nejsou veřejně dostupné, ale důvěrné, protože patří do know-how příslušných společností.

4.5 Systém pro značení a identifikaci vyztužených a nevyztužených PA

Značení probíhá podle normy ČSN EN ISO 16396-1:2015 „Plasty - Polyamidy (PA) pro tváření - Část 1: Systém označování, značení výrobků a základy pro specifikace“ [N6] pomocí pěti datových bloků. Každý datový blok vychází z tabulek, podle které se určí značení. Datové bloky 1 identifikují matrice a datový blok 2 výztuže:

Tab. 3 - Příklad značení PA podle
 ČSN EN ISO 16396-1:2015 „Plasty - Polyamidy (PA) pro tváření -
 Část 1: Systém označování, značení výrobků a základy pro specifikace“ [N6]³

DESIGNATION										
Description block (optional) Thermo-plastics	Identity block									
	ISO Standard	Individual-item block								
		Data block 1		Data block 2			Data block 3		Data block 4	Data block 5
		Polymer		Performance and origin related information			Application and processing		Properties	Additional information
		Type	Modification	Filler	Flame retardant	Recy-clate	Process-ing	Character-istics		
	16396	PA 66		GF37			M	H	S14-100	
>Part marking<										
No	No	Yes		Yes			No	No	No	No

Příklad: Specifikace materiálu ISO 16396-PA 66,GF30,MH,S14-100
 Označení dílu >PA 66,GF30<

Součásti automobilů a elektrických zařízení jsou označeny podle výše uvedeného kódu, aby bylo možné plasty třídit při jejich likvidaci:



Obr. 28 - Označení komponent kódem normy ČSN EN ISO 16396-1:2015 „Plasty - Polyamidy (PA) pro tváření - Část 1: Systém označování, značení výrobků a základy pro specifikace“ [N6] Součást automobilu: Polypropylen + 30 % mletého masku

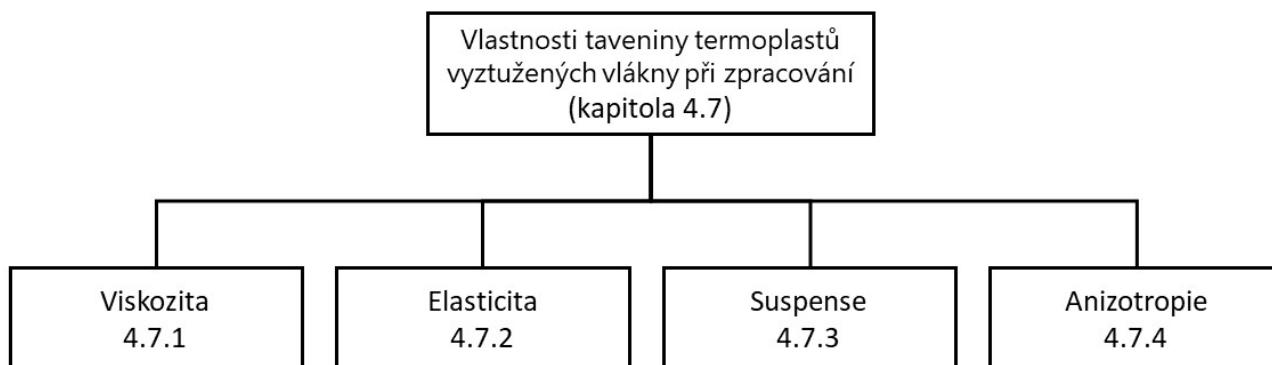
4.6 Vlastnosti taveniny termoplastů vyztužených vláknem při zpracování

Chování tavenin vyztužených plastů je obtížné vědecky popsat.

Termoplastická tavenina plněná vlákny má čtyři samostatné vlastnosti, které ovlivňují chování toku během zpracování:

- a) Viskozita: podobná jako u kapalin, ale není konstantní, závisí na tření (ne-newtonská kapalina),
- b) Elasticita termoplastické taveniny: podobná jako u pevné látky, která se může elasticky deformovat (a po odlehčení opět pruží).
- c) Suspenze: tj. směs pevné látky (vlákno) a kapaliny (tavenina).
- d) Anizotropie: vzhledem k orientaci makromolekul a orientaci vláken a nehomogenity vláken v tavenině jsou vlastnosti materiálu směrově závislé na směru.

³ Originál z normy. České znění neexistuje.



Obr. 29 - Přehled kapitol této disertační práce o vlastnostech taveniny termoplastů vyztužených vláknů

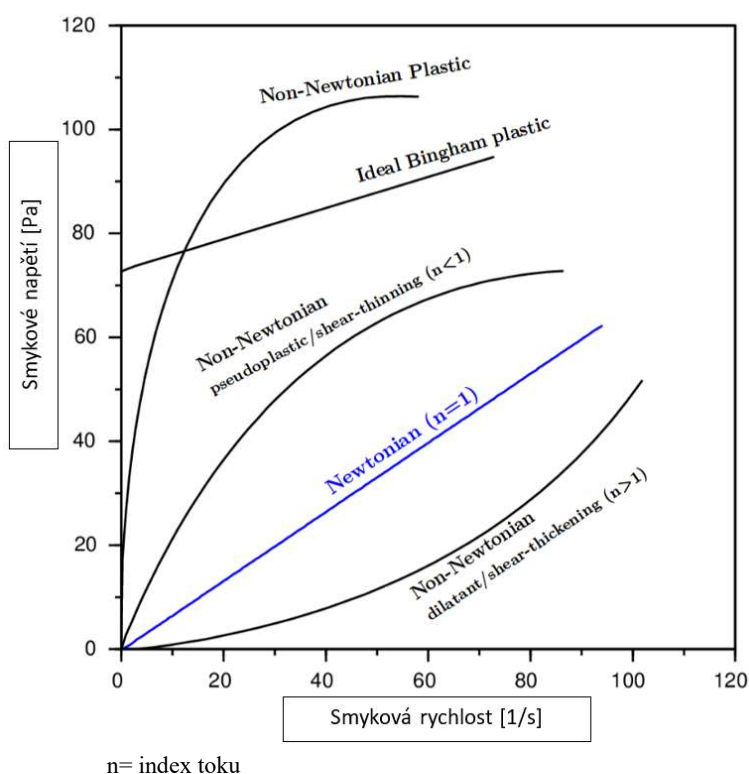
4.7 Matematické modely tokového chování taveniny vyztužených plastů

4.7.1 Modely viskozita

V následujícím textu jsou uvedeny existující matematické modely, které poskytují informace o jednotlivých vlastnostech. Všechny tyto modely nelze v současné době z důvodu jejich složitosti řešit současně. Ani pomocí numerických metod založených na parciálních diferenciálních rovnicích není možné vyjádřit celou složitost problematiky. Diferenciální rovnice neobsahují důležité jevy (např. elasticitu nebo tvorba shluku) a nejsou matematicky konvergentní, což znamená, že ani iterací nelze nalézt přesné řešení.

Z tohoto důvodu byly paralelně s matematickými modely (viz kapitola 4.7) vytvořeny analytické modely (viz kapitola 2.6), které popisují jednotlivé aspekty prostřednictvím matematické aproximace nebo kvalitativních modelů chování. Analytické modely uvedené v kapitole 2.6 obsahují mnoho zjednodušení, ale poskytují uživateli užitečný popis chování proudění.

Konstitutivní rovnice viskózní kapaliny Obr. 30 ukazuje diagram napětí-deformace pro newtonské a neneutronské tekutiny. Pseudoplastické tekutiny představují nejběžnější typ časově nezávislých neneutronských tekutin, které vykazují pokles zdánlivé viskozity s rostoucí hodnotou smykové rychlosti. Za účelem zmapování charakteristik těchto pseudoplastických tekutin bylo definováno několik modelů.



Obr. 30 - Tokové křivky: diagram napětí-deformace pro newtonské a neneutronské tekutiny [34]

4.7.1.1 Mocninový model viskozity

Tokové vlastnosti většiny neneutonských kapalin uvedených na Obr. 30 lze popsat pomocí tzv. mocninového modelu. Tím nejjednodušším a zároveň nejčastěji užívaným modelem je pro vyjádření reologického chování čistě viskózních kapalin je mocninový model:

$$\eta = K \left(\frac{\delta u}{\delta y} \right)^{n-1} \quad (4.1)$$

kde:

η	zdánlivá viskozita [Pa·s]
K	koeficient konzistence [Pa·s ⁿ]
$\frac{\delta u}{\delta y}$	smyková rychlost [1/s] = $\dot{\gamma}$
n	index toku (viz Obr. 30)

U tavenin plastů je index toku „n“ menší než 1 ($n < 1$), tj. chování při toku je pseudoplastické.

Výhodou mocninového modelu je jeho jednoduchost, jeho nevýhodou je skutečnost, že zpravidla vystihuje reologické chování kapalin pouze v omezeném rozsahu smykové rychlosti. Při hodnotách smykové rychlosti v limitě k nule dává při $n < 1$ hodnoty smykové napětí a zdánlivé viskozity $\eta \rightarrow \infty$. To odporuje experimentálním zkušenostem, že při malých hodnotách smykové rychlosti η se blíží konečné hodnotě η_0 . Kvůli tomu se užívá pro taveniny plastů následující třikonstantový model:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0}{K} \right) |\dot{\gamma}|^{(n-1)}} \quad (4.2)$$

kde:

η	viskozita [Pa·s]
η_0	newtonská limitní viskozita při velmi nízkých smykových rychlostech [Pa·s]
K	koeficient konzistence [Pa·s ⁿ]
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost [1/s]
n	index toku

4.7.1.2 Carreauův model viskozity

Problematiku toku plastů vhodně popisuje Carreauův model. 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:

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (4.3)$$

kde:

η	viskozita [Pa·s]
η_0	newtonská limitní viskozita při velmi nízkých smykových rychlostech [Pa·s]
η_∞	newtonská limitní viskozity při velmi vysokých smykových rychlostech [Pa·s]
n	index toku [-]
λ	časová konstanta [s]
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost [1/s]

V případě plastů není viskozita pro nekonečně vysoké rychlosti η_∞ relevantní, protože nemohou dosáhnout tak vysoké rychlosti bez poškození molekulární struktury. V tom případě má **Carreauova rovnice** následující podobu:

$$\tau = \frac{a_T \cdot A \cdot \dot{\gamma}}{(1 + a_T \cdot B \cdot \dot{\gamma})^C} \quad (4.4)$$

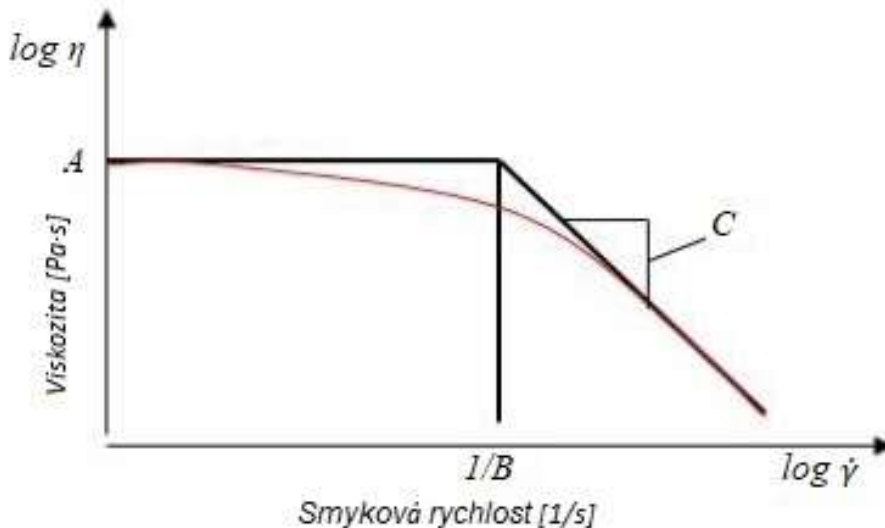
kde:

a_T faktor posunu teploty

A, B, C empiricky určené látkové konstanty, které mohou být určeny z experimentálně stanoveného průběhu $\log \eta$, viz Obr. 31

τ smykové napětí [Pa]

$\dot{\gamma}$ smyková rychlost [1/s]



Obr. 31 - Konstanty A, B a C v Carreauově modelu [7]

4.7.1.3 Cross model viskozity

Při kritickém pohledu na Carreauův model je jasné, že i tento model má problém s limity. Pokud se smyková rychlost blíží nekonečnu, viskozita se stane nulovou nebo dokonce zápornou. To je problém pro vstříkování, kde vysoké smykové rychlosti nejsou neobvyklé.

Proto byl v roce 2018 vyvinut model Cross. K nulové smykové viskozitě η_0 se přistupuje při velmi nízkých smykových rychlostech, zatímco k nekonečné smykové viskozitě η_∞ se přibližuje při velmi vysokých smykových rychlostech:

$$\eta_{eff} = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (k\dot{\gamma})^n} \quad (4.5)$$

kde:

η_{eff} efektivní viskozita [Pa·s]

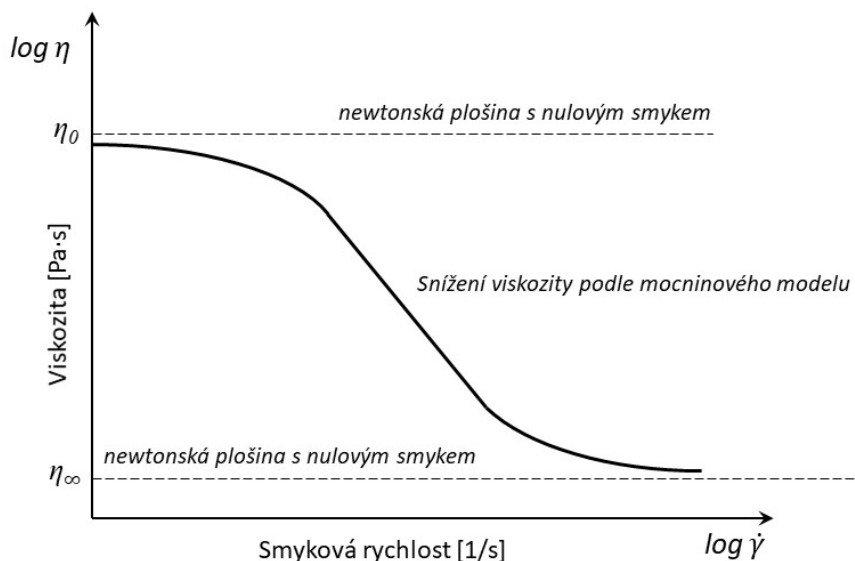
η_0 newtonská limitní viskozita při velmi nízkých smykových rychlostech [Pa·s]

η_∞ newtonská limitní viskozita při velmi vysokých smykových rychlostech [Pa·s]

n index toku [-]

$\dot{\gamma}$ smyková rychlost [1/s]

Tento model kombinuje výhody obecného Carreauova modelu s výhodami mocninového modelu (viz 4.7.1.1).



Obr. 32 - Schematické znázornění viskozitní funkce podle modelu Cross

4.7.1.4 Vliv teploty na viskozitu

Viskozita taveniny plastu závisí nejen na rychlosti smyku, ale také na teplotě taveniny. Tento vliv je velmi důležitý při chlazení taveniny ve formě. Pokud tavenina vychladne, tavenina stane se viskóznější a vlákna se již nemohou volně vyrovnávat.

Vztah mezi teplotou taveniny a viskozitou se řídí empirickou Williams-Landel-Ferryho rovnicí pro amorfní termoplasty:

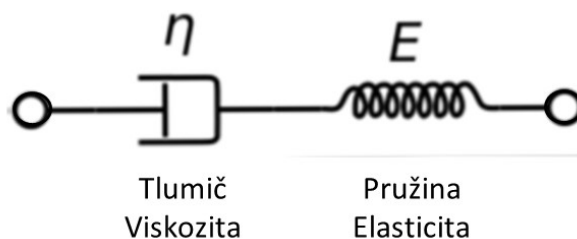
$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T-T_r)}{C_2+(T-T_r)} \tag{4.6}$$

kde:

- a_T faktor posunu křivky viskozity [-]
- C_1 konstanta závislá na materiálu [-]
- C_2 konstanta závislá na materiálu [°C]
- T teplota taveniny [°C]
- T_r referenční teplota [°C]

4.7.2 Model visko-elasticity taveniny plastů

Nejběžnějším modelem pro popis elastického chování tavenin plastů je Maxwellův model. Tento model je reprezentován čistě viskózním tlumičem a čistě pružnou pružinou zapojenou do série, jak je znázorněno na obrázku č. 13. V této konfiguraci je při aplikovaném axiálním napětí celkové napětí. Maxwellova soustava se skládá z tlumiče a pružiny zapojených do série (viz Obr. 13).



Obr. 33 - Schematické znázornění Maxwellova systému sestávajícího z tlumiče (viskózní chování) a pružiny (elastické chování) - zapojených v sérii

Tavenina plasty se při procesu tečení viskózně deformuje (teče) a zároveň se každá deformace ukládá v materiálu jako v pružině a může se (jako elastická pružná pevná látka) po deformaci sama resetovat.

Matematicky se viskózní prvek řídí rovnicí pohybu kapaliny:

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} [1 - e^{(-\frac{t}{\lambda})}] \tag{4.7}$$

kde:

- τ smykové napětí [Pa]
- η_0 newtonská viskozita [Pa·s]
- $\dot{\gamma}$ smyková rychlost [1/s]
- E Elastický modul [Pa]
- t čas [s]
- λ relaxační čas [s]

kde:
$$\lambda = \frac{\eta_0}{E} \tag{4.8}$$

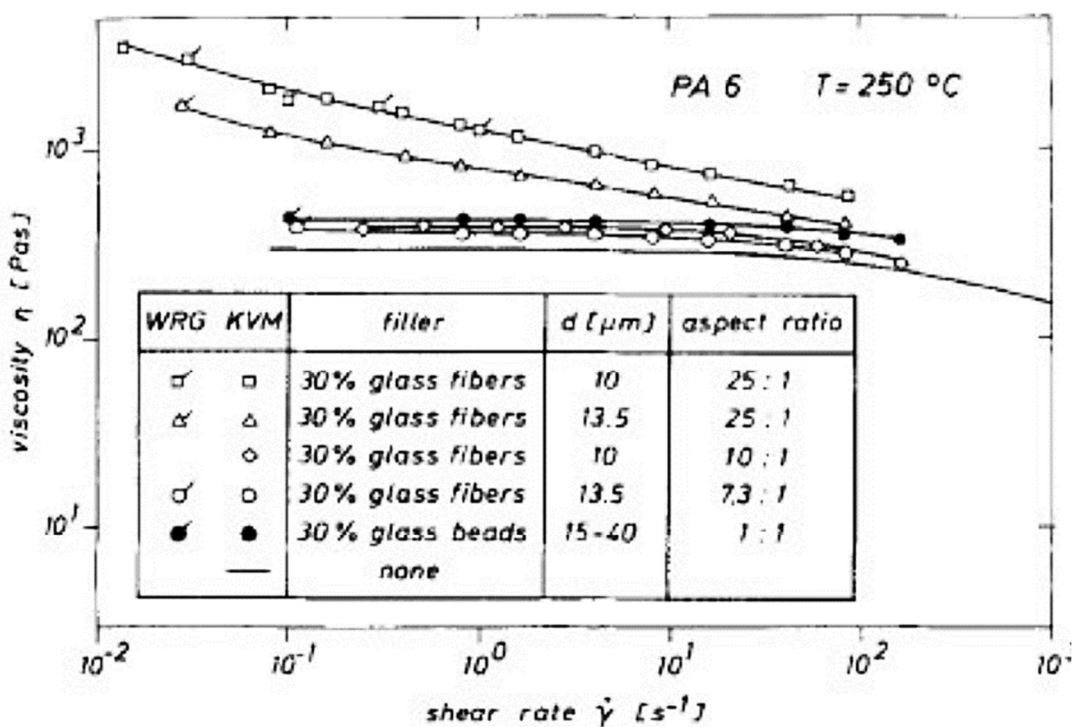
Tato rovnice vyjadřuje, že Maxwellův materiál pod napětím má konstantní viskózní část a časově závislou elastickou část, která závisí na koeficientu viskozity a elasticity (tzv. relaxační čas λ). Relaxační čas taveniny polymerů je mezi 0,01 a 0,001 s.

4.7.3 Modely suspenze z vláken v tavenině

Kapitola 4.2 se vztahuje na čisté kapaliny. Model viskozity funguje pro homogenní tekutiny. Plasty vyztužené vlákny jsou ale suspenze. Lze mluvit o viskozitě, pokud v mikroskopickém rozsahu ovlivňují tok pevného tělesa? Proto se v těchto případech mluví o „zdánlivé viskozitě“.

Zdroj [35] se zabývá modelováním suspenzí pseudoplastických tekutin. Tento model platí i pro suspenzi tavenin termoplastů. Klíčovou informací je, že vliv vláken na zdánlivou viskozitu je větší, čím více není matrice newtonská. Taveniny z plasty splňují tuto podmínku, takže obsah vláken má silný vliv na zdánlivou viskozitu.

Obr. 34 ukazuje skutečné viskozity nevyztuženého PA a zdánlivé viskozity PA-GF.



Obr. 34 - Porovnání závislosti viskozity na rychlosti deformace podle tvarového poměru vláken l/d pro materiál PA 6 bez vlákna a s vlákny [36]

Uvedený Obr. 34 ukazuje, že viskozita taveniny PA-GF při nízkých smykových rychlostech se zvyšuje s obsahem vláken a s délkou vlákna.

Zde je vidět, že křivky mají charakteristický tvar podle Carreauova modelu, který má už nižší smykové rychlosti (Newtonská plošina) pouze pro menší poměry než 10:1, přičemž maximální průměr vlákna je zde $25\mu\text{m}$. 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.

4.7.4 Anizotropie taveniny termoplastů vyztužených vlákny při zpracování

Tavenina termoplastů vyztužených vlákny není izotropní ze dvou důvodů:

- a) V toku taveniny se vlákna orientují v trojrozměrném prostoru tak, aby kladla nejmenší odpor.
- b) V toku taveniny se makromolekuly vyrovnávají v trojrozměrném prostoru tak, aby kladly nejmenší odpor.

Oba jevy vedou ke směrově závislým vlastnostem taveniny (např. viskozitě a elasticitě).

4.8 Výběr materiálu této disertační práce

Termoplasty vyztužené vlákny jsou dostupné s různými matricemi a vlákny, disertační práce se věnuje polyamidu vyztuženého krátkými skelnými vlákny, protože je to nejběžněji používaný materiál.

Polyamid má specifické vlastnosti, které je třeba respektovat při jeho zpracování. Polyamid je hygroskopický a je třeba ho před zpracováním přesušit. Stroj je proto vybaven vakuovou sušičkou. Dále se polyamid vyznačuje termickou nestabilitou, proto musí být bezpodmínečně splněny všechny podmínky jeho zpracování. Polyamid velmi snadno oxiduje, proto existuje riziko jeho „spálení“ v plastifikační jednotce. Po jejím vypnutí naopak existuje riziko nadměrného smrštění produktu v injekční jednotce, a díky vysoké adhezi materiálu se může poškodit povrchová úprava stroje (chrom nebo nitrifikace).

Proto je třeba stroj po zpracování průběžně čistit a v době odstavení naplnit čisticím granulátem, aby se předešlo poničení stroje.

Jako čisticí granulát byl vybrán materiál: Neutrex Purgex 3057 Plus, který je určen pro vysoké teploty až do $316\text{ }^\circ\text{C}$ a byl poskytnut společností Albis Plastic CR s.r.o., České Budějovice.

4.9 Výroba zkušebních těles podle normy ČSN EN ISO 527

Pro následnou tahovou zkoušku podle normy ČSN EN ISO 527-1 a -2 [N2, N3] byly vyrobeny zkušební tělesa (Obr. 38).

Parametry procesu pro zpracování vybraného materiálu byly specifikovány podle:

- technického listu výrobce [37],
- parametry, které je třeba splnit při vstřikování zkušebních těles podle normy ČSN EN ISO 16396 2:2017 „Plasty - Polyamidy (PA) pro tváření - Část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností“ [N7]

Při vytváření metodiky je třeba poznamenat, že nevýhody polyamidu jsou:

- Absorpce vody: absorbovaná voda má za následek nižší mechanické vlastnosti. Při vytváření metodiky je třeba poznamenat, že nevýhody polyamidu jsou:
- Absorpce vody: absorbovaná voda má za následek nižší mechanické vlastnosti.
- Chemická odolnost: Polyamid má nízkou odolnost vůči silným zásadám a kyselinám

- Vysoké smrštění: vysoké procento smrštění v litých aplikacích
-
- Chemická odolnost: Polyamid má nízkou odolnost vůči silným zásadám a kyselinám
- Vysoké smrštění: vysoké procento smrštění v litých aplikacích

Z ekonomických, časových a praktických důvodů bylo uvažováno provedení experimentálních zkoušek a ověření navržených metod na vybraném typu materiálu. Kritéria výběru byla:

- Materiál má být typický pro výrobu mechanicky a termicky namáhaných výstřiku v automobilovém nebo elektrotechnickém průmyslu (Matrice: polyamid, plnivo/výztuž: skleněná vlákna).
- Použitelnost zpracování na dostupném experimentálním zařízení, tzn. vstřikovací stroj Arburg Allrounder 270 C Golden Edition.
- Za účelem dobré dostupnosti zkušebnímu materiálu jsou preferováni dodavatelé materiálu se zastoupením v České republice.
- Výrobce by měl nabízet i další materiály s identickou matricí, ale s různými typy plniv, aby mohli být provedeny srovnávací testy.
- Výrobce by měl být schopen poskytnout odbornou technickou podporu.

Na základě výše uvedených kritérií byl vybrán následující zkušební materiál: Polyamid vyztužený 30 % krátkými skleněnými vlákny, který nese obchodní jméno „Grilon TSG-30/4 black 9832“ a je vyráběn švýcarskou firmou EMS-Grivory [37].

Pod tímto označením se skrývá polyamid typu PA66+PA6⁴ + 30 % výztuže

- Přísada 30 % skleněných vláken
- Označení dle ČSN EN ISO 16396-1: 2015: Thermoplastics PA 66+PA 6, GF 30, MH, S14-100
- Vhodný pro náročné aplikace s vysokým zatížením

Vlastnosti

- Velmi tuhý, tlaku odolný,
- rozměrově stabilní,
- Oproti PA6 a PA66 vykazuje lepší:
 - Tuhost
 - Odolnost vůči opotřebení
 - Navlhavost (menší)

⁴ Směs polyamidu 6 a polyamidu 66.

5 ZAŘÍZENÍ A NASTAVENÉ PARAMETRY

5.1 Vstřikovací lis

V laboratoři fakulty strojní se nachází klasický horizontální vstřikovací lis s označením Arburg Allrounder 270 C Golden Edition od společnosti Arburg s.r.o., který je vybaven nezbytným příslušenstvím pro zpracování PA-GF



Obr. 35 - Vstřikovací lis Arburg Allrounder 270 C Golden Edition v laboratoře fakulty strojní ČVUT v Praze

Parametry procesu z toho vyplývající a použité k výrobě zkušebních vzorků jsou uvedeny v Tab. 7. S těmito parametry bylo možné vyrábět kvalitní zkušební tělesa pro tahovou zkoušku. To prokázala i realizovaná zkouška tahem [38].

Používaný vstřikovací stroj Arburg Allrounder 270 C Golden Edition má následující technickou specifikaci [39]:

Tab. 4 - Technická specifikace vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 270 C Golden Edition Clamping unit

Clamping unit		270 C GOLDEN EDITION
with clamping force	max. kN	400
Opening force stroke	max. kN mm	130 350
Mould height, fixed variable	min. mm	200 ---
Platen daylight fixed variable	max. mm	550 ---
Distance between tie bars (w x h)	mm	270 x 270
Mould mounting platens (w x h)	max. mm	446 x 446
Weight of movable mould half	max. kg	180
Ejector force stroke	max. kN mm	30 125
Dry cycle time EUROMAP 2	min. s - mm	1,2 - 189

Tab. 5 – Technická specifikace vstřikovací jednotky Arburg Allrounder 270 C Golden Edition

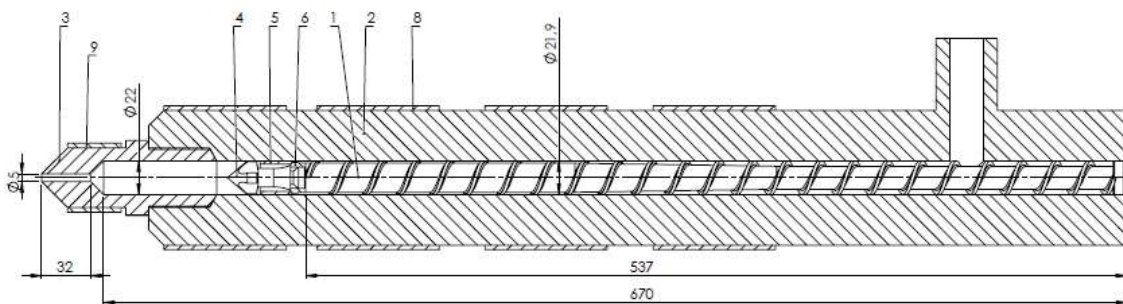
Injection unit		18	70	25
with screw diameter	mm	18	22	25
Effective screw length	L/D	24,5	20	17,5
Screw stroke	max. mm		90	
Calculated stroke volume	max. cm ³	23	34	44
Shot weight	max. g PS	21	31	40
Material throughput	max. kg/h PS	4,1	5,5	6,5
	max. kg/h PA6.6	2,1	2,8	3,3
Injection pressure	max. bar	2500	2000	1550
Holding pressure	max. bar	2500	2000	1550
Injection flow ²	max. cm ³ /s	68	100	130
Screw circumferential speed ²	max. m/min	39	48	55
Screw torque	max. Nm	90	110	120
Nozzle contact force retraction stroke	max. kN mm		50 150	
Heating capacity zones	kW		4,1 4	
Feed hopper	l		25	

Následující Tab. 6 [39] popisuje základní vlastnosti školního vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 270 C Golden Edition .

Tab. 6 - Základní vlastnosti stroje

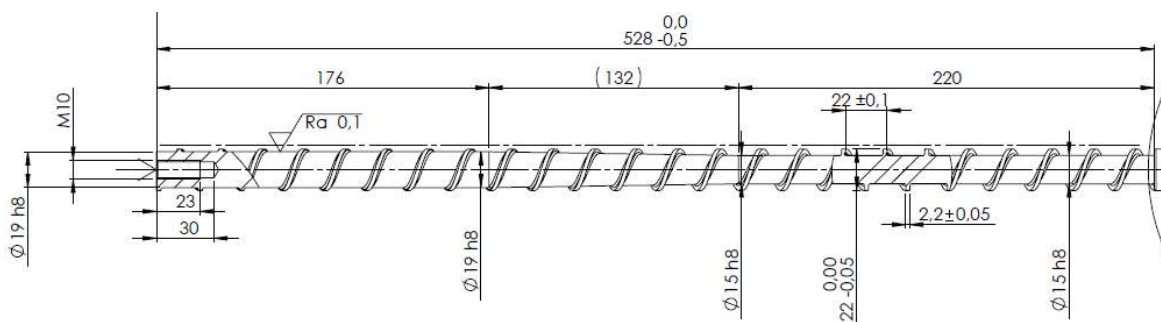
Velikost vstřikovací jednotky	70
Vzdálenost mezi vodícími sloupky	270 x 270 mm
Maximální objem zdvihu	34 cm ³
Kompresní poměr šneku	1,3
Průměr šneku	22 mm
Poměr šneku L/D	20 : 1
Zdvih šneku	90 mm
Kroutící moment šneku	110 Nm
Uzavírací síla	400 kN
Maximální vstřikovací tlak	2000 bar
Pohon	Plně hydraulický

Možnou nevýhodou plastikačního šneku je jeho komprese, která se podle údajů společnosti EMS pohybuje na hraně požadované hodnoty pro zpracování PA-GF. Komprese je vlastnost šneku, která závisí na hloubce závitů. Čím je poměr drážky hlubší, tím je hodnota komprese vyšší. Řešením pro zlepšení technologických podmínek by tedy bylo vyměnit šnek za jiný s větším kompresním poměrem. Obr. 36 ukazuje výkres sestavy plastifikační komory s popisem nezbytných součástí a na Obr. 37 je výkres šneku vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 270 C.



Obr. 36 - Plastifikační jednotka:

1 Šnek, 2 Válec, 3 Tryska, 4 Zpětný ventil, 5 Těsnící válec, 6 Těsnící kroužek, 8 Tepelné pásy velké, 9 Tepelný pás malý



Obr. 37 - Šnek vstřikovacího lisu Arburg Allrounder 270 C

Parametry procesu pro zpracování vybraného materiálu byly specifikovány podle:

- technického listu výrobce [37],
- parametry, které je třeba splnit při vstřikování zkušebních těles podle normy ČSN EN ISO 16396 2:2017 „Plasty - Polyamidy (PA) pro tváření - Část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností“ [N7]

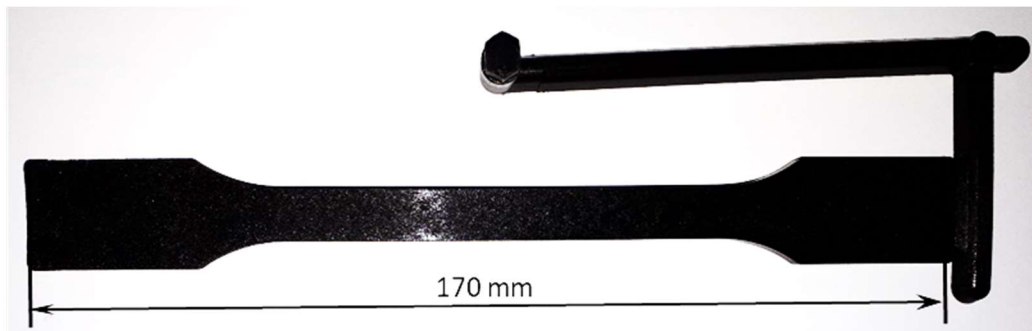
Tab. 7 - Výroba zkušebních těles, tři typy s různými procesními parametry

Parametr	Hodnoty výrobních parametrů			
Rychlost otáčení šneku	200 mm/s			
Zpětný odpor na šneku	-25 bar			
Teplota topných pásů	tryska = 300 °C, T3 = 300 °C, T2 = 295 °C, T1 = 290 °C			
Vstřikování	Pokus a jeho procesní parametry	Pokus „L“ pomalý výstřik	Pokus „M“ střední výstřik	Pokus „S“ rychlý výstřik
	Fáze 1, 6 cm ³	10 cm ³ /s	20 cm ³ /s	35 cm ³ /s
	Fáze 2, 12 cm ³	5 cm ³ /s	10 cm ³ /s	15 cm ³ /s
Teplota formy	80 °C			
Teplota příruby pod násypkou	25 °C			
Dotlak	1,5 cm ³ /s;			
	1) 200 bar – 1 s; 2) 180 bar – 15 s; 3) 25 bar – 0,5 s			
Polštář (Objem plastu v komoře před šnekem po vstřiku)	6 cm ³			

Při vytváření metodiky je třeba poznamenat, že nevýhody polyamidu jsou:

- Absorpce vody: absorbovaná voda má za následek nižší mechanické vlastnosti. Materiál musí být před zpracováním vysušen
- Chemická odolnost: Polyamid má nízkou odolnost vůči silným zásadám a kyselinám
- Vysoké smrštění: vysoké procento smrštění v litých aplikacích

Obr. 38 ukazuje vzorek zkušební tělesa, vyráběno na zkušebním zařízení Arburg.



Obr. 38 - Zkušební těleso z (PA6/PA66) + GF 30 (EMS-Grivory Grilon TSG-30/4 black 9832)

5.2 Trhací stroj

Trhací stroj LabTest 5.100SP1



Obr. 39 - Trhací stroj LabTest 5.100SP1

Trhací stroj LabTest 5.100SP1 je univerzální stroj pro statické zkoušky tahem, tlakem, ohybem apod. Vyrábí ho firma Labortech, která se zabývá výrobou servo-mechanických zkušebních strojů různých velikostí a rozsahů (od 5kN do 6MN). LabTest 5.100SP1 má silovou kapacitu 100 kN.

Tab. 8 – Technická specifikace stroje LabTest 5.100SP1 [40]

Rozsah zatížení	0 kN až 2000 kN
Rozsah měření síly	0,4 % až 100 % rozsahu snímače
Vzorkovací frekvence	1 kHz
Rozlišení polohy příčnicku	1 μm

Upnutí vzorku

K upnutí vzorku se používají klínové čelisti. Jejich výhodou je, že pokud se vzorek předupne a dojde ke tření, je vzorek svírán stále větší silou - čelisti se ještě samy více utáhnou.

Tažnost ocel vs. plast

U plastů uvažujeme tečení materiálů a tažnost tedy může dosáhnout až 600 %. Délka vzorku se při zkoušce tahem u plastů mnohonásobně zvětší než u kovů. Pro měření deformace u oceli používáme průtahoměr, který je schopen měřit mezi 5 až 127 mm měřené délky. Měření probíhá tak, že se na vzorek nalepí reflexní pásky a laserový paprsek sleduje polohu reflexní pásky. Změna polohy určuje protažení vzorku. Tzn., jestliže máme vzorek o velikosti 80 mm a je-li tažnost plastu větší než 100 %, tak nejsme schopni určit protažení pomocí průtahoměru. Reflexní páska se dostane mimo dosah průtahoměru a musíme vyhodnocovat pomocí příčnicku. Dále stroj obsahuje siloměr na hlavách a senzory na měření dráhy příčnicku. Je otázkou, zda by rozsah tohoto stroje stačil na přetržení zkoumaného vzorku. V případě, že by se vzorek ani v maximálním rozestupu čelistí nepřetrhl, musíme si určit, zda bude lepší využít jiného stroje nebo by stačilo provést zkoušku v max. rozsahu stroje bez přetržení vzorku. Předpokládáme, že námi zkoumaný vzorek nemá tak velkou tažnost, proto se přetrhne před vyčerpáním rozsahu stroje.

Tab. 9 - Další technické parametry zkušebního stroje

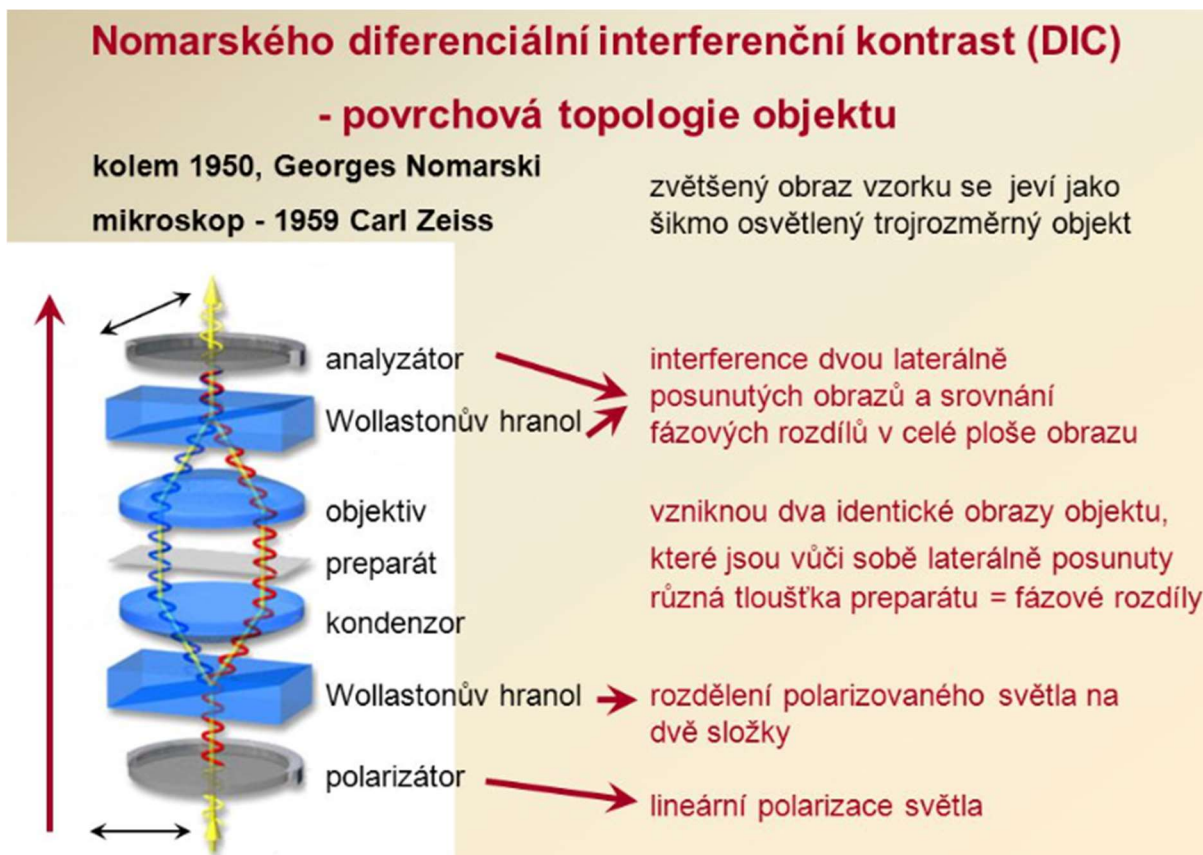
Typ stroje - model		5.100SP1
Jmenovité zatížení tah/tlak	kN	100
Minimální zkušební rychlost	mm/min	0,001
Maximální zkušební rychlost	mm/min	600
Návratová rychlost	mm/min	600
Přesnost řízení rychlosti	%	±0,5
Rozlišení polohy příčnicku	µm	1
Opakovatelnost změny	µm	2
Rozměry stroje A x B x C	Mm	2373x920x880
Rozměry stroje D x E x F x G	Mm	400x1130x125x1570
Hmotnost stroje	Kg	688
Tuhost rámu	mm/N	$3,4 \times 10^{-7}$
Barevná úprava	RAL	RAL 9005, eloxovaný hliník
Teplota pracovního prostředí	°C	10 až 35
Vlhkost pracovního prostředí	%	20 až 70
Napájecí napětí	V	3x230V/400V 50/60Hz
Příkon stroje	VA	2200

Software

Současné softwarové možnosti nejsou přizpůsobeny plastům. Proto by bylo potřeba dokoupit příslušný modul, který by byl schopen měřit požadované hodnoty na plastovém vzorku.

5.3 Optický mikroskop

Používaný metalografický mikroskop má označení Carl Zeiss Axio Observer Dm1 [41] a využívá software AxioVision.



Obr. 40 - Princip metody interferenčního kontrastu – Nomarského diferenciální kontrast (DIC Nomarski)

Nastavené parametry

- DIC Nomarskiho kontrastu, při zvětšení 200x
- DIC Nomarskiho kontrastu, při zvětšení 50x
- Normální kontrast, při zvětšení 200x

5.4 Program vyhodnocování mikroskopických snímků

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 – tzv. "plug-in", které rozšiřují jeho možnosti a je možné je vkládat bez omezení.

Popis procesu získání dat z mikroskopických snímků

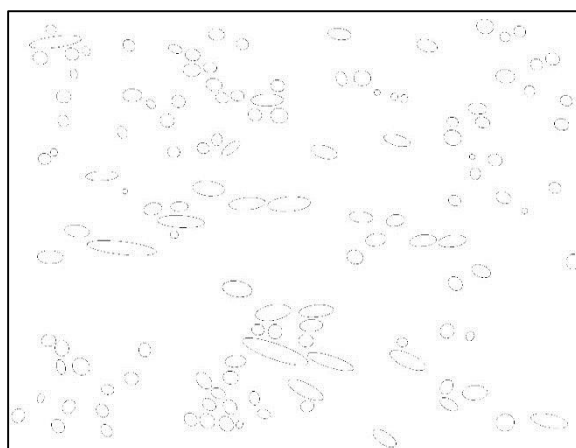
Získané obrázky musely být nejdříve v programu upraveny. Program není schopný vyhodnotit neúplná zrna, nebo zrna, která jsou různě poničena. Řešením byla úprava vláken a nečistot jako příprava pro následující měření.

Program je pak schopný vyhodnotit hranice v rámci celého obrazu. Nicméně díky struktuře získaných mikroskopických snímků je nutné ještě dále zarovnat pozadí – oblast mezi zrny a následně pak získat černobílou siluetu jednotlivých zrn.

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 vyzvořen 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 [K1].

Image J pak nakonec pro možnost porovnání původního a vyhodnoceného snímku ukáže vyhodnocené elipsy (Obr.41).



Obr. 41 - Výsledné zobrazení naměřených vláken

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

5.5 Experimentální zařízení a výsledky Likvidace matrice úplným spalováním "ash test"



a) Vyřezávací pila



c) Kompozit v kelímku v peci



b) Muflová pec



d) Váha přesně vyvážení Ohaus Explorer pro

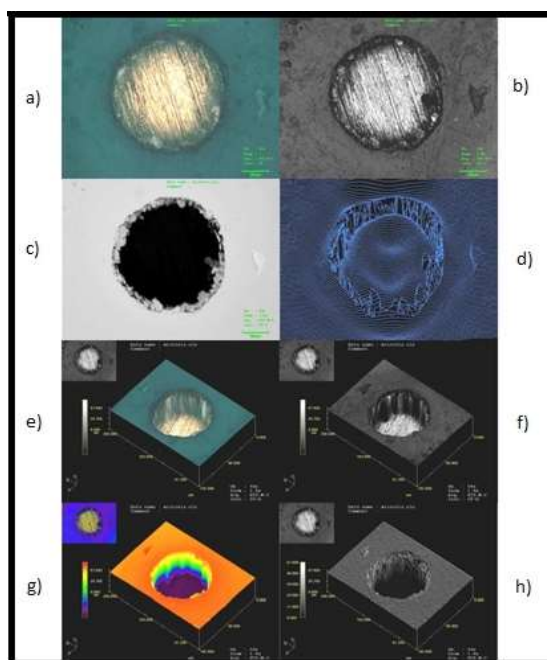
5.6 Konfokální laserová mikroskopie

Konfokální laserový mikroskop (např. Olympus LEXT) je představitel nové generace optických systémů s vysokou přesností 3D zobrazování a měření objektů od 120x do maximálního zvětšení 14 400x. Výhoda je, že není vyžadována žádná úprava vzorků jako například pokovení, vymražení, nebo nutnost měření ve vakuu.

Při použití konfokálního módu se dosahuje nesrovnatelně větší hloubky ostroty, než je tomu u konvenčních mikroskopů. To je dáno principem konfokálních mikroskopů. Speciální konstrukce rotujícího kotouče, umožňuje cíleně zastínit laserový paprsek tak, aby byla zobrazena vždy jen aktuální zaostřená rovina. Nezaostřené části obrazu jsou zatemněny. Vysoké hloubky ostroty je docíleno postupným skenováním jednotlivých vrstev obrazu a jejich následným softwarovým skládáním.

Na Obr. 42 je znázorněn sledovaný objekt v různých pozorovacích módech

- a) optický barevný mód,
- b) laserový konfokální 2D mód,**
- c) intenzitní mód,
- d) drátový intenzitní model,
- e) 3D plnobarevný model,
- f) 3D model s texturou,
- g) 3D model s barevným zdůrazněním výšky,**
- h) 3D drátový model).



Obr. 42 - Různé zobrazovací módy mikroskopu LEXT – microvia otvor 125 μ m

Tab. 10 - Nastavení konfokálního laserového mikroskopu Olympus Lext OLS5000-SAF

Zoom	1x
System name	OLS5000-SAF
Image size	389x199
Acquisition mode	Auto
Laser brightness	67.2
Laser intenzity	100.00
Offset	0
Confocal level	0.00
Beam size changer	Out
Shading correction	On
Optical noise filter	On
Colour brightness	Auto
Auto gain	on
Gamma	1.9
Red gain	1.903
Blue gain	1.364

6 METODIKY

6.1 Analýzy

6.1.1 Orientace vláken v kompozitu

Orientace vláken označuje strukturní uspořádání jednotlivých vláken při vývoji a výrobě vlákniny vyztužených kompozitů. Orientaci lze porozumět dvěma způsoby - ve dvou různých měřítcích:

- a) Makroskopický pohled na "orientaci vláken" je celkovým souhrnem orientací vláken bez znalosti orientace jednotlivých vláken.
- b) Mikroskopický pohled na "orientaci vlákna" je směr jednotlivého vlákna v prostoru.

Orientaci vláken lze chápat jako průměrný směr a statické rozložení vláken v daném objemu výstřiku.

Toto členění se v rámci disertační práce také používá k rozlišení metod analýzy a matematických simulačních modelů orientace vláken.

Rozsah, který zvyšuje pevnost, pružnost a další vlastnosti kompozitů, velmi závisí na orientaci vyztužených vláken.

6.1.2 Homogenita kompozitu

Plasty vyztužené vláknou mají nominální podíl vláken v celkovém kompozitu, který je uveden v hmotnostních procentech. Homogenita kompozitu v kontextu plastů vyztužených vláknou znamená rovnoměrné rozložení vláken v daném objemu výstřiku.

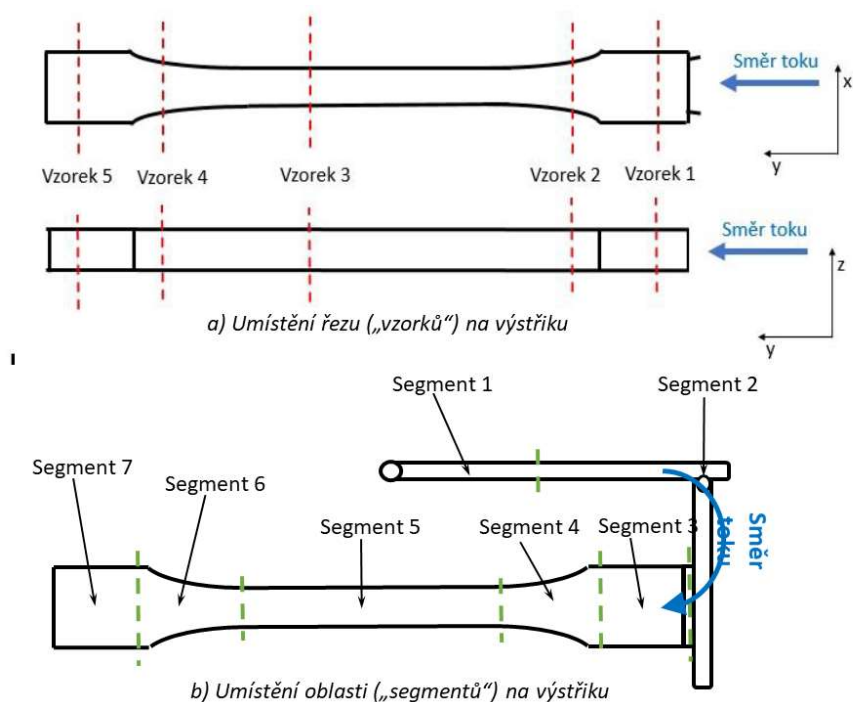
Ve výstřiku je 100 % rovnoměrného rozdělení vláken v matrici možné pouze teoreticky. Z různých důvodů může dojít k místní segregaci. V závislosti na stupni segregace a umístění deficitu vláken ve výstřiku se sníží pevnost, pružnost a další vlastnosti kompozitu. Proto homogenita je zásadní cíl výrobců výstřiků.

Homogenita je veličina, která je vždy makroskopická a určuje se počtem vláken ve dvou nebo více srovnávacích objemech.

6.1.3 Termíny pro určitá místa ve výstřiku, které jsou používány v analýzách, experimentech a diskusích

V následujících kapitolách se autor disertační práce odkazuje na určitá místa a oblasti výstřiku. Pro tento účel budou používány následující výrazy (viz Obr. 43):

- Vzorek:
Řez v kolmém směru toku. Příklad: vzorek č. 2 je řez ve středu kompresního segmentu č. 4.
- Segment:
oblast mezi dvěma vzorky. Příklad: segment č. 4 je oblast komprese.



Obr. 43 - Umístění a číslování vzorků a segmentů ve výstřiku

6.1.4 Kvalitativních podmínky pro prasknutí výstřiků kompozitních částí z polyamidu vyztužené krátkými skleněnými vlákny

Kvalitativní podmínky pro prasknutí výstřiků jsou:

1. Podmínky, které pochází z podstaty taveného kompozitu:
 - a. Tavenina matrice kompozitu má ne-newtonovskou podstatu. V důsledku toho dochází k nadprůměrnému smykovému napětí blízko stěn formy.
 - b. Vlákna se mohou v tavenině vyrovnat (orientace):
 - c. Vlákna mají poměr délky k průměru (AR), který vytváří anizotropii
 - d. Tavenina kompozitu a vlákna jsou suspenze. Vlákna se mohou na některých místech hromadit (segregace).
2. Podmínky, které pochází z geometrie výstřiku:
 - a. Průřez povrchu, kterým protéká tavenina kompozitu se zvětšuje. To vede k dekompresi taveniny, tzv. dekompresnímu toku (expanzní tok).
 - b. Průřez povrchu, kterým protéká tavenina kompozitu se zmenšuje. To vede ke stlačení taveniny, tzv. kompresnímu toku.
3. Podmínky, které pochází ze charakteristiky lomu výstřiku: existuje mechanismus, který vede k prasknutí materiálu.

Všechny tyto podmínky mění lokální pevnost kompozitu a anizotropii materiálu (pevnost, která závisí na směru zatížení).

6.2 Experimentální program

6.2.1 Hodnocení analytických metod nalezených v literatuře

V rámci disertační práce byl proveden rozsáhlý průzkum metod, pomocí kterých lze určovat nebo sledovat podmínky pro prasknutí výstřiků vláken. Tab. 11 zobrazuje přehled nalezených vyhodnocovacích metod.

Tab. 11 - Metody vhodné pro určování nebo sledování orientace a homogenity vláken

Zkušební vyhodnocovací metoda	destruktivní	Vyšetření místních vlastností	Vyšetření průměrných vlastností určitého objemu	Vyšetření průměrných vlastností v průřezu	Řez/lom vzorkem	Mikroskopické vyšetření	Drahé nebo komplikované vybavení	Další informace uvedeny v kapitole:
Zkouška tahem	X			X			X	Experiment 1 6.2.2
Plastografie (optická mikroskopie řezu)	X	X			X	X		Experiment 2 6.2.3
Likvidace matrice úplným spalováním („ash test“)	X		X			X		Experiment 3 6.2.4
Konfokální laserová mikroskopie např. zařízení LEXT (3D)	X	X			X	X	X	Experiment 4 6.2.5
Numerická simulace např. prostřednictvím sw CADMould		X						Vypočetní postup 6.4.3
Likvidace matrice pomocí rozpouštědel	X		X			X		6.3.1
SEM a CT	X	X			X		X	6.3.2
Měření tepelné roztažnosti				X				6.3.3
Rentgenová refraktometrie				X			X	6.3.4
Ultrazvukový dvojlom				X			X	6.3.5
Mikrovlny: měření lomu a útlumu				X			X	6.3.6

Hodnocení použité v Tab.:

X=Platí pro tuto metodu

Po pečlivém zvážení byly pro experimentální část disertační práce vybrány následující jednotlivé metody:

- Zkouška tahem (Experiment 1, 6.2.2),
- Plastografie (Experiment 2, 6.2.3),
- Likvidace matrice úplným spalováním – tzv. „ash test“ (Experiment 3, 6.2.4),
- Konfokální laserová mikroskopie (Experiment 4, 6.2.5),
- Numerická simulace prostřednictvím sw CADMould 3D (Vypočetní postup, 6.4.3).

Tyto metody byly vybrány, protože jsou běžně dostupné a použitelné v praktických (tzn. nejen laboratorních) podmínkách.

6.2.2 Experiment 1: Zkouška tahem

6.2.2.1 Teoretické základy tahové zkoušky

Teoretické principy tahové zkoušky vycházejí z Hookeova zákona. Pro výpočet smluvního napětí σ [MPa], platí rovnice (6.1) a pro výpočet poměrného prodloužení ε [-], [%], respektive jmenovitého prodloužení ε_t platí rovnice (6.2), resp. (6.3):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ [MPa]} \tag{6.1}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad \varepsilon_t = \frac{L_t}{L} \cdot 100 \text{ [%]}, \tag{6.2} \text{ (6.3)}$$

kde:

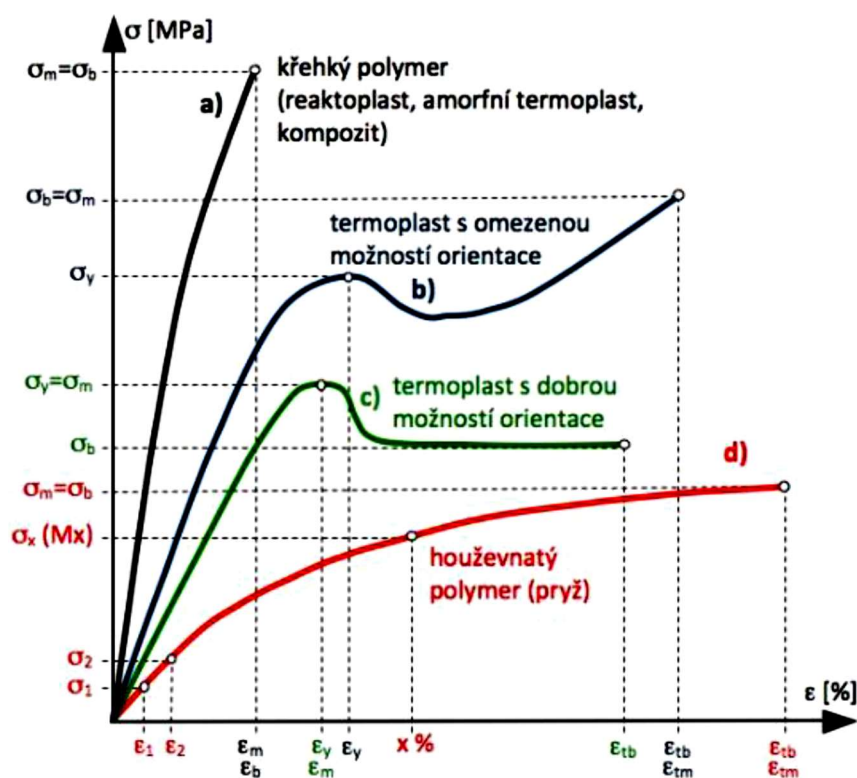
- F velikost působící síly [N],
- A_0 původní průřez zkušební tělesa [mm²],
- L_0 počáteční měřená délka zkušební tělesa [mm],
- ΔL_0 prodloužení zkušební tělesa [mm],
- L upínací vzdálenost mezi čelistmi [mm] a
- L_t zvětšení upínací vzdálenosti mezi čelistmi [mm].

Mez pevnosti σ_m je maximální napětí v tahu, které odpovídá největší síle F_{max} . Je definována jako:

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{A_0} \text{ [MPa]}. \tag{6.4}$$

Mez pevnosti nemusí souhlasit s napětím v okamžiku porušení zkušební tělesa (viz rovnice 6.4).

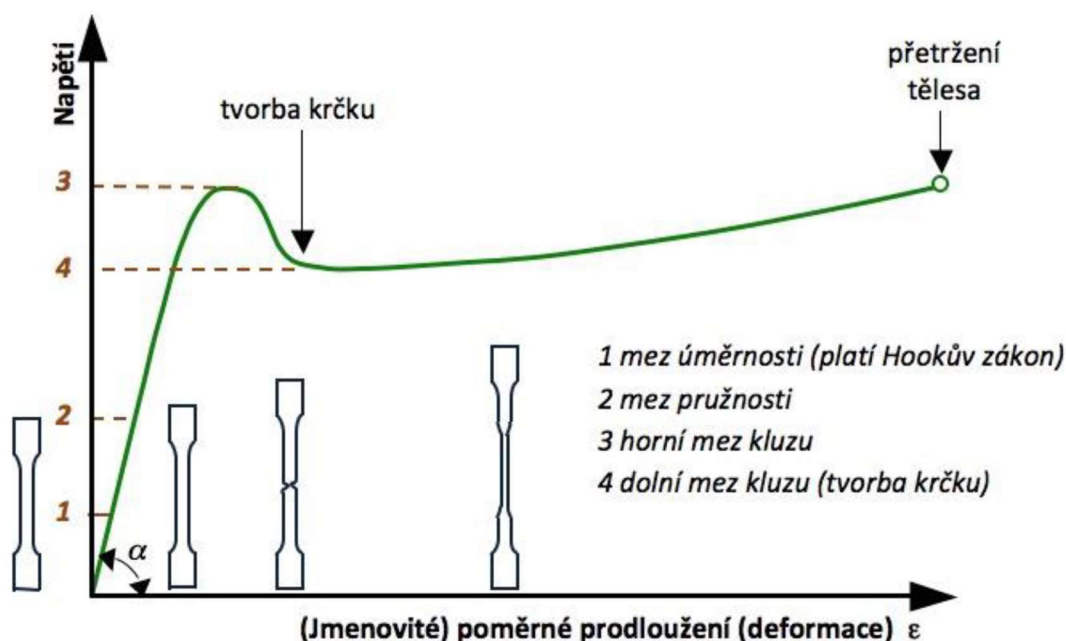
Postup stanovení pevnostních vlastností (v tahu) vychází z normy ČSN EN ISO 527 „Plasty – stanovení tahových vlastností“ [N2, N3]. Tato norma specifikuje obecné zásady pro stanovení tahových vlastností. Obsahuje metody, které se využívají k vyhodnocování chování zkušebních těles při namáhání v tahu. Ze závislosti napětí/poměrné prodloužení lze stanovit hodnoty modulu pružnosti při tahovém namáhání, mez pevnosti v tahu a další napěťové a deformační charakteristiky různých typů plastů (viz Obr. 44).



Obr. 44 - Pracovní diagram tahové zkoušky – Porovnání deformačních křivek různých typů plastů [42]

Vyztužené termoplasty jsou křehké, a proto vykazují chování v tahové zkoušce, jak je znázorněno na Obr. 44 a.

Napětí na mezi kluzu σ_y je napětí, při kterém začíná vznikat plastická deformace a tvoří se tzv. krček (viz. Obr. 45).



Obr. 45 - Deformační křivka polymerů s omezenou možností orientace, např. PE a PP [42]

Další důležitou charakteristikou je modul pružnosti v tahu E , který se stanovuje z deformačních křivek v oblasti, kde je lineární závislost napětí σ na poměrném prodloužení ε . Pro tuto oblast platí tzv. Hookův zákon (viz výpočtový vztah 6.5):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [MPa] \quad (6.5)$$

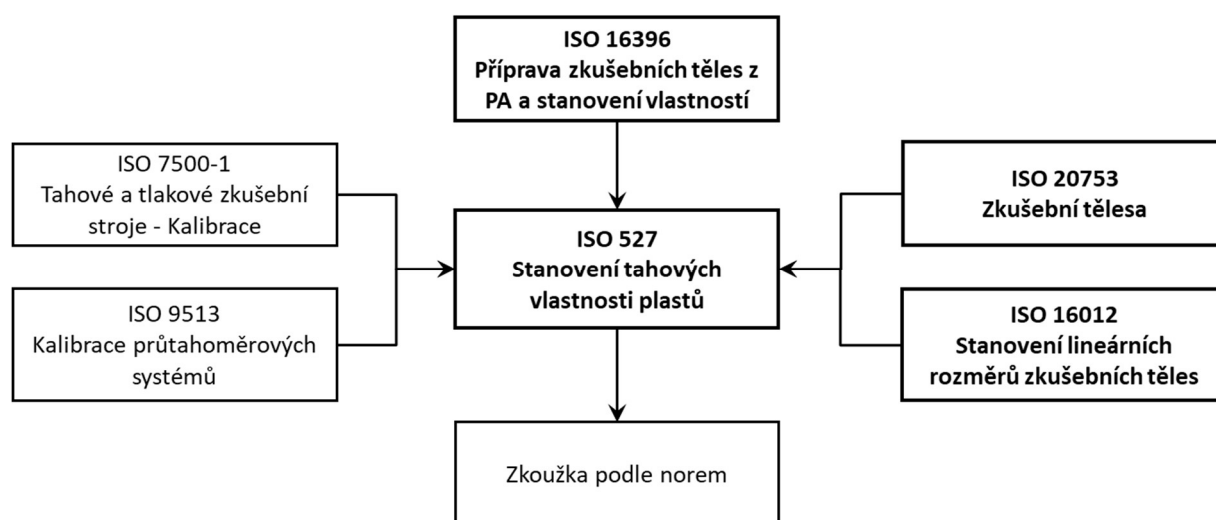
Zkouška tahem je statická zkouška a používá se téměř u všech technických materiálů. Slouží k získání hodnot meze kluzu a meze pevnosti potřebných pro výpočet konstrukčních prvků a pro volbu vhodného kompozitu.

6.2.2.2 Technické normy

Na experimentálním pracovišti Ústavu strojírenské technologie (ÚST) je běžná zkouška tahem nejčastěji používaná pro vzorky kovových materiálů.

Aby bylo možné zkušební trhacím strojem (viz 5.2) testovat i plastové vzorky, bylo potřeba vzít v úvahu platné normy pro zkoušku tahem plastových materiálů.

Vztah mezi zkušební normou ČSN EN ISO 527 „Plasty – Stanovení tahových vlastností“ [N2, N3] a normou pro parametry procesu ČSN EN ISO 16396-2:2017 „Plasty – Polyamidy (PA) pro tváření“ [N7] je uveden na obrázku 44).



Obr. 46 - Vztah mezi zkušební normou a normami pro parametry procesu pro polyamidy

Je důležité si uvědomit, že většina známých norem pro měření kovových zkušebních vzorků pro plasty neplatí. Proto bylo nutné je studovat a aplikovat v uvedených experimentálních krocích.

Pro měření plastových zkušebních vzorků je nutné [K2]:

- Vyrobit zkušební vzorky pro tahovou zkoušku, viz 4.9,
- dodržet při vstřikování parametry procesu (teplotu a rychlost) uvedené v ČSN EN ISO 16396-2:2017 „Plasty - Polyamidy (PA) pro tváření - Část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností“ [N7],
- měřit rozměry vzorků podle ČSN EN ISO 16012:2017 „Plasty - Stanovení lineárních rozměrů zkušebních těles“ [N5],
- změnit program zkušebního trhacího stroje a najít jiný způsob montáže snímače na zkušební vzorek v souladu s ČSN EN ISO 527 [N2, N3] a ČSN EN ISO 9513:2013 „Kovové materiály - Kalibrace průtahoměrových systémů používaných při zkoušení jednoosým zatížením“ [N4],
- měřit pevnost těles podle ČSN EN ISO 527-1 [N2] a ČSN EN ISO 16396-2 [N7].

Obr. 46 ukazuje všechny čtyři normy (zvýrazněny tučně), které byly v následujících testech aplikovány.

6.2.2.3 Příprava vzorků

Polyamidy mají nízký koeficient tření, a proto se zkušební tělesa obtížně upínají v tahovém měřicím stroji. Je to vidět na tom, že jeden ze dvou konců zkušebního tělesa, který je upnutý ve čelistech tahového zkušebního stroje, ztrácí přilnavost a nad určitou tahovou silou proklouzne. To vede k nesprávným výsledkům tahové zkoušky. K tomuto účelu byla v rámci řešení disertační práce (odzkoušeno v bakalářské práci [43]) vyvinuta metoda přípravy konců zkušebních těles pro tahovou zkoušku tak, aby k tomuto problému nedocházelo.

Proto byly před zkouškou tahem na všechna zkušební tělesa přilepeny hliníkové destičky, dva na každém konci upínací části vzorku pro tahovou zkoušku. Tento postup byl proveden následovně:

- Zdrsnění čtyř povrchů upínacího konce vzorku brusným papírem.
- Odmaštění povrchu lihem.
- Řezáním hliníkových desek, které se později nalepí na dva upínací konce zkušebního vzorku.
- Přilepením hliníkové desky dvousložkovým lepidlem (použito lepidlo Loctite EA 9466).
- Lisováním vzorků po dobu 24 hodin.

f) Bylo vyrobeno 58 vzorků a výsledky jsou uvedeny v 7.2.

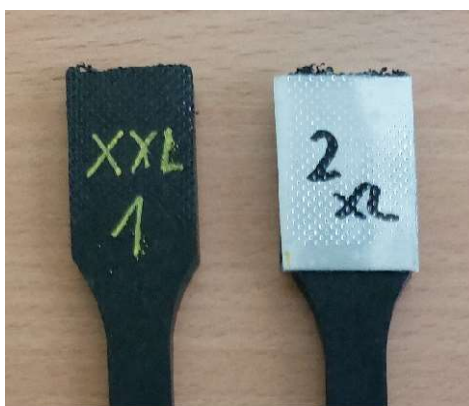
6.2.2.4 Průběh experimentu 1

- a) Nastavení různých parametrů procesu podle Tab. 37.
- b) Výroba zkušebních těles podle kapitoly 4.9.
- c) Zkouška tahem podle kapitoly 5.2.

6.2.2.5 Provedení experimentu 1

Při tahové zkoušce se ukázalo, že zkušební tělesa nelze v čelistech zkušebního stroje spolehlivě upnout. Nízký koeficient tření polyamidu způsobil, že zkušební tělesa při tahové zkoušce v čelistech prokluzovaly.

Proto byly nařezány hliníkové destičky a přilepeny k upínacím plochám dvousložkovým lepidlem Loctite EA 9466, viz Obr. 47. Tím se problém částečně vyřešil.



Obr. 47 - Zkušební těleso před a po lepení

6.2.3 Experiment 2: Plastografie

6.2.3.1 Teoretické základy tahové zkoušky plastografie

Tato kapitola je určena k vysvětlení pojmů metalografie, materiálografie a plastografie, (což jsou pojmy, které je vhodné rozlišovat) objasnění jejich původu a diferenciaci. Bohužel přesné definice těchto pojmů v technických normách nejsou obsaženy.

Metalografie je nejstarší a nejčastěji používaná metoda pro analýzu materiálu při větších zvětšeních (pod mikroskopem). Založil ji Henry Clifton Sorby v roce 1864. Termín "metalografie" se definuje jako „studie fyzikální struktury a komponent kovů mikroskopem“. Základy metalografie jsou popsány v [45]. Anglická definice metody převzatá z wikipedie:

Wikipedia.com, "Metallography":

Metallography is the study of the physical structure and components of metals, by using microscopy.

NOTE Ceramic and polymeric materials may also be prepared using metallographic techniques, hence the terms ceramography, plastography and, collectively, materialography.

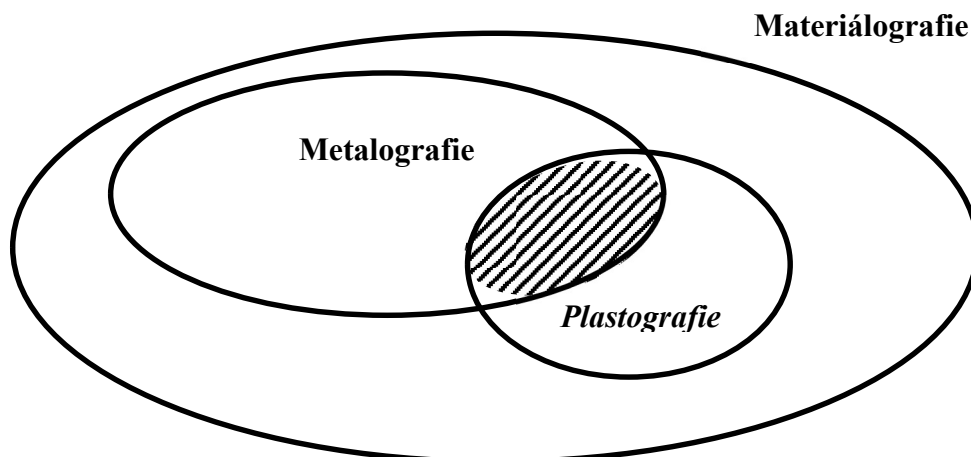
Materiálografie je novější metoda, která je technicky založena na metalografii. Dr. Wolfgang Piersig detailně popsal ve své práci o dějinách metalografie a materiálografie [44], že výraz „Materiálografie“ vyslovil Kay Geels v roce 1968. Kay Geels do dnešního dne publikuje standardní práce na téma materiálografie [45].

Definici materiálografie v češtině je těžké najít. Výrobce laboratorních zařízení a spotřebního materiálu a technologie ji definuje takto [46]:

„Materiálografie je obor obecně se zabývající pozorováním a dokumentací struktury objektů přírodních i uměle vytvořených člověkem. Je možno zkoumat strukturu kovů (metalografie), hornin a jiných přírodních

materiálů (petrografie), ale i uměle vyrobených objektů, jako jsou elektronické součástky. Prostředky materiálografie je možno využít i u zkoumání struktur některých plastů, biomateriálů atd.“

Plastografie je nejnovější vědecká disciplína v rámci materiálografie a slouží k objasnění a kvalitativnímu a kvantitativnímu popisu struktury a morfologie plastů a jejich kompozitů.



Obr. 48 - Grafické znázornění vztahů mezi metalografií, materiálografií a plastografií

Plasty a kompozity mají odlišné vlastnosti než kovy. Nejsou fyzikálně a chemicky tak stabilní jako kovové materiály. Proto je třeba brát ohled na následující:

- Plast není tak tuhý, ale je velmi elastický. Nedá se dobře brousit a leštit.
- Plasty jsou chemicky velmi nestabilní. Leptání nesmí plast rozpustit nebo chemicky poškodit.
- Plasty absorbují další látky (např. rozpouštědla). Způsob mazání a leptání musí být proveden tak, že morfologie plastu se nezmění absorpcí.
- Termoplast je tepelně citlivý. Nedá se dobře brousit a leštit, protože třením může změkknout, případně se až roztavit.
- Vyztužené termoplasty a kompozity: matrice a plnivo kompozitu se významně liší např. v tvrdosti a lomové houževnatosti. Proto je cílem přípravy kompozitních materiálů minimalizovat množství prasklin a štěpení ve vláknech již v přípravné fázi a zabránit delaminaci a extrakci vláken.

Vzorky termoplastů musí být připraveny a zkoumány jiným způsobem než kovové vzorky. Proto byla provedena rešerše, která je dále uvedena jako doporučení pro jednotlivé kroky plastografie.

Postup přípravy vzorku pro hodnocení materiálografického výbrusu se skládá z několika na sebe navazujících kroků:

- volba způsobu mikroskopie,
- volba místa odběru,
- technický odběr vzorku,
- označení vzorku,
- preparace vzorku,
- broušení vzorku,
- leštění vzorku,
- leptání vzorku,
- hodnocení.

Plastografický vzorek, jehož jedna plocha je připravena k plastografické analýze, se nazývá výbrus.

Každý z uvedených kroků velmi výrazně ovlivňuje kvalitu výsledného materiálografického výbrusu, a proto se preciznost provedení každého kroku projeví na budoucích možnostech hodnocení vzorku.

6.2.3.2 Plastografie jako aplikace metalografických metod na plastové materiály

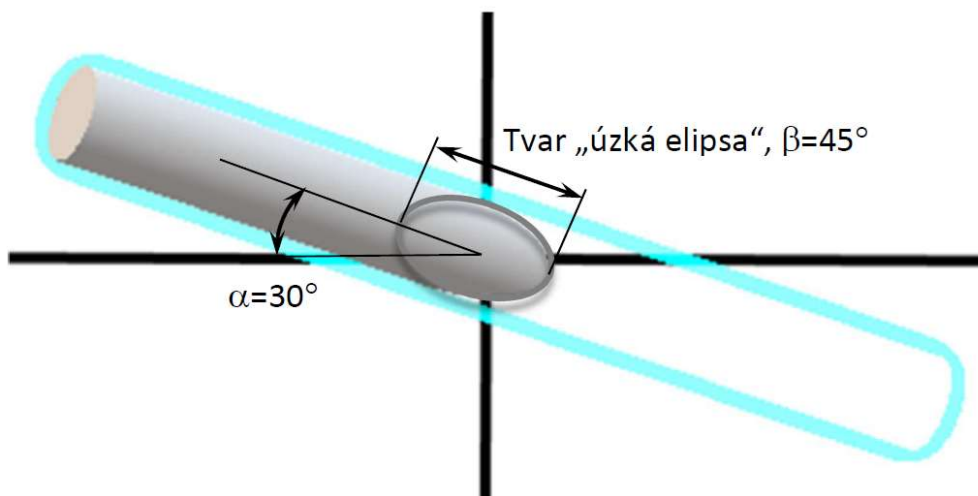
Vzorky plastů vyztužených skelnými vlákny musí být připraveny následovně:

- Technický odběr vzorku: přesná metalografická pila s vodním chlazením (použit typ Struers Labotom 3 s využitím řezných kotoučů Struers 20A25)
- Preparace vzorku: preparace za tepla (zalisování metalografických vzorků), nesmí být při přípravě překročena maximální teplota pro měknutí (podle technické listiny výrobce) – proto bylo použito ne lisování ale zalévání „za studena“ do zalévací hmoty Struers Versocit.
- Broušení vzorku: polyamidy jsou hygroskopické a působením vody nabobtnají. Pro broušení byl použit nový brusný papír (pouze papíry SiC se zrnitostí 180 – 1200 – 2000 - 4000 dle normy FEPA)
- Leštění: pomocí lešticího plátka (např. Trident, MD Dac ad.) a lešticí suspenze MasterPrep (velikost zrna 0,05 um).
- Leptání: neprovádí se kvůli termické a chemické nestabilitě plastů.

6.2.3.3 Metodika hodnocení místní orientace vláken

V určitém objemu vyztuženého plastu je obsaženo mnoho vláken. Jejich orientace a homogenita je předmětem studia. Bylo třeba vybrat a optimalizovat metodu zachycení orientace jednotlivých vláken.

Následující metoda, která byla vyvinuta pro zkoumání kovových kompozitů [47], byla v rámci řešení disertační práce přenesena na plastové materiály [48], [49].

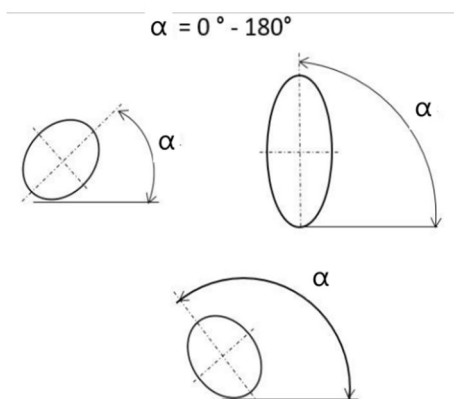


Obr. 49 - Příklad: orientovaná vlákna:
Úhel natočení vlákna v rovině příčného řezu $\alpha=30^\circ$, v rovině kolmé a míra natočení vlákna $\beta = 45^\circ$

Pro určení natočení vlákna jsou potřeba dva hodnotící parametry:

- a) Úhel natočení vlákna - α

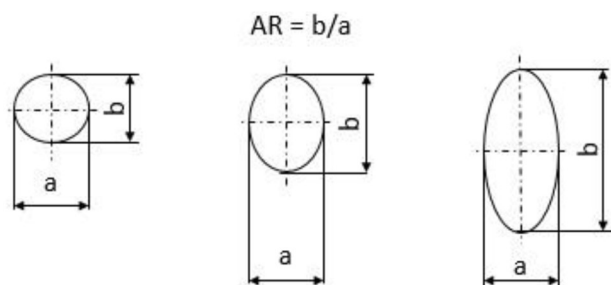
Míru natočení vlákna určuje v 3D prostoru jen 2D pohled. Dalším pohledem je úhel natočení, který udává, jakým směrem se to které vlákno pohybuje v rámci toku taveniny kavitou.



Obr. 50 - Princip měření úhlu natočení vlákna

b) Míra natočení vlákna (v AJ: „aspect ratio“ AR)

Je určena poměrem stran elipsy (vzniklé příčným řezem vlákna). Vlákno kolmé k toku má poměr stran 1:1, natočení vlákna pak zvětšuje poměr AR.



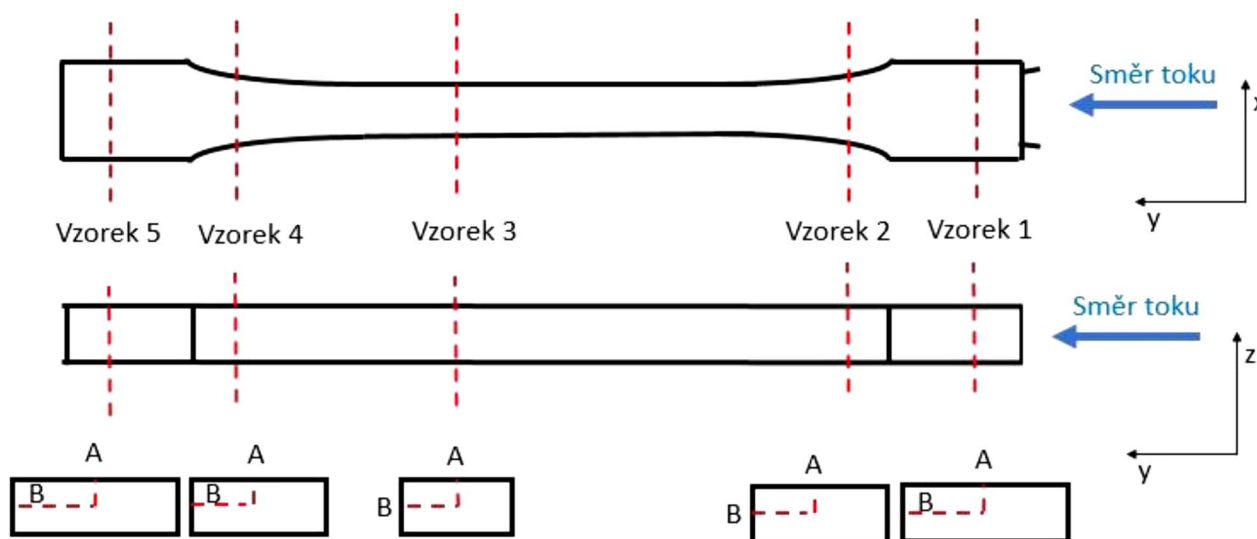
Obr. 51 - Princip měření parametru AR - míry natočení vlákna

Plastografie poskytne informaci o míře natočení vlákna (AR). Poté je nutné převést AR na úhel β . Řada 3 ve Tab. 12 poskytne pro konkrétní hodnoty AR (pravý sloupec tabulky) ekvivalentní úhel β (stupeň natočení, levý sloupec tabulky).

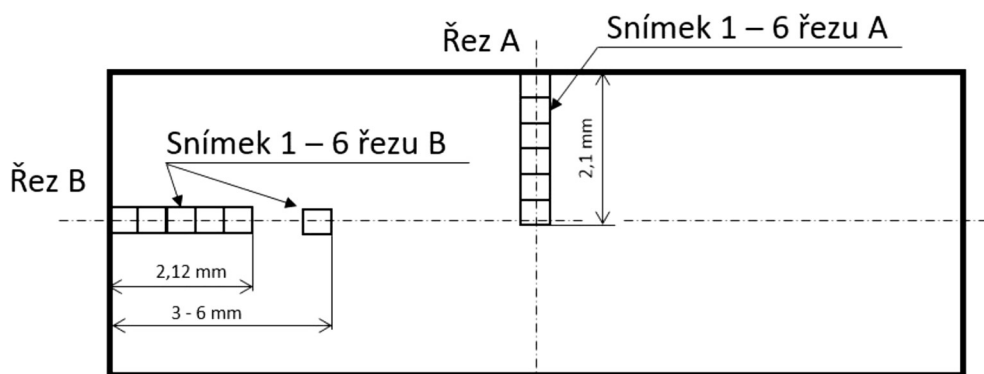
Tab. 12 - Porovnání tvaru elipsy (AR) pro různé stupně míry natočení vlákna (úhel β).

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

6.2.3.4 Volba místa odběru zkušebních vzorků pro plastografii



Obr. 52 - Zobrazení jednotlivých vzorků a řezů pro vyhodnocení pomocí plastografie



Obr. 53 - Zobrazení jednotlivých focených snímků na konkrétním řezu (vzorek 1 až 5 z Obr. 52)

Plastografie je časově náročná. Úplné vyšetřování celé plochy vzorku není prakticky možné. Z tohoto důvodu bylo nutné identifikovat body na základě dostupných analytických metod (viz kapitola 2.6), kde jsou nejpravděpodobnější odchylky orientace vláken. Tím je počet snímků omezený pro každý vzorek (1-5), odebraný ze zkušebního tělesa, bylo specifikováno 12 snímků (viz Obr. 53). Za celé těleso tak bylo hodnoceno celkem 60 obrázků. Byly tak pro hodnocení vybrány reprezentativní části zkušebního tělesa. Z uvedeného ale také vyplývá, že celý průřez zkušebního tělesa není pokryt hodnocenými snímky.

Plastografie je tedy metoda, pomocí které lze dobře zkoumat lokální hodnoty orientace ve výstřiku. Pro počet vláken (homogenita nebo segregace) neposkytne "úplný obraz" ale místní hodnoty, které lze porovnat s dalšími místními hodnotami, nebo u kterých může průměrná hodnota jednotlivých oblastí dát náznak složitější reality. Další realizovaná zkouška (Likvidace matrice úplným spalováním – tzv. „ash test“) je pro tento účel vhodnější, protože měří všechna vlákna v celém vzorku.

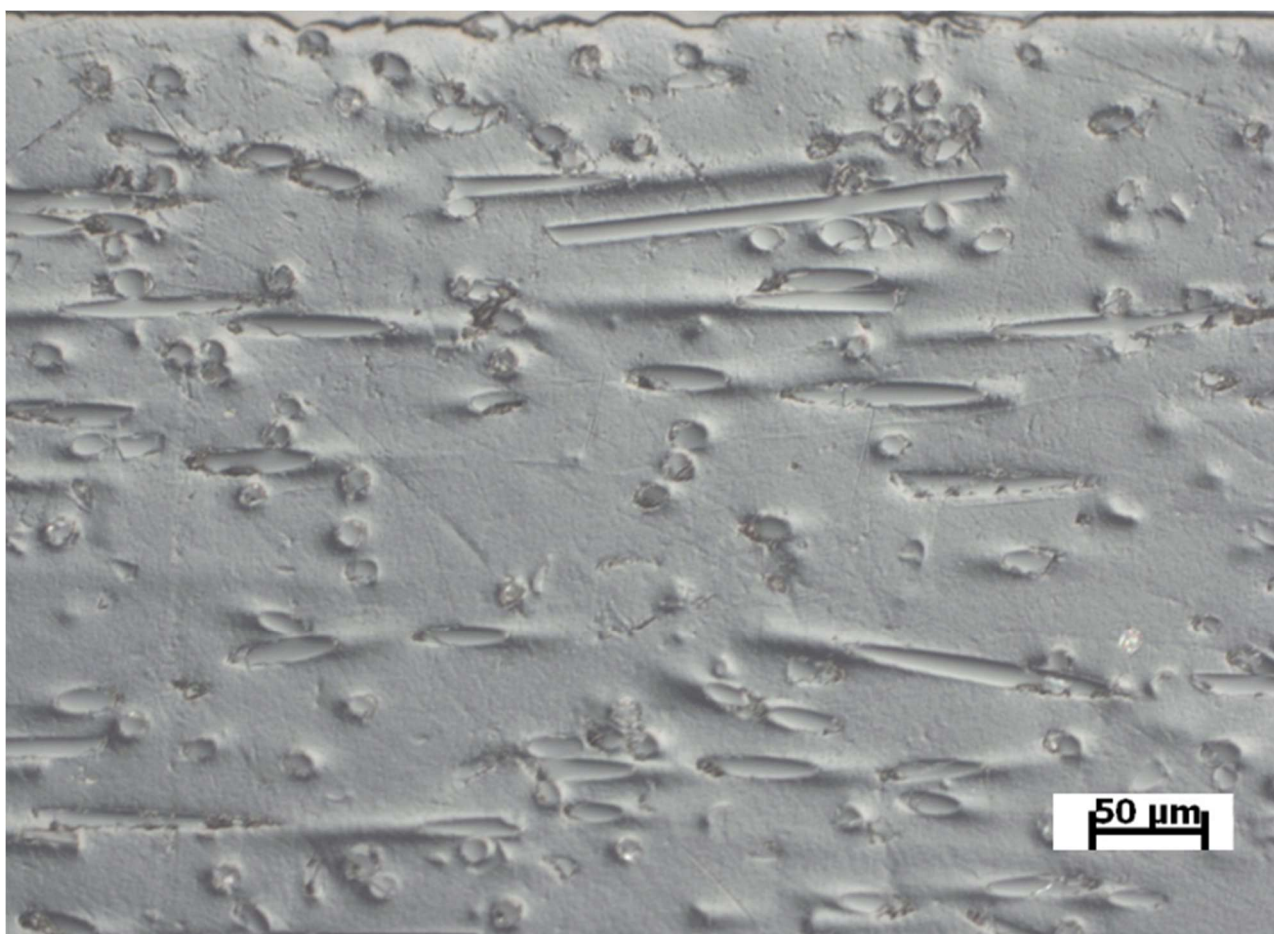
6.2.3.5 Příklad pro stanovení místní orientace a homogenity vláken v daném průřezu vzorku

Místní homogenita ve výstřiku může být zachycena počtem vláken na plastografickém snímku, vychází se z jednoduchého předpokladu, že:

- Pokud je počet vláken na dvou plastografických snímcích přibližně stejný, lze předpokládat, že jsou vlákna homogenně rozdělena.
- Pokud je počet vláken na snímku velmi odlišný, jsou vlákna rozdělena nehomogenně.

Tato metoda je vhodná pro zkoumání závislosti orientace a homogenity vláken na různých parametrech procesu.

Pokud by mělo být cílem statisticky zajistit výsledky, pak je třeba analyzovat velké množství vzorků. V tomto případě je metoda statistického hodnocení plastografických snímků stále příliš časově náročná a měla by být zjednodušena (příp. zautomatizována pomocí speciálního SW).

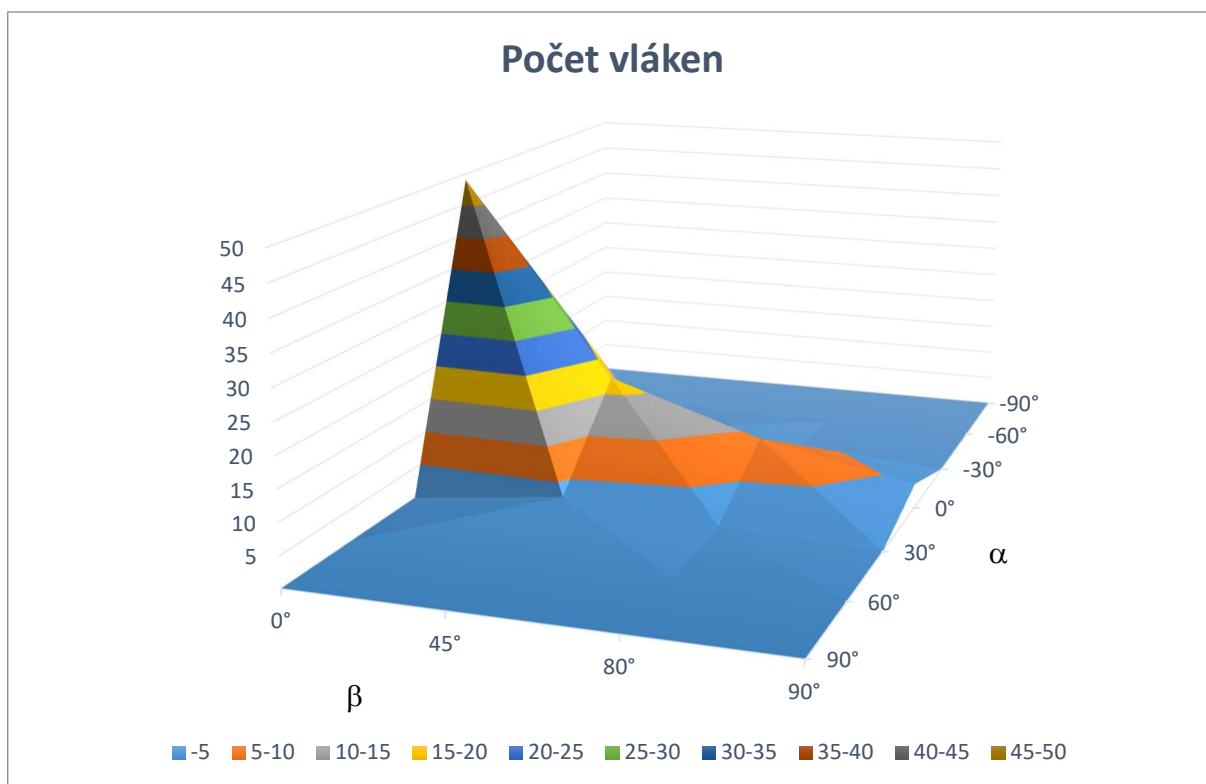


Obr. 54 - Plastografický snímek příčného řezu na povrchové vrstvě zkušební vzorku (PA6+PA66)+ GF30 vytvořeného pomocí DIC Nomarskiho kontrastu, při zvětšení 200x

Vlákná na Obr. 54 byly vyhodnoceny počty a orientace vláken a zaznamenány do Tab. 13. Obr. 55 shrnuje statistické výsledky. V experimentální části disertační práce bylo tímto způsobem analyzováno celkem 60 snímků (7.3).

Tab. 13– Příklad vyhodnocení počtu orientovaných vláken na obrázku 50

Počet vláken		Orientace v rovině příčného řezu						
		α						
		90°	60°	30°	0°	-30°	-60°	-90°
Orientace kolmá k příčnému řezu β	0°				49			
	45°			3	17	2		
	80°			1	9			
	90°				4			



Obr. 55 - Grafické znázornění orientace vláken ve dvou osách (data viz Tab. 13)

6.2.4 Experiment 2a

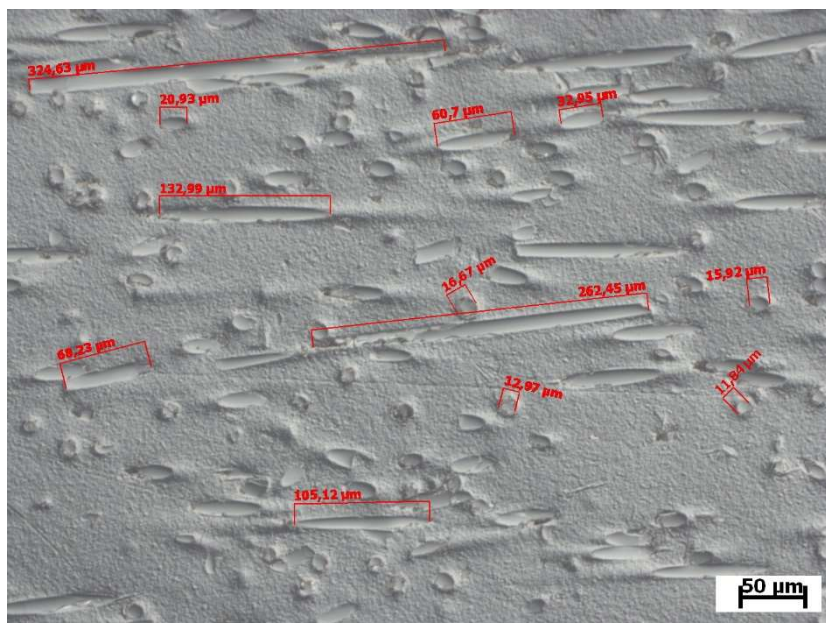
6.2.4.1 Průběh experimentu 2a:

- a) Rozřezání zkušebních těles do vzorků.
- b) Stanovení poměru délky k průměru vlákna pomocí Plastografie.
- c) Výpočet poměru délky k průměru vláken.

6.2.4.2 Provedení experimentu 2a:

Realizace experimentu probíhala bez problémů.

Pro vyhodnocení byl použit mikroskop Carl Zeiss Axio Observer, který má funkci v podpůrném sw, pomocí které lze vzdálenosti na snímku měřit a přímo dimenzovat (viz 5.3). Zkoumáním snímků materiálu Grilon TSG-30/4 použitého v disertační práci bylo v rámci hodnocení pěti snímků změřeno 25 nejdelších vláken a vyhodnoceny jejich průměry (příklad vyhodnocení je uveden na Obr. 56). Tato metoda hodnocení podléhá určitým nevyhnutelným nepřesnostem. Zvolená metoda měření zahrnuje nepřesnosti měření délky v důsledku možného poškození vlákna nebo v důsledku sférické orientace (vyrovnání) vlákna. V každém případě je vypočítaná hodnota menší než hodnota skutečná.



Obr. 56 - Příklad měření průměru a délky vláken pro materiál Grilon TSG-30/4, způsob zobrazení - DIC Nomarski při zvětšení 200x

6.2.5 Experiment 2b: Měření orientace vláken v různých řezech výstřiku a výpočet lokálních hodnot efektivity natočení vláken (PENV)

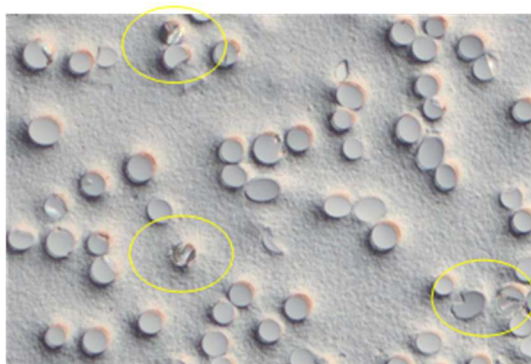
6.2.5.1 Průběh experimentu 2b:

- Rozřezání zkušebních těles do vzorků podle Obr. 59.
- Stanovení orientace všech vláken na každém vyhodnocovaném snímku (viz kapitoly 5.3 a 5.4).
- Vypočítání hodnoty PENV (vzorec 6.2).
- Prezentování výsledků graficky.

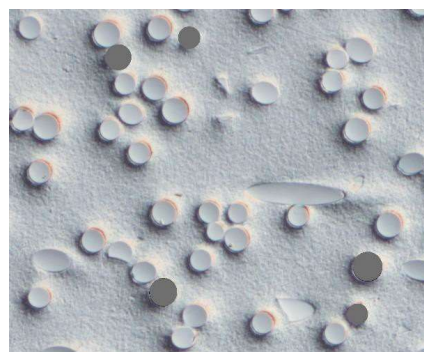
6.2.5.2 Provedení experimentu 2b:

Při realizaci experimentu se ukázalo, že SW vyhodnocování plastografických snímků (viz 5.4) není schopen vyhodnotit neúplně zobrazené příčné řezy vlákeny (ve formě eliptických tvarů) nebo průřezy vlákeny, které jsou poškozeny. Bylo proto třeba vyvinout metodu, která zajistí, aby použitý SW takového příčné řezy vlákeny také zaznamenal a započítal.

Řešením byla úprava vláken a nečistot jako příprava pro následující měření. Bylo nutné příčné řezy vláken nejdříve v SW pro úpravu obrázků překrýt elipsou a vybarvit je stejnou barvou (aby byly SW rozpoznány). Potom byla vlákna (resp. jejich příčné průřezy) správně zaznamenány a započítány (viz Obr. 57).



a) Poškozená vlákna na snímku



b) Úprava vláken a nečistot jako příprava pro následující měření

Obr. 57 - Příprava snímku pro následující měření

S touto časově náročnou přípravou všech 60 snímků, bylo možné určit hodnoty míry a úhlu natočení jednotlivých vláken a uvést je do tabulky č. 23. V tabulce je míra uvedena ve sloupcích, úhel v řádcích.

Tímto způsobem byly zaznamenávány výsledky pro 8 784 vláken, spočítáno a vyměřeno natočení ve všech třech rozměrech.

6.2.6 Experiment 3: Likvidace matrice úplným spalováním („ash test“)

6.2.6.1 Teoretické základy likvidace matrice úplným spalováním („ash test“)

Tato metoda je založena na rozdílu teplot spalování matrice a výztuže. Při této metodě se plastová matrice cíleně spálí, aby se odhalila struktura vláken. Spalování probíhá v muflové peci při teplotě nad 600 °C. V angličtině se tato analýza označuje jako „ash test“. Výrobce materiálu BASF používá tento test k analýze dlouhých skleněných vláken ve složených součástech. Tímto způsobem lze ověřit i hmotnostní podíl skleněných vláken v kompozitu (resp. jeho jednotlivých částech), což bylo použito i v experimentální části disertační práce



Obr. 58 - Ozubené kolo vyrobené z PA-GF před a po spalování (vpravo) [31]

6.2.6.2 Popis použité zkušební metody

Tato metoda využívá rozdílu v teplotě spalování plastové matrice (nad 350 °C) a teploty „tavení“ skleněných vláken (nad 950 °C). Když se kompozitní vzorek zahřeje na 650°C, matrice zcela shoří, zatímco skleněné vlákno zůstává nepoškozené a tvoří „popel“ po „spáleném vzorku“. Proto se tato metoda označuje z angličtiny jako „ash test“.

Tato metoda neměří místní hodnoty, ale hmotnostní podíl vláken určité části zkušební vzorku – výstřiku.

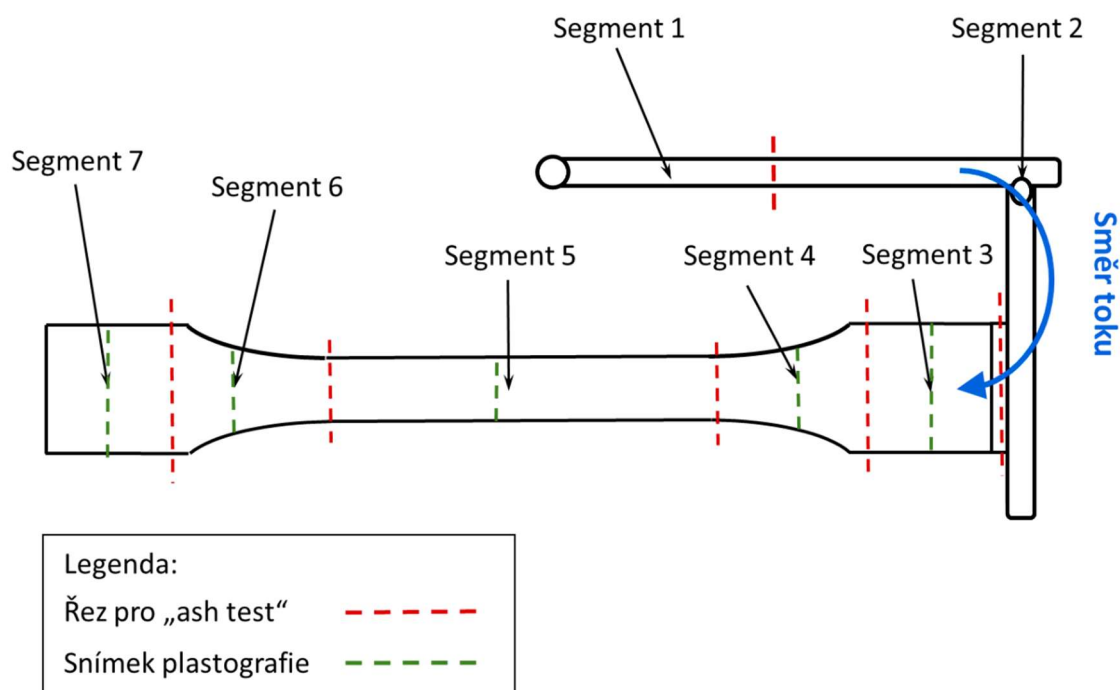
Pro zkoušky homogenity byla v rámci řešení disertační práce vyvinuta následující metoda [K4], která je založena na informacích od výrobců plastů [50] a měřicího zařízení [51].

- Polyamid je hygroskopický a obsahuje cca. 2 % vlhkosti. Proto je třeba, odstranit vlhkost uloženou v materiálu – pomocí sušení v peci (při teplotě 80 °C, po dobu 4-12 h).

- Pro každý vysušený vzorek dále příprava pokračovala následujícím způsobem: Byly vytipovány oblasti zkušební vzorku (viz Obr. 45), které byly spalovány v peci na speciálním kovovém kelímku, aby došlo k zachycení zbytkového popela po zkoušce. Postup prací byl následující:
 - Přesné zvážení hmotnosti použitých kovových kelímků před zkouškou
 - Přidání vysušených vzorků do jednotlivých kelímků
 - Zvážení hmotnosti celé sestavy (kelímek + zkušební vzorek)
 - Dokumentace získaných údajů
- Vložení zkušebních sad (tzn. Zvážených a vysušených vzorků + kelímků) do muflové pece (ohřáté na teplotu 650 °C)
- Spalování matrice zkušební vzorků (doba výdrže po vyhoření matrice – cca 5 minut)
- Vyjmutí vzorků (popela) z pece + ochlazení
- Zvážení hmotnosti vzorků (tzn. Zbytkového popela včetně zkušební kelímků),
- Odebrat vzorky (popel) + ochladit kelímky
- Výpočet čisté váhy popela (tzn. Zbýlých skleněných vláken) a dokumentace výsledků

6.2.6.3 Volba místa odběru pro „ash test“

Likvidace matrice úplným spalováním analyzuje hmotnost objemu zbytkového popela (tvořeného skleněnými vlákny). Zkušební těleso je proto rozděleno na segmenty 1-7 podle Obr. 59.



Obr. 59 - Zobrazení jednotlivých oblastí (segmentů) a řezů použitých pro „ash test“

Výřezy segmentů jsou záměrně umístěny tak, aby materiál v segmentu odpovídal materiálu zkoumanému pomocí plastografie jako Vzorky 1-5 (viz Obr. 53) a výsledky tak byly porovnatelné.

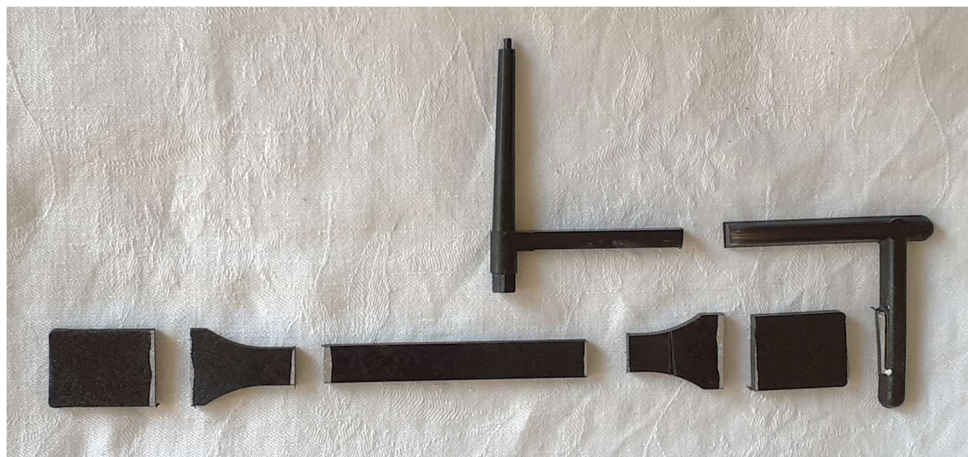
To umožňuje porovnat výsledky „ash testu“ s výsledky plastografických šetření (např. segmentu 5 je ekvivalentní vzorek 3). Bylo analyzováno sedm vzorků.

6.2.6.4 Průběh experimentu 3

- Rozřezání zkušebních těles do segmentů podle Obr. 59.
- Jednotlivé segmenty jsou samostatně zváženy a poté spáleny.
- Stanovení hmotnostního podílu popela pro každý segment a určení odchylky od průměrné hodnoty.

6.2.6.5 Provedení experimentu 3

Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku byly podle Obr. 59 označeny na správných místech a rozřezány na segmenty vyřezávací pilou.



Obr. 60 - Zkušební těleso (včetně „vtokové soustavy“) z Grilonu rozřezané na sedm segmentů

Vyřezávací pila poskytla dobrý, hladký řez díky vysoké rychlosti řezání. Pilový list takových pil je velmi úzký, takže ztráty materiálu jsou minimální.



Obr. 61 - Sedm segmentů z Obr. 60 po spálení - bílá hmota v kelímcích jsou zbytky skleněných vláken

Při spalování vzorků bylo důležité zajistit, aby se plast v peci po krátké chvíli sám vznítit. Proto byla dvířka pece mírně otevřená (pro zajištění přívodu čerstvého vzduchu) a k zachycení výfukových plynů byl použit odvzdušňovací otvor a mobilní odsávání s filtrací (které je běžně používáno při svařovacích procesech).

Zbylý materiál po spalování má bublinkovitou strukturu; bublinky se tvoří tam, kde je plast lokálně zplyňován. Proto je zbytkový materiál (popel) po spalování objemově větší než výchozí materiál (Obr. 62).



Obr. 62 - Popel po úplném spálení segmentu

Zbylý materiál po spalování je bílý. To znamená, že plast (matrice kompozitu) je úplně spálený. Dokonce i barvivo "Carbon black" (technické saze) jsou zcela spáleny.

Pro analýzu (ash test) bylo připraveno 7 různých vzorků (viz Obr. 63), které postupně simulovaly plnění vstřikovací formy kompletního výrobku (výstřiku zkušební tělesa pro tahovou zkoušku, vzorek I) přes jednotlivé fáze částečného vyplnění formy, které odpovídají vybraným zkušebním segmentům.

Vzorek I má 7 segmentů, zatímco vzorek II pouze 6 segmentů, vzorek III 5 segmentů apod.



Vzorek VII Segment 1 Vzorek VI Segment 1-2 Vzorek V Segment 1-3 Vzorek IV Segment 1-4 Vzorek III Segment 1-5 Vzorek II Segment 1-6 Vzorek I Segment 1-7

Obr. 63 - Sedm vzorků, které byly analyzovány (a jejich označení)

6.2.7 Experiment 4: Konfokální laserová mikroskopie

6.2.7.1 Teoretické základy konfokální laserové mikroskopie

Měření bylo provedeno mikroskopem na katedře materiálu a strojírenské metalurgie Fakulty strojní, Západočeské univerzity v Plzni. K tomuto účelu byl použit konfokální laserový mikroskop Olympus Lext OLS5000-SAF (3D).

Pro toto zkoumání byla použita zkušební tělesa, porušená po zkoušce tahem. Protože je tato vyšetřovací metoda velmi nákladná, byla zkoušena jenom tři zkušební tělesa s charakteristickým porušením (lomem) pro různé rychlosti vstřikování (jedno zkušební těleso s rychlostí výstřiku „rychlé“=S, jedno „střední“=M a jedno „pomalé“=L).

Parametry nastavení mikroskopu pro toto vyšetření jsou shrnuty v Tab. 10.

6.2.7.2 Průběh experimentu 4

- a) Výroba zkušebních těles probíhala podle kapitoly 6.2.3. Byly použity tři zkušební tělesa, s různými procesními parametry rychlosti vstřikování (Tab. 7) označené:

- i. nízkou rychlostí “L“,
 - ii. střední rychlostí “M“ a
 - iii. vysokou rychlostí “S“
- b) Zkouška tahem provedená podle kapitoly 7.2
 - c) Nastavení mikroskopu:
 - d) Analýza lomové plochy konfokálním laserovým mikroskopem (3D), Olympus Lext OLS5000-SAF

6.2.7.3 Provedení experimentu 4

K analýze lomu zkušebních těles po zkoušce tahem byly použity tři metody mikroskopie:

- a) Metoda laserové konfokální mikroskopie - 2D mód (obr. 33b) pro detekci vzorů na povrchu lomu,
- b) Metoda 3D model s barevným zdůrazněním výšky, (Obr. 33g) pro měření lokální výšky povrchu a
- c) Metoda 3D drátového modelu (obr. 33h) pro vyhodnocení 3D modelu prohlížením v trojrozměrném prostoru.
- d) Snímky 3D drátového modelu zkušebních těles vyráběno s procesními parametry rychlosti vstřikování: nízkou “L“, střední “M“ a vysokou rychlostí “S“:

6.3 Experimentální metody, které nebyly vybrány

6.3.1 Likvidace matrice pomocí rozpouštědel

Tato metoda je o cíleném rozpouštění matrice vhodným rozpouštědlem, aby bylo možné následně analyzovat strukturu vláken. Pozorování orientace a homogenity vláken je poté prováděno opticky.

Polyamid je rozpustný jen v silně polárních rozpouštědlech. Hledání vhodných rozpouštědel ukázalo, že je možno použít osm typů rozpouštědel⁵, ale měla by se vzít v úvahu pouze dvě, protože ostatní jsou toxická.

- a) Vhodná rozpouštědla polyamidu:
 - Kyselina mravenčí
 - Kyselina sírová
- b) Při bližším zkoumání má však tato metoda mnoho nevýhod:
 - Poskytuje pouze kvalitativní subjektivní výsledek.
 - Rozpouštědla rozpouštějí plast v silnějších částech jen velmi pomalu.
 - Metoda je sporná z hlediska bezpečnosti práce.

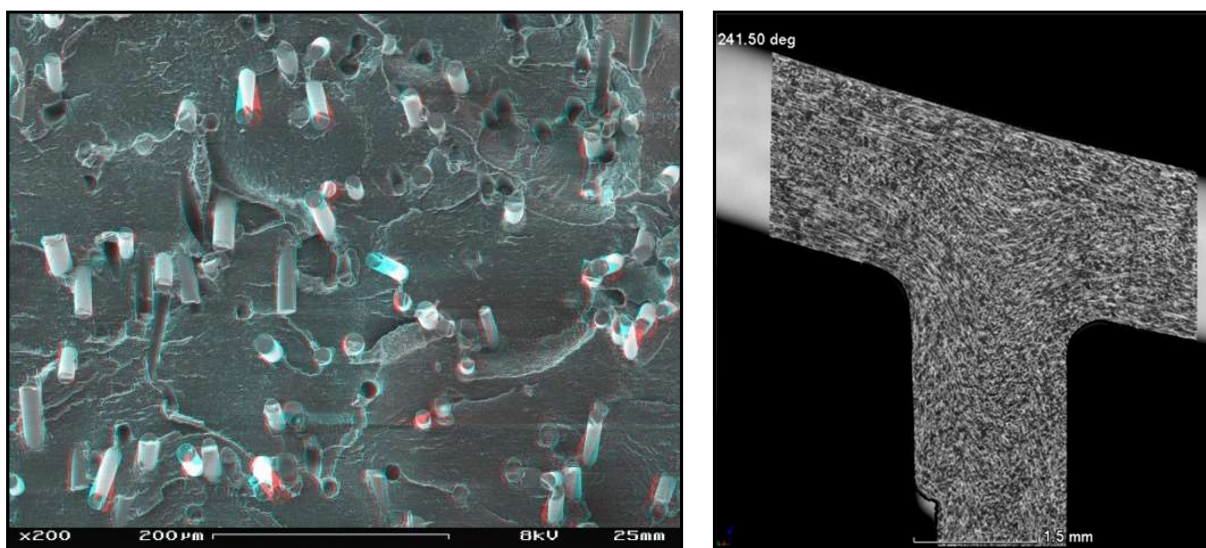
6.3.2 SEM a CT

Stanovení orientace a heterogenity je relativně složitý problém. Dosavadní zveřejněné práce na toto téma využívají komplexní metody posouzení, jako je např.:

- řádkovací elektronová mikroskopie (SEM - scanning electron microscope) [11]
- nebo rentgenová mikrotomografie (CT - computer tomography) [52],

kteřé jsou však poměrně nákladné (především investičně, protože vyžadují vysoce sofistikovaná zařízení) a nejsou vždy jednoduše použitelné v průmyslové praxi.

⁵ Kyselina sírová, Kyselina mravenčí, Kyselina fosforečná, Fenol, o – Kresol, Kyselina trichloroctová, Tetrafluorpropanol, Dimethylformamid



a) SEM - scanning electron microscope [11]

b) CT - computer tomography [53]

Obr. 64 - Komplexní metody posouzení orientace vláken v dosavadních zveřejněných výzkumných pracích

6.3.3 Měření tepelné roztažnosti

V případě kompozitu je tepelná roztažnost termoplastické matrice velká, zatímco tepelná roztažnost skleněných vláken je nízká. Proto bude kompozit s vyšším podílem skleněných vláken expandovat méně než kompozit s nižším podílem skleněných vláken. Kompozit se bude také rozpínat více příčně k orientaci skleněných vláken než podélně.

V [7] je diskutována metoda zkoumání orientace a homogenity. Autor zdroje [20] se však domnívá, že koeficient tepelné roztažnosti klesá se zvyšujícím se modulem pružnosti. Výsledkem je, že očekávané odlišné expanze vzorků jsou příliš malé. Proto byla tato metoda vyřazena, resp. nebyla použita v experimentální části disertační práce.

6.3.4 Rentgenová refraktometrie

Při tomto postupu je kompozitní vzorek ozařován fokusovaným rentgenovým zářením. V závislosti na poloze a počtu vláken je rentgenový paprsek odříznut na délku od povrchu jednotlivého vlákna a měřen po vychýlení [54] [4].

Tento proces je velmi složitý a poskytuje pouze celkové hodnoty, což znamená, že orientace je měřena pouze jako střední hodnota komponent.

6.3.5 Ultrazvukový dvojlom

Podobným způsobem jako v předchozím případě (viz kapitola 6.3.4) lze ultrazvuk použít k analýze orientace [55] [38]. Ultrazvuk zasáhne povrch vzorku a odráží se od povrchů vláken.

Tato metoda však neměří do hloubky. Je možné získat pouze přehled o orientaci vláken na povrchu.

6.3.6 Měření na mikrovlnách (lomu a útlumu)

V [56] Steegmüller a Diener vyvinuli proces, který využívá útlum mikrovlnného záření vlákny v matrici. Komponenta je rastrovaná v šířce a hloubce. Výsledky jsou zobrazeny graficky podobně jako u MKP.

Vzhledem k uspořádání mikrovlnného zářiče jsou však naměřené hodnoty vždy zprůměrovány přes tloušťku součásti [7]. To znamená, že tato metoda určuje spíše anizotropii než konkrétní orientaci.

6.4 Vypočty

6.4.1 Vypočet pohyblivosti vláken v kompozitu

Do značné míry jsou termoplasty vyztužené krátkými vlákny považovány za homogenní materiály, které nemají ve tvarovaném dílu žádné významné anizotropie (toto je zejména uváděno výrobcí materiálů) [K1].

Existuje však několik důvodů, proč lze tento předpoklad anizotropie považovat za nesprávný:

- a) Poměrně vysoký poměr délky k průměru vláken:
 Již se lze dočíst v literatuře [57]: „Typická skleněná vlákna pro vyztužení mohou mít například tloušťku 11 μm a délku 300 μm .“ V technické praxi jsou krátká vlákna obvykle delší, než výše uvedená „definice“ naznačuje, jejich délka je tzv. "střední".
- b) Dalším důvodem, proč lze vlákna orientovat, je to, že podíl v objemu kompozitu je relativně malý.

$$V_f = M_f * \frac{\rho_m}{\rho_f} = 30 \text{ hmot. \%} * \frac{1\,084 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2\,575 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 12,63 \text{ obj. \%} \quad (6.5)$$

kde:

M_f	hmotnostní podíl vláken	
V_f	objemový podíl vláken	
ρ_m	měrná hmotnost matrice polyamidu	1 084 kg/m^3
ρ_f	měrná hmotnost vláken (E sklo)	2 575 kg/m^3

Kompozit, který obsahuje vlákna s hmotnostním podílem 30 %, je vyplněn vlákny pouze osminou svého objemu. Ve skutečnosti je kompozit ještě méně plněný než tavenina, protože polyamid se během zpracování rozpíná o více než 10 %, E-sklo téměř vůbec.

Během zpracování ve formě taveniny je kompozit naplněn pouze do devítiny svého objemu. Proto je věrohodné, že se vlákna mohou během zpracování pohybovat a otáčet.

- c) V různých literárních zdrojích týkajících se tokového chování, pevnosti a lomového chování zmíněných v teoretické části se uvádí, že takové relativně dlouhé vlákno vede k anizotropiím.

Na základě těchto úvah lze předpokládat, že vlákna v TKSv jsou dostatečně dlouhá (anizotropní) a mají dost prostoru, aby se orientovaly [K1]. Ve výstřiku vyrobeného z TKSv jsou vlákna významně orientována a tato orientace způsobí anizotropii mechanických vlastností.

6.4.2 Vývoj koeficientu pro statistické vyhodnocení orientace (natočení vláken)

6.4.2.1 Efektivita natočení vláken (ENV)

Metoda plastografie poskytuje hodnoty (α , AR / β) pro každé vlákno. Aby bylo možné v rámci disertační práce vyhodnotit snímek jako celek, bylo nutné vyvinout parametr, který tyto hodnoty smysluplně shrnuje. To umožňuje určit a porovnat orientaci ve vzorku.

Efektivita natočení vláken (ENV) je parametr, který hodnotí míru natočených vláken, a přitom jednotlivé rozsahy míry natočení hodnotí příslušným koeficientem, který reflektuje negativní příspěvek natočení vlákna od ideální pozice. Tato hodnota se stanovuje pro příslušnou vyhodnocovanou oblast. Maximální hodnota parametru může nabýt velikosti počtu vyhodnocovaných zrn (každé zrno je násobeno koeficientem $k=1$).

Když je vlákno natočeno, je jeho přenos síly menší. Základem je nižší účinná povrchová plocha vlákna, která přispívá k přenosu síly. To je odvozeno z 2.5 a je zobrazeno ve formě koeficientu „ k “ (viz Tab. 14). Vlákno, které se odchyluje od směru síly o 15-25° stupňů, má tedy pouze 85 % své únosnosti.

Hodnota ENV se určí podle vzorce 6.6:

$$ENV_x = \sum k_i \cdot z_i \quad [-] \quad 6.6$$

kde:

z je počet vláken naměřených pro jednotlivá rozmezí AR

k je koeficient přínosu vlákna k přenesení síly (podle Tab. 14)

Tab. 14 – Tab. hodnot koeficientu k – přínos vlákna k přenesení síly

Třída	Míra natočení vlákna	Koeficient
k1	0° - 15°	1,00
k2	15° - 25°	0,85
k3	25° - 40°	0,75
k4	40° - 55°	0,60
k5	55° - 70°	0,45
k6	70° - 90°	0,30

6.4.2.2 Poměrná efektivita natočení vláken (PENV)

Poměrná efektivita natočení vláken 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 (viz výpočtový vztah 6.7):

$$PENV_x = \sum \frac{k_i \cdot z_i}{\sum z_i} \quad [%] \quad (6.7)$$

6.4.3 Numerická simulace

6.4.3.1 Software

Na základě numerických matematických metod, existují různé typy softwarů, které popisují tok taveniny plastu, např.:

- Autodesk – SIMULATION MOLDFLOW [58]
- SimulPlast - Moldex 3D
- Simcon - CADMould 3D
- BASF – ULTRASIM

Nejprve se vymodeluje geometrie dutiny ve 3D a pokryje se sítí, jak se používá i v MKP. Sít' má mnoho uzlů, na kterých se počítají hodnoty příslušné parciální diferenciální rovnice. Aby bylo možné vyřešit mnoho neznámých v rovnicích, je důležité popsat chování materiálu pomocí vzorce pro materiálovou závislost smykového napětí na smykové nebo deformační rychlosti. Teprve pak je soustava rovnic řešitelná a výpočet se podaří. Tomuto vzorci materiálového chování se říká materiálová derivace. Používá se Newtonův zákon, Carreauův přístup nebo mocenský zákon, jak je podrobněji popsáno v kapitole 4.7. Elasticita materiálu a existence vláken jsou zanedbávány.

Z praktického hlediska lze říci, že všechny modely počítačové simulace, obsahují mnoho zjednodušení, např.:

- Zanedbání fontánového efektu (viz kapitola 2.6.3),
- Zanedbání elastického chování taveniny plastů

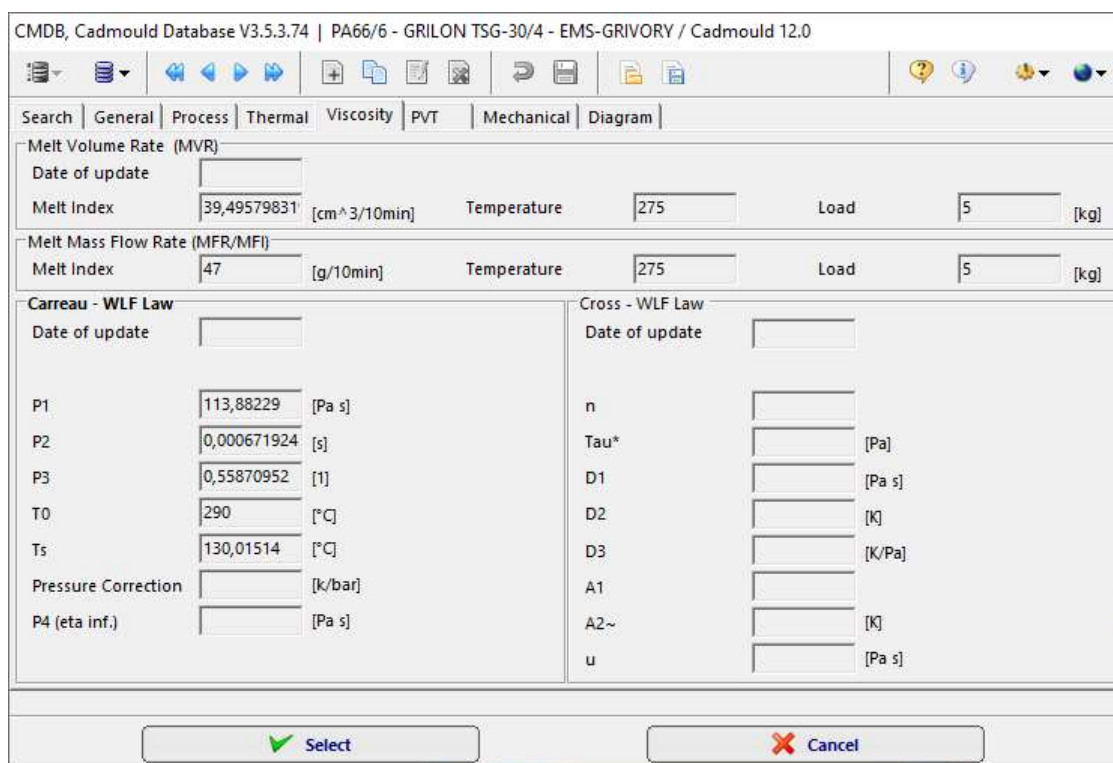
6.4.3.2 Teoretické základy numerické simulace SW CADMould 3D

Podle výzkumu stavu numerické matematiky a stávajících softwarových produktů byl použit produkt CADMould 3D-F od společnosti Simcon / Německo. Tento software je na trhu rozšířen, odpovídá stavu současné techniky a od roku 2021 je k dispozici i na Ústavu strojírenské technologie, FS, ČVUT v Praze.

Příprava výpočtu spočívala ve vytvoření 3D modelu zkoumaného zkušební tělesa dle ČSN EN ISO 527-2:2012 [N3] a vtokové soustavy. Vtok zkušební formy je jednostranný kruhový vtok s 10 stupňovým sklonem, který je uspořádán ve stejné polovině formy, ve kterém je také uspořádána dutina. 3D model byl vytvořen v sw Autocad Inventor a geometrie byla načtena do sw CADMould 3D-F přes rozhraní IGES. Před výpočtem v sw CADMould absolvoval autor disertační práce potřebná školení o používání programu.

Parametry materiálu byly již výrobcem materiálu EMS Chemie uloženy v materiálové databázi sw CADMould. Za tímto účelem výrobce materiálu přiblížil skutečnou naměřenou funkci viskozity jak pomocí modelu Carreau (viz kapitola 4.7.1.2), tak pomocí modelu mocninového. Pro výpočty v rámci disertační práce byl vybrán datový soubor podle Carreauova přístupu (viz Obr. 65), protože tento je v plastikářském průmyslu rozšířen díky vyšší přesnosti.

Po těchto přípravných krocích mohla být zahájena simulace.



Obr. 65 - Materiálová data pro simulaci proudění v sw CADMould

6.4.3.3 Průběh výpočtu

- Spuštění programu CADMould 3D model Carreau (viz kapitola 4.7.1.2 a Obr. 50),
- Zadání parametrů procesu (podle Tab. 7, pro 3 různé rychlosti vstřikování),
- Zahájení simulace obrazu výplně,
- Vypočítání maximální reprezentativní rychlosti smyku a stupně orientace vláken.
- Vyhodnocení simulace obrazu výplně na základě různých relevantních parametrů.

6.4.3.4 Provedení výpočtu

Před zahájením simulace byly zadány rychlosti vstřikování pro pokus „L“ = pomalý vstřik, „M“ = průměrná rychlost vstřiku a „S“ = rychlý vstřik (viz Tab. 7).

7 VÝSLEDKY A DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky tohoto testu jsou uvedeny v Tab. č 15. Zkušební tělesa, která lze správně změřit, jsou v Tab. 15 znázorněna zelenými čísly. Ostatní zkušební tělesa s černými čísly při tahové zkoušce prokluzovala v čelistech zkušebního stroje a nebyly tedy brány v úvahu.

7.1 Výsledky experimentu 1: Zkouška tahem

Tab. 15 – Výsledky zkoušky tahem (58 vzorků)

Měření	7/8.	10.	2021	Materiál	Rozměry vzorku		Průtahoměr skutečný [mm]	Oblast porušení	Datum zkoušky	číslování	Pořadí vzorku	E[kN/mm.]	R _{p0,02} [N/mm.]	F _{p0,02} [N]	R _{eh} [N/mm.]	R _{el} [N/mm.]	R _m [N/mm.]	F _m [N]	A _g [%]	A[%]	A _{gt} [%]	A _t [%]
					tloušťka [mm]	šířka [mm]																
XL_mokré	1XL	1	1	PA_GF	3,97	9,85	79,97	V oblasti	30.09.2021		1	27,112	38	1495,7	71	47	139	6227,4	1,44	1,44	2,03	2,03
L_vlhké	8L	8	1	PA_GF	3,97	9,85	79,8	mimo oblast	07.10.2021		5	9,524	128	5013	0	0	169	6606,6	0,71	0,72	2,48	2,49
	9L	9	1		3,97	9,88	79,2	V oblasti	07.10.2021		6	6,461	37	1441,5	0	0	168	6578,7	2,64	2,78	5,23	5,37
	10L	10	1		3,97	9,88	79,1	V oblasti	07.10.2021		7	7,428	0	0	115	104	153	5987,1	-0,02	-0,02	2,04	2,04
	11L	11	1		3,96	9,84	80,32	V oblasti	07.10.2021		8	7,872	110	4280,7	41	36	161	6285,9	1,07	1,23	3,11	3,26
	12L	12	1		3,96	9,83	80,13	V oblasti	07.10.2021		9	9,3	59	2310	0	0	162	6306,2	1,37	1,63	3,07	3,3
	13L	13	1		3,96	9,84	79,7	V oblasti	07.10.2021		10	8,42	68	2635,1	0	0	172	6684,9	1,16	1,3	3,2	3,32
	14L	14	1		3,96	9,84	80,11	V oblasti	07.10.2021		11	9,095	92	3585,2	0	0	171	6650,4	1,17	1,23	3,05	3,1
M_vlhké	8M	8	1	PA_GF	3,96	9,83	79,95	V oblasti	07.10.2021		12	12,576	28	1108,2	0	0	171	6660,3	1,47	1,47	2,83	2,83
	9M	9	1		3,96	9,85	80,2	V oblasti	07.10.2021		13	12,433	72	2800,9	0	0	175	6813	1,38	1,5	2,79	2,9
	10M	10	1		3,96	9,84	79,95	V oblasti	07.10.2021		14	9,106	88	3434,7	0	0	163	6337,9	0,63	0,63	2,42	2,42
	11M	11	1		3,96	9,85	80,3	V oblasti	07.10.2021		15	8,788	77	3007,8	95	77	174	6791,1	1,1	1,22	3,08	3,19
	12M	12	1		3,97	9,83	80,24	V oblasti	07.10.2021		16	7,375	154	6023,2	0	0	172	6723,7	0,57	0,72	2,9	3,04
	13M	13	1		3,96	9,84	80,4	V oblasti	07.10.2021		17	9,901	61	2357,7	142	118	174	6762,6	1,27	1,31	3,02	3,06
S_vlhké	8S	8	1	PA_GF	3,96	9,83	79,95	V oblasti	07.10.2021		19	9,936	54	2121,8	0	0	173	6742,4	1,35	1,39	3,09	3,13
	9S	9	1		3,96	9,84	79,7	V oblasti	07.10.2021		20	9,0	86	3350,9	126	113	171	6694,7	1,18	1,2	3,02	3,03
	10S	10	1		3,97	9,84	79,3	V oblasti	07.10.2021		21	13,289	28	1087,4	0	0	171	6681,1	1,55	1,59	2,84	2,88
	11S	11	1		3,96	9,85	80,35	V oblasti	07.10.2021		22	9,388	62	2423,9	0	0	172	6724,8	1,28	1,35	3,12	3,18
	12S	12	1		3,96	9,85	80,7	V oblasti	07.10.2021		23	10,105	70	2723,2	0	0	171	6685,4	1,31	1,45	3,01	3,13
	13S	13	1		3,96	9,85	80,25	V oblasti	07.10.2021		24	9,289	90	3523,9	0	0	158	6151,3	0,71	0,71	2,4	2,41
	14S	14	1		3,96	9,85	80,44	V oblasti	07.10.2021		25	13,039	42	1629,2	0	0	170	6645,5	1,67	1,73	2,98	3,04
L_suché	1L	1	1	PA_GF	3,97	9,84	80,3	V oblasti	07.10.2021		29	8,083	135	5265,3			178	6946,5	0,86	1,02	3,06	3,21
	2L	2	1		3,96	9,85	80,4	mimo oblast	08.10.2021		30	7,43	171	6671,2			184	7191,1	0,55	0,59	3,03	3,07
	3L	3	1		3,96	9,86	80,13	V oblasti	08.10.2021		31	6,826	175	6844,7			183	7157,7	0,42	0,51	3,1	3,19
	4L	4	1		3,97	9,86	79,83	mimo oblast	08.10.2021		32	9,312	92	3581,9			183	7154,4	1,04	1,04	3	3,01
	5L	5	1		3,97	9,85	79,93	mimo oblast	08.10.2021		33	9,173	101	3952,9			182	7101,4	0,94	0,95	2,92	2,93
	6L	6	1		3,97	9,85	80,05	V oblasti	08.10.2021		34	8,792	140	5461,8			184	7178,5	0,89	0,93	2,98	3,01
	7L	7	1		3,97	9,85	79,86	V oblasti	08.10.2021		35	9,495	115	4498,6			175	6858,9	0,65	0,65	2,49	2,5
M_suché	1M	1	1	PA_GF	3,97	9,87	80,23	mimo oblast	08.10.2021		36	7,851	137	5352,8			168	6597,3	0,31	0,31	2,45	2,45
	2M	2	1		3,96	9,84	79,91	mimo oblast	08.10.2021		37	9,04	105	4105,1			181	7059,8	0,94	0,94	2,94	2,95
	3M	3	1		3,97	9,85	80,12	mimo oblast	08.10.2021		38	8,697	136	5329,3			182	7128,2	0,79	0,81	2,89	2,9
	4M	4	1		3,97	9,86	79,92	V oblasti	08.10.2021		39	9,754	47	1847,1			183	7156,1	1,03	1,03	2,9	2,9
	5M	5	1		3,97	9,85	79,95	V oblasti	08.10.2021		40	9,447	38	1476			179	7014,9	0,89	0,89	2,79	2,79
	6M	6	1		3,97	9,85	79,48	V oblasti	08.10.2021		41	9,144	85	3305,5			182	7126,5	1,23	1,26	3,22	3,25
	7M	7	1		3,96	9,86	79,74	V oblasti	08.10.2021		42	9,758	52	2152			183	7156,1	1,03	1,03	2,9	2,9
S_suché	2S	2	1	PA_GF	3,97	9,84	80,09	mimo oblast	08.10.2021		43	10,307	48	1871,1			183	7140,2	1,15	1,15	2,92	2,92
	3S	3	1		3,97	9,86	80,09	mimo oblast	08.10.2021		44	8,767	123	4796,8			182	7110,7	0,68	0,68	2,75	2,75
	4S	4	1		3,97	9,87	79,78	mimo oblast	08.10.2021		45	9,235	116	4558,2			175	6857,8	0,61	0,61	2,5	2,51
	5S	5	1		3,97	9,87	80	V oblasti	08.10.2021		46	10,017	102	4015,3			185	7233,3	1,08	1,13	2,92	2,97
	6S	6	1		3,97	9,86	80,19	V oblasti	08.10.2021		47	8,251	150	5856,9			183	7158,3	0,79	0,91	3	3,12
	7S	7	1		3,97	9,85	79,9	V oblasti	08.10.2021		48	9,291	78	3035,2			184	7198,2	1,15	1,2	3,13	3,18
	8S	8	1		3,96	9,85	79,79	V oblasti	08.10.2021		49	9,631	65	2548,6			184	7168,1	1,16	1,27	3,07	3,17

7.2 Diskuse výsledků experimentu 1: Zkouška tahem

V datových listech výrobce materiálu [37] jsou uvedeny hodnoty modulu pružnosti materiálu. Ty byly stanoveny tahovou zkouškou dle ČSN EN ISO 527. Udávané hodnoty modulu pružnosti se pohybují mezi 6000 a 9400 MPa v závislosti na vlhkosti.

Hodnoty stanovené v rámci disertační práce jsou řádově stejné. Podrobnější analýza naměřených hodnot v provedené tahové zkoušce však ukazuje, že rozptyl hodnot modulu pružnosti je velmi vysoký. Zkušební tělesa se lámou mezi segmentem 5 a segmentem 6, kde jsou připevněna čelistmi. To však není přípustné a vysvětluje to vysoký rozptyl hodnot.

V experimentu 3 není možné spolehlivé měření. Aby bylo dosaženo spolehlivého měření, musely by být testovací tyče lépe upnuty a čelisti by musely být připevněny v jiném bodě.

7.3 Výsledky experimentu 2: Plastografie

Tab. 16 – Výsledky plastografie

Vzorek 1 - Řez A

Vzorek	Řez	část od kraje	Míra natočení	Úhel natočení elipsy						
			Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
1/A	A	Sn_1	0° - 25°	60	12	7	12	12	17	60
			25° ± 40°	29	0	2	9	8	10	29
			40° ± 55°	25	6	1	1	1	16	25
			55° ± 70°	7	5	0	0	0	2	7
			70° ± 90°	3	3	0	0	0	0	3
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy						
			Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
1/A	A	Sn_2	0° - 25°	99	32	5	32	33	26	99
			25° ± 40°	48	0	1	10	14	23	48
			40° ± 55°	22	5	0	2	0	15	22
			55° ± 70°	7	1	0	1	0	5	7
			70° ± 90°	5	3	0	0	0	2	5
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy						
			Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
4/A	A	Sn_3	0° - 25°	63	6	3	11	25	18	63
			25° ± 40°	35	3	0	4	8	20	35
			40° ± 55°	18	6	0	3	0	9	18
			55° ± 70°	15	6	1	0	0	8	15
			70° ± 90°	5	3	0	0	0	2	5
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy						
			Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
4/A	A	Sn_4	0° - 25°	44	4	2	14	9	15	44
			25° ± 40°	20	2	1	1	5	11	20
			40° ± 55°	23	2	0	0	1	20	23
			55° ± 70°	14	5	0	0	0	9	14
			70° ± 90°	5	3	0	0	1	1	5
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy						
			Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
4/A	A	Sn_5	0° - 25°	50	3	6	12	14	15	50
			25° ± 40°	22	1	2	10	1	8	22
			40° ± 55°	24	4	6	4	2	8	24
			55° ± 70°	22	10	0	1	2	9	22
			70° ± 90°	7	2	0	0	0	5	7
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy						
			Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
4/A	A	Sn_6	0° - 25°	2	0	0	0	1	1	2
			25° ± 40°	1	0	0	0	0	1	1
			40° ± 55°	4	2	0	1	1	0	4
			55° ± 70°	10	4	2	0	1	3	10
			70° ± 90°	37	18	1	1	2	15	37

Vzorek 1 - Řez B

Vzorek	Řez	část od kraje	Úhel	Natočení elipsy					
			Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
4/B	B	1	0° - 25°	64	10	17	18	9	54
			25° ± 40°	11	1	4	4	1	10
			40° ± 55°	18	5	9	4	0	18
			55° ± 70°	5	0	2	3	0	5
			70° ± 90°	0	0	0	0	0	0
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					
			Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
4/B	B	2	0° - 25°	166	31	44	56	17	148
			25° ± 40°	31	2	4	10	1	17
			40° ± 55°	9	2	1	4	1	8
			55° ± 70°	8	0	6	1	0	7
			70° ± 90°	0	0	0	0	0	0
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					
			Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
4/B	B	3	0° - 25°	153	26	51	48	17	142
			25° ± 40°	30	2	3	7	0	12
			40° ± 55°	10	2	3	4	1	10
			55° ± 70°	3	0	1	2	0	3
			70° ± 90°	0	0	0	0	0	0
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					
			Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
4/B	B	4	0° - 25°	155	25	41	51	23	140
			25° ± 40°	33	1	8	2	0	11
			40° ± 55°	5	2	1	1	0	4
			55° ± 70°	4	0	3	1	0	4
			70° ± 90°	4	0	3	1	0	4
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					
			Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
4/B	B	5	0° - 25°	137	38	42	47	13	140
			25° ± 40°	40	2	3	5	1	11
			40° ± 55°	10	2	5	3	0	10
			55° ± 70°	1	0	0	1	0	1
			70° ± 90°	2	1	1	0	0	2
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					
			Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
4/B	B	6 - dál	0° - 25°	95	8	6	28	35	77
			25° ± 40°	33	1	1	6	10	18
			40° ± 55°	31	6	3	5	4	18
			55° ± 70°	4	0	2	0	1	3
			70° ± 90°	2	1	0	1	0	2

Vzorek 2 - Řez A

Vzorek	Řez	část od kraje	Úhel	Natočení elipsy						SUM
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	
2	A	1	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
			0° - 25°	65	6	6	23	15	15	65
			25° ± 40°	25	5	2	5	5	8	25
			40° ± 55°	20	2	0	1	5	12	20
			55° ± 70°	5	2	0	0	0	3	5
			70° ± 90°	4	0	0	0	0	4	4
2	A	2	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
			0° - 25°	125	6	5	27	55	32	125
			25° ± 40°	56	6	0	9	19	22	56
			40° ± 55°	18	5	0	3	4	6	18
			55° ± 70°	4	1	0	0	0	3	4
			70° ± 90°	0	0	0	0	0	0	0
2	A	3	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
			0° - 25°	143	16	7	51	48	21	143
			25° ± 40°	41	4	0	10	10	17	41
			40° ± 55°	17	8	0	2	3	4	17
			55° ± 70°	6	4	0	1	1	0	6
			70° ± 90°	1	1	0	0	0	0	1
2	A	4	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
			0° - 25°	108	8	2	32	31	35	108
			25° ± 40°	32	1	0	7	15	9	32
			40° ± 55°	16	5	0	2	0	9	16
			55° ± 70°	3	1	0	1	0	1	3
			70° ± 90°	2	2	0	0	0	0	2
2	A	5	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
			0° - 25°	98	6	5	36	30	21	98
			25° ± 40°	27	1	1	8	11	6	27
			40° ± 55°	10	0	0	2	0	8	10
			55° ± 70°	16	1	1	1	3	10	16
			70° ± 90°	3	0	0	0	0	3	3
2	A	6	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
			0° - 25°	7	1	0	2	1	3	7
			25° ± 40°	7	3	0	2	2	0	7
			40° ± 55°	21	2	1	7	7	4	21
			55° ± 70°	32	5	3	12	7	5	32
			70° ± 90°	6	1	0	1	0	4	6

Vzorek 2 - Řez B

Vzorek	Řez	část od kraje	Úhel	Natočení elipsy						SUM
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180		
2	B	1	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM	
			0° - 25°	89	15	16	20	38	89	
			25° ± 40°	24	1	0	9	14	24	
			40° ± 55°	21	1	8	6	6	21	
			55° ± 70°	2	0	1	0	1	2	
			70° ± 90°	3	0	2	1	0	3	
2	B	2	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM	
			0° - 25°	136	11	12	39	74	136	
			25° ± 40°	25	1	1	5	18	25	
			40° ± 55°	10	1	5	3	1	10	
			55° ± 70°	5	0	3	1	1	5	
			70° ± 90°	5	0	2	2	1	5	
2	B	3	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM	
			0° - 25°	143	8	8	28	99	143	
			25° ± 40°	29	0	2	12	15	29	
			40° ± 55°	15	1	2	7	5	15	
			55° ± 70°	6	1	3	1	1	6	
			70° ± 90°	2	0	1	1	0	2	
2	B	4	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM	
			0° - 25°	119	7	9	38	65	119	
			25° ± 40°	23	2	3	10	8	23	
			40° ± 55°	14	1	6	6	1	14	
			55° ± 70°	6	1	2	3	0	6	
			70° ± 90°	3	0	1	2	0	3	
2	B	5	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM	
			0° - 25°	120	15	8	27	70	120	
			25° ± 40°	28	2	2	7	17	28	
			40° ± 55°	14	3	1	6	4	14	
			55° ± 70°	5	2	1	1	1	5	
			70° ± 90°	0	0	0	0	0	0	
2	B	7 - dál	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM	
			0° - 25°	89	7	3	27	52	89	
			25° ± 40°	38	1	3	10	24	38	
			40° ± 55°	32	2	3	8	19	32	
			55° ± 70°	8	0	1	2	5	8	
			70° ± 90°	3	1	0	0	2	3	

Vzorek 3 - Řez A

Vzorek	Řez	část od kraje	Úhel	Natočení elipsy					SUM	
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150		150° - 180
3	A	1	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	88
			0° - 25°	88	6	2	21	31	28	88
			25° ± 40°	40	5	0	7	14	14	40
			40° ± 55°	15	1	0	2	3	9	15
			55° ± 70°	5	3	0	0	1	1	5
			70° ± 90°	0	0	0	0	0	0	0
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM	
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150		150° - 180
3	A	2	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	107
			0° - 25°	107	7	2	53	29	16	107
			25° ± 40°	47	5	1	11	13	17	47
			40° ± 55°	8	2	0	2	1	3	8
			55° ± 70°	5	4	0	0	1	0	5
			70° ± 90°	2	0	0	0	0	2	2
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM	
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150		150° - 180
3	A	3	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	94
			0° - 25°	94	5	0	34	31	24	94
			25° ± 40°	55	4	3	11	18	19	55
			40° ± 55°	13	5	0	0	0	8	13
			55° ± 70°	4	2	0	0	1	1	4
			70° ± 90°	2	1	0	0	0	1	2
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM	
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150		150° - 180
3	A	4	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	131
			0° - 25°	131	11	4	27	45	44	131
			25° ± 40°	49	1	0	7	17	24	49
			40° ± 55°	12	3	0	2	1	6	12
			55° ± 70°	2	1	0	0	0	1	2
			70° ± 90°	0	0	0	0	0	0	0
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM	
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150		150° - 180
3	A	5	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	86
			0° - 25°	86	8	1	24	34	19	86
			25° ± 40°	49	6	3	17	17	6	49
			40° ± 55°	27	3	4	3	5	12	27
			55° ± 70°	11	3	3	2	1	2	11
			70° ± 90°	4	3	0	1	0	0	4
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM	
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150		150° - 180
3	A	6	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	13
			0° - 25°	13	0	5	2	2	4	13
			25° ± 40°	21	5	5	5	3	3	21
			40° ± 55°	49	6	9	11	8	15	49
			55° ± 70°	31	9	5	3	6	8	31
			70° ± 90°	3	1	2	0	0	0	3

Vzorek 3 - Řez B

Vzorek	Řez	část od kraje	Míra natočení	Úhel natočení elipsy					SUMA
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	
3	B	SN_1	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	61
			0° - 25°	61	8	4	20	29	61
			25° ± 40°	42	0	8	21	13	42
			40° ± 55°	18	1	2	11	4	18
			55° ± 70°	12	1	2	4	5	12
			70° ± 90°	0	0	0	0	0	0
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	
3	B	2	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	75
			0° - 25°	75	2	6	28	39	75
			25° ± 40°	63	0	2	37	24	63
			40° ± 55°	10	0	1	7	2	10
			55° ± 70°	6	0	1	5	0	6
			70° ± 90°	2	0	1	1	0	2
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	
3	B	3	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	137
			0° - 25°	137	3	4	78	52	137
			25° ± 40°	37	0	2	27	8	37
			40° ± 55°	20	2	7	9	2	20
			55° ± 70°	7	0	1	4	2	7
			70° ± 90°	0	0	0	0	0	0
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	
3	B	4	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	116
			0° - 25°	116	8	4	51	53	116
			25° ± 40°	50	4	1	32	13	50
			40° ± 55°	15	1	4	10	0	15
			55° ± 70°	3	0	1	2	0	3
			70° ± 90°	0	0	0	0	0	0
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	
3	B	5	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	153
			0° - 25°	153	7	7	61	78	153
			25° ± 40°	41	0	1	19	21	41
			40° ± 55°	12	1	2	9	0	12
			55° ± 70°	4	1	1	1	1	4
			70° ± 90°	1	0	0	0	1	1
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	
3	B	6 - dál	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	95
			0° - 25°	95	6	9	32	48	95
			25° ± 40°	45	2	1	18	24	45
			40° ± 55°	12	3	1	5	3	12
			55° ± 70°	3	0	1	2	0	3
			70° ± 90°	2	0	2	0	0	2

Vzorek 4 - Řez A

Vzorek	Řez	část od kraje	Úhel	Natočení elipsy					SUM
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	
4	A	1	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
			0° ± 5°	81	8	3	16	54	81
			20° ± 10°	15	1	0	5	9	15
			40° ± 10°	19	6	0	3	10	19
			60° ± 10°	9	4	1	1	3	9
			80° ± 10°	9	6	0	0	3	9
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
4	A	2	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
			0° ± 5°	91	5	3	32	51	91
			20° ± 10°	15	2	0	2	11	15
			40° ± 10°	16	4	1	3	8	16
			60° ± 10°	10	5	1	0	4	10
			80° ± 10°	8	6	1	0	1	8
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
4	A	3	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
			0° ± 5°	104	6	1	41	56	104
			20° ± 10°	84	0	0	3	12	15
			40° ± 10°	7	3	0	0	10	13
			60° ± 10°	14	3	0	0	4	7
			80° ± 10°	3	2	0	0	0	2
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
4	A	4	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
			0° ± 5°	118	2	2	27	87	118
			20° ± 10°	22	0	2	3	17	22
			40° ± 10°	21	1	1	1	18	21
			60° ± 10°	14	5	0	2	7	14
			80° ± 10°	2	1	0	0	1	2
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
4	A	5	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
			0° ± 5°	35	2	0	17	16	35
			20° ± 10°	16	1	0	4	11	16
			40° ± 10°	27	3	2	8	14	27
			60° ± 10°	30	8	1	8	13	30
			80° ± 10°	8	5	0	0	3	8
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
4	A	6	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
			0° ± 5°	4	2	1	0	1	4
			20° ± 10°	3	0	1	1	1	3
			40° ± 10°	10	2	2	4	2	10
			60° ± 10°	20	2	5	8	5	20
			80° ± 10°	34	11	3	15	5	34

Vzorek 4 - Řez B

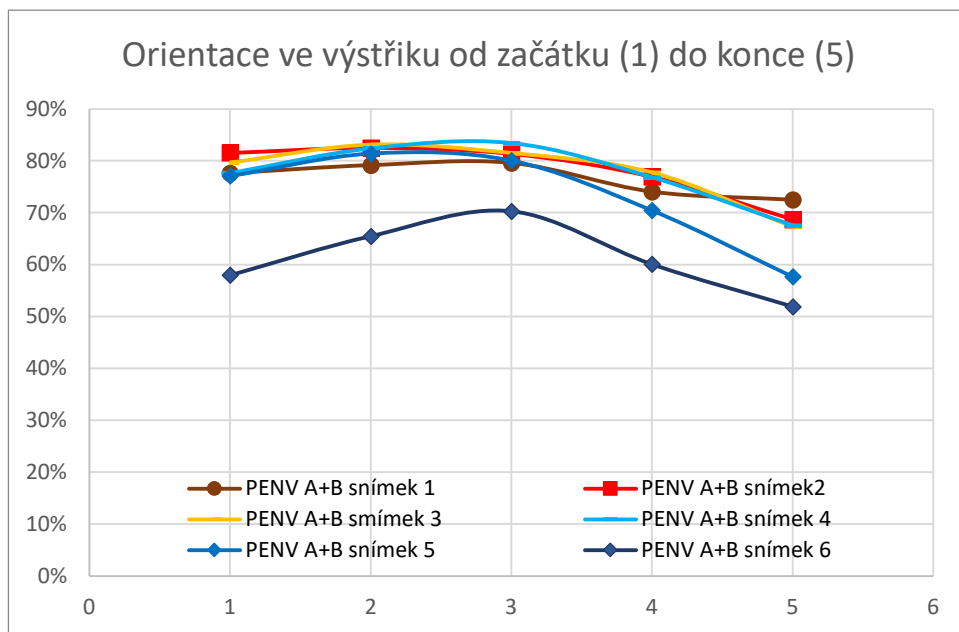
Vzorek	Řez	část od kraje	Úhel	Natočení elipsy					SUM
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	
4	B	1	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
			0° ± 5°	63	7	10	7	37	63
			20° ± 10°	20	1	0	9	10	20
			40° ± 10°	21	4	6	5	6	21
			60° ± 10°	12	2	3	4	3	12
			80° ± 10°	1	0	1	0	0	1
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
4	B	2	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
			0° ± 5°	128	7	5	11	105	128
			20° ± 10°	27	0	1	8	18	27
			40° ± 10°	18	0	1	11	6	18
			60° ± 10°	9	2	1	5	1	9
			80° ± 10°	1	0	1	0	0	1
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
4	B	3	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
			0° ± 5°	100	8	6	16	70	100
			20° ± 10°	39	0	0	17	22	39
			40° ± 10°	17	1	1	12	3	17
			60° ± 10°	8	0	4	4	0	8
			80° ± 10°	5	1	1	3	0	5
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
4	B	4	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
			0° ± 5°	114	7	3	15	89	114
			20° ± 10°	37	1	0	7	29	37
			40° ± 10°	20	0	1	4	15	20
			60° ± 10°	13	1	2	7	3	13
			80° ± 10°	3	0	1	0	2	3
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
4	B	5	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
			0° ± 5°	103	1	5	37	60	103
			20° ± 10°	43	2	1	14	26	43
			40° ± 10°	19	1	1	10	7	19
			60° ± 10°	6	1	0	3	2	6
			80° ± 10°	4	0	0	2	2	4
Vzorek	Řez	Řez	Úhel	Natočení elipsy					SUM
4	B	6 - dál	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM
			0° ± 5°	96	13	12	32	39	96
			20° ± 10°	31	1	2	13	15	31
			40° ± 10°	24	1	2	17	4	24
			60° ± 10°	5	2	1	2	0	5
			80° ± 10°	4	1	1	1	1	4

Vzorek 5 - Řez A

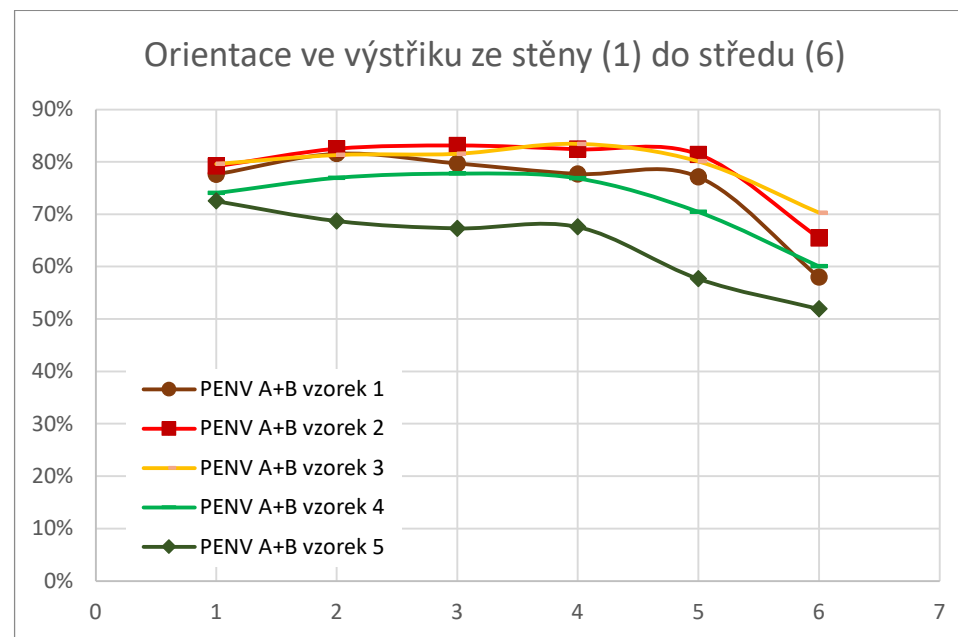
Vzorek	Řez	část od kraje	Úhel	Natočení elipsy						
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
5	A	1	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
			0° ± 5°	66	10	6	16	22	12	66
			20° ± 10°	32	2	1	5	10	14	32
			40° ± 10°	15	0	2	0	0	13	15
			60° ± 10°	10	0	0	0	0	10	10
			80° ± 10°	7	1	0	0	0	6	7
5	A	2	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
			0° ± 5°	41	4	1	7	16	13	41
			20° ± 10°	19	1	0	4	3	11	19
			40° ± 10°	30	4	1	0	4	21	30
			60° ± 10°	28	10	0	0	0	18	28
			80° ± 10°	9	6	0	0	0	3	9
4/A	A	3	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
			0° ± 5°	57	1	0	21	21	14	57
			20° ± 10°	17	4	1	0	1	11	17
			40° ± 10°	33	7	0	0	1	25	33
			60° ± 10°	24	10	1	0	0	13	24
			80° ± 10°	14	12	0	0	0	2	14
5	A	4	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
			0° ± 5°	34	5	2	8	7	12	34
			20° ± 10°	14	1	3	0	2	8	14
			40° ± 10°	39	14	5	4	0	16	39
			60° ± 10°	35	19	3	3	1	9	35
			80° ± 10°	15	7	1	0	0	7	15
5	A	5	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
			0° ± 5°	1	1	0	0	0	0	1
			20° ± 10°	1	0	0	1	0	0	1
			40° ± 10°	21	3	12	5	1	0	21
			60° ± 10°	35	12	2	14	4	3	35
			80° ± 10°	21	4	5	3	5	4	21
5	A	6	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 150	150° - 180	SUM
			0° ± 5°	2	1	0	0	1	0	2
			20° ± 10°	2	0	1	1	0	0	2
			40° ± 10°	2	1	0	1	0	0	2
			60° ± 10°	17	2	4	5	5	1	17
			80° ± 10°	30	8	2	6	5	9	30

Vzorek 5 - Řez B

Vzorek	Řez	část od kraje	Úhel	Natočení elipsy						
				0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM	
5	B	1	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM	
			0° ± 5°	39	11	3	14	11	39	
			20° ± 10°	14	0	1	11	2	14	
			40° ± 10°	26	0	8	17	1	26	
			60° ± 10°	15	0	6	9	0	15	
			80° ± 10°	10	0	5	5	0	10	
5	B	2	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM	
			0° ± 5°	47	2	5	32	8	47	
			20° ± 10°	24	1	1	20	2	24	
			40° ± 10°	44	2	5	35	2	44	
			60° ± 10°	16	0	3	13	0	16	
			80° ± 10°	2	0	0	2	0	2	
5	B	3	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM	
			0° ± 5°	37	3	3	20	11	37	
			20° ± 10°	19	0	1	12	6	19	
			40° ± 10°	59	0	5	53	1	59	
			60° ± 10°	27	0	4	23	0	27	
			80° ± 10°	5	0	3	2	0	5	
5	B	4	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM	
			0° ± 5°	53	6	6	24	17	53	
			20° ± 10°	22	1	0	17	4	22	
			40° ± 10°	26	0	0	20	6	26	
			60° ± 10°	13	1	3	9	0	13	
			80° ± 10°	2	1	1	0	0	2	
5	B	5	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM	
			0° ± 5°	61	5	1	37	18	61	
			20° ± 10°	23	0	2	19	2	23	
			40° ± 10°	42	1	1	32	8	42	
			60° ± 10°	14	0	1	13	0	14	
			80° ± 10°	9	0	1	8	0	9	
5	B	6 - dál	Elipsa	0° - 180°	0 - 45°	45 - 90°	90° - 135°	135° - 180	SUM	
			0° ± 5°	36	1	2	19	14	36	
			20° ± 10°	25	4	1	9	11	25	
			40° ± 10°	38	0	1	18	19	38	
			60° ± 10°	32	0	2	7	23	32	
			80° ± 10°	9	0	2	3	4	9	



Obr. 66 - Průměrné efektivita natočení vlákna PENV od začátku až do konce výstřiku

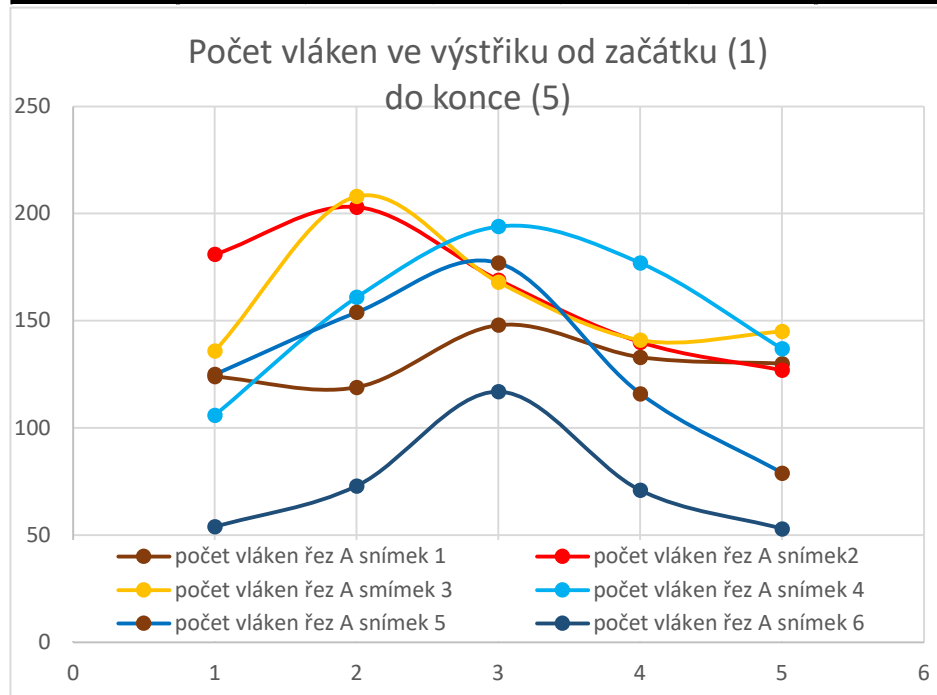


Obr. 67 - Průměrné efektivita natočení vlákna ze stěny do středu

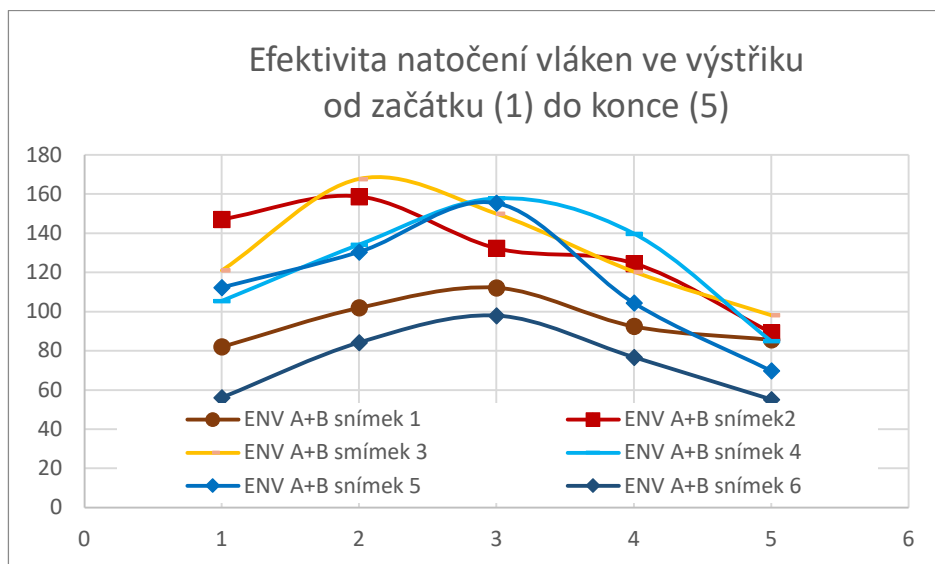
PENV							
A+B							
	snímek 1	snímek 2	snímek 3	snímek 4	snímek 5	snímek 6	všech
vzorek 1	78%	82%	80%	78%	77%	58%	75%
vzorek 2	79%	83%	83%	82%	81%	65%	79%
vzorek 3	80%	81%	82%	83%	80%	70%	79%
vzorek 4	74%	77%	78%	77%	70%	60%	73%
vzorek 5	73%	69%	67%	68%	58%	52%	64%
všech	77%	78%	78%	78%	73%	61%	74%

PENV						
A+B						
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	všech
snímek 1	78%	79%	80%	74%	73%	77%
snímek 2	82%	83%	81%	77%	69%	78%
snímek 3	80%	83%	82%	78%	67%	78%
snímek 4	78%	82%	83%	77%	68%	78%
snímek 5	77%	81%	80%	70%	58%	73%
snímek 6	58%	65%	70%	60%	52%	61%
všech	75%	79%	79%	73%	64%	74%

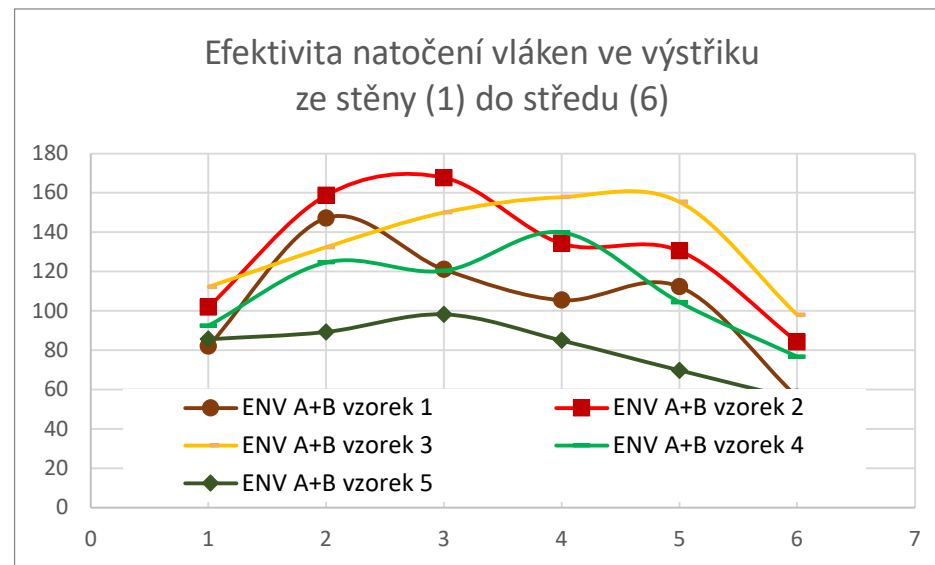
počet vláken							
A+B							
	snímek 1	snímek2	snímek 3	snímek 4	snímek 5	snímek 6	všech
vzorek 1	106	181	152	135	145	86	134
vzorek 2	129	192	202	163	161	122	161
vzorek 3	141	163	185	189	194	137	168
vzorek 4	125	162	155	182	146	116	147
vzorek 5	117	130	146	127	114	97	122
všech	123	165	168	159	152	111	146



Obr. 68 - Počet vláken od začátku až do konce výstřiku



Obr. 69 - Efektivita natočení vlákna ENV od začátku až do konce výstřiku



Obr. 70 - Efektivita natočení vlákna ENV ze stěny do středu

ENV							
A+B							
	snímek 1	snímek 2	snímek 3	snímek 4	snímek 5	snímek 6	všech
vzorek 1	82	147	121	106	112	56	104
vzorek 2	102	159	168	134	131	84	130
vzorek 3	112	132	150	158	155	98	134
vzorek 4	93	125	120	140	104	77	110
vzorek 5	86	89	98	85	70	55	81
všech	95	130	131	125	115	74	112

7.3.1 Výsledky experimentu 2a⁶:

Délky vláken byly v rozmezí od 320 do 400 μm . Průměry měřených vláken byly v rozmezí od 10 do 12 μm .

7.3.2 Diskuse výsledků experimentu 2a:

Průměrná naměřená délka vláken byla stanovena jako $\bar{O}l \approx 360 \mu\text{m}$. Průměrná naměřená hodnota průměru vláken byla stanovena jako: $\bar{O}d \approx 11 \mu\text{m}$. Podle informací od výrobce materiálu má vlákno přibližné rozměry: průměr cca 10 μm a délku cca 400 μm , což bylo ověřeno při plastografických v tomto experimentu.

Tento výsledek podléhá určitým přirozeným nepřesnostem. Je však třeba poznamenat, že zvolená metoda měření zahrnuje nepřesnosti měření délky v důsledku možného porušení vláken nebo v důsledku nesprávného sférického vyrovnání vláken. V každém případě je vypočítaná hodnota menší než hodnota skutečná

Následující experimenty a teoretické úvahy byly provedeny tak, aby bylo možné potvrdit předpoklad 1:

- Možnost vyrovnání orientace vláken je dána podle výpočtu (viz kapitola 6.4.1. b), že vlákno má ve vybraném materiálu devětkrát větší objem matrice okolo sebe. Tedy dost prostoru k vyrovnání orientace vláken.
- Vlákna jsou dostatečně dlouhá, aby způsobily anizotropii: Experiment 1a ukazuje, že vlákna jsou přibližně 40 krát delší než je jejich průměr⁷. Tento aspekt rozměrů vláken ovlivňuje mechanické vlastnosti anizotropně.

7.3.3 Výsledky experimentu 2b:

Rozsáhlá analýza dat pomocí koeficientu „Poměrná efektivita natočení vláken“ PENV (vzorec 6.7) ukazuje, že rozdíly v orientaci vláken jsou významné [K1].

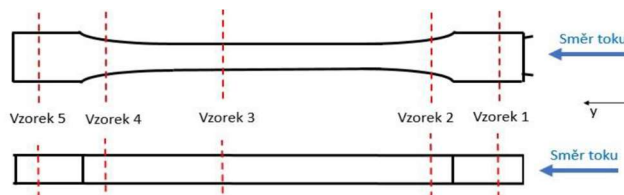
Aby bylo možné toto zjištění potvrdit, byly statisticky vyhodnoceny rozsáhlé výsledky plastografie:

- Tab. 16 obsahuje:
 - 60 snímků k hodnocení oblasti z pěti vzorků z každého tělesa.
 - V tabulkách jsou výsledky stanovení 17 568 úhlů od 8 784 vláken:
 - Úhel α je uveden ve sloupcích, úhel β je uveden v řádcích (definice úhlů podle Obr. 49).
- Analýza, Výpočty a diagramy PENV, ENV a počet vláken podle 6.4.2 pomocí 5.4.

Vyhodnocení výsledků pomocí koeficientu PENV může pomoci zkomprimovat data do takové míry, že je možné je interpretovat tak, jak je uvedeno v Tab. 17.

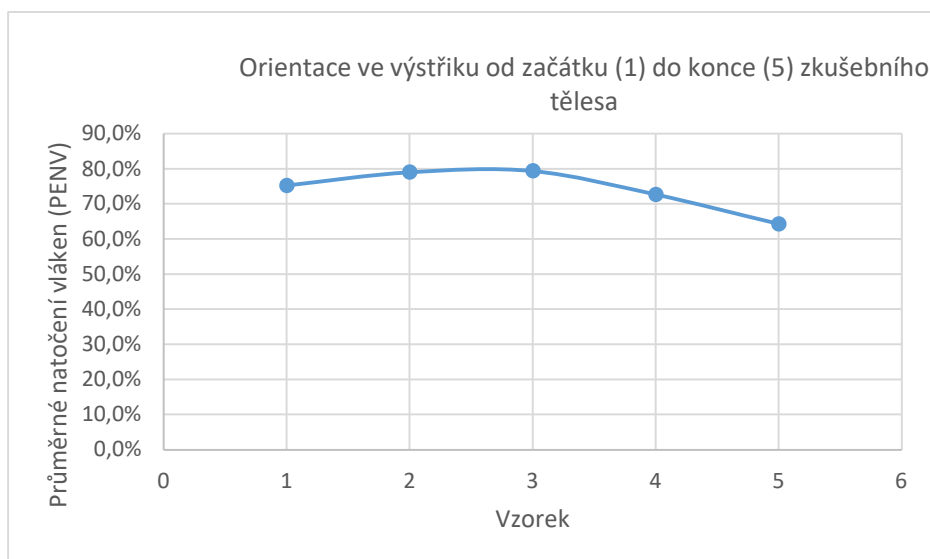
Tab. 17- Průměrná efektivita natočení vláken (PENV) od začátku (vzorek 1) do konce (vzorec 5) výstřiku

Vzorek č. (viz schéma vpravo)	PENV podle kapitoly 6.4.2.2
1	75,3 %
2	79,0 %
3	79,4 %
4	72,7 %
5	64,3 %
Maximální odchylka	15,1 %



⁶ Kompletní výsledky plastografie jsou uvedeny v příloze č 5. Zde jsou uvedeny pouze výsledné celkové hodnoty.

⁷ Tento výsledek podléhá určitým přirozeným nepřesnostem. Je však třeba poznamenat, že zvolená metoda měření zahrnuje nepřesnosti měření délky v důsledku možného porušení vláken nebo v důsledku nesprávného sférického vyrovnání vláken. V každém případě je vypočítaná hodnota menší než hodnota skutečná

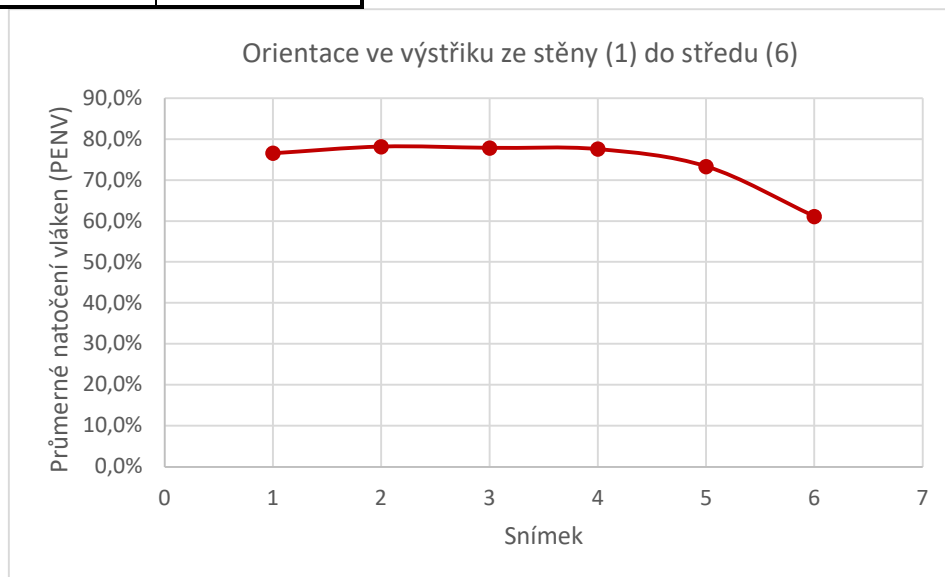
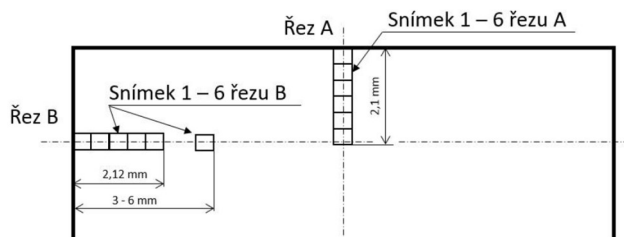


Obr. 71 - Grafické znázornění průměrné efektivity natočení vláken (PENV) podle směru toku taveniny

Přínos vláken k přenesení síly směrem k toku taveniny se liší o 15,1 % (měřeno jako PENV na vzorcích 1-5).

Tab. 18 - Průměrná efektivity natočení vláken (PENV) od okraje stěny (snímek 1) do středu (snímek 6) výstřiku

Snímek č.	PENV
1	76,6 %
2	78,2 %
3	77,9 %
4	77,6 %
5	73,3 %
6	61,1 %
Maximální odchylka	17,1 %



Obr. 72 - Grafické znázornění průměrné efektivity natočení vláken (PENV) kolmo k toku taveniny

Dílčí závěr experimentu 2b:

Výsledky analýzy plastografických dat v různých oblastech výstřiku ukazuje, že orientace vláken v kompozitu způsobí směrem a kolmo k toku významné anizotropie. Odchylky přínosu vláken k přenesení síly ve výstřiku jsou větší než 15 %. Izotropní materiál by měl odchylku 0 %. [K2]

7.3.4 Diskuse výsledků experimentu 2b

Derek Hull ve své knize "An Introduction to Composite Materials" [18] uvažuje o vlivu smykových toků na vlákna v kapalných matricích. Poukazuje na to, že smykové toky vedou k orientaci vláken. To je znázorněno na obrázku 18.

V teoretické části práce byl vypočten profil rychlosti toku pomocí vzorce 6.4. Z toho vyplývá profil rychlosti viz Obr. 16. Ukazuje, že smykový tok je největší v okrajových vrstvách. V experimentu 1b byla nejvyšší orientace naměřena v povrchových vrstvách (viz Obr. 59 snímek 1-4).

Kvantitativní měření dobře souhlasí s kvalitativními tvrzeními v literatuře. Přínos vláken k přenesení síly kolmo k toku taveniny se liší o 17,1 % (měřeno jako PENV na snímcích 1-6):

Tab. 19- Výsledky analýzy odchylek orientace vláken koeficientem PENV

Název	Koeficient reprezentuje	Měřené odchylky kolmé k toku taveniny
PENV	Orientace vláken	17,1 %

7.4 Výsledky experimentu 3: ash test

Tab 20 – Naměřené hmotnosti vzorků před a po úplném spálení

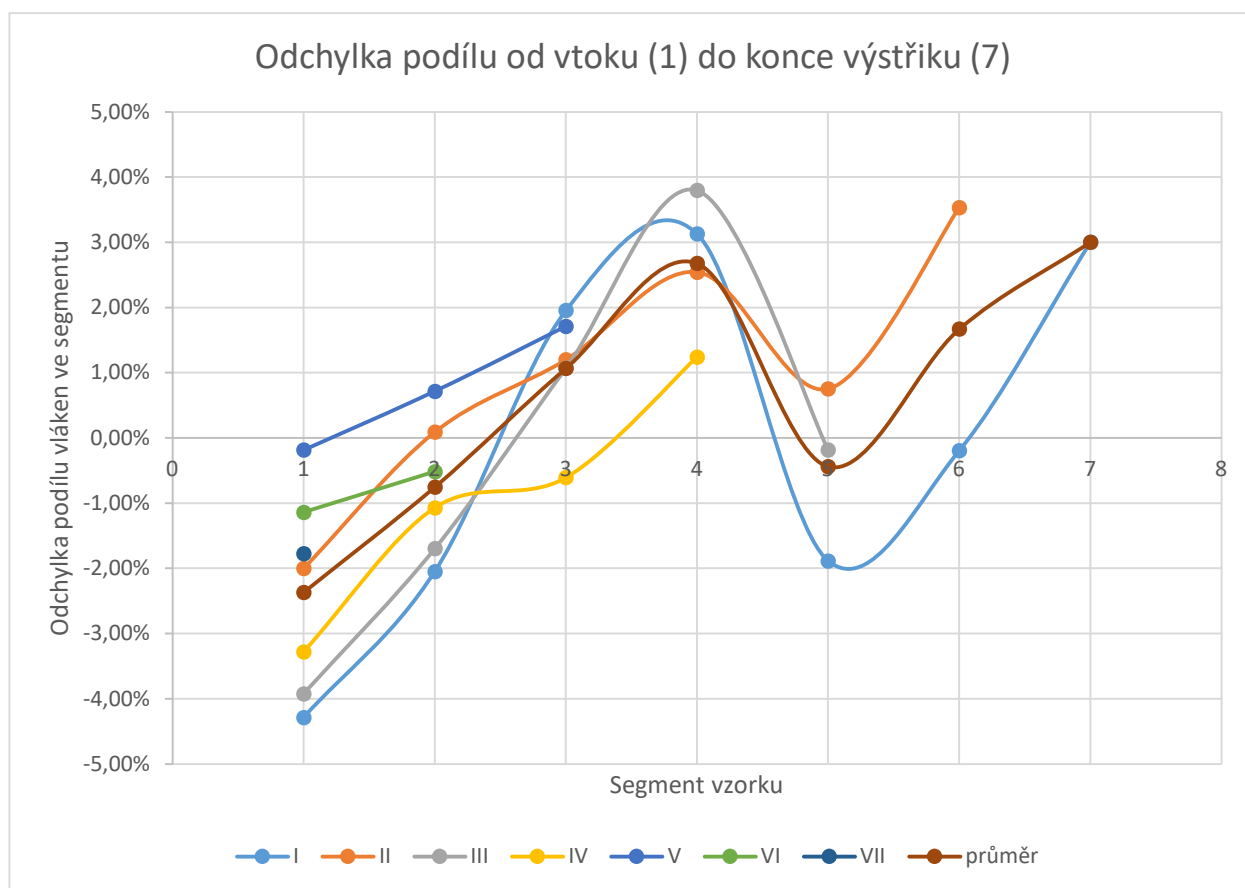
Vzorek	Segment	Vzorek [g]			Kelimek+Vzorek [g]			Kelimek+popel [g]			Kelimek [g]			Popel [g]	Podíl popelu
I	1	3,6945			15,2120	15,2108	15,2108	12,5950	12,5942	12,5939	11,5167	11,5169	11,5165	1,0777	29,2%
I	2	3,5635			15,7713	15,7712	15,7709	13,2714	13,2715	13,2713	12,2078	12,2075	12,2076	1,0638	29,9%
I	3	2,6557			15,8669	15,9664	15,8659	14,0694	14,0691	14,0692	13,2441	13,2441	13,2440	0,8252	31,1%
I	4	1,8511			15,4512	15,4513	15,4503	14,1817	14,1819	14,1813	13,5990	13,6001	13,6004	0,5818	31,4%
I	5	3,5335			14,9641	14,9644	14,9642	12,4875	12,4874	12,4869	11,4305	11,4307	11,4309	1,0566	29,9%
I	6	1,7629			13,9713	13,9711	13,9707	12,7446	12,7442	12,7443	12,2081	12,2081	12,2082	0,5362	30,4%
I	7	2,5677			14,8534	14,8530	14,8530	13,0915	13,0920	13,0910	12,2860	12,2854	12,2850	0,8060	31,4%
II	1	3,4469	3,4473	3,4470	14,9625	14,9619	14,9625	12,5450	12,5447	12,5445	11,5152			1,0295	29,87%
II	2	3,5375	3,5375	3,5374	15,7434	15,7433	15,7431	13,2852	13,2845	13,2849	12,2058			1,0791	30,50%
II	3	2,7630	2,7630	2,7030	16,0071	16,0070	16,0070	14,1113	14,1095	14,1093	13,2640			0,8460	30,84%
II	4	1,8172	1,8171	1,8170	15,4166	15,4166	15,4167	14,1684	14,1674	14,1664	13,5995			0,5679	31,25%
II	5	2,9698	2,9696	2,9694	14,3954	14,3953	14,3952	12,3412	12,3406	12,3308	11,4257			0,9118	30,71%
II	6	2,7493	2,7493	2,7493	14,9571	14,9573	14,9570	13,0753	13,0754	13,0754	12,2079			0,8675	31,55%
III	1	3,5362	3,5362	3,5362	15,0595	15,0591	15,0592	12,5590	12,5583	12,5582	11,5231			1,0354	29,3%
III	2	3,4547	3,4545	3,4545	15,6832	15,6830	15,6831	13,2642	13,2635	13,2627	12,2285			1,0350	30,0%
III	3	2,5999	2,6001	2,5999	15,8697	15,8700	15,8699	14,0712	14,0705	14,0706	13,2699			0,8009	30,8%
III	4	1,6147	1,6148	1,6148	15,2346	15,2346	15,2342	14,1310	14,1303	14,1302	13,6197			0,5108	31,6%
III	5	2,9097	2,9098	2,9097	14,3620	14,3620	14,3621	12,3374	12,3375	12,3374	11,4523			0,8851	30,4%

Obr. 73 poskytne výsledky měření hmotností jednotlivých segmentů před a po spalování.

Souhrnně lze říci, že zkušební metoda se jeví jako velmi spolehlivá, a to především z následujících důvodů:

- Metoda je jednoduchá a vyžaduje relativně jednoduché vybavení.
- Použitá váha „Ohaus Explorer pro“ byla dostatečně přesná pro měření hmotnosti (nominálně s přesností 0,1 mg).
- Zkoušky ukázaly dobrou shodu mezi údaji výrobce (30 %) a reálně naměřenými hodnotami (30,48 %).

Následující podíly skleněných vláken na segment (osa X) byly měřeny pro vzorky I-VII podle Obr. 73:



Obr. 73 - Grafické znázornění hmotnostních podílů skleněných vláken v segmentech 1-7 vzorků I-III

Dílčí závěr experimentu 3:

Sedm zkušebních vzorků jasně ukazuje, že obsah vláken ve výstřicích a segmentech není rovnoměrný[K3]:

- V různých segmentech kolísá obsah vláken přibližně o ± 4 procenta.
- Uvedené odchylky jsou tak významné, že již nelze popsat tento kompozit jako homogenní. Rozdíly by měly ovlivnit mechanické vlastnosti.
- Kolísání naměřených hodnot ve všech vzorcích naznačuje, že sleduje určitý „vzor“ (např. Segment I nízký, segment IV vysoký).

- Mělo by se dále zkoumat, zda má tento „vzor“ něco společného s průřezy, kompresí a podobně.

7.5 Diskuse výsledků experimentu 3: ash test

Tavenina polyamidu vyztuženého skelnými vlákny je suspenze. Suspenze mohou mít tendenci oddělovat vlákna od kapaliny. Schmachtenberg, Lippe a Skrodolies ve své publikaci [21] ukazují, že to platí i pro plasty vyztužené vlákny (obr. 22). Segregace však není kvantifikována.

Experiment ukazuje shodu s literaturou. V práci byla vyvinuta jednoduchá metoda pro měření segregace pomocí úplného spalování. To umožňuje kvantitativní měření segregace. Tato metoda je nová.

Kapitola 7.4 poskytuje detailní informace o výsledcích. Kvantitativní analýza odchylek z Obr. 73 ukazuje:

Tab 21- Výsledky analýzy podílu skleněných vláken ve vzorcích

	Hmotnostní podíl skleněných vláken	Odchylka v procentech
Nejnižší naměřený obsah vláken	29,17 %	-2,77 %
Jmenovitý obsah vláken udávaný výrobcem materiálu	30 %	0 %
Nejvyšší naměřený obsah vláken	31,61 %	5,37 %
Maximální odchylka	-	8,1 %

7.6 Vyhodnocení výsledků experimentu 3 pro stanovení odchylek ve směru toku

Vliv na pevnost a pružnost kompozitu lze odhadnout lineární interpolací dat z Obr. 4 a zvýšením nebo snížením obsahu vláken uvedeného v Tab. 20.

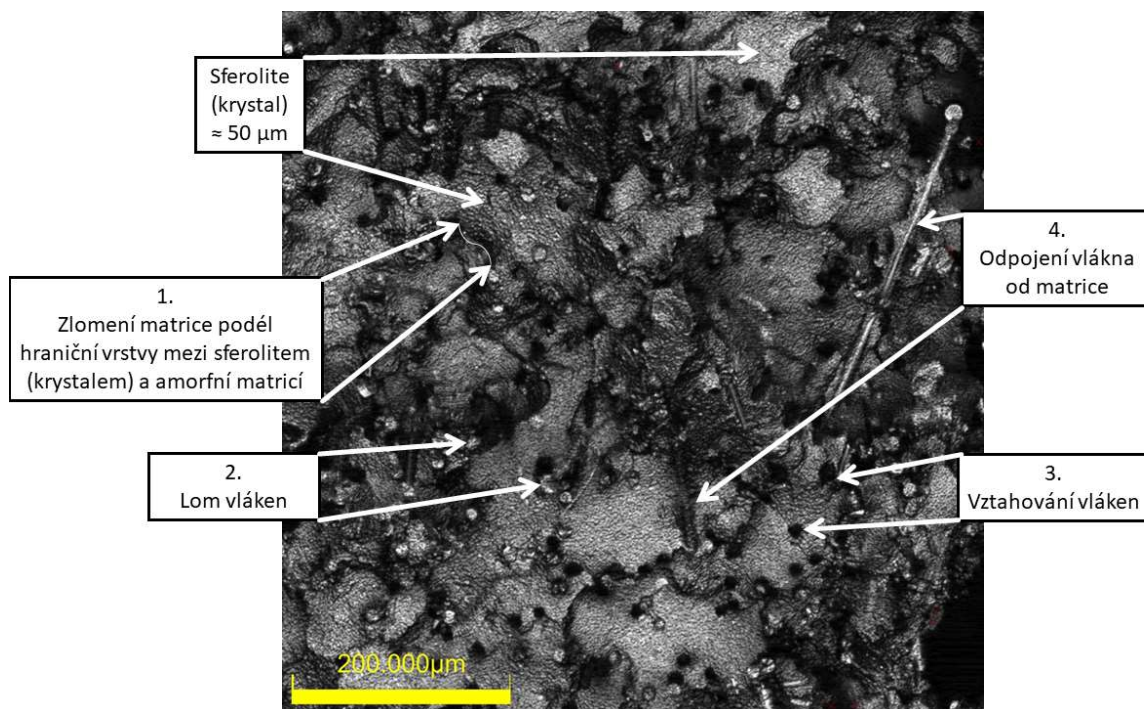
Tab. 20 - Posouzení snížení nebo zvýšení mechanických vlastností v závislosti na nehomogenní distribuci vláken

	Pevnost v tahu viz Obr. 4	Modul pružnosti viz Obr. 5
Pro nejnižší naměřený obsah vláken	168,9 MPa	8 893 MPa
Pro jmenovitý obsah vláken udávaný výrobcem materiálu	180 MPa	10 000 MPa
Pro nejvyšší naměřený obsah vláken	201,5 MPa	11 610 MPa

7.7 Výsledky experimentu 4: Konfokální laserová mikroskopie

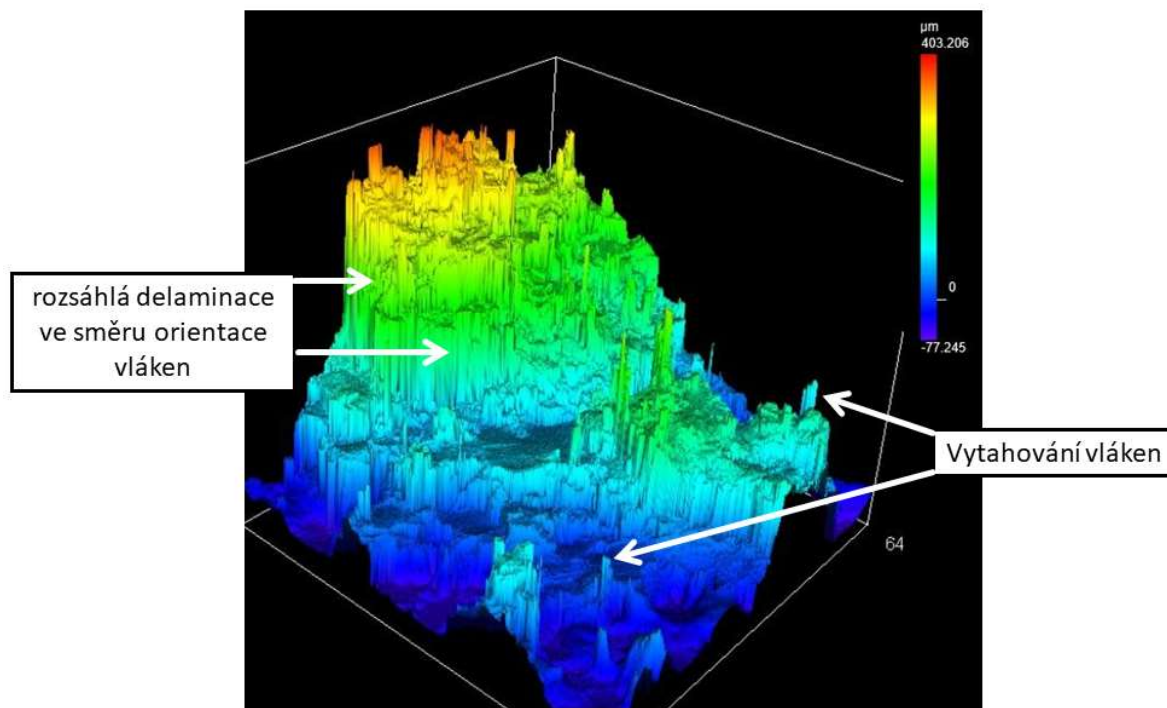
Vzorek byl zkoumán mikroskopem LEXT:

a) v laserové konfokální mikroskopii - 2D mód, který jasně ukazuje tyto čtyři mechanismy



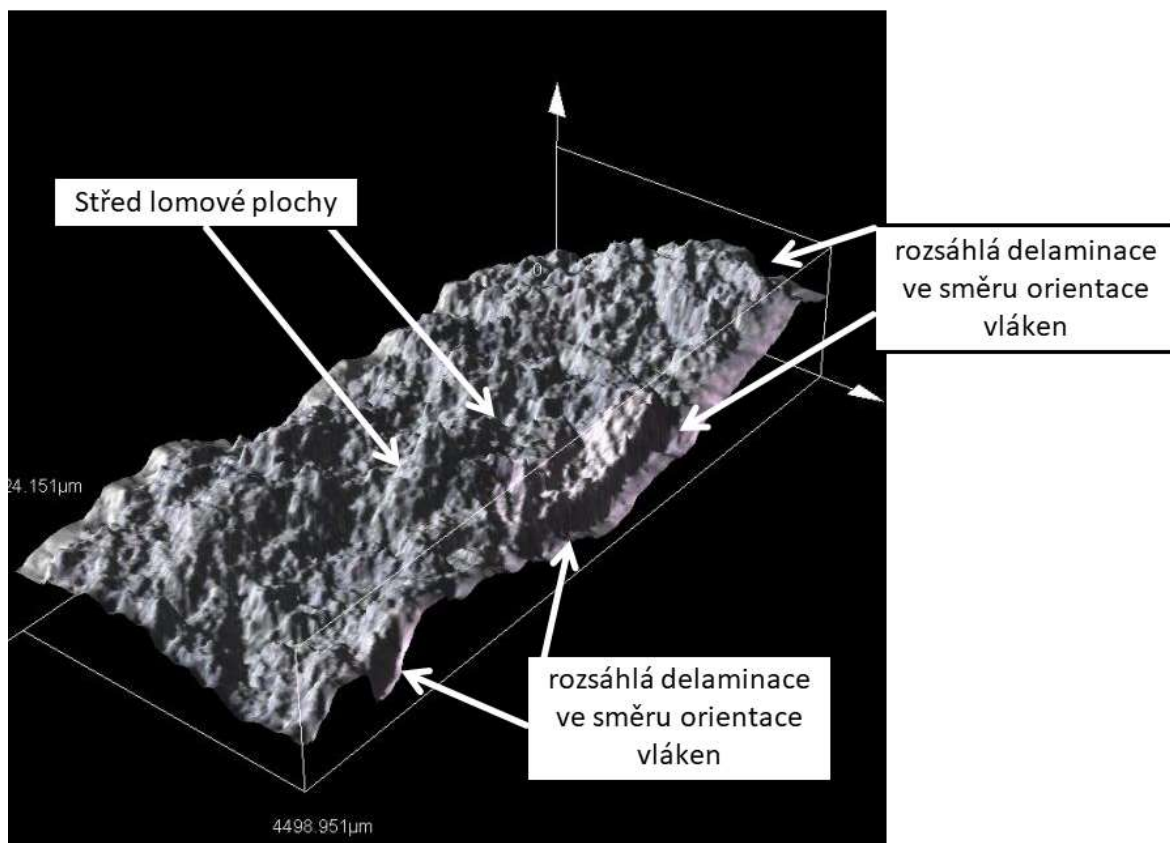
Obr. 74 - Snímek lomů EMS Grilon TSG-30/4 provedený mikroskopem LEXT v 2D mode, (zvětšení 10x) vzorek s pomalou rychlostí vstřikování „L“

b) metodou „3D model“ s barevným zdůrazněním výšky



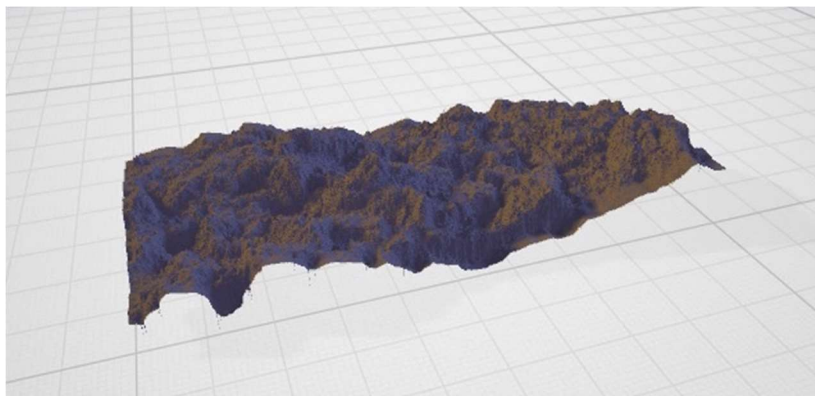
Obr. 75 - Snímek části lomu - metodou „3D model“ s barevným zdůrazněním výšky (zvětšení 20x) vzorek se střední rychlostí vstřikování „M“

c) metodou „3D drátového modelu“

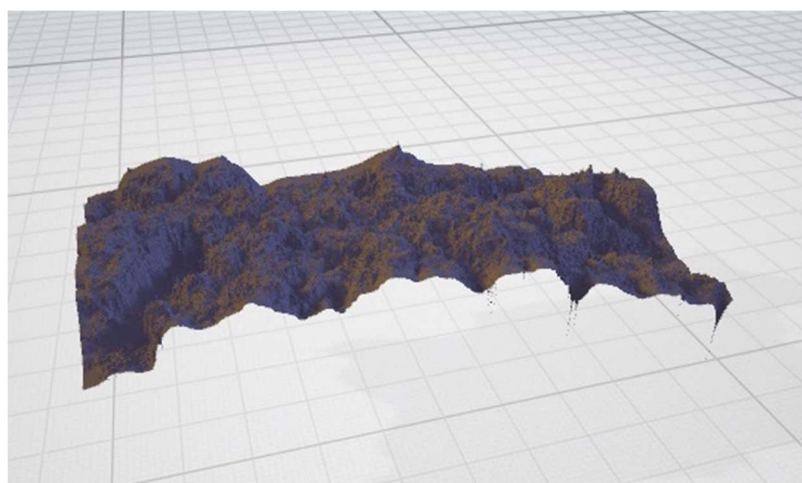


Obr. 76 - Izometrický snímek celé lomové plochy „metodou 3D drátového modelu“ (zvětšení 5x) vzorek s pomalou rychlostí vstřikování „L“

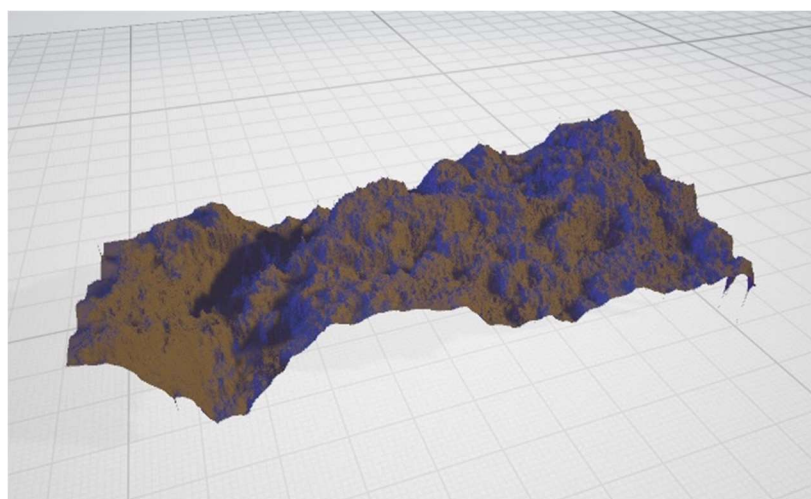
- d) Snímky „3D drátového modelu“ zkušebních těles vyrobených s různými procesními parametry rychlostí vstřikování (nízkou “L“, střední “M“ a vysokou rychlostí “S“):



Obr. 77 - Zkušební těleso vyráběno s procesními parametry: nízkou rychlostí vstřikování “L“



Obr. 78 - Zkušební těleso vyráběno s procesními parametry: střední rychlostí vstřikování “M“



Obr. 79 - Zkušební těleso vyráběno s procesními parametry: vysokou rychlostí vstřikování “S“

7.8 Diskuse výsledků experimentu 4

V části 2.1 byly vysvětleny modely dostupné v literatuře pro popis lomu materiálu:

- a) Publikace [8] se zabývá lomovou mechanikou kompozitních materiálů. V této souvislosti jsou identifikovány čtyři různé mechanismy tvorby a šíření lomu v materiálu (viz Obr. 29 [8]).

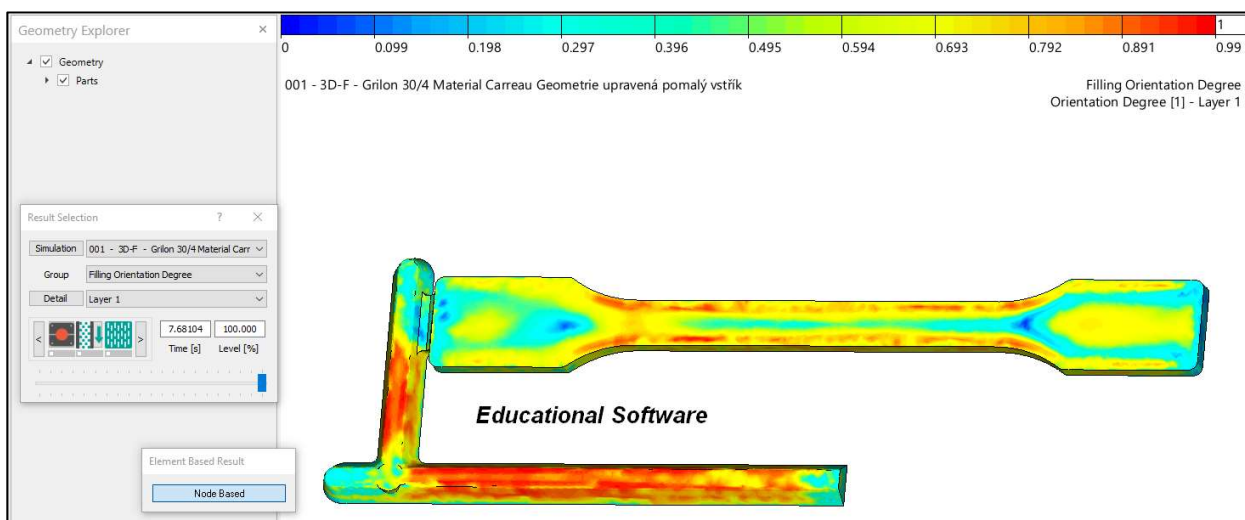
- b) Obecně se k popisu a výpočtu lomových procesů používá koncept lineární elastické lomové mechaniky [7] [6]. Tento koncept zohledňuje energetickou náročnost lomu. V souladu s tím se energie potřebná k šíření trhliny v homogenním materiálu před špičkou vrubu lineárně zvyšuje.

V experimentu 4 a optické mikroskopii v experimentu 2a) a b) lze demonstrovat čtyři mechanismy lomu z [8]. Konfokální laserová mikroskopie však ukazuje i oblasti, ve kterých dochází k odpojení vláken od matrice (delaminace). K delaminaci dochází kolmo k povrchu lomu ve směru tahu a je rozsáhlá (viz Obr. 75 a Obr. 76). Zde lze předpokládat, že lom se v těchto bodech nešíří lineárně a elasticky, ale náhle a spontánně. Výskyt těchto vertikálních lomových ploch se zvyšuje s rostoucí rychlostí vstřikování (viz 77, 78 a 79).

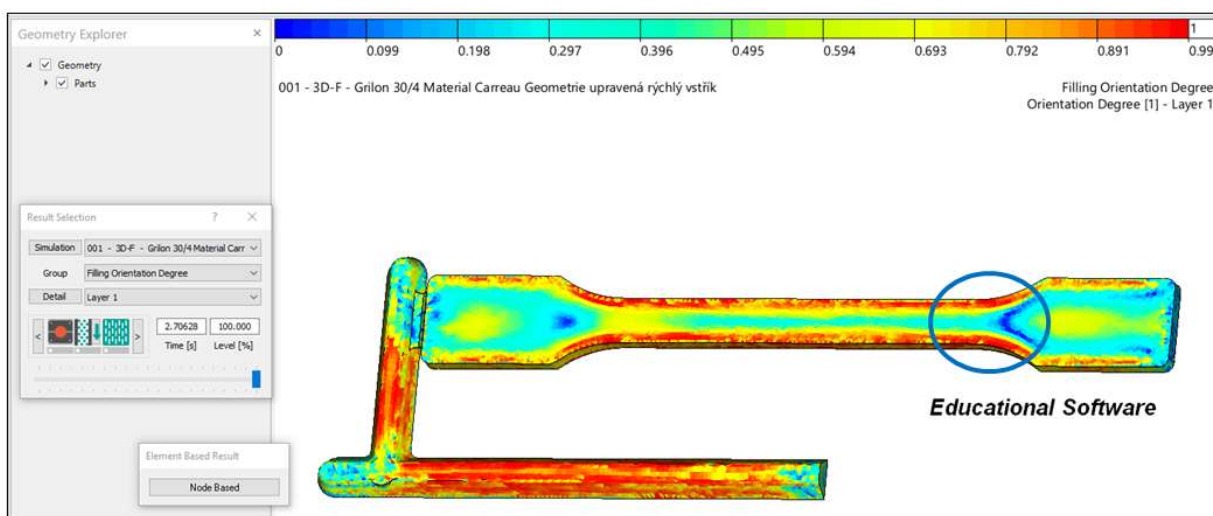
Tento jev není v literatuře doložen. Zde je potřeba dalšího výzkumu.

7.9 Výsledky numerické simulace

Softwarem CADMould byla vypočtena veličina „Stupeň orientace vláken [%]“ ve vstříku (viz Obr. 80 a Obr. 81): Tato hodnota je relativní bezrozměrná veličina, která při nulové orientaci (neorientovaná vlákna) nabývá hodnoty 0 % a při maximální orientaci nabývá hodnoty 100 %. Barevná škála hodnot na obrázcích ukazuje minimální hodnotu orientace 0 % modrou barvou a maximální hodnotu 100 % červenou barvou (100 %=1).



Obr. 80 - Stupeň orientace vláken při pomalém vstříku „L“ [%]



Obr. 81 - Stupeň orientace vláken při rychlém vstříku „S“ [%]

7.10 Diskuse výsledku numerické simulace

V literatuře [20] se poukazuje na to, že extenzní toky vyrovnávají vlákna (viz Obr. 21). Naopak kompresní tok povede ke snížení orientace.

V modrém kruhu na obrázku 73 simulace ukazuje oblast, ve které není tavenina natahována, ale stlačována. Zde náhle klesá orientace.

Pokles orientace předpovídaný v literatuře je potvrzen simulací. Provedený lomový test (experiment 1) ukazuje, že většina zkušebních těles se v tomto místě zlomí (obr. 76). Tento výsledek souhlasí s tvrzením v literatuře [10].

8 ZÁVĚREČNÁ DISKUSE K VÝSLEDKŮM

Tab. 21 - Určení velikosti významu podmínek pro prasknutí výstřiků kompozitních částí z polyamidu vyztuženého krátkými skleněnými vlákny

Podmínky pro prasknutí výstřiků (viz 6.1.4)	V kapitole práce	Kvantifikace	Velikosti významu podmínek*
1. Podmínky, které pochází z podstaty taveného kompozitu:			
a. Tavenina matrice kompozitu má ne-newtonovskou podstatu. V důsledku toho dochází k nadprůměrnému smykovému napětí blízko stěn formy.	7.3.4	Odchylka PENV je 15,1 %	++
b. Vlákna se mohou v tavenině vyrovnat (orientace):	6.4.1	Vlákno je obklopeno devítinásobným množstvím taveniny (objemu)	++
c. Vlákna mají poměr délky k průměru (AR), který vytváří anizotropii	7.3.2	Poměr délky ku průměru vláken je asi 32:0	++
d. Tavenina kompozitu a vlákna jsou suspenze. Vlákna se mohou na některých místech hromadit (segregace).	7.7	Odchylka hmotnostního podílu skleněných vláken v procentech je 8,1 %	+
2. Podmínky, které pochází z geometrie výlisku:			
a. Průřez povrchu, kterým protéká tavenina kompozitu se zvětšuje. To vede k dekompresi taveniny, tzv. dekompresnímu toku (expanzní tok).	7.3.3 2b vzorec 4	PENV se zvyšuje o 6,3 %	+
b. Průřez povrchu, kterým protéká tavenina kompozitu se zmenšuje. To vede ke stlačení taveniny, tzv. kompresnímu toku.	7.3.3 2b vzorec 2	PENV se snižuje o 3,7 %	-
3. Podmínky, které pochází ze charakteristiky lomu výstřiku: existuje mechanismus, který vede k prasknutí materiálu.	7.8	Rozsáhlá delaminace je kolmo k povrchu lomu ve směru tahu. Předpoklad: lom se v těchto bodech nešíří lineárně a elasticky, ale náhle a spontánně.	+

* Velikost významu: ++ riziko se významně zvýší, + riziko se významně zvýší, - riziko prasknutí se sníží

9 DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ POSTUP

a) Zkouška tahem:

Výsledky tahové zkoušky případů nejsou ve většině platné. Důvod je, že čelisti jsou blízko praskání. Bylo by žádoucí najít způsob měření, který by fungoval i pro tyto zkušební tyče.

b) Plastografie:

Bylo by žádoucí, určit přesnost této metody měření.

c) ash test:

Otázkou je, jak moc závisí segregace na rychlosti vstřikování.

d) Konfokální laserová mikroskopie

Rozsáhlá delaminace bylo možné určit pouze subjektivně na snímcích (Obr. 75 a 76). Pokus o kvantifikaci oddělení pomocí hodnot drsnosti Rz a Rm se neukázal jako proveditelný, protože tyto hodnoty představují průměrnou hodnotu. Extrémní odchylky v rozsáhlé delaminaci se ztrácejí při průměrování. Bylo by žádoucí vyvinout statistickou metodu, která by pomohla kvantifikovat rozsáhlé oddělení.

5. Numerická simulace:

Bylo by žádoucí porovnat přesnost simulace s výsledky plastografie.

10 ZÁVĚR

10.1 Závěry podle cílů disertační práce

Tato disertační práce popisuje kvantitativní okrajové podmínky praskání výstřiku kompozitu z polyamidu a krátkých skleněných vláken. Podmínky jsou popsány v kapitole 6.1.4. Tím je splněn první dílčí cíl.

Druhého dílčího cíle bylo dosaženo provedením experimentů 1-4:

- zkouškou tahem (6.2.2),
- plastografií (6.2.3),
- likvidační matrice úplným spalováním ("ash test" 6.2.6) a
- konfokální laserovou mikroskopií (6.2.7).

Kromě toho byly použity tři výpočty k tvorbě základu pro kvantitativní vysvětlení zlomení zkušebních těles:

- výpočet pohyblivosti vláken v kompozitu (6.4.1),
- vývoj koeficientu pro statistické vyhodnocení orientace (6.4.2) a
- numerická simulace (6.4.3).

Tím byl třetí dílčí cíl plně splněn.

Čtvrtý dílčí cíl zahrnuje kvantifikaci různých podmínek praskání výstřiku kompozitu. Podmínky byly kvantifikovány v experimentech 1-4 (7.1-7.8). Dílčí výsledky byly nakonec diskutovány a nakonec vyhodnoceny v kapitole 8. Díky tomu bylo dosaženo čtvrtého dílčího cíle.

Hlavní cíl, vysvětlit příčinu praskání výstřiku kompozitu z polyamidu a krátkých skleněných vláken, byl plně splněn splněním čtyř dílčích cílů.

10.2 Přínos disertační práce pro praxi

V průmyslové praxi bylo vyztužení termoplastů krátkými skleněnými vlákny logickým důsledkem skutečnosti, že tyto materiály (TKSV) mají díky vyztužení v mnoha ohledech lepší vlastnosti.

Disertační práce ukazuje, že tyto výhody jsou využitelné, pouze pokud jsou současně zohledněna také rizika. Orientace a homogenita vláken nebyly v žádném případě konstantní (viz Tab. 21).

Naopak se jeví jako důležité v budoucnu věnovat tomuto problému větší pozornost, aby komponenty spolehlivě a reprodukovatelně splňovaly požadavky průmyslové praxe. Následující lokální anizotropie v materiálu má silný vliv na únosnost a pevnost.

Navíc disertační práce ukazuje, že vybraný výstřik má slabé (kritické) místo, kde se díl při tahových zkouškách vždy poruší. V tomto bodě dochází k expanzi taveniny.

Pokud výrobce vezme v úvahu zmíněné příčiny orientace a nehomogenity, mohl by každou nově navrženou součást vyšetřit, pomocí informací a údajů z této disertační práce a odhadnout tak rizika pro únosnost a pevnost.

Z výsledků disertační práce vyplývá, že problémem je zřejmě orientace a nehomogenita vláken.

Pokud však má technik základní procesy plně pod kontrolou, lze tyto znalosti také použít a cíleně využívat orientace a hustoty vláken v komponentech. Pak by součást mohla být vyztužena ve větší míře, než u běžného materiálu podle datového listu.

Takto se uvedené riziko změní ve výhodu.

Likvidace matrice úplným spalováním „ash test“ (6.3.1) a mikroskopická metoda (Plastografie 6.3.2) nekladou na měřicí technologii a techniku zvlášť vysoké nároky. V případě potřeby je lze použít při

zajišťování kvality jako jednoduché metody pro kontrolu orientace a segregace vláken, použitelné v praxi.

10.3 Přínos disertační práce pro vědu

Disertační práce zvýší povědomí o vlivu orientace a homogenity výztužných vláken na kvalitu výstřiku. Dále poskytne návod na jednoduché metody analýzy, které by mohly přispět k zajištění kvality technických výstřiků z kompozitních materiálů.

Pravděpodobně značné odchylky, které by mohly být prokázány, vedou k zájmu o lepší pochopení procesu zpracování TKSV v jeho složitosti.

Slabé (kritické) místo a rozsáhlá delaminace nejsou v literatuře popsány a jsou pravděpodobně novými výsledky, které je třeba vzít v úvahu.

Z našeho pohledu není téma zdaleka plně prozkoumáno. Měla by být důkladně prozkoumána anizotropie v komponentě, která např. hraje systémově významnou roli v součástech pro automobilový průmysl.

Bylo by rovněž žádoucí, aby byly stávající analytické metody dále rozvíjeny a staly se finančně dostupnější.

Výsledky z plastografie naznačují, že místa s vysokou orientací mají také nadprůměrný počet vláken. Pokud by se to potvrdilo v dalších experimentech, znamenalo by to, že výstřik má oblasti, ve kterých jsou mechanické vlastnosti obzvláště dobré. Otázkou je proč. Neexistuje žádný analytický model pro takovou koncentraci a orientaci.

Výsledky likvidace matrice úplným spalováním („ash test“) ukazují vzor, jehož původ by měl být zkoumán.

11 SEZNAM PUŽITÝCH LITERÁRNÍCH ZDROJŮ

- [1] Bienmüller M., Joachimi D., Klein A., Münker M.. *Marktentwicklung PA6 und PA66*. Kunststoffe . 10, 2013, Sv. 10/2013. ISSN 0023-5563.
- [2] *Polyamidy s plnivem ze skelných vláken*. Ensinger webová stránka. [Online] [Citace: 21. 6 2021.] <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/modifikovane-plasty/polyamidy-s-plnivem-ze-skelných-vláken>.
- [3] BASF. *Ultramid Brochure*. Ludwigshafen : BASF, 2021.
- [4] Meschut G., Augenthaler F., Sartisson V. *Effiziente Füge-techniken für hybride Leichtbaustrukturen*. Hannover : 15. Werkstoff-Forum, Hannover Messe, 2015.
- [5] Zálešák M. *Kvantifikace vlivu aditiv na mechanické vlastnosti plastů a kompozitů pro palné zbraně*. Diplomová práce. místo neznámé : UTB Zlín, 2016.
- [6] Kunz J.. *Aplikovaná lomová mechanika*. místo neznámé : Vykladatelství ČVUT, 2005.
- [7] Grellmann W., Seidler S. *Kunststoffprüfung*. 3. vydání. Munchen, 2015. ISBN 978-3446220867. 2015. ISBN 978-3446220867.
- [8] Stelzer G. *Zum Faser- und Eigenschaftsabbau bei der Verarbeitung und Recycling diskontinuierlich faserverstärkter Kunststoffe*. Dissertační práce. Kaiserslautern : Universität Kaiserslautern, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, 2002.
- [9] Domininghaus H., *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*. místo neznámé : Springer-Verlag, 2013. ISBN 978-3642161728.
- [10] Zeman L. *Vstřikování plastů - Teorie a praxe*. Praha : Vydala Grada Publishing a.s., 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [11] Schürmann, H. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin : Springer, 2005. ISBN 978-3-540-40283-1.
- [12] Nuruzzaman D. M., Asif Iqbal A., Oumer A. N., Mazni Ismail N., Basri S. *Experimental investigation on the mechanical properties of glass fiber reinforced nylon*. Pahang, Malaysia : IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2016.
- [13] *Teplota tepelné výchylky - Heat deflection temperature* Teplota tepelné výchylky. xcv.wiki. [Online] [Citace: 23. 6 2021.] https://cs.xcv.wiki/wiki/Heat_deflection_temperature.
- [14] *Polymer Properties Database*. [Online] 2015. [Citace: 1. 7 2021.] <https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/HDT-Table1.html>.
- [15] *SpecialChem Homepage*. [Online] [Citace: 15. 1 2022.] <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/hdt-0-46-mpa-67-psi>.
- [16] Coulon A., Lafranche E., Douchain C., Krawczak P., Ciolczyk J. P., Gamache E. *Flexural creep behaviour of long glass fibre reinforced polyamide 6.6 under thermal-oxidative environment*. Journal of Composite Materials. 0, 2016, Sv. 0, 1-14.
- [17] Vrbka J., *Mechanika kompozitů*. Brno : Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008.
- [18] Hull, D. *An Introduction to Composite Materials*, , 1981. Cambridge : Cambridge University Press, 1981. ISBN 978-0-521-86095-6.
- [19] Lenfeld P. *Technologie vstřikování*. [Online] 2015. [Citace: 21. 6 2021.] <https://publi.cz/books/184/03.html>.

- [20] Monfared V. *Problems in short-fiber composites and analysis of chopped fiber-reinforced materials*. New Materials in Civil Engineering. Zanjan, Iran : Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, 2020. DOI: 10.1016/B978-0-12-818961-0.00031-4
- [21] Schmachtenberg E., Lippe D., Skrodolies K.. *Faser-/Matrix-Entmischung während des Fliesspressens von SMC*. Journal of Plastics Technology. 2005.
- [22] Kerekes R., *Characterization of Fibre Flocculation Regimes by a Crowding Factor*. Journal of Pulp and Paper Science. 18, January 1992, Sv. 1, 32-38.
- [22] Kerkstra R., Brammer S. *Injection Moulding Advanced Trouble Shooting Guide*. ISBN 978-1-5699, München : Hanser Publishers, 2018.
- [23] Studi, D., Padova, D., Petroski, H. *Analysis of the effect of sequential injection molding on weld line properties*. 2019. Corpus ID: 199598633.
- [24] *Vady výstřiků – 1. díl: Příčiny vzniku vad a studené spoje*. MM Průmyslové spektrum. [Online] 3. 3 2010. [Citace: 7. 7 2021.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-1-dil-priciny-vzniku-vad-a-studene-spoje>.
- [25] Franzén B., Klason C., Kubát J., Kitano T. *Fibre degradation during processing of short fibre reinforced thermoplastics*. Composites. Volume 20, 1989, Sv. Issue 1, Pages 65-76, DOI: 10.1016/0010-4361(89)90684-8.
- [26] Brink A., *Polyamide crystallization structures*. Ted. místo neznámé : The extrusionists, 2015.
- [27] Borealis AG. *PP Fibremod (TM)*. Videň : Borealis AG, 2016.
- [28] Weißbach W., Dahms M., Jaroschek C. Kunststoffe (Polymere). [autor knihy] *Werkstoffkunde*. . Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015. DOI: 10.1007/978-3-658-03919-6_9
- [29] Vosecký V., Sedlák M. *Konec doby plastové? Inovace mohou zachránit planetu od masové produkce umělých hmot*. www.obnovitelne.cz. [Online] 18.. leden 2019. <https://www.obnovitelne.cz/clanek/688/konec-doby-plastove-inovace-mohou-zachranit-planetu-od-masove-produkce-umelych-hmot/>.
- [30] Kießling H., Matthes L. *Skleněná textilní vlákna*. Textil- Fachwörterbuch. Berlin : ISBN 3-7949-0546-6, 1993.
- [31] BASF. *Ultramid Structure Brochure*. místo neznámé : Badische Anilin- und SodaFabrik (BASF) PM / K, F 204, 2015.
- [32] Vincenta M., Girouda T., Clarke A., Eberhardt C. *Description and modeling of fiber orientation in injection molding of fiber reinforced thermoplastics*. Polymer. 2005, 6719–6725, DOI: 10.1016/j.polymer.2005.05.026.
- [33] Möbius T., Eilbracht S., Rudolph N., Osswald T. A. *Analysis of fibre orientation and fibre matrix separation in a compression moulding process with an equi-biaxial flow front*. Journal of plastics technology. 9, 2013, Sv. 2.
- [34] *Non-Newtonain Models. SimScale - CFD, FEA, and Thermal Simulation in the Cloud*. [Online] https://www.simscale.com/docs/content/simulation/model/materials/OF_Non-Newtonain-Models.html.
- [35] Jarzebski, G. J. *On the effective viscosity of pseudoplastic suspensions*. Rheologica Acta . 20, 1981, Sv. 280–287 . DOI: 10.1007/BF01678029
- [36] Rosato D. V., Murphy J. *Reinforced plastics handbook*. místo neznámé : Elsevier, 2004. ISBN 978-1856174503
- [37] EMS-CHEMIE AG, Business Unit EMS-GRIVORY, *EMS Technical Data Sheet Grilon TSG-30/4*. [Online] 2002. <https://ems.materialdatacenter.com/eg/en/main/ds/Grilon+TSG-304>.

- [38] Neitzel M., Mitschang P.: *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. Faser-Kunststoff-Verbund. místo neznámé : Hanser Fachbuchverlag, 2004. ISBN 3-446-22041-0.
- [39] ARBURG, Firma. *Technická specifikace stroje Allrounder 270c Golden Edition*. Homepage firmy Arburg. [Online] 2018. [Citace: 11. 3 2019.] https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_270C_GOLDEN_EDITION_TD_523670_en_GB.pdf.
- [40] *Technická listina LabTest 5.100SP1*. Opava : Firma Labortech, 2017.
- [41] *ZEISS Axio Observer for Materials*. Homepage firmy Carl Zeiss. [Online] [Citace: 17. 7 2021.] <https://www.zeiss.com/microscopy/us/products/light-microscopes/axio-observer-for-materials.html>.
- [42] Běhalek L., *Polymery*. 2016. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [43] Kolaříková M., *Přednáška Metalografie*. místo neznámé : ČVUT, Ústav strojírenské technologie, Praha, 2017.
- [43] Ritschel V., *Výroba kompozitních materiálů autoklávovou technologií*. Bakalářská práce. Praha : ČVUT, 2021.
- [44] Piersig W., Sorby S., *Begründer der klassischen Metallographie*. místo neznámé : Grin, 2009. ISBN 978-3640272655.
- [45] Geels K., Fowler D. B.. *Metallographic and materialographic specimen preparation, light microscopy, image analysis, and hardness testing* . místo neznámé : ASTM International, 2011. ISBN 978-0-8031-4265-7.
- [46] *Materialografie*. Webová stránka Hanyka. [Online] Hanyko Praha s.r.o., 22. 5 2018. <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/materialografie/>.
- [47] Dong M., Schmauder S., Bidlingmaier T., Wanner A. *Prediction of the mechanical behaviour of short fiber reinforced MMCs by combined cell models*. Computational Materials Science. Volume 9, , 1997, Sv. December 1997, Issues 1–2. DOI: 10.1016/S0927-0256(97)00066-9
- [47] Folgar F., Tucker CL. *Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions*. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 3, 1984, Sv. 2, 98-119.
- [48] Mlekusch B., Lehner E. A., Geymayer W. *Fibre orientation in short-fibre-reinforced thermoplastics*. Materials Science. 59, 1999, 543-545. DOI: 10.1016/S0266-3538(98)00101-8.
- [49] Kugler S. K., Kech A., Cruz C., Osswald T.. *Fiber Orientation Predictions—A Review of Existing Models*. Journal of Composite Science. 4, 2020, Sv. 69. DOI: 10.3390/jcs4020069.
- [49] Lee K. W., Lee S. W., Youn J. R., Kang T. J., Chung K.. *Confocal microscopy measurement of the fiber orientation in short fiber reinforced plastics*. Fibers and Polymers . volume 2, 2001, pages 41–50. DOI: 10.1007/BF02875227.
- [50] Marg T. *Ashing of the plastic*. Ludwigshafen: BASF Performance Materials Europe / Infopoint Ultraplaste, 2018.
- [51] *Ash and Moisture Applications for Plastic and Composites*. Homepage Precisa. [Online] [Citace: 17. 7 2021.] <https://www.precisa.co.uk/ash-and-moisture-applications-for-plastic-and-composites/>.
- [52] *Rotorblätter mit CT-Analysesoftware geprüft - Fasern korrekt ausrichten*. Plastverarbeiter Online. [Online] 17. 12 2012. [Citace: 21. 6 2021.] <http://www.plastverarbeiter.de/36921/fasern-korrekt-ausrichten/>.
- [53] Ramazani A., Ait-Kadi A., Grmela M., *Rheology of Fiber Suspensions in Viscoelastic Media: Experiments and Model Predictions*. Journal of Rheology. 45, 2001, Sv. 4, 945-962. DOI: 10.1122/1.1378026.

- [54] Bullinger O., Dissertace: *Röntgenrefraktionsverfahren für die zerstörungsfreie Charakterisierung nichtmetallischer Werkstoffe : Möglichkeiten und Grenzen*. místo neznámé : Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart, 2005.
- [54] van Haag J., Bontenackels C., Hopmann C., *Fiber orientation prediction of long fiber-reinforced thermoplastics: optimization of model parameters*. Proceedings of the technical conference & exhibition . Orlando, Florida, USA : ANTEC 2015, 2015.
- [55] Pfeifer T., Rümenapp S., Feldhoff J.. *Determination of fibre orientation in composites with the ultrasonic backscattering method*. NDTnet . 2, 1997, Sv. 2. <https://www.ndt.net/article/aachen/aachen.htm>
- [56] *Preparation procedures - Polymer Matrix Composites (PMC's)* . Metallographic. [Online] PACE Technologies, Tucson Arizona, USA, 12. 4 2016. [Citace: 22. 5 2018.] <http://www.metallographic.com/Metallographic-Preparation-Procedures/PMC-Description.htm>.
- [56] Steegmüller R., Diener L. *New developemnts of microwave near-field imaging with open-ended waveguides*. Nondestructive Testing and Evaluation . 13, 1997, Sv. 4, 203-213. DOI: 10.1080/10589759708953030.
- [57] *Bruchmodell faserverstärkte Kunststoffe – Lexikon der Kunststoffprüfung*. [Online] Polymer Service GmbH Merseburg. [Citace: 15. 1 2022.] https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Bruchmodell_faserverst%C3%A4rkte_Kunststoffe.
- [58] *Moldflow's fiber orientation models (Theory)*. Autodesk Moldflow Homepage. [Online] [Citace: 20. 06 2021.] <https://knowledge.autodesk.com/search-result/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/MoldflowInsight360/files/GUID-6B3A7386-DE57-450E-BF94-B10BD629EC9B-htm.html>.
- [67] Vaidya U., Chawla K. K., *Processing of fibre reinforced thermoplastic composites*. International Materials Reviews. 53, 2008, Sv. 4, 185-218. DOI: 10.1179/174328008X325223
- [68] Parodi E., Gerrit W. M., Peters L., Govaert E.. *Structure–Properties Relations for Polyamide 6, Part 1: Influence of the Thermal History during Compression Moulding on Deformation and Failure Kinetics*. Polymers . 2018, Sv. 10, 710. DOI: 10.3390/polym10070710.
- [69] Takenobu S., Hirai Y., Somiya S., *Estimating the creep behavior of glassfiber-reinforced polyamide considering the effects of crystallinity and fiber volume fraction*. Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes. 2018, Sv. 4, 5. DOI: 10.1186/s40759-018-0038-4.
- [70] Lauke B., Pompe W. *Fracture toughness of short-fibre reinforced thermoplastics*. Composites Science and Technology. 26, 1986, Sv. 1, 37-57 . DOI: 10.1016/0266-3538(86)90055-2.
- [71] Lauke B., Pompe W., *Relation between work of fracture and fracture toughness of short-fibre reinforced polymers*. Composites Science and Technology. 31, 1986, Sv. 1, 25-33. DOI: 10.1016/0266-3538(88)90075-9.
- [72] Kaiser, J.-M., Dissertation: *Beitrag zur mikromechanischen Berechnung kurzfaserverstärkter Kunststoffe - Deformation und Versagen*. místo neznámé : Universität des Saarlands, 2013.
- [73] Sochi, T. *Analytical solutions for the flow of Carreau and Cross fluids in circular pipes and thin slits*. Rheologica Acta . 7/2015, 2015. DOI: 0.1007/s00397-015-0863-x
- [74] Purushottam D., Gujrati B., Arkadii I., Leonov K. *Computational Polymer Processing*. [autor knihy] Mitsoulis E.. Modeling and simulation in Polymers. místo neznámé : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. ISBN 978-9400966369
- [75] Linn J. *The Folgar-Tucker Model as a Differential Algebraic System For Fibre Orientation Calculation*. Berichte des Fraunhofer ITWM. Nr. 75, 2005.

- [76] Michaeli W. Projektantrag 5333382: *Vorhersage der Faser-/Matrix-Entmische bei der Herstellung langfaserverstärkter Pressbauteile*. Aachen : Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG, 2002.
- [77] Beitzl, F.. *1000 Tipps zum Spritzgießen Band 13 Polyamid Präzisionsverarbeitung*. Berlin : DIN e.V., 2017. ISBN 978-3410266419.
- [78] Bernasconi A., Cosmi, F, Hine P. J. *Fibre orientation distribution in short fibre reinforced polymers: A comparison between optical and tomographic methods*. Composites Science and Technology . 2012, Sv. 72, 16. DOI: 10.1016/j.compscitech.2012.08.018.
- [79] Moneke M.. Dissertation: *Die Kristallisation von verstärkten Thermoplasten während der schnellen Abkühlung und unter Druck*. Darmstadt : autor neznámý, 2001.
- [80] Petzow G., Carle V.. *Metallographic Etching - Technologies for Metallography, Ceramography and Plastography*. místo neznámé : ASM International, 1999. ISBN 9780871706331.
- [81] *Plastographie*. Soukromá wikipedia Polymerservice Merseburg. [Online] Polymer Service GmbH Merseburg, Německo, 14. 8 2017. [Citace: 22. 5 2018.] <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Plastographie>.
- [82] Trempler J. *Detektiv im Mikrokosmos- Beobachtende und messende Mikroskopie in der Schadensanalyse*. Halle-Wittenberg, Německo : Martin-Luther-Universität, 2007.
- [83] Krebs, S. Patent: DE19631532 (A1) „Postup a zařízení na neaxiální orientace vláken v trubkovém výrobku z kompozitního materiálu“, 24. 12. 1998

Použité technické normy

- [N1] ČSN EN ISO 472 „*Plasty – Slovník*“. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2013
- [N2] ČSN EN ISO 527-1 „*Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy*“. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020
- [N3] ČSN EN ISO 527-2 „*Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*“. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2012
- [N4] ČSN EN ISO 9513 „*Kovové materiály - Kalibrace průtahoměrových systémů používaných při zkoušení jednoosým zatížením*“. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2013
- [N5] ČSN EN ISO 16012 „*Plasty - Stanovení lineárních rozměrů zkušebních těles*“. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2017
- [N6] ČSN EN ISO 16396-1 „*Plasty - Polyamidy (PA) pro tváření - Část 1: Systém označování, značení výrobků a základy pro specifikace*“. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2015
- [N7] ČSN EN ISO 16396-2 „*Plasty - Polyamidy (PA) pro tváření - Část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností*“. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2017

12 PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA SOUVISEJÍCÍ S DISERTAČNÍ PRACÍ

- [K1] Krebs, S.; Kolařík, L. a Skočilas, J. Short glass fibre reinforced thermoplastics – a look deep inside. In: Kudláček, Jan. *Technological forum 2021: 12th International Technical Conference*. 1. Jaroměř: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, 2021, s. 138-142. ISBN 978-80-87583-33-3.
- [K2] Krebs, S.; Kolařík, L. a Skočilas, J. Short glass fibre reinforced thermoplastics – Orientation of fibres along the flow. *Manufacturing technology: Engineering Science and Research Journal*. J. E. Purkyně University in Ústí nad Labem. Czech Republic, 2022, ISSN 1213-2489, (submitted)
- [K3] Krebs, S. Methode zur Messung der Entmischung von Glasfasern in faserverstärkten Thermoplasten. *Kunststoffe*. Carl Hanser Verlag, 2022, ISSN 0023-5563, (submitted)
- [K4] Krebs, S.: Kap. 2.1.7. Orientace molekul v plastech a anizotropie, In: Krebs, S.; Brzksi Stunova, B.; Kolařík, L. *Technologie zpracování plastů a kompozitů*, Nakladatelství ČVUT, Praha 2020, ISBN 978-80-01-06722-2

Ostatní publikace autora

Diplomová práce: Vývoj systému pro strukturované zaznamenávání procesních kroků pro zpracování termoplastického plastového odpadu, Aachen, 1984

Článek: "Biostimulanty v technické normalizaci" v Magazínu ČAS 2/2020, Česká agentura pro standardizaci (ČAS), Praha, 2020

Kniha: "*Klein Einführung in die DIN-Normen*", 14. vydání, Spoluautor, vydavatel: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Patent: DE19703492 (A1) „Rozdělovač extrudéru pro dělení do materiálu do několika řetězců pro následné zpracování, např. vyfukování“, 6. 8. 1998

Patent: WO 98/51470 „Extruzní nástroj a postup jeho výroby“, 8. 6. 1998

Výukové podklady studijního předmětu: "*Technologie zpracování plastů a kompozitů (2331507/2331508)*", ČVUT Fakulta strojní, 2016-2021

Další aktivity:

Přednáška "*Plasty - Zásady konstrukce výrobků z plastů (550MT4)*", v rámci Materiály a technologie IV, Fakulta Architektury ČVUT, 2017/2018/2020

Přednáška „Definovat kvalitu tvářených dílů z plastů, je to riskantní?“ v rámci sedmého odborného semináře – „Kvalita a rizika ve výrobě“, 17. 4. 2014 v Čejkovicích

Seminář „Aktivně a efektivně pracovat v mezinárodní normalizaci CEN a ISO“ v DIN-Akademie, Německý normalizační institut, 18. 11. 2015, 20. 4. 2016, 13. 12. 2017

13 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Příklady použití termoplastů vyztužených krátkými skleněnými vlákny (TKSV) [3].....	9
Obr. 2 - Schematické znázornění čtyř mechanismů, které mohou vést k prasknutí kompozitu [8]....	10
Obr. 3 - Vytažení vláken na povrchu lomu „Pull-out-efekt“ Snímky pořízené řádkovací elektronovou mikroskopií (SEM - scanning electron microscope) ve stereoskopickém zobrazení [11]	11
Obr. 4 - Pevnost v tahu polyamidu pro různá složení kompozitů vyztužených skleněnými vlákny [3]	11
Obr. 5 – Modul pružnosti pro různá složení kompozitů vyztužených skleněnými vlákny [3]	12
Obr. 6 - Průřez zatíženého elementu	13
Obr. 7 - Zatížený element kompozitu - příklad $\varphi=30^\circ$ [17]	13
Obr. 8 - Naznačení teoretických předpokladů přenosu síly pro různé natočení vláken	13
Obr. 9 - Závislost mezního napětí σ_{XP} na poloze hlavního směru 1, určené úhlem φ [17]	14
Obr. 10 - Znázornění štěrbin s vyznačeným souřadným systémem.....	15
Obr. 11 - Profil rychlosti toku ve štěrbině pro různé indexy toku n.....	15
Obr. 12 - Profil smykové rychlosti pro různé indexy toku n.....	16
Obr. 13 - Schématický diagram změn v orientaci vláken během toku: (A) počáteční náhodné rozdělení; (B) rotace během smykového toku; (C) zarovnání během elongačního toku [18] (směr toku je naznačen šipkami).....	16
Obr. 14 - Fontánový efekt u vstupu taveniny do kavity	17
Obr. 15 - Trojrozměrný tok na přední straně toku a ztuhlá vrstva na stěně formy [19].....	17
Obr. 16 – Analytický model chování orientovaného vlákna v expanzním toku	18
Obr. 17 - segregace vláken při přechodu z většího na menší průřez [21]	18
Obr. 18 - Oblast lokalizace vláken kolem zpráčeného vlákna – příčný řez materiálem PA-GF	19
Obr. 19 - Turbulentní tok taveniny LDPE protékající úzkou tryskou, za kterou se její průměr 20x rozšíří [23]	19
Obr. 20 - Schematické znázornění vytvoření svarové linie a orientace vláken.....	20
Obr. 21 - Patent: zařízení na neaxiální orientace vláken v trubkovém výrobku z kompozitního materiálu [83]	21
Obr. 22 – Zkouška tahem: symetrická deformace výstřiku z houževnatých plastů (PE, PP)	21
Obr. 23 - Zkušební tělesa z materiálu Grilon, které jsou přerušena mezi segmentem č. 5 a č. 6.....	22
Obr. 24 - Vliv materiálu na vlastnosti výstřiku	23
Obr. 25 - Strukturní vzorce PA 6 a PA 66.....	24
Obr. 26 - Celková spotřeba plastů podle typů v roce 2012 [28].....	25
Obr. 27 - Porovnání kompozitů s dlouhými a krátkými vlákny s polymerní matricí bez výztuže [10]	28
Obr. 28 - Označení komponent kódem normy ČSN EN ISO 16396-1:2015 „Plasty - Polyamidy (PA) pro tváření - Část 1: Systém označování, značení výrobků a základy pro specifikace“ [N6] Součást automobilu: Polypropylen + 30 % mletého mastku	29
Obr. 29 - Přehled kapitol této disertační práce o vlastnostech taveniny termoplastů vyztužených vlákny	30
Obr. 30 - Tokové křivky: diagram napětí-deformace pro newtonské a nnewtonské tekutiny [34]...	30
Obr. 31 - Konstanty A, B a C v Carreauově modelu [7].....	32
Obr. 32 - Schematické znázornění viskozitní funkce podle modelu Cross.....	33
Obr. 33 - Schematické znázornění Maxwellova systému sestávajícího z tlumiče (viskózní chování) a pružiny (elastické chování) - zapojených v sérii	33
Obr. 34 - Porovnání závislosti viskozity na rychlosti deformace podle tvarového poměru vláken l/d pro materiál PA 6 bez vlákna a s vlákny [36]	35
Obr. 35 - Vstřikovací lis Arburg Allrounder 270 C Golden Edition v laboratoře fakulty strojní ČVUT v Praze	37
Obr. 36 - Plastifikační jednotka: 1 Šnek, 2 Válec, 3 Tryska, 4 Zpětný ventil, 5 Těsnicí válec, 6 Těsnicí kroužek, 8 Tepelné pásy velké, 9 Tepelný pás malý.....	39

Obr. 37 - Šnek vstřikovacího lisu Arburg Allrounder 270 C	39
Obr. 38 - Zkušební těleso z (PA6/PA66) + GF 30 (EMS-Grivory Grilon TSG-30/4 black 9832)	40
Obr. 39 - Trhací stroj LabTest 5.100SP1	40
Obr. 40 - Princip metody interferenčního kontrastu – Nomarského diferenciální kontrast (DIC Nomarski).....	42
Obr. 41 - Výsledné zobrazení naměřených vláken.....	43
Obr. 42 - Různé zobrazovací módy mikroskopu LEXT – microvia otvor 125µm	44
Obr. 43 - Umístění a číslování vzorků a segmentů ve výstřiku	47
Obr. 44 - Pracovní diagram tahové zkoušky – Porovnání deformačních křivek různých typů plastů [42]	49
Obr. 45 - Deformační křivka polymerů s omezenou možností orientace, např. PE a PP [42].....	50
Obr. 46 - Vztah mezi zkušební normou a normami pro parametry procesu pro polyamidy	51
Obr. 47 - Zkušební těleso před a po lepení.....	52
Obr. 48 - Grafické znázornění vztahů mezi metalografií, materiálografií a plastografií	53
Obr. 49 - Příklad: orientovaná vlákna: Úhel natočení vlákna v rovině příčného řezu $\alpha=30^\circ$, v rovině kolmé a míra natočení vlákna $\beta = 45^\circ$	54
Obr. 50 - Princip měření úhlu natočení vlákna	55
Obr. 51 - Princip měření parametru AR - míry natočení vlákna.....	55
Obr. 52 - Zobrazení jednotlivých vzorků a řezů pro vyhodnocení pomocí plastografie.....	56
Obr. 53 - Zobrazení jednotlivých focených snímků na konkrétním řezu (vzorek 1 až 5 z Obr. 52)...	56
Obr. 54 - Plastografický snímek příčného řezu na povrchové vrstvě zkušební vzorku (PA6+PA66)+GF30 vytvořeného pomocí DIC Nomarskiho kontrastu, při zvětšení 200x.....	57
Obr. 55 - Grafické znázornění orientace vláken ve dvou osách (data viz Tab. 13)	58
Obr. 56 - Příklad měření průměru a délky vláken pro materiál Grilon TSG-30/4, způsob zobrazení - DIC Nomarski při zvětšení 200x.....	59
Obr. 57 - Příprava snímku pro následující měření	59
Obr. 58 - Ozubené kolo vyrobené z PA-GF před a po spalování (vpravo) [31]	60
Obr. 59 - Zobrazení jednotlivých oblastí (segmentů) a řezů použitých pro „ash test“	61
Obr. 60 - Zkušební těleso (včetně „vtokové soustavy“) z Grilonu rozřezané na sedm segmentů	62
Obr. 61 - Sedm segmentů z Obr. 60 po spálení - bílá hmota v kelímcích jsou zbytky skleněných vláken	62
Obr. 62 - Popel po úplném spálení segmentu.....	63
Obr. 63 - Sedm vzorků, které byly analyzovány (a jejich označení)	63
Obr. 64 - Komplexní metody posouzení orientace vláken v dosavadních zveřejněných výzkumných pracích	65
• Obr. 65 - Materiálová data pro simulaci proudění v sw CADMould	68
Obr. 66 - Průměrná efektivita natočení vlákna PENV od začátku až do konce výstřiku.....	78
Obr. 67 - Průměrná efektivita natočení vlákna ze stěny do středu.....	78
Obr. 68 - Počet vláken od začátku až do konce výstřiku	79
Obr. 69 - Efektivita natočení vlákna ENV od začátku až do konce výstřiku.....	80
Obr. 70 - Efektivita natočení vlákna ENV ze stěny do středu	80
Obr. 71 - Grafické znázornění průměrné efektivity natočení vláken (PENV) podle směru toku taveniny	82
Obr. 72 - Grafické znázornění průměrné efektivity natočení vláken (PENV) kolmo k toku taveniny.....	82
Obr. 73 - Grafické znázornění hmotnostních podílů skleněných vláken v segmentech 1-7 vzorků I-III	85
Obr. 74 - Snímek lomů EMS Grilon TSG-30/4 provedený mikroskopem LEXT v 2D mode, (zvětšení 10x) vzorek s pomalou rychlostí vstřikování „L“	87
Obr. 75 - Snímek části lomu - metodou „3D model“ s barevným zdůrazněním výšky (zvětšení 20x) vzorek se střední rychlostí vstřikování „M“	87
Obr. 76 - Izometrický snímek celé lomové plochy „metodou 3D drátového modelu“ (zvětšení 5x) vzorek s pomalou rychlostí vstřikování „L“.....	88

Obr. 77 - Zkušební těleso vyráběno s procesními parametry: nízkou rychlostí vstřikování „L“	89
Obr. 78 - Zkušební těleso vyráběno s procesními parametry: střední rychlostí vstřikování „M“	89
Obr. 79 - Zkušební těleso vyráběno s procesními parametry: vysokou rychlostí vstřikování „S“	89
Obr. 80 - Stupeň orientace vláken při pomalém vstřiku „L“ [%].....	90
Obr. 81 - Stupeň orientace vláken při rychlém vstřiku „S“ [%].....	90

14 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Porovnání základních vlastností termoplastů vyztužených krátkými a dlouhými vlákny	27
Tab. 2 - Porovnání morfologických vlastností termoplastů vyztužených krátkými a dlouhými vlákny	27
Tab. 3 - Příklad značení PA podle ČSN EN ISO 16396-1:2015 „Plasty - Polyamidy (PA) pro tváření - Část 1: Systém označování, značení výrobků a základy pro specifikace“ [N6]	29
Tab. 4 - Technická specifikace vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 270 C Golden Edition Clamping unit	37
Tab. 5 – Technická specifikace vstřikovací jednotky Arburg Allrounder 270 C Golden Edition	38
Tab. 6 - Základní vlastnosti stroje	38
Tab. 7 - Výroba zkušebních těles, tři typy s různými procesními parametry	39
Tab. 8 – Technická specifikace stroje LabTest 5.100SP1 [64]	40
Tab. 9 - Další technické parametry zkušebního stroje	41
Tab. 10 - Nastavení konfokálního laserového mikroskopu Olympus Lext OLS5000-SAF	45
Tab. 11 - Metody vhodné pro určování nebo sledování orientace a homogenity vláken	48
Tab. 12 - Porovnání tvaru elipsy (AR) pro různé stupně míry natočení vlákna (úhel β).	55
Tab. 13 – Příklad vyhodnocení počtu orientovaných vláken na	57
Tab. 14 – Tab. hodnot koeficientu k – přínos vlákna k přenesení síly	67
Tab. 15– Výsledky zkoušky tahem (58 vzorků)	70
Tab. 16 – Výsledky plastografie	73
Tab. 17 - Průměrná efektivita natočení vláken (PEN _V) od začátku (vzorek 1) do konce (vzorec 5) výstřiku	81
Tab. 18 - Průměrná efektivita natočení vláken (PEN _V) od okraje stěny (snímek 1) do středu (snímek 6) výstřiku	82
Tab. 19 - Výsledky analýzy odchylek koeficientu PEN _V	83
Tab. 20 - Posouzení snížení nebo zvýšení mechanických vlastností v závislosti na nehomogenní distribuci vláken	86
Tab. 21 - Určení velikosti významu podmínek pro prasknutí výstřiků kompozitních částí z polyamidu vyztuženého krátkými skleněnými vlákny	92