



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



KOMPRESNÍ VSTŘIKOVÁNÍ PA S UHLÍKOVÝMI VLÁKNY

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. David Šubrt**
Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David Šubrt**
Osobní číslo: **S13000451**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Kompresní vstřikování PA s uhlíkovými vlákny**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznámení se s výrobou plastových dílů ve firmě Magna Exteriorsinteriors Liberec.
2. Rešerše stávajícího stavu v oblasti kompresního vstřikování.
3. Vytipování dílu pro experimentální měření.
4. Provedení experimentálních měření z hlediska parametrizace technologického procesu.
5. Diskuse výsledků a závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

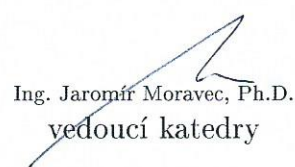
- [1] **KREBS, J.** *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Liberec: **Technická univerzita v Liberci**, 2001. ISBN 80-7083-449-8.
[2] **SOVA, M.** *Termoplasty v praxi*. Praha: Verlag Dashofer s.r.o., 2004. ISBN 80-86229-15-7.
[3] **ZEMAN, L.** *Vstřikování plastů*. Praha: Nakladatelství BEN - technická literatura, 2009. ISBN 80-7300-026-1.
[4] **Firemní materiály.**

Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **2. března 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **2. června 2016**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. března 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Kompresní vstřikování PA s uhlíkovými vlákny

Injection compression molding of carbon fiber filled polyamide

Anotace

Teoretická část diplomové práce seznamuje čtenáře s pojmem kompozitní materiál, vláknitými plnivy, polymerními matricemi a přísadami. Dále seznamuje čtenáře s technologiemi vstřikování, kterými se tyto materiály zpracovávají.

Praktická část diplomové práce se zabývá porovnáním vlivu technologie konvenčního a kompresního vstřikování na výsledné mechanické vlastnosti dílu a jejich anizotropii. Vliv použité technologie je zkoumán na polyamidu s 30 a 40 % dlouhých uhlíkových vláken a dále na polyamidu s 30 a 40% dlouhých skelných vláken.

Klíčová slova: kompresní vstřikování, CIM, konvenční vstřikování, anizotropie, mechanické vlastnosti, polyamid, uhlíková vlákna, skelná vlákna

Annotation

Technical terms such as composite materials, fiber fillers, polymer matrix and polymer additives are described in teoretical part of this diploma thesis. Further text describes various technologies suitable for fabrication these materials.

The practical part is concerned with effects of Injection molding and injection compression molding to mechanical properties and their anisotropy. Carbon fiber filled polyamide and glass fiber filled polyamide, both with 30 and 40% of fibres, are used as model materials to compare effects of both technologies.

Key words: injection compression molding, CIM, injection molding, anisotropy, mechanical properties, polyamide, carbon fiber, glass fiber

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi za odbornou konzultaci v průběhu zpracování diplomové práce, dále chci poděkovat Ing. Jířímu Habrovi za pomoc při výrobě vzorků a za užitečné rady. Dále děkuji Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D. za konzultace a pomoc při měření, Ing. Petru Severovi, Ph.D. za poskytnutý materiál pro výrobu zkušebních vzorků. Závěrem děkuji Bc. Janu Šubrtovi za pomoc při překladu anglických textů a Kristýně Schwarzové za korekci textu, své rodině a lidem, kteří mě podporovali při dosavadním studiu.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21005/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

Obsah

1. Úvod	10
2. Teoretická část	11
2.1 Kompozitní materiál	11
2.1.1 Používaná vlákna pro kompozitní materiály	13
2.1.2 Porovnání vyztužujících vláken	25
2.1.3 Matrice kompozitu (pojivo)	29
2.1.4 Přísady do polymerů	37
2.2 Technologie pro zpracování kompozitních materiálů	40
2.2.1 Technologie výroby konvenčním vstřikováním	40
2.2.2 Technologie výroby kompresním vstřikováním (CIM)	47
3 Experimentální část	50
3.1 FORMA	51
3.2 Zkušební vzorky	52
3.2.1 Materiál zkušebních tělísek	53
3.2.2 Výroba vstřikovaných destiček pro určení míry anizotropie	53
3.2.3 Výroba zkušebních tělísek ze vstřikovaného polotovaru	66
3.3 Měření mechanických vlastností pomocí tahové zkoušky	69
3.3.1 Průběh mechanické zkoušky prostým tahem	70
3.4 Zpracování naměřených dat	72
3.4.1 Zpracování naměřených dat mechanických vlastností	72
3.4.2 Zpracování hodnot anizotropie z naměřených mechanických vlastností	74
4. Vyhodnocení výsledných hodnot	76
4.1 Vyhodnocení výsledných hodnot mechanických vlastností	76
4.2 Vyhodnocení výsledných hodnot míry anizotropie mechanických vlastností	80
5. ZÁVĚR	84
6. Seznam použité literatury	87
7. Seznam příloh	89

Seznam zkratk, symbolů a jednotek

Značení	Název zkratky	Jednotka
A	tažnost	[%]
AF	aramidové vlákno (aramid fiber)	[-]
<i>b</i>	šířka	[mm]
CF	uhlíkové vlákno (carbon fiber)	[-]
CIM	kompresní vstřikování	[-]
<i>d</i>	průměr	[mm]
<i>E</i>	Youngův modul pružnosti v tahu	[MPa]
E_{\parallel}	Youngův modul pružnosti ve směru vláken	[MPa]
E_{\perp}	Youngův modul pružnosti kolmo na vlákna	[MPa]
<i>F</i>	síla	[N]
GF	skelné vlákno (glass fiber)	[-]
<i>h</i>	tloušťka	[mm]
HM	vysoko modulová aramidová, uhlíková vlákna	[-]
HST	vysoce pevná CF s nízkou tuhostí a vyšší tažností	[-]
HT	uhlíková vlákna s vysokou pevností	[-]
IM	středně modulová uhlíková vlákna	[-]
<i>l</i>	délka	[mm]
L_0	počáteční délka	[mm]
LCF	dlouhé uhlíkové vlákno (long carbon fiber)	[-]
LGF	dlouhé skelné vlákno (long glass fiber)	[-]
LM	nízko modulová aramidová vlákna	[-]
<i>p</i>	tlak	[bar]
<i>Q</i>	průtok	[cm ³ /s]
S_0	počáteční průřez	[mm ²]
<i>T</i>	teplota	[°C]
<i>t</i>	čas	[s]
t_d	doba dotlaku	[s]
t_{ch}	doba chlazení	[s]
t_{pl}	doba plastikace	[s]

t_v	doba vstřiku	[s]
V	objem	[cm ³]
v	rychlost	[cm ³ .s ⁻¹]
α_{\parallel}	součinitel teplotní roztažnosti ve směru vláken	[10 ⁻⁶ .K ⁻¹]
α_{\perp}	součinitel teplotní roztažnosti kolmo na vlákna	[10 ⁻⁶ .K ⁻¹]
ε	poměrné prodloužení	[-]
ε_r	dialektrická konstanta	[-]
σ	napětí	[MPa]
σ_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
ρ	hustota	[g/cm ³]
ρ_{el}	měrný elektrický odpor	[Ω.cm]
λ	tepelná vodivost	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
η	viskozita	[Pa.s]

1. Úvod

Diplomová práce zkoumá vliv technologie vstřikování na výsledné mechanické vlastnosti dílu a jejich anizotropii. Diplomová práce je rozdělena na část teoretickou, experimentální a část kde jsou zhodnoceny výsledné naměřené hodnoty.

Teoretické část diplomové práce v první fázi seznamuje čtenáře s charakteristikou kompozitního materiálu a jeho skladbou. Poté jsou popsána nejčastěji používaná vláknitá plniva. Popisovaná plniva jsou rozdělena ve dvou kategoriích na syntetická a přírodní vlákna. Poté následuje porovnání syntetických vláken, z čehož dále vyplývá výběr zástupců syntetických vláken pro experimentální část. Další kapitola seznamuje čtenáře s nejčastěji používanými polymerními matricemi vstřikovaných kompozitních materiálů, kde jednou z nich je polyamid použitý v experimentální části této diplomové práce. Po té následuje kapitola teoretické části, ve které jsou popsány přísady přidávané do polymerů pro zlepšení požadovaných vlastností, a dále je popsáno jejich využití při výrobě kompozitních materiálů. Teoretická část dále popisuje technologie vstřikování plněných plastů dlouhými vlákny. Tato kapitola charakterizuje konvenční a kompresní vstřikování. Popisuje jejich princip, průběžné a následné jevy a faktory, které se nejvíce podílejí na kvalitě vstřikovaného dílu.

Experimentální část diplomové práce z počátku popisuje princip prováděného výzkumu. V další části jsou popsány použité materiály, forma a vstřikovací stroj použitý pro výrobu vstřikovaných dílu. Dále je podrobně popsána výroba zkušebních tělísek, na kterých je prováděno experimentální měření. Další kapitola praktické části popisuje průběh samotného měření mechanických vlastností zkušebních tělísek tahovou zkouškou. Po získání veličin se text zabývá zpracováním výsledných hodnot mechanických vlastností zkušebních tělísek a jejich anizotropií.

V poslední fázi diplomové práce je podrobně popsáno zhodnocení naměřených a vypočtených veličin. Pro lepší vizualizaci je zhodnocení podpořeno grafy.

Diplomová práce končí závěrem, kde je stanoven výsledný verdikt z naměřených a vypočtených hodnot mechanických vlastností a jejich míry anizotropie zkoumaného dílu vyráběného konvenčním a kompresním vstřikováním.

2. Teoretická část

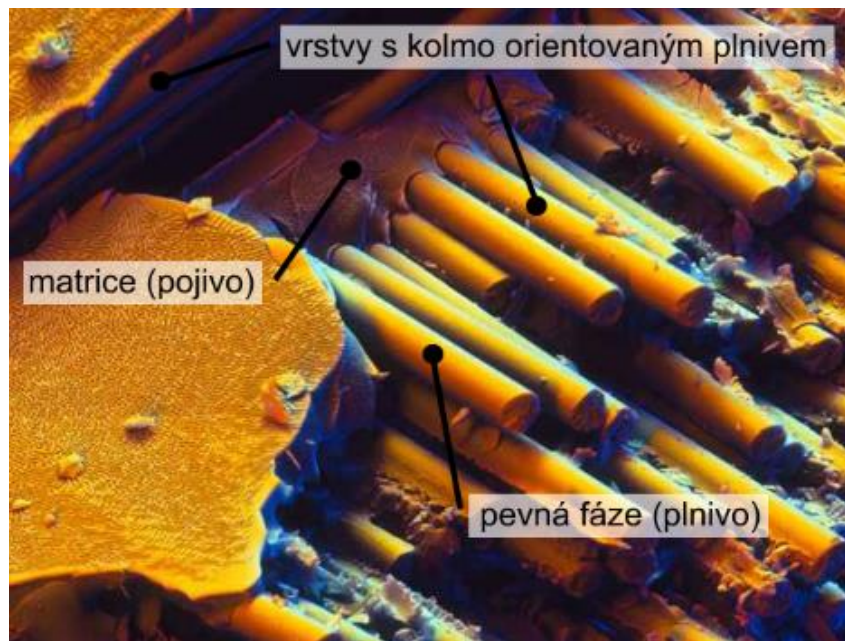
V teoretické části této práce bude představen základní popis vlákny vyztužených kompozitních materiálů s termoplastickou matricí. Budou zde představeny nejvyužívanější vyztužující vláknitá plniva. Některá z nich dále budou použita v experimentální části diplomové práce. V další části teoretické pasáže budou představeny nejvyužívanější termoplastické matrice a jejich vlastnosti. V neposlední řadě zde budou představeny přísady do polymerů a jejich vliv na konečné vlastnosti kompozitního materiálu. V posledních kapitolách teoretické části budou popsány technologie vstřikování, jimiž se dají tyto kompozity vyrábět a s kterými bude dále pracovat experimentální část této diplomové práce.

2.1 Kompozitní materiál

Definice kompozitu říká, že se jedná o materiál, který je složený nejméně ze dvou fází s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi a který získává vlastnosti, které nemohou být získány kteroukoli samostatně obsaženou fází ani prostou sumací těchto fází. Takovéto znásobení vlastností vhodně sdruženými materiály nazýváme synergický efekt. [1]

Kompozitní materiály se zpravidla skládají z pojiva nazývané matricí a z pevné fáze zvané plnivem (Obr. 2.1).

Kompozitní materiály jsou schopné odolávat vysokým i nepříznivým způsobům namáhání, a to tak, že pevný podíl v matrici přenáší část napětí a propůjčuje materiálu tuhost, čímž zvýší Youngův modul pružnosti. Dále na fázovém rozhraní pružné matrice a pevného podílu dochází k částečnému pohlcování a rozptylování mechanické energie. [1]



Obr. 2.1: Příklad struktury kompozitního materiálu [2]

Nejrozšířenějšími kompozitními materiály současnosti jsou vláknové kompozity. Matrice, povahou buď reaktoplastu, nebo termoplastu, jsou plněné vlákny konečnými či nekonečnými. Nejčastěji používané materiály vyztužujících vláken bývají sklo, uhlík, aramid, keramika, kov, polymery ale i přírodní materiály. Jednotlivé složky kompozitu jsou vybírány podle požadovaných vlastností, soudržnosti, technologii výroby, ekonomičnosti, atd. [3]

U plastů namáhaných pouze jedním směrem, je možno cílené vyztužení vlákny právě v tomto směru namáhání. To znamená, že síla namáhající tento materiál bude rovnoběžná s vyztužujícími vlákny, tím lze získat maximální efektivitu a odolnost vůči této zatěžující síle. Tímto způsobem vznikne ale kompozit s rozdílnými vlastnostmi ve směru rovnoběžném a kolmém vůči orientaci vláken, takovýto jev se nazývá anizotropií materiálu. Vlastnosti vláken, jejich rozprostření a orientace v matrici tedy ovlivňuje anizotropii vlastností materiálu, kterou se zabývá praktická část této diplomové práce. Anizotropie je pojem, který zahrnuje veškeré vlastnosti materiálu. Tedy vlákna ovlivňují jak anizotropii mechanických vlastností jako mez pevnosti v různých směrech, modul pružnosti, míru elasticity, rázovou houževnatost atd., tak i anizotropii fyzikálních vlastností jako elektrickou vodivost, tepelnou roztažnost, transparentnost a další. V další kapitole budou rozebrány nejčastěji používaná vláknitá plniva podílející se na výsledných vlastnostech kompozitního materiálu. [3]

2.1.1 Používaná vlákna pro kompozitní materiály

Nejvýznamnější vliv určující pevnostní parametry kompozitního materiálu má plnivo, v našem případě vyztužující vlákna. Proto zde bude zmíněno základní rozdělení vyztužujících vláken a dále budou podrobněji rozebrány vlastnosti nejvíce používaných zástupců těchto materiálů a jejich vzájemné porovnání. Některá vlákna, dle konečného hodnocení, budou dále vybrána pro experimentální části diplomové práce.

Základní rozdělení vláken podle chemického původu:

- organická
- anorganická

Základní rozdělení vláken podle struktury:

- amorfní
- krystalická

Rozdělení vláknitých plniv podle materiálu:

- skelná
- aramidová
- uhlíková
- keramická
- kovová
- přírodní
- polymerní

Experimentální část diplomové práce se zabývá anizotropií plastu vyztuženého syntetickým vláknem, proto zde v kapitole vyztužujících vláken dále popisují jejich nejpoužívanější zástupce. Pro dnešní snahu z ekologického a úsporného důvodu zahrnout do výroby přírodní vlákna, zde okrajově popisují i některé jejich zástupce. Polymerní materiály pro výrobu vláken budou popsány později v kapitole matric, kde budou rozebrány vlastnosti termoplastů.

2.1.1.1 Skelná vlákna

Jsou to vlákna tažená ze skloviny s pravidelným kruhovým průřezem, jejich označení je například GF – glass fiber. Pro 90 % výroby těchto materiálů je použito bezalkalické sklo s vynikajícími elektricky izolačními vlastnostmi a prostupností světla. Použitý materiál se značí jako E-sklovina (elektrická). [3]

Dále lze zvyšováním obsahu SiO_2 , MgO a Al_2O_3 zvýšit pevnostní parametry této skloviny až o 70 %, takto vylepšená sklovina se v Evropě označuje jako R-sklovina (resistence), v USA S-sklovina (strength). Sklovina se zvýšenou odolností proti kyselinám, odolávající vysoce chemicky agresivnímu prostředí se značí jako C-sklovina, nebo také bezboritá ECR-sklovina s vysokou dielektrickou konstantou. [3]

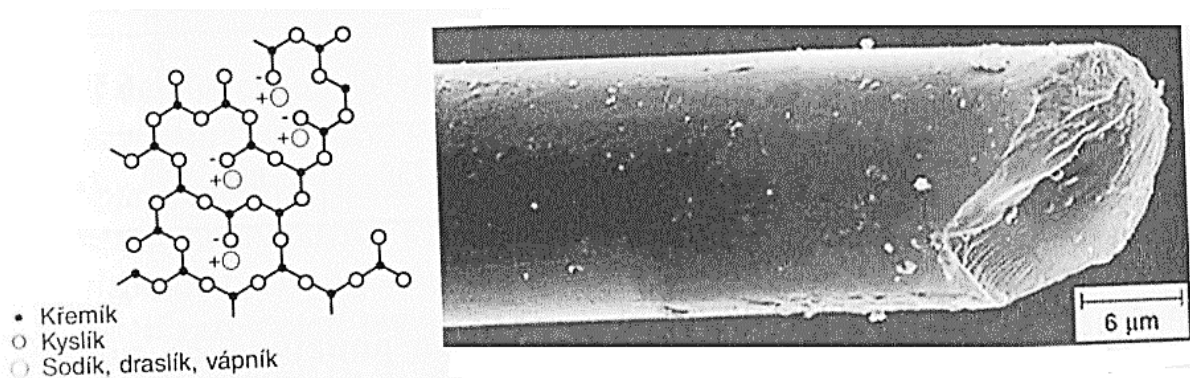
Porovnání chemického složení, mechanických a fyzikálních vlastností výše zmíněných druhů sklovin je uvedeno v tabulce (Tab. 2.1).

Tabulka 2.1 Chemické složení skloviny a její mechanické a fyzikální vlastnosti [3]

Sklovina	E	R nebo S	C	ERC
Složení [%]				
SiO_2	54	60	60 až 65	54 až 62
Al_2O_3	14 až 15	25	2 až 6	12 až 13
CaO	-	14	14	21
MgO	20 až 24	3	1 až 3	4,5
B_2O_2	6 až 9	< 1	2 až 7	< 0,1
K_2O	< 1	< 1	8	0,6
Vlastnosti				
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	2,6	2,53	2,52	2,72
Mez pevnosti v tahu *) [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$]	3400	4400	2400	3440
Modul pružnosti E [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$]	73000	86000	70000	73000
Poměrné prodloužení při přetržení *) [%]	< 4,8	< 4,6	< 4,8	< 4,8
Součinitel teplotní roztlačnosti [K^{-1}]	$5,0\cdot 10^{-6}$	$4,0\cdot 10^{-6}$	$6,3\cdot 10^{-6}$	$5,9\cdot 10^{-6}$
Teplota měknutí [$^{\circ}\text{C}$]	850	980	750	880

*) Pokles hodnoty až na 50% při zpracování na polotovary

Skelná vlákna mají vysokou pevnost díky vysokým hodnotám modulu pružnosti. To je zapříčiněno silně kovalentními vazbami křemíku s kyslíkem v trojrozměrné síti skloviny. Síly jednotlivých vazeb a zesílení struktury jsou také výsledkem obsahu oxidů kovů v materiálu. Youngův modul pružnosti E je cca $75000 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, tedy je o něco větší než modul pružnosti hliníku, má třetinovou hodnotu oceli a také je vyšší než E -modul většiny organický ale i anorganických vláken. Hustota skla je v porovnání s těmito materiály relativně nízká, proto bude měrná pevnost těchto vláken oproti nim poměrně vysoká. Díky amorfní struktuře (Obr. 2.2) tato vlákna vykazují izotropní vlastnosti, což nelze říct u aramidových a uhlíkových vláken. [3]



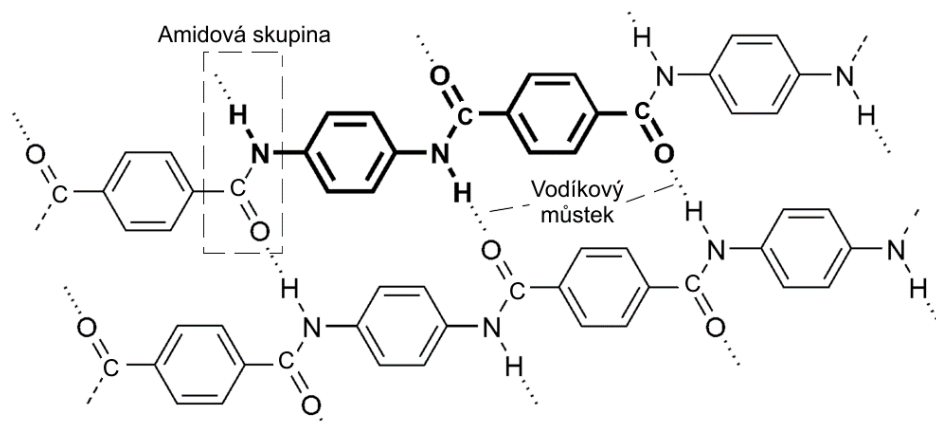
Obr. 2.2: Snímek skelného vlákna elektronovým rastrovacím mikroskopem [3]

Skleněná vlákna se nechovají viskoelasticky jako vlákna syntetická, a jejich mez průtažnosti je do 3 % původní délky, přičemž průtah má elastický charakter. Teplotní stálost vláken ze skla je výborná, při trvalém tepelném namáhání do 250°C nemění svoje hodnoty pevnostních vlastností, tedy mají výborné tepelné vlastnosti v porovnání s ostatními materiály, dále jsou nehořlavé a ohnivzdorné. Součinitel teplotní délkové roztažnosti a jejich bod měknutí přesahuje teplotu 625°C . [3]

V konečné fázi výroby se na vlákna nanáší lubrikace ve formě tekuté emulze, která chrání povrchy vláken a v neposlední řadě díky obsaženým antistatikům a apretacím také napomáhá přilnavosti matrice k vláknu. [3]

2.1.1.2 Aramidová vlákna

Jsou to vlákna s průměrem okolo 12 μm s vysokou pevností a tuhostí na bázi lineárních organických polymerů například metafenylenizoftalamid, nebo polyfenylentereftalamid. Název aramid vznikl ze spojení dvou slov **aromatický polyamid** a značí se AF – Aramid Fiber. Aramidová vlákna mají vysoce krystalickou strukturu a skládají se z podélně orientovaných polymerních řetězců s kovalentními vazbami. Molekuly vláken jsou navzájem propojeny vodíkovými můstky (Obr. 2.3) a díky aromatickým jádrům řetězce dosahují vysoké tuhosti.



Obr. 2.3: Struktura aramidu [4]

Vysoká uspořádanost struktury aramidu je zapříčiněna pravidelným uspořádáním amidových skupin a fenylenových jader s vazbou vodíkových můstků. Pravidelná struktura materiálu má pak za následek velice vysokou tuhost. Vlákna mají díky nízké hustotě vysokou měrnou pevnost v tahu a je to nejlehčí vlákno mezi vyztužujícími syntetickými materiály pro plasty. Tato vlákna lze zakomponovat jak do matrice termoplastu, tak i reaktoplastu.

Díky lineárně orientované struktuře vlákna jsou jeho mechanické vlastnosti velmi anizotropní, tedy v kolmém směru na osu vlákna má mnohonásobně menší pevnost než v podélném směru.

Vlákna Aramidu vykazují zápornou tepelnou roztažnost ve směru vláken stejně jako vlákna uhlíková, při vzrůstající teplotě se zkracují. [3]

Pro zvyšování pevnosti se tato vlákna dlouží, s pevností roste i modul pružnosti. Tímto způsobem lze upravovat mechanické vlastnosti aramidových vláken a tedy vyrábět více typů s odlišnými mechanickými vlastnostmi, které jsou popsány v tabulce (Tab. 2.2).

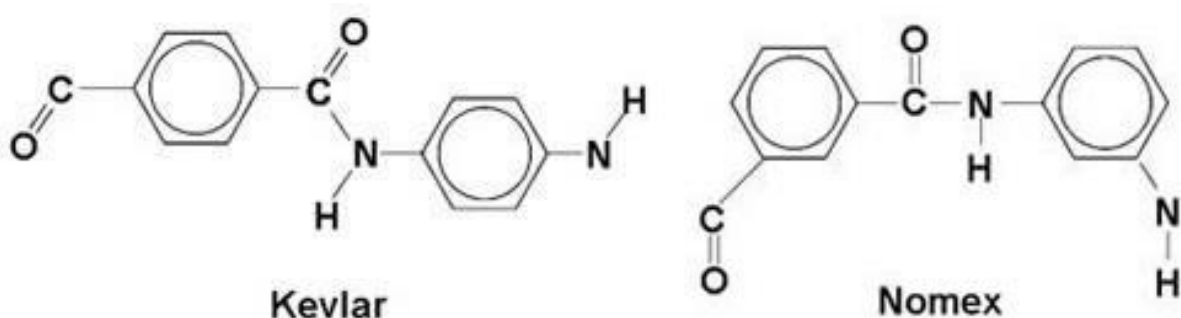
Tab. 2.2: Mechanické vlastnosti AF [3]

Aramid	Hustota [g.cm ⁻³]	Průměr [μm]	Modul pružnosti v tahu [N.mm ⁻²]	Mez pevnosti v tahu [N.mm ⁻²]	Tažnost [%]
vysokotažný (29)*	1,44	12	80000	3600	4,0
S vysokou pevností (49)*	1,44	12	131000	3800	2,8
ultra pevný (149)*	1,47	12	186000	3400	2,0

*) čísla v závorkách značí, jakému typu kevlaru odpovídají vlastnosti aramidového vlákna

V dnešní době jsou na trhu rozeznávány dvě hlavní skupiny aramidových vláken. První skupinou je Meta-aramid na bázi metafenylenizoftalamidu známý pod obchodním názvem nomex, který vyniká svými elektroizolačními a žáruvzdornými vlastnostmi, vykazuje ale nízkou pevnost. Druhou skupinu zastupuje Para-aramid na bázi polyfenylentereftalamidu s obchodním názvem kevlar. Kevlar vyniká svojí vysokou pevností v tahu a vyšším modulem pružnosti, proto je hojně využíván ke konstrukčním aplikacím. Kevlar se dělí podle pevnostních stupňů na kevlar 29, 49 a 149. V tabulce (Tab. 2.2) se kevlar 29 rovná vysokotažnému aramidu, 49 aramidu s vysokou pevností a 149 ultra pevnému aramidu.

Rozdíl mezi kevlarem a nomexem je v geometrii molekuly jedná se o meta-orientaci v případě nomexu, která nedovoluje makromolekule deformaci a proto vykazuje nízkou pevnost. Kevlar naopak díky para-orientaci své molekuly dokáže při působení napětí narovnat svoji makromolekulu a pohlit tak působící napětí, čili je daleko pevnější. Rozdíl struktury je vidět na (Obr. 2.4) [5]



Obr. 2.4: Molekula para-aramidu (Kevlar) a meta-aramidu (Nomex) [5]



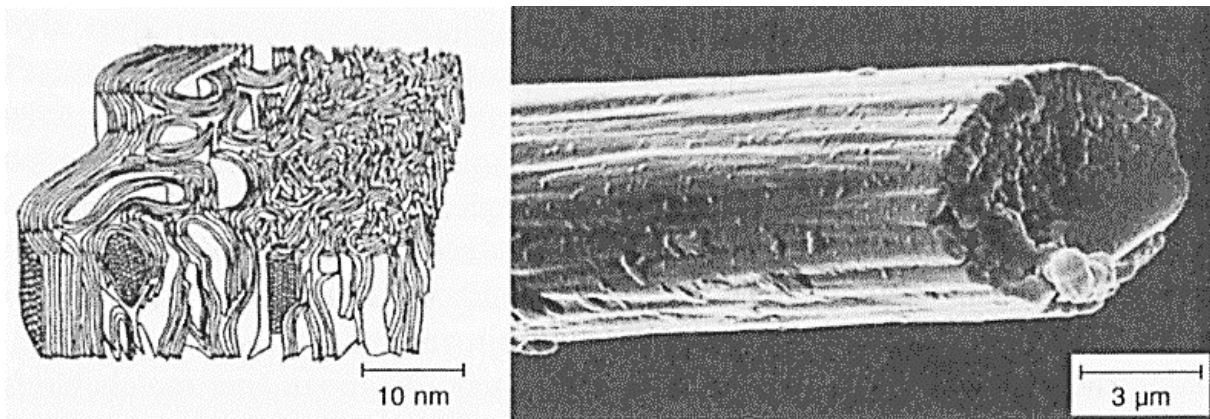
Obr. 2.5: Snímek aramidového vlákna pořízený elektronovým mikroskopem [3]

Aramidové kompozitní materiály se konstruují zpravidla tak, aby byly namáhány tahově. Důvodem je výrazně nižší mez pevnosti aramidového vlákna v tlaku, než v tahu. Lze dokonce říci, že pro konstrukce namáhané na tlak a ohyb jsou nevhodné.

Tento materiál je hydrofilní, tedy ve vlhkém prostředí váže vodu. Tento jev negativně ovlivňuje soudržnost s matricí, a tedy celkově snižuje výslednou pevnost celkového kompozitu, proto je u tohoto materiálu nutnost sušení před samotným zpracováním. Kompozitní materiál s těmito vlákny se velmi špatně obrábí a je náchylný ke snižování pevnosti vlivem UV záření. Adhezní vlastnosti vláken s matricí jsou téměř nejnižší v porovnání s ostatními vlákny. Kompozit s aramidovými vlákny není příliš odolný vůči vysoké teplotě, je schopen odolávat teplotám do 300°C. [3]

2.1.1.3 Uhlíková vlákna

Jsou to extrémně pevná, tuhá, 5 až 10 μm silná vyztužující vlákna zpočátku z organického, dále karbonizovaného materiálu a značí se CF – Carbon Fiber. Karbonizace odstraní z počátečního materiálu všechny prvky až na uhlík. Se stoupající výrobní teplotou stoupají i konečné mechanické vlastnosti uhlíkových vláken. Takováto úměra platí pouze do teploty 1800°C dokud může probíhat grafitizace. Za touto mezí stoupá už jen Youngův modul a mez pevnosti klesá. Snímek vlákna a jeho mikrostruktura jsou vyobrazeny na (Obr. 2.6). [3]



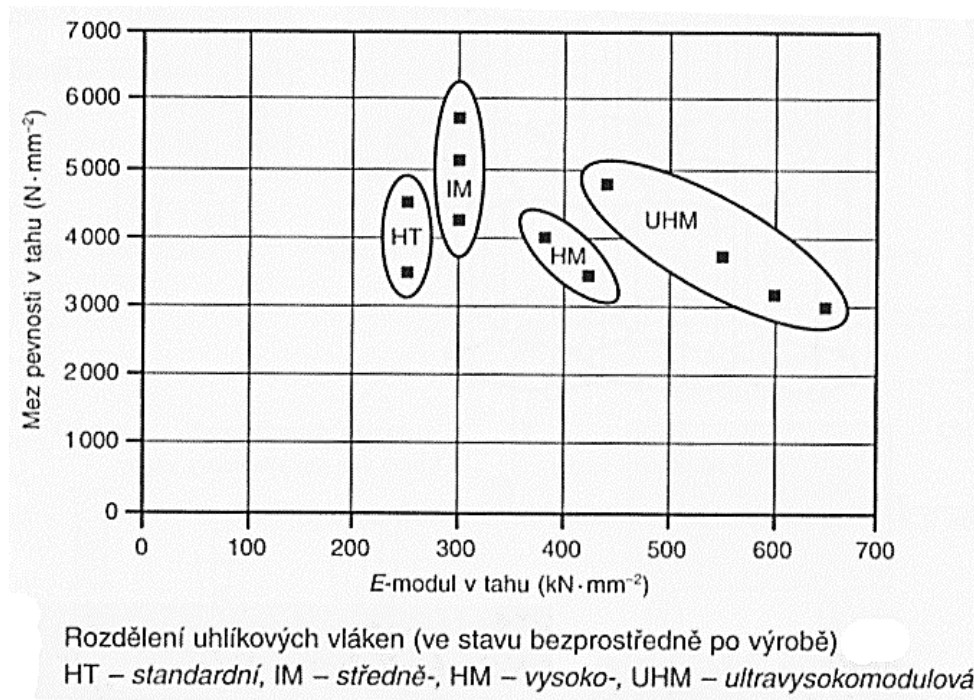
Obr. 2.6: Mikrostruktura a snímek CF z elektronové rastrovacího mikroskopu [3]

Pro výrobu uhlíkových vláken jsou používány tři výchozí materiály. Jedním z trojice používaných organických materiálů pro výrobu je celulóza. Uhlíková vlákna zhotovená z celulózy mají nízké pevnostní vlastnosti, a proto se nevyužívají ke konstrukčním aplikacím, ale spíše k izolačním účelům pro dobré tepelné vlastnosti.

Dalším materiálem pro výrobu uhlíkových vláken je smola neboli přírodní pryskyřice na bázi celulózy. Výrobní proces je celkem drahý, což ale kompenzuje velice levná základní surovina. Takto vyrobená vlákna mají výborné mechanické vlastnosti, vysokou pevnost, modul pružnosti v tahu, ale pevnost v tlaku je ve srovnání s ostatními materiály nízká. Dále mají dobré elektrické vlastnosti a vysokou tepelnou odolnost. [3]

Polyakrylonitril (PAN) je třetím používaným materiálem pro tvorbu karbonových vláken. Tento materiál je od roku 1980 na vzestupu použitelnosti pro tuto úlohu. Vlákna vyrobená z PAN jsou posuzována z pohledu pevnostních parametrů za standard. [3]

Uhlíková vlákna jsou dělena do odolnostních skupin podle charakteru stavby pramence. Pramence jsou totiž složeny z dalších mnoha elementárních vláken a výsledné pevnostní vlastnosti vycházejí právě z počtu vláken, ze kterých je výsledné vlákno neboli pramének utkáno, a dále z jejich uspořádání, které může být pravidelné, nepravidelné, ale i určitým kompromisem mezi těmito dvěma extrémy. Pro představivost standartní uhlíkové vlákno s menšími nároky na pevnost, v grafu (Obr. 2.7) značeno HT, je složeno z elementárních vláken do 24000 kusů. Vlákna, na které jsou kladeny vyšší požadavky, se pohybují s počtem elementárních vláken v jednom pramenci nad 24000. Vlákna středně modulová se značí IM, vysoko modulová HM a vlákna ultra vysoko modulová UHM. Přehled mechanických vlastností těchto zástupců uhlíkových vláken je zobrazen v grafu (Obr. 2.7). [3]

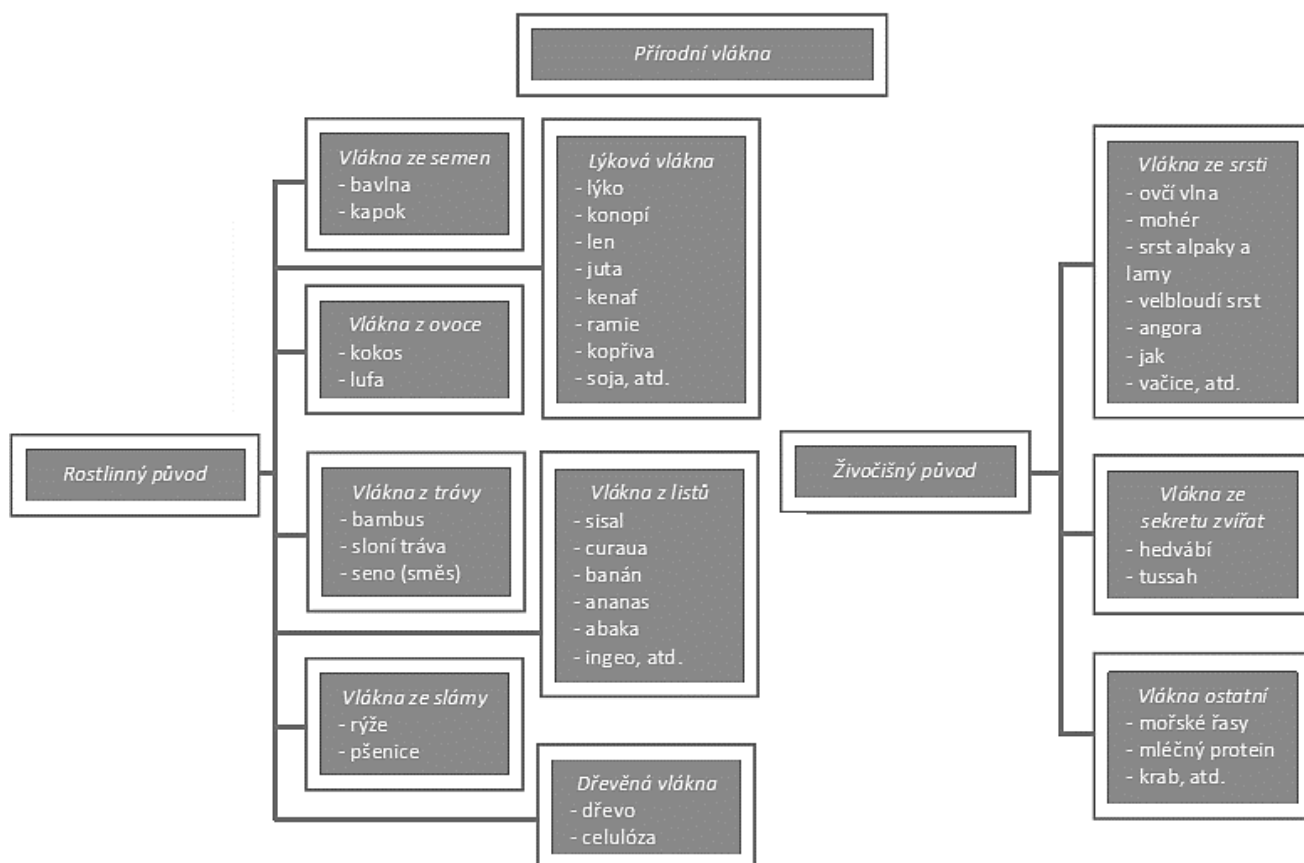


Obr. 2.7: Pevnostní přehled uhlíkových vláken [3]

Uhlíková vlákna mají oproti syntetickým tu výhodu, že spolu se vzrůstajícím zatížením roste modul pružnosti v tahu. Jsou relativně odolné vůči namáhání při vyšších teplotách, zachovávají si pevnostní parametry do teploty 500°C. Vykazují dobrou tepelnou a elektrickou vodivost. Je to materiál s velmi vysokou korozní odolností, je biokompatibilní. Lze jej využít v medicíně pro výrobu kloubních náhrad. Uhlíková vlákna jsou velice anizotropní. Tato vlastnost také ovlivňuje součinitel teplotní roztažnosti a to tak, že se roztažnost bude výrazně lišit v podélném a příčném směru. Jejich vysoká tvrdost zapříčiní i vysokou křehkost, proto je třeba uhlíková vlákna ošetřovat při výrobě apretační směsí. Chrání vlákno a zvyšuje jeho přilnavost k matrici. Apretační vrstva má ale i negativní vlastnosti, s delší dobou skladování dochází k jejímu vytvrzování a poklesu ohebnosti vlákna. Hořlavost kompozitu s uhlíkovými vlákny je velmi pomalá, i přesto že jsou vlákna sami o sobě hořlavá. Kompozity s karbonovými vlákny mají vynikající odolnost vůči dlouhodobému dynamickému namáhání. Dokonce lepší odolnost i v porovnání s ocelí. [3]

2.1.1.4 Přírodní vlákna

Jedná se o vlákna rostlinná s celulózovým základem a vlákna živočišná na bázi keratinu. Přírodní vlákna mají dobrou pevnost v tahu, jsou odolná proti stárnutí a jsou čichově nezávadná, například při náhlých změnách klimatických podmínek. Tato vlákna vytvořena přírodou jsou biodegradovatelná, jsou dále spalitelná a netoxická. Díky jejich původu jsou levná a jejich cena není závislá na ceně ropy. Použití přírodních vláken jako vyztužujícího materiálu nás posouvá k nižšímu zatížení ekologického prostředí, dále k nižší energetické náročnosti výroby a tím i ke snižování ceny výrobku. Přehled přírodních vláken dělený podle původu je vyobrazen na (Obr. 2.8). [6, 7]



Obr. 2.8: Rozdělení přírodních vláken dle původu [6]

Přírodní vlákna mají nízkou hustotu, hodí se tedy pro lehké konstrukce. Při obrábění vykazují nízkou abrazivitu. Struktura je závislá na růstu vlastního vlákna a tedy ji není možno ovlivnit. Tento problém se týká i omezené výsledné délky vláken. Přírodní vlákna mají nízkou teplotní odolnost, mohou se používat cca do 200°C. To způsobuje problémy při výběru matrice. Mechanické vlastnosti jsou dosti ovlivňovány

vlhkostí prostředí, před zapracování do plastu se tedy musí vysoušet. Přírodní vlákna sami o sobě vykazují špatnou soudržnost s matricí, je třeba použít aditiva, která tento jev eliminují. Přehled aditiv je rozebrán později v další kapitole. [3]

Bavlna – je ze světového měřítká nejpoužívanějším přírodním vláknem. Vlákna jsou rostlinného původu získávána ze semene bavlníku. Příčný průřez má tvar písmene U nebo duté fazole (Obr. 2.9). Charakteristickým tvarem pro vlákna je podélný průřez, který má tvar spirály. [7]

Len – je hojně využíván k výrobě kompozitních materiálů. Len je jedna z nejstarších plodin využívaných pro tvorbu textilií. Používá se také v papírenském průmyslu ve formě svazků, využívá se i samostatné vlákno jako plnivo, atd. Průměr vláken lnu bývá od 5 do 20 μm a jeho průřez má tvar nepravidelného polygonu (Obr. 2.10). U lněného vlákna je zjišťován obsah celulózy chemickou kompozicí. Čím je vyšší obsah celulózy, tím spíše se využívá k výrobě kompozitních materiálů. [7]

Konopí – je rostlina vyztužená po obvodu nosnými vlákny ve vrchní vrstvě stonku. Konopí je rostlina jednoletá, průřez vyztužujícího vlákna je nepravidelný, eliptický o šířce od 5 do 40 μm (Obr. 2.11). [7]

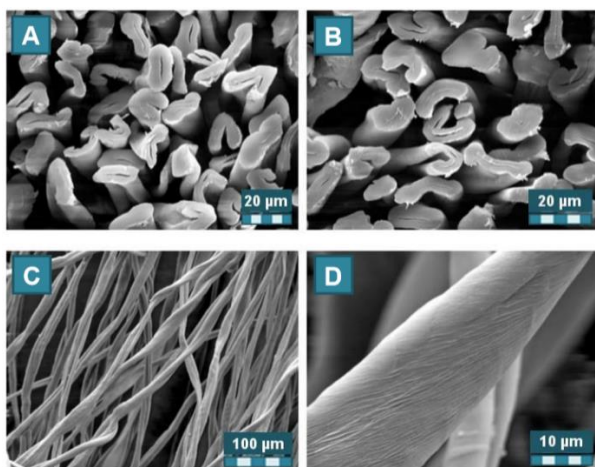
Juta – je druhé nejpoužívanější přírodní vlákno. Získává se ze dvou rostlin z Bílé juty a Tossi juty (Obr. 2.12). Vlákenné svazky získávají z povrchu stonku bývají využívány k výrobě pytlů, tkanin a obalové techniky. Průřez jutových vláken je obdélníkový nebo kruhový o průměru 40 až 80 μm . [7]

Sisal – je získáván z rostliny agáve, která se řadí do sorty jednoděložných rostlin. Vlákna se konkrétně získávají z listů. Sisal je v neposlední řadě hojně využíván k výrobě kompozitních materiálů, dále se z něho vyrábějí provazy, motouzy, geotextilie atd. Sisal je tvořen vlákennými svazky kruhového průřezu o průměru kolem 80 μm (Obr. 2.13). Vlákna tvořící svazek s šířkou pohybují se od 5 do 20 μm . [7]

Kokos – jsou přírodní vlákna o průřezu od 140 do 333 μm a délce 10 až 30 cm, jsou získávané z ochranné vrstvy plodu kokosového ořechu. Povrch vláken je členitý a hrubý (Obr. 2.14). Z kokosových vláken se vyrábí provazy, lana, tkaniny, koberce, dále

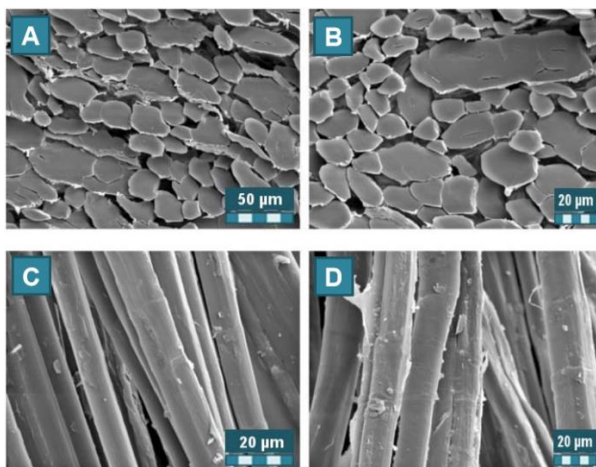
se používají pro výrobu izolací, kartáčů, čalounění a někdy i k výrobě kompozitních materiálů. [7]

Morušové hedvábí – je produkováno bourcem morušovým. Jsou to tedy vlákna živočišného původu. Vlákna jsou k sobě lepena sericinem, který lze horkou vodou odstranit a po té je lze jednotlivě separovat. Vlákna morušového hedvábí mají oválný, nebo trojúhelníkový průřez o rozměru 9 až 21 μm (Obr. 2.15). Délka vláken se pohybuje mezi 700 a 800 μm . Povrch je čistý a hladký. [7]



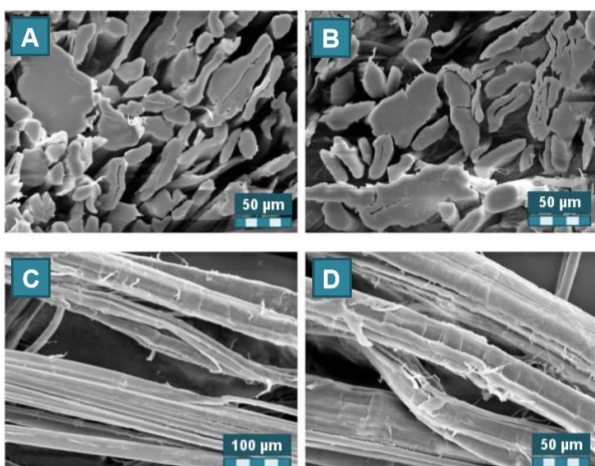
Obr. 2.9: Bavlněná vlákna [7]

A, B – příčný řez; C, D – podélný řez



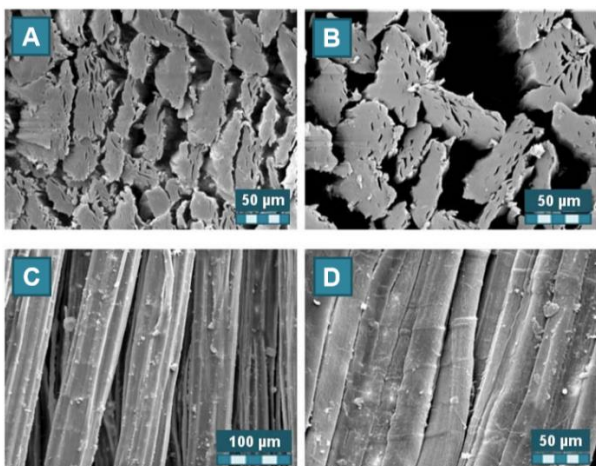
Obr. 2.10: Lněná vlákna [7]

A, B – příčný řez; C, D – podélný řez



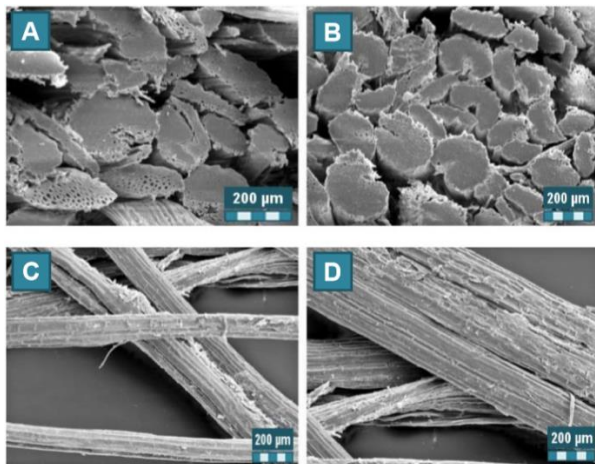
Obr. 2.11: Konopná vlákna [7]

A, B – příčný řez; C, D – podélný řez

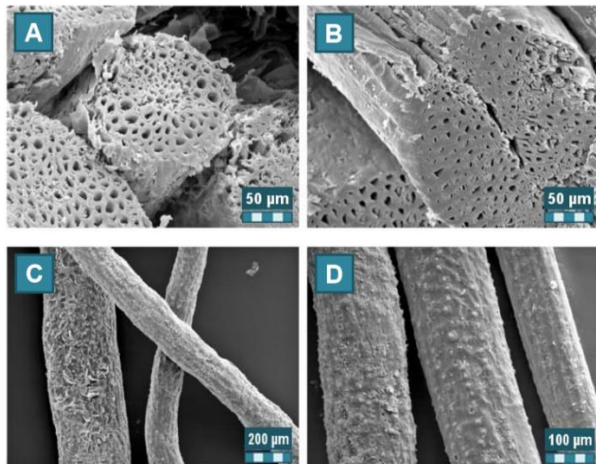


Obr. 2.12: Vlákna Tossa juta [7]

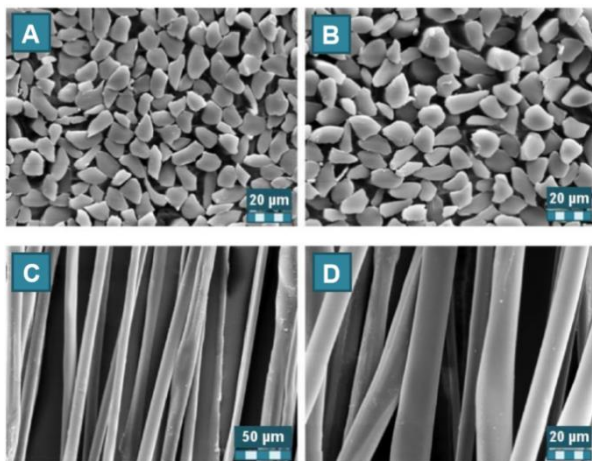
A, B – příčný řez; C, D – podélný řez



Obr. 2.13: Sisalová vlákna [7]
A, B – příčný řez; C, D – podélný řez



Obr. 2.14: Kokosová vlákna [7]
A, B – příčný řez; C, D – podélný řez



Obr. 2.15: Vlákna morušového hedvábí [7]
A, B – příčný řez; C, D – podélný řez

Pro porovnání mechanických vlastností vybraných přírodních vláken s průmyslově vyráběnými skelnými vlákny je přiložen přehled mechanických vlastností s hustotou (Tab. 2.3).

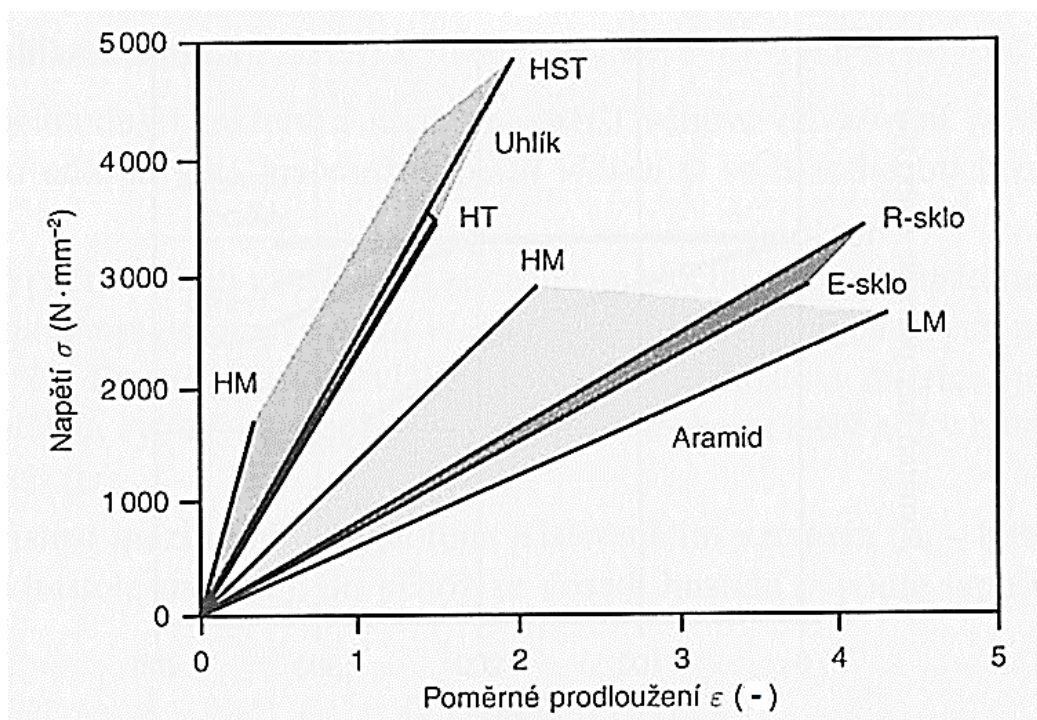
Tabulka 2.3: Porovnání vlastností skleněných vláken s některými přírodními vlákny [3, 7]

vlastnost: vlákno:	Hustota [g.cm ⁻³]	E-modul [GPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Tažnost [%]
Sklo	2,54	75	3500	4
Konopí	1,4 – 1,6	5 - 90	343 - 1500	1,3 – 6,0
Len	1,42 – 1,52	8 - 100	343 - 1500	1,2 – 6,0
Juta	1,3 – 1,5	3 - 64	187 - 800	0,2 – 3,1
Sisal	1 – 1,5	9 - 38	80 - 855	1,9 - 14
Bavlna	1,5 – 1,6	4,5 – 12,6	220 - 840	2 - 10
Morušové hedvábí	1,25 – 1,4	-	300 - 500	15 - 24

2.1.2 Porovnání vyztužujících vláken

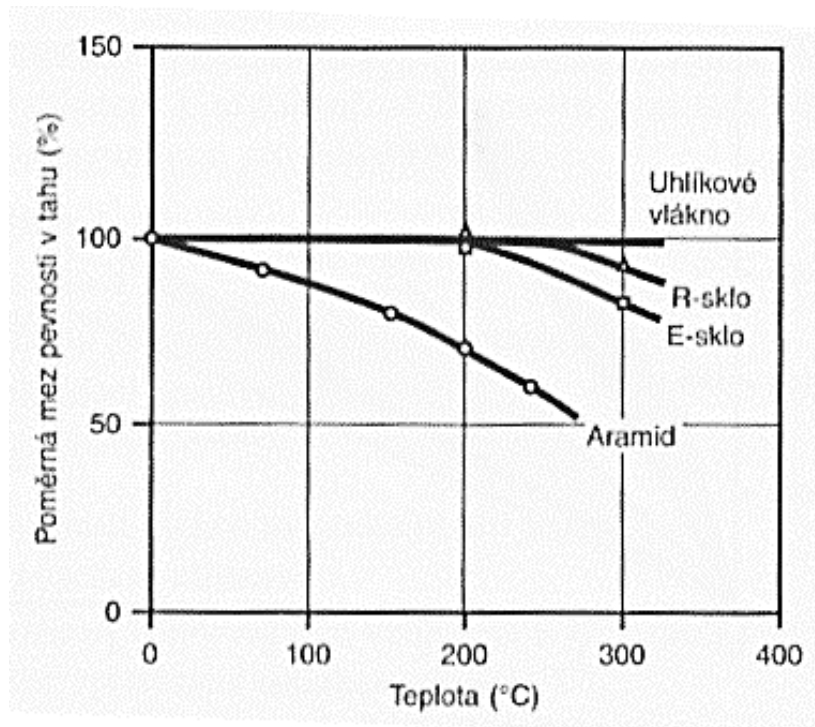
Diplomová práce se zabývá výzkumem zadaným firmou Magna Exteriors & Interiors (Bohemia) s.r.o. Magna vyrábí plastové a kompozitní díly pro automobilový průmysl. Zde bude zapotřebí dosáhnout maximálních mechanických vlastností, které zaručí hlavně syntetická vlákna. Proto jsou zde porovnána vlákna syntetická a dále na základě hodnocení jsou některá vybrána pro experimentální část.

Bude-li se jednosměrně vyztužený laminát jednotlivými vlákny zatěžovat stejně velkým tahovým napětím o stejném smyslu a rychlosti, pak lze stanovit z přetvárného odporu a přetvárné schopnosti jejich rozdílné mechanické vlastnosti. Výsledné tahové vlastnosti jednotlivých jednosměrně vyztužených kompozitů jsou vyobrazeny v grafu (Obr. 2.16). Nejvyšší pevnost a tuhost, jak je z grafu patrné, vykazují uhlíková vlákna.



Obr. 2.16 Porovnání pevnosti uhlíkových, aramidových a skleněných vyztužujících vláken [3]

Nejvyšší teplotní stálost mají uhlíková vlákna, u kterých nedochází ke změně pevnostních vlastností do teploty 300°C. Toto nelze říct o aramidových, ani o skleněných vláknech, pro porovnání graf (Obr. 2.17). [3]



Obr. 2.17: Porovnání pevnosti vláken v závislosti na teplotě [3]

Anizotropie je nejvíce znatelná u aramidových vláken, uhlíková vlákna jsou také velmi anizotropní. Jediná skleněná vlákna díky své amorfní struktuře vykazují izotropní vlastnosti. Hodnoty anizotropie jsou uvedeny v konečné tabulce shrnutí vlastností vyztužujících vláken (Tab. 2.4). Hodnota anizotropie je uvedena poměrem modulu pružnosti v tahu měřeným rovnoběžně s vlákny a modulem v tahu měřeným kolmo na vlákna, kde výsledný poměr lišící se více od jedné znamená vyšší anizotropii a poměr roven jedné znamená izotropní chování. Takovéto hodnocení anizotropie, respektive izotropie bude využito v experimentální části diplomové práce. [3]

Aramidová vlákna se vyznačují nejvyšší mechanickou schopností tlumit dynamické namáhání, kdežto uhlíková vlákna mají tuto schopnost nejnižší. Naproti tomu jsou uhlíková vlákna vodivá v porovnání s ostatním. Tyto různé vlastnosti vláken lze individuálně kombinovat pro dosažení optimálního požadovaného kompozitu, u kterého budou dále záviset jeho výsledné vlastnosti na použité matici, tedy na plastu, kterým budou vyztužující vlákna pojena. Hodnoty vyztužujících vláken pro porovnání jsou uvedeny v tabulce (Tab. 2.4). [3]

Tab. 2.4: Shrnutí vlastností vyztužujících vláken [3]

Vlákno	ρ [g.cm ⁻³]	σ_m [MPa]	E_{\parallel} [kN.mm ⁻²]	E_{\perp} [kN.mm ⁻²]	A [%]	α_{\parallel} [10 ⁻⁶ .K ⁻¹]	α_{\perp} [10 ⁻⁶ .K ⁻¹]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	ϵ_r [-]	ρ_{el} [Ω .cm]	Nasákavost *) [%]
Sklo											
E-sklo	2,60	2400	73	73	3,0	5	5	1	6,1 až 6,7	10 ¹⁴ až 10 ¹⁵	≤ 0,1
R-sklo	2,53	3500	86	86	4,1	4	4	1	6,0 až 6,1	10 ¹⁵	≤ 0,1
Uhlíkové vlákno											
HM1	1,96	1750	500	5,7	0,35	-1,5	15	-	Vodivé **)	10 ⁻³ až 10 ⁻⁴ **)	≤ 0,1
HM2	1,80	300	300	-	1,0	-1,2	12	15			≤ 0,1
HT	1,78	3600	240	15	1,5	-1	10	17			≤ 0,1
HST	1,75	500	240	-	2,1	-1	10	17			≤ 0,1
IM	1,77	4700	295	-	1,6	-1,2	12	-			≤ 0,1
Aramid											
HM	1,45	3000	130	5,4	2,1	-4	52	0,04 až 0,05	2,5 až 4,1	10 ⁵	= 3,5
LM	1,44	2800	65	-	4,3	-2	40	-	-	10 ⁵	= 7,0

*) Nasákavost při 20°C a 65% relativní vlhkosti

**) Pro všechna uhlíková vlákna

E – modul pružnosti v tahu

E_{\parallel} - modul pružnosti ve směru vláken

E_{\perp} - modul pružnosti kolmo na vlákna

α – součinitel teplotní roztažnosti

A – tažnost

ϵ_r – dielektrická konstanta

ρ – hustota

ρ_{el} – měrný elektrický odpor

σ_m – mez pevnosti v tahu

λ – tepelná vodivost

HM – vysokomodulová vlákna

HT – vlákna s vysokou pevností

HST – vysoce pevné, s nižší
tuhostí a vyšší tažností

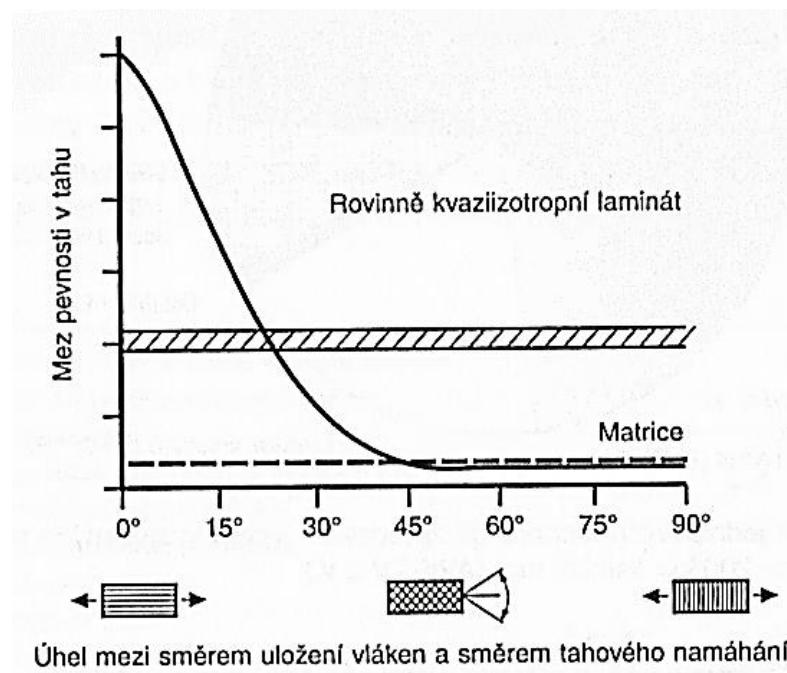
IM – středně modulová

LM - nízkomodulová vlákna

Z porovnání je patrné, že uhlíková vlákna mají nejvyšší modul pružnosti a mez pevnosti v tahu, z tohoto důvodu jsou vybrána pro experimentální část této diplomové

práce. Dále jsou vybrána vlákna skelná, protože vykazují též výborné mechanické vlastnosti a také díky své amorfní struktuře vykazují izotropní chování těchto vlastností.

Mechanické parametry kompozitního materiálu, kterými budeme určovat míru anizotropie, tedy budou vycházet v první řadě z pevnostních vlastností námi vybraných vyztužujících vláken. Dále bude velmi záležet na rozložení a orientaci vláken v matrici materiálu vůči zatěžující síle. Orientace a rozložení vláken v experimentální části diplomové práce budou ovlivňovat různé technologie vstřikování plněných plastů. Z grafu na obrázku (Obr. 2.18) je patrný vliv orientace vláken vůči napětí. Zatížíme-li materiál kolmo na směr orientace vláken, pak jeho pevnostní vlastnosti budou minimální a veškeré napětí bude přenášet pouze matrice materiálu. Maximální pevnost naopak dostaneme namáháním ve směru orientace vláken. Proto výsledný kompozitní materiál, který je zatěžován různými směry by měl obsahovat vrstvy s různou orientací vláken. V případě plněných plastů s vyztužujícími vlákny by mělo dojít k co nejchaotičtějšímu rozložení vláken. Počtem a natočením vrstev, v případě plněných plastů orientací plniva v matrici, lze pak ovlivnit výslednou míru anizotropie vlastností kompozitu. Mechanické vlastnosti dále závisí na obsahu a tloušťce vyztužujících vláken, kdy při příliš vysokém obsahu dojde k neúplnému spojení vláken matricí a tím dojde k poklesu pevnosti, nebo při příliš nízké koncentraci vláken se pak neuskuteční synergický efekt a mechanické vlastnosti po té odpovídají samotné matrici. [3]



Obr. 2.18: Vliv orientace vláken vůči napětí na výslednou pevnost [3]

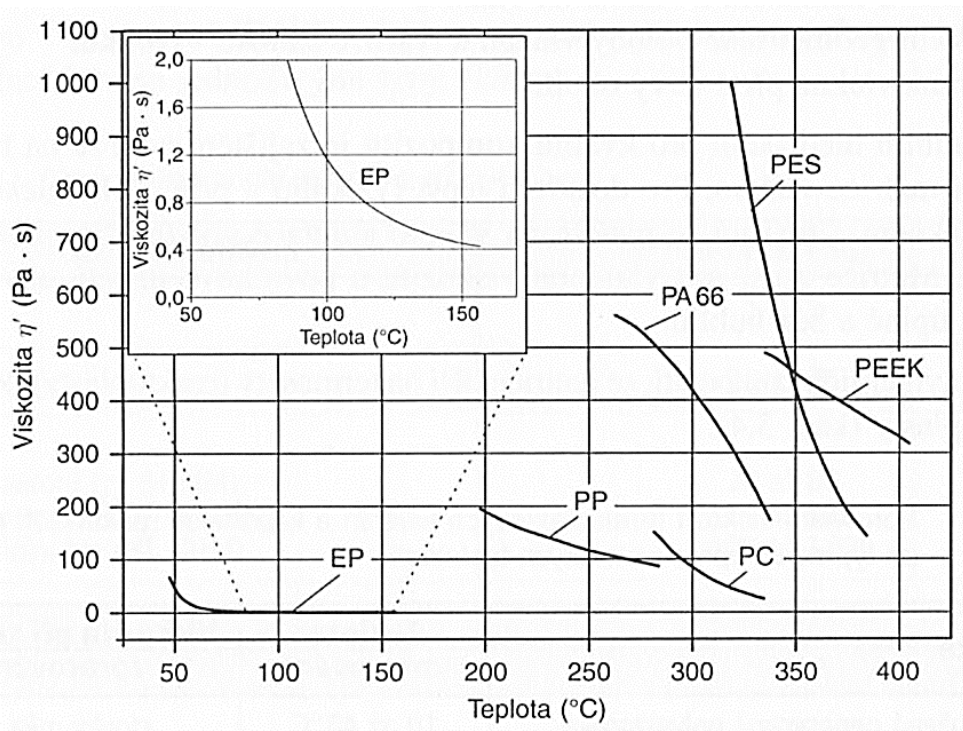
Tato diplomová práce se zabývá mechanickými vlastnostmi a mírou anizotropie kompozitního materiálu při aplikaci různých technologií výroby. Anizotropie je v tomto případě charakterizována mechanickými vlastnostmi výrobku namáhaného v různých směrech.

2.1.3 Matrice kompozitu (pojivo)

Jak už je z názvu patrné, tato část kompozitního materiálu slouží ke spojení vláken do jednoho celku, udává výsledný tvar a plní v kompozitním celku spoustu dalších funkcí jako například ochrana vláken před vnějším okolím, přenos sil mezi vlákny a stálost celkového kompozitního materiálu. Výsledné pevnostní parametry závisí v první řadě na soudržnosti vlákna s matricí, což udává výsledná adheze fázového rozhraní. Adhezi lze ovlivnit přidáním aditiv. Dále je požadována správná viskozita a povrchové napětí pojiva pro dokonalé smáčení vláken. [3]

Polymerní matrice dělíme do dvou základních skupin, matrice z reaktoplastu nebo termoplastu. Reaktoplasty a termoplasty se liší v první řadě technologickým postupem zpracování, dále i konečnými mechanickými vlastnostmi po zpracování. [3]

Reaktoplasty jsou výhodnější z hlediska menší energetické náročnosti zpracování, mají lepší smáčivost a lépe prosycují vlákna, jsou totiž ve výchozím stavu nízkomolekulární, což se odrazí na nízké viskozitě oproti termoplastům. Rozdíl viskozity obou zástupců je velmi vysoký, reaktoplasty se pohybují s viskozitou okolo několikaset mPa.s, kdežto termoplast s mnohonásobně vyšší viskozitou v rozmezí 10^3 až 10^5 mPa.s. Rozdíl viskozity reaktoplastu a termoplastu v závislosti na teplotě je znázorněn v grafu (Obr. 2.19). [3]



Obr. 2.19: Rozdíl viskozity reaktoplastu a termoplastu v závislosti na teplotě [3]

Reaktoplastická matrice se vyznačuje tvrdou křehkou trojrozměrně zesítěnou strukturou, kterou docílíme při zpracování přídavkem tvrdidla za působení tepla a tlaku. Takto vyrobený kompozit se vyznačuje vysokou pevností, Youngovým modulem, ale o to nižší tažností, kterou lze zlepšit přídavkem modifikačních činidel. [3]

Termoplastická matrice vykazuje daleko větší houževnatost a tažnost na úkor Youngova modulu. Jejich tepelná stálost a chemická odolnost je obdobná jako u reaktoplastu. Výrobní proces kompozitu s termoplastickou matricí je energeticky náročnější, ale zase jednodušší, neprobíhá zde žádná chemická reakce a je nezávadný vůči životnímu prostředí. Vstříkované termoplasty s krátkými vlákny zaujímají většinový podíl dnešní produkce vůči reaktoplastům. [3]

Matrice termoplastického charakteru mají jiné vlastnosti nežli matrice reaktoplastické. Zpracování termoplastů je možné většinou až nad teplotou 200°C, pod kterou se na rozdíl od reaktoplastů nacházejí v pevném stavu. V tomto ohledu je chemické vytvrzení reaktoplastů výhodou, jelikož je zpracování možné při pokojových teplotách. [3]

Termoplasty se zpracovávají s různými délkami vláken, jsou to vlákna krátká rozptýlená v tavenině plastu o délkách kolem 0,2 až 0,6 mm. Jejich přidání do matrice plní úlohu vyztužení a zesílení. Krátká vlákna v kombinaci s termoplastickou matricí se

vstříkují. Dále se využívají vlákna dlouhá 10 až 12 mm, ty se s matricí dají zpracovávat extruzí, lisováním i vstřikováním. Poslední sortou jsou vlákna nekonečná, ty se dají například pomocí speciálního šneku a podavače zastříkovat taveninou ve formách, nebo zpracovávat extruzí nebo lisováním. [3]

Termoplasty vyztužené krátkými vlákny se využívají tehdy, když jsou splněna kritéria, které říkají, že musí docházet ke zlepšení mechanických vlastností v porovnání s nevyztuženými termoplasty. Druhé kritérium říká, že vyztužující vlákna jsou použita tehdy, když nelze získat zlepšení mechanických vlastností jiným způsobem. [3]

U přídavku plniva do termoplastické matrice je potřeba dodržovat určitý poměr tak, aby ve výsledku zvýšilo mechanické vlastnosti, ale také aby docházelo při vyšším obsahu plniva k úplnému smáčení vláken. Doporučený procentuální obsah plniv se pohybuje od 10 do 50 %.

Z řady termoplastů se pro vyztužování vláknou využívají například materiály PC, POM, PA, PP, PBT, ABS. Rozdíl mechanických vlastností takto vylepšených plastů je markantní, představu o jaké hodnoty se jedná, znázorňuje tabulka (Tab. 2.5) plněného a neplněného termoplastu PBT.

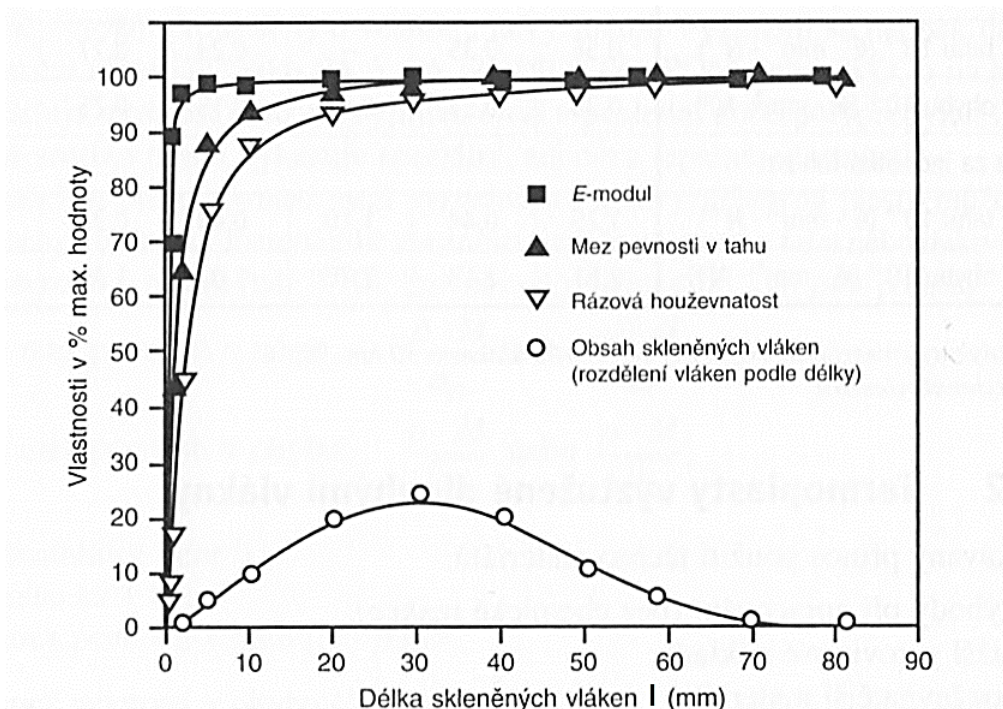
Tab. 2.5: Porovnání vlastností plněného a neplněného termoplastu [3]

vlastnost \ materiál	PBT	PBT-GF30	
			⊥
Hustota [g.cm ⁻³]	1,29	1,53	
Mez pevnosti [N.mm ⁻²]			
v tahu	60	125	-
V ohybu	85	180	110
Modul pružnosti [N.mm ⁻²]			
v tahu	2600	10000	4050
v ohybu	2400	9000	4150

Termoplasty s dlouhými vlákny vynikají proti vyztuženým pryskyřicím určitými vlastnostmi a právě tyto vlastnosti jsou důvodem nahrazení vyztužených pryskyřic plněnými termoplasty dlouhými vlákny. Jednou z nich je například výhoda při zpracování, kdy u termoplastů neprobíhá chemická reakce a tedy nezatežují ekologicky

prostředí vzniklými škodlivými plyny. Dále nejsou tolik křehké jako reaktoplasty, jsou houževnaté a vykazují daleko větší odolnost proti poškození. Suroviny pro výrobu jsou ekonomicky výhodnější z hlediska velkosériové výroby. [3]

Termoplastické matrice mají ale i spoustu záporných vlastností, se kterými je třeba při konstrukci počítat. Některé z nich mají schopnost krystalizovat. Tato vlastnost je závislá na technologickém způsobu výroby dílu, přičemž míra krystalizace je hlavním ovlivňujícím faktorem výsledných mechanických vlastností dílu. Termoplasty vykazují vysokou náchylnost ke kríčovému chování, tedy tečení za studena, což je problémem při konstrukci dlouhodobě namáhaného dílu. Důvodem jsou nižší teploty skelného přechodu termoplastů nežli reaktoplastů. Dále jsou náchylné ke korozi za napětí při působení povrchově aktivních látek, vůči kterým mají nízkou odolnost. Jejich povrchy nejsou tak kvalitní a ve většině případů potřebují z důvodu špatné přilnavosti nátěru určitou úpravu. Větší délkou vláken v případě termoplastů plněných dlouhými vlákny lze výrazně ovlivnit mechanické vlastnosti konečného výrobku. Vliv vyztužujícího účinku vláken v závislosti na délce je znázorněn v grafu na obrázku (Obr. 2.20). [3]



Obr. 2.20: Vliv délky vláken na mechanické vlastnosti kompozitu [3]

Vzhledem k tomu, že se tato diplomová práce zabývá vstřikováním polyamidu s vláknitým plnivem, jsou dále rozebrány jen termoplastické matrice. Uvedeny jsou

nejčastěji využívané amorfnní a semikrystalické termoplasty pro výrobu kompozitních materiálů. Některé z nich jsou používány k výrobě vláken přidávaných do plastů za účelem zlepšení výsledných mechanických vlastností.

2.1.3.1 Polypropylen (PP)

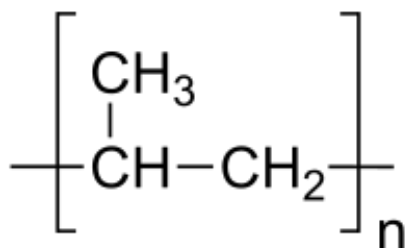
Jedná se o nepolární semikrystalický termoplast. Výsledné vlastnosti polypropyleny jsou velice závislé na indexu izotakticity, tj. na výsledném prostorovém uspořádání substituentů makromolekuly. Vlastnosti závislé na indexu izotakticity jsou uvedeny v tabulce (Tab. 2.6). [8]

Tab. 2.6 Vlastnosti PP závislé indexu izotakticity [8]

Polypropylen	Hustota [g/cm ³]	Teplota tání [°C]	Mez pevnosti [MPa]	Rozpustnost v uhlovodících při 23°C
Izotaktický	0,905 - 0,920	176	vysoká	nerozpustný
Syndiotaktický	0,890 – 0,910	135	střední	středně rozpustný
Ataktický	0,850 – 0,900	-	velmi nízká	snadno rozpustný

PP je hořlavý plast. Díky svému nepolárnímu charakteru odolává polárním rozpouštědlům, kyselinám, solím a zásadám. Hustota PP je nejnižší ze všech nelehčených plastů. Je dlouhodobě tvarově stálý do teplot 100°C. PP neodolává UV záření a proto je pro venkovní aplikace potřeba stabilizovat sazemi. [8]

Vzhledem ke svým mechanickým vlastnostem (Tab. 2.7) má tento materiál příznivou cenu. Díky možnostem kopolymerace a širokým možnostem modifikace jinými polymery a přísadami má PP velmi široké uplatnění. Je to jeden



Obr. 2.21: Polymerní jednotka PP [8]

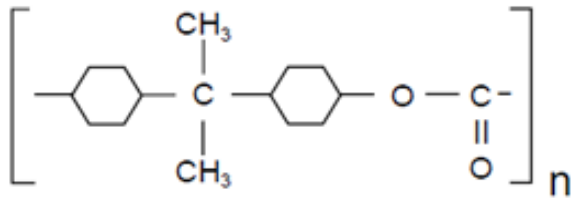
z nejpoužívanějších plastů vůbec. Využívá se ve spotřebním průmyslu k výrobě obalových materiálů, v automobilovém průmyslu, dále se z něho vyrábějí trubky, součástky strojů, domácí spotřebiče, vlákna pro plněné plasty, využívá se ale i v lékařství a dalších odvětvích. Polymerní jednotka PP je znázorněna na obrázku (Obr. 2.21). [8]

Tab. 2.7: Vlastnosti izotaktického PP [8]

Hustota [g/cm ³]	Teplota tání [°C]	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Stupeň krystalinity [%]
0,905 – 0,920	160 - 175	1100 - 1500	34 - 38	0,1 – 0,2

2.1.3.2 Polykarbonát (PC)

PC je průhledný, amorfní termoplast, z chemického hlediska je řazen mezi polyestery, základní stavební jednotka je vyobrazena na (Obr. 2.22). Polykarbonáty se



Obr. 2.22: Polymerní jednotka PC [9]

vyznačují velmi dobrými mechanickými vlastnostmi (Tab. 2.8) a odolností proti lomu, vykazují tedy vysokou tuhost, pevnost, ale také houževnatost. Díky vyšší teplotě skelného přechodu T_g nacházející se v kladných hodnotách má

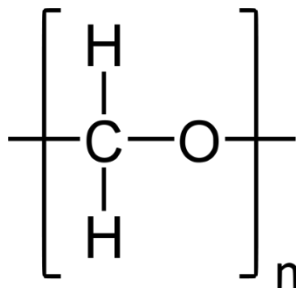
PC dobrou odolnost vůči kríčovému chování, dále je dlouhodobě odolný proti deformaci do teplot 135°C. Je navlhavý kvůli částečně polárním charakteru jeho vazeb, vykazuje výborné elektroizolační vlastnosti. [8]

Tab. 2.8: Vlastnosti konstrukčního termoplastu PC [8]

Hustota [g/cm ³]	Teplota zesklnění [°C]	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Navlhavost [%]
1,2	150	2100 - 2400	56 - 67	0,1 – 0,2

2.1.3.3 Polyoxymethylen (POM)

POM je vysoce krystalický polymer se schopností krystalizovat až do 90 %. Díky možnosti vysoce krystalické struktury pro jednoduchou stavbu polymerní jednotky (Obr. 2.23), vykazuje výborné mechanické vlastnosti (Tab. 2.9), a proto je využíván ke



konstrukčním účelům. Tento polymer vyniká velmi dobrými kluznými vlastnostmi, vysokou rázovou houževnatostí a odolností vůči krípu. Jeho dlouhodobá stálost je zaručena do teplot 110°C, krátkodobá až do 120°C. Díky přítomnosti kyslíku zaručující jistou polaritu ve vazbách je polyoxymethylen mírně navlhavý. [8]

Obr. 2.23: Základní stavební jednotka POM [10]

Tab. 2.9: Vlastnosti konstrukčního termoplast POM [8]

Hustota [g/cm ³]	Teplota tání [°C]	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Navlhavost [%]
1,41 – 1,42	165 - 185	2800 - 3200	62 - 70	0,22

2.1.3.4 Polyamid (PA)

Polyamid je plast tvořený lineárními řetězci, které jsou složeny ze střídavě se opakujících amidových skupin –CO-NH- s methylovými skupinami –CH₂-. Polyamid je jeden z nejvíce používaných semikrystalických termoplastů pro konstrukční aplikace. Využívá se i jako plnivo zvyšující pevnost v jiných plastech. [8]

Struktura PA je tvořena polárními atomy kyslíku a dusíku, což způsobuje vysoký sklon k navlhavosti a což také velice ovlivňuje výsledné vlastnosti takto navlhnutého plastu. Dojde ke zvýšení houževnatosti, tažnosti, vrubové houževnatosti, atd. Amidové skupiny umožňují mezi řetězci vytvoření speciálních vazeb zvaných vodíkové můstky, ty mají za následek vazbu makromolekul mezi sebou, a tedy zvyšují výslednou pevnost polyamidu, ale také teplotu tání. Polyamidy mají výborné kluzné vlastnosti, jsou náchylné ke krípuvému chování. Charakteristické vlastnosti PA jsou uvedeny v tabulce (Tab. 2.10). [8]

Značení polyamidů například PA-6, PA-66 uvádí počet atomů uhlíku v monomerní jednotce polyamidu. Jako příklad uvedeme PA-610, tento druh

polyamidu je tvořen kyselinou sebakovou, která obsahuje v molekule 6 atomů uhlíku v kombinaci s hexamethyldiaminem, který obsahuje 10 atomů uhlíku v molekule. Jejich takto kombinovanou strukturní stavbou jsou charakterizovány jejich mechanické vlastnosti (Tab. 2.10). [8]

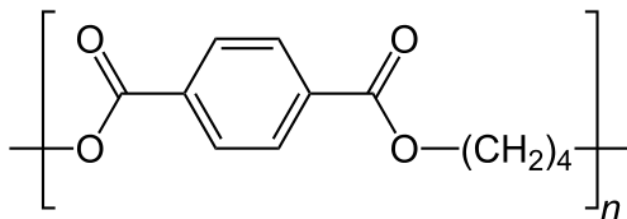
Pro experimentální část této diplomové práce byl zvolen polyamid. Zvolen byl pro jeho velmi kvalitní mechanické vlastnosti a proto, že byl požadován a také dodán firmou Magna Exteriors & Interiors (Bohemia) s.r.o.

Tab. 2.10: Vlastnosti nejpoužívanějších zástupců PA [8]

Polyamid	Hustota [g/cm ³]	Teplota tání [°C]	Modul pružnosti [MPa]		Navlhavost [%]
			Suchý stav	Navlhlý stav	
PA-6	1,10 - 1,14	215 – 225	1100 – 3500	1000 – 2500	2,5 – 3,0
PA-66	1,12 – 1,14	250 – 260	2600 – 3600	1000 – 2800	2,5 – 2,8
PA-610	1,06 – 1,08	215	2400	1500	1,4
PA-11	1,01 – 1,04	175 – 187	1200 – 1600	1000	1,0
PA-12	1,01 – 1,03	170 - 180	1300 - 2100	1200	0,9 – 1,8

2.1.3.5 Polybutylentereftalát (PBT)

Jedná se o semikrystalický termoplast s též dobrými mechanickými vlastnostmi (Tab. 2.11), krátkodobá teplotní stálost dosahuje teplot 165°C. Vlastnostmi se velmi podobá polyethylentereftalátu (PET), který má velmi nízkou krystalizační rychlost. PBT je ale lépe zpracovatelný nežli PET, dobře odolává tečení za studena a je to dobrý



Obr. 2.24: Polymerní jednotka PBT [11]

elektrický izolant, proto je hojně využíván v elektrotechnice. Dále se používá jako konstrukční materiál plněný skelnými vlákny, nebo také s přídavkem minerálu a jiných přísad. [8]

Tab. 2.11: Charakteristické vlastnosti PBT [8]

Hustota [g/cm ³]	Teplota tání [°C]	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Navlhavost [%]
1,31	225-230	2000	40	0,1

2.1.3.6 Akrylonitril-butadien styren (ABS)

Vyrábí se kopolymerací akrylonitrilu, butadienu a styrenu. ABS je amorfní terpolymer, přesto ale není průhledný. Butadienová kaučukovitá složka propůjčuje materiálu houževnatost, akrylonitril pomáhá zvyšovat chemickou odolnost polystyrenu. ABS vyniká vysokou rázovou houževnatostí, je také pevný, tuhý a proto se používá ke konstrukčním účelům například v automobilovém průmyslu. Díky svému složení ve vlhkém prostředí navlhá. ABS dobře odolává elektrostatickému náboji. Regulací poměru stavebních složek lze získat rozmanité výsledné mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti ABS jsou zobrazeny v (Tab. 2.12). [8]

Tab. 2.12: Charakteristické vlastnosti terpolymeru ABS [8]

Hustota [g/cm ³]	Teplota zesklenní [°C]	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Navlhavost [%]
1,05	105	1900 - 2700	30 - 45	0,20 – 0,45

2.1.4 Přísady do polymerů

Přísady do polymerů jsou látky přidávané do plastu za účelem odstranění jistých nedostatků, nebo zlepšení určitých vlastností. Při využití musí splňovat určité podmínky, jako například zajištění stability plastu při provozních podmínkách musí být dostatečně efektivní a nesmí mít na vlastnosti plastu negativní vliv. Lze je dělit do dvou základních skupin a to na přísady modifikující fyzikální vlastnosti plastu a přísady s ochranným účinkem vůči degradaci. Podle požadovaného výsledného přínosu lze dělit aditiva: [12]

Plastifikační činidla – využívají se pro snadnější zpracování kaučuku, usnadňují štěpení makromolekul při hnětení. [12]

Maziva – dělí se dle funkce na vnější a vnitřní. Jsou to aditiva, která napomáhají obtížně zpracovatelným plastům při výrobě tak, že napomáhají vzájemnému pohybu makromolekul. Dále ovlivňují vzhled povrchu a tepelnou stabilitu. Využívají se například pro PVC, PS, PTFE atd. [12]

Separační činidla – zaručují snadnější vyjmutí výstřiku z formy. Používají se silikonové oleje nebo disperzní látky tvořené PTFE. Dále se využívají fólie vložené do formy. [12]

Změkčovadla – snižují teplotu skelného přechodu a viskozitu taveniny, dále zlepšují houževnatost, tvárnost plastu a vrubovou houževnatost plastu. [12]

Tepelné stabilizátory – využívají se například při zpracování PVC a jiných plastů, které mají teplotu rozkladu velmi blízko teploty měknutí. Konkrétně v případě PVC zamezují odštěpení H-Cl a jejich další vazbě s méně reaktivními sloučeninami. [12]

Antidegradanty – chrání výrobek před vnějšími vlivy. Do této skupiny patří světelné stabilizátory, které absorbují ultrafialové záření způsobující degradaci plastu, dále antioxidanty zabraňují štěpné reakci makromolekul plastu kyslíkem a antiozonanty, které chrání pryž před napadáním povrchu ozonem, který povrch pryže vytvrzuje. [12]

Sítovací prostředky (tvrdidla) – vytváří trvalé příčné vazby mezi makromolekulami. Zesítnění struktury probíhá u pryží přidávkem vulkanizačního činidla, kterým je síra. Reaktoplasty se zesítují pomocí tvrdidla, což bývají kyseliny nebo peroxidy. V dnešní době se provádí i zesítnění termoplastů pomocí organických peroxidů. [12]

Plniva – dále se dělí na vyztužující nevyztužující. Vyztužující plniva se přidávají do plastu za účelem zlepšení mechanických vlastností plastu. Nevyztužující plniva jsou přidávány za účelem snížení celkové ceny výrobku. Plniva dále mohou pozitivně ovlivnit vzhled, odolnost vůči teplotě, stárnutí, korozi atd. Jsou to většinou tuhé látky ve formě prášků, kuliček, vláken, atd. [12]

Nadouvadla – nadouvadlem bývá většinou CO₂, vlivem tepla dochází k rozkladu, expanduje a vytvářejí lehčenou pórovitou strukturu plastu. Pomocí nadouvadla se vyrábějí lehčené plasty. [12]

Pigmenty – jsou ve formě barevných prášků a definují barevný odstín plastu. Nejpoužívanějším pigmentem je oxid titaničitý, dále se často využívají saze a další organické a anorganické barviva. [12]

Retardéry hoření – tyto produkty vynikají vysokou tepelnou odolností, zvyšují bod vzplanutí plastu. Pro polyolefiny jsou například používány hydratovaný oxid hlinitý a hydratovaný boritan zinečnatý, tepelná odolnost těchto materiálů dosahuje teploty 300°C. [12]

Antistatika – se přidávají za účelem eliminace elektricky nabitého náboje v plastu, který vytváří přitažlivé či odpudivé síly mezi smáčeným prostředím a plastem. Elektrický náboj dále může přitahovat prach a jiné nečistoty, které zhoršují kvalitu povrchu a výsledné mechanické vlastnosti. Nejvíce používanými antistatiky jsou aminové sloučeniny. [12]

Adheziva – používají se tam, kde dochází k nedostatečné adhezi, tedy přilnavosti vyztužujících vláken k polymerní matici. [12]

Největší nedostatek kompozitního materiálu, který lze řešit aditivem je nekompatibilita plniva a matrice, což má za následek špatnou adhezi vláken plniva s matricí. Nekompatibilitu vláken s matricí může negativně ovlivnit například jejich chemická stavba. Kupříkladu přírodní vlákna mající silně polární charakter, jsou špatně vázaná nepolární termoplastickou matricí. Špatná adheze složek kompozitu může být dále způsobena navlhavostí plniva nebo matrice. Ve výsledku budou sníženy pevnostní vlastnosti kompozitu. Aditivum v tomto případě napomáhá vytvářet chemické vazby mezi plnivem a pojivem.

2.1.4.1 Obecný princip adheziva

Adhezivo má za úkol pomoci vytvořit silnější chemické vazby mezi plnivem a pojivem kompozitního materiálu a tím zvýšit adhezivní spoj obou fází. Chemická vazba může být v tomto případě kovalentní, iontová nebo vodíková. Máme-li dvě nereaktivní složky kompozitu, tedy složky, které mezi sebou vytvoří velmi slabé chemické vazby, je třeba přidat takové činidlo, které bude schopno reagovat s oběma složkami kompozitu a bude moci zesílit chemické vazby. Obecně lze popsat princip takového adheziva dvěma složkami A a B, které bude třeba přidat do polymeru pro vytvoření potřebných chemických vazeb s plnivem. Proces bude aktivován složkou A, která vytvoří reakci s polymerem matrice volné vysoce reaktivní radikály, které umožní spojování (graftování) složky B s polymerem reprezentujícím matrici. Sloučenina složky B a polymeru reprezentujícího matrici pak za pomoci přidané energie například

formou tepla snadněji vytvoří silnější chemickou vazbu k plnivům kompozitního materiálu. [6]

V případě této diplomové práce by se jednalo o zlepšení adheze vybraných plniv s polyamidovou matricí. Zvýšení adheze plnicích vláken námi vybraného polyamidu je možno například adhezivem Versamid. Jelikož je polyamid dodáván se zakomponovaným plnivem v granulátu, tento proces odpadá. Je totiž řešen výrobcem dodávajícího materiálu, a tedy soudržnost plniva s matricí materiálu pro experimentální část bude kvalitní.

2.2 Technologie pro zpracování kompozitních materiálů

Firma Magna se zabývá v první řadě výrobou plastových dílů pro automobilový průmysl. Jedná se převážně o vstřikované díly z termoplastických polymerů, které bývají vyztuženy různými druhy plniv. Tedy převážná výroba firemního řetězce Magna Exteriors & Interiors (Bohemia) s.r.o. je tvořena technologií vstřikování. Magna, jakožto firma zefektivňující a zdokonalující své výrobní postupy s časem, vynakládá snahu pro vývoj výrobních postupů, které budou vést ke zhotovení vyráběných dílů s dokonalejšími konečnými mechanickými vlastnostmi. Jedním z řešení pro výrobu dokonalejších plastových dílů je náhrada výrobní technologie konvenčního vstřikování vstřikováním kompresním, ke kterému se ve firmě v této době přechází. Tato diplomová práce má za úkol zkoumat pro Magnu porovnání vlivu těchto technologií na výsledné mechanické vlastnosti a jejich anizotropii vyráběných termoplastických dílů vyztužených dlouhými vlákny.

2.2.1 Technologie výroby konvenčním vstřikováním

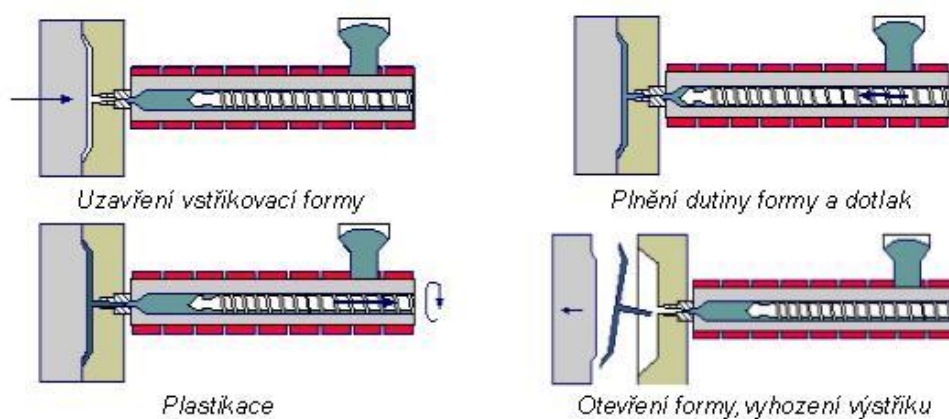
Tato technologie je jedna z nejpoužívanějších při zpracování plastů. Vstřikováním se vyrábějí díly výsledného tvaru, který určuje negativ dutiny formy. Technologie umožňuje tvarově složité a členité výrobky, které jsou rozměrově velmi přesné, kupříkladu se v Magně takto vstřikují plastové nárazníky. Technologie vstřikování je zpravidla prováděna velkosériově, nebo hromadně z toho důvodu, že v menším rozsahu není ekonomicky výhodná, stroje pro zpracování a jejich provoz je velmi drahý. Výrobní proces má diskontinuální cyklický charakter. [13]

2.2.1.1 Princip technologie vstřikování

Princip této technologie spočívá ve vstřiknutí ohřátého plastu na teplotu viskózního toku vysokou rychlostí do dutiny kovové formy, kde vyplní celý tvarový prostor a postupně od stěn ke středu chladne a tuhne. Paralelně s časem chladnutí výrobku dochází k přípravě, tedy tavení a homogenizaci další dávky plastu pro následující vstřik. [13]

V počátečním momentu vstřikovacího cyklu je dán impuls pro uzavření formy. Forma je zavírána určitou silou. Po uzavření je uzamčena silou vyšší nežli silou uzavírací. Síla uzamykací musí být tak veliká, aby udržela formu uzavřenou při působícím tlaku taveniny, který vznikne vlivem vstřikování. [13]

Poté začíná proces plastikace taveniny, granule vstřikovaného plastu nasypané v násypce šneku jsou odebírány točícím se šnekem. Šnek má jádro z části kuželovitého charakteru, což při mletí a drcení granulí slouží k vytvoření kompresního tlaku, který drť rozemletých granulí zahřívá a taví. Pro vývin přídavného tepla pro tavení granulí je stator šneku osazen několikastupňovým vyhříváním, jehož intenzita je libovolně nastavitelná v rozdělených částech komory, například lze nastavit vyšší intenzitu ohřevu na výstupu šneku, kde je teplota snižována chladícím účinkem formy, a tedy hrozí zatuhnutí plastu v ústí trysky do formy. Při tavení a homogenizaci plastu šnek ustupuje dozadu, čímž vytváří protitlak pro plastikaci a vytváří místo pro připravenou taveninu ke vstřiku do formy. Je-li připraven potřebný objem taveniny pro jeden vstřik, šnek se přestane otáčet, po té přebere funkci pístu, který vytváří svým dopředným rychlým pohybem vysoký tlak a hrne taveninu před sebou, dokud nenaplní celou dutinu formy. Grafické znázornění vstřikovacího cyklu je vyobrazeno na obrázku (Obr. 2.25). [13]

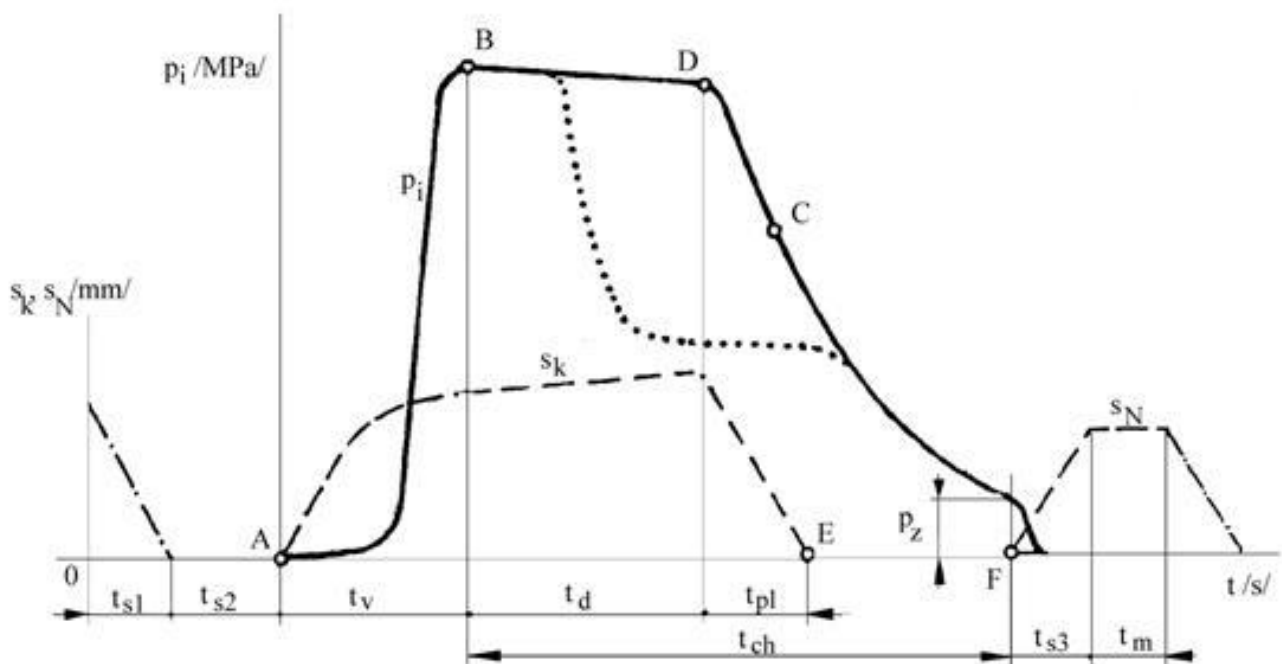


Obr. 2.25: Vstřikovací cyklus [14]

Tavenina při dotyku stěn formy vlivem chladnější teploty ihned tuhne. Ochlazováním taveniny dochází k objemovému smrštění výrobku, které je potřeba kompenzovat přídatným materiálem, který je připraven s objemem 10 – 15 % dávky pro jeden vstřík před čelem šneku a dále dotlakem, který též zajišťuje šnek. Průběh dotlaku může mít klesající charakter, nebo neměnný a je znázorněn ve vstřikovacím diagramu na (Obr. 2.26) a jeho čas je značen t_d . Formy jsou vyráběny z ocele, která má vysokou teplotní vodivost, proto pro minimalizaci teplotního šoku a tedy pomalejšího chlazení výstřiku je třeba formu temperovat na 30 až 80°C. Po čase potřebném pro ochlazení výstřiku t_{ch} , který trvá podle (Obr. 2.26) až do otevření formy, je výrobek pomocí vyhazovačů odebrán a celý cyklus se opakuje. [13]

Paralelně s probíhajícím časem chlazení po ukončení času pro dotlak, začíná vstřikovací jednotka plastikovat novou dávku plastu pro následující vstřík, znázorněno v diagramu (Obr. 2.26) jako čas plastikace t_{pl} .

Průběh tlaku při procesu vstřikování je znázorněn ve vstřikovacím diagramu na obrázku (Obr. 2.26). [13]



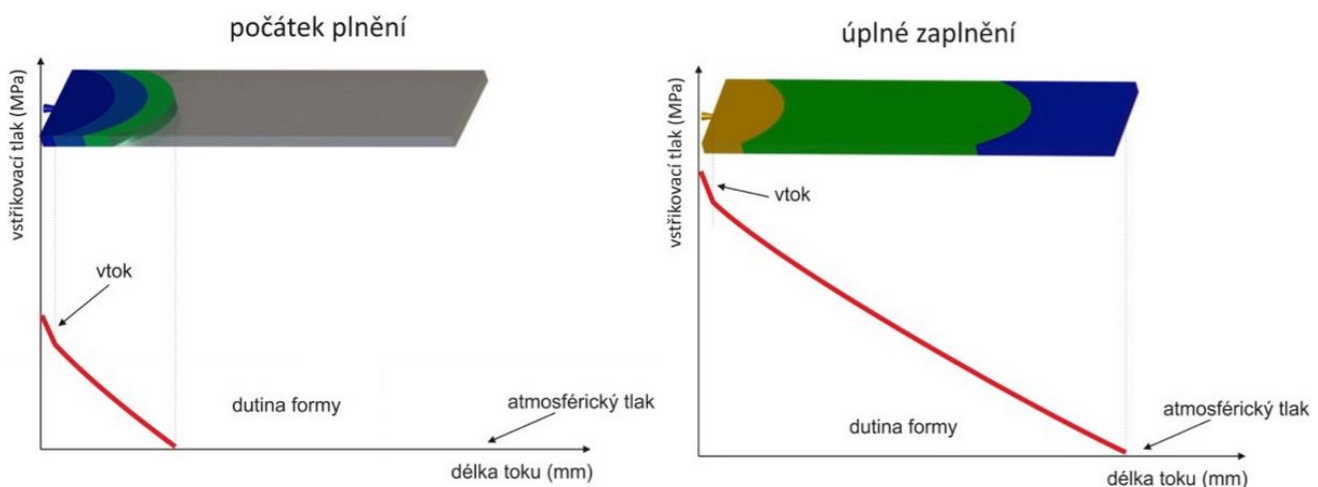
Obr. 2.26: Průběh tlaku při vstřikování ve vstřikovací formě

S_k – pohyb šneku, S_N – pohyb nástroje [14]

2.2.1.2 Průvodní jevy technologie vstřikování

Při vstřikovacím cyklu probíhá zároveň několik proměnných procesů, které ovlivňují výslednou podobu a vlastnosti vstřikovaného dílu. Jedná se o pokles teploty a tlaku s časem plnění formy. Další proměnou je zde nehomogenita teplotního a napěťového pole a orientace makromolekul a plniva v tlakem ovlivněné tavenině. [15]

Tavenina při průtoku dutinou chladne vlivem nižší teploty formy. Chladící efekt formy má za následek proměnou viskozitu taveniny, která způsobuje pokles rychlosti toku a pokles tlaku od ústí vtoku k čelu taveniny. Změna tlaku je vyobrazena v grafech na obrázku (Obr. 2.27). [15]



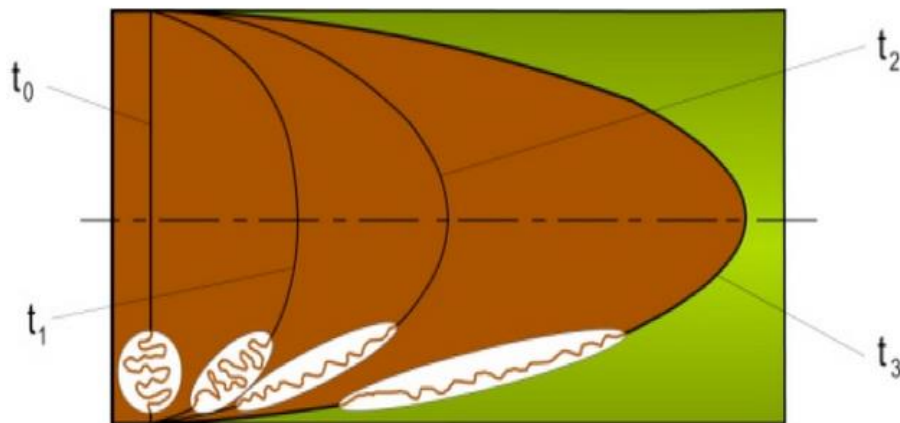
Obr. 2.27: Pokles tlaku v dutině vstřikovací formy během fáze plnění [15]

Vlivem proměnné rychlosti toku a proměnného tlaku dochází k nerovnoměrnému odvodu tepla ze vstřikovaného dílu. Takovýto efekt má za následek po vyjmutí výstřiku ze vstřikovací formy nehomogenní napěťové a teplotní pole, které vede k pnutí a deformacím výrobku. Špatná konstrukce formy může vést ke znásobení těchto nežádoucích efektů, což může mít za následek tak velké pnutí, že dojde k prasknutí dílu. [15]

Dalším průvodním jevem vstřikování termoplastů je orientace makromolekul taveniny a plniva v průběhu plnění dutiny formy. Orientace vzniká vlivem vysokých vstřikovacích rychlostí a vysokého tlaku. Čím větší vstřikovací rychlost a tlak působí na taveninu, tím vzniká větší smykové napětí v tavenině plastu. Smykové napětí a tlak mají za následek rozbalování zkroucených makromolekul do směru toku taveniny. V případě vstřikování plněného plastu vlákny pak dochází ke stejné orientaci vláken

vlivem vstřikovacího tlaku. Makromolekuly narovnané do směru toku taveniny při působení dotlaku v důsledku procesu chladnutí zůstávají ve své orientované poloze, čímž zapříčiní anizotropní vlastnosti vstřikovaného dílu. Čím více budou vlivem tlaku makromolekuly narovnané, tím výsledná anizotropie vstřikovaného dílu s orientací vzroste. Orientaci lze tedy zvyšovat větším tlakem a naopak eliminovat lze vyššími teplotami formy a taveniny. [15]

Orientace makromolekul není ve všech místech taveniny stejná. Je proměnná s tloušťkou stěny a vzdáleností od vtoku vlivem změny tlaku. Směrem od vtoku se snižujícím se tlakem k čelu taveniny stupeň orientace klesá. Tavenina chlazená formou nejrychleji chladne v místě dotyku s formou, zde se nestihnou makromolekuly orientovat. Největší orientace vzniká hned za touto zatuhlou vrstvičkou taveniny, kde se nachází největší smykové napětí. Směrem ke středu toku pak orientace se smykovým napětím klesá viz. (Obr. 2.28). [15]



Obr. 2.28: Vliv smykové rychlosti na intenzitu narovnání makromolekul [15]

Analogií makromolekul orientujících se vlivem tlaku a smykových sil, je natočení vláknenného plniva v tavenině plastu. Vláknena plniva na rozdíl od makromolekul nejsou bez smykového namáhání zpětně deformována nebo „kroucena“, orientují se stejným způsobem do směru toku taveniny za působení tlaku. Stejný efekt má vzdálenost místa orientace od vtoku, kdy dochází k menší uspořádanosti ve směru toku taveniny se zvyšující se vzdáleností od vtoku a tedy místa formy s nejvyšší teplotou a tekutostí taveniny polymeru. Jelikož u konvenčního vstřikování nelze řídit průběh tlaku v různých místech vstřikovací formy, bude touto technologií vznikat anizotropní výrobek z hlediska mechanických i fyzikálních vlastností. Z hlediska mechanických vlastností

pak bude ve směru orientace vykazovat větší pevnostní parametry, jako jsou modul pružnosti a mez pevnosti. Což bude dále uplatněno v experimentální části této diplomové práce, kde budou porovnávány mechanické vlastnosti ve směru vláken s mechanickými vlastnostmi kolmo na vlákna orientovaná v matrici, z čehož pak bude vyhodnocována výsledná míra anizotropie mechanických vlastností.

Vlivem orientace makromolekul a plniva bude dále vznikat rozdílné smrštění v podélném a příčném směru toku taveniny. Neplněné plasty vykazují větší smrštění ve směru toku taveniny než ve směru kolmém. U vláknů plněných plastů je tato vlastnost opačná, a tedy ve směru toku taveniny je smrštění menší než ve směru kolmém. [15]

2.2.1.3 Následné jevy technologie vstřikování

Po konci vstřikovacího cyklu ve výrobku probíhá několik vzájemných dějů, které ovlivňují výsledné vlastnosti, vzhled a funkčnost výstřiku. Mezi tyto následné jevy patří krystalizace, pnutí, smrštění, kvalita povrchu a deformace.

Negativní vlivy následných jevů, které by mohli ovlivnit mnoha měřené mechanické vlastnosti zkušebních tělísek, lze z velké části eliminovat dodržením dostatečně dlouhé doby chlazení, což bylo při výrobě destiček zohledněno, a tedy následné jevy experimentální část této diplomové práce ovlivní minimálně.

2.2.1.4 Faktory a parametry ovlivňující vlastnosti a kvalitu výstřiku

Na konečných užitečných, mechanických a fyzikálních vlastnostech vstřikovaných dílů se podílí spousta faktorů, které se ovlivňují navzájem. Vliv konečných vlastností výstřiku ovlivňuje v první řadě druh plastu, konstrukce výrobku a technologické parametry, dále se podílí na konečných vlastnostech konstrukce vstřikovací formy a stroj. [15]

Z hlediska volby druhu plastu je ovlivněn vstřikovaný díl vlivem:

- typu plastu
- tekutost polymeru, je potřeba, aby byla dostatečná a tavenina se dostala do všech koutů dutiny formy, neměla by se moc rychle měnit s teplotou
- druh a množství přísad
- nadmolekulární struktura plastu

- rychlost plastikace polymerních granulí v tavenině by měla být co nejrychlejší, ale nesmí dojít vlivem vysoké teploty a tření k degradaci, tedy rozpadu makromolekul plastu
- obsah vody v plastu, který by mohl vytvořit mechanické a vizuální vady výrobku
- uvolnění těkavých látek nebo vlhkosti
- optimální tepelná stabilita plastu, je potřeba, aby se do tohoto intervalu teplot vešly zpracovatelské teploty, opak by opět vedl k degradaci
- rovnoměrná homogenita taveniny plastu
- vnitřní pnutí, snaha docílit co nejnižších hodnot
- dostatečná tepelná stabilita plastu
- smrštění plastu, je ovlivněno v první řadě technologickými podmínkami
- velikost pnutí
- relaxace [15]

Dalšími vlivy, které se podílejí na výsledku vstřikování, jsou technologické parametry, které se navzájem ovlivňují. Největší vliv mají:

- teplota taveniny, je to faktor, od kterého se odvíjejí další technologické parametry a vlastnosti plastu, jakožto vstřikovací tlak, tekutost, doba chlazení, smrštění, charakter dotlaku atd., závisí na druhu plastu
- vstřikovací tlak, má vliv na velikost uzavírací síly, vnitřní pnutí, smrštění, ale i na rychlost plnění a orientaci makromolekul, které se vlivem tlaku narovnávají do směru toku taveniny
- teplota formy, závisí na druhu plastu, ovlivňuje jeho tekutost, s tím i rychlost plnění a dobu chladnutí, dále má vliv na povrch a lesk výrobku, dotlak, vnitřní pnutí a výsledné smrštění, u semikrystalických plastů je potřeba co nejvyšší pro dosažení vysokého podílu krystalinity
- velikost, délka a doba přepnutí na dotlak udává výsledné rozměry, vnitřní pnutí a smrštění výstřiku
- rychlost plnění dutiny formy je potřeba docílit co nejvyšší, abychom docílili co nejmenších rozdílů tuhnutí taveniny v různých místech výrobku, rychlost plnění ale nesmí být příliš vysoká, aby nedocházelo k degradaci nebo spálení plastu vlivem vysokého tlaku [14]

Dále se na výsledném vzhledu a kvalitě výstřiku projeví kvalita a konstrukce formy. Největší vliv z tohoto hlediska má:

- násobnost formy
- konstrukce vtokové soustavy
- konstrukce temperačního systému
- konstrukce vyhazování
- konstrukce odvodušnění
- materiál formy
- teplota temperačního média a stěn tvarové dutiny
- rozměry dutiny formy
- kvalita povrchu dutiny vstřikovací formy
- deformace formy [15]

Volba stroje má též veliký vliv na konečnou podobu vstřikovaného dílu, z tohoto hlediska má největší vliv:

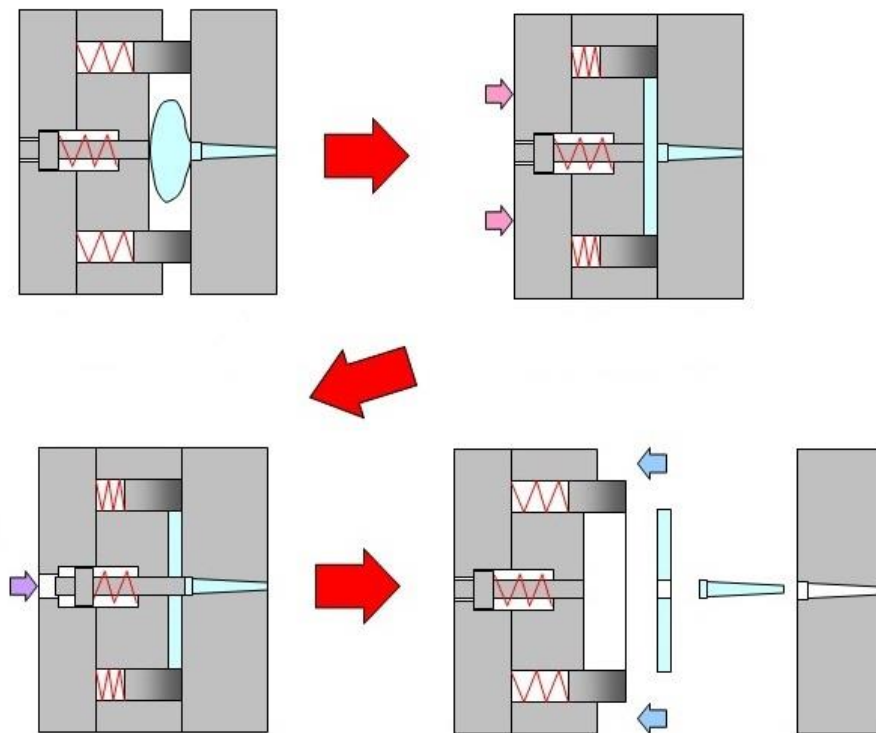
- konstrukce stroje
- typ trysky
- velikost dávky
- vstřikovací kapacita stroje
- plastikační kapacita vstřikovacího stroje
- uzavírací síla stroje
- teploty jednotlivých topných pásem tavicí komory
- teplota trysky
- otáčky šneku
- doba plastikace
- zpětný tlak šneku [15]

2.2.2 Technologie výroby kompresním vstřikováním (CIM)

Kompresní vstřikování CIM (compress injection moulding) je technologií velmi podobné konvenčnímu vstřikování. Rozdíl těchto technologií tkví ve funkci dotlaku, kterou neplní jako u klasického vstřikování šnek, ale uzavírací jednotka formy vstřikovacího stroje, která po naplnění dutiny formy zvýší uzavírací sílu a „dolisuje“

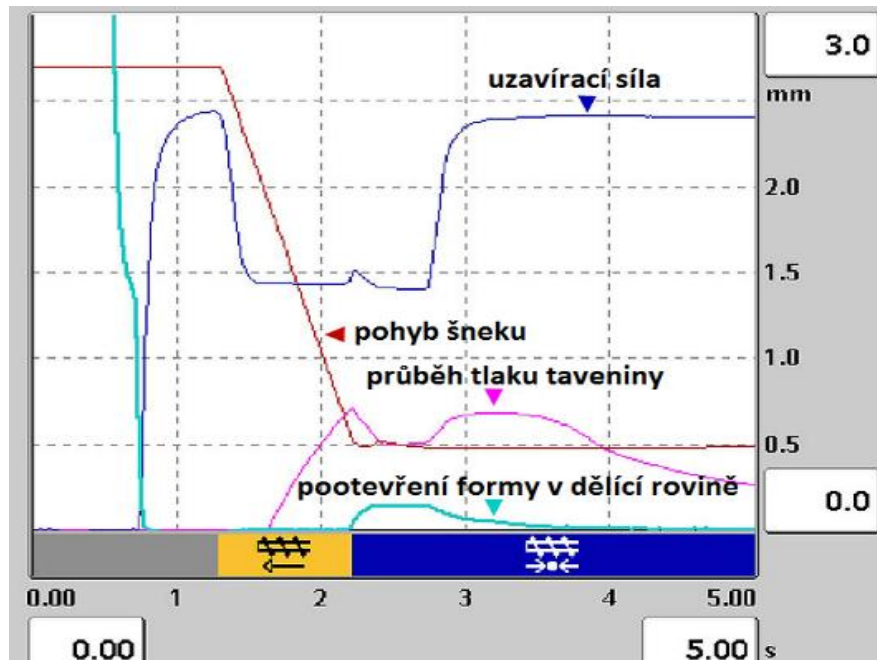
taveninu do všech koutů formy. Proto se také někdy tato technologie nazývá vstřikování s dolisováním. [15]

Všechny fáze kompresního vstřikování až na fázi dolisování jsou stejné. Fáze dolisování lze řešit dvěma alternativami. Průběh první procesní alternativy spočívá v pootevření vstřikovací formy před samotným vstřikováním. Do pootevřené vstřikovací formy je vstříknuta tavenina přesného objemu. Po vstříknutí taveniny následuje dovržení formy plnou uzavírací silou, čímž je plast kompletně dotlačen do celého objemu dutiny formy. Princip kompresního vstřikování znázorňuje obrázek (Obr. 2.29), který znázorňuje postup výroby CD a DVD. [15]



Obr. 2.29: Princip výroby CD a DVD technologií CIM

Princip druhé procesní alternativy spočívá ve zmenšení uzavírací síly formy v ovládacím rozhraní stroje na takovou hodnotu, aby se vlivem tlaku vstřikované taveniny polymeru o přesném objemu pootevřela v dělicí rovině. Průběh uzavírací síly s poklesem tlaku ve formě je znázorněn v grafu na obrázku (Obr. 2.30). Po vstříknutí roztaveného polymeru se opět uzavírací síla nastaví na maximální hodnotu a dolisuje vstříknutou taveninu. [15]



Obr. 2.30: Časový průběh uzavírací síly a tlaku v dutině formy [16]

Technologie vstřikování s dolisováním vykazuje oproti konvenčnímu vstřikování celou řadu výhod. Za výhodu lze považovat například velmi nízké hodnoty smrštění, prnutí a deformací díky tlaku vyvozeného uzavírací silou, který působí najednou v celém objemu přímo na taveninu plastu v dutině formy. Díky tomuto faktu výstřiky technologií CIM dosahují velmi vysoké přesnosti. [15]

Kompresní vstřikování plněných plastů s vyztužujícími vlákny má výhodu oproti konvenčnímu vstřikování z hlediska anizotropie. Z počátku před vyvozením dotlaku uzavírací jednotkou je průběh orientace vláken stejný jako u konvenčního vstřikování. Plast je vstříknut do pootevřené formy, přičemž se vlákna orientují ve směru toku taveniny. Po zvýšení uzavírací síly formy na maximum působí tlak v celém objemu vstřikovaného dílu stejně, tedy smykové síly by měly být též v celém objemu stejné. Tento fakt by měl mít za následek rozbití anizotropních vlastností vstřikovaného dílu pomocí všestranného (hydrostatického) tlaku se stejnou velikostí v každém bodu taveniny, který způsobí chaoticky orientovanou strukturu vláken. V experimentální části diplomové práce je sledován vliv kompresního vstřikování na výslednou anizotropii mechanických vlastností vyráběného dílu.

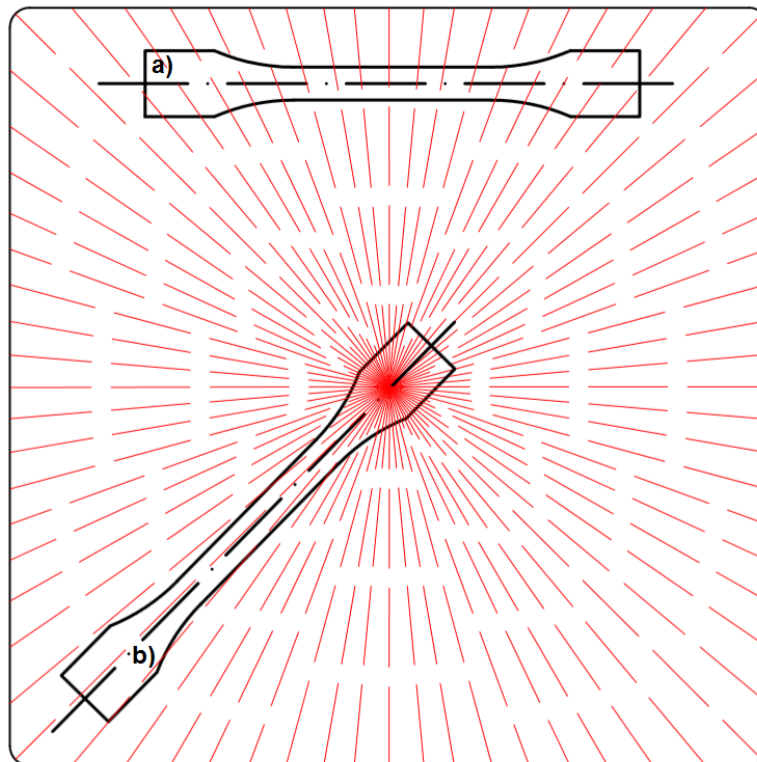
Technologií CIM jsou vyráběny takové díly, kde je třeba dosáhnout vysoké rozměrové přesnosti bez jakéhokoli pozdějšího smrštění nebo částečné deformace. Touto technologií se například vyrábějí CD, DVD, optické díly, kontaktní čočky, atd. [15]

3 Experimentální část

V experimentální části této diplomové práce byl proveden výzkum zabývající se vlivem technologie, druhem použitých plniv v matrici materiálu a jejich procentuálním množstvím na výsledné mechanické vlastnosti a míru anizotropii mechanických vlastností výrobku. Zkušební tělíska byla vyrobeny technologií konvenčním vstřikováním a poté technologií kompresním vstřikováním. Tělíska byla vstřikována z polyamidové matrice se skelným a dále uhlíkovým vláknem. Koncentrace plniva v matrici dosahovala 30 a 40%.

Jak už bylo zmíněno v kapitole teoretické části (2.1.1.1 Technologie konvenční vstřikování) míra anizotropie je nejrozdílnější v podélném a kolmém směru vláken plniva plastu. Míru anizotropie mechanických vlastností vstřikovaného výrobku s plnivem lze určit tak, že ze vstřikovaného dílu se odeberou vzorky v různých směrech, na které se pak aplikují mechanické zkoušky. Výsledky mechanických zkoušek jednotlivých vzorků odebraných v různých směrech, jako například meze pevnosti, nebo lépe moduly pružnosti se pak porovnají a jejich odchylky budou značit míru anizotropie. V ideálním případě, který prakticky nemůže s plnivem v plastové matrici nastat, by byly hodnoty stejné, což by znamenalo, že se jedná o izotropní kompozitní materiál. Mechanické vlastnosti zkušebních tělísek jsou měřeny pomocí tahové zkoušky.

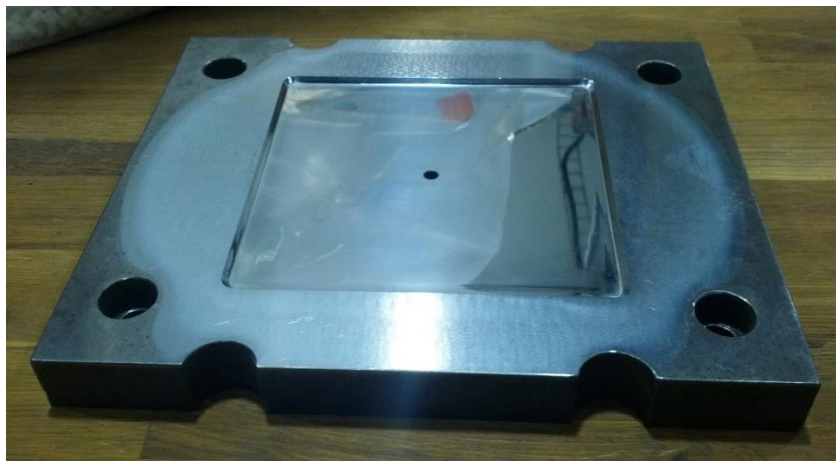
V případě této práce byly vstřikovány destičky o rozměrech 115 x 115 x 2 mm, ze kterých byla odebírána zkušební tělíska dvěma směry při zohlednění faktu, že vlákna se orientují směrem od vtoku k čelu taveniny (Obr 3.1). Orientace tělísek byla vybrána takovým způsobem, aby za první vlákna plněného plastu směřovala rovnoběžně s osou tělíska a za druhé aby vlákna měly směr kolmý vůči ose zkušebního tělíska. Představa o teoretickém směru vláken vstřikované destičky se středovým vtokem vycházela z teoretické části diplomové práce z kapitoly (2.2.1.2 Průvodní jevy technologie vstřikování). Tělíska nesměla být umístěna až do kraje destičky, protože vlivem zastavení toku taveniny a změnou tlaku a smykových sil se zde vlákna stáčí a orientují jiným směrem. Tyto dva směry byly zvoleny protože, jak je v teoretické části této diplomové práce uvedeno, rozdíl mechanických vlastností a tedy míra anizotropie v těchto dvou směrech je nejmarkantnější.



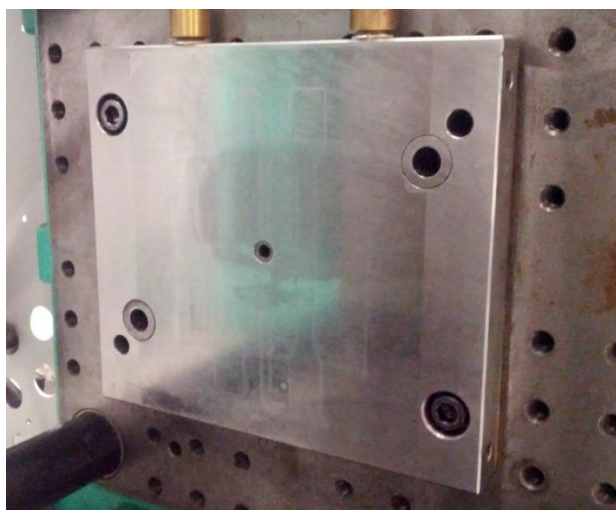
Obr. 3.1: Rozložení zkušebních tělísek na vstřikované destičce,
a) těleso má kolmo orientovanou osu vůči vláknům plniva,
b) těleso má rovnoběžně orientovanou osu vůči vláknům plniva,
(teoretická orientace vláken plniva je znázorněna červenými přerušovanými čarami)

3.1 FORMA

Konvenční a kompresní vstřikování všech polotovarů bylo provedeno do stejné jednonásobné formy. Forma byla vyrobena z ocele. Tvar dutiny formy měl rozměry 115 x 115 x 2 mm. Taveninu do středu dutiny formy přiváděl kuželový vtok. Jeho umístění bylo ve smyslu kolmém k dělicí rovině formy. Pro lepší představu vzhledu formy je přiložena fotografie pohyblivé části formy (Obr. 3.2) a fotografie statické části formy (Obr. 3.3). Odstranění výrobku z formy zajišťoval jednonásobný středový vyhazovač, umístěný proti kuželovému vtoku v pohyblivé části formy.



Obr. 3.2: Pohyblivá část vstříkovací formy pro výrobu polotovarů



Obr. 3.3: Statická část vstříkovací formy

3.2 Zkušební vzorky

Destičky byly vyrobeny v osmi sériích po desíti kusech. Pro výrobu byly použity dva druhy technologie, materiál se dvěma druhy plniv a dvěma rozdílnými koncentracemi vláken. Kombinace technologií, plniv a koncentrace je uvedena v tabulce (Tab. 3.1).

Tab. 3.1: Použité technologie a materiály při výrobě vzorků

technologie:	konvenční vstříkování				kompresní vstříkování			
matrice, plnivo:	PA, skleněné vlákno		PA, uhlíkové vlákno		PA, skleněné vlákno		PA, uhlíkové vlákno	
koncentrace plniva:	30%	40%	30%	40%	30%	40%	30%	40%

Z tabulky je patrné, že pro každou technologii byly vyrobeny čtyři typy vstřikovaných destiček v sérii po desíti. Dále se z každé destičky podle úvahy na obrázku (Obr. 3.1) odebrala dvě tělíška. Ve výsledku se celkový počet zkoušených vzorků vyšplhal na 160 kusů.

3.2.1 Materiál zkušebních tělísek

Materiál pro experimentální část této diplomové práce byl dodán firmou Magna Exteriors & Interiors (Bohemia) s.r.o. Jednalo se o čtyři typy termoplastického granulátu s dlouhými vlákny:

- OnForce LFT NN – 30LCF/002 Grey
(Polyamid 66 s 30% dlouhého uhlíkového vlákna - LCF)
- OnForce LFT NN – 40LCF/001 Grey
(Polyamid 66 s 40% dlouhého uhlíkového vlákna - LCF)
- OnForce LFT NN – 30LGF/000 HS UV Black
(Polyamid 66 s 30% dlouhého skelného vlákna - LGF)
- OnForce LFT NN – 40LGF/000 HS UV Black
(Polyamid 66 s 40% dlouhého skelného vlákna - LGF)

Jednalo se tedy o polyamid s LCF a LGF s délkou 10 – 12 mm. Vlastnosti uhlíkových a skleněných vláken jsou popsány v teoretické části v kapitolách 2.1.1.1 a 2.1.1.3. Vlastnosti dodaných polyamidů s dlouhými vlákny firmou Magna jsou vypsány v materiálových listech (Příloha 1, 2, 3, 4).

3.2.2 Výroba vstřikovaných destiček pro určení míry anizotropie

Výstřiky, u kterých je dále zkoumána anizotropie mechanických vlastností za pomoci odebraných testovaných zkušebních tělísek, byly vstřikované technologií popsanou v teoretické části v kapitole (2.2.1 Technologie výroby konvenčním vstřikováním) a (2.2.2 Technologie výroby kompresním vstřikováním). Z každé destičky o rozměrech 115 x 115 x 2 mm (Obr 3.4) se poté frézovala dvě zkušební tělíška v určitých směrech dle úvahy na obrázku (Obr. 3.1) pro zkoušku tahem, z jejichž výsledků se dále vyhodnocovala míra anizotropie všech kombinací vstřikovaných destiček dle tabulky (Tab. 3.1).



Obr. 3.4: Destičky pro určení míry anizotropie mech. vlastností porovnávaných technologií, vlevo vzorek s LGF vyroben konvenčním vstřikováním, vpravo vzorek s LCF vyroben kompresním vstřikováním

Vstřikování destiček, tedy výroba polotovaru pro určování mechanických vlastností a jejich míry anizotropie způsobenou výrobní technologií, bylo realizováno v laboratořích budovy L Katedry strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci. Vstřikování se uskutečnilo na stroji ARBURG ALLROUNDER 270 S 400-100 (Obr. 3.5).



Obr. 3.5: Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 270 S 400-100 [17]

Charakteristické parametry použitého vstřikovacího stroje jsou popsány v tabulce (Tab. 3.2). Vlastnosti stroje jsou zjistitelné v katalogových listech firmy Arburg.

Tab. 3.2: Charakteristické parametry vstřikovacího stroje ARBURG ALLROUNDER 270S 400-100

Vstřikovací jednotka

Průměr šneku	mm	20	25	30
Délka šneku	L/D	25	20	16,7
Zdvh dávkování	mm	100		
Otáčky šneku max.	m/min ⁻¹	28	35	42
Plastikační výkon měřeno pro PS podle norem	kg/hod	5,5	8	9,5
Vstřikované množství teoretické hodnoty	cm ³ .s ⁻¹	64	100	146
Max. objem zdvihu	cm ³	31	49	71
Max. hmotnost vylisku, vztaženo na PS (Euromap 19)	g	29	45	65
Specifický vstřikovací tlak	bar	2500	2000	1390
Zvýšený specifický vstřikovací tlak	bar			
Zdvih agregátu x přidržovací síla trysky	mm.kN	180 x 50		
Instalovaný příkon topení plastikačního válce	kW	4,9		
Počet topných pásů		4		

Uzavírací jednotka

Uzavírací síla	kN	400
Dráha otevření lisovacího nástroje	mm	350
Vestavěná výška formy min.	mm	200
Max. otevření upínacích desek	mm	500
Velikost upínacích desek horizontální x vertikální	Mm	380 x 380
Zvětšení upínací desky horizontální x vertikální	mm	380 x 380
Vzdálenost mezi sloupky horizontální x vertikální	mm	270 x 270
Šířka vypadávací šachty	mm	300
Zdvih vyhazovače x síla vyhazovače	mm.kN	100 x 20

Polyamid, jak je popsáno v teoretické části v kapitole (2.1.3.4 Polyamid), je velice navlhavý díky svým polárním vazbám, proto po dodání ve formě granulátu ho bylo potřeba před vlastním zpracováním vysušet. Vlhkost vázaná v polyamidové matici by negativně ovlivnila výrobní cyklus a tedy i výsledné vlastnosti vstřikovaných destiček. Dokonalého vysušení granulátu se docílilo po uplynutí doby cca 12 hodin v sušárně.

Vysušený granulát se nasypal do násypky vstřikovacího stroje. Vstřikovací stroj s formou byl před začátkem vstřikovacího cyklu potřeba přehřát na námi zvolenou pracovní teplotu. Dále bylo třeba, vyčisti plastikační jednotku od předešlého vstřikování tak, aby se dostal do formy pouze plněný polyamid. Čištění se provádělo takovým způsobem, že šnek plastikoval a vytlačoval zbývající materiál mimo formu do té doby, dokud se neobjevil čistý polyamid plněný dlouhými vlákny.

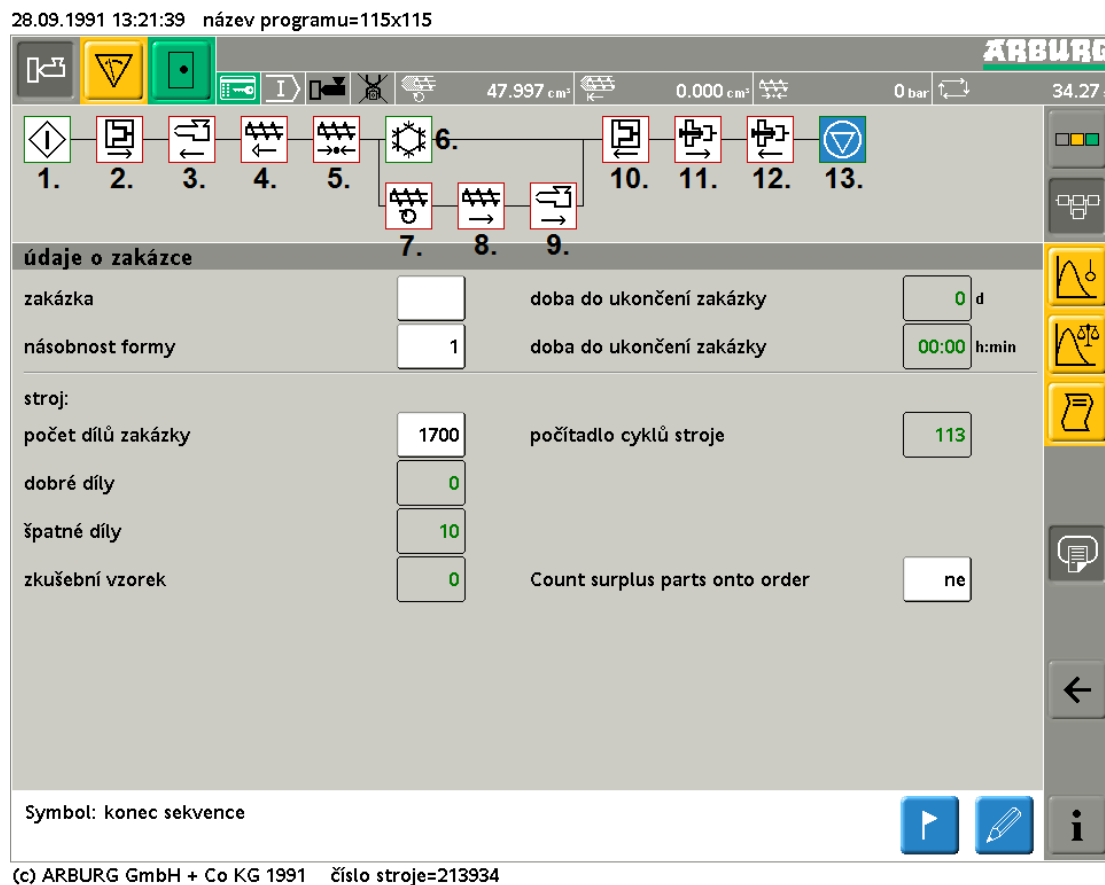
Po nasypání jednoho typu materiálu se realizovalo nejprve vstřikování konvenční a poté pro ten samý materiál byla aplikována technologie kompresního vstřikování. Tímto postupem jsme eliminovali ztrátu času z důvodu zdlouhavé výměny materiálů mezi každou sérii při stávající technologii. Nejprve byl vstřikován konvenčně polyamid s 30 % dlouhých skelných vláken, pro který byly zvoleny technologické parametry (Tab. 3.3). Tyto parametry byly zvoleny podle materiálových listů (Příloha 1, 2, 3, 4) a experimentální metodou, tak abychom dostali kompletní výstřik bez vad. Správnému zvolení technologických parametrů předcházela výroba několika zmetkových kusů.

Tab. 3.3: Technologické parametry konvenčního vstřikování PA s 30% LGF

Polyamid – 30% LGF	konvenční vstřik
teploty vstřikovací jednotky:	275 – 300°C
velikost dotlaku:	500 bar
doba dotlaku:	8 s
zpětný tlak při dávkování:	20 bar
velikost dávky plastu:	43 cm ³
bod přepnutí na dotlak:	15 cm ³
doba chlazení:	20 s
rychlost vstřiku:	35 cm ³ .s ⁻¹
teplota formy:	80°C

Před samotným začátkem vstřikování se bylo potřeba seznámit se samotným čtením a základními znaky ovládacího software. Znaky charakterizující základní úkony vstřikovacího cyklu stroje jsou vyobrazeny na ovládacím rozhraní software na obrázku (Obr. 3.6). Znak **1.** znamená začátek vstřikovacího cyklu, **2.** znak reprezentuje uzavření formy, **3.** přísun vstřikovací jednotky k formě, znak **4.** zastupuje vstřik taveniny do formy, tedy naplnění dutiny plastem, dále **5.** znak zastupuje nastavení pro

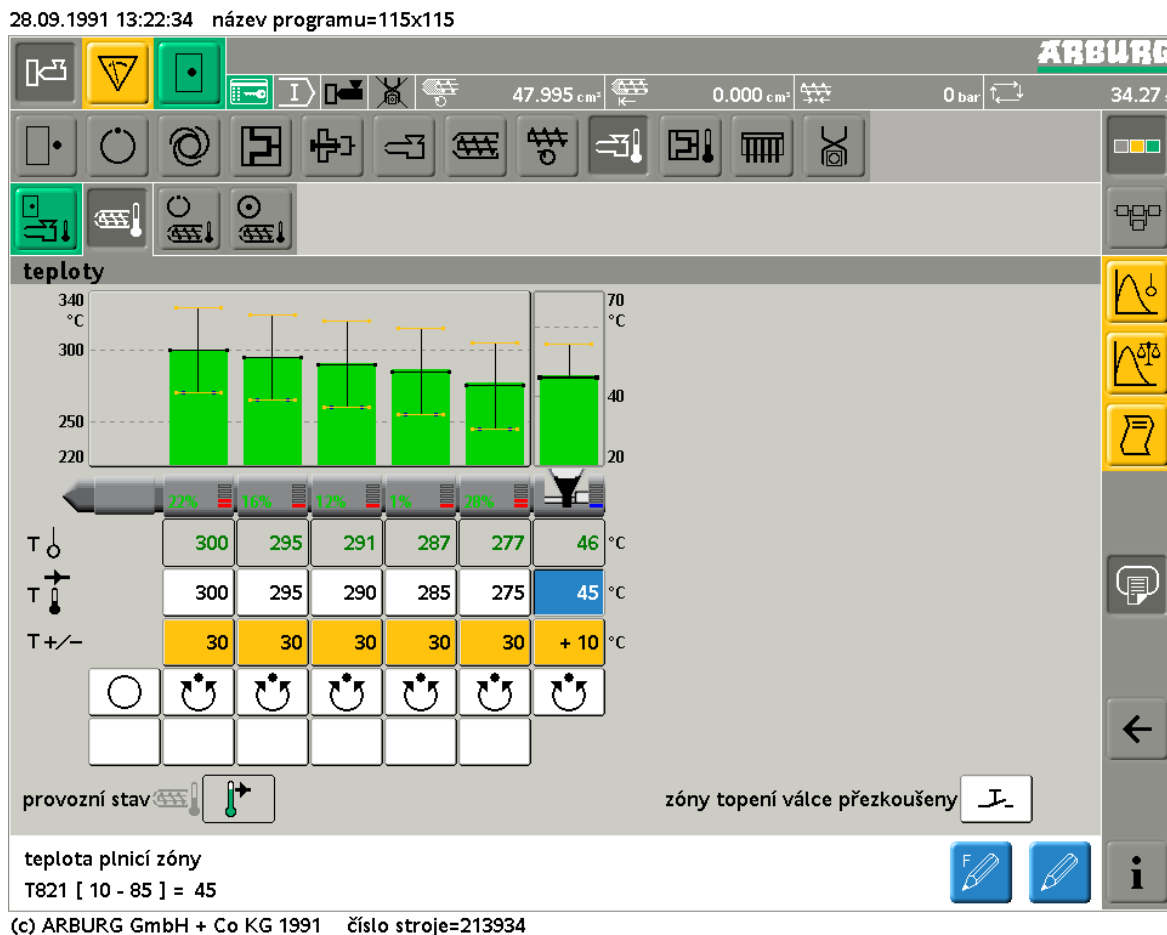
dotlak, další **6.** znak znázorňuje chlazení, nastavení jeho doby a podmínek. Paralelně s tímto znakem jsou uspořádány znaky **7, 8 a 9**, které paralelně s dobou chlazení zastupují děj přípravy další dávky taveniny, tedy reprezentují plastikaci, ústup šneku do polohy pro funkci pístu a ikona **9.** znázorňuje odsunutí vstřikovací jednotky od formy, **10.** znak za cyklem plastikace a chlazení znázorňuje otevření vstřikovací formy. Ikona **11.** a **12.** reprezentují vysunutí a zasunutí vyhazovačů, tedy nastavení vyhazovací síly atd. Konec cyklu potom znázorňuje ikona **13.**



Obr. 3.6: Přehled vstřikovací sekvence stroje

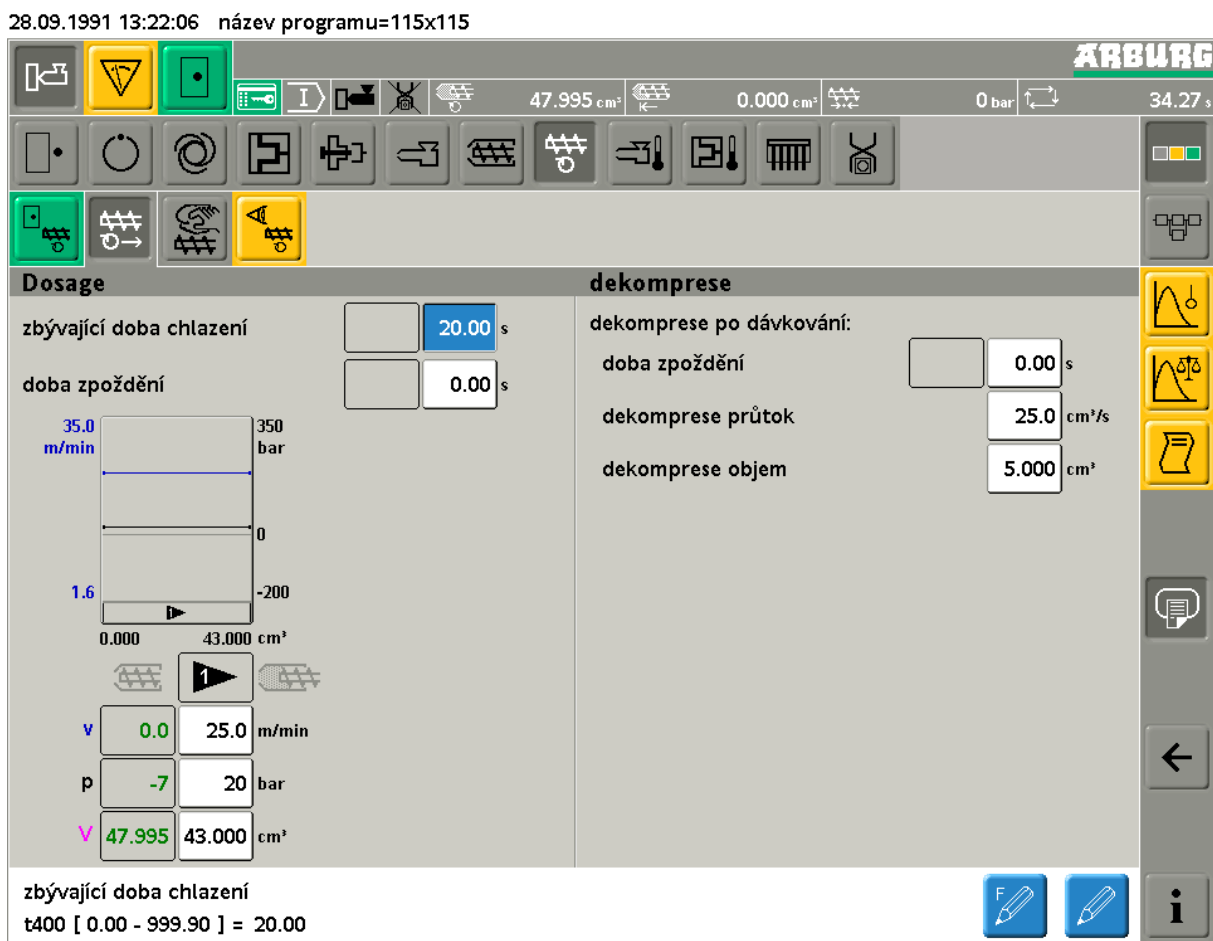
Samotné vstřikování začalo zadáním technologických parametrů do řídicího rozhraní stroje. Nejprve bylo potřeba nastavit správné teploty formy a vstřikovací jednotky pro daný materiál vyčtené z materiálových listů (Příloha 1,2,3,4). Po zadání hodnot do ovládacího software stroje se čekalo cca 30 minut, než se vstřikovací jednotka předeřádala na provozní teploty. Provozní teploty vstřikovací jednotky u všech čtyřech typů materiálů se lišily +/- 10°C, proto po první časové prodlevě z důvodů ohřátí vstřikovací jednotky, už nebylo nutno čekat tak dlouho na změnu teploty pro jiný materiál.

Na (Obr. 3.7) je vyobrazeno rozhraní pro volbu teplot vstřikovací jednotky, zde je vidět že vstřikovací jednotka umožňuje volbu rozdílných teplot v šesti částech komory od vstupu k výstupu. Teplotu na výstupu vstřikovací jednotky, tedy na trysce, která se přisouvá k formě, bylo potřeba volit nejvyšší v porovnání s ostatními teplotami. Důvodem je nízká teplota formy odpovídající 80°C pro polyamid. Chladící účinek formy při dotyku odebrává teplo trysky a hrozí zatuhnutí taveniny na jejím výstupu. Teplota na výstupu trysky byla nastavena na 300°C (Obr. 3.7), což lze považovat za teplotu vstřikované taveniny. Teplota od výstupní části směrem ke vstupu se musí snižovat, protože v těchto místech při plastikaci taveniny dochází vlivem tření při mletí k dalšímu vývinu tepla a mohlo by dojít k degradaci taveniny, neboli rozpadu makromolekul a snížení výsledných mechanických vlastností výstřiku. Vstupní část pro granulát musí mít oproti ostatním teplotám vstřikovací jednotky o poznání nižší teplotu. Není vyhřívána ale chlazena. Teplota zde byla nastavena na 45°C (Obr. 3.7) z toho důvodu, že je třeba zaručit trvalý přístup granulátu pro plastikaci. Kdyby zde nebyl vstup chlazen, mohlo by dojít k natavení granulátu a ucpání dna násypky.



Obr. 3.7: Obrazovka volby teplot vstřikovací jednotky

Dále bylo potřeba zvolit správný objem dávky pro jeden výstřik. Na obrázku (Obr. 3.8) je vyobrazeno ovládací rozhraní vstřikovacího stroje s nastavením doby chlazení, objemu dávky pro jeden výstřik a zpětný tlak při dávkování. Optimální objem celkové dávky taveniny pro jeden pracovní cyklus byl stanoven na 43 cm³ plastu. Optimální doba chlazení byla charakterizována dobou 20 sekund a zpětný tlak při plastikaci 20 barů.



(c) ARBURG GmbH + Co KG 1991 číslo stroje=213934

Obr. 3.8: Obrazovka nastavení objemu dávky a doby chlazení pro jeden cyklus

Dále bylo potřeba v ovládacím rozhraní vstřikovacího stroje (Obr. 3.9) nastavit fázi vstřiku. Zde se nastavoval bod přepnutí na dotlak, který byl charakterizován zbývajícím objemem taveniny ve vstřikovací jednotce. Přepnutí na dotlak bylo realizováno při zbývajícím objemu 15 cm³ taveniny před čelem šneku. Pro naplnění dutiny formy se vtoky je třeba cca 28 cm³ taveniny. Dále se zde dalo manipulovat s parametry jako množství toku taveniny v čase a hodnotami vstřikovacího tlaku.

28.09.1991 13:21:54 název programu=115x115

The screenshot displays the ARBURG software interface for injection molding. At the top, the status bar shows a volume of 47.995 cm³, a remaining volume of 0.000 cm³, a pressure of 0 bar, and a time of 34.27 s. The main control area includes several icons for different functions. The 'Injection' section is active, showing a dosage volume of 43.000 cm³ and a delay time of 0.00 s. A graph on the right plots flow rate (cm³/s) against volume (cm³), showing a peak flow rate of 97.3 cm³/s. Below the graph, a table lists injection parameters:

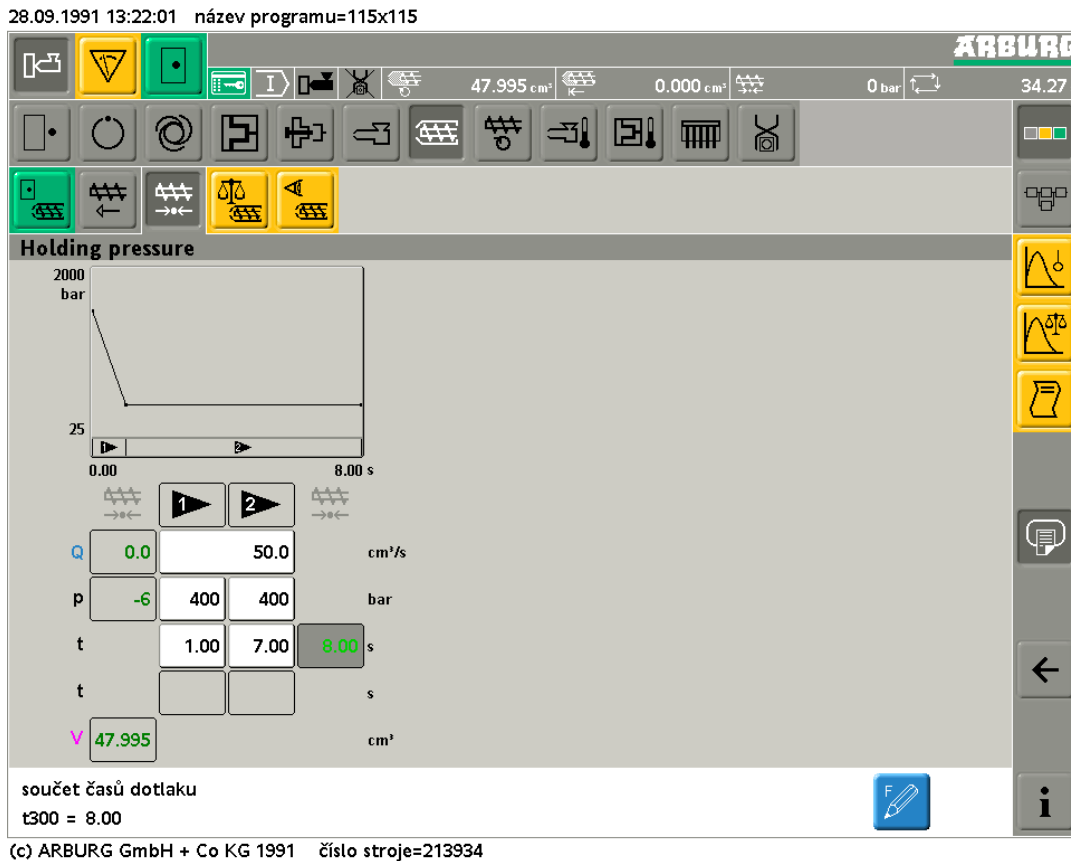
objem dávky	43.000	cm³	doba zpoždění	0.00	s
konec vstřikování:					
tlak při přepnutí	0	bar			
objem při přepnutí	0.000	15.000	cm³		
čas přepnutí	0.98		s		

Additional parameters shown include flow rate (Q) of 0.0 cm³/s, pressure (p) of -6 bar, and volume (V) of 47.995 cm³. A note at the bottom indicates the switching point volume: bod přepnutí, objem V305 [0.000 - 49.089] = 15.000.

(c) ARBURG GmbH + Co KG 1991 číslo stroje=213934

Obr. 3.9: Obrazovka ovládacího software pro nastavení fáze vstřiku

Dalším důležitým a posledním nastavením parametru konvenčního vstřikování se zabývá obrazovka na obrázku (Obr. 3.10), tato část ovládacího rozhraní se zabývá nastavením dotlaku, jeho průběhem a intenzitou. Ovládací software dovoluje nastavit proměnný průběh dotlaku. V našem případě stačil průběh konstantní. Z obrázku je patrné, že dotlak byl nastaven na 400 barů po dobu 8 sekund.



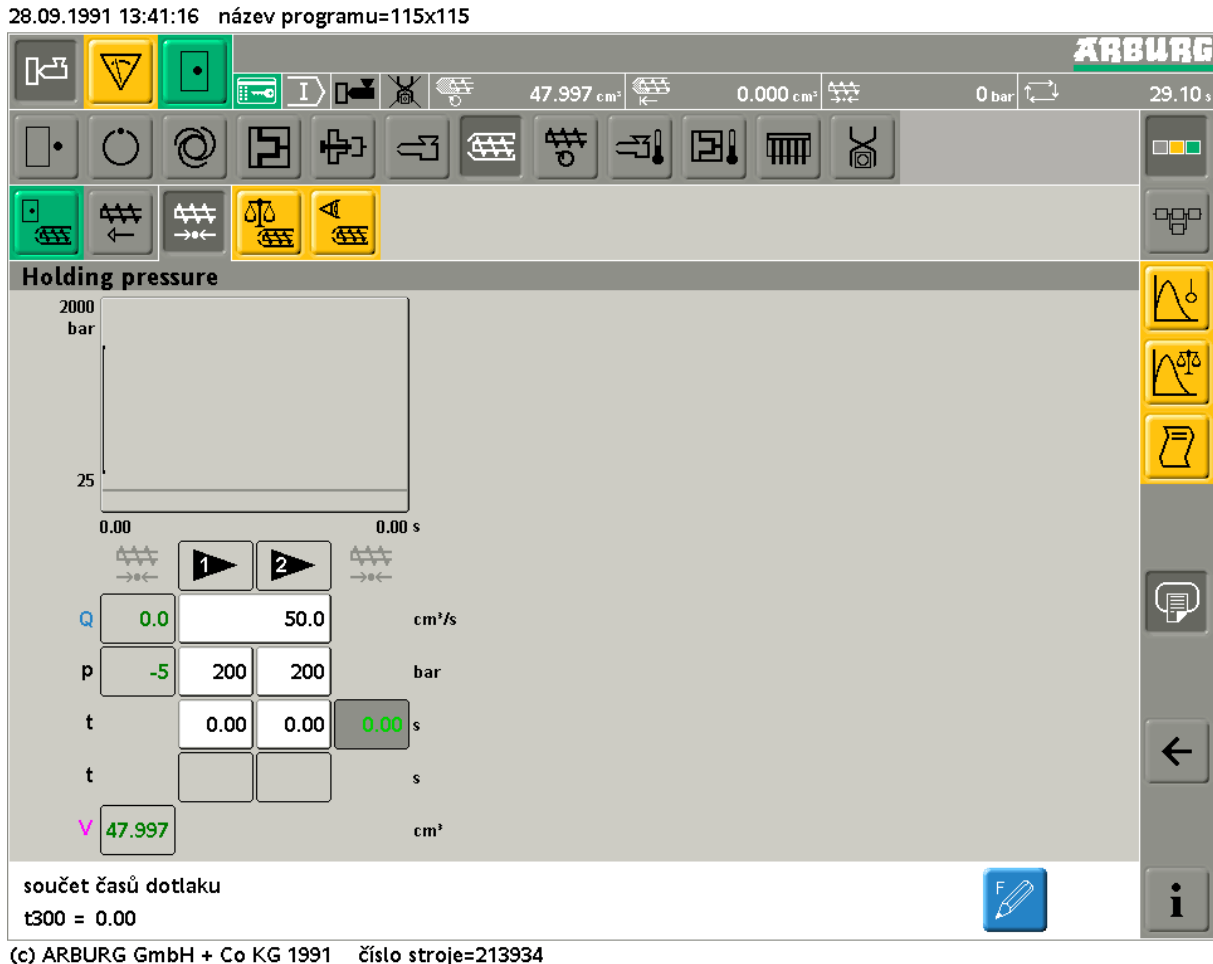
Obr. 3.10: Obrazovka pro nastavení dotlaku vstřikovací jednotkou

Po vstřikování jedné série o deseti výstřicích polyamidu s 30 % dlouhých skelných vláken byl stroj přenastaven pro technologii kompresní vstřikování. Se změnou technologie bylo potřeba přenastavit procesní parametry vstřikovacího stroje, které jsou vyobrazeny v (Tab. 3.4)

Tab. 3.4: Technologické parametry kompresního vstřikování PA s 30% skelných vláken

Polyamid – 30% LGF	kompresní vstřik
teploty vstřikovací jednotky:	275 – 300°C
velikost dotlaku:	400 kN (dotlak je vyvozen pomocí uzavírací síly)
doba dotlaku:	0 s
zpětný tlak při dávkování:	20 bar
velikost dávky plastu:	43 cm ³
bod přepnutí na dotlak:	20 cm ³
doba chlazení:	20 s
rychlost vstřiku:	35 cm ³ .s ⁻¹
teplota formy:	80°C

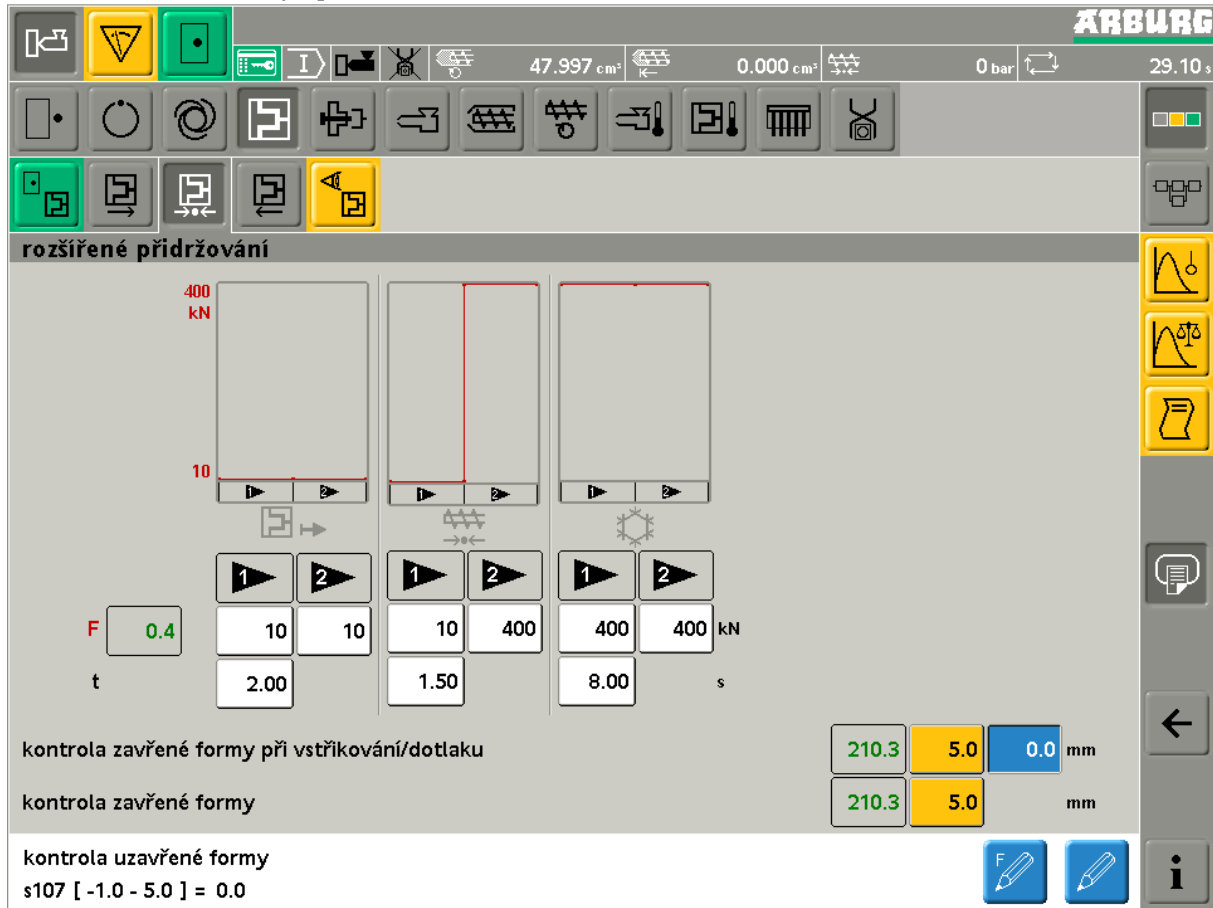
V první řadě bylo potřeba vypnout dotlak zprostředkovaný vstřikovací jednotkou. V ovládacím rozhraní vstřikovacího stroje v záložce pro dotlak (Obr. 3.11) byl nastaven čas dotlaku na nulovou hodnotu, což reprezentovalo jeho vypnutí.



Obr. 3.11: Obrázovka pro nastavení dotlaku

Po vypnutí dotlaku vyvozujícího vstřikovací jednotka bylo potřeba nastavit dotlak, který zprostředkuje uzavírací jednotka. Nastavení bylo provedeno v záložce ovládacího rozhraní pro uzavírací jednotku (Obr. 3.12). Z obrázku je patrné, že ovládání uzavírací síly lze rozdělit do dvou intervalů pro uzavírací, dotlakový a chladící cyklus. Nastavení dotlaku uzavírací jednotkou mělo takovýto charakter. Z počátku byla forma uzavřena silou 10 kN a po vstříknutí taveniny, která svým tlakem pootevřela formu, se síla navýšila na 400 kN, čímž se zaručilo dolisování.

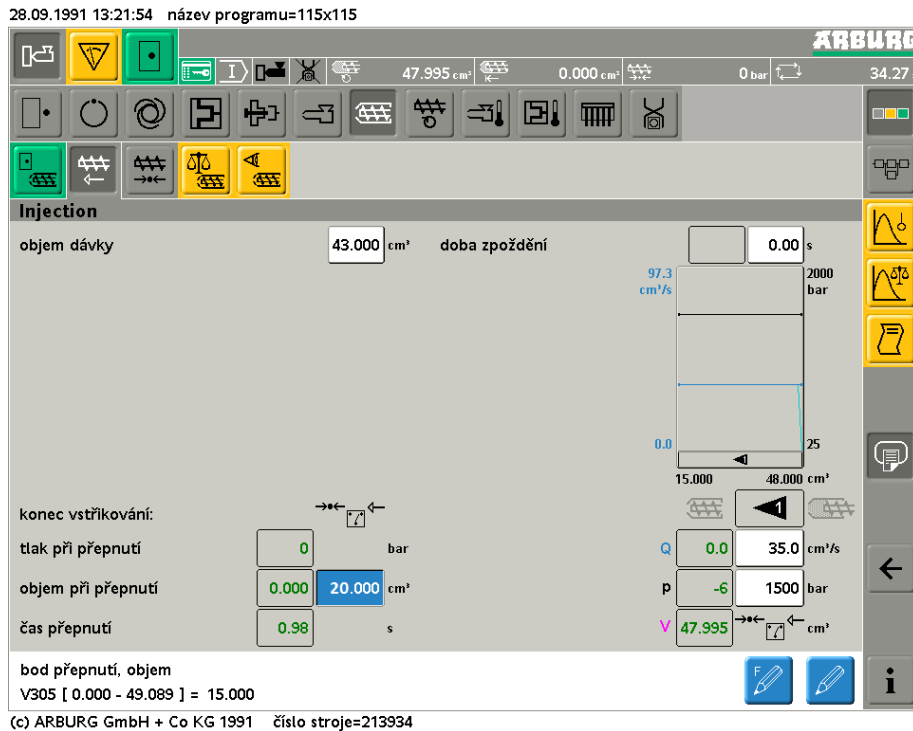
28.09.1991 13:41:42 název programu=115x115



(c) ARBURG GmbH + Co KG 1991 číslo stroje=213934

Obr. 3.12: Záložka ovládacího rozhraní pro nastavení uzavírací síly

V poslední fázi přenastavení vstřikovacího cyklu z technologie konvenčního vstřikování na vstřikování kompresní byl potřeba definovat bod přepnutí na dotlak uzavírací jednotkou. Bod přepnutí se nastavoval v záložce software pro nastavení vstřikovací fáze (Obr. 3.13). Dotlaková fáze byla zahájena při zbývajícím objemu 20 cm^3 před čelem šneku z celé vstřikované dávky 43 cm^3 .



Obr. 3.13: Nastavení bodu přepnutí na dotlakovou fázi kompresního vstříkování

Po nastavení všech procesních parametrů kompresního vstříkování bylo vyrobeno dalších deset polotovarů pro výrobu zkušebních tělísek. Těmito dvěma technologiemi se vyrobilo všech osm sérií destiček po desíti ze všech čtyřech polyamidů s různým druhem a koncentrací plniva.

Procesní parametry zbývajících šesti sérií vstříkovaných destiček jsou uvedeny v tabulkách (Tab. 3.5) až (Tab. 3.7).

Tab. 3.5: Technologické parametry konvenčního a kompresního vstříkování PA s 30% LCF

Polyamid – 30% LCF	konvenční vstřík	kompresní vstřík
teploty vstříkovací jednotky:	290 – 310°C	290 – 310°C
velikost dotlaku / uzavírací síly:	650 bar	400 kN
doba dotlaku:	8 s	0 s (vyvozen uzavírací silou)
zpětný tlak při dávkování:	20 bar	20 bar
velikost dávky plastu:	43 cm ³	43 cm ³
bod přepnutí na dotlak:	15 cm ³	20 cm ³
doba chlazení:	20 s	20 s
rychlost vstříku:	35 m ³ .s ⁻¹	35 m ³ .s ⁻¹
teplota formy:	80°C	80°C

Tab. 3.6: Technologické parametry konvenčního a kompresního vstřikování PA s 40% LCF

Polyamid – 40% LCF	konvenční vstřik	kompresní vstřik
teploty vstřikovací jednotky:	290 – 310°C	290 – 310°C
velikost dotlaku / uzavírací síly:	750 bar	400 kN
doba dotlaku:	8 s	0 s (vyvozen uzavírací silou)
zpětný tlak při dávkování:	20 bar	20 bar
velikost dávky plastu:	43 cm ³	43 cm ³
bod přepnutí na dotlak:	15 cm ³	20 cm ³
doba chlazení:	20 s	20 s
rychlost vstřiku:	35 m ³ .s ⁻¹	35 m ³ .s ⁻¹
teplota formy:	80°C	80°C

Tab. 3.7: Technologické parametry konvenčního a kompresního vstřikování PA s 40% LGF

Polyamid – 40% LGF	konvenční vstřik	kompresní vstřik
teploty vstřikovací jednotky:	290 – 310°C	290 – 310°C
velikost dotlaku / uzavírací síly:	750 bar	400 kN
doba dotlaku:	8 s	0 s (vyvozen uzavírací silou)
zpětný tlak při dávkování:	20 bar	20 bar
velikost dávky plastu:	43 cm ³	43 cm ³
bod přepnutí na dotlak:	15 cm ³	20 cm ³
doba chlazení:	20 s	20 s
rychlost vstřiku:	35 m ³ .s ⁻¹	35 m ³ .s ⁻¹
teplota formy:	80°C	80°C

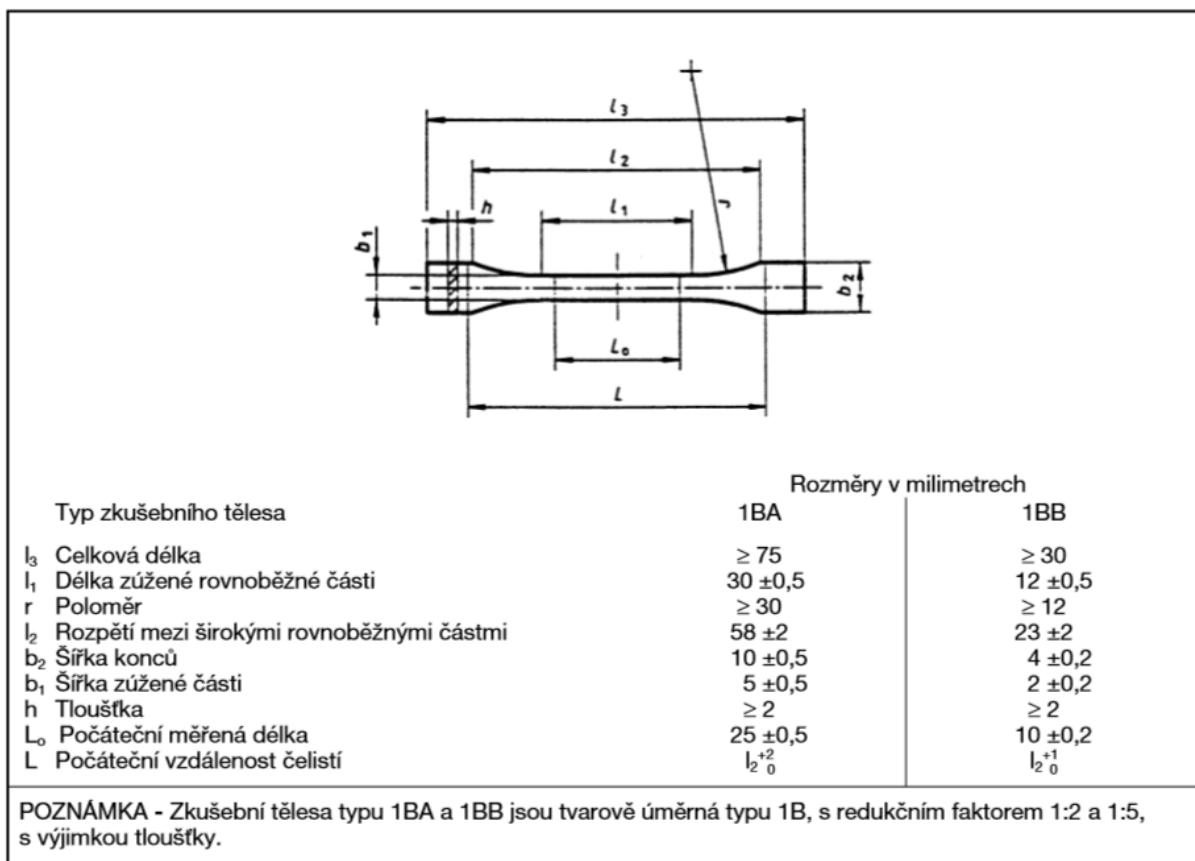
3.2.3 Výroba zkušebních tělísek ze vstřikovaného polotovaru

Zkušební tělíska se vyráběla frézováním ze vstřikovaného polotovaru ve dvou směrech podle obrázku (Obr. 3.1). Frézování bylo provedeno v laboratoři zkoušení plastů v budově E na číslicově řízené frézce ISEL ICP 4030 vyobrazené na (Obr. 3.14).



Obr. 3.14: frézka ISEL ICP 4030 [18]

Destičky se upínaly do sklíčidla, které bylo optimalizováno pro vstřikovaný polotovar. Tvar tělísek byl stanoven podle normy pro tahovou zkoušku ČSN EN ISO 527-2. Standartní rozměr zkušebních tělísek s označením 1A ani 1B se nevešel na vstřikovanou destičku s rozložením podle (Obr. 3.1). Proto bylo potřeba zvolit menší zkušební tělísko s označením 1BA. Rozměry zkušebního tělíska jsou vyobrazeny na (Obr. 3.15). Tělísko 1BA je menším rozměrovým ekvivalentem tělíska 1A a 1B.



Obr. 3.15: Rozměry zkušebních tělísek podle normy ČSN EN ISO 527-2 [19]

Po nastavení sklíčidel pro upnutí destiček byl zvolen příslušný řídicí program frézky pro tělísko 1BA. Z důvodu úspory času a kvůli rychlejšímu zakládání destiček do přípravku jsem nejprve frézoval všechny zkušební tělíska s osou kolmo orientovanou na teoreticky orientovaná vlákna, tedy rovnoběžně s hranou vstřikované destičky. Ve druhé fázi frézování bylo sklíčidlo (přípravek) přenastaven pro frézování zkušebních tělísek přes úhlopříčku vstřikované destičky. Poté jsem tímto způsobem za pomoci stejného programu frézky opět frézoval všechny destičky. Pro frézování byl zvolen program s otevřenou konturou. To znamená, že vzorky po frézování byly stále součástí destičky a tedy byly obrobena pouze tvarové strany vzorku. Pro lepší představu je přiložen obrázek destičky (Obr. 3.16) po procesu frézování.



Obr. 3.16: Ukázka frézované destičky s otevřenou konturou

Takto obrobené vzorky bylo dále potřeba oddělit od vstříkované destičky. Zkušební tělíska byla odříznuta pomocí pásové pily v budově L v laboratořích strojírenské technologie. Poslední úpravou před samotným zkoušením, bylo začištění hran vzorků smirkovým papírem a zbrúšení pozůstatků vtoku a vyhazovače na upínací části zkušebního tělíska s rovnoběžnou osou vůči směru orientace vláken. Pozůstatek vtoku a vyhazovače se při zkoušení nacházel v čelistech trhacího stroje, tedy nikterak neovlivnil mechanické vlastnosti vzorku. Broušení se provedlo též v budově L pomocí kotoučové brusky Ferm FSM-150 vyobrazené na (Obr. 3.17).



Obr. 3.17: Kotoučová bruska Ferm FSM-150

3.3 Měření mechanických vlastností pomocí tahové zkoušky

Po vytvoření zkušebních tělísek tvaru 1BA, bylo potřeba zjistit jejich mechanické vlastnosti, porovnat je a tím zjistit vliv technologie výroby na míru anizotropie mechanických vlastností vstřikovaného dílu. Mechanické vlastnosti byly zjišťovány tahovou zkouškou dle normy pro zkoušení polyamidu ČSN EN ISO 1874-2. Měření jsem provedl na trhacím stroji TIRAtest 2300 (Obr. 3.18).



Obr. 3.18: Trhací stroj TIRAtest 2300

K měření průtahu byl použit průtahoměr Epsilon Tech 3542 zobrazený na obrázku (Obr. 3.19). Průtahoměr byl konstruován k měření počátečních délek o rozměrech 10, 25 a 50 mm. Normovaná zkušební tělíška 1BA jsou 30 mm dlouhé v zúžené části (Obr. 3.15), proto byl zvolen jako optimální počáteční rozměr průtahoměru L_0 25 mm. K měření silových parametrů byla použita siloměrná hlava KAF s maximálním rozsahem 10 kN.

Protože byl zkoušen polyamid jakožto velmi navlhavý plast, bylo potřeba před samotným měřením materiál kondicionovat dle normy ČSN EN ISO 1874-2 pro navození stejného zkušebního prostředí pro všechny vzorky a dále pro navození takového prostředí, ve kterém by skutečný polyamidový výrobek sloužil při našich klimatických podmínkách.



Obr. 3.19: Průtahoměr Epsilon Tech 3542

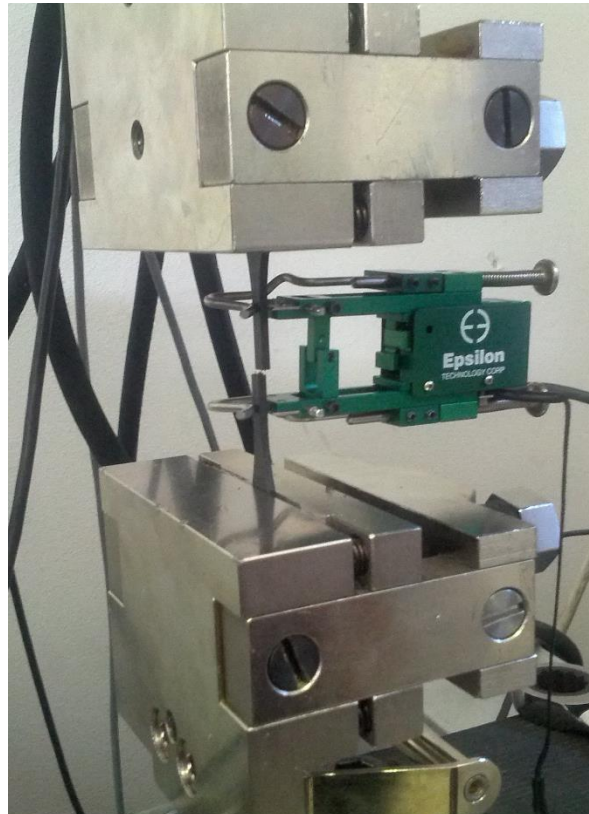
3.3.1 Průběh mechanické zkoušky prostým tahem

Mechanické vlastnosti zkušebních tělísek je v závěru diplomové práce potřeba porovnávat mezi sebou, proto bylo třeba provést tahovou zkoušky v jeden den z důvodu zachování stejných podmínek pro všechny zkušební tělíska. V první řadě před samotným zkoušením byl proměřen průřez všech vzorků, který se dále zadával do ovládacího software trhačického stroje. Před samotným zkoušením byl v ovládacím software vybrán profil pro získání modulu pružnosti v tahu, meze pevnosti tělísek, tažnosti a dalších informací z naměřených dat.

Z důvodu eliminace chyby náběhovým efektem tahové křivky byl výpočet modulu pružnosti softwarem prováděn z poměru rozdílu napětí σ_2 mínus σ_1 ku odpovídajícímu rozdílu poměrných prodloužení tělíska $\varepsilon_2 = 0,0025$ mínus $\varepsilon_1 = 0,0005$. Tedy výpočet nebyl realizován od počátečního bodu křivky, kde by se mohla vyskytovat náběhová část tahové křivky, ale od bodu odpovídajícímu 0,05 % poměrného prodloužení. Teoretická lineární část křivky pro výpočet modulu pružnosti byla získána mezi 0,05 až 0,25 % poměrného prodloužení ε . [20]

Zkušební profil vyžadoval zadání počátečních rozměrů tloušťky h a zúžené šířky tělíska b_1 dle normy ČSN EN 527-2 na (Obr. 3.15) a dále rychlost zatěžování, kterou jsem zvolil též dle normy 5 mm za minutu. Po té jsem upnul tělísko do upínacích čelistí trhačického stroje a zmačkl tlačítko pro spuštění zkoušky. Profil tahové zkoušky v první fázi vytvořil předzatížení vzorku 10 N, kvůli eliminaci možné tlakové síly působící na zkušební tělísko, která mohla vzniknout například vlivem utahování čelistí. Tlaková síla

by mohla vést ke zkreslení skutečného naměřeného prodloužení. Po vytvoření předzatížení tělíska byl připnut průtahoměr Epsilon Tech 3542 a zadán povel pro pokračování zatěžování vzorku. Polyamidová zkušební tělíska vyztužená vlákny vykazovala vysokou tuhost. Proto zatěžování netrvalo dlouho, tělíska bez projevu meze kluzu a vytvoření krčku rychle praskala. Přetržené tělísko s průtahoměrem Epsilon Tech 3542 upnuté v čelistech je vyobrazeno na (Obr. 3.20).



Obr. 3.20: Přetržené zkušební tělísko vyztuženého PA s průtahoměrem Epsilon Tech 3542

Po přetržení zkušebního tělíska byl nejdříve sejmout průtahoměr. Dále byly povoleny čelisti pro vyjmutí obou částí přetrženého vzorku a v poslední fázi byl potvrzen povel pro navrácení čelistí do původní polohy začátku trhacího cyklu. Po přetržení se celý měřicí cyklus opakoval, dokud nebylo přetrženo všech 80 vzorků s normálovou zatěžující tahovou silou vůči orientaci vláken a všech 80 vzorků s rovnoběžnou zatěžující tahovou silou vůči směru vláken.

Po dokončení měření jsem si exportoval naměřená data z řídicího software trhacího stroje do programu MS Excel, kde byla připravena k dalšímu zpracování a následnému vyhodnocení.

3.4 Zpracování naměřených dat

Naměřené hodnoty tahové zkoušky byly vyexportovány z ovládacího software trhacího stroje TIRAtest 2300 do formátu MS Excel, kde došlo k jejich zpracování a zhodnocení výsledků.

Program ovládacího rozhraní trhacího stroje vypočítal spousty výsledných hodnot reprezentujících mechanické vlastnosti zkušebních tělísek z plněného polyamidu LCF a LGF. Z těchto naměřených veličin jsem si vybral výsledné hodnoty modulu pružnosti, meze pevnosti a hodnoty tažnosti. Tyto výsledné hodnoty byly zjištěny jak pro zkušební tělíska zatěžovaná normálovou silou vůči teoretickému směru vláken, tak i pro zkušební tělíska zatěžována tahovou silou orientovanou podélně s teoretickým směrem vláken plniva.

3.4.1 Zpracování naměřených dat mechanických vlastností

Z hodnot modulu pružnosti, meze pevnosti a tažnosti byly vypočteny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky. Pro porovnání byly zaznamenány do tabulek (Tab. 3.8) až (Tab. 3.10).

Tab. 3.8: Zpracované výsledné hodnoty modulu pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu [MPa]								
technologie:	Konvenční vstřík		Kompresní vstřík (CIM)		Konvenční vstřík		Kompresní vstřík (CIM)	
	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥
materiál:	PA 30 % LCF				PA 30 % LGF			
průměr:	15210	14571	14383	13053	6303	5530	7092	6985
směrodatná odchylka:	1496,7	592,3	877,2	1189,9	260,2	452,5	343,4	545,8
materiál:	PA 40 % LCF				PA 40 % LGF			
průměr:	18893	18261	16689	16233	8706	8490	8564	8563
směrodatná odchylka:	1105,0	1280,9	771,2	1921,9	672,7	674,1	563,1	1037,7

Tab. 3.9: Zpracované výsledné hodnoty meze pevnosti v tahu

Mez pevnosti v tahu [MPa]								
technologie:	Konvenční vstřik		Kompresní vstřik (CIM)		Konvenční vstřik		Kompresní vstřik (CIM)	
orientace:	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥
materiál:	PA 30 % LCF				PA 30 % LGF			
průměr:	170,0	179,6	178,7	162,5	108,6	100,2	123,1	106,8
směrodatná odchylka:	48,02	10,19	22,75	9,21	6,51	3,71	6,84	4,14
materiál:	PA 40 % LCF				PA 40 % LGF			
průměr:	186,0	193,3	180,5	163,9	114,8	110,5	139,4	119,4
směrodatná odchylka:	12,77	6,29	9,48	8,19	18,75	11,14	7,64	6,49

Tab. 3.10: Zpracované výsledné hodnoty tažnosti zkušebních tělísek

Tažnost [%]								
technologie:	Konvenční vstřik		Kompresní vstřik (CIM)		Konvenční vstřik		Kompresní vstřik (CIM)	
orientace:	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥
materiál:	PA 30 % LCF				PA 30 % LGF			
průměr:	1,44	1,99	1,60	1,87	2,70	3,22	2,48	2,23
směrodatná odchylka:	0,40	0,29	0,23	0,18	0,12	0,15	0,20	0,29
materiál:	PA 40 % LCF				PA 40 % LGF			
průměr:	1,32	1,66	1,44	1,49	1,75	1,91	2,45	2,17
směrodatná odchylka:	0,17	0,15	0,11	0,24	0,32	0,26	0,11	0,16

3.4.2 Zpracování hodnot anizotropie z naměřených mechanických vlastností

Z těchto vybraných hodnot byla dále vypočítána anizotropie mechanických vlastností výstřiku. Naměřené hodnoty bylo potřeba porovnat mezi vzorky s rozdílnou orientací vláken plniva, ale totožnou technologií výroby, typem vlákna a koncentrací. Porovnání proběhlo poměrem vybrané naměřené veličiny reprezentující anizotropii mechanických vlastností zkušebního tělíska s normálovou orientací síly ke směru vláken ku té samé veličině pro tělíska s podélným směrem zatěžující síly ke směru vláken. Vyšel-li poměr modulů pružnosti jedna, pak výsledná hodnota znamenala, že se jedná o tělíska s izotropní vlastností z hlediska porovnávané veličiny. Čím byl výsledek rozdílnější od jedné, tím vyšší míra anizotropie z hlediska porovnávané hodnoty byla. Výsledný poměr pak dále značil, zda hodnota porovnávané veličiny byla větší pro normálově orientované plnivo vůči zatěžující tahové síle v případě výsledné hodnoty větší než jedna nebo zda, porovnávaná veličina byla větší v podélném směru vláken k zatěžující tahové síle v případě hodnoty menší než jedna. Výsledné hodnoty všech porovnávaných vzorků jednoho materiálu byly zprůměrovány pro získání výsledné průměrné hodnoty anizotropie porovnávané veličiny. Anizotropie mechanických vlastností zkušebních tělísek byla porovnáвана z hlediska modulu pružnosti, meze pevnosti a tažnosti. Z výsledné hodnoty pak dále byla vypočtena směrodatná odchylka a absolutní hodnota anizotropie z hlediska porovnávané veličiny. Vypočtené průměrné hodnoty anizotropie mechanických vlastností a jejich směrodatných odchylek jsou znázorněny v tabulce (Tab. 3.11). V poslední fázi zpracování naměřených hodnot byly vypočteny procentuální rozdíly anizotropie mechanických vlastností mezi použitými technologiemi vstřikování (Tab. 3.11).

Tab. 3.11: Vypočtené hodnoty izotropie mechanických vlastností zkušebních tělísek

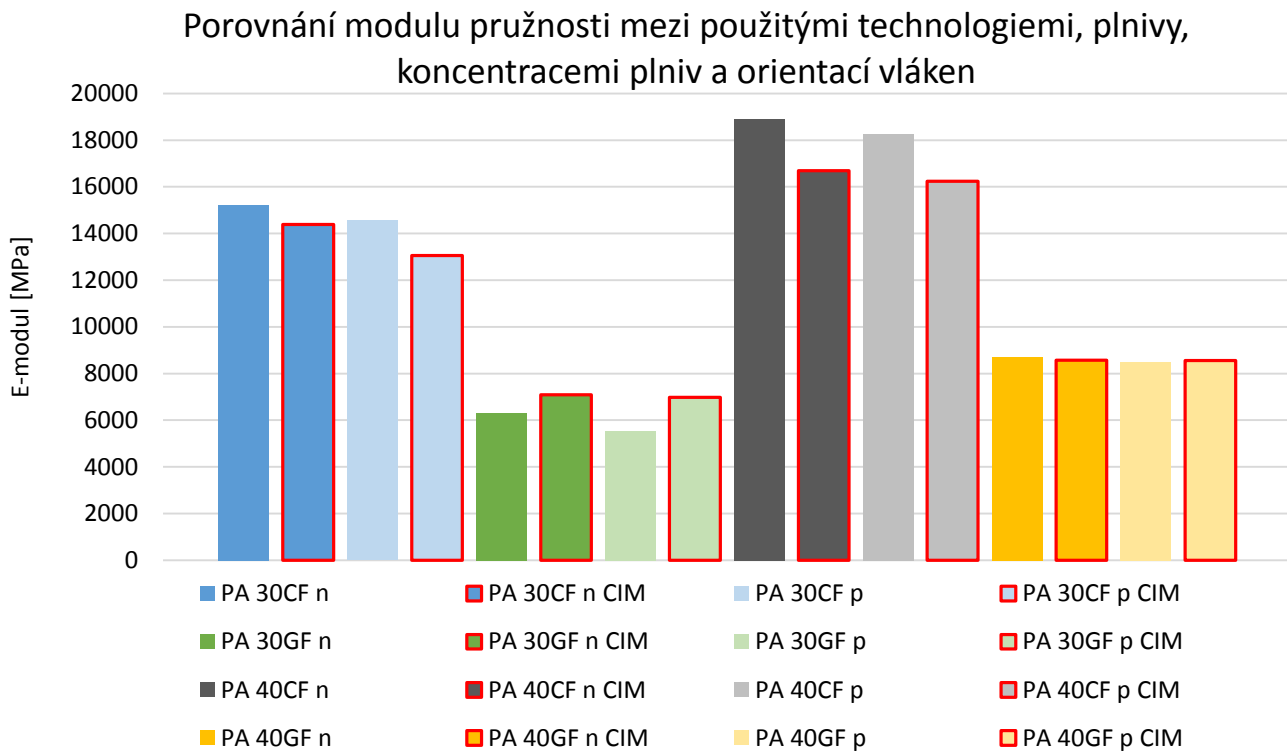
technologie:	konvenční vstřikování			kompresní vstřikování (CIM)		
anizotropie z hlediska:	Modulu pružnosti	Meze pevnosti	Tažnosti	Modulu pružnosti	Meze pevnosti	Tažnosti
materiál:	PA 30 % LCF					
průměrná hodnota anizotropie:	1,047	0,954	0,748	1,107	1,104	0,866
směrodatná odchylka:	0,116	0,285	0,259	0,085	0,157	0,163
absolutní hodnota míry anizotropie	0,047	0,046	0,252	0,107	0,104	0,134
procentuální rozdíl anizotropie technologií:	5,99 %	5,75 %	11,75 %			
materiál:	PA 30 % LGF					
průměrná hodnota anizotropie:	1,147	1,086	0,837	1,021	1,155	1,126
směrodatná odchylka:	0,113	0,089	0,050	0,092	0,085	0,165
absolutní hodnota míry anizotropie	0,147	0,086	0,163	0,021	0,155	0,126
procentuální rozdíl anizotropie technologií:	12,67 %	6,86 %	3,62 %			
materiál:	PA 40 % LCF					
průměrná hodnota anizotropie:	1,039	0,965	0,803	1,043	1,104	0,992
směrodatná odchylka:	0,088	0,087	0,135	0,151	0,080	0,214
absolutní hodnota míry anizotropie	0,039	0,035	0,197	0,043	0,104	0,008
procentuální rozdíl anizotropie technologií:	0,44 %	6,83 %	18,91 %			
materiál:	PA 40 % LGF					
průměrná hodnota anizotropie:	1,032	1,044	0,924	1,015	1,171	1,135
směrodatná odchylka:	0,116	0,190	0,158	0,151	0,103	0,093
absolutní hodnota míry anizotropie	0,032	0,044	0,076	0,015	0,171	0,135
procentuální rozdíl anizotropie technologií:	1,66 %	12,70 %	5,98 %			

4. Vyhodnocení výsledných hodnot

V kapitole vyhodnocení výsledných hodnot jsou zpracovaná data v programu MS Excel analyzována, vyhodnocena a dále jsou vyvozeny konečné závěry. Diplomová práce měla za úkol zjistit vliv použité výrobní technologie vstřikování na mechanické vlastnosti a jejich anizotropii vyráběného dílu. Jednalo se o porovnání vlivu technologie konvenčního a kompresního vstřikování polyamidu s 30 a 40 % plniva typu LCF a LGF (dlouhé uhlíkové vlákno a dlouhé skelné vlákno). Z mechanických vlastností výrobku byly zjišťovány tyto zástupci: modul pružnosti, mez pevnosti a tažnost. Pomocí těchto veličin byla dále zjišťována anizotropie mechanických vlastností.

4.1 Vyhodnocení výsledných hodnot mechanických vlastností

V grafu na obrázku (Obr. 4.1) je vyobrazen průměrný modul pružnosti všech sérií vzorků. Modrou barvou jsou vyobrazeny hodnoty materiálu PA s 30 % LCF, dále pak zelenou barvou hodnoty materiálu PA s 30 % LGF, šedivá reprezentuje modul pružnosti materiálu PA s 40 % LCF a žlutá PA s 40 % LGF. Odstíny barev odlišují hodnoty podle směru zatěžování vůči orientaci vláknitého plniva. Světlý odstín barvy reprezentuje podélný směr zatěžování zkušební tělíska vůči směru vláken (značeno p) a tmavý odstín znázorňuje hodnoty zatěžovaného tělíska kolmo ke směru orientace vláken (značeno n). Sloupce hodnot jsou dále rozlišeny obrysovou červenou čarou, která odlišuje technologii výroby vzorku, ze kterého byla zkušební tělíska odebrána. Červený obrys znázorňuje pevnostní hodnoty tělísek, které byly odebrány z destičky vyrobené kompresním vstřikem. Sloupce bez obrysu značí technologii konvenčního vstřik. Pro lepší přehled ještě zmiňuji, že první polovina sloupců zleva znázorňuje hodnoty měřené na tělískách s koncentrací plniva 30 % a druhých osm sloupců znázorňuje hodnoty tělísek se 40 % vláken. Stejná barevná legenda a uspořádání platí dále pro grafy (Obr. 4.2) a (Obr. 4.3).

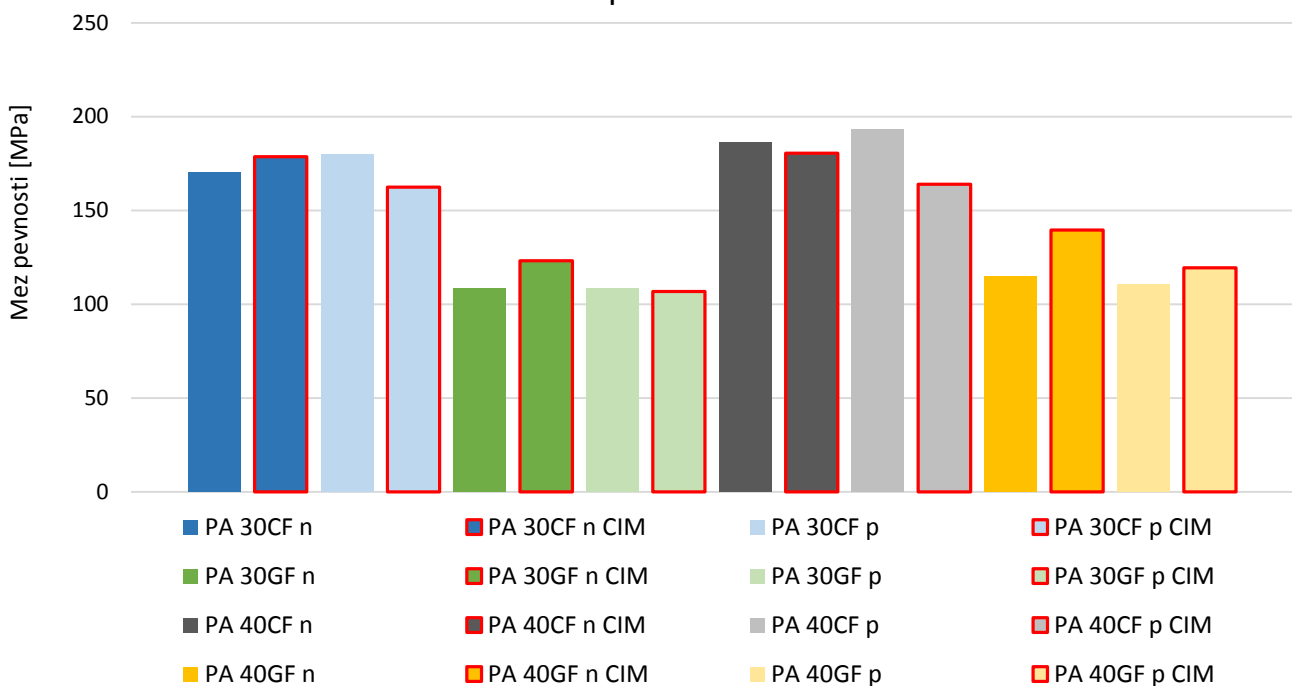


Obr. 4.1: Průměrné hodnoty modulů pružnosti testovaných tělísek,
n – tělíska zatěžovaná kolmo ke směru orientace vláken,
p – podélný směr zatěžování tělísek ve směru orientace vláken

Na první pohled je z grafu (Obr. 4.1) patrný téměř dvojnásobný modul pružnosti PA s uhlíkovým vláknem v porovnání s PA s vláknem skelným, což je zapříčiněno rozdílem mechanických vlastností vláken, popsáno v kapitole (2.1.2 Porovnání vyztužujících vláken) a horší soudržností PA s LGF v porovnání s PA s LCF. Z grafu lze dále vyčíst, že navýšením koncentrace vláken dojde k navýšení modulu pružnosti v tahu. S vyšší koncentrací se v našem případě zvýšil vyztužující efekt. Při porovnání hodnot z hlediska technologií je též patrný rozdíl modulu pružnosti, který v případě uhlíkových vláken klesne při použití technologie CIM a v případě výroby dílu z PA se skelným vláknem technologií CIM nepatrně stoupne s výjimkou PA 40 % LGF s normálním směrem vláken k ose zkušebního tělíska. Z tohoto zjištění lze vyvodit fakt, že vyztužující vlákna LCF při působení všestranného tlaku způsobeného dotlakem CIM se orientují jinak nežli vlákna LGF. Negativním zjištěním jsou nižší naměřené hodnoty modulu pružnosti tělísek s podélně orientovanými vlákny k zatěžující síle v porovnání s moduly pružnosti tělísek s vlákny normálově orientovanými k zatěžující tahové síle. Tento efekt s nejvyšší pravděpodobností zapříčinila skutečnost, že vlákna zkušebního tělíska s normálovou orientací k jejich

ose nejsou skutečně naorientovány kolmo, ale že jsou rozmístěny chaotičtěji, nebo aspoň natočeny pod určitým úhlem. Určitou roli v odlišnosti reality od předpokladu v této problematice mohl hrát středový vtok. Natočení vláken nebo jejich chaotičtější uspořádání mohlo být také způsobeno polohou zkušebního tělíska umístěného příliš u kraje destičky při frézování, kde docházelo vlivem změn toku taveniny při kontaktu se stěnou formy ke změně orientace plniva. Dalším pravděpodobným vysvětlením by mohla být příliš malá tloušťka výstřiku, která zapříčinila vyšší pokles tlaku se zvyšující se vzdáleností čela taveniny od vtoku vlivem rychlého chlazení formou. Tento efekt by měl za následek díky nízkému tlaku neovlivněnou orientaci vláken u kraje destičky, kde se nacházel vzorek s normálovou orientací plniva k ose.

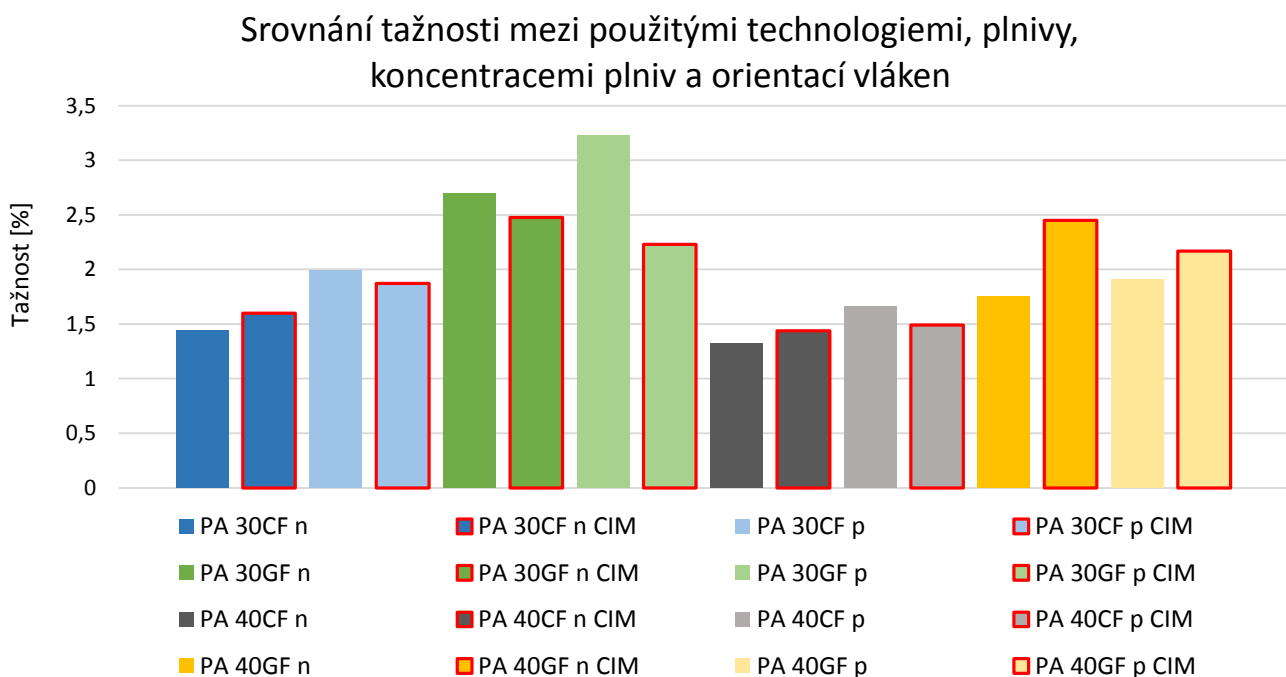
Srovnání meze pevnosti mezi použitými technologiemi, plniv, koncentracemi plniv a orientací vláken



Obr. 4.2: Průměrné hodnoty mezí pevnosti testovaných tělísek,
n – tělíska zatěžovaná kolmo ke směru orientace vláken,
p – podélný směr zatěžování tělísek ve směru orientace vláken

Graf na obrázku (Obr. 4.2) znázorňuje hodnoty průměrných mezí pevnosti jednotlivých materiálů vyrobených dvěma technologiemi vstřikováním. Zaznamenány jsou meze pevnosti příčného a podélného směru vláken plniva vůči zatěžující síle. Z grafu je patrné, že zvýšení koncentrace vláken plniva nemá velký vliv na výslednou hodnotu meze pevnosti. Z porovnání meze pevnosti z hlediska použitého typu plniva

vyplývá, že při použití LCF v matrici PA vzroste mez pevnosti téměř o třetinu v porovnání s PA plněného LGF. Z grafu je dále patrné, že výsledné hodnoty meze pevnosti tělísek reprezentující vždy jeden materiál vycházejí téměř stejně pro podélný a příčný směr vláken plniva, s výjimkou PA s 40 % LGF, kde je odchylka znatelnější. Z hlediska porovnání technologií vycházejí odlišnější meze pevnosti v závislosti na orientaci vláken vždy jednoho materiálu pro technologii CIM. Toto zjištění opět vychází opačně, nežli předpovídá teorie. Tento fakt opět přisuzuji nevhodnosti konstrukce vstřikovací formy a navrhuji, aby podobné téma bylo zpracováno s jinou větší vstřikovací formou.



Obr. 4.3: Průměrné hodnoty tažnosti testovaných tělísek, n – tělíska zatěžovaná kolmo ke směru orientace vláken, p – podélný směr zatěžování tělísek ve směru orientace vláken

Graf na obrázku (Obr. 4.3) znázorňuje hodnoty průměrných tažností jednotlivých materiálů vyrobených dvěma technologiemi vstřikování. Zaznamenány jsou tažnosti příčného a podélného směru vláken plniva vůči zatěžující síle. Z grafu je patrné, že zvýšením koncentrace vláken plniva dojde ke snížení tažnosti vzorků. Dále je z grafu patrné, že PA s LGF vykazuje větší tažnost v porovnání s PA s LCF. Z grafu je dále porovnatelná tažnost vzorků vstřikovaných odlišnou technologií. Navýšení tažnosti použitou technologií CIM došlo u materiálu PA 40 % LGF v obou směrech

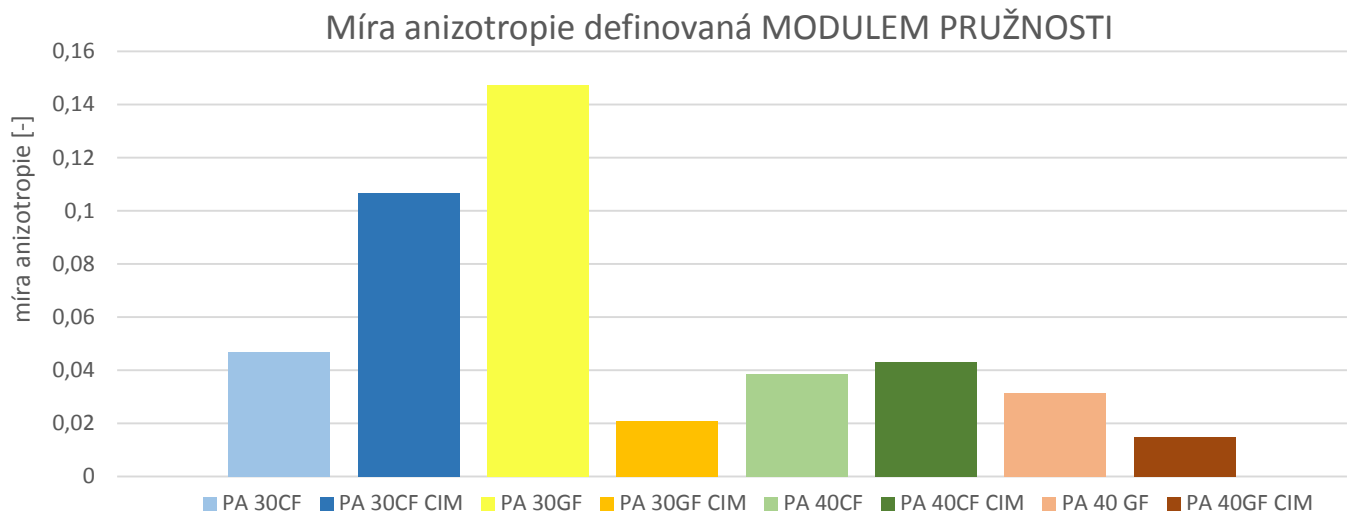
orientace vláken. U materiálu PA s 30 % LGF došlo v obou případech ke snížení tažnosti. Při použití technologie CIM v případě PA s LCF došlo k navýšení tažnosti pouze v u koncentrace 30 % a 40 % s vlákny orientovanými kolmo k ose tělísek. U těchto koncentrací plniva LCF v PA s vlákny podélnými došlo při použití CIM ke snížení tažnosti. Závěrem porovnání technologií tažností lze říci, že při zvýšení koncentrace plniva LGF dojde ke zvýšení tažnosti použitím CIM. Při zvýšení koncentrace LCF dochází naopak ke snížení tažnosti při použití CIM. Ve všech případech materiálů vycházejí vyšší tažnost tělísek s podélnými vlákny vyráběné technologií konvenčním vstřikováním. Shrnutím výsledných hodnot tažností z hlediska použitých technologií vstřikováním znázorněných v grafu lze říci, že hodnoty tažnosti jednotlivých zatěžujících směrů jsou vždy pro jeden materiál výrazně méně odlišné při použité technologii CIM.

4.2 Vyhodnocení výsledných hodnot míry anizotropie mechanických vlastností

Z výsledných hodnot (Tab. 3.11) byly vypočteny absolutní hodnoty anizotropie mechanických vlastností pro jednotlivé naměřené veličiny a byly vyneseny v grafech. Pro míru anizotropie vstřikované destičky z hlediska modulu pružnosti je zobrazen graf (Obr. 4.4), pro míru anizotropie reprezentující mez pevnosti je vyobrazen graf (Obr. 4.5) a pro míru anizotropie z hlediska tažnosti je přiložen graf (Obr. 4.6).

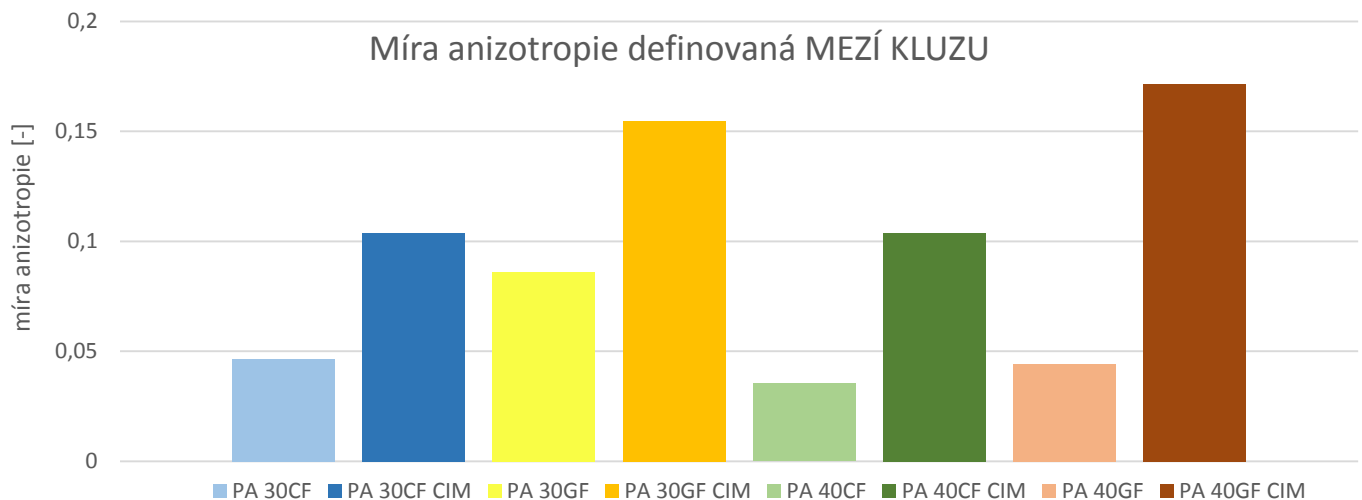
Z výsledných hodnot zanesených do grafu na obrázku (Obr. 4.4) je vytvořeno porovnání anizotropie z hlediska modulu pružnosti mezi dvěma technologiemi vstřikováním pro jednotlivé materiály. Označení materiálu pod každým sloupkem značí zleva typ matrice, kterou je polyamid 66, dále procentuální obsah plniva což je 30 nebo 40 %, poté typ dlouhého vlákna což je uhlíkové nebo skelné a na konci značení typ použité výrobní technologie, kdy CIM značí kompresní vstřikování a bez CIM znamená konvenční vstřikování.

Pro správné pochopení grafů je potřeba zmínit, že čím znázorněné sloupce absolutních hodnot míry anizotropie nabývají vyšší hodnoty, tím je anizotropní vlastnost reprezentovaná mechanickou veličinou vyšší, tedy odlišnost mezi normálním a podélným směrem zatěžování vůči směru vláken je markantnější.



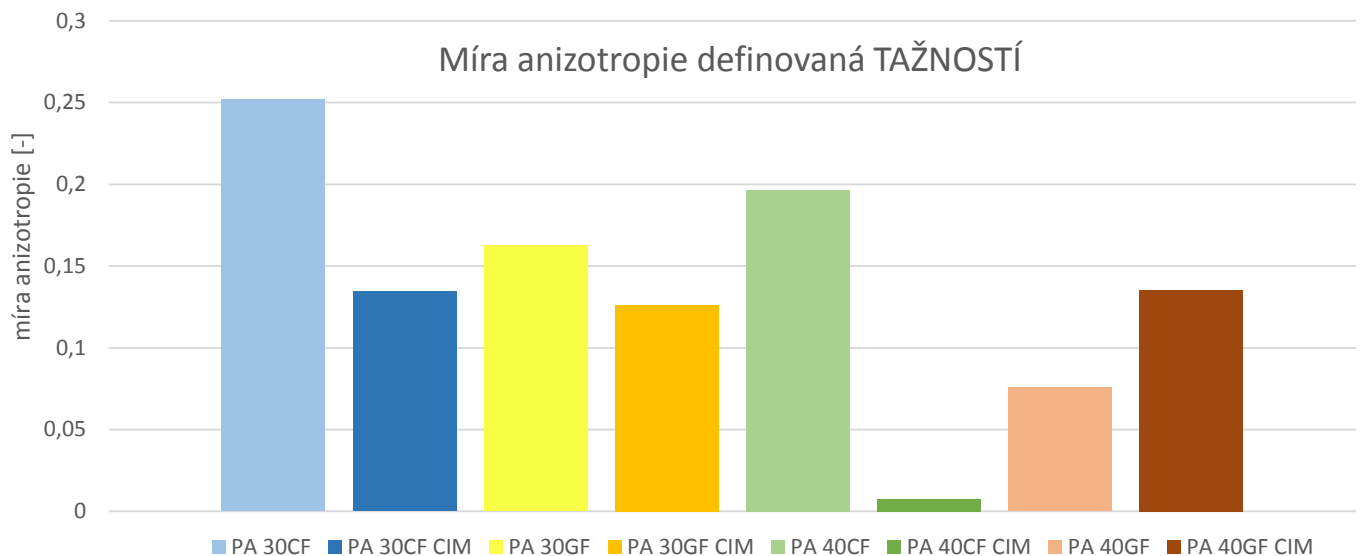
Obr. 4.4: Míra anizotropie z hlediska modulu pružnosti

Z grafu, který se zabývá mírou anizotropie z pohledu modulu pružnosti v tahu na obrázku (Obr. 4.4) je patrné, že PA s LCF ať s koncentrací 30 nebo 40 % vykazuje vyšší anizotropii z hlediska modulu pružnosti pro technologii CIM. Výrobky z PA s koncentrací 30 % LCF vyráběných CIM vykazují anizotropii o 5,99 % vyšší než u dílů vstříkovaných konvenčně. Výstřik s 40% LCF vstříkovaný kompresně vykazuje o 0,44 % vyšší anizotropii z hlediska modulu pružnosti v tahu v porovnání s konvenčně vstříkovaným dílem. Anizotropie vstříkovaného dílu z hlediska modulu E pro PA s 30 a 40 % LGF vychází opačně nežli pro PA s LCF, tedy míra anizotropie vykazuje nižší hodnoty ve prospěch kompresního vstříkování. Pro díl z 30 % LGF vychází výstřik o 12,67 % anizotropněji pro konvenční vstřik a pro díl s 40 % LGF vychází též vyšší anizotropie pro technologii konvenční vstříkování konkrétně o 1,66 %. Z grafu tedy vyplývá, že konvenčním vstříkováním PA s LCF lze vyrábět díly s nižší anizotropií z hlediska modulu pružnosti nežli technologií CIM. Naopak z PA s LGF lze vyrábět díly s vyšší izotropní vlastností z hlediska modulu pružnosti technologií CIM.



Obr. 4.5: Míra anizotropie z hlediska meze pevnosti

Z grafu na obrázku (Obr. 4.5) zobrazujícího míru anizotropie mechanických vlastností reprezentovanou mezí kluzu je patrné, že díly vstřikované konvenční technologií vyráběné z polyamidu ať s LCF nebo LGF vykazují nižší anizotropní chování z hlediska meze pevnosti, nežli díly vstřikované kompresně. Procentuální rozdíl anizotropie technologií je zaznamenán v tabulce (Tab. 3.11). Procentuální rozdíl mezi technologiemi s použitým materiálem PA s 30 % LCF je 5,75 % ve prospěch konvenčního vstřikování. Pro materiál PA s 40 % LCF je to 6,83 %, pro PA s 30 % LGF je rozdíl 6,86 % a pro PA s 40 % LGF rozdíl vychází 12,7 % ve prospěch konvenčního vstřiku. Anizotropie vstřikovaného dílu z hlediska meze pevnosti vychází jednoznačně lépe ve prospěch konvenčního vstřiku, dále lze z vypočtených procentuálních rozdílů vyčíst, že vstřikované díly tvořené materiálem PA s LGF vykazují nižší anizotropní chování v porovnání s PA plněného LCF. Tento fakt může být způsoben samotným izotropním charakterem skelných vláken.



Obr. 4.6: Anizotropie z hlediska tažnosti

Graf na obrázku (Obr. 4.6) znázorňuje míru anizotropie tažnosti testovaných tělísek. Z grafu je patrné, že materiály PA s 30 a 40 % LCF vykazují nižší anizotropii tažnosti v případě technologie CIM o 11,75 a 18,91 %. Dále PA s koncentrací 30% LGF vykazuje též o 5,98 % nižší anizotropii ve prospěch CIM, kdežto koncentrace 40 % LGF v polyamidu vykazuje o 5,98 % nižší anizotropii z hlediska tažnosti ve prospěch konvenčního vstřikování. Z celkového hlediska vychází nižší anizotropie tažnosti zkušebních tělísek vyráběných technologií CIM.

5. ZÁVĚR

Diplomová práce s tématem kompresní vstřikování PA s uhlíkovým vláknem se v teoretické části věnovala tématu kompozitní materiál a jeho složení. Byla zde rozebrána syntetická a okrajově přírodní vláknitá plniva, ze kterých jsem vybral materiály plniv pro PA, dále použité v experimentální části. Teoretická část se dále stručně zabývala popisem přísad do polymerů. Poté následovala charakteristika nejčastěji využívaných termoplastických polymerů pro výrobu plněných plastů vláknou technologiemi vstřikování. Poslední kapitoly teoretické části se zabývaly popisem principu technologie konvenční vstřik a poté technologií kompresní vstřik.

Experimentální část diplomové práce měla za úkol zkoumat vliv technologie konvenčního a kompresního vstřikování na výsledné mechanické vlastnosti vstřikovaného výrobku a na jejich míru anizotropie. Mechanické vlastnosti výstřiku byly měřeny tahovou zkouškou na zkušebních tělíscích odebíraných z konvenčně a kompresně vstřikovaných destiček o rozměrech 115 x 115 x 2 mm z PA vyztuženého dlouhým uhlíkovým vláknem o koncentraci 30 a 40 % a dlouhým skelným vláknem o stejné koncentraci. Zkušební tělíscika o rozměru 1BA dle normy ČSN EN ISO 527-2 byla frézována z čtvercových destiček ve dvou směrech. Odebrána byla tak, aby s ohledem na teoretickou orientaci vláken plniva směřovala v jednom případě kolmo k ose tělíscika a ve druhém případě rovnoběžně k ose tělíscika dle (Obr. 3.1). Na zkušebních tělíscích připravených tímto způsobem byly naměřeny mechanické vlastnosti, ze kterých jsem vybral hodnoty modulu pružnosti v tahu, meze pevnosti a tažnosti. Z vybraných a zpracovaných veličin byla dále vypočtena míra anizotropie mechanických vlastností charakterizována modulem pružnosti, mezí pevnosti a tažností.

Z naměřených hodnot modulu pružnosti (Tab. 3.8) bylo zjištěno, že aplikací technologie kompresního vstřiku CIM dochází v případě dlouhých uhlíkových vláken LCF ke snížení modulu pružnosti v porovnání s konvenčním vstřikem. Při vstřiku PA s dlouhým skelným vláknem LGF v případě CIM dojde k nepatrnému navýšení modulu pružnosti v porovnání s konvenčním vstřikem (Obr. 4.1). Z tohoto faktu vyvozují, že LCF se chovají při působení všestranného tlaku v případě CIM jinak než vlákna LGF, což může být zapříčiněno rozdílnou velikostí chemických vazeb použitých plniv s matricí PA. Dále bylo zjištěno téměř dvojnásobné navýšení modulu pružnosti při použití LCF v porovnání LGF. K navýšení modulu E dále došlo zvýšením koncentrace ze 30 % plniva na 40 %.

Z naměřených hodnot meze pevnosti (Tab. 3.9) je patrné, že tělíska odebraná z výstřiku vyrobeného technologií CIM vykazují větší rozdíl hodnot z hlediska porovnaných směrů orientace vláken nežli tělíska vyrobená konvenčním vstřikováním vizualizováno grafem (Obr. 4.2). Tento jev se neshoduje s teoretickým tvrzením, které předpovídá opačný výsledek. Tento výsledek je nejspíš zapříčiněn nevhodnou konstrukcí formy, která má příliš malou tloušťku 2 mm. Můj předpoklad je, že při dolisování není ve formě prostor pro rozbití anizotropie přeorientováním dlouhých vláken všestranným tlakem v případě CIM. Dále bylo zjištěno zvýšení meze pevnosti použitím LCF v PA matrici cca o jednu třetinu v porovnání PA s LGF. Zvýšení koncentrace plniva měla minimální vliv na výslednou mez pevnosti.

Naměřenými a zpracovanými hodnotami tažnosti (Tab. 3.10) a grafickou vizualizací (Obr. 4.3) z hlediska porovnání technologií vstřikování bylo zjištěno, že při zvýšení koncentrace LCF v kombinaci s PA matricí dochází ke snížení tažnosti s použitou technologií CIM v porovnání s konvenčním vstřikem. Při vstřikování PA s LGF tomu bylo naopak, tažnost byla zvýšena se zvýšením koncentrace plniva při zpracování technologií CIM v porovnání s konvenčním vstřikem. Dále z hlediska porovnávaných technologií vstřikování bylo zjištěno, že hodnoty tažnosti jednotlivých zatěžujících směrů jsou vždy pro jeden materiál výrazně méně odlišné při použité technologii CIM, což se shoduje s teoretickým předpokladem. Z hlediska porovnání materiálu vláken plyne zjištění, že PA s LGF vykazuje vyšší tažnost nežli PA s LCF. Tento fakt bude též způsoben slabšími chemickými vazbami mezi PA a LGF.

Z naměřených a dále zpracovaných veličin jsem v poslední fázi zhodnocení vlivu technologie vstřikování na mechanické vlastnosti výstřiku vypočetl míru anizotropie charakterizovanou modulem pružnosti, mezí pevnosti a tažností (Tab. 3.11).

Z výsledných hodnot míry anizotropie definované modulem pružnosti (Obr. 4.4) jsem zjistil, že při kompresním vstřikování PA vyztuženého LCF byly vyrobeny destičky s vyšší anizotropií, v případě koncentrace 30 % o 5,99 % a s koncentrací 40 % o 0,44 %, nežli konvenčním vstřikováním. Naopak PA s LGF vstřikovaný technologií CIM vykazuje nižší anizotropní vlastnosti z hlediska modulu pružnosti v porovnání s konvenčním vstřikováním. Jedná se o rozdíl 12,67 % v případě koncentrace 30 % a 1,66 % v případě koncentrace 40 % LGF.

Míra anizotropie mechanických vlastností výstřiku byla dále porovnávána z hlediska meze pevnosti (Obr. 4.5). Toto porovnání zjistilo, že anizotropie z hlediska

meze pevnosti vychází jednoznačně lépe pro konvenční vstřikování, tedy technologie CIM v mém případě produkovala výrobky s vyšší anizotropií z PA s oběma typy plniv. Konkrétně se jednalo o nárůst anizotropie v případě technologie CIM o 5,75 % u materiálu PA s 30 % LCF, o 6,83 % u materiálu PA s 40 % LCF, při vstřikování PA s 30 % LGF je rozdíl 6,86 % a pro PA s 40 % LGF rozdíl vychází 12,7 % ve prospěch konvenčního vstřiku. Tento fakt se opět rozchází s teoretickým předpokladem. Takovýto jev by mohla způsobovat nevhodná konstrukce vstřikovací formy pro technologii CIM a příliš velká délka vláken, která brání jejich pohybu v úzké dutině formy za působení všestranného tlaku.

Poslední zjišťovanou veličinou byla míra anizotropie definovaná tažností (Obr. 4.6). Anizotropie tažnosti vstřikovaného dílu vycházela vyšší pro destičky vstřikované konvenční metodou s výjimkou PA 40 % LGF, kde vychází vyšší v případě CIM. Míra anizotropie tažnosti vychází nižší ve prospěch technologie CIM o 11,75 % v případě PA s 30 % LCF, o 18,91 % v případě materiálu PA s 40 % LCF a dále o 5,98 % v případě PA s 30 % LGF. Naopak materiál PA s 40 % LGF vstřikovaný technologií CIM vykazuje o 5,98 % vyšší míru anizotropie tažnosti. Z celkového hlediska vychází nižší anizotropie tažnosti zkušebních tělísek vyráběných technologií CIM.

Při zhodnocení vypočtených veličin vyšli některé závěry v rozporu s teoretickým tvrzením. Na takovéto závěry může mít vliv spousta faktorů, jako například konstrukce formy, matrice, plnivo atd. Proto bych chtěl téma mé diplomové práce doporučit pro další výzkum, který by byl rozšířen o větší sortiment použitých materiálů. Dále bych doporučil jinou konstrukci formy s odlišným vtokem a s většími rozměry, které by ze vstřikovaného dílu umožnily rozsáhlejší volbu místa pro odebrání vzorku. Experiment by poté mohl za pomoci takovéto formy eliminovat mnou zmíněné úvahy nad nevhodností konstrukce formy pro tento experiment vedoucí k výsledkům v rozporu s teoretickým tvrzením.

6. Seznam použité literatury

- [1] KROISOVÁ, D.: Přednáška Kompozitní materiály, Liberec: Technická univerzita v Liberci 2015
- [2] <http://21stoleti.cz/2010/09/17/sklenena-vlakna-pod-elektronovym-mikroskopem/>, březen 2015
- [3] EHRENSTEIN, G.W.: Polymerní kompozitní materiály, Scientia, Praha 2009
- [4] http://cs.wikipedia.org/wiki/Aramid#/media/File:Kevlar_chemical_structure.png, březen 2015
- [5] http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_nomex.aspx, duben 2015
- [6] LENFELD, P.: Výzkum užitných vlastností a aplikačních možností polymerních materiálů s přírodními plnivými a nanoplnivými na bázi syntetických a PLA matic, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011
- [7] BOBEK, J.: Výzkum technologie zpracování kompozitů se syntetickou termoplastickou maticí a vlákny rostlinného a živočišného původu ve vztahu k mechanickým vlastnostem, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012
- [8] BĚHÁLEK, L.: Polymery, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014
- [9] http://is.muni.cz/do/rect/el/estud/lf/js12/vyroba_cocek/web/pages/01-2-06_polykarbonat.html, duben 2015
- [10] <http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/polyoxymethylene-pom-engineering-plastic-used-make-bolts-bearings-handles-guitar-picks-dur-q1742523>, duben 2015
- [11] http://de.wikipedia.org/wiki/Polybutylenterephthalat#/media/File:PBT_Structural_Formula_V1.svg, duben 2015
- [12] <http://old.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>, květen 2015
- [13] KREBS, J. Teorie zpracování nekovových materiálů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2001
- [14] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm, duben 2015
- [15] LENFELD, P.: Technologie vstřikování. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014
- [16] <https://www.arburg.com/en/products-and-services/injection-moulding/processes/injection-compression-moulding/>, květen 2015

- [17] http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/bilder/presse_300dpi/arburg_30288_470e.jpg, květen 2015
- [18] <http://www.isel-cnc.fr/icp.php>, květen 2015
- [19] ČSN EN ISO 527-2: Plasty - Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty, duben 1998
- [20] ČSN EN ISO 527-1: Plasty - Stanovení tahových vlastností – Část 1: Základní vlastnosti, srpen 1997

7. Seznam příloh

- Příloha 1: Materiálový list OnForce LFT NN – 30LCF/002 Grey
(Polyamid 66 s 30% dlouhého uhlíkového vlákna - LCF)
- Příloha 2: Materiálový list OnForce LFT NN – 40LCF/001 Grey
(Polyamid 66 s 40% dlouhého uhlíkového vlákna - LCF)
- Příloha 3: Materiálový list OnForce LFT NN – 30LGF/000 HS UV Black
(Polyamid 66 s 30% dlouhého skelného vlákna - LGF)
- Příloha 4: Materiálový list OnForce LFT NN – 40LGF/000 HS UV Black
(Polyamid 66 s 40% dlouhého skelného vlákna LGF)

Příloha 1: Materiálový list

OnForce™ LFT NN-30LCF/002 Grey

Polyamide 66

Key Characteristics

Product Description

PolyOne's Long Fiber Thermoplastic (LFT) compounds are formulated for demanding applications which require high stiffness and good impact such as metal replacement or other structural applications. These products exhibit enhanced physical and mechanical properties versus standard short fiber products. Benefits of LFT compounds include improved impact strength, elastic modulus, and material strength across wide temperature ranges from subambient to highly elevated. Furthermore, LFT compounds have been shown to offer improved performance in the areas of creep and fatigue performance, improved dimensional stability, and exhibit an exceptional surface finish when compared to traditional highly filled short fiber products.

General

Material Status	• Commercial: Active		
Regional Availability	• Africa & Middle East • Asia Pacific	• Europe • Latin America	• North America
Filler / Reinforcement	• Long Carbon Fiber, 30% Filler by Weight		
Features	• Heat Stabilized		
Forms	• Pellets		

Technical Properties ¹

Physical	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Method
Density	1.30 g/cm ³	1.30 g/cm ³	ISO 1183
Molding Shrinkage ²	0.30 %	0.30 %	ISO 294-4
Mechanical	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Method
Tensile Modulus	3.34E+6 psi	23000 MPa	ISO 527-2
Tensile Stress (Break)	42100 psi	290 MPa	ISO 527-2
Tensile Strain (Break)	1.5 %	1.5 %	ISO 527-2
Flexural Modulus	2.61E+6 psi	18000 MPa	ISO 178
Flexural Stress	55100 psi	380 MPa	ISO 178
Impact	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Method
Charpy Notched Impact Strength	7.1 ft·lb/in ²	15 kJ/m ²	ISO 179
Charpy Unnotched Impact Strength	26 ft·lb/in ²	55 kJ/m ²	ISO 179
Gardner Impact	78.0 in·lb	8.81 J	ASTM D5420
Thermal	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Method
Heat Deflection Temperature 264 psi (1.8 MPa), Unannealed	486 °F	252 °C	ISO 75-2/A
Heat Deflection Temperature 1160 psi (8.0 MPa), Unannealed	466 °F	241 °C	ISO 75-2/C

Processing Information

Injection	Typical Value (English)	Typical Value (SI)
Drying Temperature	176 °F	80.0 °C
Drying Time	4.0 hr	4.0 hr
Processing (Melt) Temp	554 to 608 °F	290 to 320 °C
Mold Temperature	194 °F	90.0 °C
Injection Rate	Slow-Moderate	Slow-Moderate
Back Pressure	145 psi	1.00 MPa

Copyright © 2015 PolyOne Corporation. PolyOne makes no representations, guarantees, or warranties of any kind with respect to the Information contained in this document about its accuracy, suitability for particular applications, or the results obtained or obtainable using the information. Some of the Information arises from laboratory work with small-scale equipment which may not provide a reliable indication of performance or properties obtained or obtainable on larger-scale equipment. Values reported as "typical" or stated without a range do not state minimum or maximum properties; consult your sales representative for property ranges and min/max specifications. Processing conditions can cause material properties to shift from the values stated in the Information. PolyOne makes no warranties or guarantees respecting suitability of either PolyOne's products or the Information for your process or end-use application. You have the responsibility to conduct full-scale end-product performance testing to determine suitability in your application, and you assume all risk and liability arising from your use of the Information and/or use or handling of any product. POLYONE MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, either with respect to the Information or products reflected by the Information. This data sheet shall NOT operate as permission, recommendation, or inducement to practice any patented invention without permission of the patent owner.

Injection Notes

LFT compounds can be processed using equipment similar to that used for short fiber products. The mechanical properties of finished parts depend greatly on the length of the fibers in the molded part; therefore processing conditions must be set carefully in order to minimize fiber breakage. A "low shear process" is advised, with low back pressure, low screw speed and low-to-medium injection speed.

Notes

¹ Typical values are not to be construed as specifications.

² Measured on a tensile specimen. Actual mold shrinkage values are highly dependant on part geometry, mold configuration, and processing conditions.

CONTACT INFORMATION**Americas**

Mexico - Toluca
+52 722 2790200

United States - Avon Lake
+1 440 930 1000

Asia

China - Shanghai
+86 21 5080 1188

China - Shenzhen
+86 755 2969 2888

China - Suzhou
+86 512 6823 24 38

China - Tianjin
+86 22 2532 8818

India - Pune

Japan - Tokyo
+81-3-6261-3980

Singapore - Singapore
+65 6861 9325

Taiwan - Yonghe City,
+886 9396 99740, +886 2929 1849

Europe

Germany - Gaggenau
+49 7225 6802 0

Spain - Barbastro (Huesca)
+34 974 310 314

Turkey - Esenyurt - Istanbul – Turkey
+90 212 549 2256



Beyond Polymers.

Better Business Solutions. SM

www.polyone.com

PolyOne Americas

33587 Walker Road
Avon Lake, Ohio 44012
United States
+1 440 930 1000
+1 866 POLYONE

PolyOne Asia

No. 88 Guoshoujing Road
Z.J Hi-tech Park, Pudong
Shanghai, 201203, China
+86 21 5080 1188

PolyOne Europe

6 Giällewee
+352 269 050 35

Copyright ©, 2015 PolyOne Corporation. PolyOne makes no representations, guarantees, or warranties of any kind with respect to the Information contained in this document about its accuracy, suitability for particular applications, or the results obtained or obtainable using the information. Some of the Information arises from laboratory work with small-scale equipment which may not provide a reliable indication of performance or properties obtained or obtainable on larger-scale equipment. Values reported as "typical" or stated without a range do not state minimum or maximum properties; consult your sales representative for property ranges and min/max specifications. Processing conditions can cause material properties to shift from the values stated in the Information. PolyOne makes no warranties or guarantees respecting suitability of either PolyOne's products or the Information for your process or end-use application. You have the responsibility to conduct full-scale end-product performance testing to determine suitability in your application, and you assume all risk and liability arising from your use of the Information and/or use or handling of any product. POLYONE MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, either with respect to the Information or products reflected by the Information. This data sheet shall NOT operate as permission, recommendation, or inducement to practice any patented invention without permission of the patent owner.

Příloha 2: Materiálový list

OnForce™ LFT NN-40LCF/001 Grey



Polyamide 66 PolyOne Corporation

ides.com/prospector

Technical Data

Product Description

PolyOne's Long Fiber Thermoplastic (LFT) compounds are formulated for demanding applications which require high stiffness and good impact such as metal replacement or other structural applications. These products exhibit enhanced physical and mechanical properties versus standard short fiber products. Benefits of LFT compounds include improved impact strength, elastic modulus, and material strength across wide temperature ranges from subambient to highly elevated. Furthermore, LFT compounds have been shown to offer improved performance in the areas of creep and fatigue performance, improved dimensional stability, and exhibit an exceptional surface finish when compared to traditional highly filled short fiber products.

General

Material Status	• Commercial: Active
Literature ¹	• Technical Datasheet
Search for UL Yellow Card	• PolyOne Corporation
Availability	• Africa & Middle East • Europe • Asia Pacific • North America • South America
Filler / Reinforcement	• Long Carbon Fiber, 40% Filler by Weight
Features	• Heat Stabilized
Forms	• Pellets

Physical	Nominal Value Unit	Test Method
Density	1.35 g/cm ³	ISO 1183
Molding Shrinkage ³	0.30 %	ISO 294-4

Mechanical	Nominal Value Unit	Test Method
Tensile Modulus	29000 MPa	ISO 527-2
Tensile Stress (Break)	305 MPa	ISO 527-2
Tensile Strain (Break)	1.5 %	ISO 527-2
Flexural Modulus	24000 MPa	ISO 178
Flexural Strength	420 MPa	ISO 178

Impact	Nominal Value Unit	Test Method
Charpy Notched Impact Strength	15 kJ/m ²	ISO 179
Charpy Unnotched Impact Strength	55 kJ/m ²	ISO 179
Gardner Impact	11.8 J	ASTM D5420

Thermal	Nominal Value Unit	Test Method
Heat Deflection Temperature		
1.8 MPa, Unannealed	250 °C	ISO 75-2/A
8.0 MPa, Unannealed	243 °C	ISO 75-2/C

Injection	Nominal Value Unit
Drying Temperature	80.0 °C
Drying Time	4.0 hr
Processing (Melt) Temp	290 to 320 °C
Mold Temperature	90.0 °C
Injection Rate	Slow-Moderate
Back Pressure	1.00 MPa

Injection Notes

LFT compounds can be processed using equipment similar to that used for short fiber products. The mechanical properties of finished parts depend greatly on the length of the fibers in the molded part; therefore processing conditions must be set carefully in order to minimize fiber breakage. A "low shear process" is advised, with low back pressure, low screw speed and low-to-medium injection speed.

Notes

¹ These links provide you with access to supplier literature. We work hard to keep them up to date; however you may find the most current literature from the supplier.

² Typical properties: these are not to be construed as specifications.

³ Measured on a tensile specimen. Actual mold shrinkage values are highly dependant on part geometry, mold configuration, and processing conditions.

OnForce™ LFT NN-40LCF/001 Grey

Polyamide 66

PolyOne Corporation

Where to Buy

Supplier

PolyOne Corporation
Cleveland, OH USA
Telephone: 866-PolyOne
Web: <http://www.polyone.com/>

Distributor

PolyOne Distribution
PolyOne Distribution is a global distribution company. Contact PolyOne Distribution for availability of individual products by country.
Telephone: 800-894-4266
Web: <http://polyonedistribution.com/>
Availability: Global



Founded in 1986 and based in Laramie, Wyoming, IDES is now part of the UL family of companies. UL is a premier global independent safety science company with more than a century of proven history. Employing nearly 10,000 professionals in over 100 countries, UL has five distinct business units -- Product Safety, Environment, Life & Health, Knowledge Services and Verification Services -- to meet the expanding needs of our customers and to deliver on our public safety mission.



Prospector Plastics Database - www.ides.com/prospector

Prospector is a searchable online database that includes 85,000 data sheets from 875 manufacturers and 44,000 UL yellow cards. Each data sheet includes property, processing and supplier contact information. Prospector is relied on by nearly 400,000 design engineers and plastics processors. Using Prospector, they save time with plastic material selection by quickly and easily referencing technical information critical to the success of their products.

"Prospector is absolutely the best and most well-known search engine for plastic raw materials in the world. We use Prospector every day – it's a real time saver!"

– Birgit Elvardt Bader, Production Manager, Micotron

Power Searches

Property Search – select plastics by 500 key properties and design parameters.

Alternative Resins Search – find replacement plastics within minutes.

Automotive Plastics Search – easily locate automotive approved plastics.

Curve Data – view, overlay and export curve data.



Material Data Management – www.ides.com/datasheets

With our data management services, plastic suppliers and distributors can have custom search interfaces available on their website for their customers, website visitors, sales and customer service teams. These provide intuitive ways to find and view technical data sheets for their products.

"With UL IDES data services, our website now displays the most current information on the products we distribute and links to our backend RFQ and sales order system, adding both value and service for our customers."

– Kevin Chase, Owner & President, Chase Plastics



Advertising – www.ides.com/advertise

Reach 365,000 pre-qualified plastics professionals and generate leads with proven techniques. Electronic newsletter insertions, sponsored webinars and powerful online ads are available to make the most of your lead-generation program.

For more information, call: 800.788.4668 or 307.742.9227 ext. 220



Příloha 3: Materiálový list

OnForce™ LFT NN-30 LGF/000 Natural

Polyamide 66

Key Characteristics

Product Description

PolyOne's Long Fiber Thermoplastic (LFT) compounds are formulated for demanding applications which require high stiffness and good impact such as metal replacement or other structural applications. These products exhibit enhanced physical and mechanical properties versus standard short fiber products. Benefits of LFT compounds include improved impact strength, elastic modulus, and material strength across wide temperature ranges from subambient to highly elevated. Furthermore, LFT compounds have been shown to offer improved performance in the areas of creep and fatigue performance, improved dimensional stability, and exhibit an exceptional surface finish when compared to traditional highly filled short fiber products.

General

Material Status	• Commercial: Active		
Regional Availability	• Africa & Middle East • Asia Pacific	• Europe • Latin America	• North America
Filler / Reinforcement	• Long Glass Fiber, 30% Filler by Weight		
Features	• Heat Stabilized		
RoHS Compliance	• RoHS Compliant		
Forms	• Pellets		

Technical Properties ¹

Physical	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Method
Specific Gravity	1.37	1.37 g/cm ³	ASTM D792
Molding Shrinkage - Flow	2.0E-3 to 3.0E-3 in/in	0.20 to 0.30 %	ASTM D955
Mechanical	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Method
Tensile Modulus ²	1.50E+6 psi	10300 MPa	ASTM D638
Tensile Strength (Yield)	26500 psi	183 MPa	ASTM D638
Tensile Elongation ² (Break)	2.0 to 3.0 %	2.0 to 3.0 %	ASTM D638
Flexural Modulus	1.40E+6 psi	9650 MPa	ASTM D790
Flexural Strength (Yield)	41000 psi	283 MPa	ASTM D790
Impact	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Method
Notched Izod Impact 73°F (23°C), 0.125 in (3.18 mm), Injection Molded	5.0 ft·lb/in	270 J/m	ASTM D256
Unnotched Izod Impact	26 ft·lb/in	1400 J/m	ASTM D256
Thermal	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Method
Deflection Temperature Under Load 264 psi (1.8 MPa), Unannealed	480 °F	249 °C	ASTM D648

Processing Information

Injection	Typical Value (English)	Typical Value (SI)
Drying Temperature	176 °F	80.0 °C
Drying Time	4.0 hr	4.0 hr
Processing (Melt) Temp	560 to 590 °F	293 to 310 °C
Mold Temperature	200 °F	93.3 °C

Notes

¹ Typical values are not to be construed as specifications.

² Type I, 0.20 in/min (5.1 mm/min)

Copyright © 2015 PolyOne Corporation. PolyOne makes no representations, guarantees, or warranties of any kind with respect to the Information contained in this document about its accuracy, suitability for particular applications, or the results obtained or obtainable using the information. Some of the Information arises from laboratory work with small-scale equipment which may not provide a reliable indication of performance or properties obtained or obtainable on larger-scale equipment. Values reported as "typical" or stated without a range do not state minimum or maximum properties; consult your sales representative for property ranges and min/max specifications. Processing conditions can cause material properties to shift from the values stated in the Information. PolyOne makes no warranties or guarantees respecting suitability of either PolyOne's products or the Information for your process or end-use application. You have the responsibility to conduct full-scale end-product performance testing to determine suitability in your application, and you assume all risk and liability arising from your use of the Information and/or use or handling of any product. POLYONE MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, either with respect to the Information or products reflected by the Information. This data sheet shall NOT operate as permission, recommendation, or inducement to practice any patented invention without permission of the patent owner.

CONTACT INFORMATION

Americas

Mexico - Toluca
+52 722 2790200

United States - Avon Lake
+1 440 930 1000

Asia

China - Shanghai
+86 21 5080 1188

China - Shenzhen
+86 755 2969 2888

China - Suzhou
+86 512 6823 24 38

China - Tianjin
+86 22 2532 8818

India - Pune

Japan - Tokyo
+81-3-6261-3980

Singapore - Singapore
+65 6861 9325

Taiwan - Yonghe City,
+886 9396 99740, +886 2929 1849

Europe

Germany - Gaggenau
+49 7225 6802 0

Spain - Barbastro (Huesca)
+34 974 310 314

Turkey - Esenyurt - Istanbul – Turkey
+90 212 549 2256



Beyond Polymers.

Better Business Solutions. SM

www.polyone.com

PolyOne Americas

33587 Walker Road
Avon Lake, Ohio 44012

United States

+1 440 930 1000

+1 866 POLYONE

PolyOne Asia

No. 88 Guoshoujing Road
Z.J Hi-tech Park, Pudong

Shanghai, 201203, China

+86 21 5080 1188

PolyOne Europe

6 Giallewee

+352 269 050 35

Copyright ©, 2015 PolyOne Corporation. PolyOne makes no representations, guarantees, or warranties of any kind with respect to the Information contained in this document about its accuracy, suitability for particular applications, or the results obtained or obtainable using the information. Some of the Information arises from laboratory work with small-scale equipment which may not provide a reliable indication of performance or properties obtained or obtainable on larger-scale equipment. Values reported as "typical" or stated without a range do not state minimum or maximum properties; consult your sales representative for property ranges and min/max specifications. Processing conditions can cause material properties to shift from the values stated in the Information. PolyOne makes no warranties or guarantees respecting suitability of either PolyOne's products or the Information for your process or end-use application. You have the responsibility to conduct full-scale end-product performance testing to determine suitability in your application, and you assume all risk and liability arising from your use of the Information and/or use or handling of any product. POLYONE MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, either with respect to the Information or products reflected by the Information. This data sheet shall NOT operate as permission, recommendation, or inducement to practice any patented invention without permission of the patent owner.

Příloha 4: Materiálový list

OnForce™ LFT NN-40LGF/000 HS UV Black

Polyamide 66

Key Characteristics

Product Description

PolyOne's Long Fiber Thermoplastic (LFT) compounds are formulated for demanding applications which require high stiffness and good impact such as metal replacement or other structural applications. These products exhibit enhanced physical and mechanical properties versus standard short fiber products. Benefits of LFT compounds include improved impact strength, elastic modulus, and material strength across wide temperature ranges from subambient to highly elevated. Furthermore, LFT compounds have been shown to offer improved performance in the areas of creep and fatigue performance, improved dimensional stability, and exhibit an exceptional surface finish when compared to traditional highly filled short fiber products.

General

Material Status	• Commercial: Active		
Regional Availability	• Africa & Middle East • Asia Pacific	• Europe • Latin America	• North America
Filler / Reinforcement	• Long Glass Fiber, 40% Filler by Weight		
Features	• Good UV Resistance • Heat Stabilized		
Forms	• Pellets		

Technical Properties ¹

Physical	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Method
Density	1.45 g/cm ³	1.45 g/cm ³	ISO 1183
Molding Shrinkage ²	0.30 %	0.30 %	ISO 294-4
Mechanical	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Method
Tensile Modulus	1.89E+6 psi	13000 MPa	ISO 527-2
Tensile Stress			ISO 527-2
Break	30500 psi	210 MPa	
Break, -40°F (-40°C)	31500 psi	217 MPa	
Break, 212°F (100°C)	17800 psi	123 MPa	
Tensile Strain			ISO 527-2
Break	2.0 %	2.0 %	
Break, -40°F (-40°C)	1.9 %	1.9 %	
Break, 212°F (100°C)	2.7 %	2.7 %	
Flexural Modulus	1.52E+6 psi	10500 MPa	ISO 178
Flexural Stress	36300 psi	250 MPa	ISO 178
Impact	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Method
Charpy Notched Impact Strength	7.1 ft·lb/in ²	15 kJ/m ²	ISO 179
Charpy Unnotched Impact Strength	33 ft·lb/in ²	70 kJ/m ²	ISO 179
Gardner Impact	72.0 in·lb	8.13 J	ASTM D5420
Thermal	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Method
Heat Deflection Temperature			ISO 75-2/A
264 psi (1.8 MPa), Unannealed	486 °F	252 °C	
Heat Deflection Temperature			ISO 75-2/C
1160 psi (8.0 MPa), Unannealed	455 °F	235 °C	

Processing Information

Injection	Typical Value (English)	Typical Value (SI)
Drying Temperature	176 °F	80.0 °C
Drying Time	4.0 hr	4.0 hr

Copyright © 2015 PolyOne Corporation. PolyOne makes no representations, guarantees, or warranties of any kind with respect to the Information contained in this document about its accuracy, suitability for particular applications, or the results obtained or obtainable using the information. Some of the Information arises from laboratory work with small-scale equipment which may not provide a reliable indication of performance or properties obtained or obtainable on larger-scale equipment. Values reported as "typical" or stated without a range do not state minimum or maximum properties; consult your sales representative for property ranges and min/max specifications. Processing conditions can cause material properties to shift from the values stated in the Information. PolyOne makes no warranties or guarantees respecting suitability of either PolyOne's products or the Information for your process or end-use application. You have the responsibility to conduct full-scale end-product performance testing to determine suitability in your application, and you assume all risk and liability arising from your use of the Information and/or use or handling of any product. POLYONE MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, either with respect to the Information or products reflected by the Information. This data sheet shall NOT operate as permission, recommendation, or inducement to practice any patented invention without permission of the patent owner.

Injection	Typical Value (English)	Typical Value (SI)
Processing (Melt) Temp	554 to 608 °F	290 to 320 °C
Mold Temperature	194 °F	90.0 °C
Injection Rate	Slow-Moderate	Slow-Moderate
Back Pressure	145 psi	1.00 MPa

Injection Notes

LFT compounds can be processed using equipment similar to that used for short fiber products. The mechanical properties of finished parts depend greatly on the length of the fibers in the molded part; therefore processing conditions must be set carefully in order to minimize fiber breakage. A "low shear process" is advised, with low back pressure, low screw speed and low-to-medium injection speed.

Notes

¹ Typical values are not to be construed as specifications.

² Measured on a tensile specimen. Actual mold shrinkage values are highly dependant on part geometry, mold configuration, and processing conditions.

CONTACT INFORMATION

Americas	Asia	Europe
Mexico - Toluca +52 722 2790200	China - Shanghai +86 21 5080 1188	Germany - Gaggenau +49 7225 6802 0
United States - Avon Lake +1 440 930 1000	China - Shenzhen +86 755 2969 2888	Spain - Barbastro (Huesca) +34 974 310 314
	China - Suzhou +86 512 6823 24 38	Turkey - Esenyurt - Istanbul – Turkey +90 212 549 2256
	China - Tianjin +86 22 2532 8818	
	India - Pune	
	Japan - Tokyo +81-3-6261-3980	
	Singapore - Singapore +65 6861 9325	
	Taiwan - Yonghe City +886 9396 99740, +886 2929 1849	



Beyond Polymers.

Better Business Solutions. SM

www.polyone.com

PolyOne Americas	PolyOne Asia	PolyOne Europe
33587 Walker Road	No. 88 Guoshoujing Road	6 Gälllewee
Avon Lake, Ohio 44012	Z.J Hi-tech Park, Pudong	+352 269 050 35
United States	Shanghai, 201203, China	
+1 440 930 1000	+86 21 5080 1188	
+1 866 POLYONE		

Copyright ©, 2015 PolyOne Corporation. PolyOne makes no representations, guarantees, or warranties of any kind with respect to the Information contained in this document about its accuracy, suitability for particular applications, or the results obtained or obtainable using the information. Some of the Information arises from laboratory work with small-scale equipment which may not provide a reliable indication of performance or properties obtained or obtainable on larger-scale equipment. Values reported as "typical" or stated without a range do not state minimum or maximum properties; consult your sales representative for property ranges and min/max specifications. Processing conditions can cause material properties to shift from the values stated in the Information. PolyOne makes no warranties or guarantees respecting suitability of either PolyOne's products or the Information for your process or end-use application. You have the responsibility to conduct full-scale end-product performance testing to determine suitability in your application, and you assume all risk and liability arising from your use of the Information and/or use or handling of any product. POLYONE MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, either with respect to the Information or products reflected by the Information. This data sheet shall NOT operate as permission, recommendation, or inducement to practice any patented invention without permission of the patent owner.