

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Výrobní proces vstřikování kompozitního materiálu

The injection mold process of the composite production

AUTOR: Antonín Voldřich
STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství
VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jan Skočilas Ph.D.

PRAHA 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných vzorů

V Praze dne 8. 6. 2018

.....

Podpis

Abstrakt

Tato práce se zabývá procesem vstřikování plastových kompozitů a vlivem nastavení vstřikovacího stroje na mechanické vlastnosti výrobků. Obsahem teoretické části je popis polymerních materiálů, výrobních strojů, vstřikovacího procesu a vlivu technologických parametrů na kvalitu a mechanické vlastnosti výrobků z materiálu PA 6 a PA 66 včetně plniva. Praktická část je věnována optimálnímu nastavení stroje pro vstřikování polyamidní směsi a jeho vlivu na mechanické vlastnosti zkušebních tělísek.

Klíčová slova: polymery, vstřikování, polyamidy, vstřikovací stroj, mechanické vlastnosti, vstřikování kompozitů, PA 6, PA 66

Abstract

This thesis deals with the process of plastic composite injection and effect of technological parameters on a quality and mechanical properties of the products. Theoretical part consists of an introduction to polymer materials, description of an injection molding machine, description of an injection process and effect of technological parameters on a quality and mechanical properties of products made from material PA 6 and PA 66 including additives. The practical part is focused on optimal settings of the injection molding machine for injecting polyamid blend and its effect on mechanical properties of the test specimens.

Keywords: polymers, injection molding, injection molding machine, mechanical properties, injection molding of composites, PA 6, PA 66

Poděkování

Chtěl bych především poděkovat panu doktoru Janu Skočilasovi za jeho odborné vedení, podnětné rady a projevenou trpělivost při zpracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval paní doktorce Zdeňce Jeníkové za její cenné připomínky a pomoc při zpracování praktické části této práce.

ÚVOD.....	8
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY	9
1.1 DEFINICE POLYMERŮ	9
1.2 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	9
1.2.1 TERMOPLASTY	10
1.2.2 REAKTOPLASTY	10
1.2.3 ELASTOMERY	11
1.2.4 TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY	11
1.3 MOLEKULÁRNÍ STRUKTURA TERMOPLASTŮ	12
1.3.1 LINEÁRNÍ MAKROMOLEKULY	12
1.3.2 ROZVĚTVENÉ MAKROMOLEKULY.....	12
1.3.3 ZESÍŤOVANÉ MOLEKULY.....	12
1.4 NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURA.....	13
1.4.1 AMORFNÍ STRUKTURA.....	13
1.4.2 SEMIKRYSTALICKÁ STRUKTURA	13
2 PŘÍSAKY DO POLYMERŮ	14
3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY PRO VSTŘIKOVÁNÍ.....	16
3.1 ČÁSTICOVÁ PLNIVA	16
3.2 VYZTUŽUJÍCÍ PLNIVA	16
3.3 NANOPLNIVA.....	17
3.4 KOMPOZITNÍ SLITINY, SMĚSI, BLENDS	17
4 POLYAMIDY	18
4.1 VLASTNOSTI POLYAMIDŮ	18
4.2 MOŽNOSTI POUŽITÍ.....	19
4.3 POLYAMID 6.....	19
4.4 POLYAMID 66	20
4.4.1 PA 6 A PA 66 + ADITIVA.....	20
5 VSTŘIKOVACÍ STROJE	22
5.1 PARAMETRY VSTŘIKOVACÍHO STROJE.....	22
5.2 ROZDĚLENÍ VSTŘIKOVACÍCH STROJŮ	22
5.3 ČÁSTI VSTŘIKOVACÍHO STROJE	23
5.3.1 VSTŘIKOVACÍ JEDNOTKA.....	23
5.3.2 UZAVÍRACÍ JEDNOTKA.....	26

5.3.3	VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	26
5.3.4	RÁM STROJE A POHON	27
5.3.5	ŘÍZENÍ.....	27
6	PROCES VSTŘIKOVÁNÍ.....	28
6.1	VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	28
6.2	FÁZE VSTŘIKOVACÍHO CYKLU A JEJICH VLIV NA VLASTNOSTI VÝSTŘIKU.....	29
6.3	PARAMETRY VSTŘIKOVACÍHO PROCESU	31
7	VSTŘIKOVÁNÍ POLYAMIDŮ PA 6 A PA 66.....	35
7.1	SUŠENÍ GRANULÁTU	35
7.2	DOPORUČENÉ PARAMETRY VSTŘIKOVÁNÍ.....	35
7.2.1	DALŠÍ DŮLEŽITÁ DOPORUČENÍ: [2, 13].....	36
7.3	DOPORUČENÉ PARAMETRY VSTŘIKOVÁNÍ OD DODAVATELŮ	36
7.3.1	SHRNUTÍ DOPORUČENÝCH HODNOT PRO VSTŘIKOVÁNÍ VYZTUŽENÝCH PA6 A PA66	38
7.4	VĚDECKÉ PRÁCE ZABÝVAJÍCÍ SE OPTIMALIZACÍ PARAMETRŮ VSTŘIKOVÁNÍ PA6 A PA66	39
8	SHRNUTÍ LITERÁRNÍ REŠERŠE	43
9	PRAKTICKÁ ČÁST.....	45
9.1	POPIS ZKUŠEBNÍHO TĚLÍSKA	45
9.2	POPIS MATERIÁLU PRO VSTŘIKOVÁNÍ.....	46
9.3	POPIS OVLÁDÁNÍ STROJE	47
9.4	POPIS PRŮBĚHU VSTŘIKOVÁNÍ	50
9.5	TAHOVÁ ZKOUŠKA	53
9.5.1	POPIS TAHOVÉ ZKOUŠKY.....	54
9.5.2	HODNOTY F A ΔL VYČTENÉ Z TAHOVÉHO DIAGRAMU:	54
9.5.3	VYPOČTENÉ HODNOTY	56
9.5.4	VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY	57
9.6	POZOROVÁNÍ POD MIKROSKOPEM	58
10	ZÁVĚR.....	60
	SEZNAM ZDROJŮ.....	62
	SEZNAM TABULEK	65
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	66

ÚVOD

Vstřikování plastů do formy je v dnešní době nerozšířenější technologií pro zpracování plastů. Pro tento účel se čím dál tím více používají kompozitní materiály s příměsí, které umožňují jedinečné vlastnosti vyrobených součástí. V rámci tématu bakalářské práce se zaměřuji na proces vstřikování kompozitní směsi polyamidu a k tomu vhodných parametrů nastavení vstřikovacího stroje.

V teoretické části bakalářské práce nejprve popisují základní rozdělení polymerních materiálů vhodných pro vstřikování a jejich makromolekulární strukturu, která hraje důležitou roli při samotném vstřikovacím procesu. Dále se věnuji kompozitním materiálům a významu různých druhů plniv na výsledné vlastnosti výlisků. V následujících kapitolách popisují celý proces vstřikování, parametry s tímto procesem spojené a druhy vstřikovacích strojů.

V literární rešerši se zabývám vlivem konkrétních parametrů vstřikování na kvalitu a mechanické vlastnosti výrobků pro materiál PA 6 a PA 66 s příměsí skleněnými vlákny a na doporučuji vhodné nastavení stroje pro zpracování těchto materiálů.

Ve druhé části této práce je popsán proces výroby zkušebních tělísek, na kterém jsem se podílel, při vstřikování polyamidní směsi PA 6 + PA 66 + GF do formy. Podrobněji se věnuji průběhu celého procesu, vzniklým komplikacím a způsobu nastavování stroje. V poslední části bakalářské práce vyhodnocuji mechanické a strukturní vlastnosti vzorků, u kterých jsem provedl tahovou zkoušku.

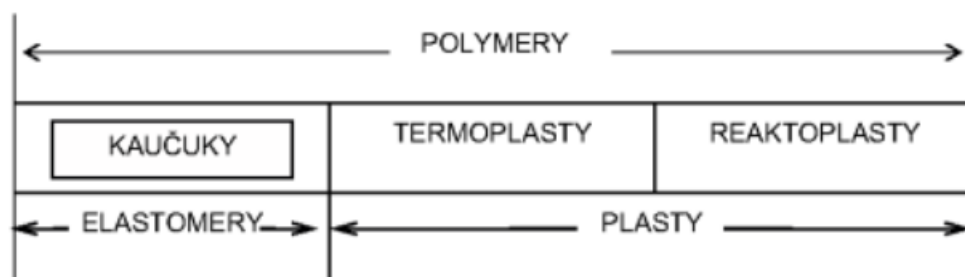
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

1.1 Definice polymerů

Polymery jsou přírodní nebo syntetické chemické látky tvořené z molekul jednoho či více atomů (nejčastěji atomy uhlíku, vodíku a kyslíku) nebo skupin molekul navzájem spojených ve velkém počtu. Od ostatních materiálů odlišuje polymery řetězcová struktura jejich makromolekul, ve kterých se podobně jako článek v řetězu opakuje základní jednotka mer, odvozená od výchozí molekuly – monomeru [1] [2].

1.2 Rozdělení polymerů

Jednotlivé druhy polymerů mohou mít velmi rozdílné vlastnosti a tyto materiály můžeme rozdělit podle mnoha kritérií. Vzhledem k tematickému okruhu bakalářské práce podrobněji popíši pouze rozdělení polymerů podle tepelného chování, jak je možné vidět na obr.1 [1].



Obr. 1 - Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [1]

1.2.1 Termoplasty

Jedná se polymerní materiály, které mění svůj tvar působením tepla a smykovými silami. Dají se nejlépe ze všech polymerních materiálů zpracovat pomocí vstříkovaní do formy, kterému se budu věnovat v dalších kapitolách. Když se zahřejí, přecházejí do plastického stavu, do stavu viskózních newtonovských kapalin, kde jsou snadno tvářitelné a zpracovatelné různými technologiemi.

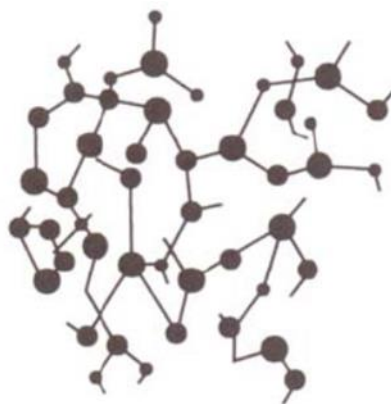
Dále je rozdělujeme na amorfní termoplasty a semikristalické, v závislosti na struktuře jejich makromolekul (viz Kapitola 1.4). Toto rozdělení bývá velmi důležité z hlediska zpracovatelnosti. Abychom přivedli termoplasty zpět do tuhého stavu, musíme je ochladit pod teplotu tání T_m (semikristalické plasty) respektive teplotu viskózního toku T_f (amorfní plasty). Po ochlazení je můžeme opět převést zpět do taveniny působením tepla. Jelikož při zahřívání nedochází ke změně v chemické struktuře termoplastu, lze proces měknutí a následného tuhnutí opakovat teoreticky do nekonečna [2] [3].

Mezi termoplasty patří i polyamidy, kterým bude věnovaná samostatná kapitola.

1.2.2 Reaktoplasty

Jsou to polymerní materiály, dříve též nazývané termosety, které také v první fázi zahřívání měknou a je možné je tvářet, ale jen omezenou dobu po zahřátí. V průběhu následujícího zahřívání dochází u reaktoplastů k chemické reakci – tzv. vytvrzování. Jde o prostorové zesíťování struktury, díky kterému změní materiál své vlastnosti. Tím se stává netavitelný a nerozpustný a tento děj je nevratný.

Reaktoplasty tak nelze znovu tvarovat, svařovat, ani převést do taveniny. Výrobky z tohoto typu plastů mají vysokou chemickou a tepelnou odolnost, tuhost a tvrdost [2] [3].



Obr. 2 - Schéma struktury sítě vytvrzeného reaktoplastu [3]

1.2.3 Elastomery

Jedná se o polymerní materiály, které jsou velice pružné, mají nízkou tuhost a můžeme je za běžných podmínek značně deformovat bez porušení, a to i malou silou. Celý proces je převážně vratný. Dochází totiž k pohybu řetězců aktivovaných teplem – vulkanizací okolo spojů. Elastomery jsou schopné velkých deformací a následného odpružení díky příčným kovalentním vazbám řetězců. Tyto polymerní řetězce se ani v průběhu velkých deformací neporuší.

Mezi typické elastomery patří kaučuky, ze kterých se vulkanizací (řidkým zesítním, nejčastěji za použití síry) vyrábí pryže, jež jsou charakterizovány chemickými příčnými vazbami mezi makromolekulami tvořící uzly prostorové sítě [2] [4].



Obr. 2 - Struktura elastomeru [2]

1.2.4 Termoplastické elastomery

Termoplastickými elastomery (TPE) nazýváme materiály tvořené elastickými polymerními z vulkanizovanými řetězci, které jsou integrovány do polymerní matrice [1].

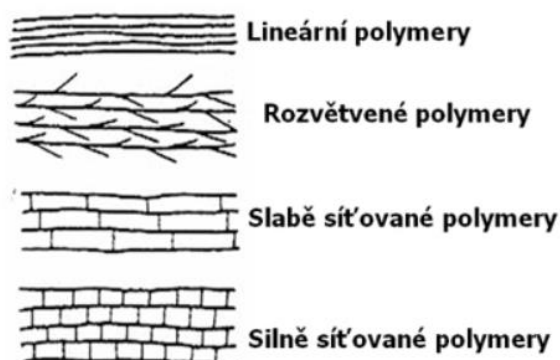
Jejich vlastnosti jsou podobné vlastnostem pryží. Zesíťovanou strukturu tvoří tvrdé a měkké segmenty v podobě elastomerů a termoplastů, které vytváří uzly sítě.

Při zahřátí přichází do tekutého stavu a mohou být zpracované podobně jako termoplasty, čímž se liší od pryží.

TPE nemají tak dobré elastické vlastnosti, mezi jejich hlavní výhody však patří možnost jejich opětovného zpracování a také možnost vstřikování na běžných strojích určených pro termoplasty. Jejich fyzikální vlastnosti jsou výhodnou kombinací vlastností elastomerů a termoplastů [4]

1.3 Molekulární struktura termoplastů

Základ polymerů tvoří makromolekuly, skládající se z velkého počtu malých, poměrně jednoduchých monomerních jednotek. Ty se propojují do makromolekulárních řetězců, jejichž základním prvkem je atom uhlíku. Atomy uhlíku jsou schopny vzájemně se vázat a vytvářet dlouhé řetězce. Monomery se mohou v řetězcích střídat pravidelně i nepravidelně. Rozlišujeme tři druhy polymerních makromolekul podle strukturního uspořádání [3] [19]:



Obr. 4 - Rozdělení polymerů podle makromolekulární struktury [3]

1.3.1 Lineární makromolekuly

Vznikají vzájemným lineárním řazením monomerních molekul v řadě za sebou. Lineární molekuly se mohou přiblížit více jedna ke druhé a vyplnit tak menší prostor. Polymerní materiály s touto strukturou pak mají vyšší hustotu (např. vysokohustotní polyetylen HDPE). Lineární molekuly se také snadněji pravidelně spojují v krystalické struktury a díky tomu mají polymery s touto strukturou vyšší obsah krystalických podílů.

Vyznačují se obvykle dobrou rozpustností a tavitelností díky vysoké pohyblivosti makromolekul. V tuhém stavu je pro ně příznačná houževnatost a ve formě taveniny jsou dobře zpracovatelné [3].

1.3.2 Rozvětvené makromolekuly

Od lineárních makromolekul se liší výskytem bočních větví na základním řetězci. V důsledku existence těchto bočních větví se k sobě nemohou tolik přiblížit a mají tak nižší hustotu (např. nízkohustotní polyetylen LDPE). Vyznačují se také nižším stupněm krystalinity a horší tekutostí v roztaveném stavu [3].

1.3.3 Zesíťované molekuly

Jsou vytvořeny prostorovou sítí propojených přímých nebo rozvětvených makromolekulárních řetězců. Tato síť způsobuje ztrátu tavitelnosti a rozpustnosti polymeru.

Zesíťované molekuly mají vysokou tuhost, tvrdost a odolnost proti zvýšení teplotě, jsou však méně odolné proti rázovému namáhání. Síť může být řídká (např. u elastomerních kaučukovitých polymerů) nebo hustá (např. u reaktoplastů – viz. 1.2.2 Reaktoplasty) [3].

1.4 Nadmolekulární struktura

Z hlediska stupně uspořádanosti jednotlivých makromolekul rozlišujeme dva typy struktury:

1.4.1 Amorfní struktura

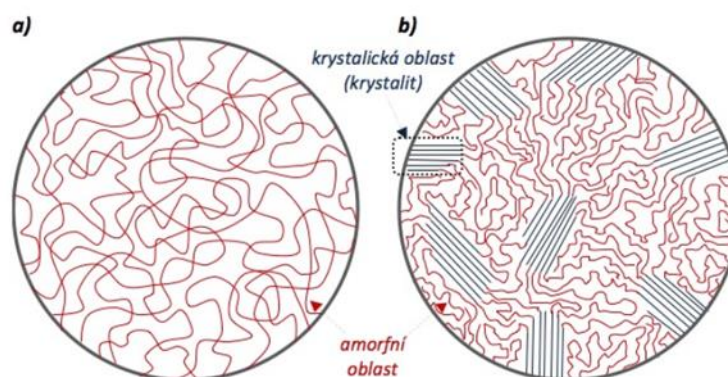
Vyznačuje se neuspořádaností a jejím základním morfologickým útvarem jsou klobuly (neboli klubička) o velikosti 10-30 nm, tvořené z chaoticky stočených makromolekul [3]. Polymery s touto strukturou jsou charakteristické tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností a modulem pružnosti a díky nízkému indexu lomu bývají průhledné [3].

1.4.2 Semikrystalická struktura

Od určitého stupně uspořádanosti ve struktuře – tzv. krystalinity (od 40 do 90 procent) mluvíme o semikrystalické struktuře. V reálných podmínkách technologického zpracování krystalizuje jen určitá část polymeru, zbylá část zůstává v amorfním stavu. Polymery s touto strukturou obsahují tedy jak krystalické, tak i amorfní části.

Materiály s vyšším stupněm krystalinity mívají větší hustotu, pevnost, tvrdost a modul pružnosti díky těsnějšímu uspořádání makromolekul v krystalických oblastech. Mají však také nižší tažnost, rázovou houževnatost a ztrácí svoji průhlednost.

Při vstřikování semikrystalických polymerů musíme brát v úvahu změnu rozměrů výstřiku v důsledku krystalizace částí jejich molekul [3],[19].



Obr. 5 - Struktura: a) amorfní b) semikrystalická [4]

2 PŘÍŠADY DO POLYMERŮ

Polymery se v čistém stavu obvykle nedají zpracovávat ani používat pro vstřikování. Abychom dosáhli požadovaných vlastností pro konkrétní aplikace, je potřeba polymer upravit vhodnými přísadami – aditivy. Základní vlastnosti bývají vždy dány typem polymeru, přísady však mohou tyto vlastnosti zlepšovat [2] [3].

Abychom dosáhli lepší zpracovatelnosti polymerních materiálů, přidáváme do nich přísady [2]:

- Pro zvýšení stability taveniny ve válci, resp. v horkém rozvodu formy (pomocí stabilizátorů).
- Pro zlepšení reologických vlastností taveniny, zajištění dobré zatékavosti, bezproblémovou plastikaci ve šnekové plastikační komoře, nelepivost a snadné vyjímání výstřiků z formy (pomocí maziv přidaných již při výrobě).
- Pro lepší uspořádání a zjemnění krystalické struktury u částečně krystalických materiálů (pomocí nukleačních činidel).

Mezi základní druhy přísad do polymerních materiálů patří [2],[3]:

- Stabilizátory, které se používají buď ke zvýšení odolnosti a zpomalení nežádoucích degradačních procesů materiálu (termooxidační stabilizátory), anebo ke zvýšení odolnosti k atmosférickému stárnutí – čímž dochází k prodloužení životnosti výstřiků (UV stabilizátory).
- Plastifikátory neboli změkčovadla, které snižují tuhost a tvrdost a naopak zvyšují ohebnost, tažnost a houževnatost zchladnutých polymerů. Nejčastěji se používají u PVC.
- Lubrikanty (maziva) snižující viskozitu taveniny polymeru a zároveň usnadňující vyjímání výstřiků z forem a zvyšující jejich lesk.
- Nukleační činidla zkracující výrobní cyklus díky modifikaci rychlosti krystalizace.
- Antistatika používající se pro zlepšení elektrické vodivosti materiálů.
- Retardéry hoření, které snižují nebo zmenšují hořlavost termoplastů.
- Pigmenty a barviva, dodávající polymerním materiálům požadovaný odstín a kryvost. Jsou v polymerech nerozpustné, původem jsou organické nebo anorganické a mohou

působit také jako nukleační činidla. Musí být tepelně i světelně stálé, tzn. musí beze změny odolat výrobním podmínkám a UV záření.

- Opticky zjasňující látky, které pohlcují část UV záření a následně pohlcenou energii vyzařují ve formě fluorescence s viditelnou složkou modrého světla. Lidské oko tak vnímá výrobek jako jasnější a bělejší.

3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY PRO VSTŘIKOVÁNÍ

Polymerní materiály obsahující plniva se nazývají kompozitní. Jsou definovány jako materiálové struktury, skládající se ze dvou nebo více materiálů se zcela odlišnými vlastnostmi a výsledným synergickým účinkem.

Základní uspořádáním kompozitního materiálu je matrice–pojivo, což je v tomto případě polymer s přísadami a plnivo, neboli výztuž [2] [7].

Plniva dělíme na částicová, vyztužující a nanoplňiva [2].

3.1 Částicová plniva

Do této skupiny patří spousta druhů minerálních plniv různě velkých a tvarově odlišných částic. Jejich přidáním dochází ke zvýšení viskozity taveniny (zhoršení tekutosti), tvrdosti, tuhosti a tepelné odolnosti výstřiků a zároveň ke zmenšení jejich smrštění. Některá plniva zlepšují kluzné vlastnosti (grafit, MoS_2), jiná zase snižují povrchový odpor a zvyšují tepelnou vodivost (uhlíková vlákna, hliníkový prach, kovová vlákna).

Obsah částicových plniv v kompozitu se pohybuje od 1 do 60 hmotnostních procent, částice jsou velké desetiny až desítky mikronů a mají buď kulovitý, nebo destičkový tvar.

Mezi částicová plniva patří např. skleněné mikrokuličky (balotina), kaolin, talek, mikromletý křemen, vápenec, čedič, perlit, živec, nebo další minerály, koks, saze, aerosil, slída, sírany, siřníky, práškové kovy a jejich slitiny, polymerní prášky, dřevo atd.

Tato plniva mohou zároveň působit jako pigmenty, retardéry hoření nebo nukleační látky [2].

3.2 Vyztužující plniva

Tento druh plniv zvyšuje v kompozitech jejich pevnost, tuhost, odolnost k toku za studena a tvarovou stálost, a zároveň snižuje jejich ohebnost, tažnost, smrštění a kluzné vlastnosti s výjimkou uhlíkových vláken.

Nejčastější strukturou u vyztužujících plniv je struktura vláknitá, a to v podobě sekaných pramenců vláken. Tato plniva obvykle dosahují 5-60 hmotnostních procent.

Na vyztužující efekt vláknitých plniv má vliv zejména poměr jejich délky k jejich průměru. Vlákna u běžných granulátů pro vstřikování jsou obvykle většinou v řádu desetin mm (0,2 až 0,4) až celých mm (až cca. 10 mm). Průměr vláken bývá v jednotkách mikrometrů. Po procesu vstřikování bývá délka vláken ve výstřicích

cca 0,8-4 mm. Kompozity, které obsahují dlouhá vlákna, mají oproti těm s krátkými lepší mechanické vlastnosti, vyšší vrubovou houževnatost, sníženou průtažnost dále méně tečou za studena a jsou velmi stálé za vyšších teplot v teplejším i vlhčím klimatu.

Nejčastěji se používají skleněná vlákna, dále vlákna uhlíková, vlákna z nerezových ocelí, vláknité monokrystaly kovů, kysličníky kovů a karbidů, vlákna z titanátů alkalických kovů, vlákna aromatických polyamidů, minerální vlákna a další [2], [18].

3.3 Nanoplňiva

Nejčastěji používaným nanoplňivem bývají vrstevnaté jíly. Pokud je alespoň jeden rozměr částice v nanometrech, jedná se o nanoplňiva a jejich obsah v kompozitu je obvykle 3 až 7 procent.

Nanočástice zlepšují mechanické vlastnosti matrice polymeru, do které jsou přidány a mohou nahradit i účinek některých přísad nutných k dosažení požadovaných vlastností kompozitních materiálů. Díky tomu vede jejich použití ke snížení hmotnosti konkrétního výstřiku na rozdíl od tradičně plněných termoplastů.

Nanoplňiva mohou nahradit částicová plňiva i retardéry hoření, zlepšují nepropustnost, odolnost proti chemikáliím a navlhavost. Dále zlepšují jakost povrchu výstřiků a zvýšení lesku.

Díky nízkému obsahu plňiva nejsou technologické parametry vstřikování závislé na hmotnostním množství. Před vstřikováním není nutné granulát sušit, protože částice nanokompozitů jsou vysušeny už při výrobě [2].

3.4 Kompozitní slitiny, směsi, blendy

Kompozitní materiály můžeme také definovat jako materiály, vyznačující se využitím výhodných vlastností dvou nebo více složek, které je tvoří. Pak do této skupiny mohou být zařazeny slitiny (směsi, blendy) dvou polymerů, z nichž každý přináší do směsi své lepší vlastnosti. Díky tomuto postupu je možné připravit různorodé materiály vhodné pro konkrétní aplikace [2].

Nejčastěji používané blendy jsou: PC/ABS, PC/ASA, PA/ABS, PC/PBT, PSU/ABS, PC/PET [2].

V praktické části budu pracovat se směsí polyamidů PA 6 a PA 66 s 30% obsahem vyztužujícího plňiva v podobě skelných vláken.

4 POLYAMIDY

Polyamidy (dále jen PA) jsou amidové jednotky s dlouhým řetězcem: ($N-H-C=O$). Jedná se o semikrystalické materiály s krystalickým podílem do 40 %. Díky jejich vynikajícímu poměru vlastností a ceny patří mezi nejpoužívanější skupinu plastů mezi technickými polymery [8]. Nejdůležitějšími druhy polyamidů z hlediska využití jsou Polyamid 6 (PA 6) a Polyamid 6.6 (PA 66), kterým se budu věnovat podrobněji.

Mezi další druhy patří například: PA 46, PA 610, PA 11, PA 12 [9]. V praxi se samozřejmě k polyamidům přidávají různá aditiva (viz. Kapitola 2 a 3) a používají se různé směsi (blends), jako například: PA 66 / PA 6, PA 6 / PA 12, PA 6 / PP, PA 6 / PE, PA 66 / PP, PA 66 / PE, PA / ABS, PA / PPO. [2] [5].

4.1 Vlastnosti polyamidů

Polyamidy se vyznačují velkou tvrdostí a dobrou tepelnou i chemickou odolností. Bývá pro ně charakteristická absorpce vlhkosti, ke které dochází, jsou-li skladovány na vzduchu nebo ponořeny ve vodě, a která způsobuje změnu jejich mechanických vlastností (se stoupajícím obsahem vody klesá jejich pevnost, tuhost a tvrdost, stoupá však houževnatost a tažnost) [9] [5].

Mezi základní vlastnosti polyamidů patří [8],[10] :

- Vysoká tuhost a pevnost, (a to i při nízkých teplotách).
- Odolnost proti stárnutí při vysokých teplotách a dlouhé době expozice.
- Vysoká teplotní odolnost.
- Vynikající chemická odolnost.
- Dobrá odolnost proti otěru a opotřebení.
- Vysoká hodnota toku pro snadné plnění forem.
- Výborné dielektrické vlastnosti.
- Absorpce vody.
- Nízká teplotní roztažnost.
- Vysoká odolnost vůči benzínu, mastným a aromatickým materiálům.
- Nízký součinitel tření.
- Vynikající poměr vlastnosti/cena.

4.2 Možnosti použití

Díky tomu, že jsou polyamidy lehké, nekorozivní a samomazné, mohou nahrazovat ocelové a hliníkové součástky ve všech odvětvích průmyslu jako tzv. konstrukční plasty. Dále mají využití v podobě průmyslových a textilních vláken.

Konkrétní příklady aplikací polyamidů najdeme např. v automobilovém průmyslu (vstupní vzduchové potrubí, ozubené převody, spojky, napínače řetězů, kryty motorů, komory na airbagy, dveřní kliky, kryty kol, zrcátka), dále v elektrickém průmyslu (spínací zařízení nízkého napětí, konektory, vypínače, i v ostatních odvětvích průmyslu (kryty, ozubená kola lyžařská vázání, železniční podložky kolejí, nábytek, potrubí do moře a balicí fólie [8]).



Obr. 6 - Příklady aplikací polyamidů [4]

4.3 Polyamid 6

Polyamid 6 (PA 6) jiným názvem také Nylon 6, je polyamid tvořený jediným cyklickým monomerem se 6 uhlíky. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších polyamidů. Vyznačuje se dobrou trvanlivostí a vhodnou kombinací tvrdosti, pevnosti a zároveň houževnatosti a pevnosti v tahu. Má také nízký koeficient tření, dobrou otěru–odolnost a elektroizolační vlastnosti [11] [12].

Nevýhodou je značná navlhavost. Používá se pro výrobu vláken anebo jako konstrukční materiál hlavně ve strojírenství [11].

Z PA 6 se vyrábějí například hedvábná vlákna, kobercová vlákna, kordy do pneumatik, ozubená kola, ložiska atd. [4]

4.4 Polyamid 66

Polyamid 66 (PA 66) se vyrábí polykondenzací diaminů a dikarboxylových kyselin [9]. Jedná se o semikrystalický až krystalický materiál, který má jednu z nejvyšších teplot tání, srovnáme-li ho se všemi ostatními komerčně dostupnými polyamidy.

Ve srovnání s PA 6 má vyšší teplotu tání, vyšší tuhost a pevnost, nižší navlhavost a lepší otěruvzdornost, ale nižší odolnost proti rázu a tekutost. [8] [12] .

Rozdíly mezi základními fyzikálními vlastnostmi u PA 6 a PA 66 znázorňuje Tab. 1

Tab. 1 - Srovnání vlastností PA 6 a PA 66 [4]

Polyamid	Hustota [g/cm ³]	Modul pružnosti [MPa]		Teplota tání [°C]	Navlhavost [%]
		Suchý stav	Navlhý stav		
PA-6	1,10-1,14	1100-3500	1000-2500	215-225	2,5-3,0
PA-66	1,12-1,14	2600-3600	1000-2800	250-260	2,5-2,8

Z PA 66 se vyrábějí se vlákna, fólie, kryty přístrojů, otěru-odolné součástky nebo kluzné kladky. Spolu s PA 6 se používá jako konstrukční materiál.

4.4.1 PA 6 a PA 66 + aditiva

Stejně jako je tomu i u ostatních polymerů, ke zlepšení vlastností materiálů se hojně používají různé přísady a plniva. Abychom zlepšili jejich vlastnosti, můžeme k polyamidům PA 6 a PA 66 přidat aditiva pro zlepšení tepelné odolnosti, odolnosti vůči světlu a UV, rázové odolnosti nebo pro zvýšení adheze. Dále můžeme materiál ovlivnit přídavnými mazadly, nukleačními činidly, či retardéry hoření [2] [6].

V neposlední řadě se také používají různá plniva, z nichž nejčastějšími jsou skleněná vlákna (až 60 %), jejichž obsah v procentech se zapisuje do zkratky polyamidu (např. PA 6 + 30 GF je polyamid 6 se 30% obsahem skleněných vláken – anglicky glass fiber). Tato vlákna zlepšují výsledné mechanické vlastnosti materiálu [6].

Touto skutečností se zabývali vědci J. Paulo Davim, Leonardo R. Silvab, António Festasa a A.M.Abraoc [25]. Zkoumali rozdíly vlastností mezi materiály PA 66 a PA 66 s 30% obsahem skleněných vláken. K měření byly použity vzorky s průměrem 20 mm a délkou 80 mm, z materiálů PA 66 a PA 66 GF 30 od firmy ERTA® Company. Jejich výsledky znázorňuje následující tabulka, ze které je patrné, že skleněná vlákna zvyšují jeho modul pružnosti, modul kluzu, hustotu, a naopak snižují jeho teplotní roztažnost a pevnost.

Tab. 2 - Tepelné a mechanické vlastnosti PA 66 a PA 66 + GF 30 [25]

Měřená vlastnost	PA 66	PA 66 - GF 30
Modul pružnosti v tahu (MPa)	1650	3200
Tvrdość podle Rockwella	M88	M76
Mez kluzu (MPa)	90	100
Teplota tání (°C)	255	255
Hustota (g/cm³)	1,14	1,29
Tepelná vodivost při 23 °C (W/(mK))	0,28	0,30
Koeficient teplotní roztažnosti z 23 °C na 60°C (m/(mK))	$80 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$
Koeficient teplotní roztažnosti z 23 °C na 100°C (m/(m K))	$95 \cdot 10^{-6}$	$60 \cdot 10^{-6}$

5 VSTŘIKOVACÍ STROJE

Mezi základní vybavení potřebné pro technologii vstřikování je vstřikovací stroj neboli vstřikolis, vstřikovací forma a periferní zařízení (především temperační jednotka, která reguluje tepelné procesy ve vstřikovací formě.) Při vstřikování navlhavých materiálů, jako jsou polyamidy, se navíc používají sušičky na vysušení materiálu před jeho zpracováním.

Vstřikovací stroje jsou určeny převážně pro zpracování polymerních materiálů v podobě granulátu. [21]

5.1 Parametry vstřikovacího stroje

Mezi základní parametry vstřikovacích strojů patří [21]:

- Vstřikovací kapacita (maximální vstřikovací objem) – objem výstřiku, kterého lze dosáhnout při jednom pracovním cyklu stroje. Udává se nejčastěji v cm^3 .
- Vstřikovací síla – maximální síla, kterou působí šnek nebo píst na taveninu.
- Uzavírací síla – maximální síla, kterou působí uzavírací jednotka na formu.
- Vstřikovací tlak – největší možný tlak, který působí na čelo šneku/ pístu v tavenině.
- Plasticační kapacita – maximální množství materiálu, které je stroj schopen převést do plastického stavu za jednotku času (nejčastěji za 1 hodinu).

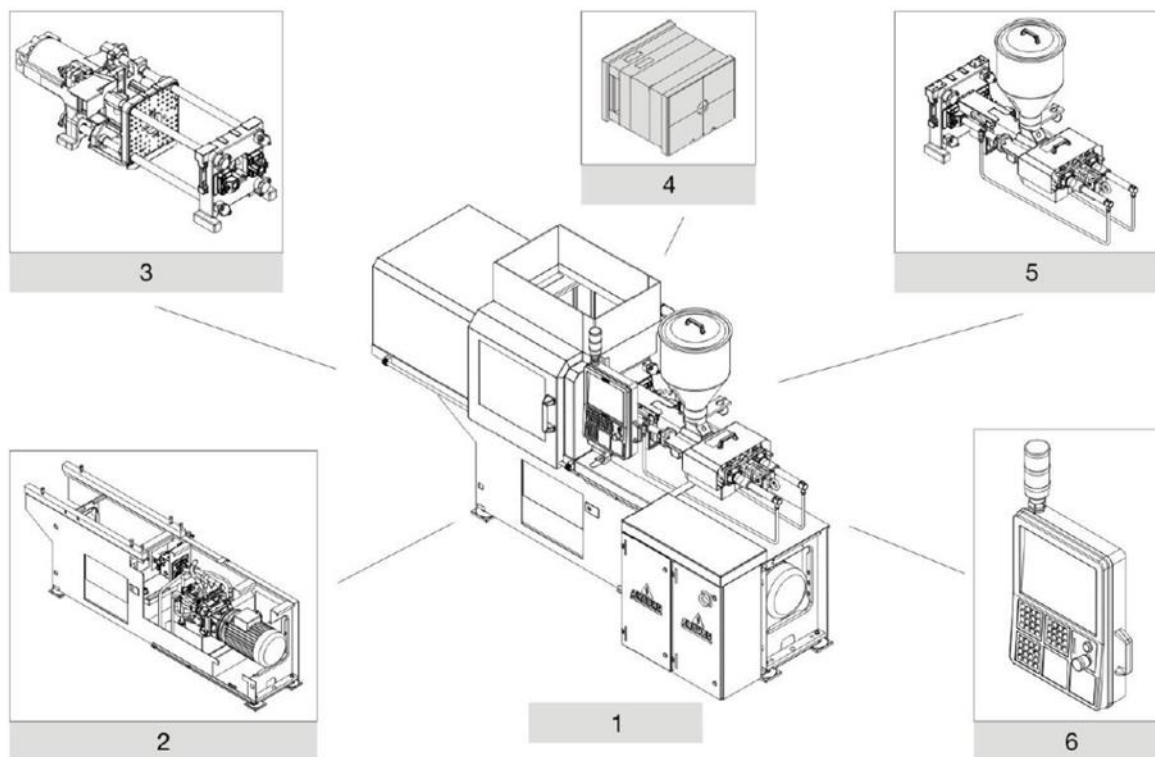
5.2 Rozdělení vstřikovacích strojů

Vstřikolisy můžeme dělit podle několika kritérií [3] [21]:

- podle pohonu, který zajišťuje posuvy vstřikovací a uzavírací jednotky (vstřikolisy hydraulické, elektrické nebo hybridní),
- podle pracovního členu v tavicí komoře vstřikovací jednotky (v. šnekové a pístové),
- podle směru posuvu pohyblivé uzavírací jednotky (v. horizontální a vertikální),
- podle počtu desek uzavírací jednotky (v. dvoudeskové a třideskové),
- podle počtu šneků (v. jednošnekové a vícešnekové).

5.3 Části vstřikovacího stroje

V této kapitole se budu zabývat popisem částí pouze šnekového vstřikovacího stroje, protože pístové stroje se v současnosti už skoro nepoužívají.



Obr. 7 - Části vstřikovacího stroje Arburg ALLROUNDER 270 C [20]

Na obrázku 7 můžeme vidět základní části hydraulického horizontálního vstřikovacího stroje [20]:

1. vstřikovací stroj,
2. rám stroje a pohon,
3. uzavírací jednotka,
4. vstřikovací forma,
5. vstřikovací jednotka,
6. ovládací panel

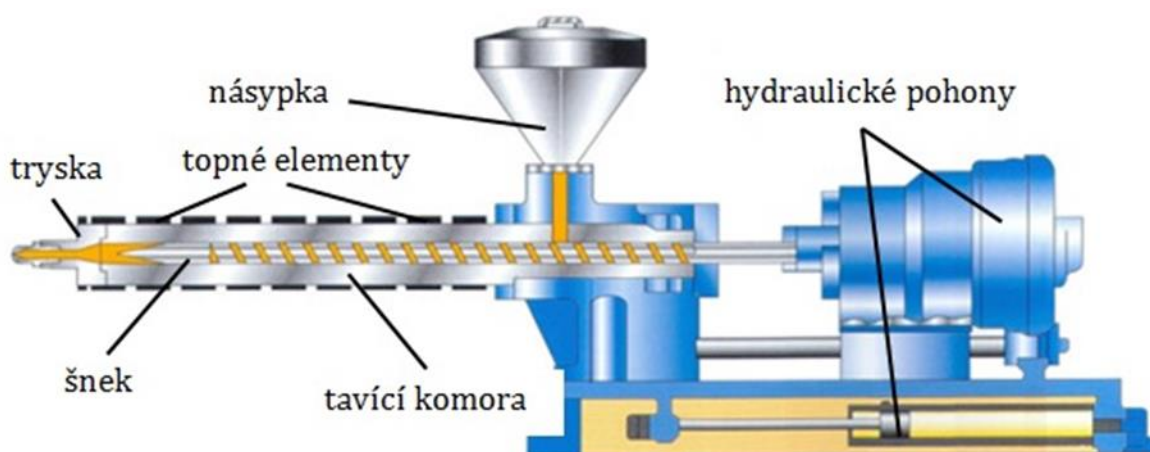
5.3.1 Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka taví granulát na homogenní taveninu a tu vstřikuje vysokou rychlostí a velkým tlakem do vstřikovací formy. Skládá se z několika částí, viz obr. 8.

Vstupní část tvoří násypka, do které se nasype materiál v podobě granulátu.

Na ní navazuje tavicí komora, ve které se granulát plastifikuje na taveninu nejčastěji pomocí šneku a topných pásem umístěných kolem komory. Přibližně 70 % tepelné energie je do plastu přeneseno díky tření granulátu mezi šnekem a stěnou tavicí komory. Protože plasty nejsou příliš dobrými vodiči tepla, bývá šnek konstruován tak, aby množství polymeru mezi bočními stěnami šneku a tavicí komory nebylo příliš velké.

Na konci tavicí komory se nachází tryska, která těsně dosedá na vtokovou vložku vstříkovací formy, kterou se tavenina dostane až do formy [21].



Obr. 8 - Schéma vstříkovací jednotky [21]

Násypka

Násypkou je do tavicí komory přiváděn granulát působením gravitace a vlastní hmotnosti. Neměla by obsahovat žádné ostré přechody a místa, kde by mohlo dojít k hromadění a usazování materiálu. Je také důležité zabránit přestupu tepla do násypky, aby se zde materiál netavil a neucpal otvor.

Součástí násypky může být i směšovací systém pro přimíchání přísad k materiálu a přídatné zařízení pro promíchání a převedení i méně sypkých materiálů. [3] [21]

Tavicí komora

Z násypky se granulát dostává do tavicí komory, která má podobu dutého kovového válce zakončeného tryskou.

Povrch tavicí komory je tvořen topnými pásy a uvnitř komory se nachází šnek. Mezera mezi komorou a šnekem je velmi malá (0,1-0,2 mm), a proto musí být vnitřní dutina komory velmi přesně obrobena a mít hladký povrch.

Tavicí komora je obvykle rozdělena do tří zón, z nichž každá je vytápěna a regulována samostatně na trochu odlišnou teplotu dle doporučení výrobce materiálu. Nejnižší teplota se nastavuje v zóně u násypky a nejvyšší u trysky [3] [21].

Šnek

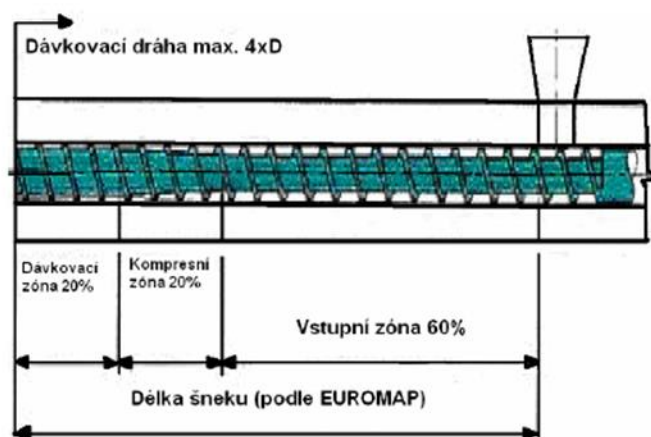
Šnek ve vstřikovací jednotce slouží k dopravě materiálu tavicí komorou, plastikaci, hnětení a vstříknutí do formy. Šneky určené pro zpracování termoplastů se skládají ze tří odlišných funkčních zón. [21]

Ve **vstupní (dopravní)** zóně je materiál nabrán z násypky a přemístěn do oblasti tavicí komory zahříváné topnými pásy. Zde je hlavně stlačován a vytěsňuje se z něj vzduch. Šroubovice šneku je v této zčásti největší [21].

V **kompresní (přechodové)** zóně dochází k dalšímu stlačování a ohřívání, a díky tomu zde granulát nejvíce taje. Na konci této zóny by měl být všechn materiál v podobě taveniny, není však ještě teplotně homogenní. Hloubka i stoupání šroubovice se zde postupně zmenšuje. [21]

V **homogenizační** zóně, se díky intenzivnímu promíchání a prohnětení dosáhne teplotně homogenní taveniny. Hloubka závitů šneku je zde konstantní. [21]

Špička šneku bývá nejčastěji opatřena zpětným ventilem, aby nedocházelo k unikání taveniny zpět do tavicí komory. Poměr délek jednotlivých zón lze vidět na Obr. 9.



Obr. 9- Zóny šneku [3]

Jedním z nejdůležitějších parametrů šneku je poměr jeho délky k průměru (L/D). Pro vstřikování termoplastů je ideální poměr 19 až 22:1. Další důležitou charakteristikou šneku je kompresní poměr. Ten určuje poměr objemu šnekového profilu pro jedno stoupání závitů pod násypkou k objemu profilu v části šneku před tryskou a bývá v rozmezí od 1,5 a 4,5 [21].

Tryska

Tryska zajišťuje spojení mezi vstřikovací jednotkou a formou. Přivádí taveninu do vtokových kanálů formy a musí přesně dosedat na vtokovou vložku formy. Úniku taveniny mezi tryskou a vtokovou vložkou brání přítlačná síla. Teplota trysky je regulována a kontrolována samostatnou topnou zónou, aby zde nedocházelo k chladnutí taveniny [3] [21].

5.3.2 Uzavírací jednotka

Zajišťuje upnutí a plynulé otevírání a zavírání vstřikovací formy. Skládá se z pevné a pohyblivé upínací desky, z vodících sloupků. Uzavírací systém může být hydraulický, mechanický nebo kombinovaný [21].

5.3.3 Vstřikovací forma

Jedná se o jednu z nejdůležitějších částí vstřikovacího stroje a její konstrukce a výroba je dosti náročná a nákladná. Musí poskytovat výrobky o přesných rozměrech (při stanovení rozměrů formy a při její konstrukci záleží na velikosti smrštění a dosmrštění materiálu.) Dále musí odolávat vysokým tlakům a též umožnit snadné vyjmutí výrobků.

Skládá se z chladicího (temperačního) systému, vtokového systému, vyhazovacího systému a upínacích a vodících elementů.

Teplota formy se reguluje pomocí chladicího média, které protéká soustavou chladicích kanálů. [21]



Obr. 10 - Vstřikovací forma, autor fotografie Antonín Voldřich

Vstřikovací formy můžeme rozdělit do následujících skupin [21]:

- Podle násobnosti (jednonásobné a vícenásobné).
- Podle způsobu konstrukčního řešení (dvoudeskové, třideskové, etážové, čelistové, vytáček a další).
- Podle konstrukce vstřikovacího stroje (formy se vstřikem kolmo na dělicí rovinu, formy se vstřikem do dělicí roviny).

Vtokový systém

Je to systém kanálů a ústí vtoku, díky kterým se musí dosáhnout správného naplnění formy, snadné oddělení od výstřiku a snadné vyhození odtokového zbytku. Vtok by měl být navržen tak, aby došlo k co nejrychlejšímu naplnění formy taveninou, co nejkratší cestou, bez velkých teplotních a tlakových ztrát, co nejrychleji a pokud možno ve stejném čase. [21]

5.3.4 Rám stroje a pohon

V rámu stroje je celý stroj uložen a pohon, který zajišťuje posuvy vstřikovací a uzavírací jednotky, může být hydraulický, elektrický nebo kombinací těchto dvou. [3]

5.3.5 Řízení

Řízení zajišťují moderní procesorově řízené jednotky, díky kterým je možné naprogramovat průběh celého cyklu vstřikování. Vstřikovací stroje bývají vybaveny ovládacím panelem s displejem, na kterém se dají nastavit jednotlivé parametry vstřikování, jako jsou jednotlivé, teploty, tlaky a časy (viz kapitola 9.3), a celý proces lze v grafické podobě sledovat. [2]

6 PROCES VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování do formy je nejrozšířenější technologií pro zpracování plastů. Nejčastěji se používá u termoplastů a jejich kompozitů, v dnešní době však mohou být vstřikovány téměř všechny druhy polymerů (reaktoplasty, elastomery i termoplastické elastomery) [22].

Jedná se o technologii, při které je potřebné množství materiálu v podobě taveniny vstříknuto pomocí šneku nebo pístu velkou rychlostí z tavicí komory do vstřikovací formy, kde ochlazením ztuhne v konečný výrobek. Slouží jak k výrobě polotovarů, tak i konečných výrobků.

Mezi hlavní výhody patří především vysoká rozměrová a tvarová přesnost vhodná pro sériovou výrobu, krátký čas cyklu a možnost vytvořit tvarově velmi složité díly.

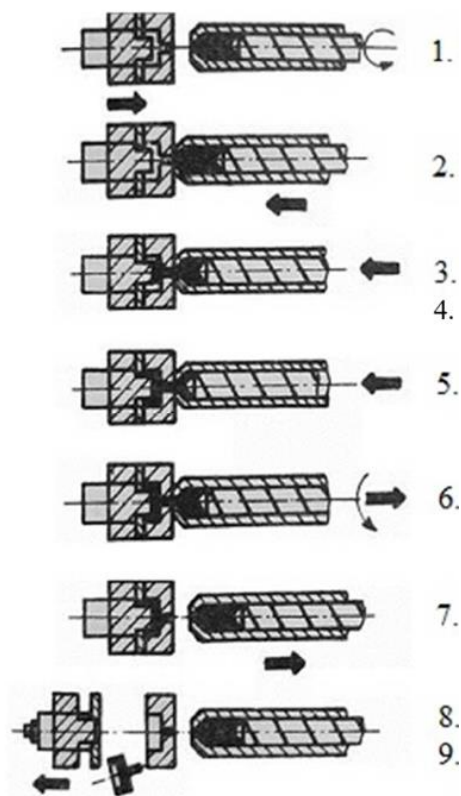
Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady stroje a vstřikovacích forem a velikost strojního vybavení vzhledem k velikosti dílu. [3].

6.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus neprobíhá kontinuálně, ale uskutečňuje se v opakujících se cyklech. V každém cyklu vzniká jeden výrobek, kterému se říká vylisek, nebo také výstřík.

Jeden cyklus lze rozdělit na tyto úseky [2][3]:

1. Uzavření formy a vyvolání uzavírací síly.
2. Příjezd vstřikovací jednotky k formě a vyvolání přítlaku.
3. Vstřikovací – plnicí a kompresní fáze.
4. Přepnutí ze vstřikovacího tahu na dotlak.
5. Dotlaková fáze.
6. Fáze chlazení výstříku ve formě, plastifikace–dávkování taveniny před čelo šneku.
7. Odjezd vstřikovací jednotky od formy.
8. Otevření formy.
9. Vyhození nebo vyjmutí výstříku z formy.



Obr. 11 - Fáze vsřikovacího procesu [3]

6.2 Fáze vstřikovacího cyklu a jejich vliv na vlastnosti výstřiku

Vzhledem k velikosti vlivu na vlastnosti výstřiku nebudou v této kapitole podrobněji popsány všechny dílčí části vstřikovacího cyklu z obr. 11, ale pouze fáze plastikační, vstřikovací, přepnutí na dotlak, fáze dotlaková a fáze ochlazování.

Plastikační fáze

Plastikace probíhá v plastikační jednotce poté, co je granulát převeden pomocí gravitace z násypky do tavicí komory vstřikolislu. Pomocí pohybu šneku a ohřívání tavicí komory se z materiálu stane tavenina, která by měla být před vstříknutím do formy teplotně a viskozitně homogenní [2]. Aby toho bylo dosaženo, musí být správně nastaveny tyto technologické parametry. [2]:

- Teplota taveniny (nastavení teploty jednotlivých teplotních zón včetně trysky),
- Otáčky šneku,
- Zpětný odpor na šneku.

Nehomogenita taveniny způsobí zhoršení kvality povrchu výstřiku (tokové čáry, horší lesk, studené spoje, vnitřní pnutí atd.).

Teplota taveniny ovlivňuje orientaci makromolekul ve výstřiku – při vyšší teplotě taveniny orientace klesá a výstřik se stává z hlediska vlastností izotropním. Zhoršují se některé mechanické vlastnosti (pevnost v tahu a houževnatost) a naopak se zvyšuje pevnost studených spojů a snižuje vnitřní pnutí.

Při zvýšené teplotě taveniny dochází také ke zvýšení výrobního smrštění a snížení dosmrštění [2].

Vstřikovací fáze

Díky dopřednému pohybu šneku dochází za vysokého tlaku k přesunutí taveniny z tavicí komory tryskou do vtokového systému a následně do dutiny vstřikovací formy. Rychlost čela proudu taveniny by měla být v každém místě průřezu tvarové dutiny formy stejná. Toho lze snadno dosáhnout pouze u tvarově jednodušších výrobků. U tvarově složitějších to bývá problematické a musí se použít softwarová simulace plnění formy [2] [22].

Mezi technologické parametry ovlivňující plnění formy taveninou patří [2]:

- Vstřikovací tlak.
- Rychlost vstřikování.
- Teplota formy.
- Teplota taveniny.
- Viskozita taveniny.

Přepnutí na dotlak

V důsledku chladnutí taveniny vstříknuté do formy dochází k jejímu smrštění. K potlačení vlivu tohoto smrštění, k zabránění tvorbě propadlin a k získání požadovaných tvarů, rozměrů a hmotnosti výstřiku rozměrů výstřiku musíme přepnout tlak na dotlak, jehož hodnota je nižší. Tento přechod by měl být plynulý – tlaková křivka musí plynule stoupat na maximum a pak plynule přejít na dotlakový průběh. Jedině tak je docíleno co největší izotropie, minimalizace vnitřního pnutí a zabránění přetoků v dělicí rovině formy [2].

Existují 3 způsoby přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak [2]:

- *Časové přepnutí*: k přepnutí dojde po uplynutí zvoleného času od začátku plnění formy.
- *Tlakové přepnutí*: k přepnutí dojde po dosažení zvoleného tlaku (v hydraulickém systému, v dutině formy, nebo v kanálu horkého rozvodu formy).
- *Dráhové přepnutí*: k přepnutí dojde po dosažení zvolené dráhy pohybu šneku vpřed při vstřikování.

Co se týče jakostních parametrů výstřiku, nejvýhodnější je ve většině případů použití tlakového přepnutí a nejpresnější metodou bývá snímání tlaku v dutině formy co nejbližší ústí vtoku.

Dotlaková fáze

Dotlaková fáze následuje po fázi vstřikovací a trvá až do ztuhnutí ústí vtoku. Kromě potlačení smrštění a zlepšení přesnosti rozměrů výstřiku zvyšuje však také jeho vyšší vnitřní pnutí. Působení vstřikovací a dotlakové fáze můžeme kontrolovat pomocí tzv. *polštáře* – množství taveniny, která zůstává nevstříknuta před čelem šneku. Pokud je velikost polštáře v jednotlivých cyklech stejná, znamená to, že do formy se dostává v každém cyklu stejné množství taveniny, což zajišťuje dobrou reprodukovatelnost procesu. Velikost polštáře by měla být v rozmezí 5 až 10 % vstřikované dávky. Dotlakem působíme až do zatuhnutí vtokového systému, poté šnek začíná plastikovat novou dávku taveniny pro další vstřikovací cyklus [2], [3].

Technologické parametry ovlivňující dotlakovou fázi jsou [2]:

- Tlaková úroveň dotlaku.
- Rychlost dotlaku.
- Doba dotlaku.
- Teplota taveniny.
- Teplota formy.

Fáze chlazení

V této fázi vstřikovacího procesu dochází k chladnutí taveniny plastu tak, aby mohl být výstřik z formy vyhozen v tuhém stavu. Chlazení začíná už při prvním kontaktu taveniny se studenější vstřikovací formou a pokračuje, až do úplného zatuhnutí plastu v dutině formy. Konečná teplota výstřiku, který je vyhozen z formy, musí být tak vysoká, aby nedošlo k jeho deformaci. Chlazení se většinou provádí průtokem chladícího média, nejčastěji vody. Doba chlazení závisí na maximální tloušťce stěny výstřiku, na druhu plastu a na teplotě formy a taveniny. Po zchladnutí nastává otevření formy a vyhození výstřiku nejčastěji vyhazovačem [2] [22].

Na fázi chlazení mají vliv následující parametry [2]:

- Teplota chlazení.
- Teplota formy.
- Teplota vyhazování výstřiku z formy.

6.3 Parametry vstřikovacího procesu

Vstřikovací proces můžeme regulovat pomocí několika parametrů, které lze nastavit prostřednictvím řídicího systému stroje. Je důležité si uvědomit, že toto nastavení bude mít u každého stroje trochu jiné důsledky na vlastnost výstřiku, a proto není zcela přenosné z jednoho zařízení na druhé. Dalším faktorem, který hraje roli při nastavování stroje, je opotřebení jeho jednotlivých komponent. Tyto skutečnosti je nutné vzít v potaz, při přenosu výroby z jednoho vstřikolisu na druhý a při přebírání údajů (o nastavení stroje) z různých podkladů (např. přílohy granulátu od výrobce) [2].

Při volbě vhodných parametrů pro vstřikování konkrétního materiálu je dobré se řídit těmito podklady, některé parametry je však nutné přizpůsobit konkrétnímu stroji. Z materiálů

od výrobce bychom měli brát v úvahu hlavně doporučené teplotní parametry (teplota formy a jednotlivých zón tavicí komory), vstřikovací rychlost, zpětný odpor na šneku, obvodovou rychlost šneku, poměr vstřikovacího tlaku a dotlaku a dobu výdrže taveniny na zpracovatelské teplotě. Mnohé z těchto parametrů bývají uvedeny pouze orientačně (např. vstřikovací rychlost – vysoká, zpětný odpor na šneku – nízký) a jejich velikost závisí na konkrétním vstřikovacím stroji [2] [21].

Mezi základní technologické parametry vstřikovacího procesu patří:

Teplota formy

Touto teplotou se rozumí teplota tvarové dutiny formy těsně před jejím naplněním taveninou polymerního materiálu. Po vstříknutí taveniny do formy se forma začne ohřívat a poté zase klesá na původní hodnotu. Pro regulaci této teploty slouží temperační systém formy. Ten by měl formu dovést na požadovanou teplotu a udržet tuto teplotu po celou dobu vstřikovacího procesu. V praxi by neměla být překročena spodní hodnota teploty formy udávaná výrobcem granulátu.

Zvyšování teploty stěny formy zvyšuje výrobní smrštění, teplotní odolnost, potřebnou dobu ochlazování, krystalinitu semikrystalických materiálů, tuhost, povrchovou tvrdost a odolnost proti otěru, zlepšuje kluzné vlastnosti. Zároveň snižuje velikost dosmrštění, vnitřního pnutí, odporu proti toku taveniny a absorpci vody u polyamidů [2] [3].

Teplota taveniny – teplota jednotlivých zón tavicí komory

Teplotu taveniny ovlivňuje tření materiálu mezi šnekem a vnitřní stěnou tavicí komory (dáno velikostí zpětného odporu na šneku a jeho obvodovou rychlostí) a nastavení teploty jednotlivých zón plastikační komory. Tyto zóny bývají většinou 3 nebo 4. Průběh teplot na jednotlivých pásmech je dán doporučením výrobce daného materiálu a nejčastěji klesá od trysky směrem k násypce. Stejně jako teplota formy i teplota taveniny výrazně ovlivňuje celý vstřikovací proces [2] [22].

Zvyšování teploty taveniny vede ke snížení její viskozity (zlepšení zatékavosti), snížení orientačních jevů, snížení tlakové ztráty v dutině formy, snížení vlivu studených spojů na jakost povrchu a mechanické vlastnosti, zvýšení doby chlazení a zvýšení obsahu krystalického podílu u semikrystalických materiálů. S vyšší teplotou taveniny lze snižovat vstřikovací tlak, což má za následek snížení vnitřního pnutí ve výstřiku [2].

Vstřikovací tlak a vstřikovací rychlost

Tyto dva parametry slouží k objemovému naplnění tvarové dutiny formy při co nejmenším smykovém namáhání taveniny a pevnostním namáhání formy. Každé vstřikovací rychlosti odpovídá tlak, při kterém se tato rychlost realizuje. Nastavuje se pouze jedna hodnota vstřikovacího tlaku, zatímco vstřikovací rychlost lze nastavit buď konstantě pro celou dobu pohybu šneku, nebo různě v závislosti na poloze šneku. V běžných případech by se mělo vstřikovat konstantní a vyšší vstřikovací rychlostí.

Příliš nízká hodnota vstřikovacího tlaku způsobuje nedostříknuté díly, příliš vysoká hodnota má za následek přetoky. Příliš pomalá vstřikovací rychlost vede ke vzniku studeného toku a vzniku spojových čar na výstřiku a naopak příliš vysoká rychlost může způsobit teplotní degradaci materiálu [2].

Zpětný odpor šneku

Jedná se o tlak působící proti pohybu šneku zpět při rotaci – dávkování. Zpětný tlak, jiným slovem také protitlak, ovlivňuje dobu plastikace a tím pádem i kvalitu prohnětení roztaveného materiálu. Používáme ho především pro tepelnou a mechanickou homogenizaci taveniny a vytěsnění vzduchu z granulátu.

Pomocí protitlaku můžeme také zvýšit teplotu taveniny, což bývá rychlejší a jednodušší než pomocí zvyšování teploty topných pásem. Při jeho zvyšování musíme být však opatrní. Se zvyšováním zpětného odporu totiž také klesá plastikační výkon, prodlužuje se doba dávkování, u materiálů s vláknitými plnivými snižuje jejich vyztužující efekt a napomáhá k teplotní degradaci [2] [22].

Otáčky šneku/ obvodová rychlost šneku

Stejně jako zpětný odpor, i otáčky šneku mají vliv na proces plastikace a úzce spolu souvisejí. Jsou definovány jako počet otáček šneku za daný časový úsek (obvykle za jednu minutu). Obvodová rychlost je pak jeho obvod vynásobený počtem otáček.

Větší otáčky šneku zvyšují disipační energii a tím vyrovnávají teplotu v dávce. Příliš vysoké otáčky u šneku však mohou také způsobit tepelnou a mechanickou degradaci taveného materiálu nebo zvýšení opotřebení šneku a plastikační komory.

V dokumentech od výrobců granulátů bývá obvykle udávána maximální dovolená rychlost šneku.

Počet otáček by měl být obecně volen tak, aby se obvodová rychlost nacházela v rozmezí od 0,05 do 0,2 (max – 0,3) m/s [2].

Velikost dotlaku a doba dotlaku

Princip dotlakové fáze byl již vysvětlen v kapitole 6.2. Tato fáze má z hlediska jakosti výstřiků největší vliv na tvarovou a rozměrovou přesnost.

Velikost dotlaku i doba jeho působení musí být takové, aby po přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak došlo k vyrovnání všech možných propadlin a nerovností a zaplnění všech průřezů taveninou (odstranění vnitřních bublin a propadlin).

Doba dotlaku závisí především na vlastnostech vtokového systému a tloušťky stěny výstřiku a bývá zpravidla v rozmezí několika až několika desítek sekund.

Poměr mezi velikostí dotlaku a vstřikovacím tlakem by měli udávat výrobci konkrétního granulátu nebo jej můžeme stanovit z tabulkových hodnot.

Zvýšení velikosti dotlaku a jeho prodloužení má za následek zmenšení výrobního smrštění v důsledku vyššího plnění dutiny vstřikovací formy [2].

Doba chlazení

Musíme rozlišovat pojmy doba chlazení a doba ochlazování. Doba chlazení je časový úsek začínající až po skončení působení dotlaku a trvající až do okamžiku otevření formy. Dobou ochlazování se rozumí součet doby dotlaku a doby chlazení. Doba ochlazování by měla být tak dlouhá, aby zajistila, že při vyhození výstřiku z formy nedojde k jeho deformaci. Dobu ochlazování stanovujeme buďto z tabulek nebo výpočtem [2].

Největší vliv na hodnotu doby chlazení má největší tloušťka stěny výstřiku nebo tloušťka stěny tvarového prvku výstřiku s nejhorsími podmínkami pro chlazení. O něco menší vliv mají také technologické teploty (teplota taveniny, formy a vyhazování výstřiku z formy.)

Doby chlazení a ochlazování jsou časově nejdélsí fáze vstřikovacího procesu, protože plasty jsou špatnými vodiči tepla. Trvají od několika sekund do několika málo minut v závislosti na tloušťce stěny [2] [3].

7 VSTŘIKOVÁNÍ POLYAMIDŮ PA 6 A PA 66

7.1 Sušení granulátu

Protože polyamidy jsou velmi navlhavé materiály, před samotným vstřikováním je nutné hlídat si obsah vlhkosti v granulátu. Ta by neměla při samotném vstřikování přesáhnout 0,2 %.

Většina výrobců dodává PA vysušený, v hermeticky uzavřených obalech. V takovém případě není potřeba před vstřikováním sušit. Je-li však pytel otevřen a obsah není zpracován najednou, při dalším zpracování je nutné jej sušit. Pokud je vlhkost před vstřikováním vyšší, je nutné materiál vysušit.

Doba sušení závisí na konkrétní vlhkosti, většinou by však neměla být menší, než 4 hodiny při sušení suchým vzduchem.

Vysušený materiál po vystříknutí znovu navlhá, čímž se mu snižuje tuhost a pevnost, dochází k jeho zvětšení a zvyšuje se jeho houževnatost. [2]

Rovnovážný obsah vlhkosti pro PA 6 je 6,6 % a to způsobuje rovnoměrné zvětšení jeho rozměrů ve formě o cca 1,47 %. PA 6 se 30 % skleněných vláken má oproti tomu nižší obsah vlhkosti (cca 3,7 %) a zvětšuje se anizotropně – rovnoběžně s tokem taveniny o cca 6,3 %, kolmo ke směru toku jen o cca 0,6%. Pro PA 6 a PA 66 se doporučuje sušení po dobu 4 až 8 hodin při teplotě 80°C.

Příliš dlouhá doba sušení může způsobit nežádoucí termooxidaci sušeného granulátu, čímž dojde k jeho zežloutnutí, nebo změně odstínu [2].

7.2 Doporučené parametry vstřikování

Po vysušení materiálu probíhá vstřikovací proces stejně, jako u ostatních materiálů (viz kapitola 6).

Doporučené parametry pro vstřikování PA můžeme najít jak v odborné literatuře, tak u jednotlivých dodavatelů materiálu v podobě granulátu. Vždy by se měly přizpůsobit konkrétnímu vstřikolisu.

Pro vstřikování PA 6 a PA 66 uvádí pan L. Zeman ve svém průvodci vstřikováním plastů následující doporučené technologické parametry: [2]

Tab. 3 - Doporučené parametry vstřikování [2]

Parametr	Pa 6	PA 66
Teplota taveniny	250-270°C	270 (290-310) °C
Teplota formy	70-80°C	70 (50-90)°C
Obvodová rychlost šneku	Nízká (0,2-0,25 m. s ⁻¹ , pro neplněné typy PA max.: 0,4 m. s ⁻¹ , pro plněné typ max.: 0,12 m. s ⁻¹ ,	
Vstřikovací rychlost	vysoká	
Zpětný odpor	nízký	

7.2.1 Další důležitá doporučení: [2, 13]

- U PA 6, PA 66, PA 6 - GF, PA 66 - GF by výtrž na teplotě taveniny neměla být delší, než cca 15 až 20 min.
- Pro získání dobré jakosti povrchu u PA plněnými skleněnými vlákny (SV) se doporučuje co nejvyšší vstřikovací rychlost.
- Odvzdušnění by mělo být maximálně 0,02 mm.
- Profil nastavení teplot topných zón (především u PA plněnými SV by měl být plochý, i dávkovací zóna by měla mít vysokou teplotu, aby nedocházelo k redukci délky SV a tím ke snížení mechanických vlastností.
- Při krátkém přerušení výroby se sníží teplota taveniny o 30 °C
- K čištění komory by se měl používat speciální materiál, HDPE-nízký ITT, PS standardní – nízký ITT, PP - GF přírodní.
- U PA má velký vliv na výsledné rozměry výstřiku dosmrštění a absorpce vody. Je potřeba brát v potaz oba tyto vlivy.

7.3 Doporučené parametry vstřikování od dodavatelů

Každý dodavatel polymerního granulátu uvádí doporučené parametry jeho vstřikování a doporučené nastavení stroje. To závisí jak na konkrétním typu PA, tak na obsahu přidaného plniva. U blendů smíchaných ze 2 nebo více PA bude nastavení samozřejmě také odlišné. Pro srovnání a lepší náhled do celé problematiky přidávám doporučené parametry od tří mezinárodních dodavatelů granulátu PA 6 a PA 66. Je zajímavé vidět, jak se liší doporučení od jednotlivých dodavatelů a jak se parametry mění přidáním SV.

Světový dodavatel polyamidů AKULON® udává následující parametry nastavení stroje pro zpracování PA 6 a PA 66 s výztuží v podobě SV i bez ní [14].



	forma	tavenina	tryska	přední z.	střední z.	zadní z.	sušení
Akulon Polyamid 6	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
nevztužený	55-80	240-265	235-260	235-255	230-250	225-245	80
se skleněnými vlákny	55-80	270-280	260-270	265-275	275-290	270-280	80
Akulon Polyamid 66							
nevztužený	55-80	270-295	270-295	280-295	275-295	270-290	80
se skleněnými vlákny	55-95	280-305	280-295	275-290	290-300	280-295	80

Obr. 12 - Doporučené nastavení teplot pro PA 6 a PA 66 od světového dodavatele polyamidů, AKULON® [14]

Výrobce vyztužených polyamidů Celstran® LFRT uvádí následující doporučené hodnoty nastavení stroje pro PA 6 - GF a PA 66 - GF. (Teploty v °C nejsou celočíselné, neboť došlo k převodu z Fahrenheitovy stupnice).

První dvě tabulky (tab. 4 a tab. 5) znázorňují nastavení teplot v jednotlivých zónách, doporučenou teplotu formy a teplotu taveniny pro každý z materiálů PA6 a PA66 zvlášť.

Třetí tabulka (tab. 6) popisuje nastavení stroje, které je pro oba PA stejné [15].

Tab. 4 - Doporučení nastavení teplot pro PA 6 + GF (30-60 %), teploty jsou ve °C [15].

Materiál	Forma [°C]	Tavenina [°C]	Tryska [°C]	Přední z. [°C]	Střední z. [°C]	Zadní z. [°C]
PA 6/GF 30	93,3	271,1	271,1	271,1	265,5	260,0
PA 6/GF 40	93,3	276,6	276,6	276,6	271,1	265,5
PA 6/GF 50	93,3	282,2	282,2	282,2	276,6	271,1
PA 6/GF 60	93,3	287,8	287,8	287,8	282,2	276,6

Tab. 5 - Doporučení nastavení teplot pro PA 66 + GF (30-60 %) [15]

Materiál	Forma [°C]	Tavenina [°C]	Tryska [°C]	Přední z. [°C]	Střední z. [°C]	Zadní z. [°C]
PA 66/GF 30	93,3	293,3	287,8	293,3	287,8	282,2
PA 66/GF 40	93,3	298,9	293,3	298,9	293,3	287,8
PA 66/GF 50	93,3	304,4	298,9	304,4	298,9	293,3
PA 66/GF 60	93,3	304,0	304,4	30,0	304,4	298,9

Tab. 6 - Doporučené parametry stroje pro vstřikování PA 6 s i bez výztuže SV od firmy Celstran [15]

Vstřikovací rychlost	cca 50,8-76,2 mm/s
Vstřikovací tlak	Střední až maximální
Rychlost šneku	30-50 ot/min
Tloušťka polštáře	6,35 mm

Mezinárodní dodavatel plastů a elastomerů Resinex udává na své internetové stránce následující parametry pro zpracování polyamidů řady Technyl (platí nejen pro vstřikování) [17].

Tab. 7 - Doporučené parametry zpracování PA 6 a PA 66 od firmy Resinex [17]

Technyl® C - PA6	Teplota taveniny [°C]	Teplota formy [°C]	Zpětný tlak [bar]
Neplněný Technyl® C	230 - 250	40 - 80	50 - 100
Technyl® C plněný sklem	280 - 260	80 - 100	20 - 50
PA6.6 Technyl® A	Teplota taveniny [°C]	Teplota formy [°C]	Zpětný tlak [bar]
Neplněný Technyl® A	270 - 290	60 - 80	50 - 100
Technyl® A plněný sklem	280 - 300	80 - 120	20 - 50

7.3.1 Shrnutí doporučených hodnot pro vstřikování vyztužených PA6 a PA66

Na základě nalezených informací, popsaných v kapitolách 7.3 a 7.4 uvádím doporučené hodnoty základního nastavení vstřikolisu pro zpracování polyamidů PA6 a PA66 vyztužených SV.

U některých parametrů, závisí velikost hodnoty daného nastavení na vstřikovacím stroji. V tomto případě proto uvádím pouze orientační hodnotu (např. nízká rychlost na šneku) z kapitoly 7.3.

Tab. 8 - Souhrn doporučených hodnot parametrů vstřikování PA 6 a PA 66 + GF

Parametr	PA 6 + GF	PA 66 + GF
teplota zón plastikační komory [°C]	271	295
teplota formy [°C]	82	85
zpětný odpor na šneku	nízký	
rychlost na šneku	nízká	
vstřikovací rychlost	vysoká (max. 0,12 m. s ⁻¹)	
obvodová rychlost šneku	nízká (max. 0,12 m. s ⁻¹)	
teplota sušení [°C]	80	

7.4 Vědecké práce zabývající se optimalizací parametrů vstřikování PA6 a PA66

Vhodným nastavením vstřikovacího stroje za účelem docílení co nejlepší kvality a mechanických vlastností se zabývalo několik vědců.:

D.Teixeira, M.Giovanella, L.B.Gonellac a J.S.Crespoa [16] řešili optimální nastavení vstřikovacího stroje při vstřikování kompozitu PA 6 + 50 GF a snažili se stanovit takové parametry, aby bylo dosaženo co největší pevnosti v ohybu a co nejlepší kvality povrchu výstřiku.

Počáteční délka vláken byla 11 mm a materiál pocházel z firmy Ticona (Florence, Kentucky, USA). Jako vstřikovací stroj byl použit vstřikovací lis HAIHANG–HHF128X. Před vstřikováním byl materiál sušen 12 hod na 80±5 °C.

Během celého experimentu se měnily tyto parametry: teplota topných zón v plastikační komoře, rychlost vstřikování a rychlost šneku. Za výstupní hodnoty byly zvoleny: pevnost v ohybu, drsnost, lesk a vizuální kvalita výlisků

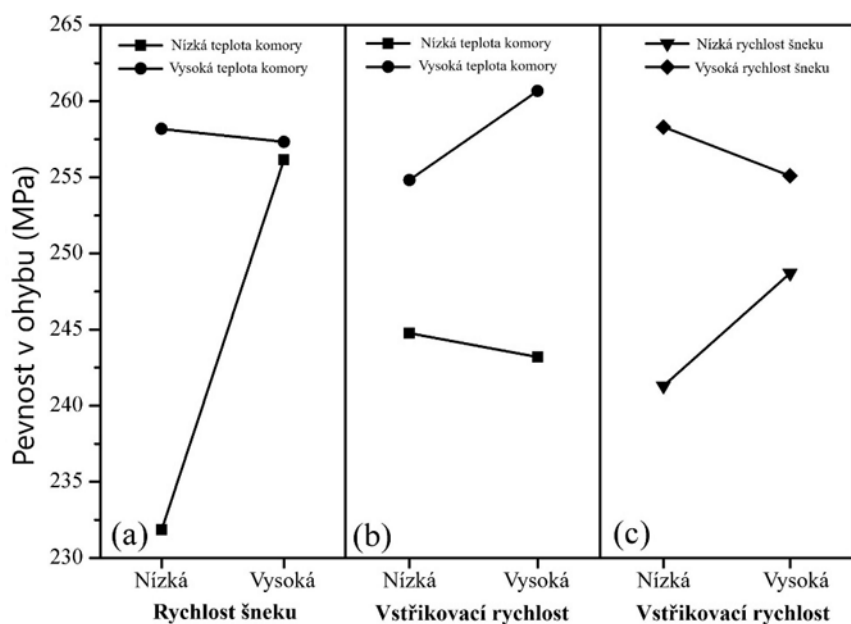
Ukázalo se, že nejdůležitějšími faktory pro výslednou pevnost v ohybu byla teplota jednotlivých zón plastikační komory a rychlost šneku. Čím vyšší tyto hodnoty byly, tím lepší byla lepší nejen měřená pevnost, ale také výsledná kvalita povrchu (drsnost, lesk a vizuální kvalita). Vyplývá to z grafických výstupů celého výzkumu, viz obr. 13 a obr. 14.

Díky mikroskopické analýze vzorků autoři zjistili, že optimalizace parametrů procesu podporuje lepší orientaci vláken ve vnějších vrstvách a zároveň zabraňuje přemístění skleněných vláken na povrch kompozitu, díky čemuž je dosaženo lepší kvality povrchu.

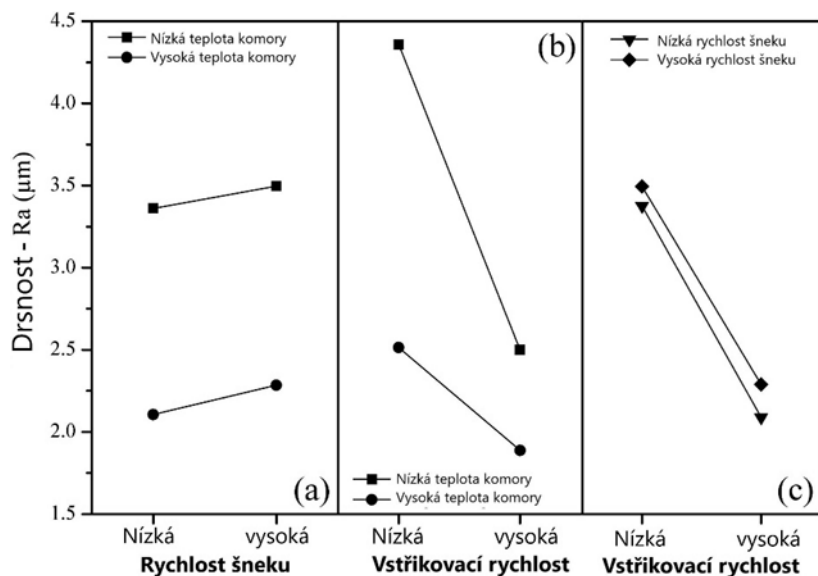
Aby bylo dosaženo co největší pevnosti a zároveň co nejlepší kvality povrchu, všechny parametry (teplota zón, rychlost šneku a rychlost vstřikování) by podle autorů měly být nastaveny na vyšší hodnoty.

Tab. 9 – Nastavení stroje [16]

Měněné parametry	nízká	vysoká	Konstantní parametry	
Teploty komory [°C]	275-285	295-310	Vstřikovací tlak [MPa]	11
Rychlost šneku [ot./min]	40	120	Teplota vody [°C]	90
Vstřikovací rychlost [cm^3/s]	32	65	dotlak (bar)	60
			doba dotlaku (s)	4



Obr. 13 - Vliv parametrů na pevnost v ohybu u výlisků [16]



Obr. 14 - Vliv parametrů vstřikolisu na drsnost výlisků [16]

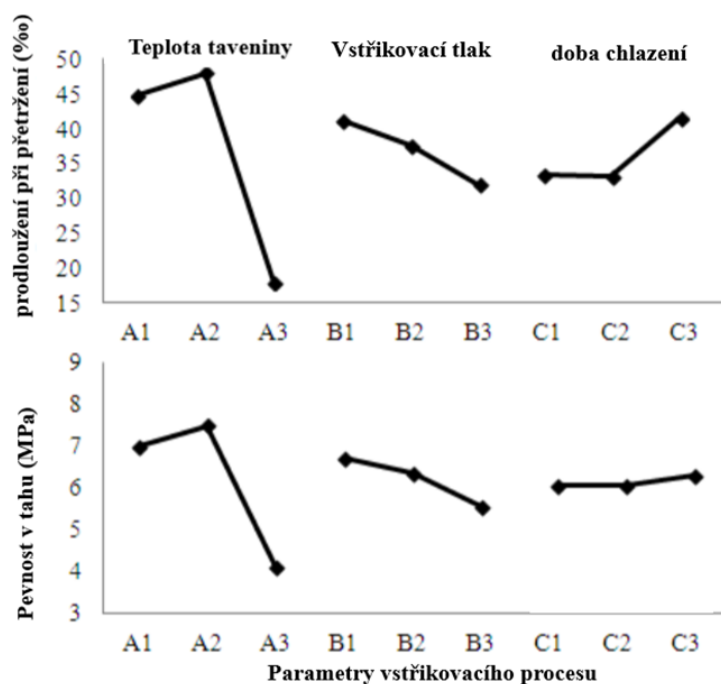
Podobnou prací se zabývali i Nik Mizamzul Mehat, Shahrul Kamaruddin a Abdul Rahim Othman [23], kteří se snažili stanovit co nejlepší parametry nastavení vstřikovacího stroje, za účelem co nejlepších mechanických vlastností u ozubeného kola, vyrobeného z PA 6 vstřikováním do formy. Jako stroj byl použit Battenfeld TM750/210.

Teplota formy byla nastavena na 60 °C a vstřikovací čas na 1 sekundu. Parametry, které měnili v průběhu procesu: teplota formy, vstřikovací tlak a doba chlazení. Jejich přesné hodnoty můžeme vidět v tab. 10.

V následujících grafech můžeme vidět, jak jednotlivé parametry ovlivnily délkové prodloužení při přetržení a pevnost v tahu. Z grafů je patrné, že největší vliv na změnu mechanických vlastností měla teplota taveniny.

Tab. 10 - Hodnoty regulovaných parametrů [23]

	Hodnota č. 1	Hodnota č. 2	Hodnota č. 3
A) Teplota taveniny [°C]	260	280	300
B) Vstřikovací tlak [%]	60	80	100
C) Doba chlazení [s]	30	40	50



Obr. 15 - Vliv technologických parametrů vstřikování na některé mechanické vlastnosti u ozubeného kola vyrobeného z PA 6 [23]

Alexandre Luís Gasparin, Leandro Luís Croso, Eduardo Kirinius Tendarini a další [24], řešili ve své práci vhodnou volbu materiálu a nastavení technologických parametrů pro výrobu šnekových kol.

Ke vstřikování použili vstřikolis Himaco model LH150-80 se vstřikovací kapacitou 150 kg a maximální uzavírací silou 800 kN.

Jako materiál zvolili PA 6 a PA 66 s různým množstvím skelných vláken (%GF). V závěru své práce uvedli jako nejvhodnější materiál z hlediska výsledných mechanických vlastností PA 6 + 30 GF 30 a PA 66 + GF 30. Jimi doporučená nastavení vstřikolisu jsou uvedeny tabulce 11.

Tab. 11 - Doporučené nastavení parametrů pro výrobu šnekových kol [24]

Parametry:	PA 6	PA 6 15% GF	PA 6 30% GF	PA 6/6	PA 6/6 15% GF	PA 6/6 30% GF	PA 60% GF
Doba vstřikování(s)	4.5	5	6	4.5	5	5	5
Doba chlazení (s)	23	22	20	22	18	20	20
Vstřikovací tlak (%)	35	40	40	50	40	45	25
Teplota trysky (°C)	40	30	60	25	50	40	60
Teplota zóny 1 (°C)	250	250	250	280	280	280	230
Teplota zóny 2 (°C)	230	230	230	270	270	270	220
Teplota zóny 3 (°C)	210	210	210	260	260	260	210

8 SHRNUÍ LITERÁRNÍ REŠERŠE

Polymerní materiály můžeme podle tepelného chování rozdělit na termoplasty, reaktoplasty, elastomery a termoplastické elastomery. Pro technologii vstřikování do formy se nejčastěji používají termoplasty.

Základ polymerů tvoří makromolekuly složené z monomerů. Tyto makromolekuly se podle struktury dělí na lineární, rozvětvené a zesíťované. Z hlediska uspořádanosti makromolekul rozlišujeme polymery amorfnní a semikristalické. Do jaké skupiny materiál spadá, ovlivňuje nastavení vstřikolisu při vstřikování. U semikristalických polymerů se musí brát ohled na velikost smrštění v důsledku krystalizace.

Do termoplastů vhodných ke vstřikování se přidávají různé přísady a plniva pro zlepšení jejich zpracovatelnosti a výsledných fyzikálních vlastností. Plniva se dělí na částicová, vyztuřující a nanoplňniva. Materiál obsahující plnivo, nebo směs dvou a více materiálů se nazývá kompozit.

Polyamidy jsou semikristalické materiály vhodné pro vstřikování. Používají se pro tvorbu vláken a jako konstrukční plasty. Mají velkou tvrdost, tepelnou odolnost, tuhost a pevnost a jsou značně navlhavé. Mezi nejčastěji používané polyamidy patří PA 6 a PA 66.

Vstřikování do formy je v dnešní době nerozšířenější způsob zpracování plastů. Hlavními výhodami této technologie je vysoká rychlost výroby, velká opakovatelnost, nízká cena práce a možnost zpracování různých plastových materiálů. Nevýhodou bývá především vysoká pořizovací cena vstřikovacího stroje a náklady na zhotovení vstřikovací formy.

Vstřikování se v současnosti provádí převážně na šnekových vstřikolisech. Každý vstřikolis se skládá z několika komponent a k samotnému procesu vstřikování je potřeba vstřikovací forma s vtokovým systémem.

Princip vstřikování spočívá v natavení materiálu většinou v podobě granulátu pomocí šneku a topných pásem v plastikační komoře a jeho následném vstřiknutí pod vysokým tlakem do ohřáté formy. Vstřikovací proces je cyklický a můžeme ho rozdělit na fázi plastikační, vstřikovací, dotlakovou a chladící.

Tento proces ovlivňuje několik parametrů, které můžeme měnit přímo na řídicí jednotce stroje. Jednotlivé parametry mají vliv na výsledné vlastnosti výrobku – výstřiku. Nejdůležitějšími z nich jsou: teplota formy, teplota jednotlivých zón v plastikační komoře, vstřikovací tlak a vstřikovací rychlost, zpětný odpor šneku, obvodová rychlost šneku, velikost a doba dotlaku a doba chlazení.

Polyamidy se před vstřikováním musejí vysušit, aby nedošlo k nežádoucímu ovlivnění mechanických vlastností kvůli příliš velkému obsahu vody v granulátu. Při volbě vhodného nastavení vstřikovacího stroje by se mělo vycházet především z materiálových listů od dodavatele materiálu. Obecné doporučené nastavení pro zpracování PA 6 a PA 66 vyztužených SV je uvedeno v tab. 8 v kapitole 7.3.1.

Na výsledné mechanické vlastnosti výstřiku mají vliv různé technologické parametry. Z nich nejvýznamnější je obvodová rychlost šneku a teplota taveniny, která se nastavuje pomocí topných pásem umístěných okolo plastikační komory. Obě hodnoty by podle několika zahraničních vědců citovaných v kapitole 7.4 měly být nastaveny na, pokud možno, co nejvyšší hodnoty. Zvýšená teplota taveniny materiálu, které je docíleno teplotou plastikační komory, má za následek lepší mechanické vlastnosti a kvalitu povrchu výlisku, neboť se zvýší tekutost materiálu, která umožňuje snazší orientaci vláken v tavenině.

9 PRAKTICKÁ ČÁST

V rámci praktické části jsem se měl seznámit s ovládáním a výrobním procesem na laboratorním vstřikovacím lise. Podílel jsem se na nastavování vhodných parametrů pro vstřikování materiálu Grilon TSG-30/4, což je směs PA 6 a PA 66 s 30% příměsí skleněných vláken (PA 6 + PA 66 + 30 GF). Tento materiál má obrovské využití nejen ve strojírenství, ale i v dalších odvětvích průmyslu. Díky svým výborným mechanickým vlastnostem, teplotní, chemické a korozní odolnosti, lehkosti a cenové dostupnosti se používá jako konstrukční plast. Protože se vstřikováním polyamidů jsme neměli žádné zkušenosti, vycházelo se z materiálových listů od výrobce a z normy na vstřikování zkušebních tělísek.

Kvůli více faktorům, které popíši dále, se nám podařilo vyrobit pouze 3 vylisky, u kterých jsem se rozhodl udělat tahovou zkoušku a zjistit některé mechanické vlastnosti. Strukturu lomové plochy po tahové zkoušce jsem pak pozoroval na mikroskopu.

V následujících kapitolách uvedu normu na vstřikování zkušebních tělísek, doporučené parametry vstřikovacího procesu od výrobce granulátu, dále popíši ovládání vstřikolisu, průběh samotného vstřikování, průběh tahové zkoušky a výsledky.

9.1 Popis zkušebního tělíska

Produktem vstřikovacího procesu byla tahová tělíska (vyrobená z polyamidu), které mají rozměry dle normy EN ISO 527-2. Tělíska mají délku $L_0 = 115 \text{ mm}$. V místě přetržení při tahové zkoušce je výška vzorku $h = 4 \pm 0,2 \text{ mm}$ a šířka $b_1 = 10 \pm 0,2 \text{ mm}$ [26]



Obr. 16 - Zkušební tělíska z PA 6 + PA 66 + 30 GF, autor fotografie: Antonín Voldřich

Norma ISO 16396-2:2017 (E) pro vstřikování zkušebních tělísek z polyamidů uvádí následující doporučené teploty taveniny a formy:

Tab. 12 - Doporučené hodnoty zpracování tělísek dle normy ISO 16396-2:2017 (E) [27]

Materiál	Viskozitní číslo [ml/g]	Obsah plniv [%]	Teplota taveniny [°C]	Teplota formy [°C]
PA 6	≤120	> 0 a ≤ 70	270	80
	≥ 120 a ≤ 200	> 0 a ≤ 70	290	80
PA 66	≤ 160	> 0 a ≤ 50	290	80
PA 66/6	≤ 200	≤ 70	290	80

Podle této normy by také obsah vlhkosti granulátu před vstřikováním neměl přesáhnout 0,2 %, což souhlasí s doporučením z odborné literatury z kapitoly 7.1. Při vyšší hodnotě by měl být materiál před vstřikováním vysušen.

9.2 Popis materiálu pro vstřikování

Pro vstřikování byl zvolen granulát Grilon TSG-30/4, což je polyamidní směs PA 6 + PA 66 + 30 GF od výrobce polyamidů EMS GRIVORY.

V materiálových listech jsou v angličtině uvedeny fyzikální vlastnosti, popis vhodného skladování a sušení a doporučené hodnoty nastavení stroje.

Sušení materiálu

Materiál Grilon TSG-30/4 bývá dodáván ve vzduchotěsném balení, které brání prostupu vlhkosti. Maximální obsah vlhkosti v nerozbaleném balení je 0,1 %. Při rozbalení a následném ponechání na vzduchu delší dobu, je nutné granulát vysušit. Při vysoušení sušičkou výrobce doporučuje následující hodnoty [28]:

Tab. 13 - Sušení materiálu Grilon-TSG-30/4

Teplota sušení	Doba sušení	Rosný bod sušičky
Max. 80 °C	4-12 hod.	-25 °C

Tab. 14 - Doporučené hodnoty nastavení stroje pro vstřikování materiálu GRILON TSG-30/4 [28]

Doporučené nastavení stroje:

Teplota formy [°C]	80-100
Teplota trysky [°C]	275
Teplota přední zóny (u trysky) [°C]	280
Teplota střední zóny [°C]	275
Teplota zadní zóny [°C]	270
Vstřikovací rychlost	Střední až vysoká
Velikost dotlaku [bar]	300-800
Otáčky šneku [ot/min]	50-100

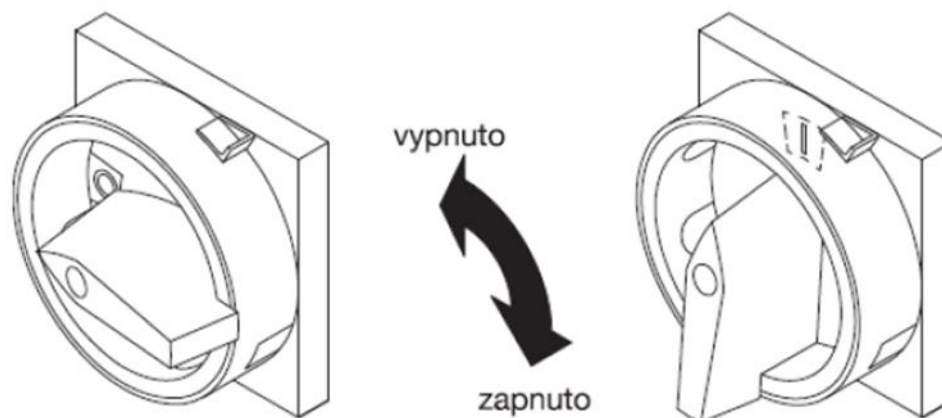
9.3 Popis ovládání stroje

Vstřikování bylo provedeno na vstřikovacím lisu ALLROUNDER 270C nacházejícím se v prostorách školy.

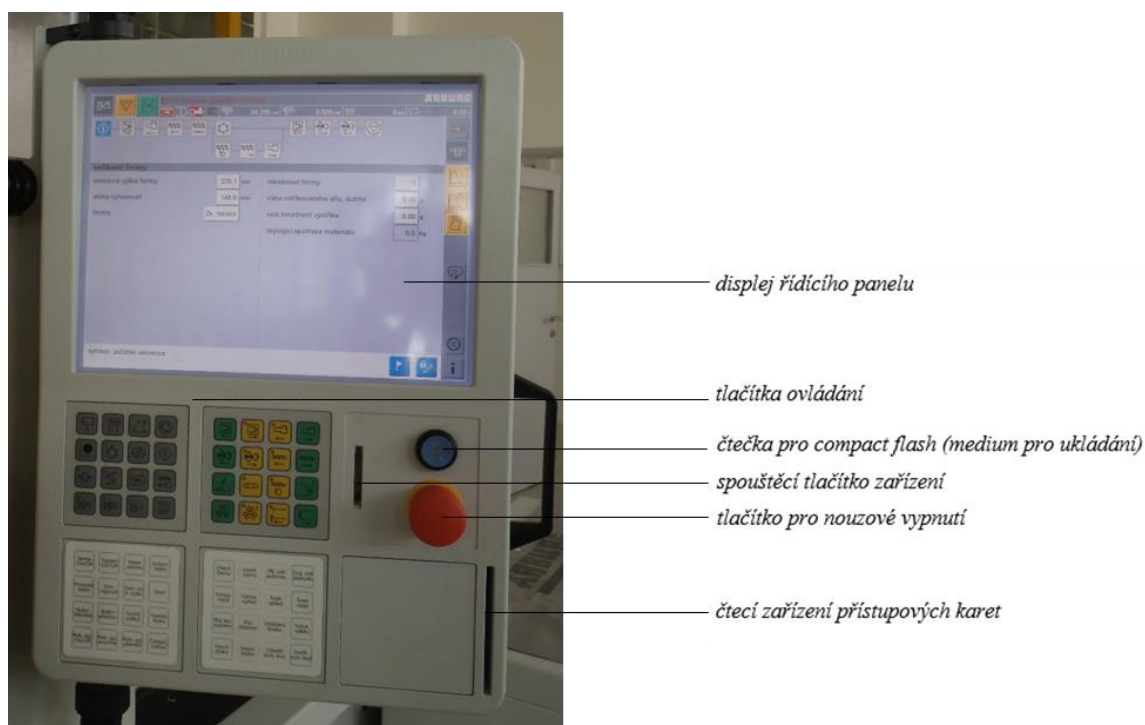


Obr. 17 - Vstřikovací stroj ALLROUNDER 270C, autor fotografie: Antonín Voldřich

Před zahájením vstřikování je potřeba zapnout stroj hlavním vypínačem, stisknout tlačítko spuštění, spustit chladicí zařízení a odemknout ovládání řídicího panelu přístupovou kartou viz obr. 18 a obr. 19.



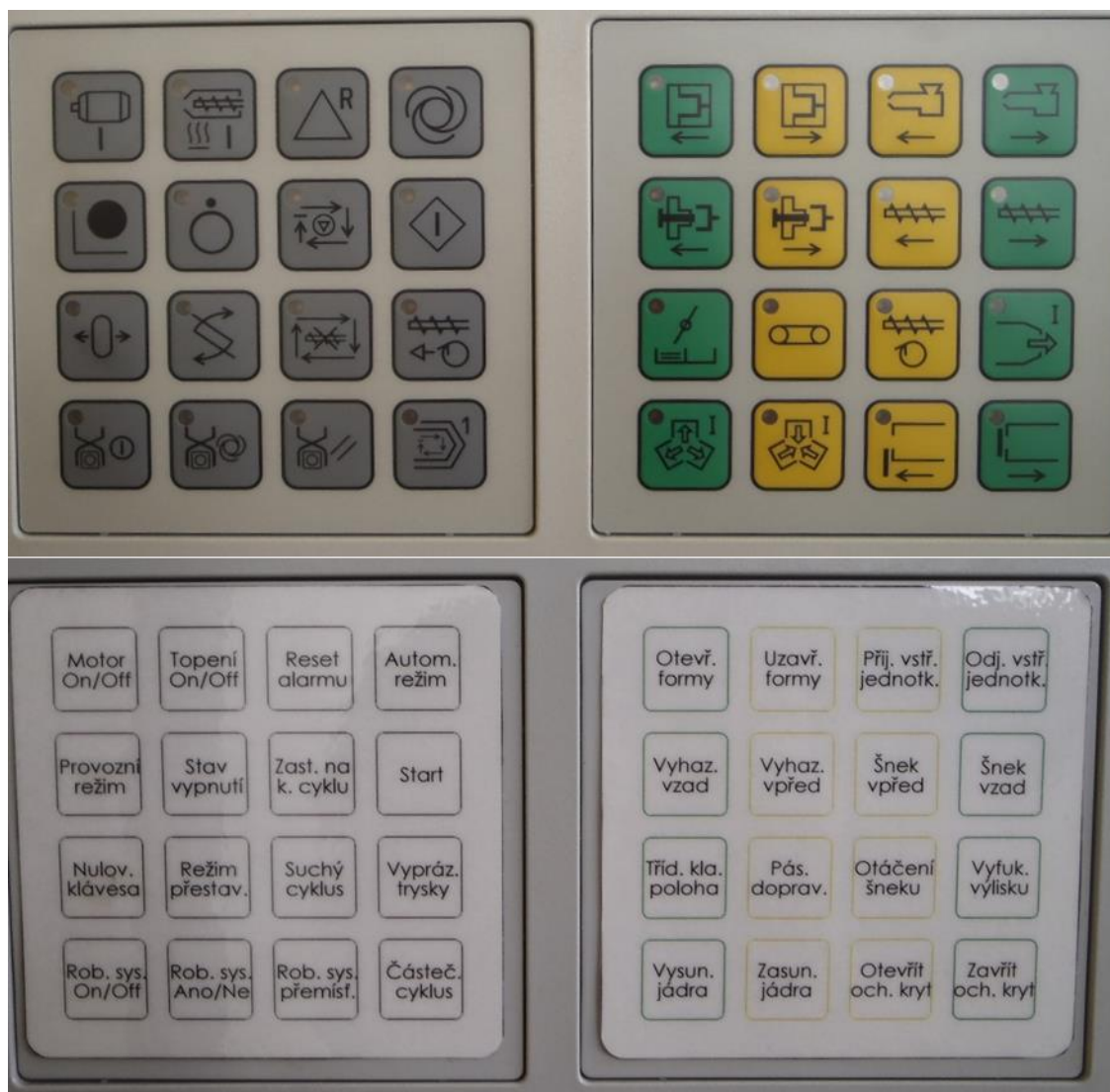
Obr. 18 - Hlavní vypínač [20]



Obr. 19 - Řídicí panel vstřikovacího stroje, autor fotografie: Antonín Voldřich

Ovládání přednastaveného a připraveného výrobního programu se provádí v automatickém režimu šedými tlačítky. Při ručním režimu ovládání stroje jsou použita tlačítka zelená a žlutá, viz obr. 20 vpravo. Parametry vstřikování se nastavují přímo na displeji, kde může obsluha stroje také sledovat průběh celého procesu.

Na obr. 20 lze vidět základní tlačítka ovládání vstřikolisu a jejich funkce.



Obr. 20 - Ovládací tlačítka vstřikolisu, autor fotografie: Antonín Voldřich

Před spuštěním samotného vstřikování musejí být stisknuta první dvě tlačítka, aby se zapnul motor čerpadla a topení válce. Klávesou „autom.režim“ se pak přepíná mezi ručním a automatickým provozem stroje. Tlačítko „start“ spouští každý automatický vstřikovací cyklus. Pravá strana tlačítek pak slouží k manuální obsluze dílčích procesů vstřikování viz obr 20.

9.4 Popis průběhu vstřikování

V rámci praktické části mé bakalářské práce jsem se podílel celkem dvakrát na vstřikování materiálu Grilon TSG-30/4.

Před prvním vstřikování bylo nejprve potřeba zprovoznit sušičku a namontovat ji na samotný vstřikolis, aby mohl vysušený granulát přímo propadat otvorem přímo do plastikační komory viz obr. 21. K tomu byla použita sušička Piovan DPA6 Po zapnutí vstřikovacího stroje se musela vyprázdnit vstřikovací jednotka, ve které byly zbytky polyetyleny z předešlého vstřikovacího procesu. Následně byl vstřikovací stroj nastaven na hodnoty, které doporučoval výrobce materiálu, a pokusili jsme se vyrobit první výlisek. Rychlost šneku byla při prvním pokusu nastavena na hodnotu $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 21 - Sušička Piovan, autor fotografie: Antonín Voldřich

Problémy vzniklé během vstřikování materiálu Grilon TSG-30/4

Během vstřikování jsme se potýkali s řadou problémů.

Aby se dostal granulát z násypky do tavicí komory, musí se u vstřikovacího stroje, na kterém jsme pracovali, šnek posunout dozadu za úroveň násypky. To se však nedařilo a materiál se z násypky nedostával do plastikační komory (před šnek) v požadovaném množství. Na konci prvního vstřikování jsme zjistili, že to bylo částečně způsobeno špatnou montáží sušičky. Otvor, kterým měl granulát propadávat působením gravitace, byl otevřen jen z poloviny. Dalším důvodem bylo pravděpodobně špatné nastavení protitlaku, který by se na řídicím panelu stroje měl nastavovat v záporných hodnotách.

Dalším problémem bylo ucpávání trysky vstřikovací jednotky. Otvor trysky, kterým měla být tavenina, vstříknuta byl při každém pokusu užší, protože roztavený materiál průběžně tuhnul a lepil se na vnitřní stěny trysky. To bylo způsobeno hlavně tím, že byla tavenina ponechána příliš dlouho v tavicí komoře, což je nežádoucí. Stroj neběžel kontinuálně, z důvodu přerušování automatického režimu po ukončení jednoho cyklu z důvodu poruchy (např. zacpání vtokové soustavy, nebo trysky). Doba, kterou může materiál zůstat ve vstřikovací jednotce, by neměla přesáhnout 10 minut. Vzhledem k nutnosti neustálé změny nastavení a době, která je potřeba k manuálnímu ovládní stroje nebylo možné tento limit dodržet. Po každém pokusu jsme proto museli trysku manuálně čistit, aby byl umožněn prostup nové várky taveniny. Také by měla být nastavena správná hodnota dekomprese, aby nedocházelo k vytékání taveniny tryskou.

Sušička sušila granulát pouze při teplotě 40 °C, z důvodu omezení vnějších zásahů obsluhy do nastavení sušičky výrobcem zařízení.

Chladič Aquatech CH 50, který je součástí vybavení vstřikovacího lisu v prostorách školy vykazoval poruchu a přehříval se (zřejmě z důvodu úniku chladiva z chladičí jednotky). Vzhledem k poruše chladiče, byl čas vyhrazený pro nastavení a provoz stroje omezený cca na 5 hodin. Kvůli tomu nebyl dostatek času na vystříknutí více zkušebních tělísek, a tak se podařilo plně vyrobit pouze 3 zkušební tělíška.

Při druhém pokusu už byla provedena správná montáž násypky a materiál se dostával do plastikační komory v požadovaném množství. Aby nedocházelo k ucpávání trysky, zvýšili jsme teploty jednotlivých zón plastikační komory a teplotu trysky, jak lze vidět v tab. 15.

Tab. 15 - Nastavené hodnoty teplot jednotlivých zón včetně trysky

Teplota trysky [°C]	Teplota přední zóny [°C]	Teplota střední zóny [°C]	Teplota zadní zóny [°C]
300	300	285	280

Hodnoty dotlaku v závislosti na časovém průběhu dotlakové fáze byly nastaveny na 200, 180 a 60 barů. Rychlost šneku byla nastavena na $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Při druhém pokusu byly úspěšně vyrobeny 2 zkušební tělíska. Z důvodu poruchy chladiče a stálého ucpávání trysky s nemožností připravit novou dávku taveniny se nepodařilo vyrobit více vzorků.

Na konci dne bylo potřeba celý stroj vyčistit čistícím granulátem, který dodala firma Purgex. Čištění probíhalo tak, že se čistící granulát postupně vstříkoval mimo formu, v množství, které odpovídalo jedné čtvrtině vstřikovací kapacity. Čistící granulát sebou postupně nabíral nečistoty, které zanechal materiál Grilon TSG 30/4 v tavicí komoře. Celkový objem vystříknutých dávek by měl být podle materiálových listů od výrobce roven objemu tavicí komory. Kdyby nebylo čištění stroje provedeno, při dalším vstřikování jiných materiálů by se ve výliscích mohly objevit stopy polyamidu, což by bylo nežádoucí. Navíc polyamid má vysokou přilnavost ke kovovým povrchům, což by mohlo při dalším provozu poškodit povrch plastikačního válce vytržením „napečeného“ polyamidu.

Před dalším vstřikováním materiálu Grilon TSG 30/4 by bylo vhodné pracovat s opraveným chladičem, správně nastavenou sušičkou a zkusit zvýšit hodnoty dotlaku a protitlaku, popřípadě měnit i jiné parametry procesu. Po konzultaci s firmou Arburg nám bylo dále doporučeno nastavit správnou hodnotu zpětného tlaku a nezapomenout na dekompresi po dávkování (snížení tlaku v plastikační komoře), aby nedocházelo k nežádoucímu vytékání taveniny tryskou. Doba vstřikování by prý měla být stejně dlouhá, jako doba dávkování.

Nelze spoléhat na doporučené hodnoty od výrobce granulátu, ale je potřeba experimentovat s nastavením vstřikolosu. Ke vstřikování polyamidní směsi, jako je tato, jsou

důležité především zkušenosti, protože na každém vstřikovacím stroji bude vhodné nastavení vypadat trochu jinak a není zcela přenosné.

9.5 Tahová zkouška

U všech tří úspěšně vstříknutých tělísek jsem se rozhodl provést tahovou zkoušku a pro dvě z nich spočítal mez pevnosti v tahu R_m a modul pružnosti v tahu E . Měření jsem provedl na školním trhacím stroji od společnosti Walter + Bai AG, typ ZD 10/90. Během celé zkoušky byla nastavena konstantní rychlost polohování $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Aby byly výsledky relevantní, bylo by potřeba vyrobit mnohem více vzorků a pracovat s více hodnotami. Výsledky tohoto měření budou proto pouze orientační.



Obr. 22 - Trhací stroj [29]



Obr. 23 - Natrhané výlisky, autor fotografie Antonín Voldřich

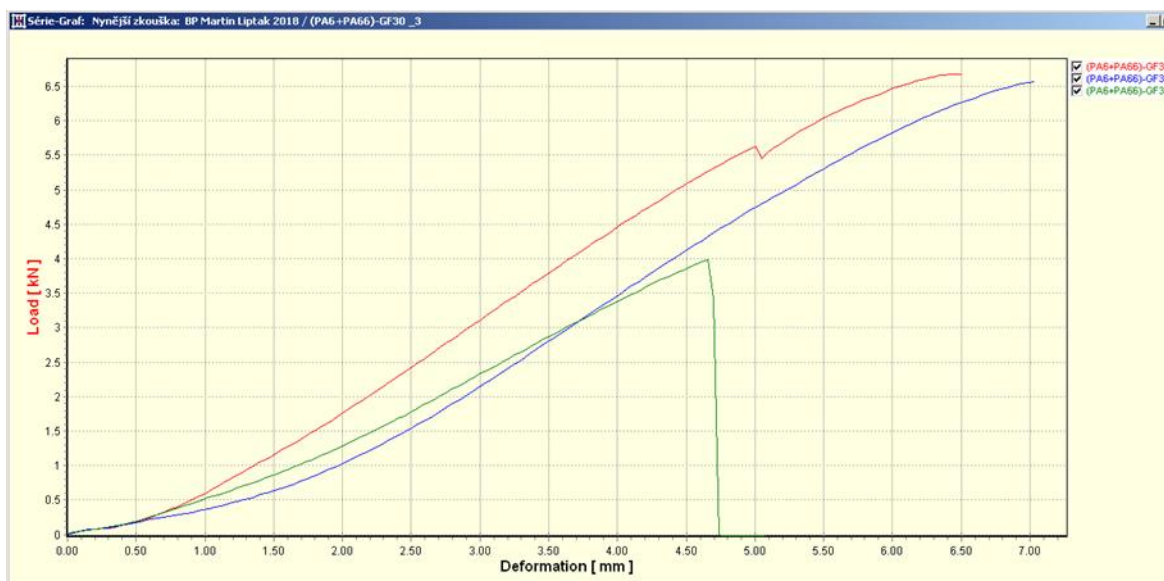
9.5.1 Popis tahové zkoušky

Tahová zkouška je jednou z nejčastěji používaných mechanických zkoušek. Vzorek je při zkoušce na obou koncích upnut do trhacího stroje a postupně zatěžován silou až do jeho přetržení. Z tahové zkoušky lze zjistit spoustu důležitých mechanických veličin [30]. Výstupem bývá tahový diagram, ze kterého se přímo dají vyčíst hodnoty následujících veličin:

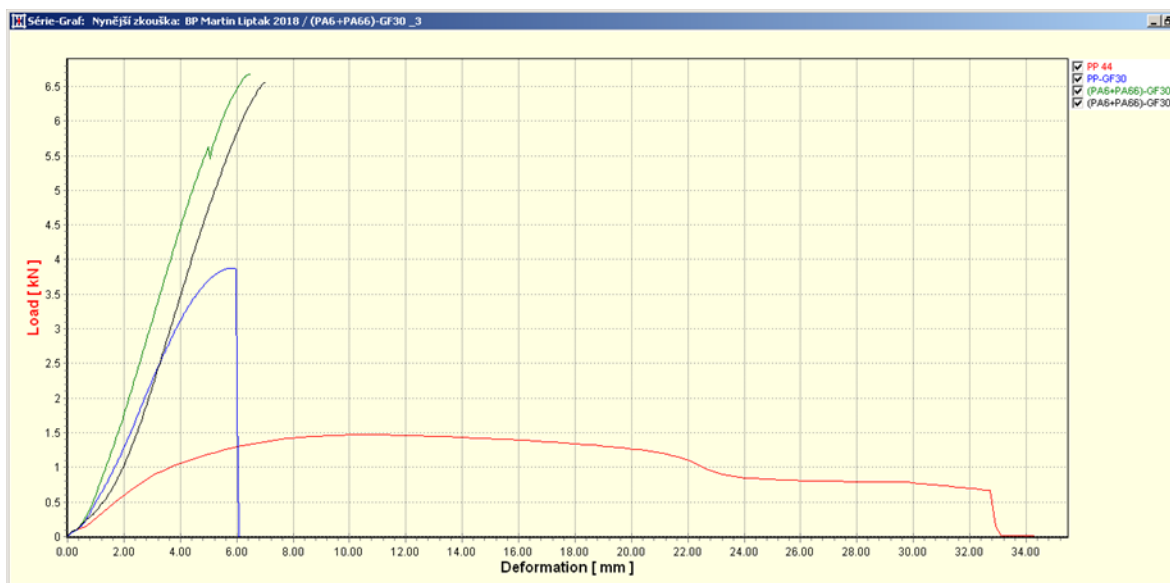
- F [N] – maximální zatížení před přetržením.
- ΔL [mm] – deformace (prodloužení) při přetržení

9.5.2 Hodnoty F a ΔL vyčtené z tahového diagramu:

Na obr. 24 lze vidět tahový diagram přímo z tahové zkoušky. Pro lepší představu přikládám obr. 25, který zobrazuje porovnání křivek tahového diagramu polyamidní směsi a polypropylenu 44 (PP 4). Z grafů je zřejmé, že polyamidy vydrží násobně větší zatěžovací síly než ostatní druhy termoplastů a přitom se méně deformují.



Obr. 24 - Tahový diagram, červeně - vzorek č. 1, modře - vzorek č. 2, zeleně - vzorek č.3



Obr. 25 - Srovnání křivek tahového diagramu pro PA 6 + PA 66 + 30 GF (zeleně, černě a modře) a PP 44 (červeně)

Z tahového diagramu (obr. 24) jsem vyčetl následující hodnoty:

Tab. 16 - Hodnoty vyčtené z tahových diagramů

	Max. zatížení F [kN]	Prodloužení ΔL [mm]
Vzorek č.1	7,5	6,50
Vzorek č.2	7,1	7,02
Vzorek č.3	4,0	4,72

Vzorek č. 3 jsem posoudil, jako vadný, neboť k jeho přetržení došlo o dost dříve, než u vzorků č.1 a č. 2. Z tahového diagramu na obr. 24 a z tab. 16 je vidět, že dosahoval o dost nižších hodnot F a ΔL než ostatní dva vzorky. U tohoto vzorku jsem tedy nepočítal R_m ani E, ale abych zjistil důvod vady, porovnal jsem ho s ostatními pod mikroskopem, viz kapitola 9.6.

9.5.3 Vypočtené hodnoty

Použitý vztah pro výpočet meze pevnosti v tahu:

$$R_m = \frac{F}{S_0} = \frac{F}{h \cdot b_1} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

kde F [N] je maximální zatížení před přetržením,

S_0 – [mm²] původní plocha průřezu v místě přetržení,

h [mm] – výška vzorku,

b_1 [mm] – šířka vzorku

Použitý vztah pro výpočet Youngova modulu pružnosti v tahu:

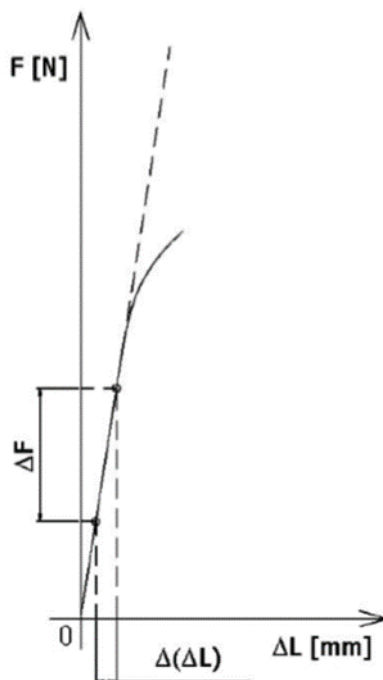
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta F}{S_0}}{\frac{\Delta(\Delta L)}{L_0}} = \frac{\Delta F}{\frac{\Delta(\Delta L)}{L_0}} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

kde $\Delta\sigma$ [MPa] je napětí v tahu,

$\Delta\varepsilon$ [-] – poměrné prodloužení,

$\Delta(\Delta L)$ [mm] – změna délky vzorku,

L_0 [mm] – původní délka vzorku



Obr. 26 - Princip odečtení hodnot ΔF a $\Delta(\Delta L)$ pro výpočet E z tahového diagramu [30]

Hodnoty ΔF a $\Delta(\Delta L)$ jsem vyčetl z grafu dle obr. 26. Tabulka 17 uvádí hodnoty potřebných rozměrů vzorků před přetržením:

Tab. 17 - Původní rozměry vzorků

	h [mm]	b_1 [mm]	S_0 [mm ²]	L_0 [mm]
Všechny vzorky	4	10	40	115

Tabulka 18 zobrazuje hodnoty ΔF a $\Delta(\Delta L)$ odečtené z grafů dle obr. 24 a 25 a vypočtené hodnoty: R_m a E .

Tab. 18 - Hodnoty ΔF , $\Delta(\Delta L)$, R_m a E

	ΔF	$\Delta(\Delta L)$	R_m [MPa]	E [MPa]
Vzorek č. 1	4,5	3,5	187,5	3696
Vzorek č. 2	3,2	2,5	177,5	3680

Vzorový výpočet pro vzorek 1

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta F}{S_0}}{\frac{\Delta(\Delta L)}{L_0}} = \frac{\frac{\Delta F}{h \cdot b_1}}{\frac{\Delta(\Delta L)}{L_0}} = \frac{\frac{4500}{40}}{\frac{2,5}{115}} = 3696 \text{ [MPa]}$$

9.5.4 Výsledky tahové zkoušky

Zjištěné mechanické vlastnosti u vzorku č. 1 a vzorku č. 2 jsem zprůměroval a porovnal s hodnotami, které uvádí materiálové listy od firmy Grilon.

Tab. 19 - Výsledné mechanické vlastnosti vzorků

Max. zatížení F [kN]	Prodloužení ΔL [mm]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Youngův modul pružnosti v tahu E [MPa]
Hodnoty zjištěné tahovou zkouškou			
7,3	6,76	182,5	3688
Hodnoty z materiálových listů pro vysušený materiál			
-	3	190	9700
Hodnoty z materiálových listů pro kondicionovaný materiál (s obsahem vlhkosti)			
-	8	125	6000

Tahová zkouška byla provedena cca po 14 dnech od vyrobení zkušebních tělísek. Za tu dobu se do materiálu dostalo určité množství vlhkosti. Hodnoty prodloužení a pevnosti v tahu zhruba odpovídají materiálovým listům. Hodnota Youngova modulu pružnosti v tahu vyšla o hodně nižší, než by měla být. Důvodem může být ne úplně ideální nastavení stroje při vstřikování a příliš malým počtem měřených vzorků. Pro relevantní výsledky by bylo potřeba vyrobit více vylisků a u nich provést tahovou zkoušku. Výsledky jsou pouze orientační.

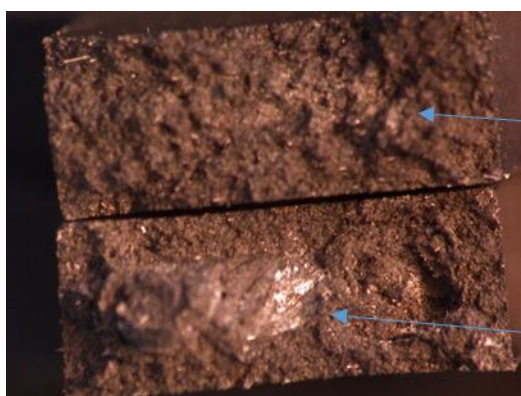
9.6 Pozorování pod mikroskopem

Především kvůli zjištění důvodu závadného vzorku č. 3 jsem pozoroval lomové plochy všech vzorků pod mikroskopem Nikon 600ME.

První dva vzorky (č.1 a č. 2) měly téměř totožnou homogenní strukturu. U vzorku č. 3 se dalo zpozorovat nežádoucí nahromadění skelných vláken na jednom místě, což byl také důvod předčasného přetržení při tahové zkoušce. Tento jev si vysvětlují tak, že byla použita příliš vysoká obvodová rychlost šneku tohoto tělíska a tavenina se v plastikační komoře nestihla zhomogenizovat. Jednalo se o první pokus vstřikování polyamidní směsi Grilon, u kterého byla obvodová rychlost šneku nastavena na 400 mm/s, zatímco u vzorků č.1 a č. 2 jsme ji snížili na 150 mm/s.

Pro další závěry by bylo nutné vyrobit více tělísek, což nám bohužel porucha chladiče nedovolila.

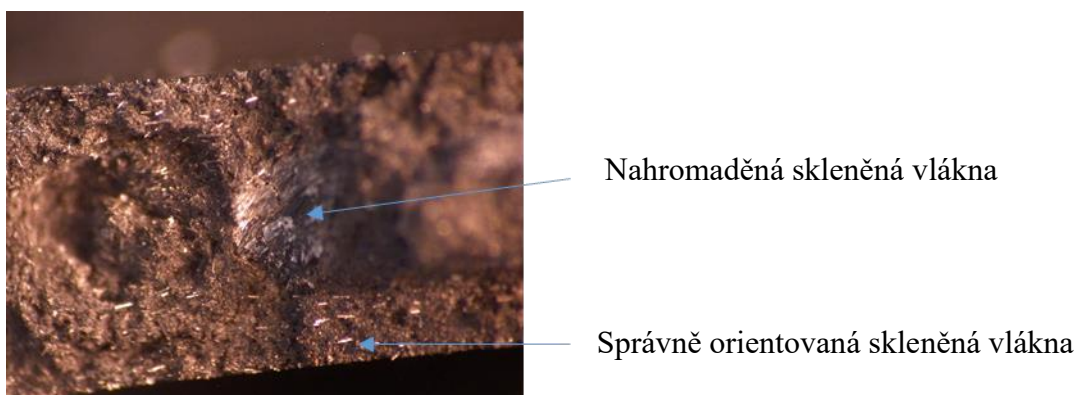
Výsledky pozorování pod mikroskopem lze vidět na obr. 27 a obr. 28.



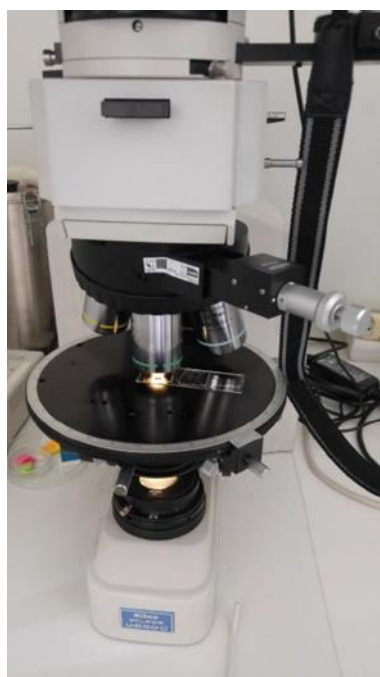
Vzorek č. 1 podobná struktura jako u vzorku č. 2

Vzorek č. 3 s nahromaděním skleněných vláken

Obr. 27 - Porovnání struktury vzorku č. 1 a č. 3, zvětšení 5x



Obr. 28 - Detail vzorku č. 3, zvětšení 10x



Obr. 29 - Mikroskop Nikon 600 ME [29]

10 ZÁVĚR

Vstřikování do formy je v dnešní době nerozšířenější způsob zpracování plastů. Tento proces ovlivňuje několik parametrů, které můžeme měnit přímo na řídicí jednotce stroje. Jednotlivé parametry mají vliv na výsledné vlastnosti výrobku – výstřiku. Nejdůležitějšími z nich jsou: teplota formy, teplota jednotlivých zón v plastikační komoře, vstřikovací tlak a vstřikovací rychlost, zpětný odpor šneku, obvodová rychlost šneku, velikost a doba dotlaku a doba chlazení.

Polyamidní materiály a jejich kompozity se díky svým výborným mechanickým vlastnostem, teplotní, chemické a korozní odolnosti, lehkosti a cenové dostupnosti používají jako konstrukční plasty nejen ve strojírenském průmyslu.

V rámci praktické části této práce jsem se podílel na vstřikování polyamidní směsi PA 6 + Pa 66 s 30% příměsí skleněných vláken na laboratorním lisu v prostorách školy.

Při nastavení parametrů stroje jsem vycházel z informací získaných z teoretické části této práce a z doporučených hodnot nastavení od výrobce granulátu. Při vstřikování polyamidů je nejprve potřeba materiál vysušit, protože je velice navlhavý. K tomu byla použita sušička, která musela být namontována přímo na vstřikolis na místo násypky. Celý průběh vstřikování včetně ovládání stroje jsem popsal a uvedl problémy, které během něj nastaly.

Podařilo se vyrobit pouze 3 vzorky z důvodu poruchy chladiče, špatné montáže sušičky a ucpávání trysky a dalších komplikací.

Na všech vzorcích jsem provedl tahovou zkoušku a vzorek, který byl vyroben jako první, jsem z důvodu strukturní chyby musel označit jako vadný. Ze zbylých dvou výlisků jsem vyčetl z tahových diagramů maximální zatěžovací sílu F , poměrné prodloužení L a dopočítal hodnotu meze pevnosti v tahu a Youngův modul pružnosti v tahu. Výsledné hodnoty jsem porovnal s hodnotami z materiálových listů. Pro relevantní výsledky by bylo potřeba udělat měření na mnohem více vzorcích a výsledky jsou proto pouze orientační.

Při zkoumání struktury lomové plochy vadného vzorku pod mikroskopem jsem vyzoroval nežádoucí nahromadění skelných vláken, které bylo způsobeno příliš vysokou obvodovou rychlostí šneku.

Na základě literární rešerše a praktické části své bakalářské práce doporučuji pro vstřikování polyamidní směsi PA 6 + PA 66 + 30 GF následující nastavení (pro vstřikovací stroj ALLROUNDER 270C):

Tab. 20 - Shrnutí doporučených parametrů vstřikování

Teplota formy [°C]	80
Teplota zón plastikační komory [°C]	280 – 285 – 300
Teplota trysky [°C]	300
Úroveň dotlaku [bar]	300-800
Teplota sušení granulátu [°C]	80
Obvodová rychlost šneku [mm/s]	150
Vstřikovací rychlost	Střední až vysoká

Zpětný odpor šneku by se měl nastavovat v záporných hodnotách. Dále by se nemělo při ručním ovládní stroje zapomínat na dekompresi, aby nedocházelo k vytékání taveniny tryskou. Doba vstřikování by měla být stejně dlouhá, jako doba dávkování.

Celý proces vstřikování polyamidů je komplikovaný a nestačí vycházet z materiálových listů, protože nastavení se musí přizpůsobit konkrétním vstřikolisu, na kterém se vstřikování provádí a vyžaduje zkušenosti.

SEZNAM ZDROJŮ

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [2] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů*. Praha: BEN, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [3] LENFELD, Petr. *Technologie II-část 2: Zpracování plastů* [online]. 2005. Liberec [cit.2018-03-25].
Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm#
- [4] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 17. verze. Liberec: Publi, 2014 [cit. 2018-04-15] ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/eknihy/?book=180-polymery>
- [5] *baird, donald a dimitris collias. Polymer processing: principles and design*. 2. Vydání. Hoboken, new jersey: wiley, 2014. Isbn 978-0-470-93058-8.
- [6] *BAIRD, Donald a Dimitris COLLIAS. Polymer processing: principles and design*. 2. vydání. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014. ISBN 978-0-470-93058-8.
- [7] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály* [online]. Technická univerzita v liberci, 2008 [cit.2018-05-02]. Dostupné z:
http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf
- [8] *PA (PA 6, PA 6.6, PA 11, PA 12) - POLYAMID* [online]. 2015 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z:
<http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pa.html>
- [9] VEJRAŽKOVÁ, Ivana. *Plasty pro stavebnictví a architekturu 11 – Polyamidy* [online]. https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-11-polyamidy_41299.html, 2008 [cit. 2018-06-07].
- [10] *HEYMAN. Všeobecné vlastnosti materiálu polyamid (PA)* [online]. 2013 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z:
http://www.heyman.de/media/useruploads/files/de/documentation/eigenschaften_kunststoffen.pdf
- [11] *POLYPLASTY, Polyamid 6* [online]. 2015 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z:
<https://www.polyplasty.cz/clanky-polyamid-6.html>

- [12] MARGOLIS, James M. *Engineering plastics handbook*. New York: McGraw-Hill, c2006. ISBN 00-714-5767-4.
- [13] AUTODESK INVENTOR. *Vstřikování plastů, materiály PA 6* [online]. 2015 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <http://help.autodesk.com/view/INVENTOR/2015/CSY/?guid=GUID-1323A155-E3A9-4A78-B6D0-56D5D05791B2>
- [14] J.R.D CORPORATION, AKULON. *Injection moulding of polyamides* [online]. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <http://www.jrdcorporation.com/images/nylon.pdf>
- [15] TICONA CELSTRAN. *Celstran long fiber reinforced thermoplastics-Injection Molding Guide*. [online]. USA, 2014 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://www.hipolymers.com.ar/pdfs/celstran/procesamiento/Celstran%20Injection%20Molding.PDF>
- [16] TEIXEIRA, D., M. GIOVANELA, L.B. GONELLA a J.S. CRESPO. *Influence of injection molding on the flexural strength and surface quality of long glass fiber-reinforced polyamide 6.6 composites* [online]. [cit. 2018-05-07]. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.097. ISBN 10.1016/j.matdes.2015.07.097. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127515301696>
- [17] TECHNIL. Materiál PA 6, PA 66 a PA 66/6 Technyl [online]. 2015 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/produkty/technyl.html>
- [18] ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ FS ČVUT. *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [19] SOVA, Miloš a Josef KREBS. *Termoplasty v praxi*. 1. vyd. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. 2 sv. (580, 425 s.). ISBN 80-86229-15-7.
- [20] FIREMNÍ LITERATURA (MANUÁL): *NÁVOD K OBSLUZE PRO STROJ Č. 229484*. ARBURG SPOL. S.R.O., POSTFACH, 2011.
- [21] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. Verze 19. Liberec: Publi, 2015 [cit. 2018-04-10]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/eknihy/?book=181-stroje-pro-zpracovani-polymernich-materialu>

- [22] LENFELD, Petr. Technologie vstřikování [online]. Liberec: Publi 2015 [cit. 2018-04-10]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupný z: <https://publi.cz/books/184/03.html>
- [23] MEHAT, Nik Mizamzul, Shahrul KAMARUDDIN a Abdul Rahim OTHMAN. Investigating the Effects of Injection Moulding Process Parameters on Multiple Tensile Characteristics of Plastic Spur Gear via Experimental Approach. *Advanced Materials Research* [online]. 2013, 748, 544-548 [cit. 2018-05-07]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.748.544. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMR.748.544>
- [24] GASPARIN, Alexandre Luís, Leandro Luís CORSO, Eduardo Kirinus TENTARDINI, Regina Célia Reis NUNES, Maria Madalena de Camargo FORTE a Ricardo Vinicius Bof de OLIVEIRA. Polyamide worm gear: manufacturing and performance. *Materials Research* [online]. 2012, 15(3), 483-489 [cit. 2018-05-07]. DOI: 10.1590/S1516-14392012005000056. ISSN 1980-5373. Dostupné z http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392012000300022
- [25] PAULO DAVIM, J., Leonardo R. SILVA, António FESTAS a A.M. ABRÃO. *Machinability study on precision turning of PA66 polyamide with and without glass fiber reinforcing* [online]. 2009, 30(2), 228-234 [cit. 2018-05-07]. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.05.003. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306908001805>
Dostupné z <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306908001805>
- [26] ISO 527-1: *Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles*. 2005.
- [27] ISO 16396-2:2017(E) *Plastics - Polyamide (PA) moulding and extrusion materials - Part 2: Preparation of test specimens and determination of properties*. 2017
- [28] Firemní literatura Technical Data Scheet GRILON TSG 30/4. EMS Grivory, 2018
- [29] LUKÁŠ, Jiří. Parametry procesu vstřikování plastů. Praha, 2017. Bakalárska práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [30] *Statické zkoušky: Zkouška tahem* [online]. In: Plzeň, s. 13 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>

SEZNAM TABULEK

	str.:
Tab. 1 - Srovnání vlastností PA 6 a PA 66 [4]	20
Tab. 2 - Tepelné a mechanické vlastnosti PA 66 a PA 66 + GF 30 [25]	21
Tab. 3 - Doporučené parametry vstřikování [2]	36
Tab. 4 - Doporučení nastavení teplot pro PA 6 + GF (30-60 %), teploty jsou ve °C [15].	37
Tab. 5 - Doporučení nastavení teplot pro PA 66 + GF (30-60 %) [15]	37
Tab. 6 - Doporučené parametry stroje pro vstřikování PA 6 s i bez výztuže SV od firmy Celstran [15]	38
Tab. 7 - Doporučené parametry zpracování PA 6 a PA 66 od firmy Resinex [17]	38
Tab. 8 - Souhrn doporučených hodnot parametrů vstřikování PA 6 a PA 66 + GF	39
Tab. 9 – Nastavení stroje [16]	40
Tab. 10 - Hodnoty regulovaných parametrů [23]	41
Tab. 11 - Doporučené nastavení parametrů pro výrobu šnekových kol [24]	42
Tab. 12 - Doporučené hodnoty zpracování tělísek dle normy ISO 16396-2:2017 (E) [27]	46
Tab. 13 - Sušení materiálu Grilon-TSG-30/4	46
Tab. 14 - Doporučené hodnoty nastavení stroje pro vstřikování materiálu GRILON TSG-30/4 [28]	47
Tab. 15 - Nastavené hodnoty teplot jednotlivých zón včetně trysky	52
Tab. 16 - Hodnoty vyčtené z tahových diagramů	55
Tab. 17 - Původní rozměry vzorků	57
Tab. 18 - Hodnoty ΔF , $\Delta(\Delta L)$, R_m a E	57
Tab. 19 - Výsledné mechanické vlastnosti vzorků	57
Tab. 20 - Shrnutí doporučených parametrů vstřikování	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

	str.:
Obr. 3 - Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [1]	9
Obr. 2 - Schéma struktury sítě vytvrzeného reaktoplastu [3]	10
Obr. 4 - Struktura elastomeru [2]	11
Obr. 4 - Rozdělení polymerů podle makromolekulární struktury [3]	12
Obr. 5 - Struktura: a) amorfní b) semikrystalická [4]	13
Obr. 6 - Příklady aplikací polyamidů [4]	19
Obr. 7 - Části vstřikovacího stroje Arburg ALLROUNDER 270 C [20]	23
Obr. 8 - Schéma vstřikovací jednotky [21]	24
Obr. 9 - Zóny šneku [3]	25
Obr. 10 - Vstřikovací forma, autor fotografie Antonín Voldřich	26
Obr. 11 - Fáze vstřikovacího procesu [3]	28
Obr. 12 - Doporučené nastavení teplot pro PA 6 a PA 66 od světového dodavatele polyamidů, AKULON® [14]	37
Obr. 13 - Vliv parametrů na pevnost v ohybu u výlisků [16]	40
Obr. 14 - Vliv parametrů vstřikolisu na drsnost výlisků [16]	41
Obr. 15 - Vliv technologických parametrů vstřikování na některé mechanické vlastnosti u ozubeného kola vyrobeného z PA 6 [23]	42
Obr. 16 - Zkušební tělíska z PA 6 + PA 66 + 30 GF, autor fotografie: Antonín Voldřich	45
Obr. 17 - Vstřikovací stroj ALLROUNDER 270C, autor fotografie: Antonín Voldřich	47
Obr. 18 - Hlavní vypínač [20]	48
Obr. 19 - Řídicí panel vstřikovacího stroje, autor fotografie: Antonín Voldřich	48
Obr. 20 - Ovládací tlačítka vstřikolisu, autor fotografie: Antonín Voldřich	49
Obr. 21 - Sušička Piovan, autor fotografie: Antonín Voldřich	50
Obr. 22 - Trhací stroj [29]	53
Obr. 23 - Natrhané výlisky, autor fotografie Antonín Voldřich	53
Obr. 24 - Tahový diagram, červeně - vzorek č. 1, modře - vzorek č. 2, zeleně - vzorek č.3	54

Obr. 25 - Srovnání křivek tahového diagramu pro PA 6 + PA 66 + 30 GF (zeleně, černě a modře) a PP 44 (červeně)	55
Obr. 26 - Princip odečtení hodnot ΔF a $\Delta(\Delta L)$ pro výpočet E z tahového diagramu [30]	56
Obr. 27 - Porovnání struktury vzorku č. 1 a č. 3, zvětšení 5x	58
Obr. 28 - Detail vzorku č. 3, zvětšení 10x	59
Obr. 29 - Mikroskop Nikon 600 ME [29]	59