Vliv zpracovatelských parametrů na vlastnosti PP plněného dlouhým skleněným vláknem.

Bc. Věra Navrátilová

Diplomová práce 2013

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav inženýrství polymerů
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Věra Navrátilová**
Osobní číslo:	**T11020**
Studijní program:	**N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor:	**Inženýrství polymerů**
Forma studia:	**kombinovaná**
Téma práce:	**Vliv zpracovatelských parametrů na vlastnosti polypropylenu plněného dlouhým skleněným vláknem.**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracovat literární rešerži
2. Zhotovit vstřikovaná zkušební tělesa za různých podmínek
3. Provést a zpracovat experimentální měření vybraných termických a mechanických vlastností

Příjmení a jméno: ..... Obor: .....

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Ehrenstein, G.W.: Polymerní kompozitní materiály (překlad), Scientia Praha, 2009
2. Meissner, B., Zilvar, V.: Fyzika polymerů, SNTL/Alfa Praha, 1997
3. Lapčík, L., Raab, M.: Nauka o materiálech II, skriptum FT UTB, 2004
4. Ward, I.M., Sweeney, J.: An introduction to the mechanical properties of solid polymers, Wiley, 2004

Vedoucí diplomové práce:	**RNDr. Marta Sližová, CSc.** Ústav fyziky a mater. inženýrství
Datum zadání diplomové práce:	**11. února 2013**
Termín odevzdání diplomové práce:	**17. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
ředitel ústavu

P R O H L Á Š E N Í

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby[1)];
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 [2)];
- beru na vědomí, že podle § 60 [3)]odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 [3)]odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 16. 5. 2013

.....

[1)] zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

[2)] zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

[3)] zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vlivem zpracovatelských podmínek na vlastnosti kompozitů s polypropylenovou matricí, plněných dlouhým skleněným vláknem.

Teoretická část popisuje kompozitní materiály, technologii vstřikování a zkoušky vlastností polymerů. Praktická část je zaměřena na měření mechanických vlastností, měření teplotní délkové roztažnosti a sledování délky vláken ve vstřikovaných vzorcích.

Klíčová slova:

polypropylen, kompozity plněné dlouhým skleněným vláknem, vstřikování, délka vláken, zpracovatelské podmínky

ABSTRACT

The presented work is dedicated to polypropeylen composites reinforced with long glass fibres and its processing conditions.

Theoretical part describes composite materials, injection molding technology and polymer characterisation. Experimetal part is focused on material properties evaluation using mechanical properties testing, thermomechanical analysis and optical microscopy.

Keywords:

Polypropylene, long glass fibre composites, injection molding, glass fibre, processing conditions

Ráda bych poděkovala paní doktorce Martě Sližové, CSc za odborné vedení, cenné rady, trpělivost a obětavý přístup při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Tomáši Sedláčkovi, PhD. za pomoc a ochotu při vypracování praktické části.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD **10**
I TEORETICKÁ ČÁST **12**
1 POLYPROPYLEN **13**
1.1 VÝROBA POLYPROPYLENU 13
1.2 VLASTNOSTI PP 13
1.2.1 Struktura PP 14
1.2.2 Modifikace vlastností PP 15
2 POLYMERNÍ KOMPOZITY **17**
2.1 VLASTNOSTI POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ 17
2.2 ČLENĚNÍ POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ: 18
2.3 POLYMERNÍ KOMPOZITY PLNĚNÉ SKLENĚNÝM VLÁKNEM 19
2.3.1 Vlastnosti skleněných vláken 19
2.3.2 Rozhraní vlákno – polymer 20
Mezifáze 20
Vazebné typy 22
2.3.3 Vliv konců vláken: 23
2.3.4 Anizotropie vlastností polymerů plněných vlákny 24
2.4 TERMOPLASTY PLNĚNÉ DLOUHÝM SKELNÝM VLÁKNEM 24
2.4.1 Výroba termoplastů plněných dlouhým skelným vláknem 24
Pultruze 24
In-Line Compounding (ILC) 25
2.4.2 Vlastnosti termoplastů plněných dlouhým skelným vláknem 26
Vliv délky vlákna na vlastnosti termoplastů plněných dlouhým vláknem 27
Vliv kompatibilizátoru na vlastnosti termoplastů plněných LGF 30
2.4.3 Aplikace PP plněného LGF 34
3 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ **35**
3.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS 35
3.2 ZPRACOVATELSKÁ OBLAST PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ 36
3.3 SMRŠTĚNÍ 37
3.3.1 Průběh smrštění 37
3.3.2 Vliv podmínek vstřikování na smrštění 38
3.4 VSTŘIKOVACÍ STROJ 38
3.5 VSTŘIKOVÁNÍ PP PLNĚNÉHO LGF 39
3.5.1 Vliv podmínek zpracování na délku vlákna 39
3.5.2 Obecná doporučení pro zpracování granulátů plněných LGF 40
4 ZKOUŠKY POLYMERŮ **43**
4.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA 43
4.2 RÁZOVÁ A VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST 44
4.2.1 Rázová a vrubová houževnatost metodou Charpy 45
4.3 TERMOMECHANICKÁ ANALÝZA (TMA) 46
4.3.1 Měření teplotní roztažnosti pomocí TMA 46
II PRAKTICKÁ ČÁST **48**

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE 49
6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES 50
6.1 POUŽITÉ MATERIÁLY 50
6.1.1 PP+LGF 50
6.1.2 PP+SGF 50
6.2 VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES 51
6.2.1 Použité zařízení 52
6.2.2 Vstřikování lopatek 53
6.2.3 Vstřikování destiček 54
6.2.4 Dodatečná úprava vzorků 55
7 METODY MĚŘENÍ 57
7.1 SLEDOVÁNÍ DÉLKY VLÁKEN V NESPALITELNÉM ZBYTKU 57
7.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA 58
7.3 RÁZOVÁ ZKOUŠKA CHARPY 58
7.3.1 Zkušební tělesa 60 x 10 x 2 mm 58
7.3.2 Zkušební tělesa 60 x 10 x 4 mm 59
7.4 TEPLOTNÍ DÉLKOVÁ ROZTAŽNOST 59
8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A DISKUZE 61
8.1 SLEDOVÁNÍ DÉLKY VLÁKEN V NESPALITELNÉM ZBYTKU 61
8.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA 64
8.3 RÁZOVÁ ZKOUŠKA CHARPY 67
8.3.1 Zkušební tělesa 60 x 10 x 2 mm 67
8.3.2 Zkušební tělesa 60 x 10 x 4 mm 70
8.4 TEPLOTNÍ DÉLKOVÁ ROZTAŽNOST 72
ZÁVĚR 74
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 76
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 80
SEZNAM OBRÁZKŮ 83
SEZNAM TABULEK 86
SEZNAM GRAFŮ 87
SEZNAM PŘÍLOH 88

ÚVOD

Od 70. let 20. století dochází k prudkému rozvoji průmyslových aplikací polymerních kompozitů. Tento rozvoj umožnil intenzivní materiálový výzkum, objevy matric a vláken s novými vlastnostmi. Dalším aspektem byl také vývoj v oblasti mechanizace a automatizace umožňující velkoobjemovou výrobu. Obě skutečnosti umožnily zařadit polymerní kompozity mezi běžné konstrukční materiály s potenciálem aplikací jako náhrady klasických materiálů. [1]

V oblastech použití, ve kterých byly na základě požadavků na mechanické vlastnosti aplikovány především kompozity na bázi termosetů, došlo v 80. letech minulého století k novému materiálovému trendu, kterým je využití kompozitů s termoplastickou matricí. Dosavadní zpracovatelské technologie určené pro klasické kompozity plněné skleněným vláknem nebyly svojí efektivitou a produktivností srovnatelné s technologiemi určenými pro zpracování termoplastů. Jedním z materiálů využívaných v kompozitech s termoplastickou matricí, který našel široké uplatnění v průmyslových aplikacích, je polypropylen. [2]

Materiály na bázi polypropylenu plněného skleněným vláknem prošly rychlým vývojem od výzkumu k významnému nárůstu jejich využití. Stalo se tak díky efektivním zpracovatelským technologiím, především technologii vstřikování, možnosti recyklace, nízké hustotě a dobrému poměru cena-výkon. Významným vlivem byl především zájem vývojářů v aplikacích určených pro automobilový průmysl. Toto odvětví průmyslu je od počátku tohoto století pod silným tlakem ke snižování emisí oxidu uhličitého, které nutí konstruktéry automobilů ke snižování spotřeby paliv. Jedním z kroků vedoucích k tomuto cíli je snižování hmotnosti vozidel. Je proto snahou výrobců nahradit kovové materiály a klasické konstrukční plasty novými materiály s co nejnižší měrnou hmotností. [3]
Využití polypropylenu plněného dlouhým skleněným vláknem ve vstřikovaných výliscích otevřelo další možnosti aplikací tam, kde již kompozity plněné krátkými vlákny nestačily plnit požadavky na jejich vlastnosti. Takto vyztužené typy polypropylénových polymerů a kopolymerů získávají mechanické vlastnosti, které dříve splňovaly jen technické polymery jako např. PA 6 a PA 66 . Polymery PP vyztužené dlouhými skleněnými vlákny mají nižší hustotu a plastové díly vstřikované z tohoto PP nižší hmotnost. Také cena těchto polymerů je nižší. Budeme-li uvažovat u PA 6 a PA 66 plněných krátkým vláknem s cenou v rozpětí 3 – 5 EUR za 1 kg granulátu, a cenou PP plněného dlouhým vláknem s cenou okolo 2 EUR

za 1 kg, získáváme, spolu se sníženou hmotností, výraznou úsporu materiálových nákladů, která se může činit až 40%. [4]

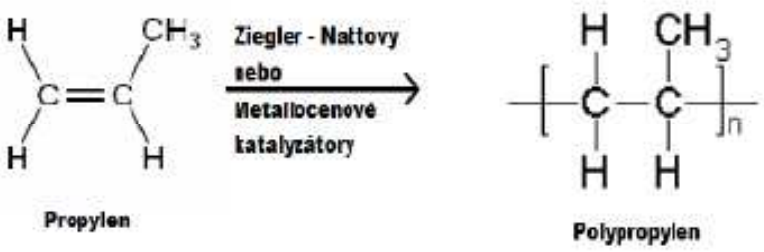
Z výše popsaných důvodů získává polypropylen plněný dlouhým vláknem zaslouženou pozornost. Jestliže však chceme z tohoto materiálu získat maximum jeho schopností, je třeba se zaměřit také na problematiku jeho zpracování, které může významným způsobem ovlivnit uživatelské vlastnosti finálního výrobku. Techničtí pracovníci zpracovatelských firem musí proto zajistit odpovídající podmínky jak pro dodržování technologických parametrů doporučených výrobcem, vhodného strojního vybavení, konstrukce vstřikovacích forem, tak i proškolení pracovníků podílejících se na zpracovatelském procesu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYPROPYLEN

1.1 Výroba polypropylenu

Polypropylen se vyrábí iontovou suspenzní polymerací, nebo polymerací v plynné fázi s aplikací ZN katalyzátorů, nebo nejmodernějších katalyzátorů na bázi metalocenů (např. methylaluminiumoxid). Použití metalocenových katalyzátorů umožňuje přípravu polymerů s užší distribucí molekulových hmotností, lepšími mechanickými vlastnostmi. [5]. Schéma přípravy polypropylenu zobrazuje Obr. 1.



Obr. 1: Polymerace polypropylenu [3]

1.2 Vlastnosti PP

Polypropylen je nepolární, částečně krystalický polymer se stupněm krystalinity 60-70%. Vlastnosti PP závisí na stupni krystalinity, molekulové hmotnosti, stupni polydispezity a stereoizomerii. Vliv takticity na vlastnosti PP můžeme porovnat v Tabulce 1 [6].

Tabulka 1: Vlastnosti jednotlivých stereoizomerů polypropylenu [3]

Vlastnost	**Izotaktický**	**Syndiotaktický**	**Ataktický**
Hustota (kg/m^3)	920 - 940	890 - 910	850 - 900
Teplota tání (°C)	165	135	-
Mez kluzu	vysoká	střední	Velmi nízká

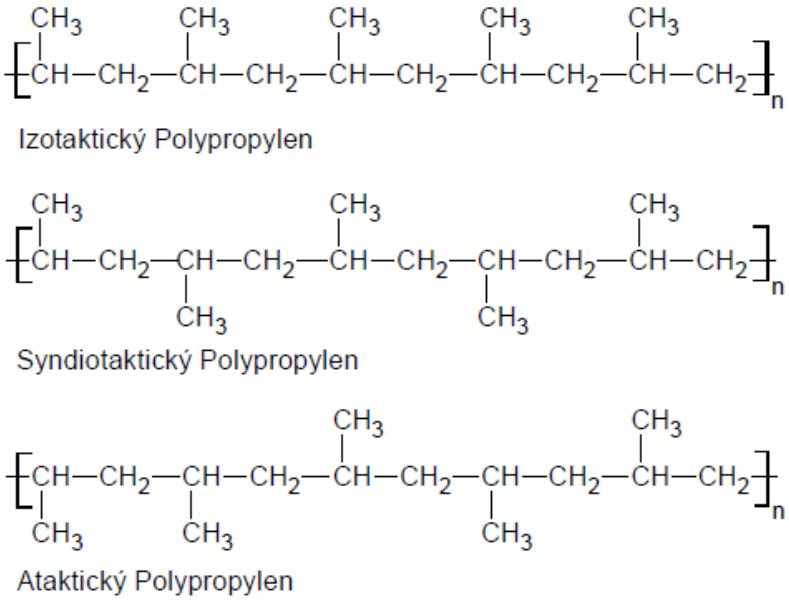
PP křehne při teplotách pod 0°C, což ovlivňuje spodní hranici jeho teplotní použitelnosti. Doporučená teplotní oblast pro aplikace výrobků z PP je od 10°C do 100°C, a v případě krátkodobého použití až do 135°C. Oproti ostatním polyolefinům se u něj projevuje nižší koroze za napětí. Díky své nepolární struktuře má dobré elektroizolační vlastnosti. Polypropylen je vysoce chemicky odolný kyselinám a zásadám, má nižší odolnost vůči alifatickým a aromatickým rozpouštědlům. Vyznačuje se nízkou odolnosti vůči oxidaci a povětr-

nostním vlivům. Vlivem degradace dochází ke snížení tažnosti, houževnatosti a zvýšení křehkosti [6].

1.2.1 Struktura PP

Molekulární struktura PP je závislá na prostorovém uspořádání monomerních jednotek, tak jak vidíme na Obr. 2. Monomerní jednotky jsou nesymetrické, a proto mohou být v makromolekule uspořádány různým způsobem. Z tohoto hlediska dělíme polypropylen:

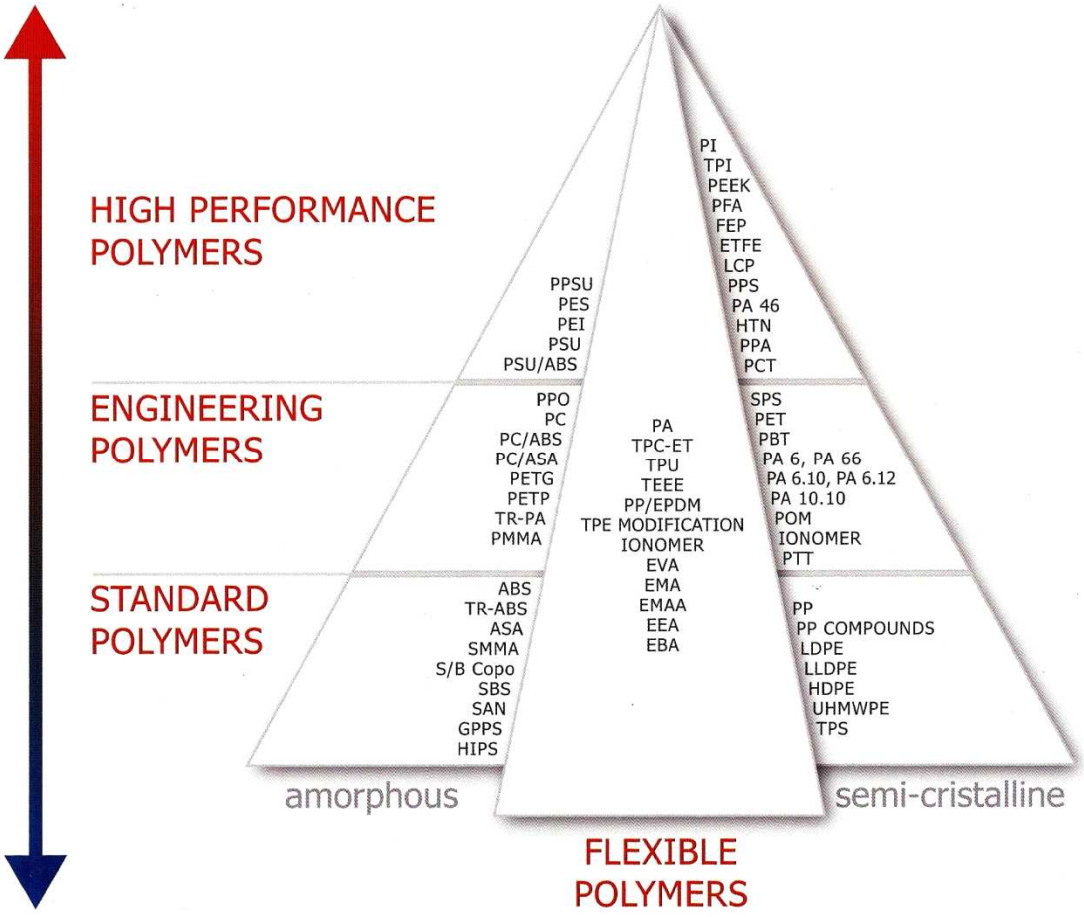
1. Izotaktický PP (iPP): methylové skupiny jsou pravidelně umístěny pouze na jedné straně hlavního uhlíkového řetězce. Tvar makromolekuly šroubovicový, jeden její závit je tvořený třemi monomerními jednotkami. Toto uspořádání umožňují ukládání šroubovic do krystalických oblastí.
2. Syndiotaktický PP (sPP): je schopen krystalizace, methylové skupiny se pravidelně střídají po obou stranách řetězce. Oproti iPP má vyšší ohebnost řetězce, která umožňuje vznik molekulárních zapletenin v tavenině. Tato vlastnost má za následek zlepšení některých vlastností jako odolnost UV záření, elasticita, odolnost proti přetržení.
3. Ataktický PP (aPP): vlivem nahodilého střídání methylových skupin podél hlavního řetězce má ataktický PP zcela amorfní strukturu, což ovlivňuje jeho vlastnosti – je rozpustný v široké škále rozpouštědel, je lepivý a má nízkou molekulovou hmotnost. Z těchto důvodů je nepoužitelný jako konstrukční materiál.[3]



Obr. 2: Konfigurace polypropylenu [7]

1.2.2 Modifikace vlastností PP

Jak můžeme vidět na Obr. 3, polypropylen je obecně řazen do skupiny standardních polymerů. Tento materiál se však díky širokému rozsahu modifikací vlastností stává konstrukčním materiálem dle požadavků na konkrétní aplikace.



Obr. 3: Rozdělení polymerů dle výkonu a struktury [8]

Mezi nejvýznamnější modifikace PP můžeme zařadit:

4. Kopolymery: výroba blokových, nebo statistických kopolymerů s alifatickými uhlovodíky, především s PE. Tyto kopolymery se vyznačují zvýšenou rázovou houževnatostí a sníženou Tg až k hodnotám -50°C.
5. Termoplastické elastomery: mísením s EPM, nebo EPDM kaučuky získává polymer vícefázovou strukturu, jejíž spojitou fází je polypropylen, ve kterém jsou rozptýleny kaučukové částice. Termoplastické kaučuky na bázi PP se vyznačují vysokou odolností

vůči ozonu, kyslíku a polárním rozpouštědlům, sníženým Tg a tím zvýšení houževnatosti až k -60°C.

6. Kompozity plněné minerálními plnivy: běžně používaná minerální plniva jsou vápenec, talek, kaolín, křída, slída, wollastonit. Přínosem plnění je zvýšení modulu pružnosti, tepelné a chemické odolnosti, odolnosti proti poškrábání, rozměrové stability, snížení smrštění, anizotropie vlastností a ceny.
7. Kompozity plněné vlákny: např. vlákna skleněná, uhlíková, kevlarová. PP plněný vlákny získává vyšší modul pružnosti, rozměrovou stabilitu, teplotní odolnost, pevnost a rázovou houževnatost. [3, 6]

2 POLYMERNÍ KOMPOZITY

2.1 Vlastnosti polymerních kompozitů

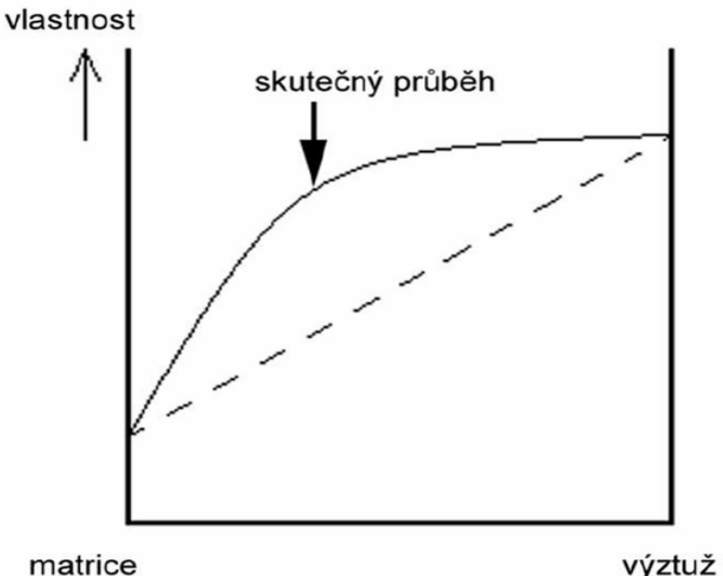
Kompozity jsou složené heterogenní systémy tvořené alespoň dvěma fázemi. Vícefázový materiál, který je možno zařadit mezi kompozitní materiály, se vyznačuje charakteristickými vlastnostmi.

- Obě fáze mají obvykle rozdílné chemické složení.
- Fáze se liší svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi.
- Matrice je spojitá a obvykle poddajnější složka, zastávající funkci pojiva výztuže. Úkolem matrice je zajištění tvaru výrobku, zavedení a přenos sil na vlákna při zatížení, ochrana plniva.
- Výztuž je nespojitá složka, na rozdíl od matrice je mnohem pevnější a tužší a má lepší mechanické vlastnosti. Podíl výztuže musí být větší než 5%.
- Kompozit musí být připraven mísením složek.

Za kompozit nepovažujeme například plast, obsahující malá množství tuhých barviv, částic sazí, oxidů nebo částic eleastomerů.

Výsledné vlastnosti kompozitu závisí na rozložení a vzájemném ovlivňování jeho jednotlivých složek. Významnými ukazateli vlastností jsou koncentrace výztuže, která se udává objemovým podílem nebo hmotnostním podílem složek, a míra homogenity a rovnoměrnosti systému. [9, 10]

Synergické chování kompozitů je charakteristickým jevem vyskytujícím se u kompozitů. Jak ukazuje Obr. 4, jeho projevem je skutečnost, že vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Existence synergismu je velmi významná, jelikož umožňuje získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností.[11]

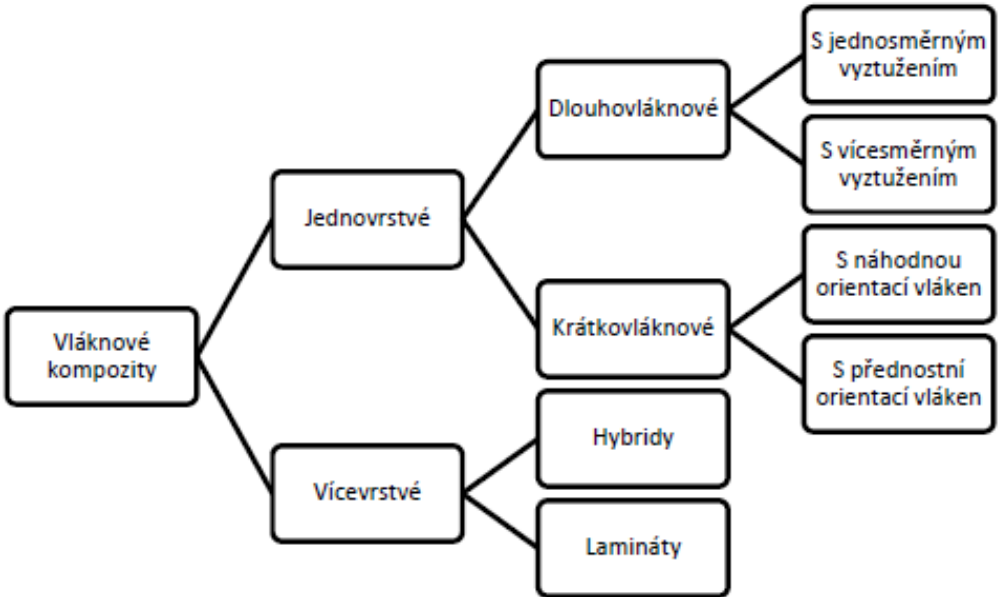


Obr. 4: Synergické chování složek kompozitu [11]

2.2 Členění polymerních kompozitů:

Polymerní kompozity můžeme rozdělit dle několika hledisek, například podle vlastností výztuže nebo druhu matrice. Jako kritérium se také používá geometrický tvar, velikost, orientace a rozměry vyztužujících částic.

1. Dle geometrického tvaru sekundární fáze (plniva) dělíme na kompozity s částicovými, vláknovými plnivy, hybridní kompozity (kombinované systémy plniv).
2. Dle prostorové orientace vyztužujících vláken je dělíme na jednosměrné, kdy jsou vlákna orientována převážně v jednom směru, a mnohosměrné, kdy jsou vlákna náhodně nebo pravidelně orientována dvěma, nebo více směry. Toto dělení kompozitů znázorňuje Obr. 5.
3. Dle velikosti plniva rozdělujeme kompozity na krátkovláknové, u nichž je poměr L/D<100 (délka/průměr vláken - aspektní poměr), dlouhovláknové: poměr L/D> 100. Dále na kompozity s kontinuálními vlákny, která obsahují vlákna s délkou odpovídající rozměrům celého dílce, mikrokompozitní materiály, u nichž jsou příčné rozměry výztuže 10^0 až 10^2 μm, makrokompozity, kde je velikost příčného rozměru výztuže je 10^0 až 10^2 mm, a nanokompozity, kde se alespoň jeden rozměr výztuže se pohybuje v jednotkách nm. [9]



Obr. 5: Rozdělení vláknových kompozitů dle poměru výztuže [9]

2.3 Polymerní kompozity plněné skleněným vláknem

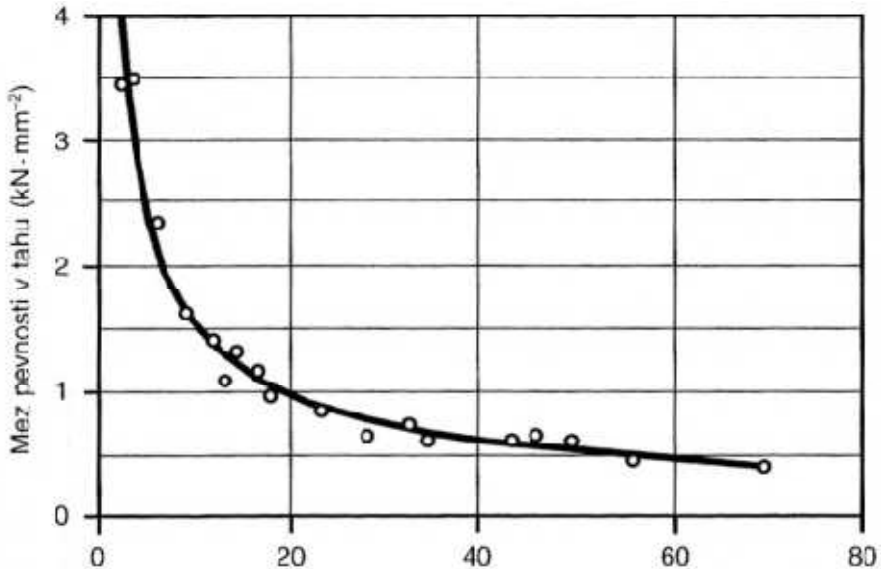
2.3.1 Vlastnosti skleněných vláken

Textilní skleněná vlákna (GF – Glass Fiber) jsou nejrozšířenější vláknové plnivo do polymerních kompozitů. Jsou to tenká vlákna s kruhovým průřezem o rozměru 3,5 – 24 μm, vyráběná tažením z roztavené skloviny. Materiálem pro výrobu vláken jsou různé typy sklovin s rozdílnými vlastnostmi:

- E-sklovina: nejběžnější, až 90% podíl na trhu, vápenaté, aluminium-borosilikátové sklo s vynikajícími elektroizolačními vlastnostmi.
- S-sklovina: s vyšším obsahem oxidů Si, AL, Mg. Vyznačuje se o 40-70% vyšší pevností (S-strengh). U evropských výrobců označována také jako R-sklovina (R-resistence).
- C-sklovina, ECR-sklovina, A*R-sklovina*: materiály s vysokou chemickou odolností.

Skleněná vlákna jsou izotropní, mají shodné vlastnosti ve všech směrech, což se projevuje např. u modulu pružnosti, pevnosti v tahu, součinitele teplotní délkové roztažnosti. Pevnost v tahu je vyšší než u většiny organických i anorganických vláken. Tepelné vlastnosti skleněných vláken překonávají tepelné vlastnosti ostatních materiálů, nedochází ke snížení hodnot mechanických vlastností ani při dlouhodobém namáhání při 250°C. S velikostí prů-

řezu vláken souvisí jeho pevnost v tahu, které klesá současně s jeho zvětšující se tloušťkou. Tuto závislost ukazuje Obr. 6.



Obr. 6: Závislost pevnosti skleněného vlákna na jeho průřezu (vodorovná osa udává průřez vlákna v μm) [12]

Pro kompozity plněné krátkým vláknem jsou používána především skleněná vlákna ze skloviny E (s modulem pružnosti v tahu 70 až 80 GPa, tahovou pevností 2 až 3,5 GPa). Klasicky se kompozit připravuje smíšením taveniny polymeru a 3 až 12 mm dlouhých vláknem, připravených sekáním pramenů. Při homogenizaci směsi dochází k lámání vláken na délky menší než 1 mm. Semikrystalické matrice kompozitů určených pro vstřikování umožňují, vzhledem ke své tekutosti, vyšší plnění a to až do obsahu 50%. U amorfních polymerů s horší tekutostí nelze takto vysoké plnění aplikovat.[12, 13]

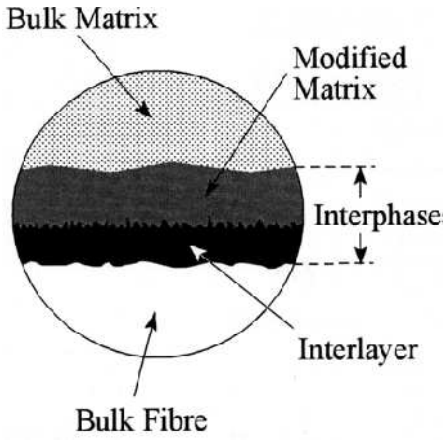
2.3.2 Rozhraní vlákno – polymer

Mezifáze

Na velikost přenosu napětí z matrice do vyztužujících vláken má zásadní vliv tenká hraniční vrstva na rozhraní vlákno-polymer, která se nazývá mezifáze. Pokud dojde k dokonalé adhezi vlákna k polymerní matrici, nesou vyztužující dlouhá vlákna veškeré napětí v kompozitu a deformovatelná matrice nenese napětí téměř žádné.

V případě, že vyztužující vlákna nejsou nijak povrchově upravena, polymerní matrice pak může nebo nemusí být ovlivněna přítomností vláken. Jedná se o tzv. neřízenou mezifázi.

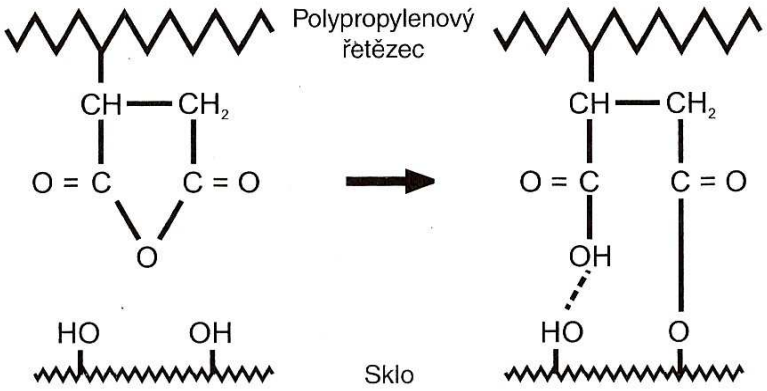
Adheze povrchově neupravených vláken je vzhledem k matrici obvykle špatná. Řízenou mezifází docílíme zajištění dokonalé adheze vlákno-polymer a vytvoření vazeb mezifáze jak k výztuži, tak k matrici. Schéma řízené mezifáze kompozitu vidíme na Obr. 7. [13]



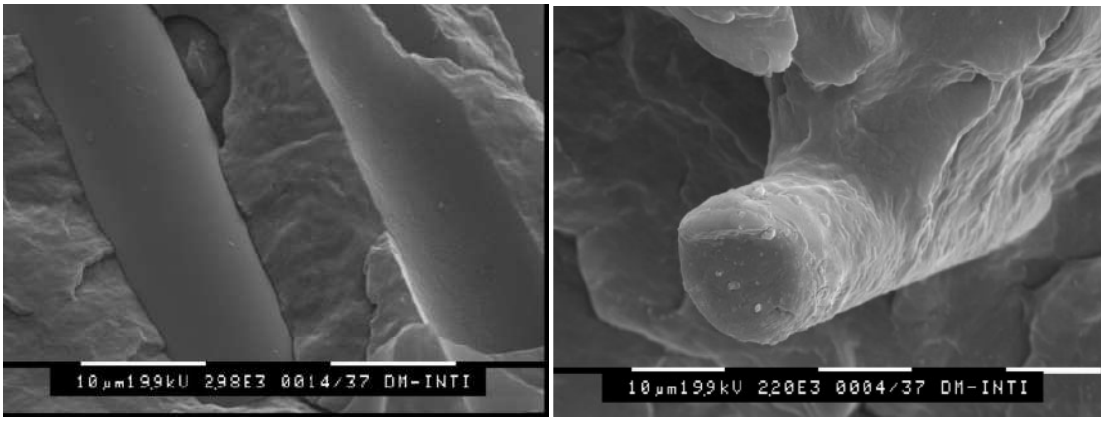
Obr. 7: Schematický obrázek mezifáze kompozitu [13]

Příklady způsobů tvorby řízené mezifáze:

1. Organosilanovými vazebnými činidly typu R-Si-X_3, jejichž principem je vytvoření pevné vazby mezi oxidy na povrchu vlákna a molekulami polymeru tvořícími matrici. X představuje hydrolyzovatelné skupiny, uhlovodíkový zbytek odpovídá matrici. U matrice je zásadní přítomnost funkční skupiny, schopné reakce s funkčními skupinami organosilanů. Z tohoto důvodu není použití organosilanů možné u nepolárních polymerů, například polyolefinů.
2. Aplikace povrchu reaktivními činidly, například pomocí reaktivního chloridu křemičitého ($SiCl_4$).
3. Použití kopolymerů, např. kopolymerace polypropylenu, která umožňuje zvýšení adheze k plnivům, a to roubováním řetězce anhydridem kyseliny maleinové (MA). Takto vzniklý kopolymer PP-g-MA je schopný interagovat s polárními plnivy pomocí svých bočních skupin. Princip a účinky této interakce vidíme na Obr. 8 a Obr. 9. [14]



Obr. 8: Princip vazby mezi povrchovou vrstvou skla a PP řetězcem s naroubovaným PP-g-MA [12]

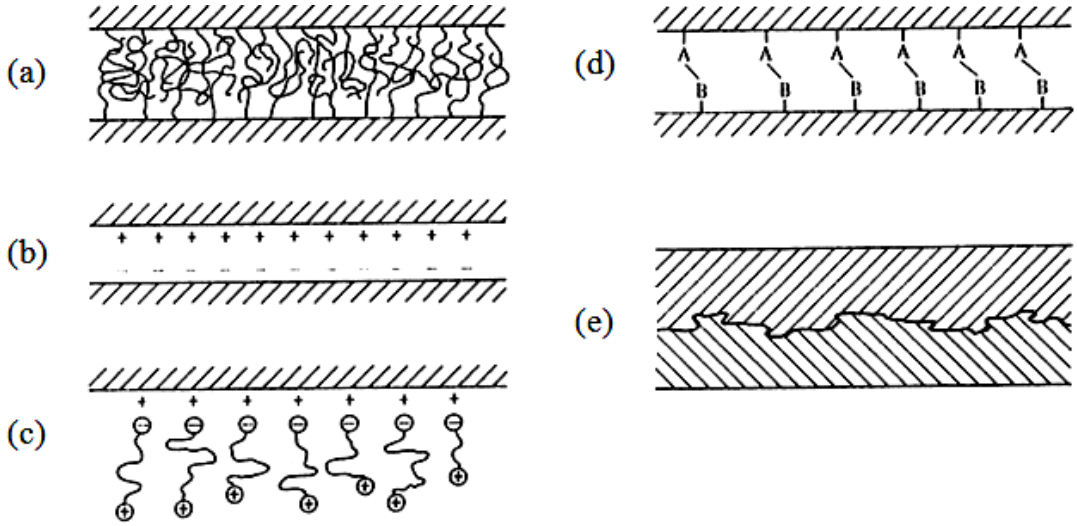


Obr. 9: Snímky ze SEM – kompozit plněný 30 % GF (zleva: bez přídavku kopolymeru; s přídavkem 10 hm. % PP-g-MA) [15]

Vazebné typy

Druh vazby mezi vláknem a matricí je dalším faktorem kvality adheze. Mezi povrchem vlákna a matricí se uplatňují slabé interakce pomocí Van der Walsových sil, elektrostatických přitažlivých sil a sil mechanických v případě drsností povrchů. Dominantní vazebnou silou jsou však síly chemické. Obecně platí, že skleněná vlákna mají na povrchu přítomny adsorbované molekuly vody nebo hydroxylové skupiny, které slouží jako reaktivní skupiny pro ukotvení řízených mezivrstev. Obr. 10 ukazuje principy působení sil na rozhraní vlákno-polymer, kde jsou mezifázové vazby tvořené (a) molekulovým zapletením, (b) elektro-

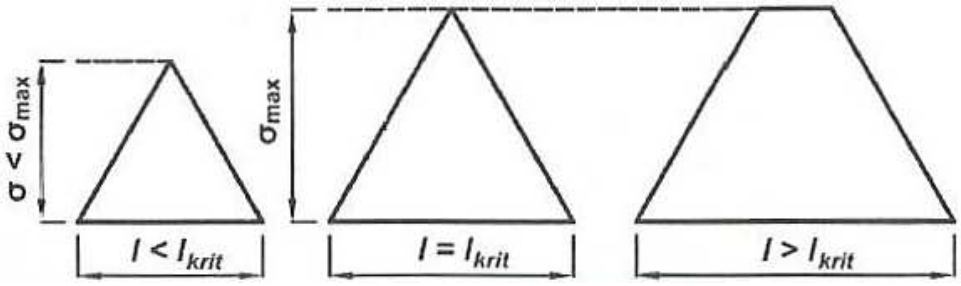
statickou interakcí, (c) kationovými skupinami na koncích molekul přitahovanými k aniontovému povrchu, (d) chemickou reakcí, (e) mechanickým spojením. [13]



Obr. 10: Principy působení sil na rozhraní vlákno-polymer. [16]

2.3.3 Vliv konců vláken:

V krátkovláknových kompozitech vyztužených diskontinuálními vlákny se projevuje vliv konců vláken. Z tohoto důvodu jsou jejich vlastnosti výrazně závislé na délce vlákna. Při zatěžování takového kompozitu nepůsobí zatížení přímo na vlákna, ale přenáší se z matrice do vláken smykovým napětím, působícím na povrchu. Přes matrici je na vlákna přenášeno adhezí. Konec vlákna napětí nepřenáší. S prodlužující se délkou vlákna se postupně přenáší napětí čím dál větší, až dosahuje maxima, které je dále konstantní. Součet vlivů obou konců vlákna, která nepřenáší napětí je roven kritické délce vlákna. Vliv délky vlákna na přenos napětí zobrazuje Obr. 11. V případě délky vláken kratších, než kritických, nedojde při zatížení v tahu k přerušení vláken, ale pouze k jejich vytahování z matrice. Pevnost kompozitu pak bude závislá pouze na pevnosti matrice. [18]



Obr. 11: Vliv délky vlákna na přenos namáhání z matrice na výztuž [17]

2.3.4 Anizotropie vlastností polymerů plněných vlákny

V případě materiálů plněných vlákny se projevuje anizotropie mechanických i fyzikálních vlastností výstřiků výrazněji než u materiálů neplněných, nebo plněných částicovými plnivy. Anizotropii výrazně ovlivňuje orientace vláken, kdy jsou vlastnosti dílů ve směru toku taveniny v rozhodující míře ovlivněny skleněnou výztuží, zatímco ve směru kolmém na tok taveniny jsou ovlivněny použitou matricí. [20]

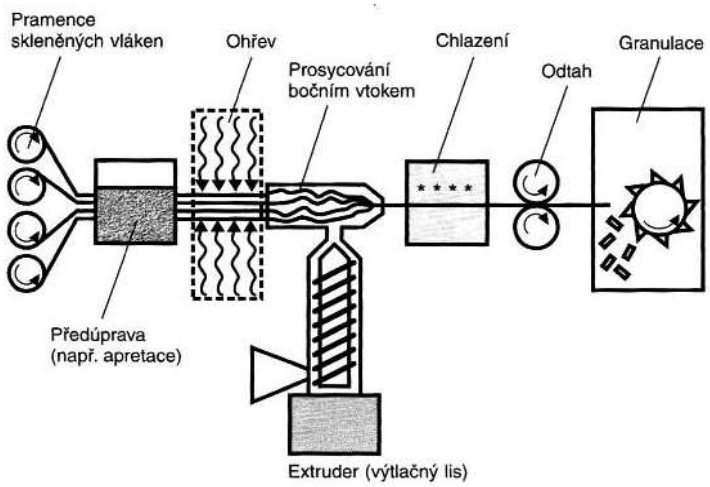
2.4 Termoplasty plněné dlouhým skelným vláknem

Od roku 1990 se začaly vyrábět tzv. dlouhovláknové kompozity, označené jako LFRT ("Long Fiber Reinforced Thermoplastic"), příp. jako kompozity plněné LGF („Long Glass Fiber"). V tomto případě se nejedná o klasické kompozity s obsahem dlouhých kontinuálních vláken, ale o kompozity plněné krátkým vláknem o větší délce, která se pohybuje obvykle od 7 do 25 mm. Jako matrice pro výrobu LFRT kompozitů jsou používány převážně semikrystalické termoplasty. [18]

2.4.1 Výroba termoplastů plněných dlouhým skelným vláknem

Pultruze

Principem klasického postupu výroby LFRT kompozitů je metoda nazývaná pultruze. Princip této metody ukazuje Obr. 12. Pultruze je kontinuální proces výroby, při kterém jsou kontinuální skleněná vlákna prosycována polymerem a následně ochlazena do tvaru strun. Následuje sekání na granulát potřebné délky



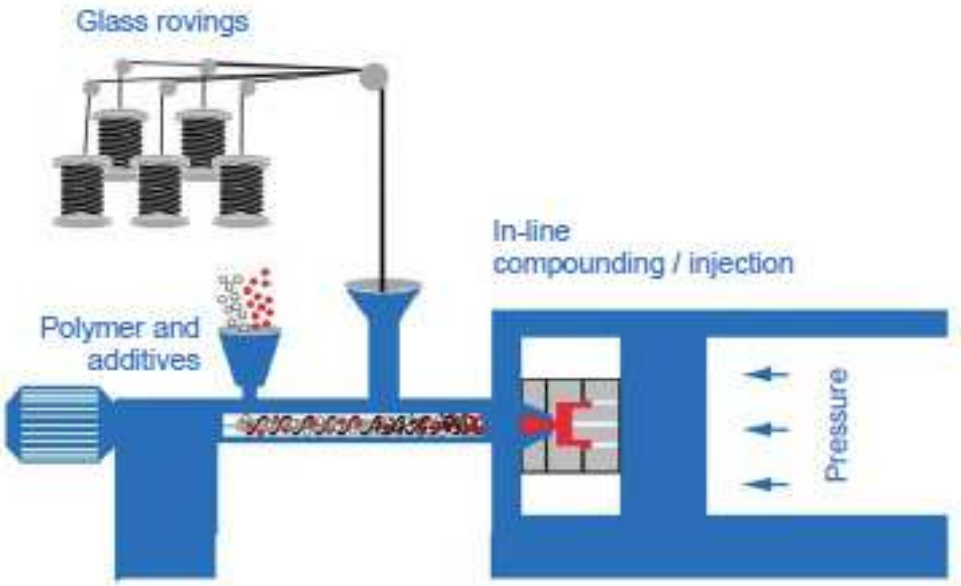
Obr. 12: Pultruzní zařízení na výrobu LFT [12]

In-Line Compounding (ILC)

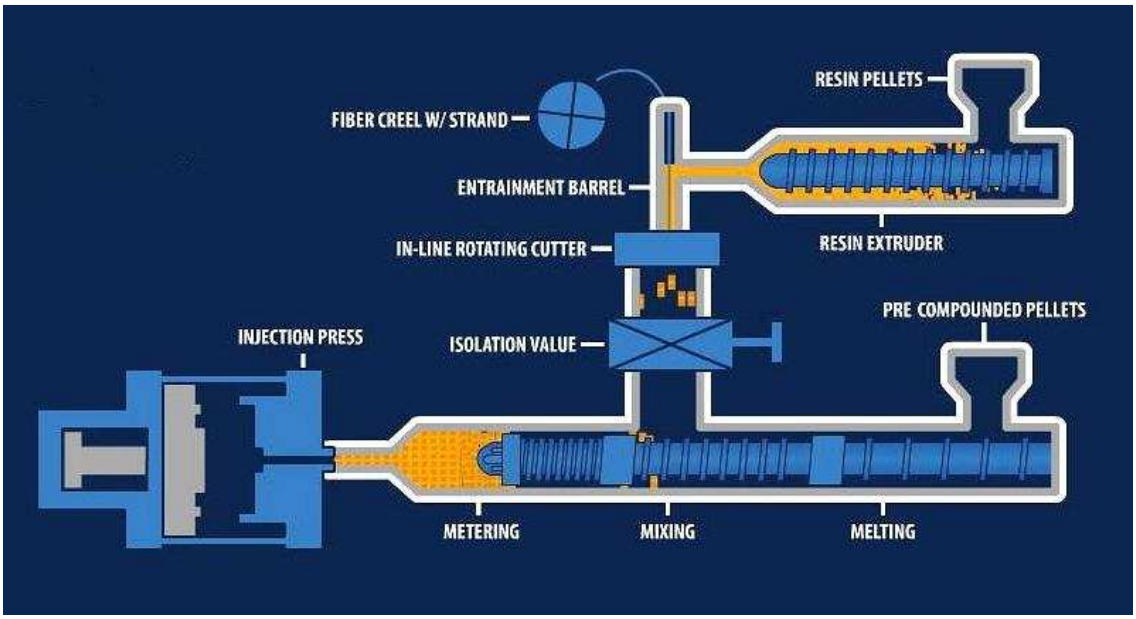
Novější metodou výroby je systém ILC ("In-Line Compounding"), při kterém je připravován dlouhovláknový kompozit přímo u vstřikovacího lisu. Metoda výroby je označována D-LFT - "Direct Long-Fiber Thermoplastic". Pramence skleněných vláken jsou vedeny do dvoušnekového vytlačovacího stroje, zde jsou řezány a míseny s taveninou. Speciální elementy dvoušneku oddělují jednotlivá vlákna pramenců skleněných vláken k zajištění dokonalé homogenizace směsi za účelem vytvoření kompozitního materiálu s jednotnými vlastnostmi. Definovanou délku vláken pak určuje profil šneků. Následuje vytlačování, nebo vstřikování taveniny do formy. Tento princip výroby vidíme na Obr. 13.

Obr. 14 zobrazuje druhý postup ILC, při kterém jsou pelety připraveny u vstřikovacího lisu a následně ihned dávkovány.

Výhodou ILC technologie je úspora výrobních nákladů, vyloučení jednoho ohřevu polymeru a s tím související pozitivní vliv na vlastnosti materiálu.[12, 18]



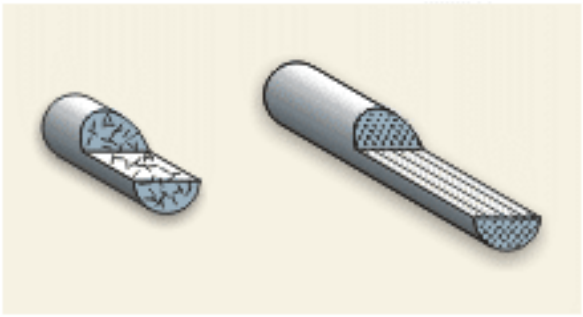
Obr. 13: Princip výroby LFRT metodou ILC (D-LFT) [21]



Obr. 14: Princip výroby LFRT metodou ILC [22]

2.4.2 Vlastnosti termoplastů plněných dlouhým skelným vláknem

Již na první pohled se LFRT kompozity liší tvarem granulátu od kompozitů plněných krátkým vláknem. Granuláty plněné krátkým vláknem obsahují vlána o délkách 0,2-0,4 mm, která jsou neuspořádaně rozptýlena v matrici. Oproti tomu granuláty plněné dlouhým vláknem obsahují kontinuální jednosměrně orientovaná vlákna, jejichž délka je dána délkou granule. Tento rozdíl nám ukazuje Obr. 15. [2]

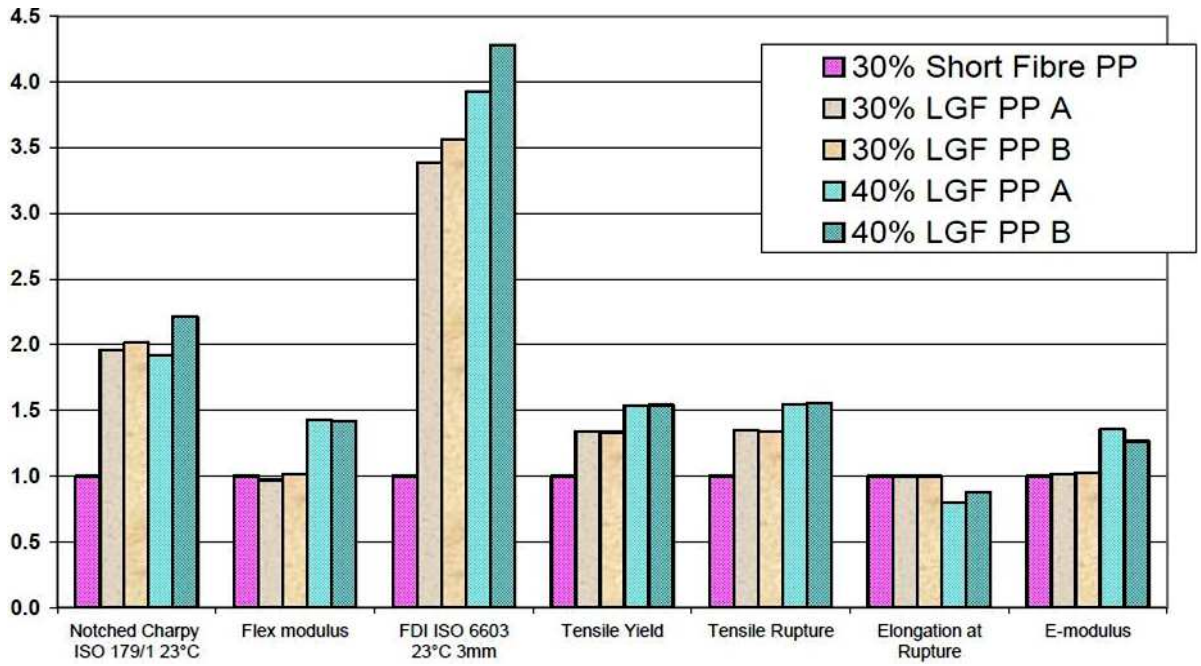


Obr. 15: Tvar granulátu plněného krátkým a dlouhým vláknem (vlevo neuspořádaně rozptýlená skleněná vlákna, vpravo podélně orientovaná dlouhá skleněná vlákna) [2]

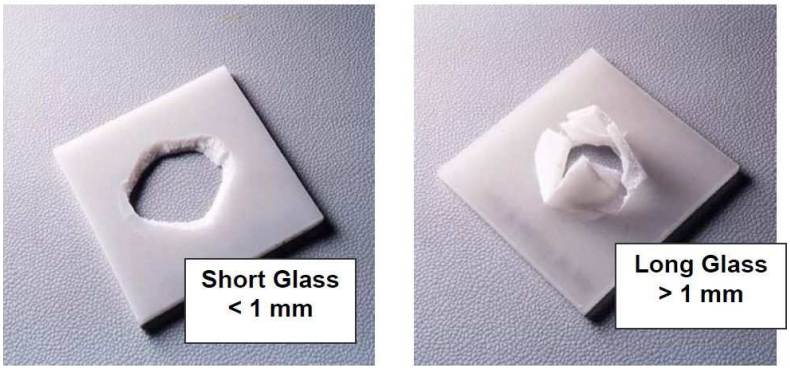
Výsledné vlastnosti výrobků z LFRT jsou silně závislé na délce vlákna, dále na orientaci vláken, obsahu plniva a použité matrici.

Vliv délky vlákna na vlastnosti termoplastů plněných dlouhým vláknem

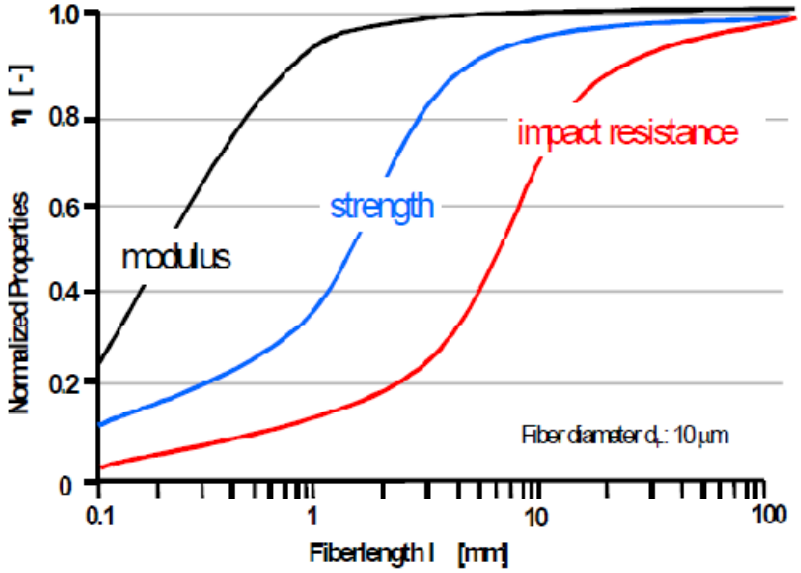
Větší délka „krátkých“ vláken přináší těmto materiálům nové vlastnosti, jako jsou tuhost (modul) při zvýšených teplotách a rázovou houževnatost při nízkých teplotách, což rozšiřuje teplotní oblast použitelnosti výlisků, kde již kompozity plněné krátkými vlákny zaostávají. Tyto materiály také vykazují nižší creep a dobrou rozměrovou stabilitu. Rozdíl mezi vlastnostmi PP plněného krátkým a dlouhým vláknem zobrazuje Graf č. 1, kde jsou srovnávány vlastnosti materiálů PP+30%SGF a PP+30%,40% LGF s rozdílnou matricí. Nejvýraznější rozdíl ve vlastnostech vidíme u rázové zkoušce Charpy a rázové zkoušce ISO 6603 (Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání). Na Obr. 16 můžeme porovnat chování vzorků krátkým a dlouhým vláknem vyztuženého PP po rázové zkoušce. Díky síti tvořené skelnými vlákny odolává rázu lépe PP plněný dlouhými vlákny. Vliv délky vláken na modul pružnosti, pevnost a rázovou houževnatost zobrazuje Graf č. 2. [18, 23]



Graf č. 1: Porovnání vlastností SGFPP a LGFPP kompozitů [23]



Obr. 16: Srovnání rázové zkoušky PP+SGF vs. PP+LGF kompozitu [23]

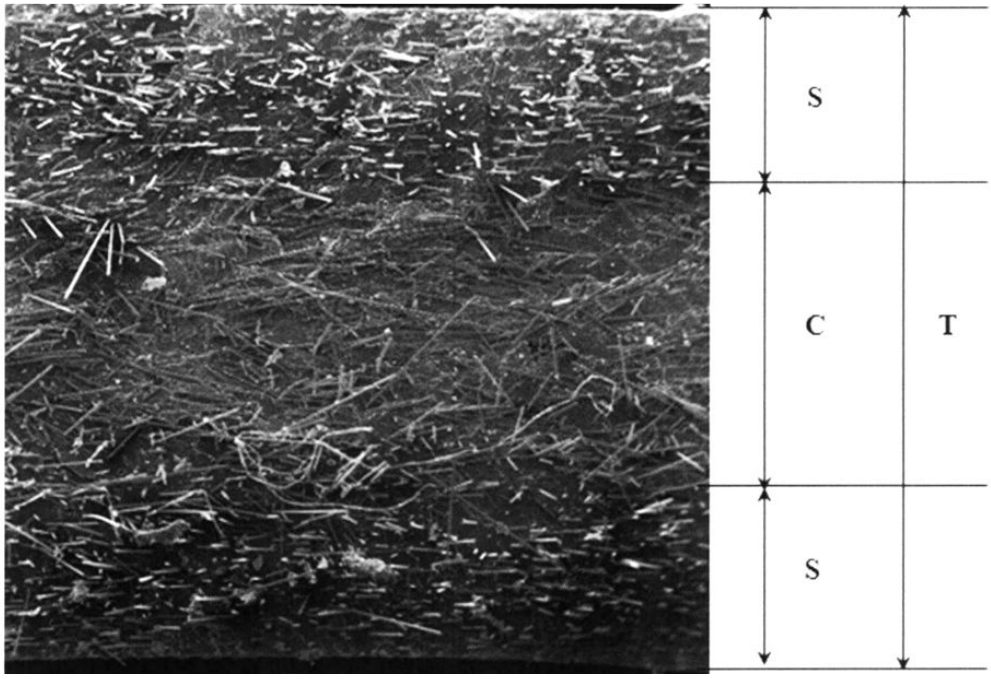


Graf č. 2: Kvalitativní vztah mezi mechanickými vlastnostmi a délkou vlákna u plněného PP [24]

Orientace vláken během vstřikování termoplastů plněných LGF

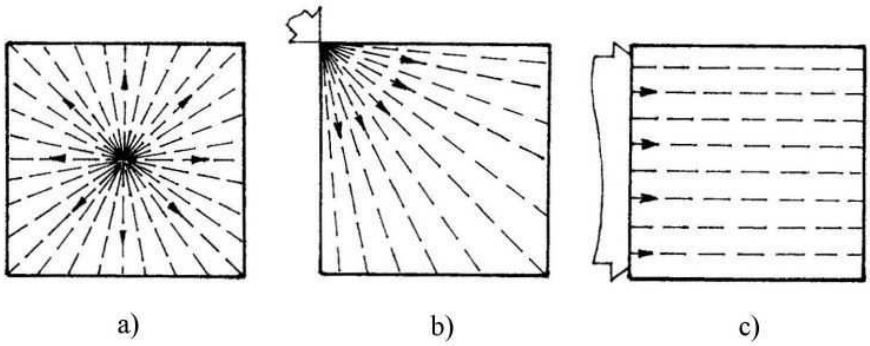
Mikrostruktura vstřikovaných vláknových kompozitů je silně nehomogenní. SEM analýza PPLGF kompozitu ukazuje třívrstvou strukturu, jak je znázorněno na Obr. 17. Ve dvou vnějších vrstvách skořepiny (S) převažuje orientace vláken převážně rovnoběžně ve směru toku. Střední jádrová vrstva (C) obsahuje vlákna orientovaná v příčném směru k toku taveniny. Tento druh vrstvené orientace vláken vzniká v důsledku rozdílu v rychlosti proudění taveniny v oblasti jádra, kde je rychlejší, a rychlosti na stěně formy. Rychlost proudění taveniny v oblasti jádra, je vyšší, než je rychlost proudění taveniny na stěně. Z tohoto dů-

vodu, se orientace vláken v oblasti jádra liší od orientace vláken v oblasti pláště. Dále zde působí interakce vlákno-vlákno a vlákno forma. V oblasti jádra, je interakce mezi vlákny a formou nulová a vlákna jsou zarovnána v příčném směru ke směru toku taveniny v důsledku vyšší interakce mezi vlákny. [25]

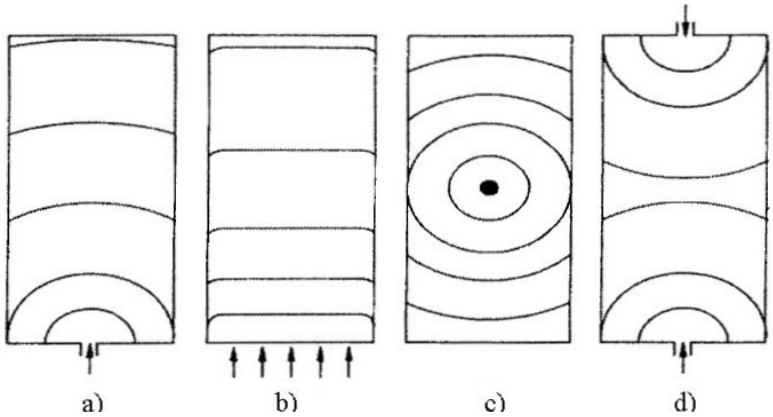


Obr. 17: SEM fotografie LGFPP kompozitu (70x zvětšeno) [25]

Orientace vláken vnáší do vstřikovaného výrobku silnou anizotropii vlastností. Je proto vhodné předpokládat, jak budou ve výstřiku vlákna orientována. Zjednodušeně lze znázornit orientaci vláken v závislosti na použitém vtokovém ústí, jak ukazuje Obr. 18. Na Obr. 19 vidíme, jak ovlivňuje orientaci vláken způsob, kterým probíhá plnění formy, související s umístěním vtokového ústí na výlisku [26]



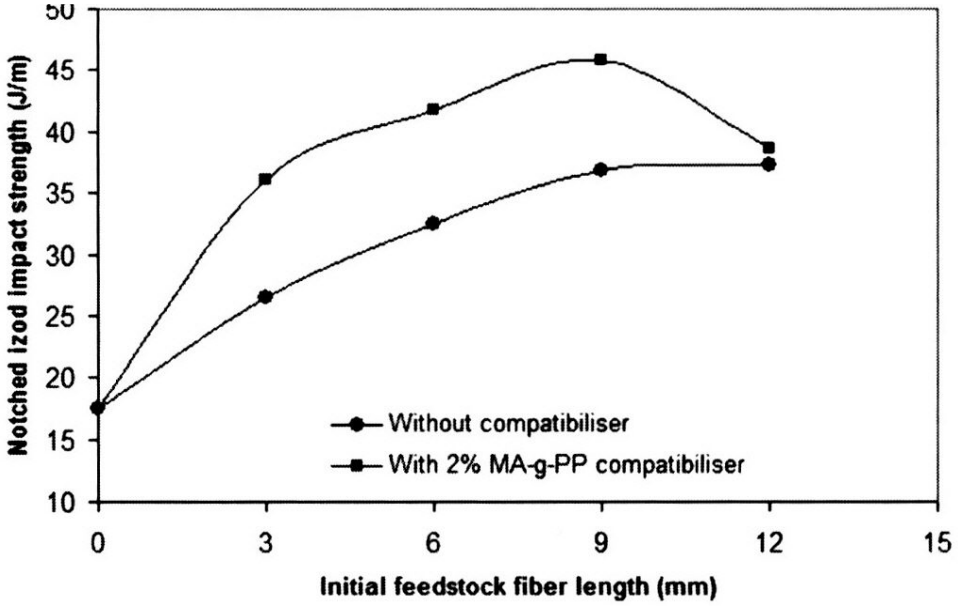
Obr. 18: Vliv umístění vtoku na orientaci vláken: a) centrálně umístěný vtok, b) v rohu umístěný vtok, c) filmový vtok [26]



Obr. 19: Postup plnění dutiny formy taveninou: a) bodový vtok umístěný zboku, b) filmový vtok, c) centrálně umístěný bodový vtok, d) dva protilehlé umístěné bodové vtoky [26]

Vliv kompatibilizátoru na vlastnosti termoplastů plněných LGF

Pozitivní vliv aplikace kompatibilizátoru na vlastnosti LFTR platí stejně, jako u ostatních druhů kompozitů. Dle výsledků práce K. S. Kumara je však nárůst pozitivního vlivu prokazatelný pouze do určité délky vláken. Autor usuzuje, že je tato skutečnost zapříčiněna zkracováním delších vláken během zpracovatelského procesu. [25]



Graf č. 3: Vliv kompatibilizátoru na vrubovou houževnatost PPLGF [25]

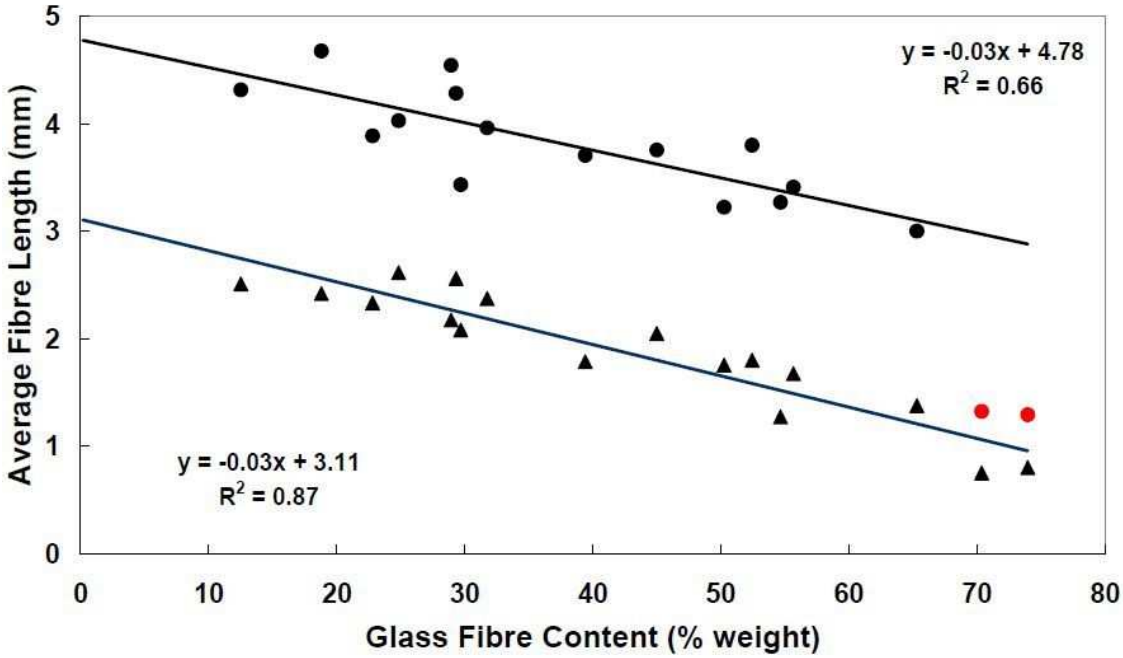
Vliv obsahu skleněných vláken na vlastnosti termoplastů plněných LGF

Hodnoty obsahu vláken se musí pohybovat nad jejich kritickým podílem. Při nižších hodnotách je zpevnění menší a pevnost může být dokonce menší než pevnost samotné matrice. Důvodem je skutečnost, že nepočetná vlákna účinkují spíše jako defekty matrice, než zpevňující fáze. [18]

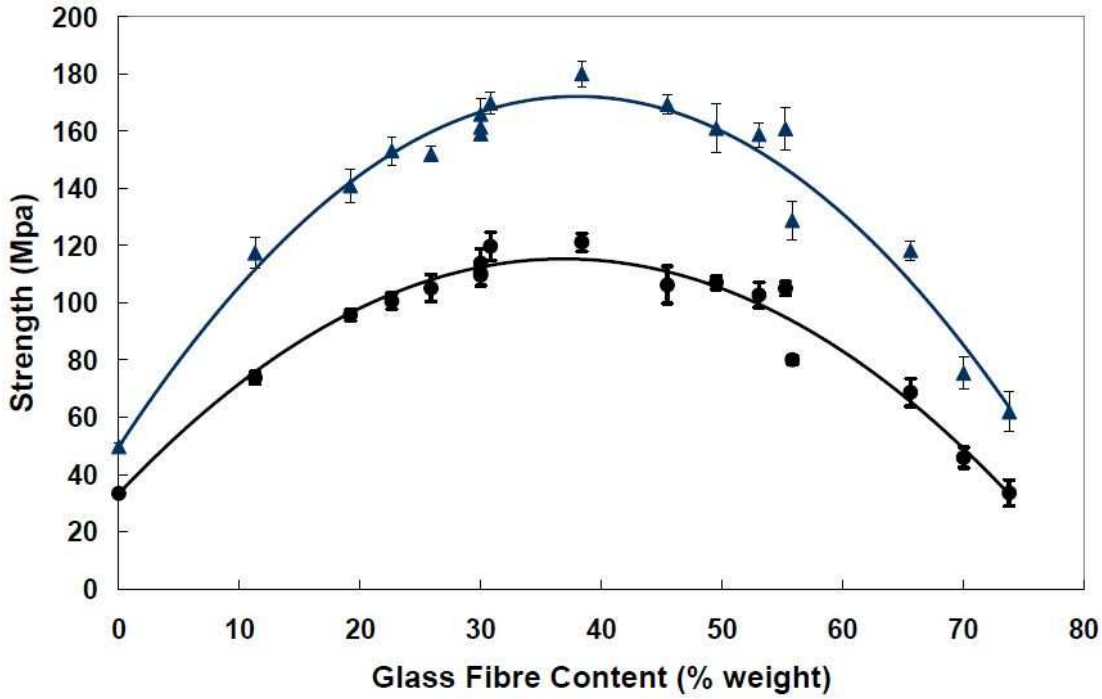
J. L. Thomason, at. al. ve své práci zkoumali vliv obsahu plniva u vstřikovaného PP plněného 0-73% dlouhého vlákna. Studie prokázala, že se zvyšujícím se obsahem skleněných vláken dochází k následujícím změnám vlastností:

1. Lineární nárůst modulu pružnosti v tahu i ohybu.
2. Nárůst pevnosti do maxima při obsahu vláken 40-50%. Při vyšším plnění dochází k poklesu až k hodnotám neplněného PP při 73% obsahu vláken.
3. Tažnost se výrazně snižuje již při minimálním přídavku vláken, následuje pokles lineárně s obsahem vláken.
4. Vrubová houževnatost stoupá do obsahu 40% vláken, následuje pokles, kdy se při obsahu 73% vláken houževnatost blíží neplněnému PP.
5. Rázová odolnost Charpy, se snižuje po přídavku malého množství vláken, při zvyšujícím se obsahu vláken roste. Maxima dosahuje při obsahu 30%. Při teplotách pod T_g, zde měřeno při teplotě -40°C, vykazuje rázová odolnost trend shodný s pevností a vrubovou houževnatostí za pokojových teplot, kdy je dosaženo max. hodnot při 40% obsahu vláken. Při obsahu nad 40% je rázová houževnatost nezávislá na teplotě.
6. Teplotní odolnost HDT, po přidání plniva, dosahuje hodnoty 157 °C, která se blíží teplotě tání PP (165 °C). Při obsahu vláken nad 50% HDT prudce klesá. [24]

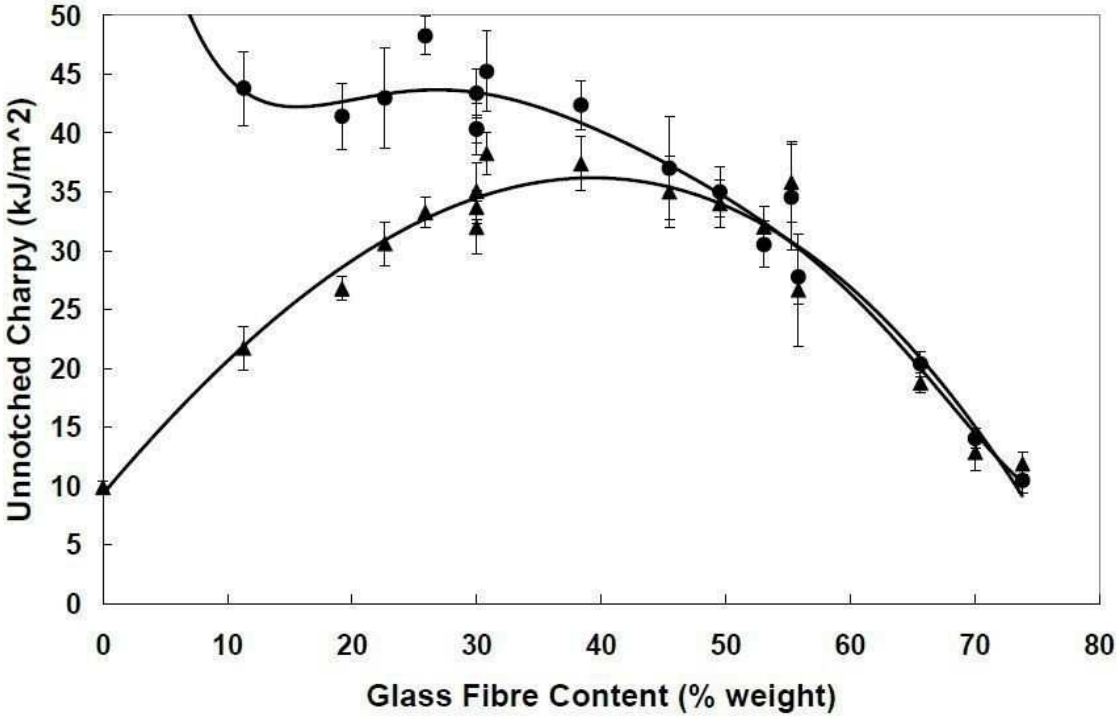
Obecně lze konstatovat, že se pozitivní vliv obsahu LGF na vlastnosti PP kompozitu projevuje do obsahu 40% vláken. Příčinou mohou být vlivy, jakými jsou zkracování délky vláken a jejich orientace. Vliv obsahu vláken na jejich délku zobrazuje Graf č. 4. Délka vláken se snižuje lineárně s obsahem plniva. Grafy č. 5, 6 a 7 zobrazují výsledky studie J. L. Thomasona et. al. – vliv obsahu vláken na pevnost, rázovou houževnatost a HDT. [24]



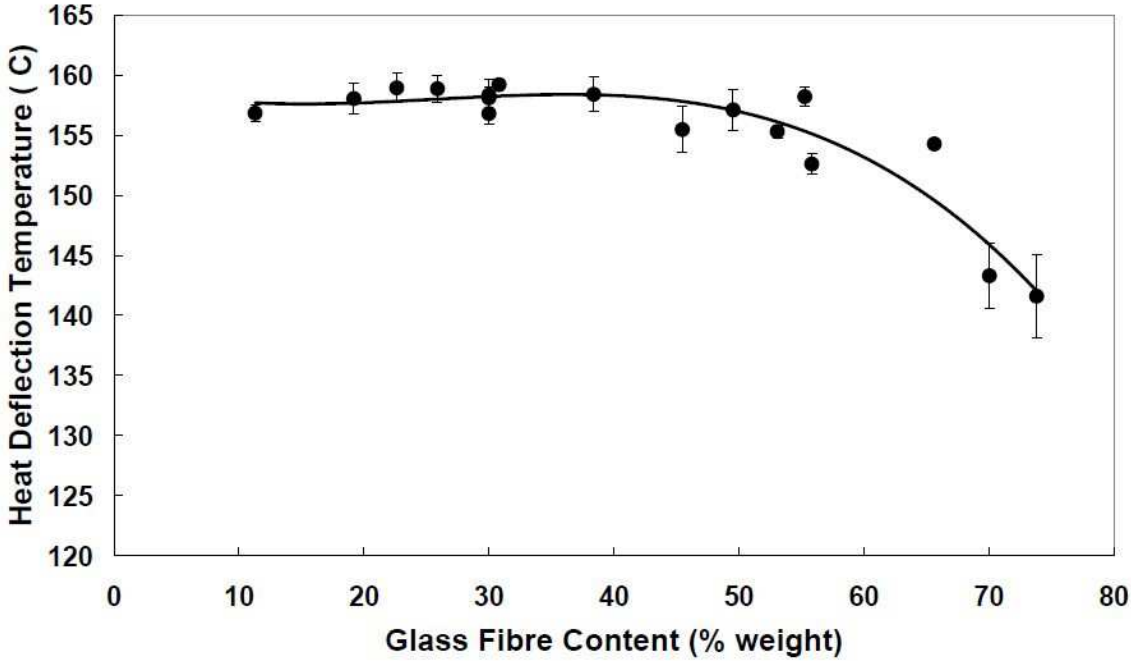
Graf č. 4: Závislost zbytkové délky vláken na obsahu vláken vstřikovaného kompozitu PP+LGF (●hmotnostní průměr vláken, ▲délkový průměr vláken) [24]



Graf č. 5: Závislost pevnosti v tahu a ohybu obsahu vláken vstřikovaného kompozitu PP+LGF (●v tahu, ▲ v ohybu) [24]



Graf č. 6: Závislost rázové houževnatosti na obsahu vláken vstřikovaného kompozitu PP+LGF (●23°C, ▲ -40°C) [24]



Graf č. 7: Závislost tepelné odolnosti HDT na obsahu vláken vstřikovaného kompozitu PP+LGF [24]

2.4.3 Aplikace PP plněného LGF

Kompozity na bázi PP plněného dlouhým skleněným vláknem jsou aplikovány především pro výrobu dílů v automobilovém průmyslu. Jejich přínosem, ve srovnání s klasickými kompozity na bázi termosetů, je snížení hmotnosti dílů díky nízké hustotě polypropylenu, nízká cena surovin, možnost zpracování technologiemi určenými pro termoplasty, nižší výrobní náklady, recyklovatelnost. Dále jsou těmito materiály nahrazovány neplněné termoplasty a termoplasty plněné krátkými vlákny díky tuhosti při zvýšené teplotě, houževnatosti za nízkých teplot, sníženému creepu, lepší rozměrové stabilitě a menšímu smrštění.

Typickými aplikacemi jsou součásti palubních desek, podvozků, nárazníků, ventilačních jednotek, autobaterií, řadicí páky, pedály, dveřní systémy. Dalšími oblastmi aplikací je stavební průmysl (součásti dopravních pásů), nábytkářský průmysl (kování, rámy židlí), spotřební průmysl (lyžařské vázání, kuchyňské spotřebiče). [2, 3, 23]

3 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování je tvářecí diskontinuální cyklický proces, při kterém získá materiál, většinou granulát, charakter konečného výrobku, nebo polotovaru.

Mezi výhody této technologie zpracování plastů patří: krátký čas výrobního cyklu, vysoký podíl automatizace a opakovatelnost procesu, výroba tvarově složitých produktů s velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a vysokou reprodukovatelností mechanických a fyzikálních vlastností, konstrukční flexibilita, která umožňuje odstranění konečných úprav povrchu a montážních operací.

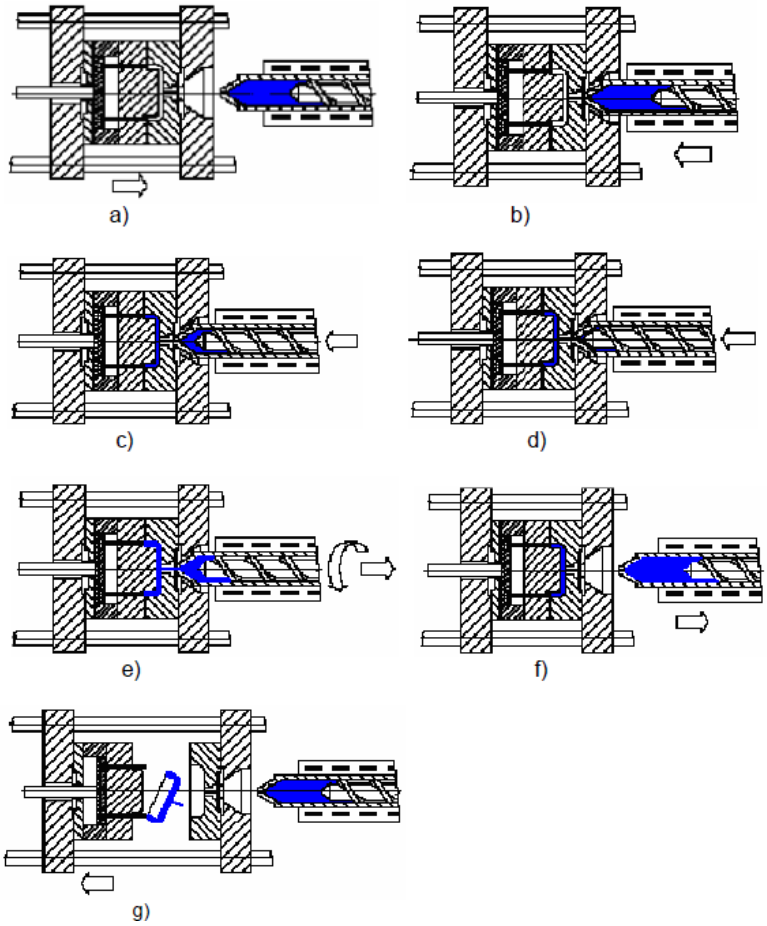
Vstřikováním lze zpracovávat téměř všechny druhy termoplastů. V omezené míře se vstřikují i některé reaktoplasty a kaučuky. [27]

3.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus se skládá z následujících kroků:

1. Dávkování a plastikace: granulát padá z násypky, taví se, působením šneku hněte, homogenizuje a dopravuje před čelo šneku. Ohřev polymeru se uskutečňuje převodem tepla ze stěn válce a frikčním teplem vznikajícím třením mezi materiálem s šnekem. V této fázi působí také zpětný tlak
2. Vstřikování: během této fáze nastává plnění formy vstříknutím taveniny pomocí axiálního pohybu šneku vpřed. Po naplnění formy dosahuje tlak ve formě maxima.
3. Dotlak: vlivem ochlazování taveniny od stěn formy dochází k jejímu smršťování. Dotlakem je tento úbytek objemu kompenzován. Dotlačování je ukončeno zatuhnutím ústí vtoku.
4. Chlazení: chlazení taveniny probíhá již během vstřikování a dotlaku. Další doba chlazení se volí z ekonomického hlediska co nejkratší, ale taková, aby bylo možno výlisek bez problémů vyhodit z formy bez deformací tvarů a dodržení požadovaných rozměrů dílu.
5. Vyhození výstřiku:ochlazený výstřik je během otevírání formy vyjmut z její dutiny mechanicky (vyhazovačem) nebo stlačeným vzduchem.[28]

Fáze vstřikovacího cyklu zobrazuje Obr. 20.

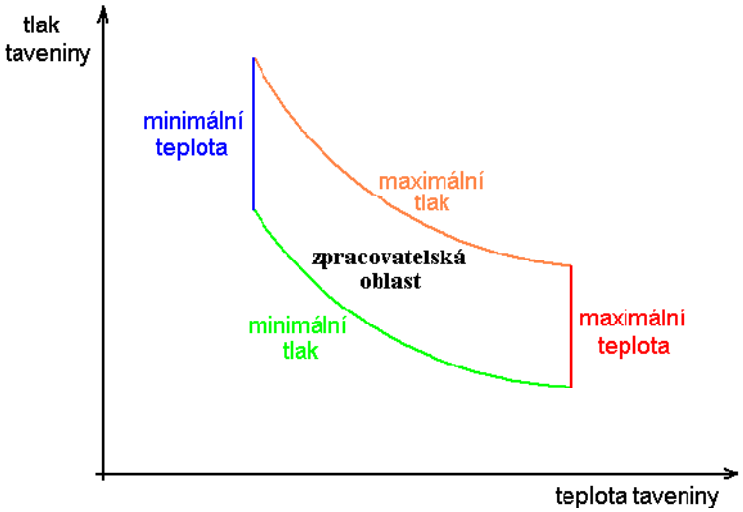


Obr. 20: Fáze vstřikovacího cyklu: a) uzavření formy, b) přísun vstřikovací jednotky, c) plnění dutiny formy, d) dotek, e) plastikace, f) odsunutí vstřikovací jednotky, g) otevření formy a vyhození výstřiku [34]

3.2 Zpracovatelská oblast procesu vstřikování

Zpracovatelská oblast vstřikování, tzv. zpracovatelské okno, které ukazuje Obr. 21, charakterizuje podmínky, za kterých je polymer zpracovatelný a to v závislosti na teplotě a tlaku taveniny. Vlivem těchto podmínek mohou nastat případy:

1. Teplota taveniny je nízká: z důvodu předčasného ztuhnutí taveniny nedojde k dostatečnému vyplnění dutiny formy.
2. Teplota taveniny je vysoká: může dojít k degradaci polymerního materiálu
3. Tlak taveniny je vysoký: nebezpečí otevírání formy z důvodu nedostatečné odpovídající uzavírací síle, vznik vnitřního pnutí ve výlisku.
4. Tlak taveniny je nízký: nedostatečné vyplnění formy taveninou.

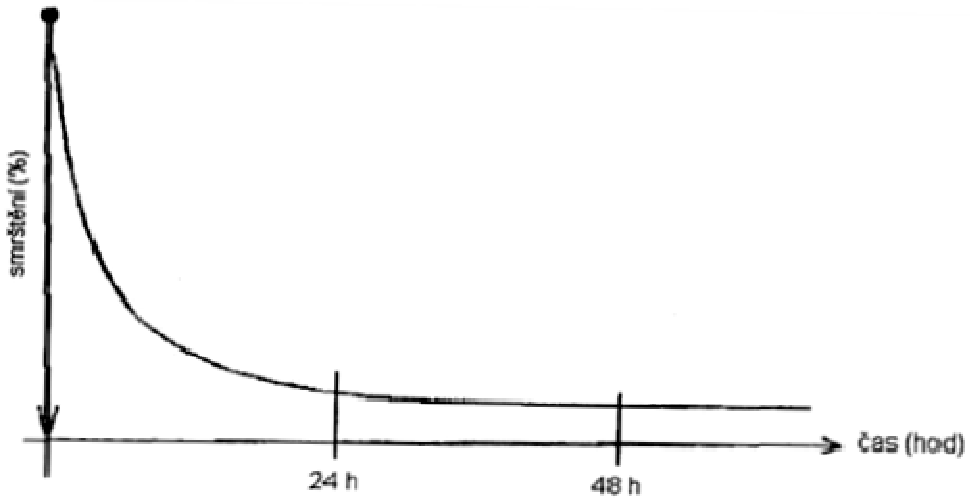


Obr. 21: Zpracovatelská oblast procesu vstrikování. [39]

3.3 Smrštění

3.3.1 Průběh smrštění

Významnou vlastností termoplastů je smrštění, které zásadním způsobem ovlivňuje kvalitu výsledného výrobku. Vlivem smrštění dochází k objemovým změnám a změnám tvaru při zachování konstantního objemu - k deformacím. Smrštění probíhá ve dvou fázích, a to během chlazení ve formě a následně po opuštění dutiny formy. Převážný podíl smrštění (asi 80 – 90%) proběhne zhruba do 24 hodin po vyjmutí výstřiku z formy. Zbývající podíl smrštění probíhá ještě několik týdnů. S tímto jevem je proto nutné počítat již při konstrukci formy i při kontrole rozměrů dílu v procesu výroby. Časový průběh smrštění ukazuje Obr. 22. [27, 30]

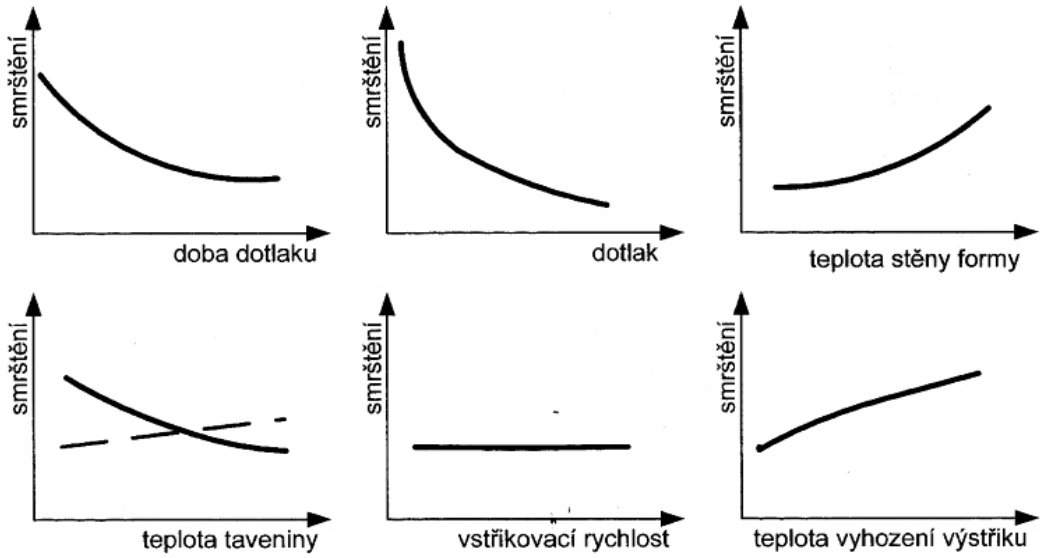


Obr. 22: Průběh smrštění v čase [30]

3.3.2 Vliv podmínek vstřikování na smrštění

Smrštění výlisku ovlivňuje řada faktorů. Mezi nejdůležitější patři zadané procesní parametry, dále druh použitého materiálu, jeho krystalinita, obsah a typ plniv, konstrukce dílu a konstrukce formy.

Vliv jednotlivých procesních parametrů na smrštění nám zjednodušeně zobrazují grafy na Obr. 23.

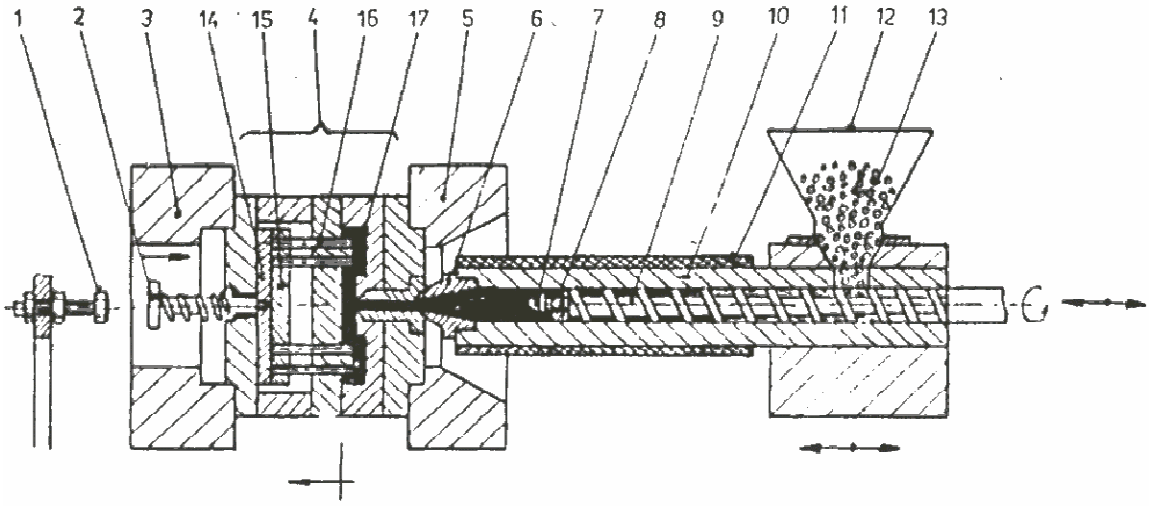


Obr. 23: Vliv procesních parametrů na průběh smrštění [27]

3.4 Vstřikovací stroj

Vstřikovací lis je diskontinuálně pracující tvářecí stroj, jehož úkolem je dávkování, roztavení a homogenizace polymeru s následným vstříknutím do formy za podmínek zachování co nejvyšší kvality a opakovatelnosti výrobků.

Vstřikovací stroj se skládá ze vstřikovací jednotky, uzavírací jednotky, regulace a přídavných, tzv. periferních zařízení. Schéma vstřikovacího lisu vidíme na Obr. 24.



Obr. 24: Schéma vstřikovacího stroje se šnekovou plastifikační jednotkou (1 – doraz, 2 – tyč vyhazovače, 3, 5 – upínací desky, 4 – forma, 6 – vstřikovací tryska, 7 – špice šneku, 8 – zpětný uzávěr, 9 – šnek, 10 – tavící komora, 11 – topná tělesa, 12 – násypka, 13 – granule plastu, 14 – deska vyhazovačů, 15 – kotevní deska, 16 – vyhazovače, 17 – výstřik) [31]

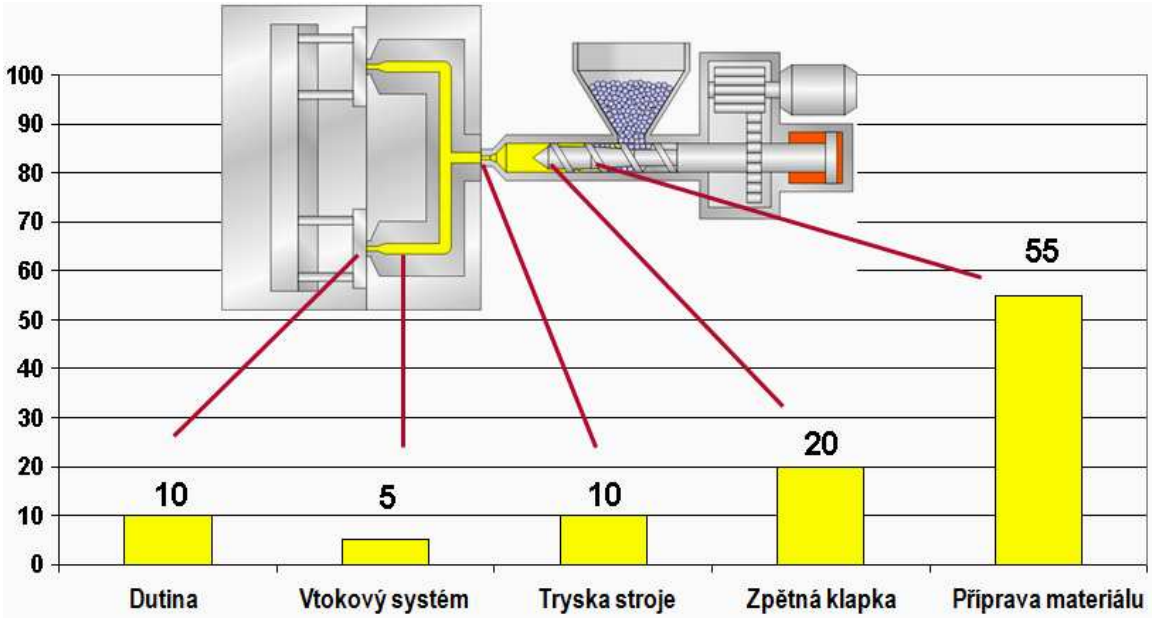
3.5 Vstřikování PP plněného LGF

3.5.1 Vliv podmínek zpracování na délku vlákna

Granuláty s obsahem dlouhého skleněného vlákna je možno zpracovávat na běžných vstřikovacích strojích a běžných formách. Aby však bylo možno využít výjimečných vlastností tohoto materiálu, je nutné zajistit takové podmínky zpracování, aby se maximálně vyloučilo zkracování skleněných vláken. Pozornost je třeba věnovat designu šneku, vtokového systému a zpracovatelským parametrům. Délku vláken ve výstřiku negativně ovlivňují faktory:

- tření mezi kovovými částmi a vlákny,
- drcení vláken mezi šnekem a stěnou válce,
- vzájemná interakce mezi vlákny,
- smykové namáhání vedoucí k lámání vláken v tavenině,
- prudké nárazy na ostré hrany při procesu vstřikování. [32, 33]

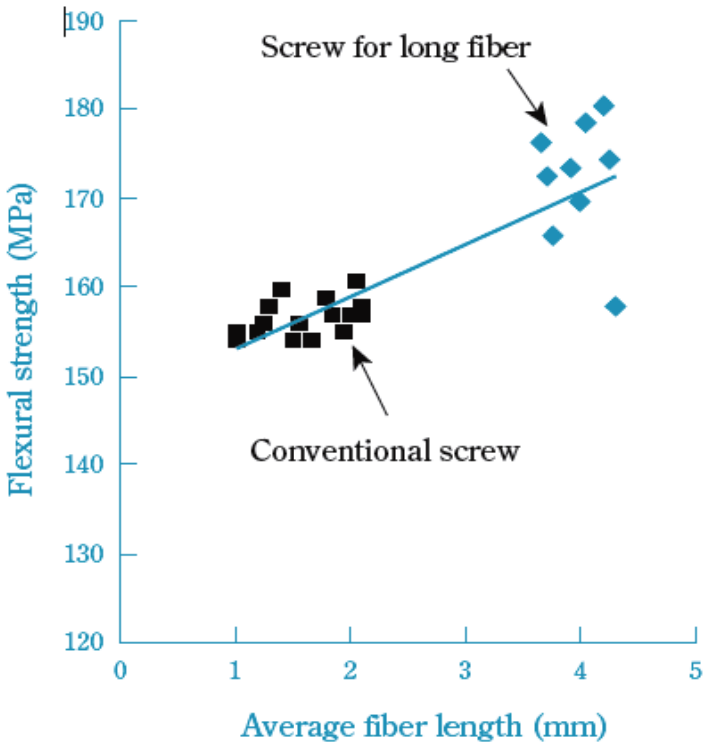
Podíl vlivů na zkracování vláken během procesu vstřikování zobrazuje schéma na Obr. 25.



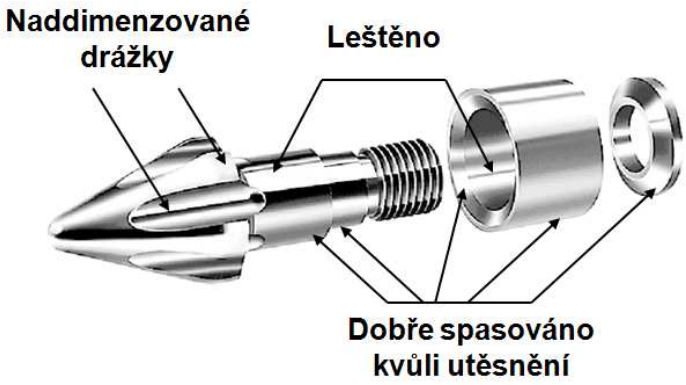
Obr. 25: Podíl vlivů zpracovatelského procesu na délku vláken [32]

3.5.2 Obecná doporučení pro zpracování granulátů plněných LGF

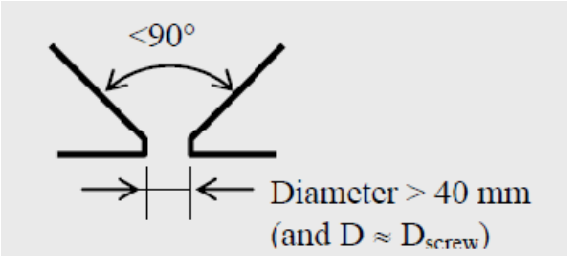
1. Design výlisku: pro navrhování dílů platí obecné zásady pro zpracování jiných termoplastů. Navíc je však nutné zohlednit faktory zohledňující délku vláken, jako jsou např. tloušťka stěny min. 3 mm, konstantní v celé součásti, zaoblené rohy, vnitřní rádius o velikosti 0,5 tloušťky stěny.
2. Vstřikovací stroj: výrobci granulátů je doporučován šnek s nízkým namáháním materiálu - délka šneku 20-26 D, kompresní poměr 2:1 až 3:1, poměr L/D 18:1 až 22:1, průměr šneku 45 mm, drážky špičky šneku dimenzované pro dokonalý tok taveniny, dokonale těsnící zpětná klapka jak ukazuje Obr. 26. Vliv geometrie šneku na pevnost v tahu, související s délkou vláken zobrazuje Graf č. 8. Z důvodu větší délky granulátu, než je obvyklé u běžných materiálů, může docházet k problémům s dávkováním. Je proto vhodné zvolit konstrukci násypky, jak je zobrazeno na Obr. 27. [2, 33]



Graf č. 8: Vliv geometrie šneku vstřikovacího stroje na pevnost v ohybu [34]

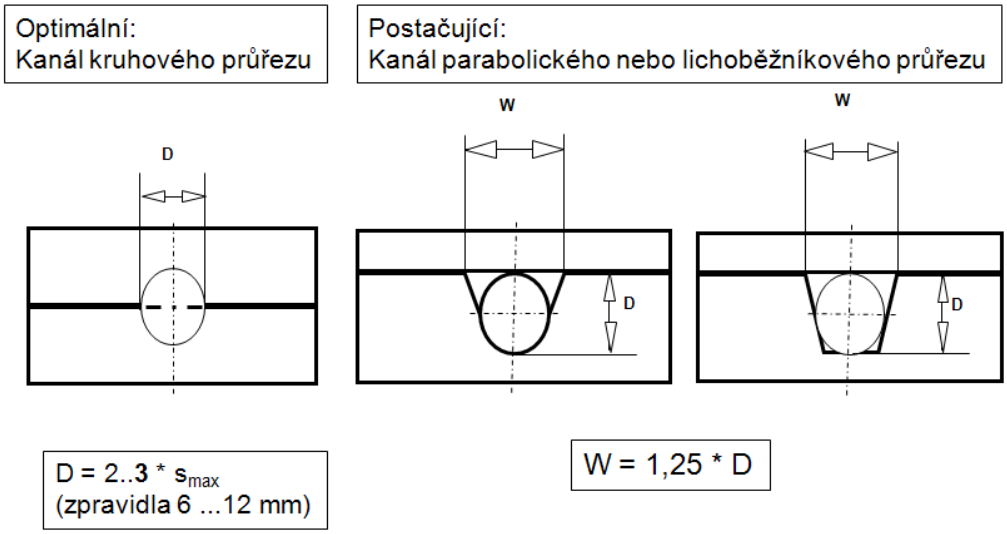


Obr. 26: Doporučení pro provedení špičky šneku pro zpracování LFRT [32]



Obr. 27: Doporučená konstrukce násypky pro zpracování LFRT [33]

3. Tryska: doporučuje se otevřená tryska, s velkým průměrem, průměr trysky by měl činit 0,1-0,15x průměr šneku.
4. Forma: konstrukce vtokového systému musí být navržena tak, aby byly vyloučeny ostré hrany a přechody a co nejmenší změny toku. Doporučenou geometrii studeného vtokového kanálu vidíme na Obr. 28.



Obr. 28: Doporučená geometrie studeného vtokového kanálu pro zpracování LFRT(s_{max} - max. tloušťka stěny výlisku) [32]

5. Technologické parametry zpracování: pro zachování délky vláken a současně dobré homogenizace materiálu a dispergace vláken je nutné zajistit co nejnižší smykové namáhání, dobrou tekutost taveniny. Z tohoto hlediska jsou důležité parametry: nízké otáčky šneku, zpětný tlak pokud možno nulový, nízká vstřikovací rychlost. Pokud to konstrukce formy a dílu umožňují, obecně se doporučuje používání nízkých tlaků. [2, 33]

4 ZKOUŠKY POLYMERŮ

4.1 Tahová zkouška

Principem tahové zkoušky je krátkodobé namáhání zkušebního tělesa definovaným zatížením v tahu malými rychlostmi deformace dokud nedojde k jejich porušení anebo předepsané deformaci za normovaných podmínek měření (teplota, rychlost).

Po zatížení se začne zkušební těleso deformovat a v důsledku toho měnit své rozměry až do okamžiku přetržení vzorku. Dochází k prodloužením zkušebního tělesa. Mezní hodnota deformace, tedy protažení při přetržení, se označuje jako **tažnost,** pro kterou platí vztah:

$$\varepsilon_t = \frac{l_t - l_0}{l_0} \cdot 100\ [\%] \tag{1}$$

kde: l_t je délka zkušebního tělesa při přetržení,l_0 je počáteční délka zkušebního tělesa, ε_t je mezní hodnota deformace

Hookův zákon popisuje vztah mezi napětím a deformací. Konstantou úměrnosti je Yongův **modul pružnosti E**, který je definován vztahem:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}\ \ [Pa] \tag{2}$$

kde: E je modul pružnosti v tahu, σ je napětí, ε je deformace

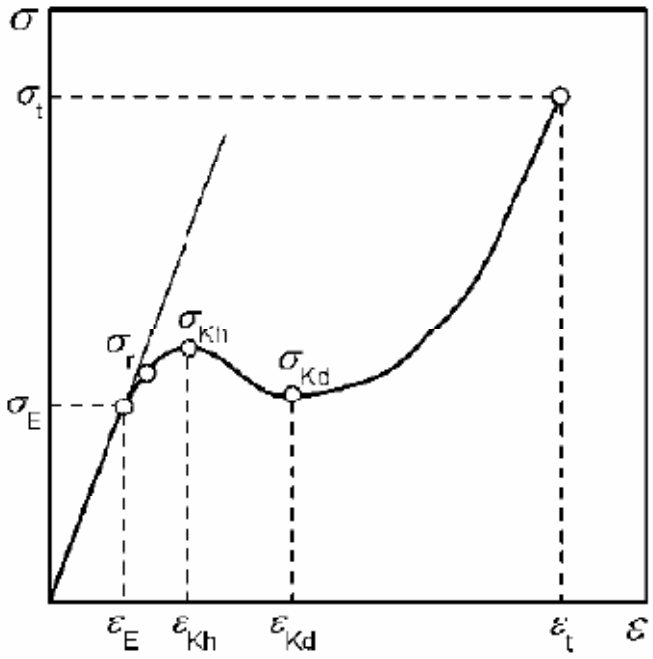
Napětí potřebné k přetržení zkušebního tělesa, vztažené na původní průřez se nazývá **pevnost v tahu**, jedná se tedy o smluvní napětí potřebné k přetržení. Platí vztah:

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A_0}\ \ [Pa] \tag{3}$$

kde: σ_t je napětí při přetržení, F_{max} je síla potřebná k přetržení A_0 je počáteční průřez tělesa

V průběhu zkoušky se trvale zaznamenává síla a prodloužení tělesa. Všechny charakteristické hodnoty ze zkoušky tahem se vyhodnocují z tahové křivky.

Na Obr. 29 můžeme sledovat obecnou tahovou křivku s body charakterizujícími tahové chování materiálu.



Obr. 29: Obecná tahová křivka. [35]

Kde σ_E je mez úměrnosti (oblast, kde končí hookovské chování), σ_r je mez pružnosti (bod, do kterého je deformace ještě vratná), σ_k je mez kluzu (plastická, nevratná deformace) [35, 36]

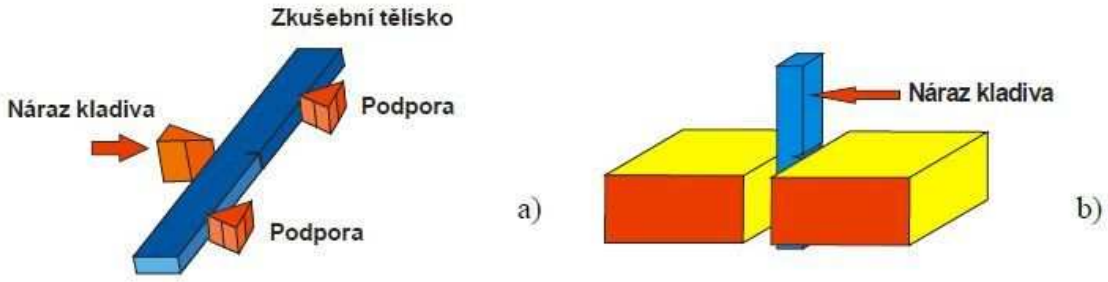
Tvar a povrch těles pro konkrétní materiál, jejich kondicionování, průběh tahové zkoušky a teplota jsou dány příslušnými normami. V případě tahových zkoušek plastů se jedná o normy ČSN EN ISO 527-1; 2; 3

4.2 Rázová a vrubová houževnatost

Jedná se o dynamickou zkoušku, která spočívá v namáhání tělesa rázem, tzn. silou působící ve velmi krátkém časovém intervalu. Tato zkouška podává informaci o schopnosti materiálu rychle absorbovat energii.

Zkoušky rázové a vrubové houževnatosti se obvykle provádí jedním ze tří metod. Princip zkoušky dle Charpy a Izod ukazuje Obr. 30.

1. Charpy: zkušební těleso je umístěno na dvou podpěrách a přeráží se otáčivým kladivem uprostřed.
2. Izod: zkušební těleso tvaru trámce se na jednom konci pevně upevní (vetknutý trámec) a na druhém se přeráží [37]
3. Dynstat: je metoda pro zkoušení těles malých rozměrů, například z hotových výrobků



Obr. 30: Princip zkoušek rázové houževnatosti a) Charpy, b) Izod [38]

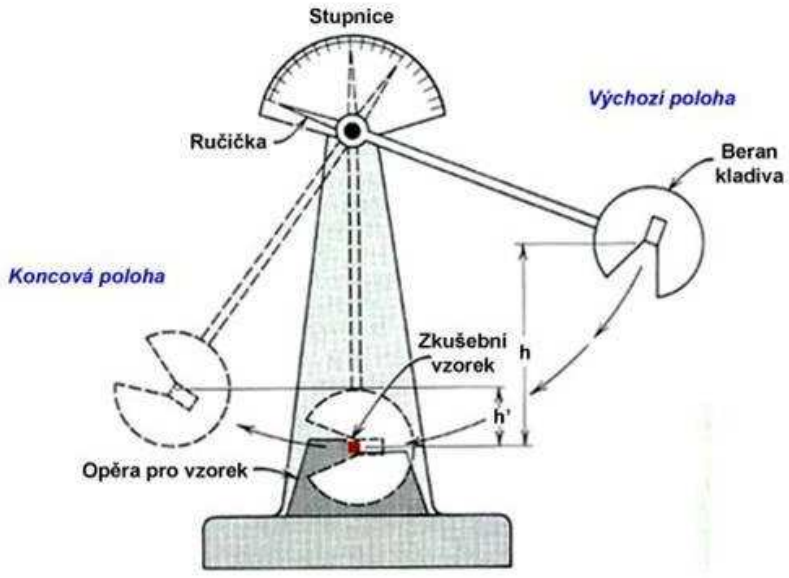
4.2.1 Rázová a vrubová houževnatost metodou Charpy

Rázová houževnatost je kinetická energie kyvadlového rázového kladiva nutná k přeražení zkušebního tělesa vztažená na plochu příčného průřezu. V případě vrubové houževnatosti jsou zkušební tělesa opatřena vrubem. Výpočet rázové houževnatosti je dán vztahem:

$$A_n = \frac{W}{b \cdot h} \quad \left[kJ \cdot m^2\right] \tag{4}$$

kde: W je deformační energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa, b je šířka zkušebního tělesa, h je tloušťka zkušebního tělesa [37]

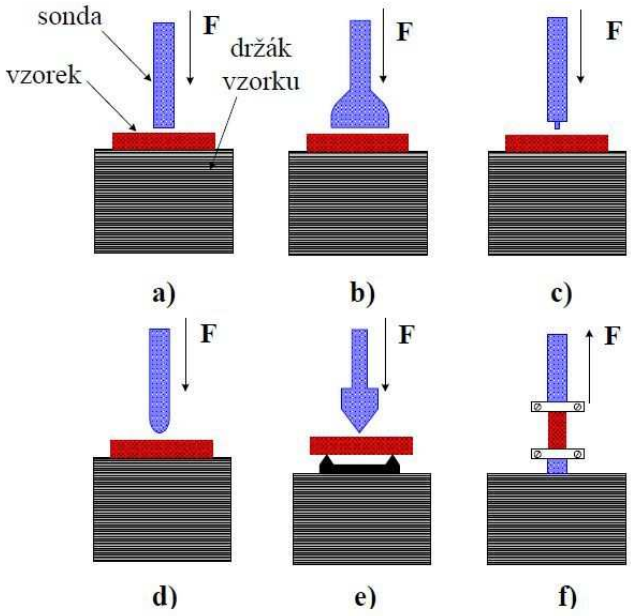
Měření houževnatosti metodou Charpy se provádí na Charpy kladivech. Princip tohoto zařízení ukazuje Obr. 31.



Obr. 31: Charpyho kladivo [39]

4.3 Termomechanická analýza (TMA)

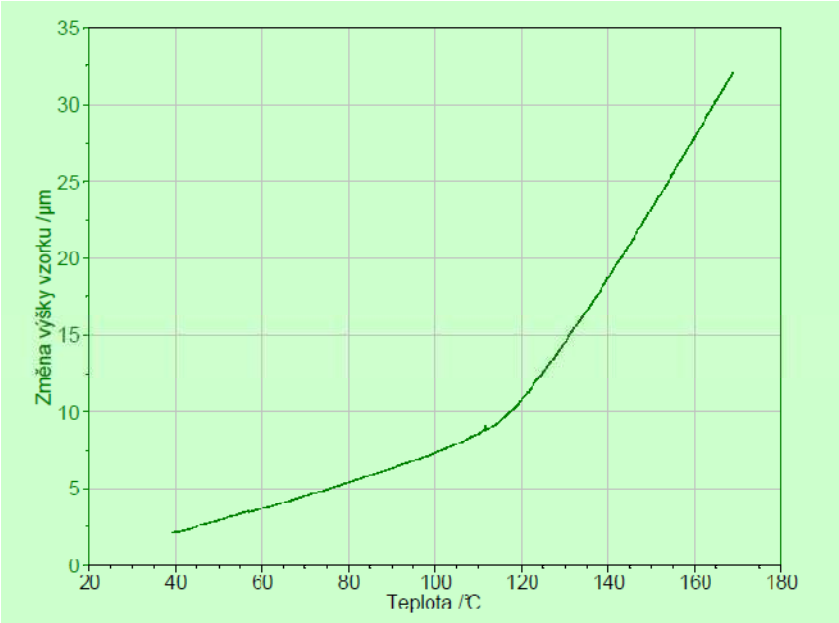
Termomechanická analýza (TMA – Thermomechanical analysis) patří do skupiny tzv. termických analýz. Tato analýza je založena na technice zaznamenávající fyzikální a chemické změny vznikající v látce, při níž se měří deformace vzorku zatíženého neoscilující silou jako funkce teploty, zatímco je látka vystavena řízenému teplotnímu režimu. U TMA rozlišujeme několik módů měření, které závisí na druhu použité měřící sondy.Typy měřících sond zobrazuje Obr. 32.



Obr. 32: Některé typy měřících sond pro TMA – a) expanzní, b) makroexpanzní, c) penetrační, d) hemisférická, e) pro tříbodový ohyb, f) tahová) [40]

4.3.1 Měření teplotní roztažnosti pomocí TMA

Pro měření teplotní roztažnosti se používá expanzní sonda s nulovou či velmi malou přítlačnou silou. Z provedeného měření obdržíme, křivku tepelné roztažnosti. Jako příklad je na Obr. 33 uvedena křivka roztažnosti sklolaminátu.



Obr. 33: TMA křivka tepelné roztažnosti sklolaminátu tloušťky 1,5 mm (rychlost ohřevu 2 °C/min, přítlačná síla 0,01 N, expanzní sonda) [40]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je porovnání vlastností materiálů LFRT kompozitů s PP matricí zpracovaných vstřikováním při různých technologických podmínkách. Kromě základního nastavení parametrů byly zvoleny takové podmínky zpracování, při kterých se předpokládá zkracování vláken a tím i změny vlastnosti výstřiků. Vstřikovány byly kompozity PP+LGF50 a PP+LGF30.Pro porovnání výsledků se část měření provedla s PP plněným krátkým vláknem PP+SGF30 a PP+SGF50.

V první fázi praktické části byly připraveny vstřikováním zkušební tělesa tvaru lopatek a destiček. Část zkušebních tělísek byla následně připravena vysekáváním a třískovým opracováním z již dříve vstřikovaných těles. V dalším kroku byly provedeny následující zkoušky: tahová zkouška, rázová zkouška Charpy u vzorků z destiček a lopatek, u materiálu PPLGF50 zjištění tepelné roztažnosti pomocí TMA a spálení vzorku za účelem porovnání délky vláken.

V závěrečné části byly vyhodnoceny výsledky měření jednotlivých zkoušek.

6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

6.1 Použité materiály

6.1.1 PP+LGF

1. Celstran PP-GF50 0403P10
2. Celstran PP-GF30 0403P10

Jedná se o PP homopolymer v barvě černé, tepelně stabilizovaný, vyztužený 50% a 30% dlouhého skleněného vlákna. Vlákna jsou chemicky vázána s PP matricí. Pelety jsou válcovité, 10 mm dlouhé, čemuž odpovídá také délka vláken 10 mm. Výlisky mají vysokou vrubovou houževnatost za vysokých i nízkých teplot, tepelnou odolnost a nízký creep. Vlastnosti materiálu jsou uvedeny v příloze P I, a příloze P II. Doporučené zpracovatelské podmínky jsou uvedeny v Tabulce 2. [41]

Tabulka 2: Zpracovatelské podmínky matriálu Celstran PP [41]

Technologický parametr	**Jednotka**	**Celstran PP-GF50 0403 P10**	**Celstran PP-GF30 0403 P10**
Sušení	x	4 hod; 90-100°C; není nutné v případě skladování v temperovaných skladech	
Teplota formy	°C	30-70	40-70
Teplota válce	°C	230 - 270	250 - 290
Otáčky šneku	ot. / min	25 - 50	
Zpětný tlak	MPa	0, nebo co nejnižší možný	
Vstřikovací tlak	MPa	60 - 120	
Dotlak	MPa	40 - 80	

6.1.2 PP+SGF

1. Themofill HP F910X:

Jedná se o PP homopolymer v barvě černé plněný 50% krátkých skleněných vláken určený pro aplikace v automobilovém průmyslu. Tento typ je určený pro aplikace za vyšších tep-

lot, kdy si uchovává tuhost a nízký creep. Vlastnosti materiálu jsou uvedeny v Příloze P III, zpracovatelské podmínky v Tabulce 3. [41]

Tabulka 3: Zpracovatelské podmínky materiálu Themofill HP F910X [41]

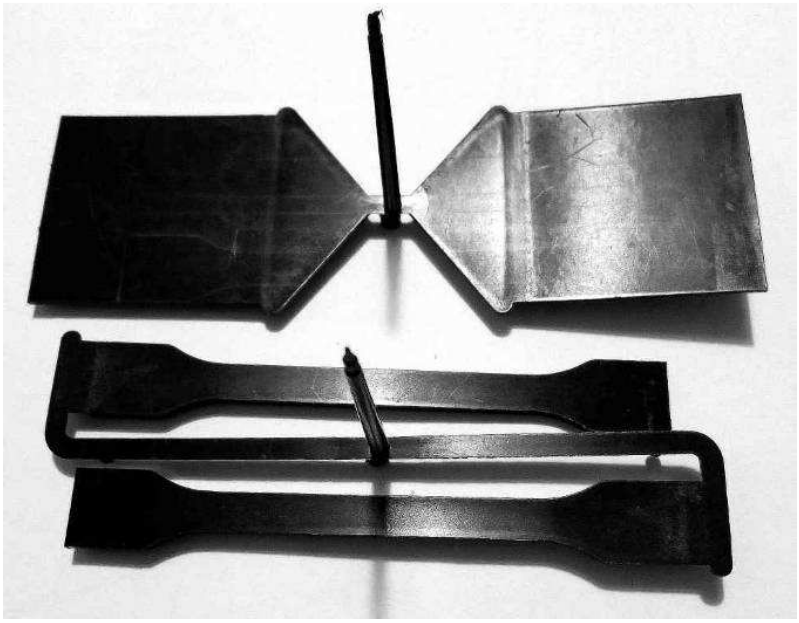
Technologický parametr	**Jednotka**	Themofill HP 910X
Sušení	x	4 hod; 80°C; není nutné v případě skladování v temperovaných skladech
Teplota formy	°C	30 - 60
Teplota válce	°C	200, 230, 240, 250
Zpětný tlak	MPa	nízký
Vstřikovací rychlost	MPa	Střední až vysoká

2. Syntegum 1030AFV

Jedná se o PP homopolymer v barvě černé s obsahem 30% SGF, chemicky vázaného s matricí. Určený pro vstřikování náročných technických dílů s aplikacemi při mechanické zátěži za vyšších teplot. Vlastnosti materiálu jsou uvedeny v Příloze P IV. Doporučené podmínky zpracování výrobce neuvádí.

6.2 Vstřikování zkušebních těles

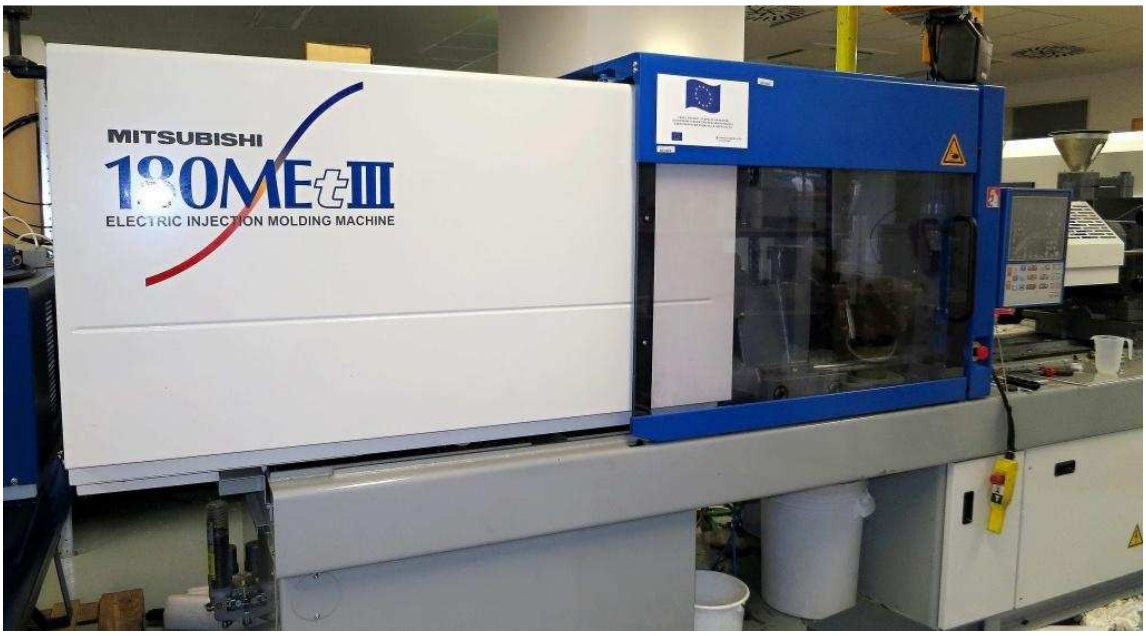
Pro potřeby experimentu byly vystříknuty dva typy zkušebních těles – lopatky a destičky (viz Obr. 34), vždy při třech různých nastavení parametrů vstřikování.



Obr. 34: Výstřiky pro přípravu vzorků

6.2.1 Použité zařízení

Vzorky byly vstřikovány na elektrickém vstřikovacím stroji Mitsubishi 180MEtIII (viz Obr. 35), s průměrem šneku 46 mm. Průměr vstřikovací trysky činil 3mm, kompresní poměr šneku 2:1, poměr L/D 20. K temperaci forem bylo použito temperanční zařízení Regloplast 90 Smart.



Obr. 35: Vstřikovací stroj Mitsubishi 180MEtIII

6.2.2 Vstřikování lopatek

Vstřikování lopatek probíhalo na dvounásobné formě se studeným rozvodem. Do každé kavity ústí filmový vtok. Nastavení stroje je zobrazeno v Tabulkách 4, 5, 6 a 7. Nastavení 1 vychází z podmínek doporučených výrobcem granulátu. Nastavení 2 a 3 mají upraveny parametry. Z důvodu vytékání taveniny z trysky a problémům s dávkováním byly u materiálů s obsahem LGF upraveny doporučené teploty zpracování.

Tabulka 4: Nastavení parametrů pro vstřikování lopatek z PP+LGF50

Technologický parametr	**Jednotka**	**Nastavení 1**	**Nastavení 2**	**Nastavení 3**
Sušení	x	granulát nebyl sušen		
Teplota formy	°C	50		
Teplota válce	°C	200 - 255	180 – 240	180 – 240
Otáčky šneku	ot. ⁄min	40	40	300
Zpětný tlak	MPa	0	20	0
Vstřik. rychlost	mm⁄s	20; 23		
Vstřikovací tlak	MPa	80		
Dotlak	MPa	60		
Doba dotlaku	s.	12		
Doba plastikace	s.	9,6	14,9	3.5
Poznámka	Sníženy teploty na válci			

Tabulka 5: Nastavení parametrů pro vstřikování lopatek z PP+LGF30

Technologický parametr	**Jednotka**	**Nastavení 1**	**Nastavení 2**	**Nastavení 3**
Sušení	x	granulát nebyl sušen		
Teplota formy	°C	40		
Teplota válce	°C	180 - 240		
Otáčky šneku	ot. ⁄min	40	40	300
Zpětný tlak	MPa	0	10	0
Vstřik. rychlost	mm⁄s	20; 23		
Vstřikovací tlak	MPa	80		
Dotlak	MPa	64		
Doba dotlaku	s.	12		
Doba plastikace	s.	9,15	17,9	2.2
Poznámka	Sníženy teploty na válci; nastavení 2 – při zpětném tlaku 20 MPa byla dlouhá doba dávkování, zvoleno 10MPa			

Tabulka 6: Nastavení parametrů pro vstřikování lopatek z PP+SGF50

Technologický parametr	**Jednotka**	**Nastavení 1**	**Nastavení 2**	**Nastavení 3**
Sušení	x	granulát nebyl sušen		
Teplota formy	°C	40		
Teplota válce	°C	200 - 250		
Otáčky šneku	ot. ⁄min	20	20	300
Zpětný tlak	MPa	2	20	2
Vstřik. rychlost	mm⁄s	20; 23		
Vstřikovací tlak	MPa	60		
Dotlak	MPa	75		
Doba dotlaku	s.	12		
Doba plastikace	s.	30	56	27
Poznámka	Snížen vstřikovací tlak z důvodu přetoků			

Tabulka 7: Nastavení parametrů pro vstřikování lopatek z PP+SGF30

Technologický parametr	**Jednotka**	**Nastavení 1**	**Nastavení 2**	**Nastavení 3**
Sušení	x	granulát nebyl sušen		
Teplota formy	°C	40		
Teplota válce	°C	180 - 220		
Otáčky šneku	ot. ⁄min	40	40	300
Zpětný tlak	MPa	2	20	0
Vstřik. rychlost	mm⁄s	20; 23		
Vstřikovací tlak	MPa	80		
Dotlak	MPa	65		
Doba dotlaku	s.	12		
Doba plastikace	s.	10	22,5	1,8
Poznámka	Snížena teplota na trysce z důvodu vytékání taveniny			

6.2.3 Vstřikování destiček

Jako polotovar pro následnou přípravu zkušebních těles pro zkoušku rázové houževnatosti byly vystříknuty destičky o rozměru 60 x 60 mm a tloušťkou stěny 2 mm. Vstřikováno

bylo na dvounásobné formě se studeným vtokovým rozvodem, do kavit ústil filmový vtok. Nastavení parametrů pro jednotlivé materiály bylo obdobné, jako při vstřikování lopatek. Pro všechny materiály bylo zvoleno nastavení 1 základní, nastavení 2 se zvýšeným zpětným tlakem 20MPa, v případě materiálu PP+LFG30 byl použit zpětný tlak 10MPa, nastavení 3 - se zvýšenými otáčkami šneku 300 ot. ⁄min.

6.2.4 Dodatečná úprava vzorků

1. **Zkušební tělesa pro rázovou houževnatost**:

   1.1. Zkušební tělesa z destiček: byly připraveny vyseknutím pomocí nože 10 x 80 mm na vysekávacím stolním lisu (viz Obr. 36) ve směru podélném a kolmém se směrem toku taveniny. Vyseknuté vzorky byly vyhlazeny pomocí jemného smirkového papíru. Výsledná tělíska měla velikost cca 60 x 10 x 2 mm (délka tělíska byla dána délkou vystříknuté destičky).

   1.2. Zkušební tělesa z lopatek: byly připraveny seříznutím vystříknutých lopatek na trámečky o velikosti 60 x 10 x 4 mm.

Obr. 36: Stolní vysekávací lis

2. **Zkušební tělesa pro měření pomocí TMA** byly připraveny z vystříknutých lopatek řezáním na stroji Buehler Isomet 4000 (viz. Obr. 37). Nerovnosti po řezu byly zahlazeny jemným smirkovým papírem. Výsledné vzorky měly velikost 10 x 5 x 4 mm.

Obr. 37: Řezání vzorků na stroji Buehler Isomet 4000

3. **Vzorky pro sledování v optickém mikroskopu:** byly připraveny spálením části výlisku destičky velikosti cca 2 x 2 cm z materiálu PP+LGF50 v keramických kelímcích v pícce ESA K59 (viz Obr. 38) při teplotě 470°C po dobu 1 hod.

Obr. 38: Pícka ESA K59

7 METODY MĚŘENÍ

7.1 Sledování délky vláken v nespalitelném zbytku

Spálením vzorků z výlisku destičky PPLGF50 a PPSGF30 zůstal v keramických kelímcích nespalitelný zbytek, sestávající ze zbytků skleněných vláken. Bylo provedeno vizuální pozorování nespalitelného zbytku v kelímku pozorování pomocí optického polarizačního mikroskopu Intraco Micron při zvětšení 40. Digitálním fotoaparátem Canon G10 byly pořízeny jejich snímky. Oba přístroje jsou zobrazeny na snímku na Obr. 39. Sledování délky vláken v nespalitelném zbytku bylo provedeno na vzorcích uvedených v Tabulce 8.

Tabulka 8: Vzorky pro sledování vláken v nespalitelném zbytku

Vzorek č.	Materiál	Nastavení parametrů
1. – 2.	PPLGF50	1 - základní
3.		2 - zvýšený zpětný tlak
4.		3 - zvýšené otáčky šneku
5.	PPSGF50	1 - základní
6.		2 - zvýšený zpětný tlak
7.		3 - zvýšené otáčky šneku

Obr. 39: Optický polarizační mikroskop Intraco Micron s digitálním fotoaparátem Canon G10

7.2 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na zařízení Testometric M350-5CT (viz Obr. č. 40) se softwarem Winter Analysis 3.5.39. Teplota prostředí zkoušky činila 23°C. Použitá tělíska a způsob provedení byly v souladu s normou ČSN EN ISO 527-3, typ tělíska 1A. Bylo provedeno 6-8 měření pro každou sadu vzorků (materiál-zpracovatelské parametry), tělíska byla namáhána ve směru toku taveniny. Rychlost pohybu čelistí byly 1mm/min. Zkušební tělesa byla napínána až do konečného přetržení. Příklad protokolu z tahové zkoušky je uveden v Příloze P V.

Obr. 40: Zařízení pro tahovou zkoušku – Testometric M350-5CT

7.3 Rázová zkouška Charpy

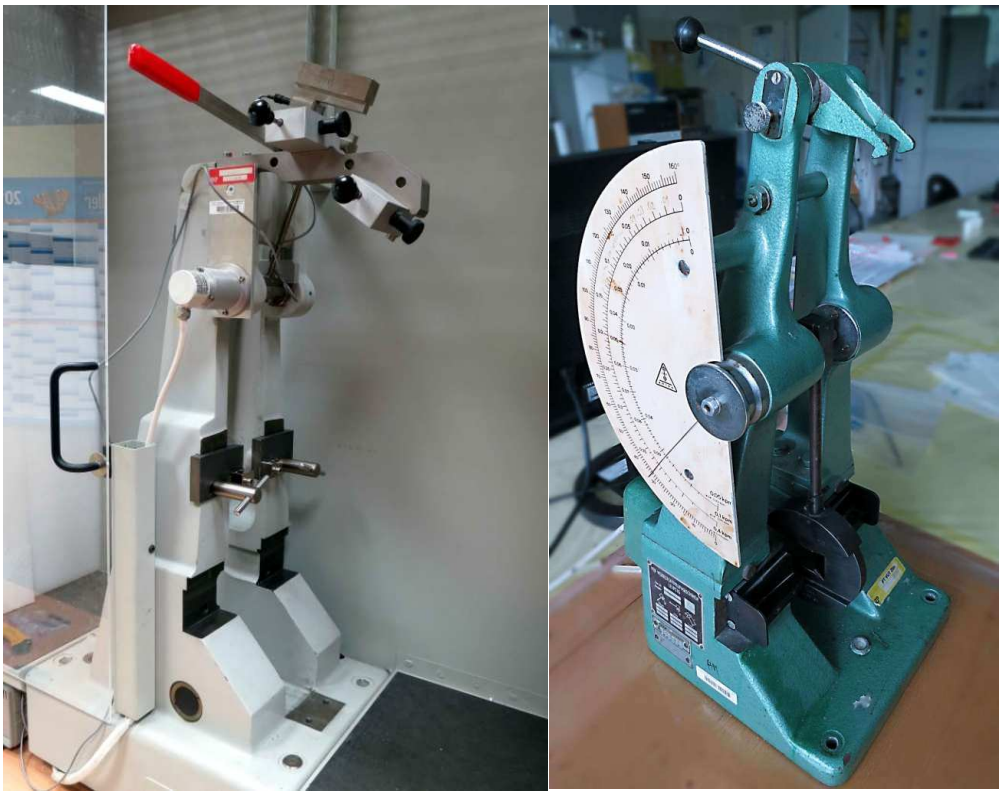
7.3.1 Zkušební tělesa 60 x 10 x 2 mm

Rázová zkouška byla provedena na zařízení Zwick Roell 5113 (viz. Obr. 41 vlevo) s kladivem o energii 5 J, při teplotě 23°C. Zkoušeno bylo vždy 5 vzorků od každé sady (materiál-parametry) ve směru rovnoběžném a ve směru kolmém k směru tečení taveniny.

Před zkouškou byla změřena šířka a tloušťka zkušebních tělísek pomocí posuvného měřítka.

7.3.2 Zkušební tělesa 60 x 10 x 4 mm

Rázová zkouška byla provedena na Charpyho kladivu o energii 3,92 J, při teplotě 23°C. Zkoušeno bylo vždy 6 vzorků od každé sady (materiál-parametry). Rázová zkouška proběhla na vzorcích kolmo na směr tečení taveniny. Před zkouškou byla změřena šířka a tloušťka zkušebních tělísek pomocí posuvného měřítka. Použité zařízení vidíme na fotografii na Obr. 41 vpravo.



Obr. 41: Zařízení pro zkoušku rázové houževnatosti Charpy (vlevo zařízení Zwick Roell 5113; vpravo Charpyho kladivo 3,92 J)

7.4 Teplotní délková roztažnost

Teplotní délková roztažnost byla měřena pomocí analýzy TMA na zařízení Mettler Toledo TMT SDTA 841e, software Stare Default D8 V9.20. (Obr. 42). Délková teplotní roztažnost byla měřena na vzorcích z materiálu PP+LGF50 vždy 1x ve směru podélném a kol-

mém na směr tečení taveniny. Rozsah teplot činil -60 – +140°C, rychlost ohřevu vzorku byla 3°C na minutu, dynamické zatížení vzorku činilo 0,05 – 0,5 N.

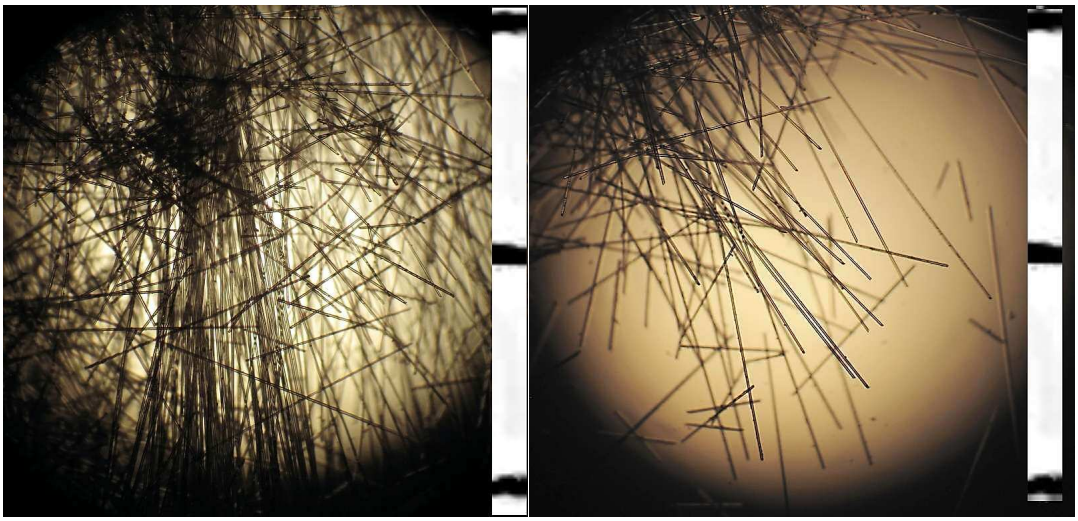
Obr. 42: Termomechanický analyzátor TMT SDTA841e

8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A DISKUZE

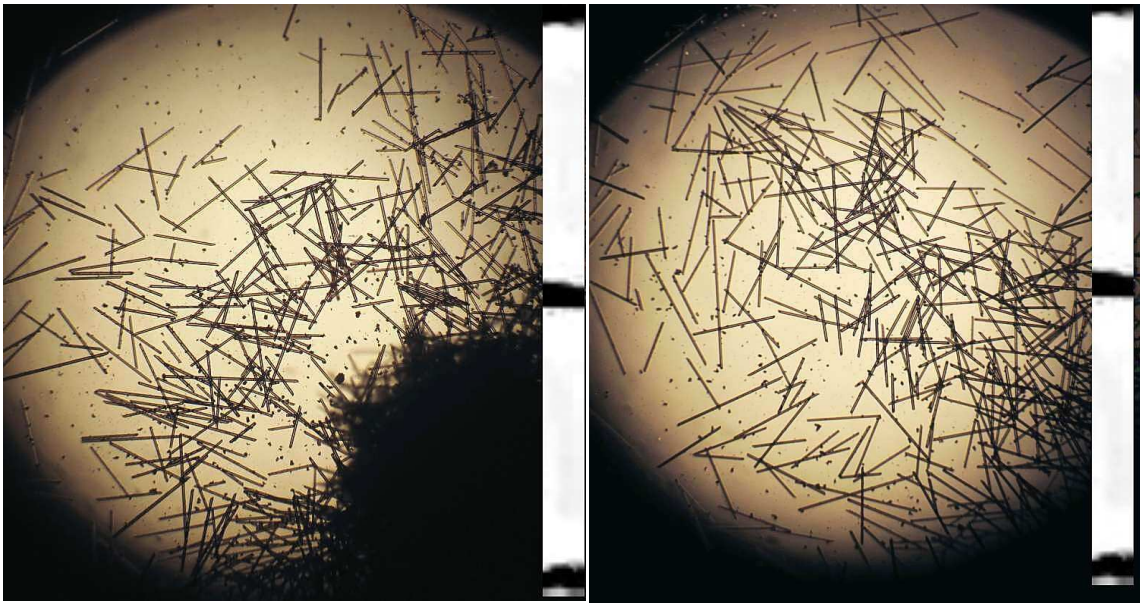
8.1 Sledování délky vláken v nespalitelném zbytku

Vizuálním pozorováním bylo zjištěno, že v případě vzorku č. 1 zůstal v kelímku viditelný skelet původního tvaru vzorku, jak ukazuje Obr. 43 vlevo. Na makrofotografii vzorku PPLGF50 č. 1 na Obr. 43 vpravo jsou patrné zbytky delších vláken. Po spálení vzorků PPLGF50 č. 3 a 4 zůstal v kelímcích nespalitelný zbytek, který nevykazoval zachování skeletu. Výsledky sledování v optickém mikroskopu vidíme na Obr. 44 až Obr. 47. Průměr kruhového záběru v mikroskopu odpovídá přibližně 2 mm (na snímcích přiloženo orientační měřítko).

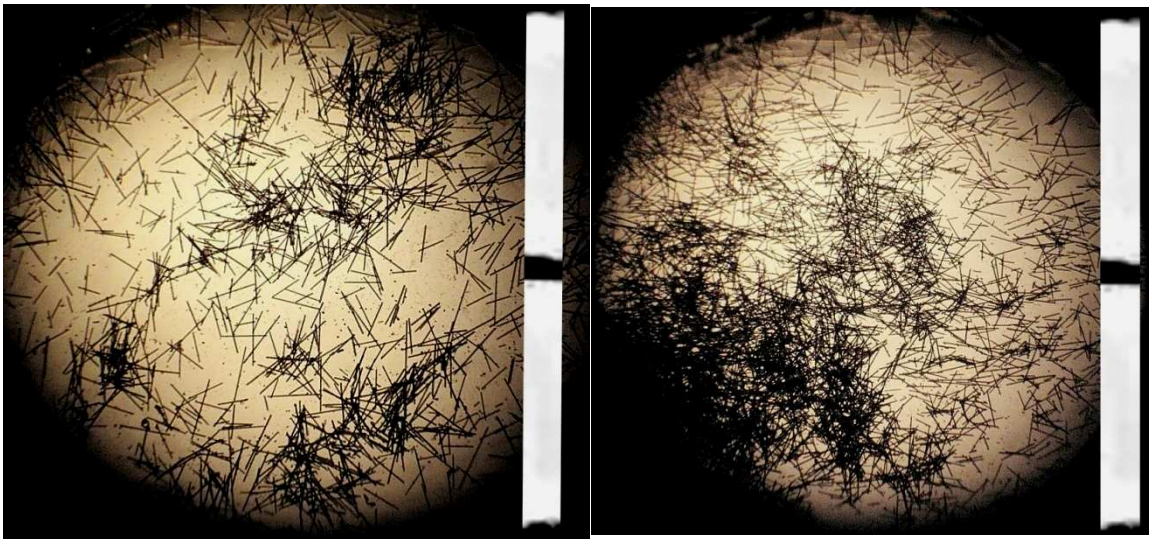
Obr. 43: Zbytek po spálení vzorku č. 1 před a po rozpadnutí skeletu (jeden dílek na měřítku odpovídá 1 mm)



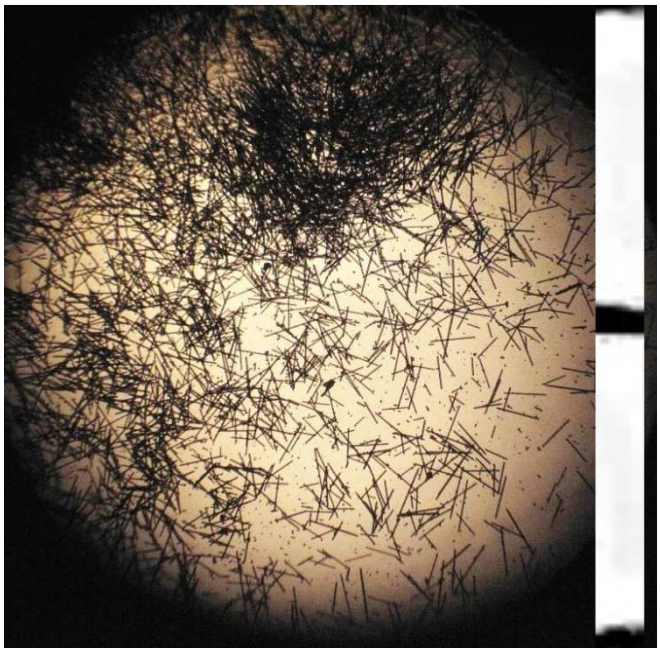
Obr. 44: Vzorek č. 1 (vlevo), vzorek č. 2 (vpravo), materiál PPLGF50, nastavení 1 – snímek z optického mikroskopu



Obr. 45: Vzorek č. 3, materiál PPLGF50, nastavení 2 (vlevo); vzorek č. 4, materiál PPLGF50, nastavení 3 (vpravo) – snímek z optického mikroskopu



Obr. 46: Vzorek č. 5, materiál PPSGF50, nastavení 1 (vlevo); vzorek č. 6, materiál PPSGF50, nastavení 2 (vpravo) – snímek z optického mikroskopu



Obr. 47: Vzorek č. 7, materiál PPLGF50, nastavení 3 – snímek z optického mikroskopu

Provedené měření bylo pouze orientační, nebyla změřena přesná délka vláken, ani jejich distribuce. Přesto je z pozorování patrné, že se délka skleněných vláken v nespalitelném zbytku u jednotlivých vzorků se liší. Nejvýraznější rozdíl vykazuje vzorek materiálu PPLGF50 a to vzorek č. 1 a č. 2, kdy na základě fotografií na Obr. 44 je možno usuzovat, že vzorek obsahoval vlákna o rozměru delším jak 2 mm a blížícím se původní délce vlákna před zpracováním, tj. 10 mm. Tuto skutečnost také dokazuje kompaktní tvar vzorku po spálení. Vzorky č. 3 a 4 obsahují pouze vlákna výrazně zkrácená. Vlákna délek blížících se jejich původní délce se nepodařilo nalézt. Zkrácení délek vláken pozorujeme také u vzorků č. 6 a 7 v porovnání se vzorkem č. 5 z materiálu PPSGF50.

Při porovnání délek vláken v nespalitelném zbytku u materiálu PPLGF50 s materiálem PPSGF50 je zřejmé, že vzorky č. 3 a č. 4 obsahují, i po zkrácení, vlákna větších délek než ve vzorcích č. 5, 6 a 7. Přesné vyhodnocení rozdílu mezi jednotlivými vzorky a jejich distribuci si vyžaduje přesnější měření, které nebylo v možnostech této části práce.

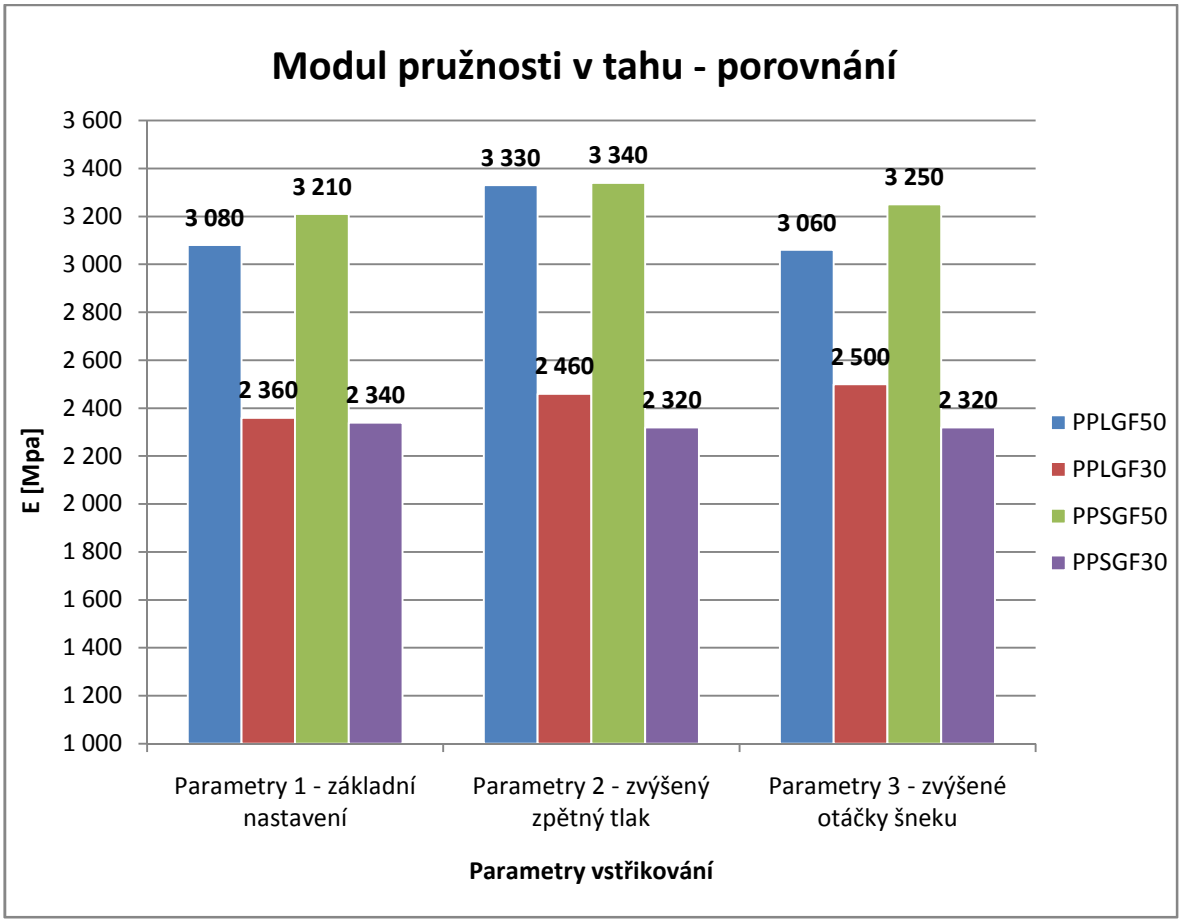
Z výsledků pozorování délky vláken v nespalitelném zbytku lze usoudit, že zadané technologické parametry měly vliv na konečnou délku vláken ve vstřikovaných vzorcích.

8.2 Tahová zkouška

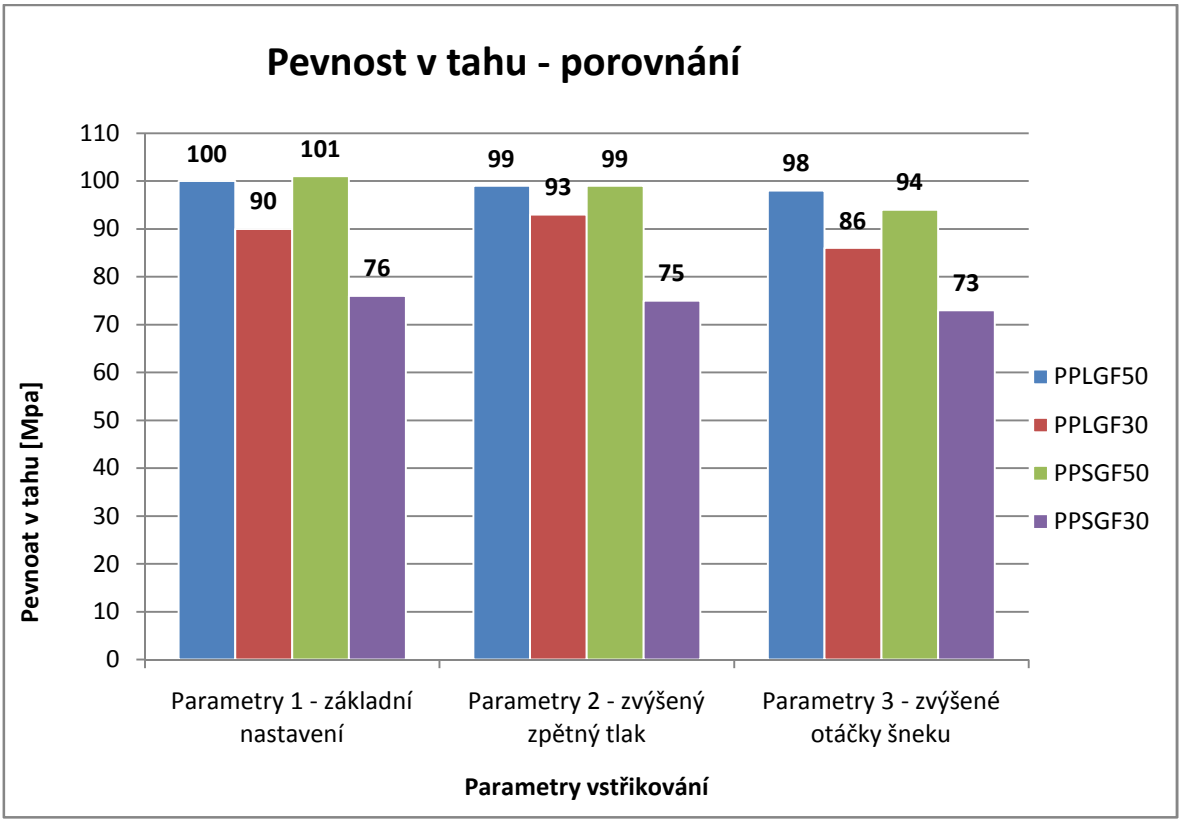
Výsledky tahové zkoušky vidíme v Tabulce 9, grafické srovnání výsledků ukazuje Graf č. 9 a Graf č. 10.

Tabulka 9: Výsledky zkoušky v tahu

PPLGF50		**Youngův modul (MPa)**	**Tažnost (%)**	**Pevnost v tahu (MPa)**
Nastavení 1. (základní)	x	**3 080**	**4,6**	**100**
	s	330	0,3	5
Nastavení 2. (zpětný tlak 20 Mpa)	x	**3 330**	**4,6**	**99**
	s	290	0,3	7
Nastavení 3. (300 ot. min^{-1})	x	**3 060**	**4,8**	**98**
	s	170	0,3	4
PPLGF30		**Youngův modul (MPa)**	**Tažnost (%)**	**Pevnost v tahu (MPa)**
Nastavení 1. (základní)	x	**2 360**	**6,2**	**90**
	s	40	0,2	1
Nastavení 2. (zpětný tlak 10 Mpa)	x	**2 460**	**6,2**	**93**
	s	40	0,2	1
Nastavení 3. (300 ot. min^{-1})	x	**2 500**	**6,5**	**86**
	s	140	0,3	2
PPSGF50		**Youngův modul (MPa)**	**Tažnost (%)**	**Pevnost v tahu (MPa)**
Nastavení 1. (základní)	x	**3 210**	**4,7**	**101**
	s	140	0,2	2
Nastavení 2. (zpětný tlak 20 Mpa)	x	**3 340**	**4,6**	**99**
	s	80	0,2	3
Nastavení 3. (300 ot. min^{-1})	x	**3 250**	**4,3**	**94**
	s	240	0,3	5
PPSGF30		**Youngův modul (MPa)**	**Tažnost (%)**	**Pevnost v tahu (MPa)**
Nastavení 1. (základní)	x	**2 340**	**5,5**	**76**
	s	90	0,3	2
Nastavení 2. (zpětný tlak 20 Mpa)	x	**2 320**	**5,7**	**75**
	s	90	0,5	3
Nastavení 3. (300 ot. min^{-1})	x	**2 320**	**5,9**	**73**
	s	140	0,2	1



Graf č. 9: Porovnání výsledků tahové zkoušky – modul pružnosti v tahu



Graf č. 10: Porovnání výsledků tahové zkoušky - pevnost v tahu

Vlivem nastavených parametrů došlo ke změnám hodnot modulu pružnosti i pevnosti v tahu řádově v jednotkách procent, jak vidíme v Tabulce 10. Červená barva označuje pokles hodnot, zelená nárůst hodnot.

1. Zvýšený zpětný tlak způsobil zvýšení modulu u obou materiálů plněných dlouhým vláknem i u materiálu PPSGF50. Nejvýraznější nárůst se projevil u materiálu PPLGF50, a to o 8%. Materiály s obsahem 50% skleněných vláken vykazovaly vyšší moduly pružnosti, což odpovídá informacím uvedených v materiálových listech. V případě pevnosti v tahu došlo ke snížení hodnot o 1-2 procenta u materiálu PPLGF50 a u obou materiálů plněných krátkým vláknem. U materiálu PPLGF30 došlo k nárůstu pevnosti v tahu o 3%.
2. Zvýšené otáčky šneku způsobily výraznější zvýšení modulu pružnosti u materiálu PPLGF30 o 6%, tj. o 140 MPa. U ostatních materiálů se blížily hodnotám při nastavení parametrů 1. Pevnost v tahu vykazovala pokles hodnot u všech sledovaných materiálů. Obdobně jako u modulu pružnosti, i v případě pevnosti v tahu vykazovaly vyšší hodnoty oba materiály s obsahem 50% vláken.

Tabulka 10: Porovnání vlivu zpracovatelských parametrů na modul pružnosti v tahu a pevnost v tahu

Modul pružnosti v tahu (%)	**PPLGF50**	**PPLGF30**	**PPSGF50**	**PPSGF30**
Parametry 1 - základní nastavení	100	100	100	100
Parametry 2 - zvýšený zpětný tlak	108	104	104	99
Parametry 3 - zvýšené otáčky šneku	99	106	101	99
Pevnost v tahu (%)	**PPLGF50**	**PPLGF30**	**PPSGF50**	**PPSGF30**
Parametry 1 - základní nastavení	100	100	100	100
Parametry 2 - zvýšený zpětný tlak	99	103	98	99
Parametry 3 - zvýšené otáčky šneku	98	96	93	96

8.3 Rázová Zkouška Charpy

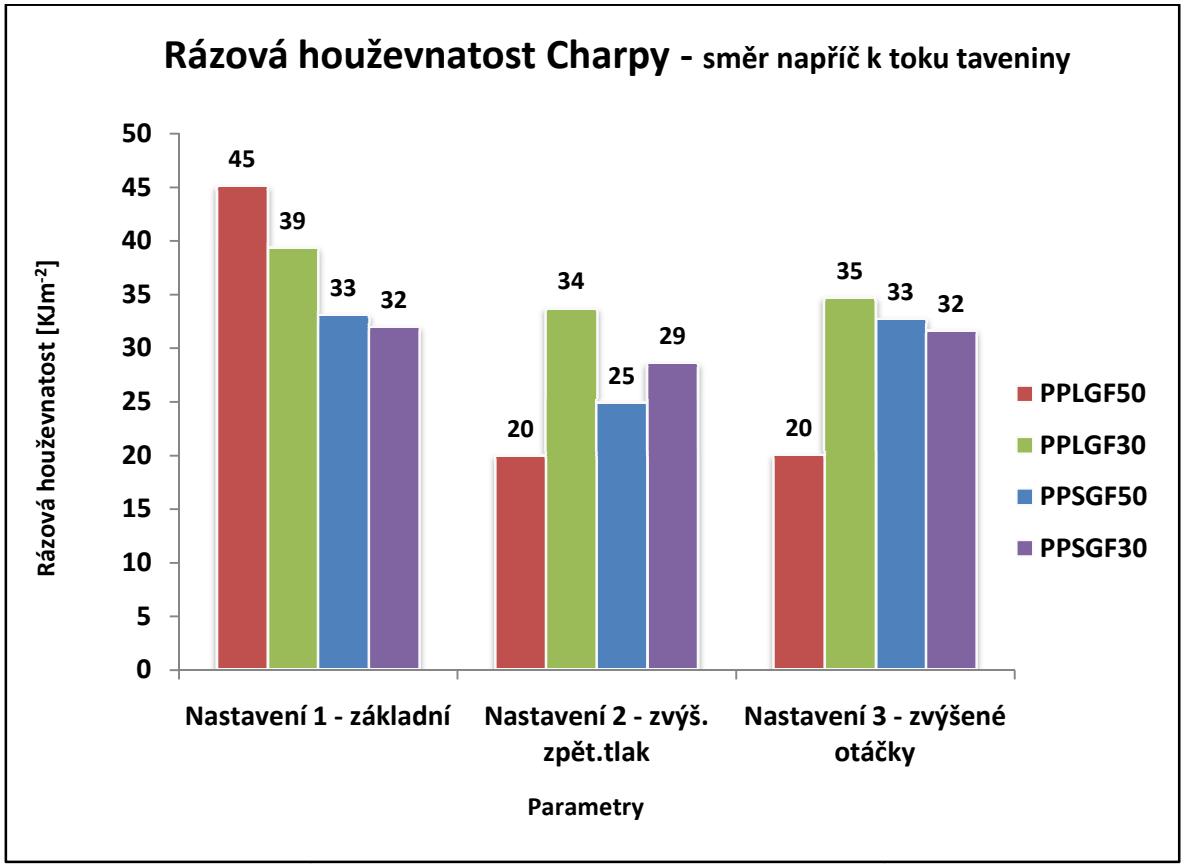
8.3.1 Zkušební tělesa 60 x 10 x 2 mm

Výsledky rázové zkoušky vidíme v Tabulce 11, grafické srovnání výsledků ukazuje Graf č. 11 a Graf č. 12.

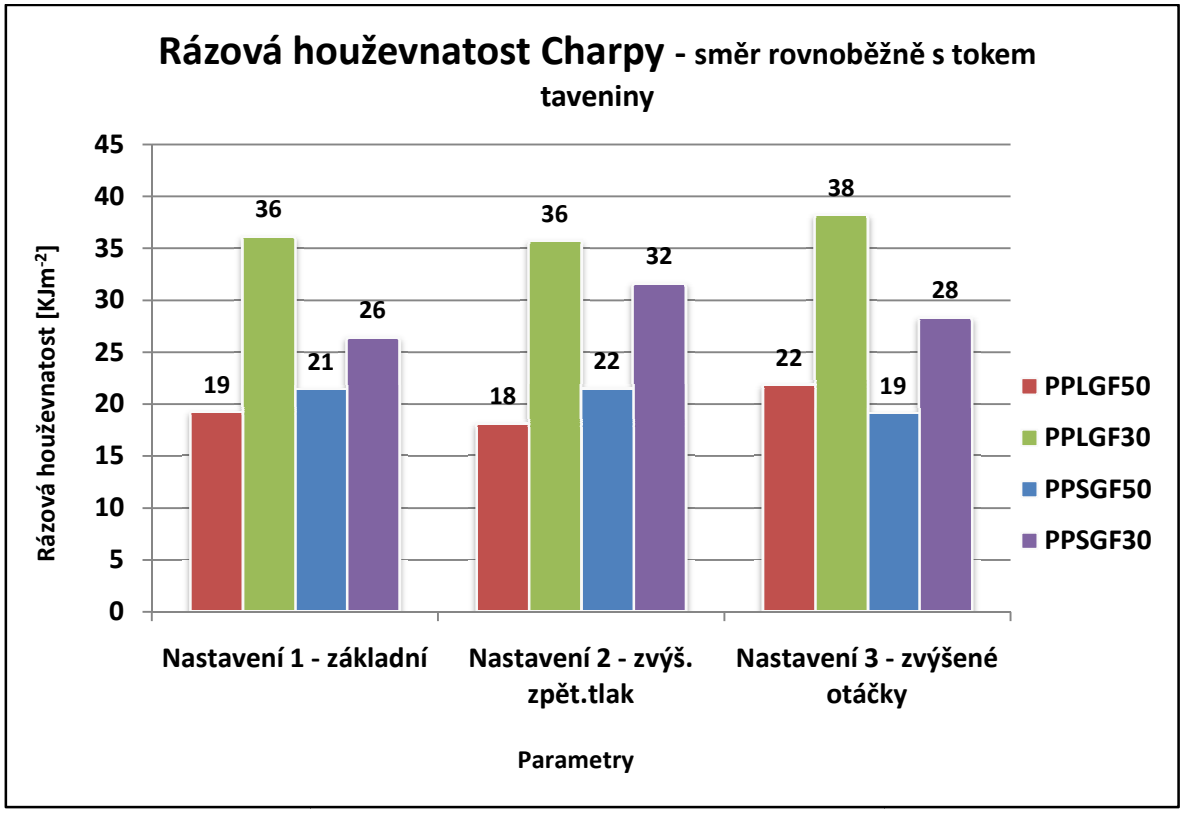
Tabulka 11: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti (tělesa z destiček)

PPLGF50		**Rázová houževnatost KJ m^{-2}**	
		Napříč k toku taveniny	**Rovnoběžně s tokem taveniny**
Nastavení 1. (základní)	x	**45**	**19**
	s	8	5
Nastavení 2. (zpětný tlak 20 Mpa)	x	**20**	**18**
	s	3	3
Nastavení 3. (300 ot. min^{-1})	x	**20**	**22**
	s	**7**	2
PPLGF30		**Rázová houževnatost KJ m^{-2}**	
		Napříč k toku taveniny	**Rovnoběžně s tokem taveniny**
Nastavení 1. (základní)	x	**39**	**36**
	s	11	7
Nastavení 2. (zpětný tlak 20 Mpa)	x	**34**	**36**
	s	9	5
Nastavení 3. (300 ot. min^{-1})	x	**35**	**38**
	s	5	6

PPSGF50		Rázová houževnatost KJ m^{-2}	
		Napříč k toku taveniny	Rovnoběžně s tokem taveniny
Nastavení 1. (základní)	x	**33**	**21**
	s	5	6
Nastavení 2. (zpětný tlak 20 Mpa)	x	**25**	**22**
	s	7	3
Nastavení 3. (300 ot. min^{-1})	x	**33**	**19**
	s	7	2
PPSGF30		**Rázová houževnatost KJ m^{-2}**	
		Napříč k toku taveniny	**Rovnoběžně s tokem taveniny**
Nastavení 1. (základní)	x	**32**	**26**
	s	7	4
Nastavení 2. (zpětný tlak 20 Mpa)	x	**29**	**32**
	s	8	5
Nastavení 3. (300 ot. min^{-1})	x	**32**	**28**
	s	3	5



Graf č. 11: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti Charpy – směr napříč k toku taveniny



Graf č. 12: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti Charpy – směr rovnoběžně se směrem toku taveniny

Vlivem nastavených parametrů došlo ke změnám hodnot rázové houževnatosti řádově v jednotkách až desítkách procent jak zobrazuje Tabulka 12. Červená barva označuje pokles hodnot, zelená nárůst hodnot. Všechny zkoušené materiály vykazovaly rozdílné chování v případě působení síly ve směru kolmém a ve směru rovnoběžném se směrem tečení taveniny.

1. Zvýšený zpětný tlak: ve směru kolmém na tok taveniny došlo u všech materiálů k poklesu rázové houževnatosti. Nejvýraznější pokles vykazuje materiál PPLGF50, kdy se hodnota rázové houževnatosti snížila na 44% hodnoty při nastavením parametrů 1. Ve směru rovnoběžném s tečením taveniny došlo ke snížení hodnot řádově nižším než v předchozím případě a to pouze u materiálů plněných dlouhým vláknem.
2. Zvýšené otáčky šneku: v případě působení síly kolmo na tok taveniny a materiálu PPLGF50 a PPLGF30 měla tato změna parametru obdobný vliv na rázovou houževnatost, jako tomu bylo v případě působení vyššího zpětného tlaku. Materiály plněné krátkým vláknem byly ovlivněny minimálně. Ve směru rovnoběžném došlo u

materiálu PPSGF50 k poklesu hodnot, u ostatních materiálů sledujeme nárůst rázové houževnatosti.

Tabulka 12: Porovnání vlivu zpracovatelských parametrů na rázovou houževnatost Charpy

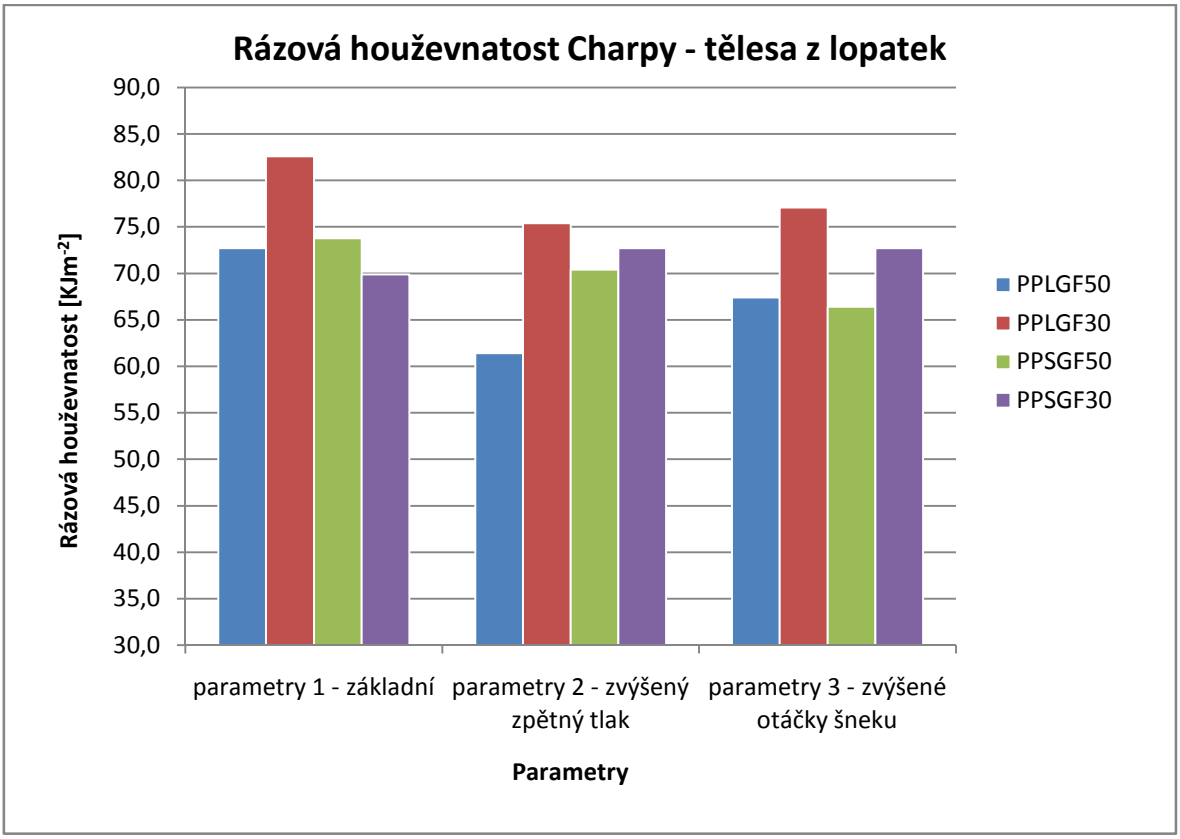
Rázová houževnatost (%) napříč	**PPLGF50**	**PPLGF30**	**PPSGF50**	**PPSGF30**
Parametry 1 - základní nastavení	100	100	100	100
Parametry 2 - zvýšený zpětný tlak	44	86	75	90
Parametry 3 - zvýšené otáčky šneku	44	88	99	100
Rázová houževnatost (%) rovnoběžně	**PPLGF50**	**PPLGF30**	**PPSGF50**	**PPSGF30**
Parametry 1 - základní nastavení	100	100	100	100
Parametry 2 - zvýšený zpětný tlak	94	99	100	119
Parametry 3 - zvýšené otáčky šneku	114	106	89	107

8.3.2 Zkušební tělesa 60 x 10 x 4 mm

Výsledky měření jsou uvedeny v Tabulce 13. Grafické srovnání výsledků ukazuje Graf 13.

Tabulka 13: Výsledky měření rázové houževnatosti Charpy – tělesa z lopatek

Materiál	**parametry 1**		**parametry 2**		**parametry 3**	
	x (KJ/m^{-2})	**s**	**x (KJ/m^{-2})**	**s**	**x (KJ/m^{-2})**	**s**
PPLGF50	72,7	1,2	61,4	3,5	67,4	3,5
PPLGF30	82,6	1,4	75,4	1,8	77,1	1,3
PPSGF50	73,8	2,7	70,4	2	66,4	3,6
PPSGF30	69,9	3,2	72,7	2,5	72,7	2,1



Graf č. 13: Výsledky měření rázové houževnatosti Charpy – tělesa z lopatek

Vlivem nastavených parametrů došlo ke změnám hodnot rázové houževnatosti řádově v jednotkách až desítkách procent jak zobrazuje Tabulka 14. Červená barva označuje pokles hodnot, zelená nárůst hodnot.

Tabulka 14: Porovnání vlivu zpracovatelských parametrů na rázovou houževnatost – tělesa z lopatek

Rázová houževnatost Charpy (%)	PPLGF50	PPLGF30	PPSGF50	PPSGF30
Parametry 1 - základní nastavení	100	100	100	100
Parametry 2 - zvýšený zpětný tlak	84	91	95	104
Parametry 3 - zvýšené otáčky šneku	93	93	90	104

1. Zvýšený zpětný tlak: u materiálů PPLGF50, PPLGF30 a PPSGF50 došlo k poklesu rázové houževnatosti. V případě materiálu PPSGF30 sledujeme nárůst o 4%. Nejvýraznější pokles vykazuje materiál PPLGF50, kdy se hodnota rázové houževnatosti snížila na 84% z hodnoty při nastavením parametrů 1.

2. Zvýšené otáčky šneku: výsledky vykazují obdobný průběh, jako v případě nastavení parametrů 2 – zvýšeného zpětného tlaku. K výraznějšímu poklesu došlo u materiálů plněných dlouhým vláknem

Na základě provedené zkoušky je možno usuzovat, že zvýšený zpětný tlak i otáčky šneku mají negativní vliv na rázovou houževnatost u materiálů plněných dlouhým skleněným vláknem. Vyšší hodnoty rázové houževnatosti u materiálu PPLGF30 oproti materiálu PPLGF50 korespondují s výsledky studie J. L. Thomasona, který naměřil maximum hodnot u materiálu s obsahem 30% LGF [27].

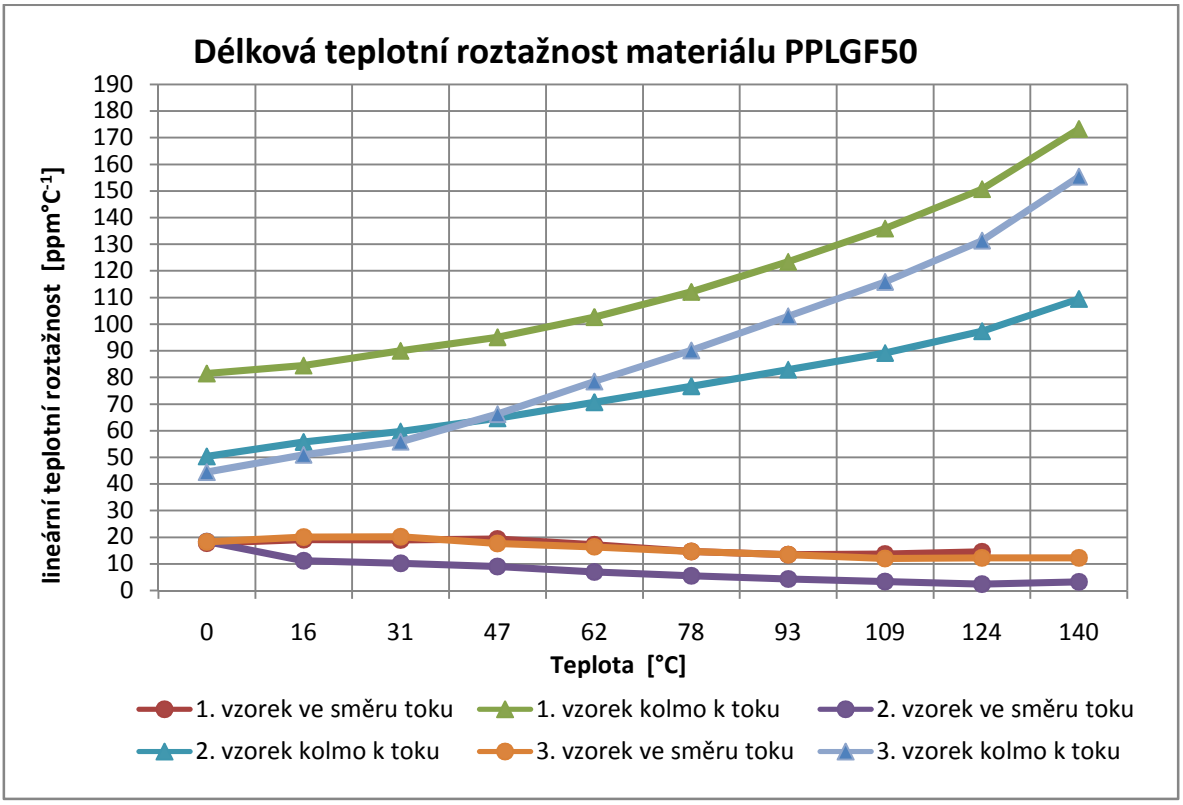
Výsledné hodnoty rázové houževnatosti jsou u všech zkoušených materiálů vyšší, než tomu bylo u zkoušky prováděné na tělesech připravených z destiček. V tomto případě je nutno zohlednit jednak vliv rozdílné tloušťky těles, tak i způsob jejich přípravy. U těles připravených z destiček mohly vznikat vruby způsobené jejich vysekáváním a následným opracováním.

8.4 Teplotní délková roztažnost

Na protokolu z měřícího zařízení sledujeme výraznější nárůst hodnot teplotní délkové roztažnosti u všech tří zkušebních těles v oblasti nad teplotami skelného přechodu, tj. při teplotách v blízkosti a nad 0°C. V případě vzorků měřených ve směru rovnoběžném se směrem tečení taveniny byl nárůst hodnot výrazně nižší. Dá se předpokládat, že vlivem orientace skleněných vláken dochází v tomto směru k vyztužení výlisku a vlákna zajistí minimální změny rozměrů zkušebních těles. Vlastnosti vzorků měřených kolmo na směr tečení jsou výrazněji závislé na vlastnostech matrice a na různé orientaci vláken v povrchových a vnitřních vrstvách výstřiku [42].. Sledujeme zde výraznější rozdíly ve výsledcích mezi jednotlivými měřeními v závislosti na nastavených zpracovatelských parametrech. Výsledné hodnoty měření teplotní délkové roztažnosti nad hodnotou 0°C jsou zobrazeny v tabulce 15, grafické znázornění vidíme v Grafu 14. Výstupy měření ze software Stare Default D8 V9.20 jsou uvedeny v Příloze PVII a PVII.

Tabulka 15: Výsledné hodnoty měření teplotní délkové roztažnosti

Teplota °C	1. vzorek ve směru toku	1. vzorek kolmo k toku	2. vzorek ve směru toku	2. vzorek kolmo k toku	3. vzorek ve směru toku	3. vzorek kolmo k toku
0,0	17,7	81,5	18,4	50,4	18,3	44,5
13,3	19,0					
15,5		84,5	11,2	55,8	20,1	51,0
26,6	18,9					
31,1		90,0	10,2	59,7	20,2	55,9
39,9	19,3					
46,6		95,1	9,0	64,6	17,7	66,2
53,2	17,1					
62,1		102,7	7,0	70,7	16,4	78,5
66,5	14,6					
77,6		112,1	5,5	76,7	14,7	90,1
79,2	13,4					
93,2		123,4	4,3	82,9	13,4	103,0
106,5	13,7					
108,7		135,9	3,4	89,2	12,0	115,9
119,8	14,5					
124,2		150,7	2,4	97,4	12,3	131,4
139,7		173,3	3,2	109,5	12,2	155,4



Graf č. 14: Grafické srovnání výsledků měření délkové teplotní roztažnosti

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala vlastnostmi a chováním kompozitů s polypropylenovou matricí, plněných dlouhým skleněným vláknem zpracovaných technologií vstřikování.

Pozornost se zaměřila na změny vlastností v souvislosti s použitím různých zpracovatelských podmínek, konkrétně zvýšeného zpětného tlaku a zvýšených otáček šneku. Na základě informací dostupných od výrobců těchto materiálů se předpokládaly změny vlastností v souvislosti se změnou délek skleněných vláken ve výliscích.

Pro zkoumání vlivu podmínek zpracování byly vybrány zkoušky vlastností, konkrétně tahová zkouška, zkouška rázově odolnosti Charpy provedená na dvou typech těles, a měření teplotní roztažnosti pomocí metody TMA. Dále bylo provedeno sledování délek vláken v nespalitelném zbytku. Pro srovnání chování materiálů byly některé zkoušky provedeny také na materiálech plněných krátkým skleněným vláknem.

Výsledky tahové zkoušky ukázaly, že nastavené zpracovatelské parametry neměly zásadní vliv na snížení modulu pružnosti v tahu. V případě aplikovaného zvýšeného zpětného tlaku došlo k jeho zvýšení u obou materiálů plněných dlouhým vláknem. Pevnost v tahu poklesla v řádu jednotek procent u těles lisovaných se zvýšenými otáčkami šneku u všech zkoušených materiálů.

Parametry zpracování ovlivnily výrazně hodnoty rázové odolnosti na tělesech, které byly zatěžovány kolmo na směr tečení taveniny a to u obou provedených zkoušek. K nejvýraznějšímu snížení hodnot došlo u materiálu s vyšším obsahem plniva. Na základě těchto výsledků je možno předpokládat, že nastavené parametry negativně ovlivnily délku vláken.

Tento jev byl prokázán při sledování délky vláken v nespalitelném zbytku. Vzorky lisované při zvýšeném zpětném tlaku i otáčkách šneku vykazovaly zkrácení vláken. Srovnání s délkou vláken ze vzorků materiálů PPSGF však ukazuje, že i takto zkrácená vlákna jsou delší, než u materiálů PPSGF.

Měření teplotní délkové roztažnosti ukázalo výrazný rozdíl v hodnotách v případě měření ve směru rovnoběžném a ve směru kolmém k tečení taveniny. Nejnižší teplotní délková roztažnost byla zjištěna u vzorku lisovaného při vysokém zpětném tlaku.

V diplomové práci se podařilo prokázat vliv zpracovatelských parametrů na vlastnosti kompozitů plněných dlouhým vláknem. Je proto potřeba této problematice věnovat pozornost v zpracovatelských podnicích.

Kompozity na bázi polypropylenu plněného dlouhým skleněným vláknem nacházejí stále větší uplatnění, a to především v automobilovém průmyslu. V těchto aplikacích jsou na vyrobené díly kladeny požadavky na vynikající vlastnosti v extremních podmínkách. Pro další zkoumání těchto materiálů a vlivu zpracovatelských podmínek na jejich vlastnosti bych proto doporučovala další zkoušky, jako jsou např. rázové i tahové zkoušky za snížených a zvýšených teplot, zkoušku HDT, creepové zkoušky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.

[2] TICONA. *Celstran: Long-fiber-reinforced thermoplastics (LFRT)*. 2007. Dostupné z: http://www.celanese.com/sitecore%20modules/web/-/media/Ticona/Files/Brochures/CelstranProBroEU0907B341EBRE.pdf

[3]NAVRÁTILOVÁ, Věra. *Materiály na bázi polypropylenu v automobilovém průmyslu*. Zlín, 2011. 60 s. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně, fakulta technologická.

[4] Automotive application: LGF-PP compounds helps cut costs. *Plastictoday* [online]. 2008 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: http://www.plasticstoday.com/articles/automotive-application-lgf-pp-compounds-helps-cut-costs

[5] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie* [online]. Vyd.2., Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007, 207 s. [cit. 2013-03-17]. ISBN 978-807-0806-623. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-978-80-7080-662-3

[6] MLEZIVA, Josef. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7.

[7] MLEJNEK, Petr. *Fotodegradace komerčních α-nukleovaných polypropylenů*. Zlín, 2009. 10-20 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

[8] BIESTERFELD PLASTIC GMBH. *Informační materiály* [online]. [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://www.biesterfeld-plastic.com

[9] KROČOVÁ, Blanka. *Částicové kompozity vyztužené krátkými vlákny*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké technické učení v Brně, fakulta chemická.

[10] PLUHAŘ, Jan. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL, 1989.

[11] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů* [online]. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. [cit. 2013-03-17]. ISBN 80-708-0568-4. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/uid_isbn-80-7080-568-4

[12] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.

[13] KNOB, Antonín. *Plazmochemické zpracování vláknových výztuží pro polymerní kompozity*. Brno, [cit. 2013-03-17]. 2012. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/4686/. Diplomová práce. VUT v Brně, fakulta chemická.

[14] BĚŤÁK, Lukáš. *Příprava roubovaných PP s různou koncentrací MA a IA*. Brno, 2008. 30 s. Bakalářská práce. VUT v Brně, fakulta chemická.

[15] KRAUSE-SAMMARTINO, L. E., Lucas, J. C., Reboredo, M. M., Aranguren M. I.: Maleic anhydride grafting of polypropylene: peroxide and solvent effect. *Plastic, Rubber and Composites*, 2006, vol. 35, no.3, pp. 117-123

[16] HULL, D. *An introduction to composite materials*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. ISBN 05-213-8855-4.

[17] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu: Polymery a kompozity s polymerní matricí.* Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008, 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4.

[18] KOŘÍNEK, Zdeněk. Technologie výroby kompozitů. *Technologie výroby kompozitů* [online]. 2010 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://www.volny.cz/zkorinek/technologie.pdf

[19] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vydání. Brno: VUT, 2003. 194 s. ISBN 80-214-2443-5.

[20] BENÍČEK, Josef. *Studium mechanických vlastností vstřikovaných stěn vyztužených krátkými vlákny*. Zlín, 2006. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická

[21] Manufacturing of Direct Long Fibre Reinforced Thermoplastics (D-LFT). *National Research Council Canada* [online]. Dostupné z: http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/eng/facilities/imi/magna-nrc-composites-centre/manufacturing-direct-long-fibre-thermoplastics.html

[22] Pushtrusion: Direct plastic compounding technology. *PlastiComp* [online]. 2013 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.plasticomp.com/pushtrusion/

[23] VAN POUCKE, Jeroen a James ALLAN. Long glass fiber polypropylene technology for. Automotive applications. *Society of plastics engineers: Automotive Division*

of the Society of Plastics [online]. 2006 [cit. 16.3.2013]. Dostupné z: http://www.speautomotive.com/SPEA_CD/SPEA2006/PDF/b/b1.pdf

[24] THOMASON, J. L. a M. A. VLUG. Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: 1. Tensile and flexural modulus. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1996, roč. 6, č. 27, 477–484.2011 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/1359835X9500065A

[25] KUMAR, K Senthil; BHATNAGAR, Naresh; GHOSH, Anup K. Mechanical Properties of Injection Molded Long Fiber Polypropylene Composites, Part 2: Impact and Fracture Toughness. *Polymer Composites*. 2008, vol. 29, no. 5 s. 525-533. ISSN:0272-8397.

[26] HORÁK, Pavel. *Vliv struktury na mechanické chování vstřikovaných plošných prvků*. Zlín, 2009. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická.

[27] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3., Manas, M., Vlcek, J. Aplikovaná reologie. 1. vyd. UTB Zlín, 2001. ISBN 80-7318-039-1.

[28] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999, 203 s. ISBN 80-708-0367-3.

[29] MAŇAS, Miroslav a Jiří VLČEK. *Aplikovaná reologie*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001, 144 s. ISBN 80-731-8039-1.

[30] DVOŘÁK, Zdeněk a Hana LÉDLOVÁ. *Základy výrobních procesů: Výrobní technologie zpracování polymerů vstřikováním*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická, 2007. studijní materiály.

[31] LENFELD, Petr. Technologie II - zpracování plastů: Vstřikování plastů. *Technická univerzita Liberec, fakulta strojní: Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec, 2013 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm

[32] SYNVENTIVE. *Zpracování plastů s dlouhými skelnými vlákny*. [prezentace firmy]

[33]SABIC. *Stamax long fibre polypropylene: Injection moulding guide* [informační materiály]. 2011.

[34] MORITOMI, Satoru; WATANABE, Tsuyoshi; KANZAKI, Susumu. Polypropylene Compounds for Automotive Applications. *"SUMITOMO KAGAKU" : R&D Report*. 2010, 1, s. 1-16.[cit. 2013-05-06]. Dostupné z www: www.sumitomo-chem.co.jp/english/rd/report/theses/docs/20100100_a2g.pdf.

[35]PAVLÍNEK, Vladimír. *Statické zkoušky krátkodobé: kapitola 9* [výukové materiály do předmětu KZM]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická.

[36] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 3., přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 266 s. ISBN 80-718-3262-6.

[37] PAVLÍNEK, Vladimír. *Dynamické zkoušky: kapitola 11* [výukové materiály do předmětu KZM]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická.

[38] ELISEK, Petr. *Houževnatost polymerních materiálů na bázi izotaktického polypropylenu*. Zlín, 2006. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická.

[39] VĚCHET, Stanislav. SLEZSKÁ UNIVERZITA V OPAVĚ. *Mechanické vlastnosti a charakteristiky materiálů I: Přednáška č.2 do předmětu Úvod do materiálových věd a inženýrství*. Opava, 2009.

[40] POLANSKÝ, Radek. Teoretické a praktické aspekty termomechanické analýzy. *Elektrorevue*. 2008, č. 15, s. 12. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.elektrorevue.cz/cz/download/teoreticke-a-prakticke-aspekty-termomechanicke-analyzy/

[41] *IDES Procpector: materiálová databáze* [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: http://prospector.ides.com/default.aspx

[42] ITO, T., SUGANUMA, T., WAKASHIMA, K., *Journal of materials science letters* 18. 1999, 1963-1965

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_n	vykonaná práce
W	deformační energie
b	šířka tělesa
h	výška tělesa
TMA	termomechanická analýza
σ	napětí
σ_t	napětí při přetržení
ε	deformace
ε_t	tažnost
α_L	koeficient délkové teplotní roztažnosti
ΔL	změna délky
N	jednotka síly
J	jednotka práce
m^2	metr čtverečný
F_{max}	maximální síla
A_0	počáteční průřez tělesa
L/D	aspektní poměr
ot./min.	otáčky za minutu
MPa	jednotka tlaku
°C	jednotka teploty
s.	sekunda
L_0	původní délky zkušebního tělesa
L_t	délka zkušebního tělesa při přetržení

PP	polypropylen
E-modul	modul pružnosti
CLTE	součinitel lineární tepelné roztažnosti
PE	polyetylen
EPM	etylen-propylenový kaučuk
ITT	index toku taveniny
TPO	termoplastický polyolefin
EPDM	etylen-propen-dienový kaučuk
MA	anhydrid kyseliny maleinové
PP-g-MA	polypropylen roubovaný anhydridem kyseliny maleinové
GF	skleněné vlákno
SGF	krátké skleněné vlákno
LGF, LFT	dlouhé skleněné vlákno
ABS	akrylonitril butadien styren
O_2	kyslík
$SiCl_4$	chlorid křemičitý
UV	ultrafialové záření
SEM	rastrovací elektronový mikroskop
LFRT	termoplastické kompozity plněné dlouhým vláknem
ILC	In-line compounding
D-LFT	Direct Long-Fiber Thermoplastic
LGFPP	polypropylen plněný dlouhým skleněným vláknem
SGFPP	polypropylen plněný krátkým skleněným vláknem
HDT	teplotní odolnost při zatížení
T	teplota
P	tlak

V	objem
s_{max}	maximální tloušťka stěny výlisku
Tg	teplota skelného přechodu
L	délka
D	tloušťka
s	směrodatná odchylka
x	střední hodnota

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Polymerace polypropylenu [3] 13
Obr. 2: Konfigurace polypropylenu [7] 14
Obr. 3: Rozdělení polymerů dle výkonu a struktury [8] 15
Obr. 4: Synergické chování složek kompozitu [11] 18
Obr. 5: Rozdělení vláknových kompozitů dle poměru výztuže [9] 19
Obr. 6: Závislost pevnosti skleněného vlákna na jeho průřezu (vodorovná osa udává průřez vlákna v μm) [12] 20
Obr. 7: Schematický obrázek mezifáze kompozitu [13] 21
Obr. 8: Princip vazby mezi povrchovou vrstvou skla a PP řetězcem s naroubovaným PP-g-MA [12] 22
Obr. 9: Snímky ze SEM – kompozit plněný 30 % GF (zleva: bez přídavku kopolymeru; s přídavkem 10 hm. % PP-g-MA) [15] 22
Obr. 10: Principy působení sil na rozhraní vlákno-polymer. [16] 23
Obr. 11: Vliv délky vlákna na přenos namáhání z matrice na výztuž [17] 23
Obr. 12: Pultruzní zařízení na výrobu LFT [12] 24
Obr. 13: Princip výroby LFRT metodou ILC (D-LFT) [21] 25
Obr. 14: Princip výroby LFRT metodou ILC [22] 26
Obr. 15: Tvar granulátu plněného krátkým a dlouhým vláknem (vlevo neuspořádaně rozptýlená skleněná vlákna, vpravo podélně orientovaná dlouhá skleněná vlákna) [2] 26
Obr. 16: Srovnání rázové zkoušky PP+SGF vs. PP+LGF kompozitu [23] 28
Obr. 17: SEM fotografie LGFPP kompozitu (70x zvětšeno) [25] 29
Obr. 18: Vliv umístění vtoku na orientaci vláken: a) centrálně umístěný vtok, b) v rohu umístěný vtok, c) filmový vtok [26] 29
Obr. 19: Postup plnění dutiny formy taveninou: a) bodový vtok umístěný zboku, b) filmový vtok, c) centrálně umístěný bodový vtok, d) dva protilehlé umístěné bodové vtoky [26] 30
Obr. 20: Fáze vstřikovacího cyklu: a) uzavření formy, b) přísun vstřikovací jednotky, c) plnění dutiny formy, d) dotek, e) plastikace, f) odsunutí vstřikovací jednotky, g) otevření formy a vyhození výstřiku [34] 36
Obr. 22: Zpracovatelská oblast procesu vstrikování. [39] 37
Obr. 22: Průběh smrštění v čase [30] 37

Obr. 23: Vliv procesních parametrů na průběh smrštění [27] 38
Obr. 24: Schéma vstřikovacího stroje se šnekovou plastifikační jednotkou 39
Obr. 25: Podíl vlivů zpracovatelského procesu na délku vláken [32] 40
Obr. 26: Doporučení pro provedení špičky šneku pro zpracování LFRT [32] 41
Obr. 27: Doporučená konstrukce násypky pro zpracování LFRT [33] 41
Obr. 28: Doporučená geometrie studeného vtokového kanálu pro zpracování LFRT(s_{max} - max. tloušťka stěny výlisku) [32] 42
Obr. 29: Obecná tahová křivka. [35] 44
Obr. 30: Princip zkoušek rázové houževnatosti a) Charpy, b) Izod [38] 45
Obr. 31: Charpyho kladivo [39] 45
Obr. 32: Některé typy měřících sond pro TMA – a) expanzní, b) makroexpanzní, c) penetrační, d) hemisférická, e) pro tříbodový ohyb, f) tahová) [40] 46
Obr. 33: TMA křivka tepelné roztažnosti sklolaminátu tloušťky 1,5 mm (rychlost ohřevu 2 °C/min, přítlačná síla 0,01 N, expanzní sonda) [40] 47
Obr. 34: Výstřiky pro přípravu vzorků 52
Obr. 35: Vstřikovací stroj Mitsubishi 180MEtIII 52
Obr. 36: Stolní vysekávací lis 55
Obr. 37: Řezání vzorků na stroji Buehler Isomet 4000 56
Obr. 38: Pícka ESA K59 56
Obr. 39: Optický polarizační mikroskop Intraco Micron s digitálním fotoaparátem Canon G10 57
Obr. 40: Zařízení pro tahovou zkoušku – Testometric M350-5CT 58
Obr. 41: Zařízení pro zkoušku rázové houževnatosti Charpy (vlevo zařízení Zwick Roell 5113; vpravo Charpyho kladivo 3,92 J) 59
Obr. 42: Termomechanický analyzátor TMT SDTA841e 60
Obr. 43: Zbytek po spálení vzorku č. 1 před a po rozpadnutí skeletu (jeden dílek na měřítku odpovídá 1 mm) 61
Obr. 44: Vzorek č. 1 (vlevo), vzorek č. 2 (vpravo), materiál PPLGF50, nastavení 1 – snímek z optického mikroskopu 61
Obr. 45: Vzorek č. 3, materiál PPLGF50, nastavení 2 (vlevo); vzorek č. 4, materiál PPLGF50, nastavení 3 (vpravo) – snímek z optického mikroskopu 62
Obr. 46: Vzorek č. 5, materiál PPSGF50, nastavení 1 (vlevo); vzorek č. 6, materiál PPSGF50, nastavení 2 (vpravo) – snímek z optického mikroskopu 62

Obr. 47: Vzorek č. 7, materiál PPLGF50, nastavení 3 – snímek z optického mikroskopu 63

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vlastnosti jednotlivých stereoizomerů polypropylenu [3] 13
Tabulka 2: Zpracovatelské podmínky matriálu Celstran PP [41] 50
Tabulka 3: Zpracovatelské podmínky materiálu Themofill HP F910X [41] 51
Tabulka 4: Nastavení parametrů pro vstřikování lopatek z PP+LGF50 53
Tabulka 5: Nastavení parametrů pro vstřikování lopatek z PP+LGF30 53
Tabulka 6: Nastavení parametrů pro vstřikování lopatek z PP+SGF50 54
Tabulka 7: Nastavení parametrů pro vstřikování lopatek z PP+SGF30 54
Tabulka 8: Vzorky pro sledování vláken v nespalitelném zbytku 57
Tabulka 9: Výsledky zkoušky v tahu 64
Tabulka 10: Porovnání vlivu zpracovatelských parametrů na modul pružnosti v tahu a pevnost v tahu 67
Tabulka 11: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti (tělesa z destiček) 67
Tabulka 12: Porovnání vlivu zpracovatelských parametrů na rázovou houževnatost Charpy 70
Tabulka 13: Výsledky měření rázové houževnatosti Charpy – tělesa z lopatek 70
Tabulka 14: Porovnání vlivu zpracovatelských parametrů na rázovou houževnatost – tělesa z lopatek 71
Tabulka 15: Výsledné hodnoty měření teplotní délkové roztažnosti 73

SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 1: Porovnání vlastností SGFPP a LGFPP kompozitů [23] 27
Graf č. 2: Kvalitativní vztah mezi mechanickými vlastnostmi a délkou vlákna u plněného PP [24] 28
Graf č. 3: Vliv kompatibilizátoru na vrubovou houževnatost PPLGF [25] 30
Graf č. 4: Závislost zbytkové délky vláken na obsahu vláken vstřikovaného kompozitu PP+LGF (●hmotnostní průměr vláken, ▲délkový průměr vláken) [24] 32
Graf č. 5: Závislost pevnosti v tahu a ohybu obsahu vláken vstřikovaného kompozitu PP+LGF (●v tahu, ▲ v ohybu) [24] 32
Graf č. 6: Závislost rázové houževnatosti na obsahu vláken vstřikovaného kompozitu PP+LGF (●23°C, ▲ -40°C) [24] 33
Graf č. 7: Závislost tepelné odolnosti HDT na obsahu vláken vstřikovaného kompozitu PP+LGF [24] 33
Graf č. 8: Vliv geometrie šneku vstřikovacího stroje na pevnost v ohybu [34] 41
Graf č. 9: Porovnání výsledků tahové zkoušky – modul pružnosti v tahu 65
Graf č. 10: Porovnání výsledků tahové zkoušky - pevnost v tahu 66
Graf č. 11: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti Charpy – směr napříč k toku taveniny 68
Graf č. 12: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti Charpy – směr rovnoběžně se směrem toku taveniny 69
Graf č. 13: Výsledky měření rázové houževnatosti Charpy – tělesa z lopatek 71
Graf č. 14: Grafické srovnání výsledků měření délkové teplotní roztažnosti 73

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list Celstran PP-GF50-0403 P10

Příloha P II: Materiálový list Celstran PP-GF30-0403 P10

Příloha P III: Materiálový list Thermofil HP F910X

Příloha P IV: Materiálový list Syntegum 1030 AFV 00

Příloha P IV: Materiálový list Syntegum 1030 AFV 00

Příloha P V: Příklad výstupu z tahové zkoušky

Příloha P VI: Příklad výstupu z rázové zkoušky na zařízení zwick/Roell

Příloha P VII: Křivky měření teplotní délkové roztažnosti metodou TMA

Příloha P VIII: Křivky měření teplotní délkové roztažnosti metodou TMA

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST CELSTRAN PP-GF50-0403 P10

Ticona
Performance Driven Solutions

CELSTRAN® PP-GF50-0403 P10 | PP | Glass Reinforced

Description

Material code according to ISO 1043-1: PP

Heat stabilized polypropylene reinforced with 50 weight percent long glass fibers. The fibers are chemically coupled to the polypropylene matrix. The pellets are cylindrical and normally as well as the embedded fibers 10 mm long.

Parts molded of CELSTRAN have outstanding mechanical properties such as high strength and stiffness combined with high heat deflection. The notched impact strength is increased at elevated and low temperatures due to the fiber skeleton built in the parts. The long fiber reinforcement reduces creep significantly.

The very isotropic shrinkage in the molded parts minimizes the warpage.

Complex parts can be manufactured with high reproducibility by injection molding.

Application field: Functionial/structural parts for automotive

Physical properties	Value	Unit	Test Standard
Density	1340	kg/m³	ISO 1183

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Tensile modulus (1mm/min)	12000	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile stress at break (5mm/min)	150	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile strain at break (5mm/min)	2	%	ISO 527-2/1A

Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature (10°C/min)	165	°C	ISO 11357-1,-2,-3

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST CELSTRAN PP-GF30-0403 P10

Ticona
Performance Driven Solutions

CELSTRAN® PP-GF30-0403 P10 | PP | Glass Reinforced

Description

Material code according to ISO 1043-1: PP

Polypropylene reinforced with 30weight percent long glass fibers. The fibers are chemically coupled to the polypropylene matrix. The pellets are cylindrical and normally as well as the embedded fibers 10 mm long.

Parts molded of CELSTRAN have outstanding mechanical properties such as high strength and stiffness combined with high heat deflection. The notched impact strength is increased at elevated and low temperatures due to the fiber skeleton built in the parts. The long fiber reinforcement reduces creep significantly.

The very isotropic shrinkage in the molded parts minimizes the warpage.

Complex parts can be manufactured with high reproducibility by injection molding.

Application field: Functional/structural parts for automotive

Physical properties	Value	Unit	Test Standard
Density	1120	kg/m³	ISO 1183

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Tensile modulus (1mm/min)	7100	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile stress at break (5mm/min)	123	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile strain at break (5mm/min)	2.5	%	ISO 527-2/1A

Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature (10°C/min)	166	°C	ISO 11357-1,-2,-3
DTUL @ 1.8 MPa	158	°C	ISO 75-1/-2
DTUL @ 8.0 MPa	134	°C	ISO 75-1/-2

PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST THERMOFIL HP F910X

TECHNICAL DATA SHEET

PRODUCT CODE:	THERMOFIL HP F910X
CATEGORY:	ADVANCED ENGINEERING

DESCRIPTION :	50% High Performance Glass Coupled Polypropylene with outstanding Tensile strength, impact strength and stiffness. The grade has improved retention of stiffness and creep properties at elevated temperature.
APPROVALS :	
TYPICAL APPLICATIONS:	Automotive and industrial. Long fibre glass PP, Glass polyamide and Glass PBT replacement.

Properties at 23°C	Test Method	Units	Value
Reinforcement Content	Internal Method	%	50
Specific Gravity (SG)	ISO R1183		1.33
Melt Flow Rate (MFR)	ISO R1133	g/10 minutes	3
Mould Shrinkage	Internal Method	%	0.1-0.9
Flammability Resistance	UL 94/1.0mm	-	HB
Tensile Strength	ISO R527	MPa	138
Elongation at Break	ISO R527	%	2.6
Tensile Modulus	ISO R527	GPa	13.0
Flexural Strength	ISO 178	MPa	182
Flexural Modulus	ISO 178	GPa	10.8
Izod Impact notched 23°C	ISO R180	KJ/m²	16
Charpy Impact notched 23°C	ISO 179/1eA	KJ/m²	10.5
Charpy Impact unnotched 23°C	ISO 179/1eU	KJ/m²	60
Charpy Impact notched -30°C	ISO 179/1eA	KJ/m²	9
Charpy Impact unnotched -30°C	ISO 179/1eU	KJ/m²	66
Heat Distortion Temperature	ISO 75/0.45 MPa	°C	163
Heat Distortion Temperature	ISO 75/1.8 MPa	°C	154

Sumika Polymer Compounds
Sumitomo Chemical Group
Sumika Polymer Compounds (UK) Ltd.
28, New Lane, Havant Hampshire PO9 2NQ UK
Telephone : 00 44 (0) 23 92 48 63 50 Fax 00 44 (0) 23 92 47 23 88

Information in this publication and otherwise supplied to users is based on our general experience and is given in good faith, but because of the many particular factors which are outside our knowledge and control and affect the use of the products, no warranty is given or to be implied with respect to such information. The property values and applications quoted are believed typical but do not constitute a specification. Users should make their own tests to determine the suitability of the information and products for any particular use. Users also assume all responsibility and liability for loss or damage arising from the processing and use of the information and products. Freedom under patents, copyright and registered designs cannot be assumed.

Registered in England No 2594313

PŘÍLOHA P IV: MATERIÁLOVÝ LIST SYNTEGUM 1030 AFV 00

LA.M.PLAST. s.a.s. di Aldo Redaelli e C.
Frazione Molino Principe - 20034 Giussano MI Italy
Tel. (+39)03623537.1 - Fax. (+39)0362332109 (+39)0362852409
E-mail lamplast@lamplast.it - Internet http://www.lamplast.it

Azienda certificata
Certificato n.800/2
Norma UNI-EN ISO 9001

Technical data sheet

SYNTEGUM 1030 AFV 00 is a 30% fiber glass chemically coupled reinforced homopolymer polypropylene compound.

Its main properties are:
- high dimensional stability,
- low shrinkage after injection moulding,
- high strength,
- high creep resistance also at high temperatures.

Thanks to these properties, SYNTEGUM 1030 AFV 00 is suitable for the production of high-tecnological products, which in normal working conditions are submitted to high temperatures and considerable mechanical solicitations.

Property	Measure method	UM	Value
Density (23°C)	ISO R 1183	g/cmł	1.14
Melt flow index	ISO R 1133	g/10 min	5.0
Izod impact notched (23°C)	ISO R 180	kJ/m¸	9.0
Tensile strength at yield	ISO R 527	kg/cm¸	750
Vicat met. B 5 kg	ISO R 306	°C	125
Filler content 750°C-30 min	ISO R 3451	%	30

The quality manager

PŘÍLOHA P V: PŘÍKLADY VÝSTUPU Z TAHOVÉ ZKOUŠKY

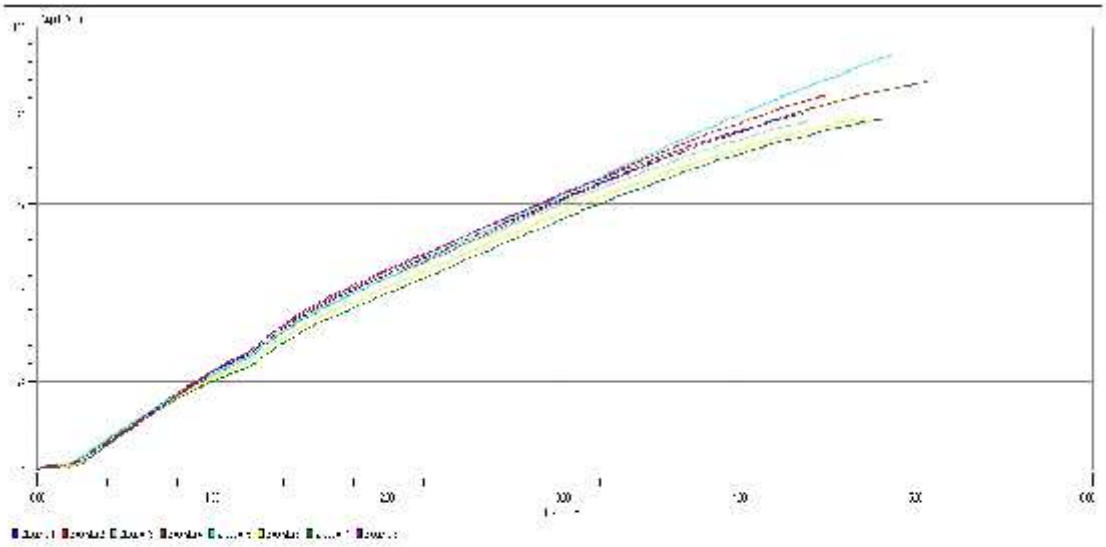
Testometric
materials testing machines

winTest™
Analysis

Ref 1 : 2.PPLGF50 40ot 20zp

Machine No. : 0350-09232
Nazev zkousky : Tah Lopatky vstrik velke
Druh zkousky : Tah
Datum zkousky : 05/04/2013 12:53
Rychlost zkousky : 1.000 mm/min
Predpeti : Vypnuto
Delka vzorku : 80.000 mm

Zkouska c.	Sirka (mm)	Tloustka (mm)	Younguv modul (MPa)	Taznost pri nejvyssi pevnosti (%)	Napeti pri nejvyssi sile (MPa)	Taznost pri pretrhu (%)	Napeti pri pretrhu (MPa)
1	9.970	4.360	3570.196	4.356	96.457	4.356	96.457
2	9.970	4.360	3647.551	4.504	101.251	4.504	101.251
3	9.940	4.350	3554.215	4.388	94.389	4.388	94.389
4	9.950	4.380	2867.115	5.084	105.117	5.084	105.117
5	9.910	4.380	3076.261	4.851	111.847	4.851	111.847
6	9.960	4.400	3382.305	4.726	95.560	4.726	95.560
7	9.960	4.370	3075.927	4.824	94.876	4.824	94.876
8	9.930	4.350	3441.381	4.075	92.966	4.075	92.966
Min	9.910	4.350	2867.115	4.075	92.966	4.075	92.966
Průměr	9.951	4.369	3326.869	4.601	99.058	4.601	99.058
Max	9.960	4.400	3647.551	5.084	111.847	5.084	111.847
S.O.	0.024	0.017	284.622	0.328	6.552	0.328	6.552
VK	0.237	0.395	8.555	7.127	6.614	7.127	6.614
D.H.D	9.932	4.354	3088.921	4.327	93.580	4.327	93.580
H.H.D.	9.971	4.383	3564.816	4.875	104.535	4.875	104.535



Unit 1 Lincoln Business Park Lincoln Close.
Rochdale, Lancashire. England OL11 1NR
Tel: (44) (0)1706 654039 Fax: (44) (0)1706 646089
Email: info@testometric.co.uk Website: www.testometric.co.uk

PŘÍLOHA P VI: PŘÍKLADY VÝSTUPU Z RÁZOVÉ ZKOUŠKY NA ZAŘÍZENÍ ZWICK/ROELL

Test protocol

Zwick / Roell

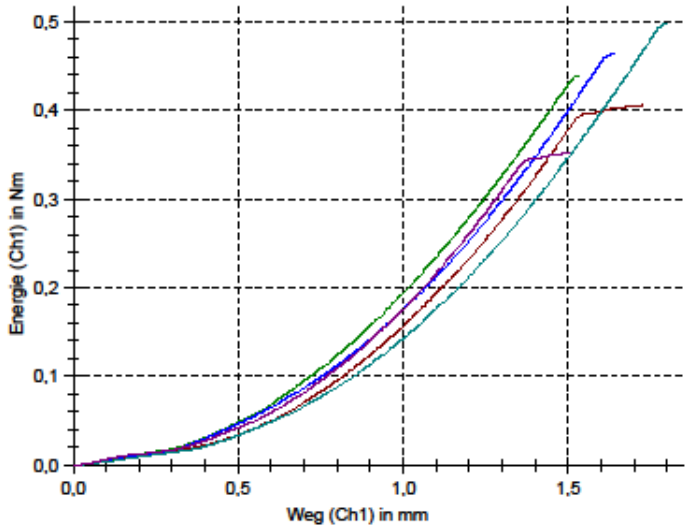
Machine data:

Type of machine : ZWICK 5113

Specimen data:

Customer	:		Position of specimen	:	
Tester	:		Support separation	:	40,00 mm
Date	:	2013-04-02	Width of the specimen	:	2,13 mm
Clock time	:	11:09:14	Length	:	80,00 mm
Material	:		Height	:	10,11 mm
Product designation	:		Height in the notch base	:	10,11 mm
Specimen shape	:	ISO	Test cross-section	:	21,53 mm²
Notch radius	:	0,00 mm	Specimen temperature	:	23,00 °C
Notch angle	:	0,0 °			

Series graphics:

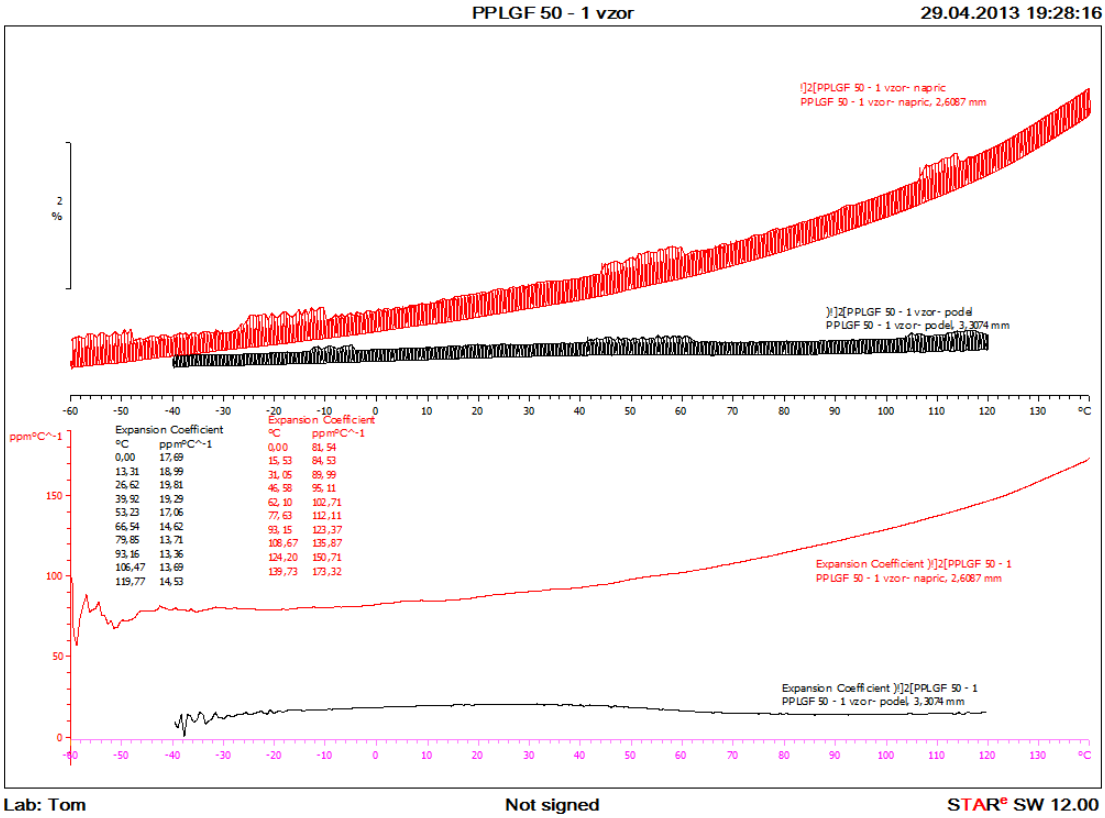


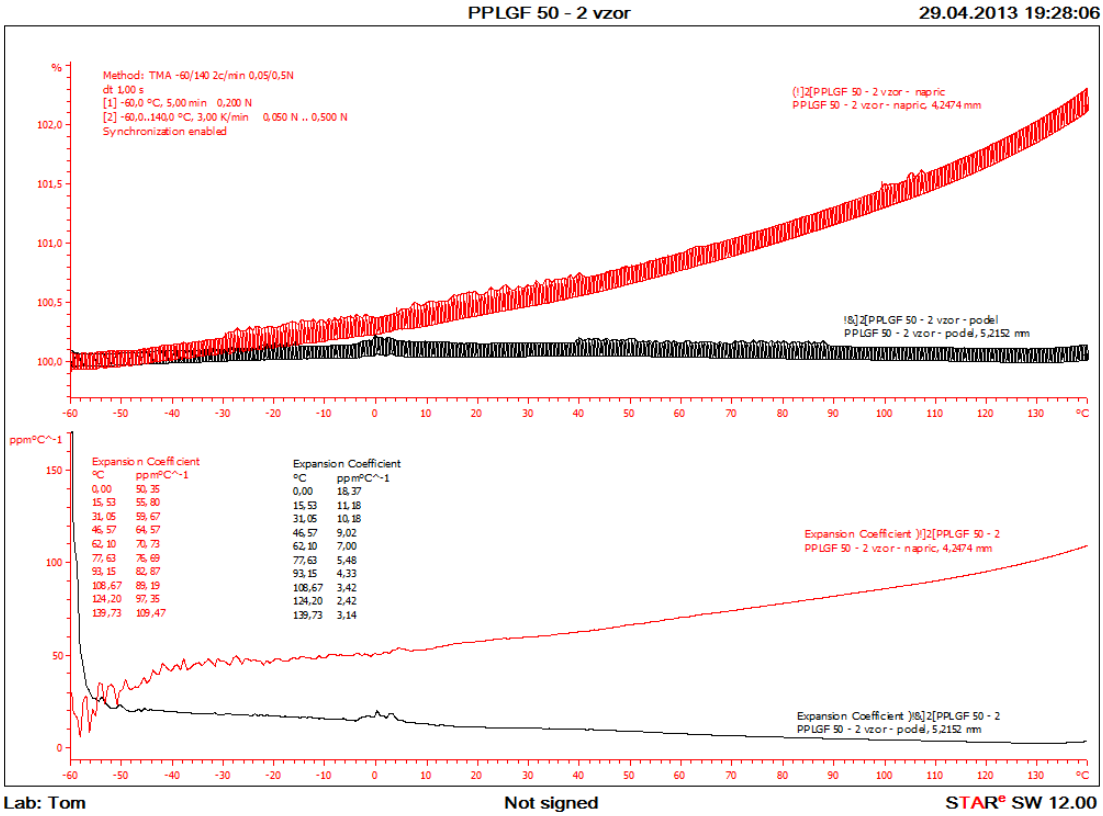
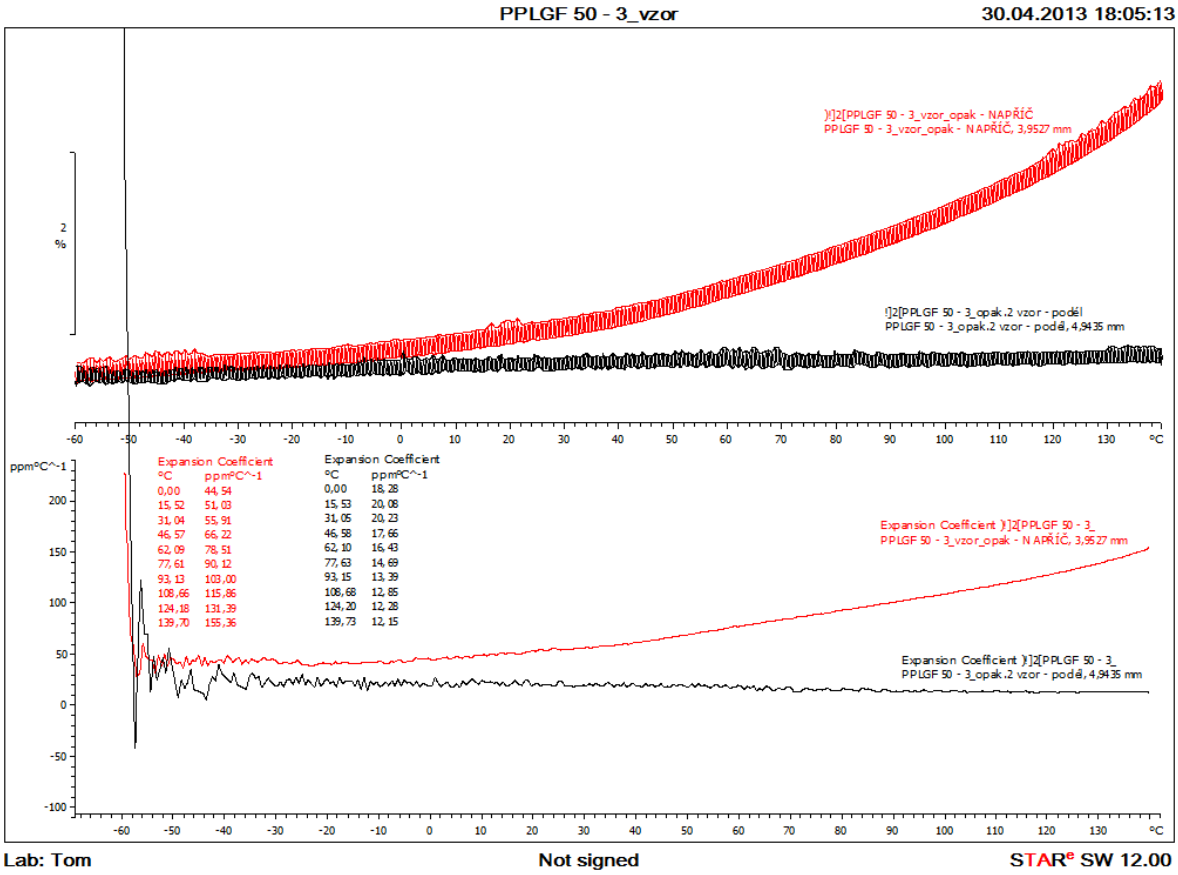
Statistics:

Sub-series #2 n = 5	F(m) kN	S(m) mm	V(m) m/s	W(ARE) J	(ak) KJ / m^2
$\bar{x}$	0,540	1,517	2,805	0,468	19,96
s	0,021	0,149	0,017	0,050	2,54
v	3,88	9,79	0,61	10,72	12,70

Test results:

PŘÍLOHA P VII: KŘIVKY MĚŘENÍ TEPLOTNÍ DÉLKOVÉ ROZTAŽNOSTI METODOU TMA





PŘÍLOHA P VIII: KŘIVKY MĚŘENÍ TEPLOTNÍ DÉLKOVÉ ROZTAŽNOSTI METODOU TMA