

Vliv velikosti částic recyklátu na vlastnosti výrobku z PA

Bc. Libor Tomanec

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Libor Tomanec**
Osobní číslo: **T12681**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv velikosti částic recyklátu na vlastnosti výrobku z PA**

Zásady pro vypracování:

- 1) Zpracování literární studie dané problematiky
- 2) Příprava recyklátu
- 3) Příprava zkušebních tělísek
- 4) Provedení zkoušek
- 5) Vyhodnocení výsledků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

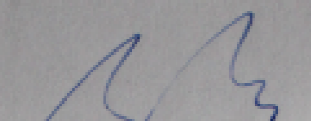
Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vojtěch Šenkeřík**
Ústav výrobního inženýrství

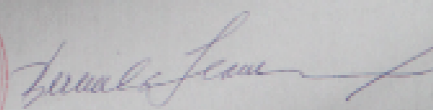
Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: TOMANEČ LIBOR

Obor: Vyrobní inženýrství

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 10.5.2014



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá zkoumáním vlastností velikostí částic recyklátu na výsledné mechanické vlastnosti výrobku. Recyklát, který obsahuje různé velikosti částic byl proséván tak, aby se částice rozdělily do určitých velikostí a následně byly zhotoveny vzorky, které se podrobily mechanickým zkouškám. Zkoumaným materiálem byl Polyamid 6. Vzorky byly zhotoveny metodou vstřikování. Vzorky byly podrobeny tahové zkoušce, zkoušce vrubové houževnatosti a tvrdosti Shore D. Analýza byla zhotovena pomocí základních statistických veličin a sloupcových grafů.

Klíčová slova: Polyamid 6, vstřikování plastů, recyklace plastů, zkoušky mechanických vlastností.

ABSTRACT

This thesis investigates the properties of the recycled material particle size on the mechanical properties of the resulting product. Recycled materials which contain different particle size was sieved so that the particles are divided into certain size and then the samples were made, which were subjected to mechanical testing. The research material was polyamide 6 samples were prepared by injection molding. The samples were subjected to tensile test, test, impact toughness and hardness of Shore D. The analysis was made using basic statistical concepts and bar graphs.

Keywords: Polyamide 6, injection holding plastic recycling, mechanical properties testing.

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi za odborné vedení a cenné rady při vypracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu.

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

Ve Zlíně 10. 5. 2014



.....

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERY	12
1.1 ROZDĚLENÍ PLASTŮ.....	12
1.1.1 Podle aplikace.....	12
1.1.2 Na základě teplotního chování.....	13
1.1.3 Podle nadmolekulární struktury (podle stupně uspořádanosti).....	13
1.1.4 Podle druhu přísad.....	14
1.1.5 Makromolekulární struktura plastů.....	14
1.1.6 Morfologie plastů.....	15
1.1.7 Termodynamické vlastnosti plastů.....	16
1.2 POLYAMIDY (PA).....	17
1.2.1 Navlhavost polymerů-podmínky sušení.....	18
1.2.2 Použití.....	18
2 VSTŘIKOVÁNÍ	19
2.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS.....	19
2.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	20
2.2.1 Vstřikovací jednotka.....	20
2.2.2 Uzavírací jednotka.....	21
2.3 VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	21
2.3.1 Vtokový systém formy.....	22
2.3.1.1 Studené vtokové systémy.....	22
2.3.1.2 Vyhřívané vtokové systémy.....	25
3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	27
3.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	27
3.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	28
3.2.1 Zkušební tělesa.....	28
3.2.2 Pracovní diagram tahové zkoušky.....	29
3.3 ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	32
3.3.1 Tvrdost dle Brinella.....	32
3.3.1.1 Zkušební tělesa.....	34
3.3.2 Tvrdost dle Vickerse.....	34
3.3.3 Tvrdost dle Rockwella.....	35
3.3.3.1 Zkušební tělesa.....	36
3.3.4 Tvrdost Shore.....	36
3.4 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY JEDNORÁZOVÉ.....	37
3.4.1 Zkouška rázem v ohybu.....	37
4 RECYKLACE PLASTŮ	40
4.1 MATERIÁLOVÁ RECYKLACE.....	42
4.1.1 Mlecí zařízení.....	43
4.2 CHEMICKÁ RECYKLACE.....	44
4.2.1 Tepelná depolymerace.....	44
4.2.2 Solvolýza.....	45

4.3	SUROVINOVÁ RECYKLACE.....	45
4.4	ENERGETICKÁ RECYKLACE	45
II PRAKTICKÁ ČÁST		46
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	47
6	ZKOUŠENÝ MATERIÁL PA6	48
7	VSTŘIKOVÁNÍ	50
7.1	SUŠENÍ MATERIÁLU	50
7.2	VSTŘIKOVÁNÍ.....	51
7.3	VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK	53
8	RECYKLACE VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ	55
8.1	MLETÍ POLYAMIDU	55
8.2	PROSÉVÁNÍ.....	57
9	VSTŘIKOVÁNÍ RECYKLÁTU	61
10	MECHANICKÉ ZKOUŠKY PA6	62
10.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA	62
10.1.1	Modul pružnosti v tahu	63
10.1.2	Mez pevnosti v tahu	65
10.1.3	Poměrné prodloužení v tahu.....	67
10.2	ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....	70
10.2.1	Vyhodnocení síly potřebné k přeražení.....	71
10.2.2	Vyhodnocení vrubové houževnatosti	73
10.3	ZKOUŠKA TVRDOSTI SHORE D	75
10.3.1	Vyhodnocení tvrdosti Shore D.....	75
DISKUZE VÝSLEDKŮ		77
ZÁVĚR		79
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		80
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		82
SEZNAM OBRÁZKŮ		84
SEZNAM TABULEK.....		87
SEZNAM PŘÍLOH.....		88
PŘÍLOHA P I: MODUL PRUŽNOSTI V TAHU		89
PŘÍLOHA P II: MEZ PEVNOSTI V TAHU.....		90
PŘÍLOHA P III : POMĚRNÉ PRODLOUŽENÍ V TAHU.....		91
PŘÍLOHA P IV: SÍLA POTŘEBNÁ NA PŘERAŽENÍ VZORKŮ		92
PŘÍLOHA P V: VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST		93

ÚVOD

Polymery za více než stoletou dobu existence zažily obrovský celosvětový rozvoj. Velká expanze a rozmanitost druhů je způsobena velkou variabilitou jejich vlastností. Lze jmenovat tvrdost, tepelnou odolnost, pružnost, pevnost, chemickou odolnost, hustotu, elektroizolační vlastnosti, teplotní vodivost, nasákavost, zpracovatelnost, zdravotní nezávadnost aj. Variabilita vlastností umožnila vývoj mnoha nových výrobků, které nacházejí uplatnění jak v běžném životě, kdy jejich přítomnost již člověk bere jako samozřejmost, tak i v mnoha konstrukčních a speciálních případech, kdy je jejich aplikace vnímána širokou veřejností jako velký posun kupředu. [1]

Kromě vývoje nových polymerních výrobků je velmi často uplatňována i náhrada dříve používaného materiálu za polymerní. Namátkou lze jmenovat automobilový průmysl, kde konstrukce automobilu za posledních 20 let zažila neobvyklou proměnu nahrazením mnohých kovových součástí polymerními, či celkové využití polymerních materiálů v různých sportovních odvětvích. [5]

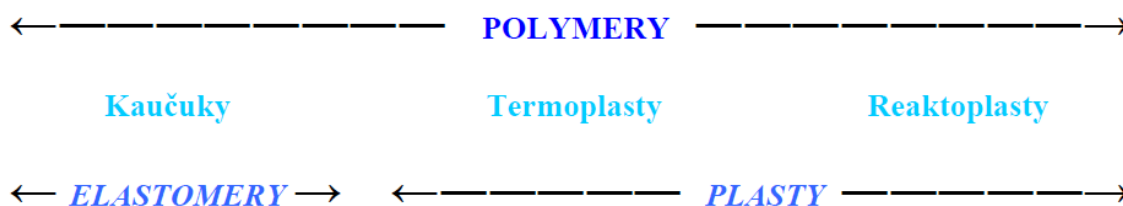
V důsledku velmi krátkého životního cyklu plastových obalů a skutečností, že polymerní materiály se obvykle rozkládají velmi dlouho, jsou právě plasty subjektivně pocíťovány jako jeden z nejzávažnějších zdrojů znečištění životního prostředí. Je zřejmé, že, že zpracování odpadů z plastů a jejich recyklace musí být zahrnuty do celkové ekonomicko-ekologické strategie. Navrhované metody snížení ekologické zátěže zahrnují jako preventivní opatření redukci množství vznikajícího odpadu a vývoj a použití snadno degradovatelných polymerů. Recyklace plastů přímou přeměnou odpadu na použitelné výrobky a využití jeho chemického nebo alespoň energetického obsahu, se dnes jeví jako nezbytné technologické řešení. Mezi recyklovanými materiály z komunálního odpadu činí plasty pouze 3%. [5]

K plastům obsaženým v komunálním odpadu přistupují i polymerní materiály z použitých průmyslových výrobků, zejména automobilů a ostatních dopravních prostředků, transportních obalů, výrobků z dalších odvětví i odpad vznikající při jejich výrobě a zpracování. Jedním z důvodů, který vede zpracovatele plastů a výrobců strojů pro přípravné zpracování k recyklaci, je právě poměrně vysoká cena plastů. Moderní státy usilují o to, aby k recyklaci vedla firmy také legislativa a proto se snaží poskytovat výhody pro zpracovatele recyklátu. Dnes je již na trhu mnoho strojů a zařízení, které jsou určeny právě pro zpracování odpadu na regenerát. [5]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

Polymery jsou chemické látky neobvyklé šíře vlastností, obsahující ve svých molekulách většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často dusíku, chloru a jiných prvků. Polymery jsou ve formě výrobku v tuhém stavu, ale v určitém stádiu zpracování ve stavu kapalném, dovolujícím za zvýšené teploty a tlaku udělit budoucímu výrobku nejrůznější tvar, podle předpokládaného použití. Dělíme je na elastomery a plasty, jak názorně zobrazuje (obr. 1).



Obr. 1. rozdělení polymerů [2]

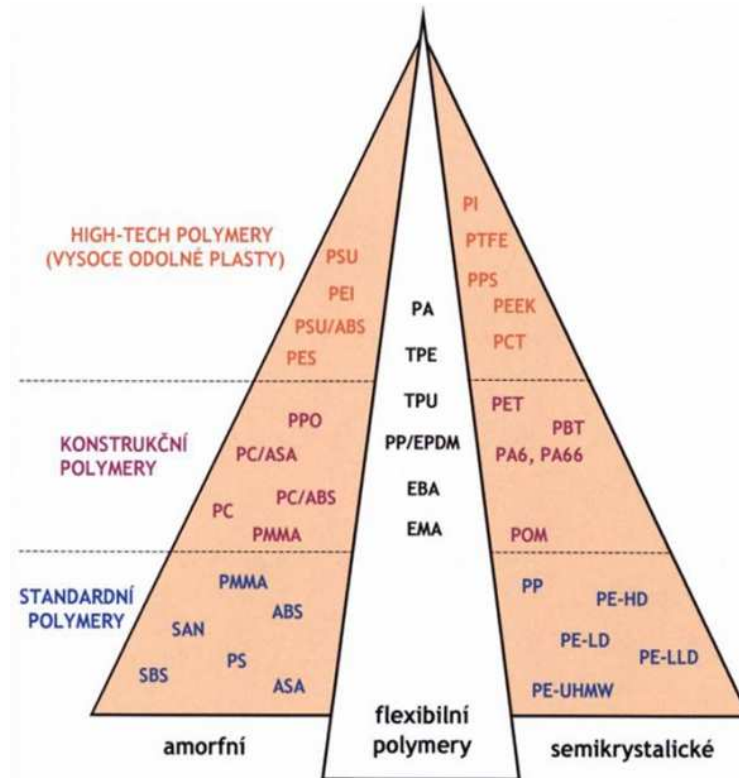
Plasty jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými (odtud název plasty) a tvarovatelnými. Pokud je změna z plastického do tuhého stavu vratná (opakovatelná), nazýváme je *termoplasty*. Pokud jde o změnu nevratnou (neopakovatelnou, trvalou), mluvíme o *reaktoplastech*. [3]

Využití plastů pro nejrůznější průmyslové aplikace se v poslední době stále více rozšiřuje. Díky svým vlastnostem nachází plastové výrobky uplatnění ve spotřebním průmyslu, ve strojírenství, automobilovém, elektrotechnickém i elektronickém průmyslu, ale i v takovém průmyslovém odvětví jako je například optika. Požadavky na stále vyšší jakost výrobků s ohledem na náročnější aplikace vyžadují zdokonalování zpracovatelských technologií. [4]

1.1 Rozdělení plastů

1.1.1 Podle aplikace

- Plasty pro široké použití (PE, PP, PS apod.)
- Plasty pro inženýrské aplikace (PBT, PC, ABS apod.)
- Plasty pro špičkové aplikace (PPS, PI, apod.)



Obr. 2. Rozdělení plastů podle aplikace [3]

1.1.2 Na základě teplotního chování

- Termoplasty
- Reaktoplasty
- Elastomery

1.1.3 Podle nadmolekulární struktury (podle stupně uspořádanosti)

- **Amorfni plasty**, makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici. Patří sem např. PS, PMMA, PC, apod. Jsou charakteristické tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností, modulem pružnosti a jsou většinou transparentní. Použitelnost amorfních polymerů je do teploty zesklennění T_g . [5]
- **Krystalické (semikrystalické) plasty**, vykazují určitý stupeň uspořádanosti. Ten se označuje jako stupeň krystalinity (pohybuje se od 40 do 90 %) a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí, uložených mezi oblastmi amorfními. Nemůže nikdy dosáhnout 100 %, proto se krystalické plasty označují jako semikrystalické. [6]

1.1.4 Podle druhu přísad

- *Neplněné plasty*, neplněný plast je takový plast, u kterého množství přísad neovlivňuje vlastnosti polymerní matrice.
- *Plněné plasty*, plnivo ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti plastu. Makromolekulární látka plní funkci pojiva a určuje základní fyzikální a mechanické vlastnosti hmoty. Přísadou mohou být plniva, stabilizátory, maziva, barviva, změkčovadla, iniciátory, nadouvadla, tvrdidla, retardéry hoření, apod. [7]

Plniva zlepšují buď mechanické vlastnosti materiálu, nebo chemickou odolnost či tvarovou stálost při zvýšené teplotě, jiné prostě jen hmotu zlevňují. Rozeznáváme vyztužující (skleněná, uhlíková, kovová či méně účinná bavlněná krátká nebo dlouhá vlákna, popř. textilní ústřížky do obsahu maximálně 50 %, neboť pro správnou funkci vyztužujícího plniva je důležité, aby bylo dokonale obaleno pojivem) a nevyztužující plniva ve formě prášku, které se přidávají se většinou z důvodu snížení ceny materiálu (moučka z břidlice, kaolinu, křída a dalších levných materiálů). [8]

1.1.5 Makromolekulární struktura plastů

Plasty jsou obecně makromolekulární látky a z chemického hlediska jsou to látky organické. Podstatou polymerů je makromolekulární látka přírodního nebo syntetického původu. V makromolekule se jako článek řetězu mnohokrát opakuje základní monomerní jednotka. Základním prvkem řetězce je atom uhlíku. Uhlíkové atomy mají schopnost vzájemně se vázat a vytvářet dlouhé řetězce.

V zásadě existují tři druhy polymerních makromolekul: lineární, rozvětvené (typické pro termoplasty) a zesíťované (kaučuky, reaktoplasty). [9]



Obr. 3. Polymerní makromolekuly [4]

1.1.6 Morfologie plastů

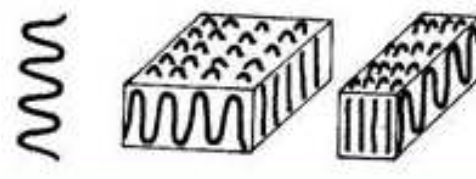
Nadmolekulární struktura (stupeň uspořádanosti makromolekul) může být popsána jednak jako amorfnní a jednak jako krystalická. Lineární makromolekuly vytváří, narozdíl od rozvětvených makromolekul, uspořádanější nadmolekulární strukturu a zesíťované makromolekuly strukturu neuspořádanou. Termoplasty tak mohou mít amorfnní nebo semikrystalickou nadmolekulární strukturu, zatímco reaktoplasty pouze strukturu amorfnní. [10]

- amorfnní strukturou rozumíme strukturu bez jakékoliv uspořádanosti (struktura chaotická). Základním morfologickým útvarem této struktury jsou globuly (neboli klubíčka) o velikosti 10, 30 nm, které jsou vytvořeny z chaoticky stočených makromolekul. [11]



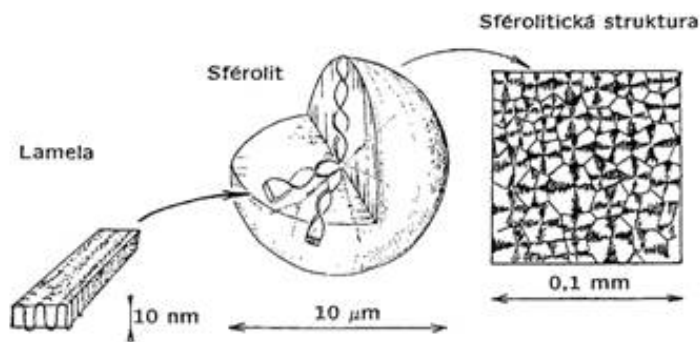
Obr. 4. Nadmolekulární struktura amorfnních plastů [12]

- krystalická struktura se vyznačuje určitým stupněm uspořádanosti. Základním morfologickým útvarem jsou tzv. lamely, fibrily. [13]



Obr. 5. Nadmolekulární struktura krystalických plastů [14]

U reálných výrobků se při tuhnutí z tavenin polymerů vytvářejí útvary, nazývané sférolity. Jedná se o shluky lamel, které vychází ze společného centra a rozrůstají se na všechny strany, často jsou vrtulovitě stočené. Krystalizující polymery nemají v reálných podmínkách technologického zpracování možnost dokonalé krystalizace, tzn. že krystalizace se nezúčastní veškerá polymerní hmota, ale krystalizuje jen určité procento polymeru. Část takového polymeru je krystalická, zbylá část zůstává v amorfnním stavu. [15]



Obr. 6. Sférolitická struktura semikrystalických termoplastů [16]

1.1.7 Termodynamické vlastnosti plastů

Obdobně jako u jiných materiálů jsou vlastnosti polymerů závislé především na teplotě. V určité oblasti teplot probíhají tyto změny rychleji anebo se mění skokově. Takové oblasti jsou nazývány přechodové a v těchto oblastech existují přechodové teploty: T_g - teplota zesklenní nebo teplota skelného přechodu, T_f - teplota viskózního toku (pro amorfní plasty), T_m - teplota tání (pro semikrystalické plasty). [5]

U amorfních plastů se hodnota meze pevnosti v tahu (a také modulu pružnosti) v přechodové oblasti v okolí teploty zesklenní T_g mění skokově, modul pružnosti asi o tři řády, koeficient teplotní roztažnosti o 100 %. Teplotu zesklenní je možno ovlivnit např. přidávkem změkčovadel, které sníží mezimolekulární soudržnost a tím i T_g . Při teplotě viskózního toku T_f narůstá intenzita změn vlastností polymeru. Při této teplotě ztrácí hmota své kaučukovité vlastnosti a mění se ve vysoce viskózní kapalinu. Nad touto teplotou leží oblast zpracovatelnosti materiálu. [5]

U semikrystalických plastů dochází k nejrychlejším změnám vlastností v oblasti teplot, kterou charakterizuje teplota tání T_m . Při teplotě tání dochází k rozpadu a tání krystalitů, což je provázeno změnou fáze hmoty, která přechází ze stavu tuhého do stavu kapalného. Je zřejmé, že tání se děje v určitém teplotním intervalu a teplota T_m představuje pouze střední hodnotu této oblasti, podobně jako teplota T_g . [5]

1.2 Polyamidy (PA)

Polyamidy jsou lineární polymery charakterizované hlavním polymerním řetězcem, v němž se pravidelně střídají skupiny –CO-NH- s větším počtem skupin methylenových, tedy –CH₂-. Vyrábějí se převážně na základě technické realizace tří polyreakcí: [5]

- *Polykondenzace w-aminových kyselin* nebo
- *polymerace jejich cyklických aminů*
- *Polykondenzace diaminů s dikarboxylovými kyselinami*

Máme různé druhy polyamidů, např: PA-6, PA-66, PA-610, PA-11, PA-12 a další. [5]

- **PA-6**, charakteristickými vlastnosti jsou vysoká hodnota polymeračního stupně (300 až 500), stupeň krystalinity kolem 45%, obsah nízkomolekulárních látek extrahovatelných vodou pod 5%, malá hořlavost, vysoká odolnost vůči oděru a značná houževnatost. Lze je modifikovat anorganickými plnivými včetně ztužujících skleněných vláken (v koncentraci 6% až 60%). [5]
- **PA-66**, nejrozšířenější typ polyamidu vyráběný polykondenzací. Vyrábí se o polymeračním stupni 100 až 200, ve srovnání s polyamidem 6 má výhodu ve vyšší teplotě tání, větší pevnosti a menší navlhavosti, především však v tom, že neobsahuje žádný monomer, takže odpadá jeho odstraňování a ale jej použít například k balení potravin
- **PA-610**, Vyrábí se obdobně jako PA-66 a srovnání jeho vlastností s PA-66 a PA-6 je patrné v tabulce. [5]

Tab. 1. srovnání vlastností vybraných polyamidů [5]

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

1.2.1 Navlhavost polymerů-podmínky sušení

Jaké množství vlhkosti z atmosférického vzduchu absorbuje navlhavý polymer, závisí na teplotě polymeru a na relativní vlhkosti vzduchu. Navlhavý polymer vystavený atmosférickému vzduchu bude absorbovat vodní páry až do okamžiku, kdy nastane rovnováha s okolním vzduchem. Tento proces může trvat několik minut, ale také i několik dní. [6]

Na obrázku (obr.7) lze vidět podmínky sušení pro atmosférický typ sušárny. Relativní vlhkost vzduchu 65%. [6]

Skupina	Plast	Navlhavost ve vzduchu	Podmínky sušení teplota/doba
	PE – LD	0	Nesuší se. Při nevhodném skladování: 50-70°C / 0,5-1 h
	PE – HD	0	
	PE – LLD	0	
	PP	0	zcela výjimečně 80°C / 0,5-1 h
	PS	0	zcela výjimečně 60-80°C / 1-3 h
	PVC	< 0,3	60-70°C / 2 h
	PMMA	0,8 – 1,2	70-80°C / 12-24 h
	PA 6	3,0 – 3,5	80-90°C / 6-12 h
	PA 66	2,5 – 3,0	70-80°C / 24-30 h
	PA 11	0,8 – 1,2	70-80°C / 3-5 h
	PA 12	0,8	100-110°C / 2-6 h
	POM	0,25	80-110°C / 1-3 h
	PET	0,3	120-140°C / 5-7 h
	PBT	0,25	90-120°C / 2-5 h
	PC	0,15 – 0,20	110-120°C / 4-12 h

Obr. 7. Podmínky sušení vybraných polymerů [6]

1.2.2 Použití

Vyrábějí se z něj především části strojů, přístrojů a zařízení, např. pouzdra kluzných ložisek, ozubená kola, řemenice, transportní válce, nosné kladky, kalousové desky apod. [5]

2 VSTŘIKOVÁNÍ

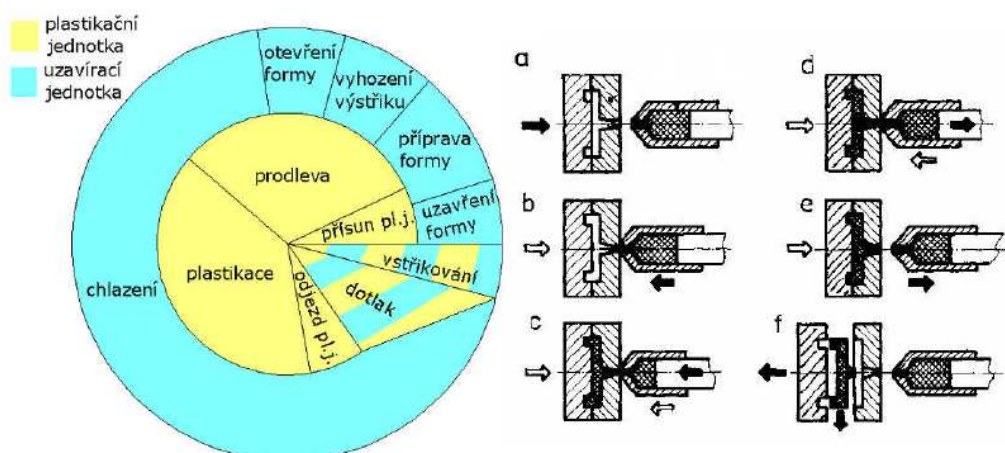
Vstřikování patří mezi nejvýznamnější technologie v plastikářském průmyslu. Vstřikovací proces se vyznačuje složitými fyzikálními procesy, na kterém se podílí polymer, forma a vstřikovací stroj a touto metodou se v dnešní době vyrábí plastové výrobky téměř pro všechna odvětví lidské činnosti. Během vstřikovacího procesu je polymer ve vstřikovacím stroji nejdříve dopravován, taven a následně vstříknut do formy, odkud je zatuhnutý výrobek vyhozen. Tento nejdůležitější proces zpracování termoplastů je též využíván pro některé reaktoplasty a elastomery. Jedná se o cyklický proces.

Hlavní výhody vstřikování:

- přímá cesta ze suroviny v konečný výrobek,
- žádné nebo malé dokončovací operace,
- proces je možno plně automatizovat,
- vysoká reprodukovatelnost,
- při velkovýrobě jsou nízké náklady na jeden kus výrobku. [7]

2.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus lze rozdělit do několika fází, které jsou graficky znázorněny na (obr.8). Plastikační a uzavírací jednotky pak harmonicky vykonávají své jednotlivé kroky tak, aby nedocházelo v žádné části cyklu ke zbytečným prodlevám.



Obr. 8. Vstřikovací cyklus [8]

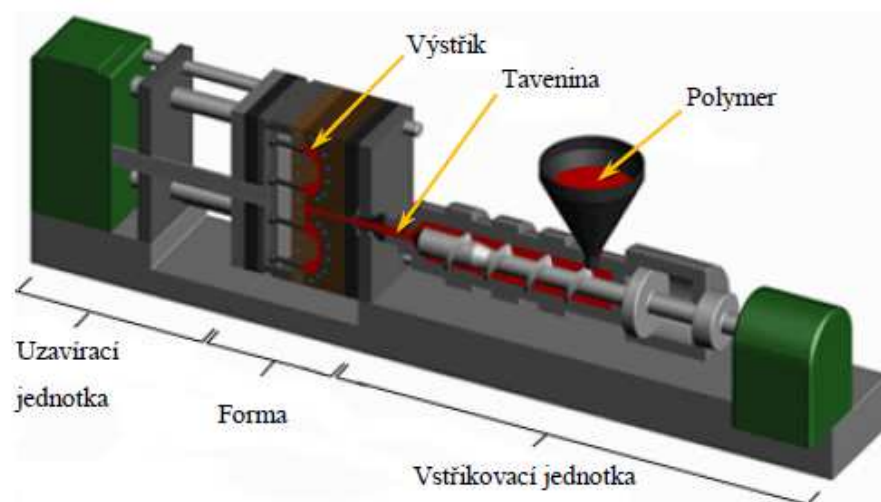
Nejprve je materiál převeden v taveninu v plastikací jednotce, přitom šnek koná rotační a přímočarý pohyb, tavenina se shlukuje před čelem šneku (a). Plastikací jednotka se přisune k uzavírací jednotce (b) a pohybem hydraulického pístu působícího na šnek je tavenina

vstříknuta do dutiny formy. Po naplnění dutiny dále působí dotlak (c), kterým eliminujeme smršťení výstřiku. Dotlak je většinou menší než vstřikovací tlak a působí do zatuhnutí vtokového ústí. (d). Během dotlaku začíná chlazení výstřiku, po skončení dotlaku plastikací jednotka odjíždí (e) a plastikuje se v ní nový materiál. Po ochlazení výstřiku na vyhazovací teplotu je forma otevřena, výstřik vyhozen (f), provedena eventuální příprava nebo kontrola formy, forma se v dalším kroku uzavře a může dojít k novému cyklu vstřikování.

2.2 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj se skládá z několika dílů, které spolu tvoří základní části (obr.9):

- vstřikovací jednotka,
- Uzavírací jednotka,
- Regulace a řízení.



Obr. 9. Vstřikovací stroj [9]

2.2.1 Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka (obr.9) je zodpovědná za plastikaci a vstřik polymerní taveniny do dutiny formy. Polymer je přiváděn násypkou do pracovního válce kde působením topných pásů a disipace dochází k jeho plastikaci. Poté je tavenina dopravena otáčením šneku před něj axiálním pohybem šneku vstříknuta před trysku do dutiny formy.

2.2.2 Uzavírací jednotka

Otevření a bezpečné uzavření formy zajišťuje uzavírací ústrojí. Potřebná uzavírací síla je závislá na velikosti stroje, resp. na velikosti plochy průřezu výstřiku v dělicí rovině a na velikosti vstřikovacího tlaku.

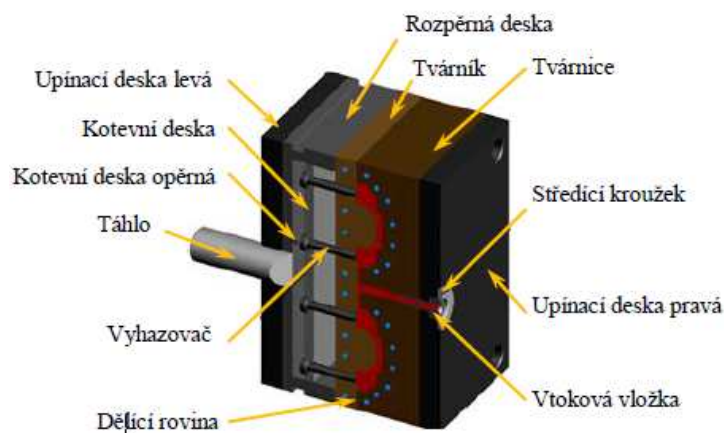
Hlavní části uzavírací jednotky jsou:

- základní deska pevná,
- vodící sloupky,
- uzavírací mechanismus,
- pohon. [10]

2.3 Vstřikovací forma

Vstřikovací forma je nástroj, jehož použitím na vstřikovacím stroji vznikne výrobek z plastického materiálu. Dnes používané vstřikovací formy jsou technicky poměrně značně komplikovaná zařízení, na která se kladou nemalé nároky z hlediska kvality, produktivity spolehlivosti a automatizace výroby.

- **Části vstřikovací formy**, Počet všech jednotlivých částí a desek tvořící formu (obr. 10) je velice individuální ať už podle zvoleného vtokového systému (horký, studený) nebo podle způsobu vyhazování (stírací deska, vyhazovače apod.). Forma se studeným vtokovým ústím a vyhazovači se obvykle skládá ze šesti desek, ke kterým se mohou a nemusí přidat izolační desky pro omezení přestupu tepla mezi vstřikovacím strojem a formou. [11]



Obr. 10. Vstřikovací forma [9]

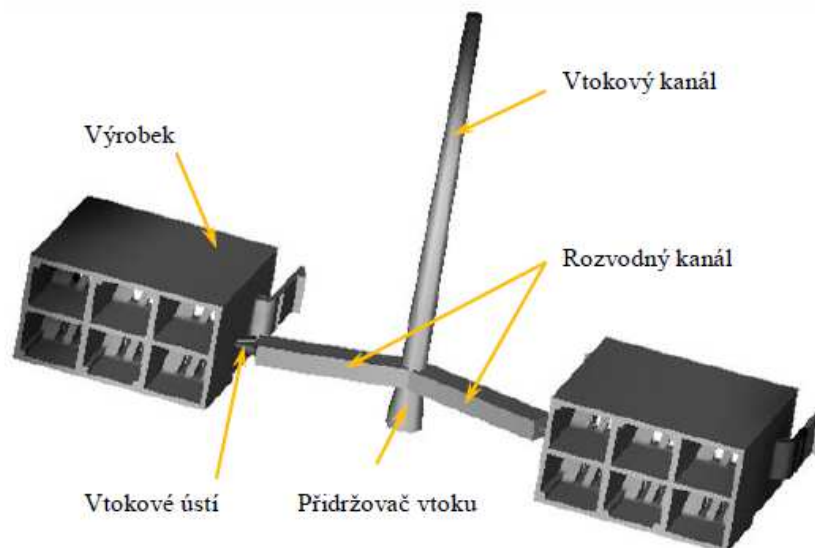
2.3.1 Vtokový systém formy

Plast roztavený v plastikační jednotce proudí tryskou do vtokové soustavy vstřikovací formy, kterou tvoří systém vtokových kanálů různého tvaru. Tyto kanály vedou k jedné nebo více dutinám formy, které mají být naplněny taveninou. Rozdíly v uspořádání vtokové soustavy jsou dány v první řadě konstrukcí formy (její násobností).

2.3.1.1 Studené vtokové systémy

U studeného vtokového systému SVS vstupuje tavenina nejdříve do vtokového kanálu. Následně je rozváděna rozvodnými kanály k dutinám, přičemž musí zabezpečit stejný objem materiálu pro každou dutinu. Mezi rozvodným kanálem a dutinou je ještě vtokové ústí, které směřuje proud taveniny a dochází v tomto místě k odtržení výrobku od vtokového systému. V případě potřeby se používá přidržovač vtoku, který přidržuje vtokový systém při odsunu vstřikovací jednotky na straně tvárníku a zjednodušuje tak jeho vyhození.

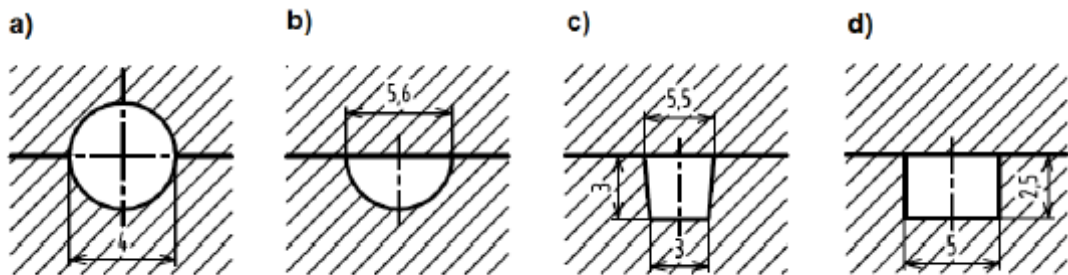
Vtokový kanál má nejčastěji kuželový tvar vytvořený uvnitř vtokové vložky. Samotná vtoková vložka je velmi mechanicky a tepelně namáhána a proto se vyrábí z pevné, houževnaté a žárovevné oceli, kterou tepelně zpracováváme [12]



Obr. 11. Studený vtokový systém

Existují různé druhy průřezů rozvodných kanálů. Kruhový je nejpoužívanější a také nejvhodnější. Výhodou kruhového kanálu je snadná výroba a jeho vhodnost se hodnotí podle tzv. smáčivého čísla a_s , které vyjadřuje poměr průtočného průřezu k smáčenému povrchu.

Čím je číslo vyšší, tím je průřez vhodnější. Srovnání základních typů kanálů při stejném průřezu (obr. 12). [12]



Obr. 12. Srovnání základních typů kanálů podle smáčivého čísla

$$as = a) 1; b) 0,86; c) 0,84; d) 0,83 [13]$$

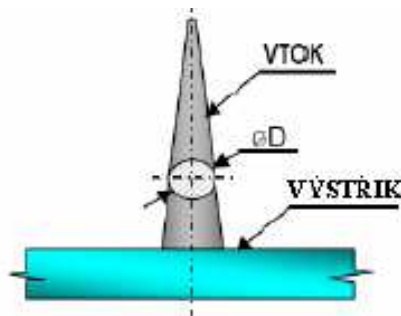
Vtokové ústí

Vtokové ústí se vytváří zúžením rozváděcího kanálu. Jeho zúžením se zvýší klesající teplota taveniny před vstupem do tvarové dutiny. Omezí se strhávání chladných vrstev z obvodu vtoku a tím i vytváření povrchových defektů.

Vtokové ústí se volí co nejmenšího průřezu v závislosti na charakteru výstřiku, plastu i technologii vstřikování. Velikost zúžení průřezu však musí spolehlivě naplnit dutinu formy a také ještě umožnit případné působení dotlaku.

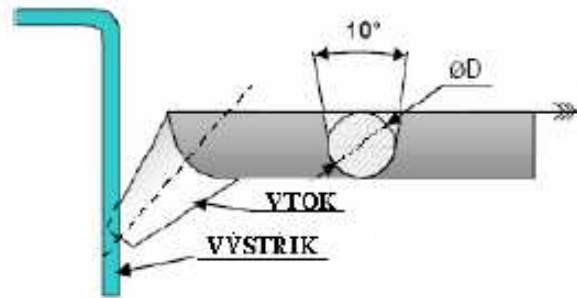
Základní typy vtokového ústí:

- Plný kuželový vtok (obr. 13) - výhodou tohoto vtoku je malá tlaková ztráta, malá anizotropie smrštění a malé vnitřní pnutí ve výstřiku. Nevýhodou je delší výrobní cyklus a složité odstranění vtoku od výstřiku. [12]



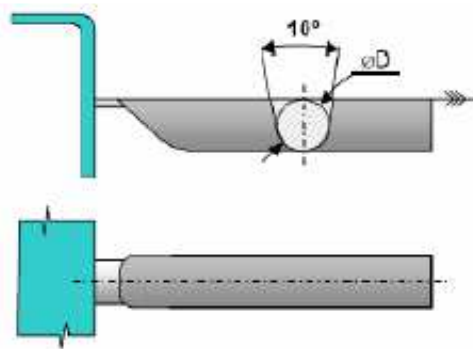
Obr. 13. plný kuž. Vtok [12]

- Tunelový vtok (obr. 14) - výhodou tohoto vtoku je, že zbylá stopa, která zůstane na výstříku, je poměrně nepatrná a nevyžaduje dodatečné zarovnání. Dává krátké výrobní časy a omezuje vznik nepříjemných tokových čar na povrchu výstříku. Nevýhodou jsou velké tlakové ztráty.



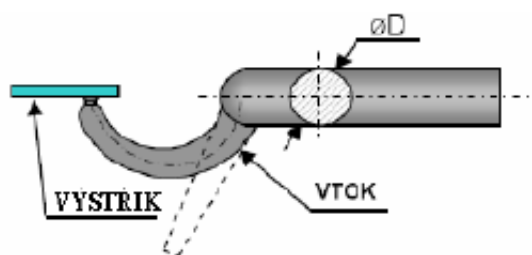
Obr. 14. tunelový vtok [12]

- Filmový vtok (Obr. 15) - výhodou je rovnoměrné plnění formy a malé dodatečné smrštění výstříku. Nevýhodou je větší spotřeba materiálu a nezbytnost dodatečného odříznutí vtoku od výstříku.



Obr. 15. filmový vtok [12]

- Banánový vtok (Obr. 16) - má podobné vlastnosti jako vtok tunelový. Používá se, jestli je potřeba se dostat s vtokem pod stěnu výstříku. [12]



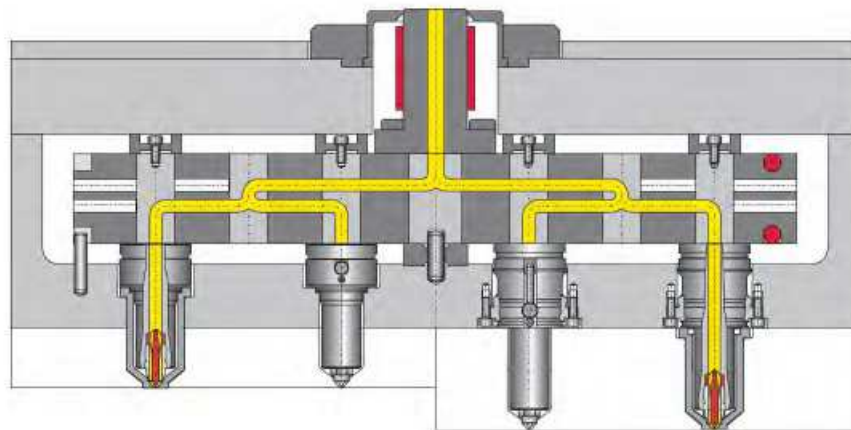
Obr. 16. banánový vtok [12]

2.3.1.2 Vyhřívané vtokové systémy

Technologie vstřikování s použitím VVS spočívá v tom, že tavenina po naplnění formy zůstává v celé oblasti vtoku až do ústí formy v plastickém stavu. To umožňuje použít jen bodové vyústění malého průřezu, které je vhodné pro širokou oblast vyráběných výstřiků. I přes malý průřez vtoku je možné částečně pracovat s otlakem. VVS se zavádějí do výroby, protože:

- umožňují automatizaci výroby,
- zkracuje výrobní proces,
- snižuje spotřebu plastu – vstřikuje se bez vtokových zbytků,
- odpadá manipulace a regenerace zbytků vtoků a problémy při jejich zpracování.

Soustava vyhřívané vtokové soustavy však vyžaduje podstatně složitější a výrobně nákladnější formy, obslužný personál i strojní zařízení. Je zapotřebí zajistit VVS včetně regulátorů a snímačů teploty což zvyšuje energetickou náročnost výroby. [14]



Obr. 17. Vyhřívaný vtokový systém [14]

Vyhřívané vtokové systémy zaujímají v technologii vstřikování platů, jako zpracovatelské metody, stále větší uplatnění. Nesporným důvodem užívání těchto systémů je jejich neustálý vývoj a množství výhod, které poskytují. V tabulce (tab.2) jsou uvedeny hlavní výhody a nevýhody vyhřívaných vtokových systémů (VVS) z hlediska technologie a ekonomiky výroby. [15]

Tab. 2. Ekonomické a technické aspekty pro rozhodování o použití VVS [15]

	Výhody oproti vtokovým systémům s vtokovým zbytkem	Nevýhody
Ekonomické hlediska	Úspora ceny za materiál (menší spotřeba mat.), kratší chladicí cyklus (nechladí se vtokový systém), kratší působení uzavírací síly.	Jedná se o komplikovanější zařízení obecně jsou i vyšší náklady, více práce spojené s malými sériemi výroby při prvním cyklu, díky citlivosti na poruchy větší náklady na provoz VVS (příčiny poruchovosti: temperace, abraze a jiné).
Technologické hlediska	Výrobní proces lze automatizovat (není potřeba odstraňovat vtokový systém), lze umístit vtok do technologicky přijatelnější polohy, minimalizace tlakových ztrát, balancování lze provádět během výroby. Balancovaný vtokový systém je lepší, kratší čas pro otevření ve srovnání s třídeskovými systémy, lze působit delší dobu dotlakem.	Možné ovlivnění materiálu (zvláště citlivých) díky setrvávání z VVS, zvláště pak u výrobků, kde jsou požadavky na chlazení, problémy z hlediska řízení teploty.

3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Zkoušky mechanických vlastností jsou velmi důležité pro volbu konstrukčních materiálů v technické praxi. Ty nejn nutnější údaje pro návrh tvarů, rozměrů získáváme právě těmito zkouškami. Zkoušky mechanických vlastností můžeme rozdělit podle působení síly na zkoušené těleso, tímto způsobem:

- Statické zkoušky, při kterých je zatížení zvětšováno pozvolným způsobem. Trvání zkoušky je většinou v minutách, avšak u dlouhodobých zkoušek se tento čas může protáhnout na týdny až roky. Patří zde asi nejznámější zkouška tahem.
- Dynamické zkoušky rázové a cyklické, při kterých je zatížení vyvoláno nárazově. U cyklických zkoušek se toto zatížení opakuje. Těchto cyklů mohou být až milióny.
- Zkoušky za normálních (teplota okolí) a za zvýšených teplot.

Důležitým prvkem těchto mechanických zkoušek je, že se jedná o tzv. zkoušky destruktivní. Z toho plyne, že tyto zkoušky neprovádíme ve většině případů na součásti samotné, ale na zkušební ch vzorcích. Tyto vzorky jsou vyrobeny ze stejného materiálu a stejným tepelným zpracováním jako součást. [16]

3.1 Mechanické vlastnosti

Volba materiálu pro danou aplikaci v praxi je založena na znalosti mechanických, technologických, fyzikálních i chemických vlastností materiálu. A to i v případě, že se jedná o kovové nebo polymerní materiály. Poté můžeme zvolit materiál, jenž bude nejlépe vyhovovat našim požadavkům v určité situaci. Avšak pro tuto volbu musíme znát požadované vlastnosti v numerických hodnotách. Vyjádřit vlastnosti v numerických hodnotách mají za úkol právě zkoušky mechanických vlastností. Charakteristika materiálu je vlastně numerická hodnota, jež kvantifikuje určitou vlastnost a je stanovena experimentálně. Mechanické vlastnosti určíme v praxi čtyři. Je to houževnatost, plasticita, pevnost a pružnost. Ovšem mechanických charakteristik se vyskytuje mnoho. Můžeme vzít například pružnost, která je pro konstruktérské potřeby popsána modulem pružnosti v tahu E , modulem ve smyku G a dalšími. Již experimentální povahy mechanických charakteristik vyplývá, že jejich počet musí být vyšší, než je počet mechanických vlastností. [16]

V praxi jsou materiály při výrobě a jejich aplikaci podrobeny nejrůznějšímu namáhání. Mezi tyto typy namáhání patří tlak, tah, krut, střih a ohyb. Součásti bývají většinou zatíženy kombinací těchto namáhání. Jen zřídka se stane, že by došlo například „k čistému smyku“ nebo tahu. Do jaké

míry je materiál odolný vůči těmto namáháním, nám určují mechanické vlastnosti. Tyto vlastnosti byly zmíněny výše, nyní je specifikujeme podrobněji.

Pevnost patří mezi nejznámější mechanické vlastnosti. Definovat ji můžeme jako schopnost materiálu odolávat vnějším silám, které se jej snaží rozdělit na více částí.

Tvrдость je možné definovat jako odpor materiál, proti vnikání cizího tělesa. Na tomto principu také pracuje drtivá většina přístrojů měřících tvrdost

Plasticita (tvárnost) je vlastnost velmi typická pro kovy a jejich slitiny. Tvárný materiál je schopen odolávat vnějším silám bez porušení jeho celistvosti.

Elasticita (pružnost) schopnost materiálu vrátit se do původního tvaru po tom co na něj přestane působit vnější deformační síla. [16]

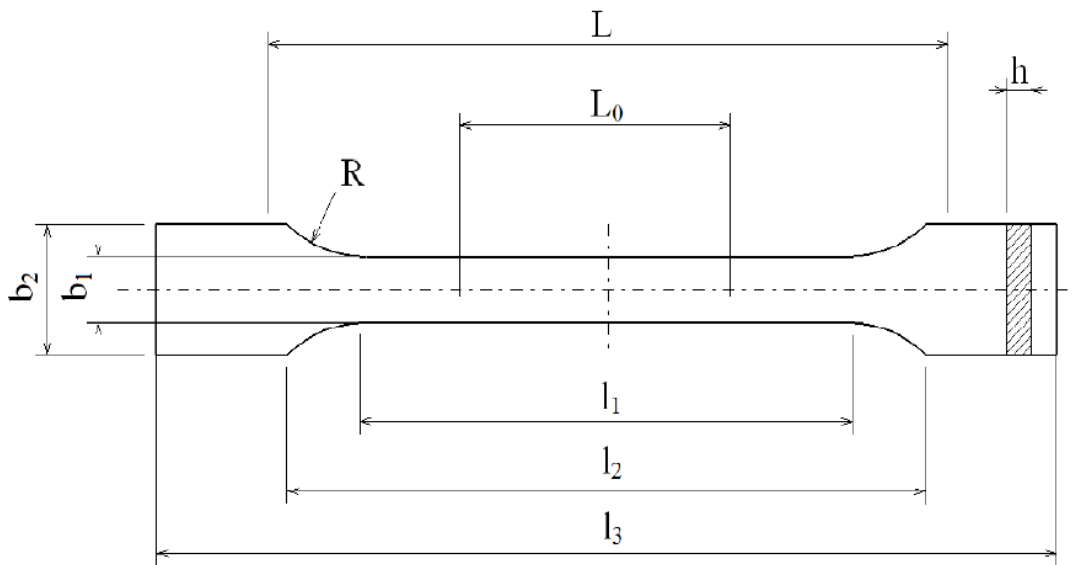
3.2 Tahová zkouška

Tahová zkouška je jednou ze základních a nejvíce používaných zkoušek v technické praxi, jak u kovových, tak i polymerních materiálů. Princip zkoušky spočívá ve statickém jednoosém zatěžování zkušebního tělesa, které je pevně upnuto ve zkoušeném zařízení.

Za předpokladu, že zkoušený materiál je izotropní, tak by napětí v tahu bylo rozloženo po celém průřezu tělesa rovnoměrně. Tento ideální stav však v praxi neexistuje, a to v důsledku anizotropie. Vlastnosti plastů se v různých místech liší a při takovém namáhání je napětí v tahu rozloženo po průřezu nerovnoměrně. Výsledkem tahové zkoušky jsou pracovní diagramy. [17]

3.2.1 Zkušební tělesa

Tvar a velikost zkušebního tělesa určuje norma ČSN EN ISO 527. Rozlišujeme několik druhů, tvarů a velikostí zkušebních těles pro tahovou zkoušku. Zároveň rozlišujeme i způsob výroby. Zároveň rozlišujeme i způsob výroby, např. vstřikováním, tvářením, mechanickým opracováním aj. [17]



Obr. 18. Normalizované rozměry pro zkušební těleso pro tahovou zkoušku plastů

Tab. 3. Rozměry těles pro tahovou zkoušku plastů

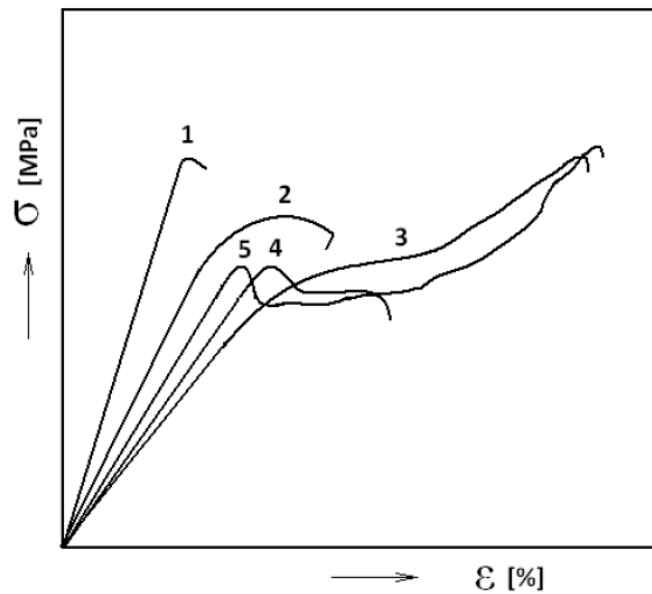
	Druh rozměru	Rozměry [mm]	
		Typ 1A	Typ 1B
b_1	Šířka pracovní části	10	10
b_2	Šířka upínací části	20	20
l_1	Délka pracovní části	80	60
l_2	Vzdálenost mezi širokými částmi	104-113	106-120
l_3	Celková vzdálenost	150	150
L_0	Počáteční měřená délka	50	50
L	Vzdálenost čelistí na počátku	115	106-120
h	Tloušťka tělesa	4	4
R	Poloměr	20-25	60

3.2.2 Pracovní diagram tahové zkoušky

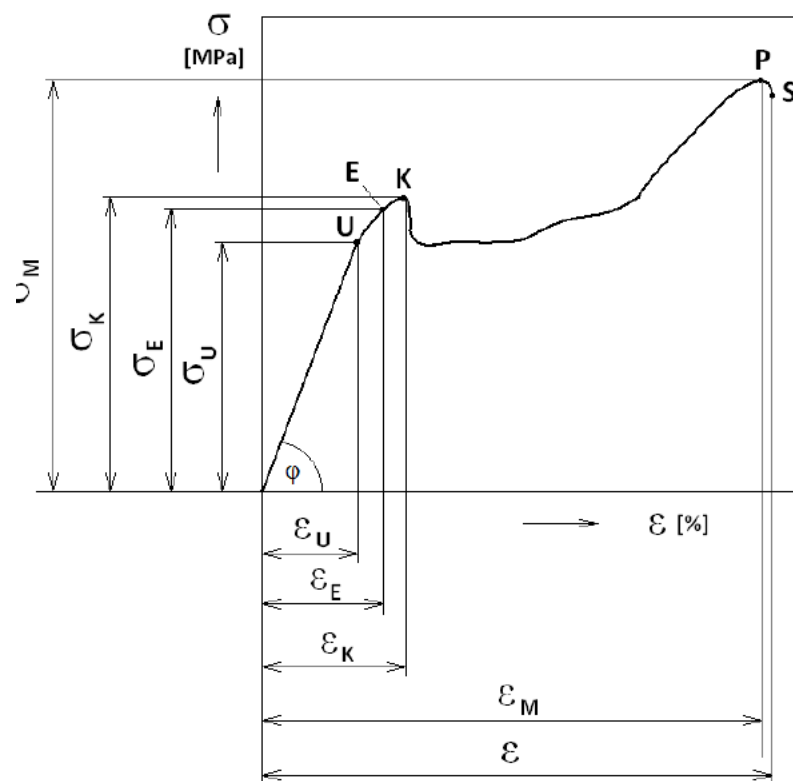
Grafické znázornění závislosti napětí na poměrném prodloužení měřené části zkušebního tělesa představuje u každého polymerního materiálu jiný pracovní diagram. [17]

Na (obr.19) lze vidět různé pracovní diagramy polymerních materiálů. Pracovní diagram č.1 zahrnuje polymery s malou průtažností (reaktoplasty, polystyren, PMMA apod.). Diagram č. 2 charakterizuje houževnatější polymerní materiály (těleso se přetrhne, jakmile napětí překročí mez úměrnosti). Diagram č. 3 se vyznačuje velkým prodloužením (měkčené PVC).

Diagram č. 4 se vyznačuje horní a dolní mezí kluzu (PE, PP aj.). Diagram č. 5 ukazuje materiály, jejichž mechanické vlastnosti se prodloužením zlepšují (PA). [17]



Obr. 19. Typy pracovních diagramů polymerních materiálů [17]



Obr. 20. Pracovní diagram tahové zkoušky [17]

Na křivce pracovního diagramu (obr.20) lze vyznačit několik důležitých bodů:

- E – mez pružnosti
- U – mez úměrnosti
- K – mez kluzu
- P – mez pevnosti neboli pevnost v tahu
- S – napětí při přetržení
- Bodům odpovídají hodnoty tažnosti

Zkušební těleso musí být nejprve upnuto do čelistí zkušební stroje. Po zahájení zkoušky je těleso vystaveno postupně zvyšujícímu se namáhání na tah. Průběh zatěžující síly a prodloužení se ukládá do paměti přístroje. Ten nám poté vykreslí závislost tohoto napětí na prodloužení zkušební tyče - smluvní pracovní diagram tahové zkoušky. Smluvní znamená, že všechny vztahy týkající se průřezu zkušební vzorku jsou vztaženy na původní neporušený průřez. [17]

Smluvní napětí v jakémkoliv bodě diagramu je možné vypočítat ze vzorce. Jedná se o podíl velikosti zatěžující síly a původního průřezu. [16]

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

Poměrné prodloužení zkušební tyče je odvislé od původní délky a od délky tyče po přetržení. [16]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_v - L_0}{L_0} \quad (2)$$

Smluvní mez pevnosti zkoušeného materiálu vychází z maximálního napětí v pracovním diagramu. Tato mez nám určuje maximální napětí, které snese materiál těsně před tím, než dojde k porušení jeho vnitřních vazeb a přetrhne se. [16]

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (3)$$

Mez kluzu je jedním s velmi významných bodů v tahovém diagramu. Při tomto napětí začne docházet k výrazným plastickým deformacím. Tyč se prodlužuje a to i při snížení působícího zatížení. [16]

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (4)$$

V dnešní době zaveden pojem smluvní meze kluzu. Je to napětí, kdy dojde trvalé deformaci s velikostí $\varepsilon_p = 0,002$ tedy 0,02%. [16]

$$R_{p0,2} = \frac{F_{max} \cdot 0,2}{S_0} \quad (5)$$

Tažnost patří mezi takzvané deformační charakteristiky. Jedná se v podstatě o poměrné prodloužení, pouze v procentuálním vyjádření. U plastů je tato hodnota vysoká a konkrétně u elastomerů může dosahovat až tisíců procent. [16]

$$A = 100 \cdot \frac{L_v - L_0}{L_0} \quad (6)$$

Kontrakce, neboli zúžení patří také do skupiny deformační charakteristik. Vztah pro kontrakci je následující. [16]

$$Z = 100 \cdot \frac{S_v - S_0}{S_0} \quad (7)$$

3.3 Zkoušky tvrdosti

Obecně se dá tvrdost popsat jako odolnost materiálu proti vniknutí jiného tvrdšího tělesa. Avšak houževnaté polymerní materiály a jejich povrchy jsou více či méně deformovatelné. Z toho důvodu se vyvinuly zkoušky v měření celého objemu proti vtlačování tvrdých těles definovaných tvarů. Při měření tvrdosti u kovů, které jsou plastické, se vyhodnocuje tvrdost dle stopy, kterou ten daný tvar zanechal. U polymerů je nutné postupovat jinak, vzhledem k jejich viskoelastickému chování. Neměří se stopa, ale rovnovážná hloubka vniknutí daného tvaru, při určité konstantní síle vtlačování. Zkoušky tvrdosti, jež jsou používány u kovů, byly upraveny tak, aby je bylo možno použít i u polymerních materiálů.

Zkoušky tvrdosti plastů jsou předepsány normami ČSN EN ISO 2039-1 a ČSN EN ISO 2039-2. [18]

3.3.1 Tvrdost dle Brinella

Tato zkouška, běžně používaná u kovových materiálů, byla upravena pro zkoušky polymerů. Byly zvětšeny průměry měřících kuliček a snížena síla při jejich vtlačování. Metoda měření tvrdosti dle Brinella spočívá ve vtlačení kuličky pod daným specifikovaným zatížením do povrchu zkušebního tělesa. Plocha vtlačení je počítána z hloubky, a hloubka vtlačení se měří pod zatížením. [18]

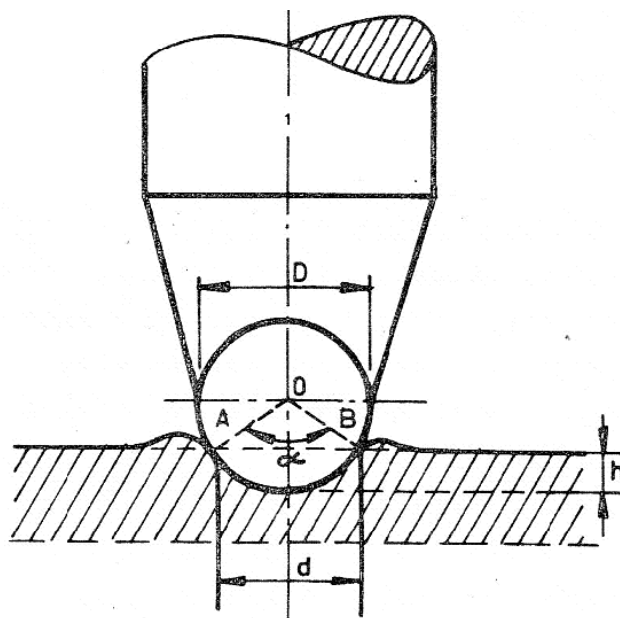
Tvrдост dle Brinella je vyhodnocována dle vztahu:

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{F_r}{\pi D h_r} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

Kde je:

- HB tvrdost vtlačením kuličky [$\text{N}\cdot\text{mm}^2$];
- F_r redukované zatížení [N];
- S plocha vytlačeného důlku [mm^2];
- D průměr kuličky [mm] (= 5 mm);
- h_r hloubka vtisku [mm] (= 0,25 mm).

Průměr kuličky a zatížení jsou při zkoušce konstantní a proměnlivou veličinou je jen hloubka vtisku h , která je odčítána dle výškového indikátoru. Indikátor zamezuje nepřesnému odečtení hloubky vtisku, či průměru vtisku, kterému by mohl bránit vytvořený návalek (Obr. 21). [18]



Obr. 21. Princip měření tvrdosti kuličkou dle Brinella [18]

Pro stejný úhel α dvou různých kuliček má být vztah mezi silou F a čtvercem velikosti D dle rovnice konstantní. Teprve pak jsou výsledky tvrdosti při použití různých průměrů kuliček srovnatelné. [18]

$$\frac{F_1}{D_1^2} = \frac{F_2}{D_2^2} = \frac{F}{D^2} = konst. \quad (9)$$

K výpočtu hodnoty tvrdosti se používá redukovaných hodnot F_r a h_r :

$$F_r = F_m \cdot \frac{\alpha}{(h - h_r) + \alpha} = F_m \cdot \frac{0,21}{(h - 0,25) + 0,21} \quad (10)$$

Kde je:

- F_m zatížení působící na měřicí kuličku [N];
- h_1 hloubka vtlačení při zkušebním zatížení měřicí kuličky [mm];
- h_2 deformace zkušebního zařízení při zkušebním zatížení [mm];
- h ($= h_1 - h_2$) hloubka vtlačení po provedení opravy na deformaci rámu [mm];
- α je konstanta (0,21)

3.3.1.1 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa musí mít hladké plochy, nejlépe tvaru hranolu, tak aby byl minimalizován vliv okrajů na výsledky zkoušky. (např. 20 mm x 20 mm). Plochy zkušebního tělesa musí být rovnoběžné. Doporučuje se tloušťka 4 mm.

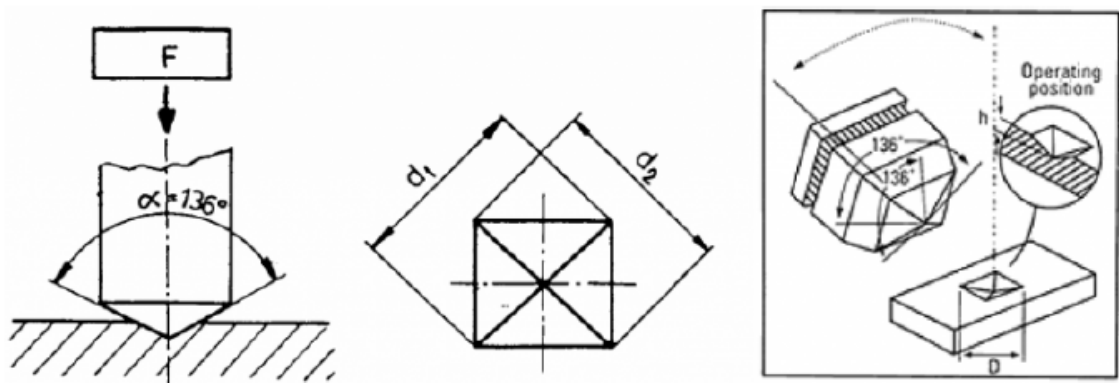
3.3.2 Tvrdost dle Vickerse

Princip měření tvrdosti dle Vickerse spočívá ve vtlačování čtyřbokého diamantového jehlanu. Vtisk je proveden určitou konstantní silou a po odlehčení se měří úhlopříčka u . Jehlan má úhel 136° . Tvrdost je dána poměrem zatěžující síly F a plochou vtisku S :

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{1,8544 \cdot F}{u^2} \quad [\text{MPa}] \quad (11)$$

$$S = \frac{u^2}{2 \cos 22} = \frac{u^2}{1,8544} \quad [\text{mm}^2] \quad (12)$$

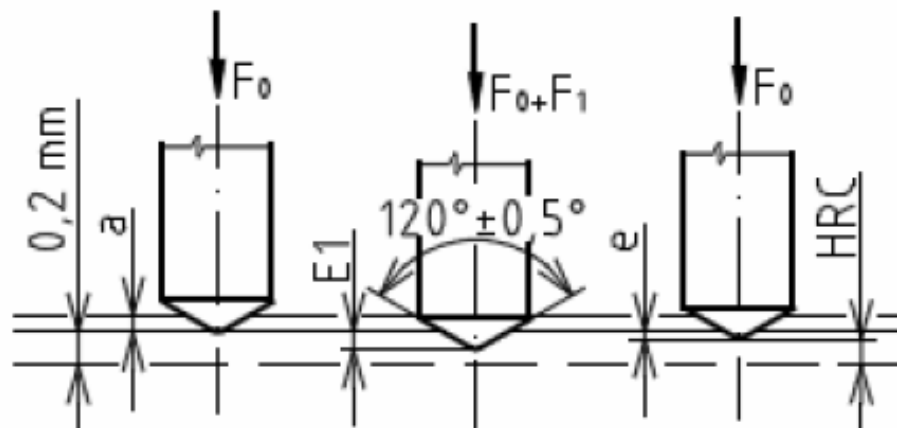
Výhodou metody je, že při použití různých zatížení se nemění hodnoty tvrdosti. [18]



Obr. 22. Měření tvrdosti dle Vickerse [19]

3.3.3 Tvrdost dle Rockwella

Metoda měření tvrdosti, při níž je na ocelovou kuličku spočívající na zkoušeném materiálu aplikováno konstantní předběžné zatížení. Poté následuje aplikace přídatného zatížení a návrat na předběžné zatížení. Všechny tyto procesy probíhají v daných časových intervalech zatěžování. Vlastní měření spočívá ve stanovení hloubky vtažení, přičemž se odpočte elastické zotavení za určitou dobu po sejmutí přídatného zatížení, poté se rovněž odpočte hloubka vtažení způsobeného předběžným zatížením. Hodnota tvrdosti dle Rockwella je přírůstek mezi hodnotami při zvýšeném zatížení a předběžném zatížení. [20]



Obr. 23 Tvrdost dle Rockwella

Každý dílek na Rockwellově stupnici představuje vzdálenost (posun měřící kuličky) o 0,002 mm. [20]

V praxi je tvrdost dle Rockwella určena:

$$HR = 130 - e \quad (13)$$

Kde je:

HR hodnota tvrdosti dle Rockwella;

e hloubka vtlačení po odstranění přídavného zatížení, v jednotkách 0,002 mm.

Norma udává různé stupnice tvrdosti dle Rockwella, dělí se na R, L, M, E. Jejich odlišnosti jsou uvedeny v tabulce (tab.4): [20]

Tab. 4. Hodnoty přídavných zatížení, předběžného zatížení a průměrů měřící kuličky [20]

Stupnice tvrdosti dle Rockwella	Předběžné zatížení [N]	Přídavné zatížení [N]	Průměr měřící kuličky[mm]
R	98,07	588,4	12,7
L	98,07	588,4	6,35
M	98,07	980,7	6,35
E	98,07	980,7	3,175

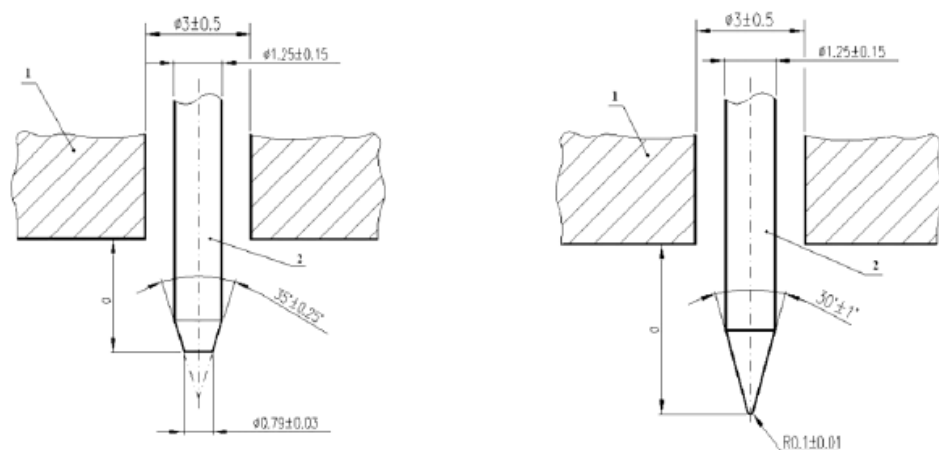
3.3.3.1 Zkušební tělesa

Obvyklé zkušební těleso musí být plochá rovná deska o tloušťce minimálně 6 mm. Tvar zkušebního tělesa není nutně stanoven. [20]

3.3.4 Tvrdost Shore

Uvedená metoda patří mezi dynamické zkoušky tvrdosti a její princip je založen na pružném odrazu tělesa o standardní hmotnosti, které dopadá z konstantní výšky na povrch. Při nárazu tělesa se malá část kinetické energie spotřebuje na nevratnou plastickou deformaci povrchu zkoušeného tělesa a zbývající energie se projeví odrazem tělesa. Z dosažené výšky po odrazu se vypočte hodnota tvrdosti, která ale u dynamických metod zkoušení tvrdosti nedosahuje přesnosti statických metod. Nastavení počáteční výšky tělesa je možné buď vysátím vzduchu z prostoru nad tělesem pomocí gumového balónku nebo u některých přístrojů pomocí pružiny. [21]

Shoreho skleroskopy se používají se ve 2 stupnicích – HSC a HSD.



Obr. 24 Schematické zobrazení zkušební hrotu typu Shore A (vlevo) a typu shore D [21]

$$F = 550 + 75H_A \quad (14)$$

$$F = 455H_D \quad (15)$$

Kde je:

F síla vtlačování [N];

HA hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu A;

HD hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu D. [21]

3.4 Dynamické zkoušky jednorázové

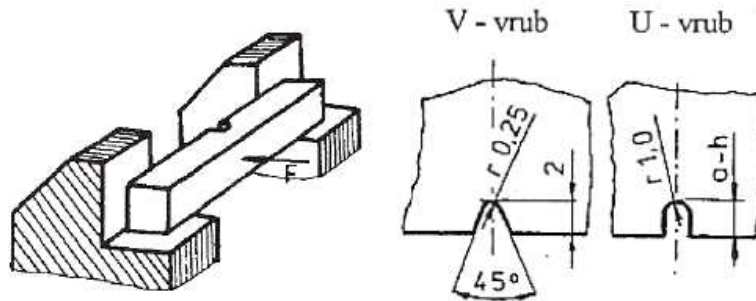
Zkoušky rázové a vrubové houževnatosti se provádějí metodou Charpy, při které je zkušební těleso umístěno na dvou podpěrách a přeráží se otáčivým kladivem uprostřed.

3.4.1 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu nebo také zkouška vrubové houževnatosti je v technické praxi velmi používanou zkouškou a je pravdivým ukazatelem o křehkosti nebo naopak houževnatosti. Běžně zkouška probíhá na Charpyho kyvadlovém kladivu dle normy ČSN EN 10045-1.[16]

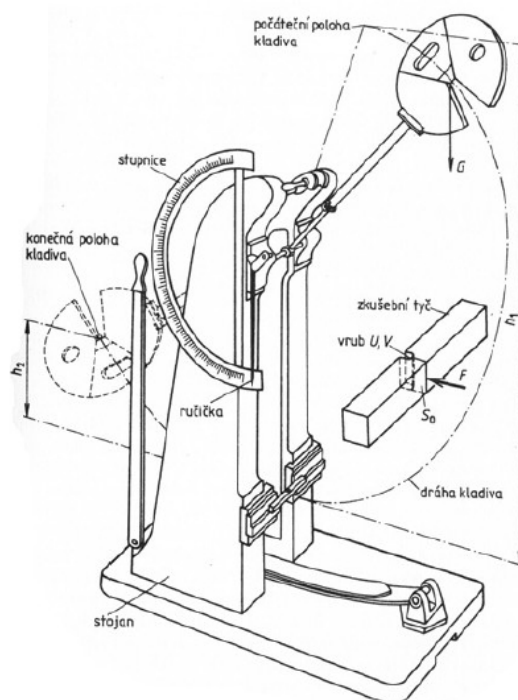
Zkouška probíhá na normalizovaných zkušebních tyčích. Výška zkušební tělesa je dle normy 5 mm nebo 10 mm. Jedná-li se o zkoušku vrubové houževnatosti je do tyče vyroben vrub. Základní tvary můžeme vidět na obrázku. Tvar V je dle normy doporučen spíše pro

hodnocení ocelí. Rozměry vrubů jsou proměnlivé. Například u tvaru U může být hloubka vrubu 2,3 mm a 5 mm



Obr. 25. Typy používaných vrubů [16]

Při přípravě na zkoušku je kladivo zkušebního stroje upevněno v počáteční poloze. Podmínkou je, že kladivo musí být otočné kolem osy. Zkušební tyč je umístěna v kruhové dráze pohybu kladiva a to v nejnižším místě. Zkouška začíná ve chvíli, kdy je těžké kladivo uvolněno. Zkušební tyč je po nárazu kladiva přelomena. Po přeražení však kladivu ještě zůstala určitá energie a proto ještě pokračuje dále. Výška, do které se kladivo dostane po přeražení tělesa, je mnohem nižší než původní výška. Princip zkouška je znázorněn na obrázku. [16]



Obr. 26. Schéma Charpyho kladiva [22]

Pro vyhodnocení zkoušky je potřeba zjistit velikost **nárazové práce**. Ze vzorce plyne, že nárazová práce funkcí výšky, do které se kladivo dostane po přeražení vzorku.

$$K = F_g \cdot (V - v) \quad (16)$$

Samotná **vrubová houževnatost** je přepočítána jako podíl spotřebované nárazové práce a velikosti průřezu v místě vrubu. [16]

$$KC(U/V) = \frac{K(U/V)}{S_0} \quad (17)$$

Dalším často uváděným výsledkem rázové zkoušky v ohybu je **procento tvárného lomu** P_L , které se vyhodnocuje z velikosti štěpně. To znamená, že se měří rozměry porušené oblasti na ploše lomu zkušebního tělesa. [16]

4 RECYKLACE PLASTŮ

Obrovský rozmach výroby a aplikace plastů v praxi v posledních letech má vedle kladného významu i význam negativní. Ten nastává zejména ve chvíli, kdy plastový výrobek přestane plnit svou funkci, skončí jeho doba života a výrobek se stává odpadem. Plastový odpad nemusí vznikat pouze při vyřazení plastového výrobku z užívání (tzv. sběrový odpad), ale také již při výrobě při zpracování plastů. Vznikají tak různé vtoky, přetoky, odřezky a zmetky (tzv. vratný odpad). Odpad lze dělit podle využitelnosti na využitelný a nevyužitelný. Nevyužitelný je určen k likvidaci, využitelný odpad však lze znovu využít, označujeme jej jako využitelné druhotné suroviny. Plastový odpad je obecně velký ekologický problém, tím, že budou využívány druhotné suroviny, přispějeme k šetření prvotních surovin (ropa) a energie až o 94 %. [23]

Recyklace, jak říkáme procesu, při kterém je dosaženo využití energie a materiálové podstaty výrobku po ukončení jeho životnosti, má však vedle ekologického významu také význam ekonomický. Je tomu tak, protože energetické nároky na výrobu prvotního polymeru jsou mnohem vyšší, než je energetická spotřeba na opětovné přepracování použitého materiálu. Přepracovat již použitý materiál je tedy mnohem levnější, než vyrobit materiál nový. Tyto výborné předpoklady pro recyklaci jsou však komplikovány tím, že každý druh plastu má jiný průběh recyklačního cyklu, při němž doba tohoto cyklu je u každého plastu také jiná. To samo o sobě není problém, avšak to, že převážná většina plastového odpadu pochází z komunálního netříděného odpadu, už problém je. Samotné recyklaci tak musí předcházet nejdříve třídění odpadu, což je také finančně náročná záležitost. Je to však zapotřebí, protože podíl plastů v komunálním odpadu i celkový objem plastového odpadu se každým rokem zvyšuje a představuje tak velkou zátěž pro životní prostředí. Zejména proto je téma recyklace více než aktuální a proto se dnes výrobci snaží o vývoj takových plastů, které lze recyklovat. [23]

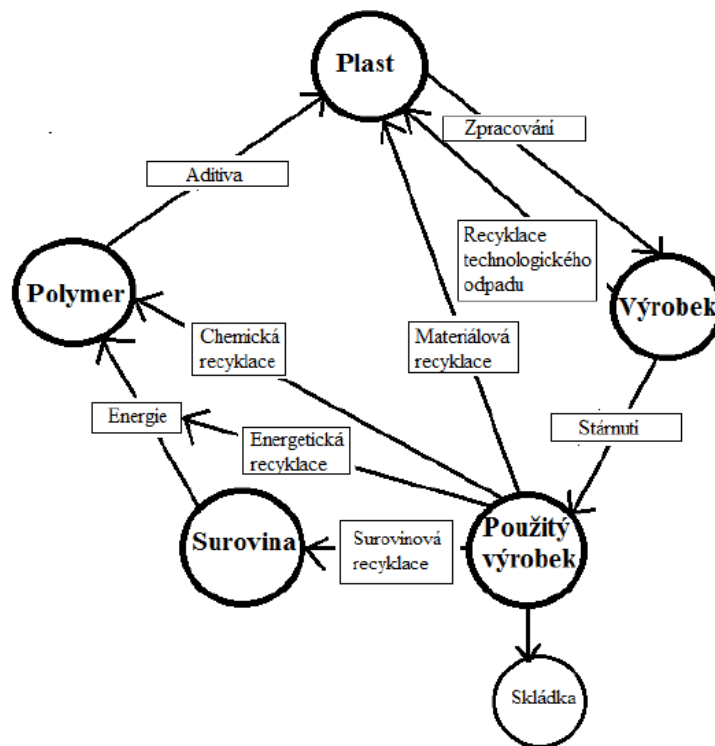
Plastový odpad lze rozdělit do 4 kategorií:

1. **Čistý tříděný odpad** – jedná se o hodnotný odpad, který vzniká přímo při výrobě plastů (např. odřezky fólií, trubek, desek, vtokové zbytky). Je o plastový odpad jediného druhu, který není znečištěný a může být opětně zahrnut do procesu, při kterém vznikl.
2. **Znečištěný tříděný odpad** – jedná se např. o zemědělské fólie, obalové fólie aj. I když je plastový odpad patřící do této skupiny jediného druhu, nemůže být zahrnut do procesů, při kterých vznikl, protože je znečištěný.

3. **Čistý netříděný odpad** – do této skupiny patří plastový odpad, který prakticky neobsahuje neplastové kontaminanty, jsou to např. vícevrstvé desky, syntetické tkaniny, vícevrstvé fólie.
4. **Znečištěný netříděný odpad** – patří sem odpad, který obsahuje i jiné materiály než plasty. Proces zpracování tohoto typu odpadu zahrnuje třídění dle druhu materiálu a velikosti částic materiálu. Jedná se např. o zbytky kabelů. [24]

V závislosti na příslušné kategorii a tedy čistotě plastového odpadu lze odpad zpracovávat čtyřmi druhy recyklací:

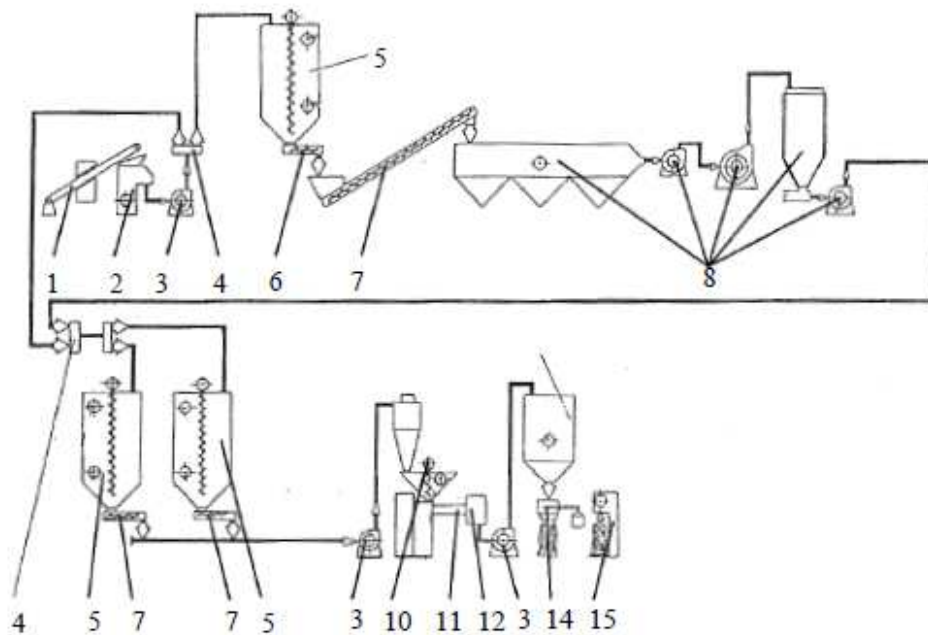
- Materiálová recyklace,
- Chemická recyklace,
- Surovinová recyklace,
- Energetická recyklace.[23]



Obr. 27. Schéma recyklačního cyklu [23]

4.1 Materiálová recyklace

Materiálová recyklace se vyplatí v tom případě, je-li k dispozici velmi čistý odpad, např. odpad z plastikářské výroby nebo vytríděné použité výrobky. Tato technologie recyklace je vhodná zejména pro termoplasty. Jedná se o jeden z nejnáročnějších recyklačních postupů, který zahrnuje procesy od nejjednoduššího mletí opotřebovaných výrobků a následného tepelně mechanického zpracování meliva pro výrobu nových výrobků až po kompatibilizační postupy v tavenině, které slouží k přípravě vícesložkových materiálů ze směsí odpadních plastů. Touto technologií recyklace získáme materiál s vlastnostmi blízkými původnímu polymeru. Docílíme toho dodáním tepelné a mechanické energie a aditiv jako jsou stabilizátory a barviva odpadní surovině, čímž ji přetvoříme. Ekonomický efekt této recyklace je příznivý, pokud má recyklát požadovanou jakost, to znamená, pokud jím můžeme zaměnit původní nerecyklovaný plast v dané aplikaci [25]



Obr. 28. Linka na zpracování tříděného plastového odpadu [24]

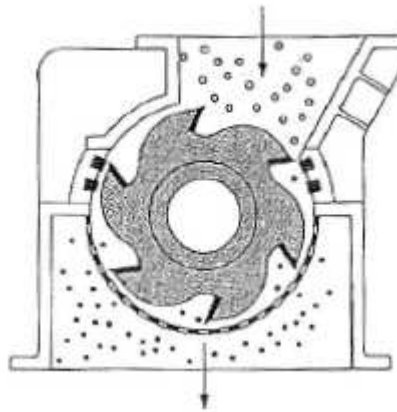
1 - dopravní pás; 2 - mlýn; 3 - transportní dmýchadlo; 4 - potrubní výhybky; 5 - zásobník; 6 - vynášecí šnek; 7 - šnekový dopravník; 8 - praní a sušení; 10 - násypka; 11 - vytlačovací stroj; 12 - granulační zařízení; 13 - zásobník pytlovacího zařízení; 14 - automatická pytlovací váha; 15 - svařování pytlů.

Důležitým faktorem je zde však typ znečištění. Nejvíce nás zajímá, jedná-li se o nečistoty rozpustné nebo nerozpustné ve vodě [24]

4.1.1 Mlecí zařízení

Součástí linky na zpracování plastového odpadu bývá mlecí zařízení. Je velmi důležitou součástí, protože se stará o první hrubé rozemletí velký kusů materiálu. Hrubé rozemletí je potřebné především z důvodu, že se odpad musí nejprve rozemlít nebo rozdrtit na takovou velikost, aby bylo možné jeho další zpracování nebo úprava. K výrobě těch nejhrubších částic plastového materiálu se používají například kotoučové pily. Takto zpracovaný materiál bývá ještě dále rozemlet pomocí kladivových mlýnů.

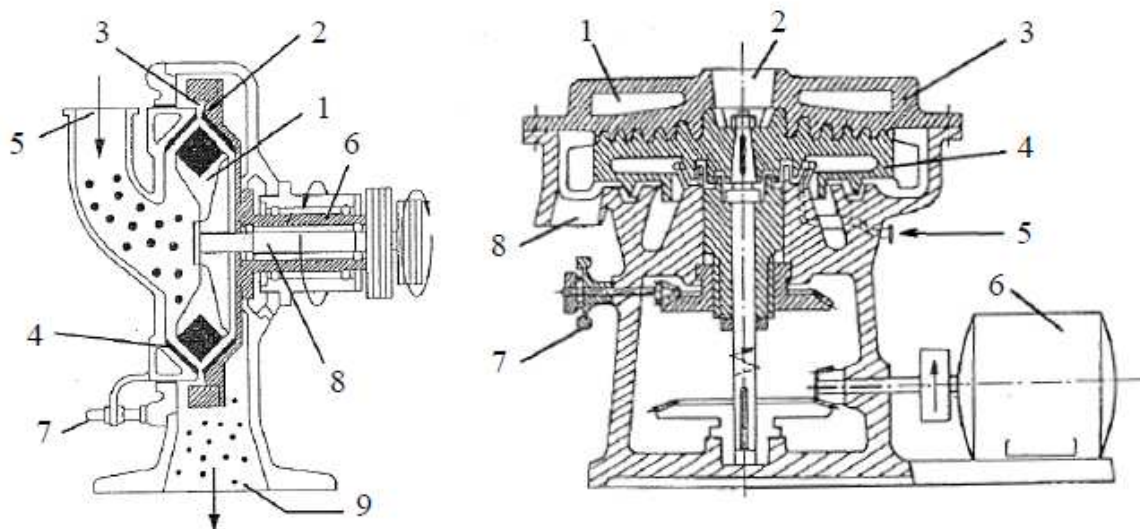
Pro výrobu drtí se velmi často používají klasické nožové mlýny. Základem tohoto mlýnu jsou pevné nože, které jsou uloženy radiálně kolem rotoru. Rotor je po svém povrchu osazen dalšími noži. Na obrázku je vidět schéma práce nožového mlýnu.



Obr. 29. Nožový mlýn [24]

Při práci se rotor nožového mlýnu otáčí vysokou rychlostí. Materiál, který přichází z násypky je uvnitř mlýnu stříhán a drcen mezi noži. Při této technologii vzniká drť rovnoměrné velikosti, což je velkou výhodou. Pozitivní také je, že při drcení materiálů nevzniká mnoho prachu a tak je provoz poměrně čistý.

Pro výrobu jemné drtě se již dnes v stále větší míře využívá talířových nárazových mlýnů. Často se do linek zařazují za nožové mlýny. Tyto mlýny jsou schopné drť z nožových mlýnů rozemlít s rovnoměrnou zrnitostí až 100 μm . Schéma práce talířového mlýnu je uvedeno na obrázku. Přiváděný materiál je okamžitě vystřelován rotorem na bočnice, které se otáčejí v opačném smyslu než rotor. [24]



Obr. 30. Talířové nárazové mlýny [24]

1 - rotor; 2 - otáčející se rýhovaná bočnice; 3 - regulovatelná bočnice; 4 - neotáčející se axiálně posuvná rýhovaná bočnice; 5 - plnicí hrdlo; 6 - hřídel bočnice; 7 - šrouby axiálního posunu bočnice; 8 - hřídel rotoru; 9 - výpustní otvor.

4.2 Chemická recyklace

Při chemické recyklaci je polymerní materiál rozkládán na nízkomolekulární látky, monomery, které lze opětovně použít pro polymerace. Tento typ recyklace je vhodný zejména pro ty polymerní materiály, které nemohou být recyklovány materiálovou recyklací kvůli své náchylnosti k degradaci nebo nejsou dostatečně čisté, což je jeden ze základních požadavků materiálové recyklace. Nevýhodou této technologie recyklace jsou poměrně vysoké investiční náklady na technologické zařízení.

4.2.1 Tepelná depolymerace

Jedná se o nejjednodušší typ chemické recyklace. Za působení vysokých teplot podléhá polymer tepelné degradaci, kdy se z konců polymerních řetězců postupně odštěpují monomerní jednotky. Takový mechanismus nazýváme zipový. Získané monomery lze po očištění znovu polymerovat na výchozí polymer s původní kvalitou. V současné době se takto recykluje polymethylmetakrylát, jehož spotřeba je ovšem tak malá, že se dále tento typ chemické recyklace nerozšiřuje. [23]

4.2.2 Solvolýza

Solvolýza je souhrnný název pro procesy, kterými získáváme výchozí monomerní jednotky postupem opačným polykondenzaci. Jedná se tedy o rozklad polykondenzátů účinkem nízkomolekulárních látek. To znamená, že tímto postupem lze recyklovat polymery vyráběné polykondenzací nebo polyadici, jakými jsou polyestery, polyamidy, polykarbonáty nebo polyuretany. [23]

4.3 Surovinová recyklace

Surovinová recyklace je chemická přeměna plastového odpadu na výrobní surovinu. Principem tohoto typu recyklace jsou termicky destrukční procesy, které rozkládají polymery na směs plyných a kapalných uhlovodíků. Produktem surovinové recyklace pak jsou energeticky využitelný plyn a směs kapalných uhlovodíků, které lze následně využít jako topné oleje nebo petrochemické suroviny. Surovinovou recyklací se recyklují silně znečištěné směsi různorodých plastových složek, které již není prakticky možné recyklovat na hodnotnější materiál.

Surovinové zhodnocení odpadních plastů může být provedeno chemickým postupem hydrogenace nebo pyrolýzy. Hydrogenace je vysokotlaký katalytický proces, jehož produktem jsou kapalné, nasycené uhlovodíky. [26]

4.4 Energetická recyklace

Energetická recyklace je často označována jako ekologicky nepřijatelná kvůli možnému toxickému znečištění ovzduší ekologicky závadnými plynými produkty, např. dioxiny, které mohou vznikat při spalování plastů. Vhodně navržené topeniště a technologické podmínky spalování však tuto možnost vylučují. Stejně tak ekologicky závadné produkty vznikající při spalování PVC, polyamidů, polyuretanů a pryží jsou vhodně neutralizovány převedením na pevnou formu. Například chlorovodík, který se uvolňuje při spalování PVC, je vázán do tuhého chloridu vápenatého, síra z pryží na inertní síran vápenatý a oxidy dusíku z polyamidů jsou převedeny na nezávadné dusíkaté soli. Energetická recyklace je ve světě hojně využívána, ve Švédsku a Německu je takto zpracováno 50 % veškerého pevného komunálního odpadu, v Dánsku je to 65 %, v Japonsku 70 % a ve Švýcarsku dokonce 80 %. [26]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomová práce má za úkol prozkoumat vliv recyklátu a vliv velikosti částic recyklátu na mechanické vlastnosti materiálu. Zkoušeným materiálem je Polyamid 6. V praktické části budou tedy vystříknuty na vstřikovací stroji zkušební tělesa, které budou následně zpracovány na drť (recyklát). Pomocí prosévačky bude recyklát rozdělen na různé velikosti částic. V dalším kroku budou znovu vystříknuty zkušební vzorky tentokrát již pomocí různých velikých částic recyklátu a následovně se budou podrobovat mechanickým zkouškám.

Praktická část diplomové práce se tedy bude zabývat těmito body:

- Výroba zkušebních těles, které budou zhotoveny pomocí technologie vstřikování,
- Všechna vystříknutá tělesa budou následně použita na recyklaci pomocí nožového mlýnu,
- Recyklát bude následovně proséván tak, že částice recyklátu budou rozděleny na určité velikosti,
- Různé velikosti částic recyklátu budou použity k opětovnému vystříknutí zkušebních těles,
- Všechny vyrobené vzorky budou použity na vybrané mechanické zkoušky. Mezi tyto zkoušky bude patřit tahová zkouška, zkouška tvrdosti a zkouška vrubové houževnatosti.
- Závěr diplomové práce se bude zabývat vyhodnocením a následovným porovnáním naměřených výsledků.

6 ZKOUŠENÝ MATERIÁL PA6

Polyamidy jsou lineární polymery obsahující v řetězci amidové skupiny -CONH-. Vlastnosti polyamidů jsou závislé na výchozích monomerech. Klasický polyamid je v tuhém stavu z 30% až 50% krystalický a neprůhledný. Řetězové můstky jsou propojeny vodíkovými můstky mezi amidovými skupinami. Jejich množství ovlivňuje krystalickou strukturu, bod tání, teplotu skelného přechodu a většinu dalších vlastností.

Obecně polyamidy (plasty i vlákna) mají vysokou houževnatost, tvrdost, odolnost proti oděru a dobré elektroizolační vlastnosti. Mechanické vlastnosti polyamidů jsou závislé na typu polyamidu, na jeho molekulové hmotnosti a množství obsažené vody. Nasákavost je dána koncentrací amidových skupin. Čím vyšší je poměr skupin -CONH- a -CH₂-, tím vyšší je nasákavost.

PA6 je tvrdý, světle žlutý plast rohovitého vzhledu. Není rozpustný v běžných rozpouštědlech, rozpouští se ve fenolech, kyselině mravenčí a bezvodé kyselině octové. Má dobré mechanické vlastnosti, nízký koeficient tření, mimořádnou odolnost vůči otěru, dobrou rázovou houževnatost, dobré elektroizolační vlastnosti, ovšem velkou navlhavost. Není odolný vůči anorganickým kyselinám a oxidačním činidlům.

V našem případě byl použit typ PA6 Novamid PA6 B30 P. Tento materiál je dodáván ve formě granulí, které jsou baleny do polyethylenových fólií o celkové váze 25 kg. Každý z těchto pytlů je vzduchotěsný, aby bylo zamezeno přístupu vlhkosti z okolního vzduchu. Na obrázku (obr. 31) můžeme vidět příklad granulátu Polyamidu 6.



Obr. 31 Granulát PA6

V tabulce je možno pozorovat základní vlastnosti materiálu Novamid PA6 B30 P.

Tab. 5 Vlastnosti Novamid PA6 B30 P

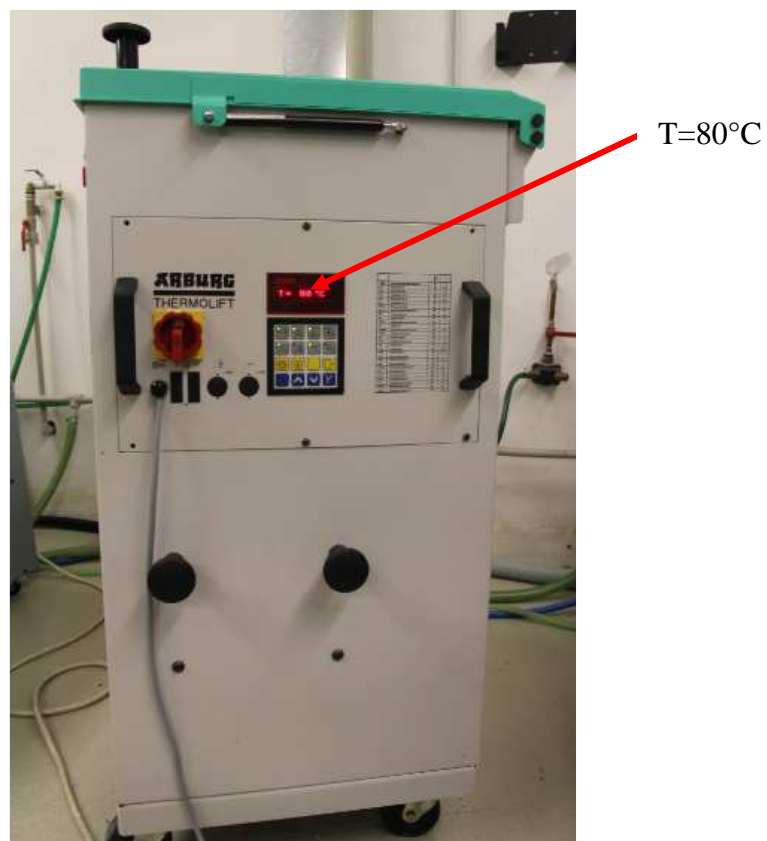
Vlastnost	Novamid PA6 B30 P
Typ polymeru	semikrystalický
Hustota při 23°C	1,12 [g/cm]
Nasákavost při 23°C	3 [%]
Navlhavost při 23°C	9,5 [%]
MVR [275°C/5kg]	[%]
Rozsah vstřikovacích teplot	250-270 [°C]
Teplota formy	40-80 [°C]
smrštění vůči formě	0,9 - 1,1 [%]
Modul pružnosti v tahu [1mm/min]	3400 [MPa]
napětí na mezi kluzu	85 [MPa]
Spirálový test [270°C]	435 [mm]
Dielektrická konstanta	3,5

7 VSTŘIKOVÁNÍ

Prvním bodem praktické části diplomové práce bylo vystříknutí zkušebních těles, ze kterých se následně pomocí přístroje na recyklaci získala tzv. drť.

7.1 Sušení materiálu

Vstřikovaný materiál Novamid B30 P je navlhavý a měl by být před zpracováním vysušen. V granulích by nemělo více než 0,06 % zbytkové vody pro vstřikování. Větší vlhkost by mohla způsobit vady jak vnější, tak vnitřní..



Obr. 32 Sušárna Thermolift

Novamid B30 P byl sušen v sušárně přímo spojené s násypkou vstřikovacího stroje. Je to vhodný způsob řešení, protože při přepravě mezi sušičkou a násypkou by mohlo dojít k nežádoucímu navlhnutí vysušeného materiálu. Pro sušení materiálu byla použita sušárna Thermolift od firmy Arburg, kterou je možné vidět na obrázku (obr. 32). Materiál byl sušen 5 hodin při teplotě 80 °C.

7.2 Vstřikování

Firma ARBURG je výrobcem nejen vstřikovacích strojů, ale i velkého množství příslušenství vstřikovacích strojů a strojů používaných v plastikářském průmyslu. V našem případě byl použit typ Arburg Allrounder 470 H. Tento typ lze pozorovat na obrázku (obr.33).



Obr. 33 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 H

Pro svou dobrou adaptabilitu a velké množství nastavbových úprav stroje se hodí pro zpracování všech běžných termoplastů. Obsluze a komunikaci se strojem velmi napomáhá moderní zobrazovací panel, výklopného terminálu. Lze rychle zvládnout široké spektrum úkolů, v oblasti technologie vstřikování. Tento typ vstřikovacího zařízení je u firmy Arburg novinkou. Jedná se o novou výkonnou řadu ALLROUNDER HIDRIVE. Tyto stroje dosahují vysokých výkonů při zkráceném výrobním cyklu, což je vidět na této výkonové charakteristice na obrázku (obr.34).

Tato třída Allrounderů jsou hybridní vstřikovací stroje, kde se využívá jak elektrická, tak hydraulická strojní technika. Jedná se o kombinaci všech předcházejících typů Allrounderů.

Tyto stroje mají robustní kompletní technické řešení pohonů a to zaručuje dlouhou životnost a nízkou míru opotřebení. Kompaktní kapalinou chlazené servomotory a stabilní pevné planetové válečkové převody jsou zárukou dlouhodobého bezporuchového provozu stroje.

Základní parametry vstřikovacího stroje jsou uvedeny v (tab.6). Jsou v ní uvedeny jen základní parametry. Podle nich je však možné stroj bezpečně identifikovat. Pro účel této diplomové práce je naprosto dostačující.

Tab. 6 Základní parametry vstřikovacího stroje

Technické údaje	
Vlastnost	Arburg Allrounder 470 H
Uzavírací síla	1000 [kN]
Maximální rozměry formy	420x420x500 [mm]
Průměr šneku	40 [mm]
Maximální vstřikovaný objem	201[cm]

V tabulce (tab.7) je uvedeno nastavení vstřikovacích podmínek, které jsou velmi důležité pro samotnou výrobu těles na mechanické zkoušky. Správné nastavení vstřikovacích parametrů je důležité na jakost budoucího výrobku. Bylo tedy nutné nastavit správné parametry, protože jejich špatné nastavení by mohlo vést k degradovaným výrobkům, což by ovlivnilo samotný recyklát a měření by pak nebylo objektivní.

Tab. 7 Nastavení vstřikovacích podmínek

Vstřikovací podmínky					
Teplota taveniny/trysky	260 °C				
Teplota formy	60°C				
průměr šneku	40 mm				
vstřikovací tlak	600 Bar				
chlazení	20 sekund				
dotlak	20 sekund				
dráha dávkování	28 mm				
dráha přepnutí	13 mm				
Teploty jednotlivých pásem	255°C	250°C	245°C	240°C	30°C - Vstup

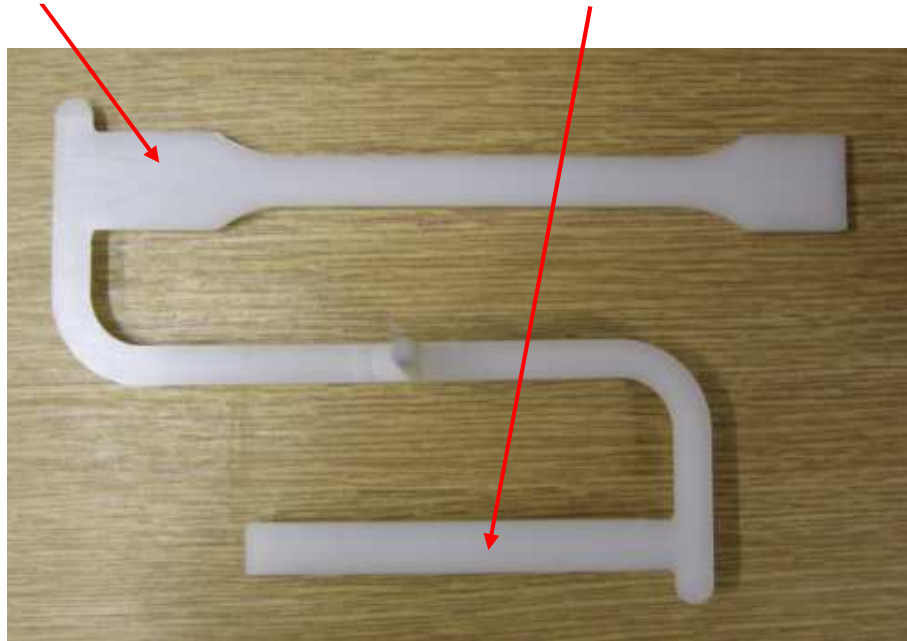
V tabulce (tab.7) lze vidět, že u teploty pásem na vstupu, tedy pod násypkou je nejnižší teplota, je to z toho důvodu aby materiál předčasně nedegradoval a nenatavoval se a tím nezabraňoval dalšímu materiálu ke vstupu do pracovního válce. Dále si můžeme všimnout poměrně dlouhého dotlaku. Je tak proto, aby docházelo co k nejmenšímu smrštění a co nejmenším propadlinám na výrobku. Při dlouhém dotlaku se naopak zmenšila doba chlazení.

7.3 Vstříkovaný výrobek

Vstříkovaným výrobkem byly zkušební tělesa, které se používají na mechanickou zkoušku tahem a na zkoušku vrubové houževnatosti. Na obrázku můžeme vidět zkušební tělíska i s vtokovým systémem, který zaujímá velkou část hmotnosti výstříku.

Tyčinka pro mechanickou zkoušku tahem

Těleso na zkoušku vrubové houževnatosti



Obr. 34 zkušební tělesa včetně vtokového systému

Na obrázku (obr.34) lze vidět, že vtokový systém zaujímá velkou část výstříku. V tabulce (tab. 8) jsou uvedeny hmotnosti vtokového zbytku, výrobku a výstříku. Je tak možné porovnat jednotlivá hmotnostní zastoupení.

Výpočet aritmetického průměru:

$$\bar{x} = \sum_{i=0}^n x^i \qquad \bar{x} = \frac{23,15 + 23,15 + 23,16 \dots + 23,15}{10} \qquad (18)$$

Výpočet směrodatné odchylky:

$$\bar{x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x^i - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \qquad \bar{x} = \sqrt{\frac{(23,15 - 23,15)^2 + \dots (23,16 - 23,15)^2}{(10 - 1)}} \qquad (19)$$

Tab. 8 Procentuální zastoupení

číslo měření	výstřík [g]	vtok[g]	výrobek[g]
1.	23,15	10,51	12,64
2.	23,15	10,51	12,63
3.	23,16	10,94	12,22
4.	23,16	10,52	12,65
5.	23,15	10,18	12,97
6.	23,15	10,51	12,65
7.	23,16	10,50	12,67
8.	23,13	10,46	12,67
9.	23,16	10,33	12,83
10.	23,16	10,32	12,83
Aritmetický průměr \bar{x}	23,15	10,48	12,68
Směrodatná odchylka S	0,01	0,20	0,20
Procentuální zastoupení [%]	100	45,26	54,74

V tabulce (tab.8) lze pozorovat, že hmotnost výrobku je 23,15g. Hmotnost vtokové soustavy je 10,48g, což je 45% hmotnosti vystříknutého dílu. Vtoková soustava tvoří tedy téměř polovinu hmotnosti výstříku. V sériové výrobě by to znamenalo velké množství nevyužitého materiálu.

8 RECYKLACE VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ

Po fázi vstřikování došlo k přípravě recyklátu. Nejprve bylo přistoupeno k mletí polyamidových vzorků, které byly následně prosévány.

8.1 Mletí polyamidu

Mletí polyamidu probíhalo na nožovém mlýnu typu GK 2218 od výrobce Maskain AB Rapid. Je to stroj starší výroby, ale pro náš účel byl pracovním prostorem i výkonem plně dostačující. Stroj byl plněn výrobky v krátkých intervalech.



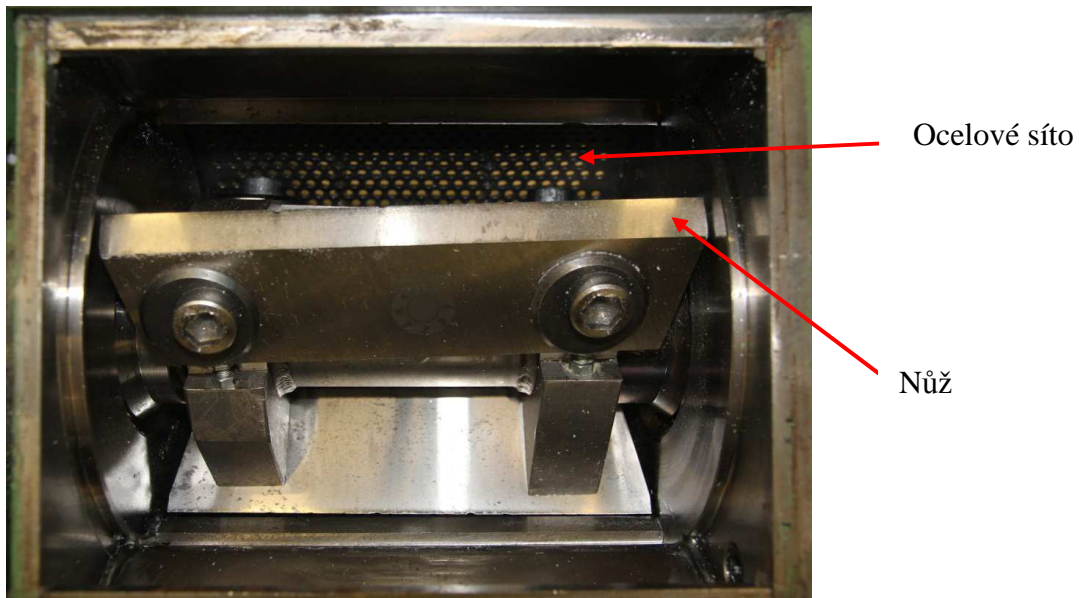
Obr. 35 Nožový mlýn

Technické data jsou uvedena v následující tabulce (tab.9).

Tab. 9 parametry nožového mlýnu

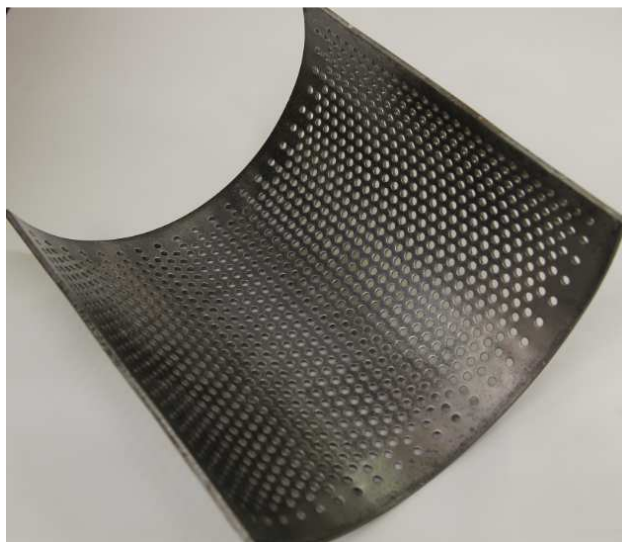
Technické údaje	
Vlastnost	MASKIN AB RAPID GK 2218
Výkon	3 kW
Velikost ok v sítu	4mm
Hmotnost	150 kg

Na obrázku (obr.36) lze pozorovat pracovní prostor nožového mlýnu. Tento prostor je možné vidět jen v případě, že je stroj vypnutý a je demontována násypka. Rotor mlýnu se otáčí a nože melou výrobky na drť. Když je drť menší než díry v sítu, propadá jíím do předem přichystané násypky. V prostoru se nachází současně velmi malé částičky drti a celé ještě nezpracované kusy výrobků.



Obr. 36 Pracovní prostor mlýnu

Výstupem je drť, která má různé velikosti částic. Síto (obr.36) mělo průměr ok 4 mm, takže recyklát měl nejrůznější velikosti částic od prachových, jejichž velikost se pohybovala od 0-1 mm a po částice velikostí 4 mm.



Obr. 37 Síto mlýnu

Na (obr.38) můžeme pozorovat drť která není proseta. Pro představu velikosti částic je přiloženo pravítko. Na recyklátu můžeme pozorovat, že oproti originálnímu materiálu se liší ostrými hranami, což způsobilo mletí v pracovním prostoru nožového mlýnu, a také se recyklát liší různými velikostmi svých částic.



Obr. 38 Nepřesetá drť

8.2 Prosévání

Po recyklaci vstřikovaných dílů probíhalo prosévání. Účelem prosévání bylo rozdělení částic neprosetého recyklátu do jeho určitých velikostí. Prosévání bylo zhotoveno na laboratorní prosévače AS 200 Basic (obr. 39).



Obr. 39 AS 200 Basic

Technické data o přístroji jsou uvedena v následující tabulce (tab.10). Amplituda byla nastavena na 70%, jedna navážka byla o hmotnosti 250g a doba jednoho prosévacího cyklu trvala 120 vteřin.

Tab. 10 Technické parametry AS 200 Basic

Technické údaje	
Vlastnost	AS 200 Basic
Typ	Vibrační s 3D efektem
Rozsah amplitudy	0-3 mm
Rozměry Š x V x H	400 x 230 x 350 mm

Na prosévacím zařízení byly síta (obr.40) o velikosti svých děr 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm a miska na částice o velikosti menší než 1 mm. Po prosévání bylo zjištěno, že na sítě s velikostí děr 4 mm se usazovalo zanedbatelné množství recyklátu.



Obr. 40 Síto přístroje na
prosévání

V misce byl zachycen velmi jemný prach o velikosti menší než 1mm. Tento prach se může hůře zpracovávat z důvodu prašnosti.



Obr. 41 Velikosti částic 3 – 4 mm

Na obrázku (obr.41) lze pozorovat částice recyklátu velikosti mezi 3 – 4 mm. Částice jsou téměř shodného tvaru s ostrými hranami, které jsou způsobeny recyklací.



Obr. 42 Velikosti částic 2 – 3 mm

Na obrázku (obr.42) je možné vidět částice velikosti 2 – 3 mm. Stejně jako u (obr.41) jsou částice téměř shodného tvaru.



Obr. 43 Velikosti částic 1 – 2 mm

Na obrázku (obr.43) je recyklát o velikosti částic 1 – 2 mm. Lze konstatovat, že všechny velikosti částic recyklátu mají téměř shodný tvar.



Obr. 44 Velikosti částic 0 – 1 mm

Na obrázku (obr.44) lze pozorovat velikosti částic 0 – 1 mm. Pro porovnání velikosti částic recyklátu je přiloženo pravítko. Mezi touto velikostí se nachází i prach, který se může hůře zpracovávat z důvodu prašnosti.

Tabulka (tab. 11) udává poměr hmotností podle velikosti drtě v jedné 250 gramové navážce. Bylo provedeno celkem deset měření, které byly následně statisticky vyhodnoceny. Z tabulky vyplývá, že největší zastoupení mají částice recyklátu mezi 2 - 3 mm. V jedné navážce se jich vyskytuje přibližně polovina z celkové hmotnosti. Drť menší než 2 mm a zároveň větší než 1 mm je zastoupena přibližně 5 % a nakonec prachové částičky zaujímají při hmotnosti 5,8 g přibližně 2 % z celkové hmotnosti.

Tab. 11 Poměr hmotností různých velikostí částic recyklátu

číslo měření	0-1 [mm]	1-2[mm]	2-3[mm]	3-4[mm]
1.	4,00	16,00	122,00	107,9
2.	5,00	13,40	122,20	109,3
3.	6,40	11,50	124,90	107,3
4.	6,10	12,00	119,10	113,9
5.	8,40	11,60	119,00	111,7
6.	8,20	12,40	119,80	110,5
7.	4,80	13,00	120,30	111,9
8.	4,00	12,10	128,60	105,5
9.	5,60	12,90	129,20	104
10.	5,30	11,90	122,10	112
Aritmetický průměr	5,78	12,68	122,72	109,40
Směrodatná odchylka	1,54	1,32	3,71	3,18
Procentuální zastoupení	2%	5%	49%	44%

9 VSTŘIKOVÁNÍ RECYKLÁTU

Následně po prosévání probíhalo opětovné vstřikování, ale v tomto případě už recyklovaného polyamidu. Opět byly vystříknuty vzorky z kapitoly 7.3. Recyklát musel být stejně jako originální materiál před samotným vstřikováním vysušen a to 4 - 5 hodin při teplotě 80°C.

Vstřikování probíhalo na stejném vstřikovacím stroji jako z kapitoly 7.2. Je nutno podotknout, že při každé změně typu vstřikovaných vzorků, bylo nutno vyčistit násypku a vyprázdnit pracovní válec vstřikovacího stroje tak, aby bylo zabráněno smíchání různých typů recyklátu, což by vedlo ke zkresleným výsledkům. Pro mechanické zkoušky bylo použito 6 sad vzorků. Mezi ně patří :

- 1) Polyamid 6 – čistý
- 2) Polyamid 6 – neprosetý
- 3) Polyamid 6 - velikosti částic 0-1mm
- 4) Polyamid 6 - velikosti částic 1-2 mm
- 5) Polyamid 6 - velikosti částic 2-3 mm
- 6) Polyamid 6 - velikosti částic 3-4 mm

Všem výrobkům byla bezprostředně po vystříknutí odstraněna pomocí dílenských nůžek celá vtoková soustava, abychom dostali již hotové výrobky. Těmi jsou zkušební tyčinky určené pro mechanické zkoušky, které byly uschovány v uzavřených sáčcích tak, aby nedošlo k jejich navlhnutí.

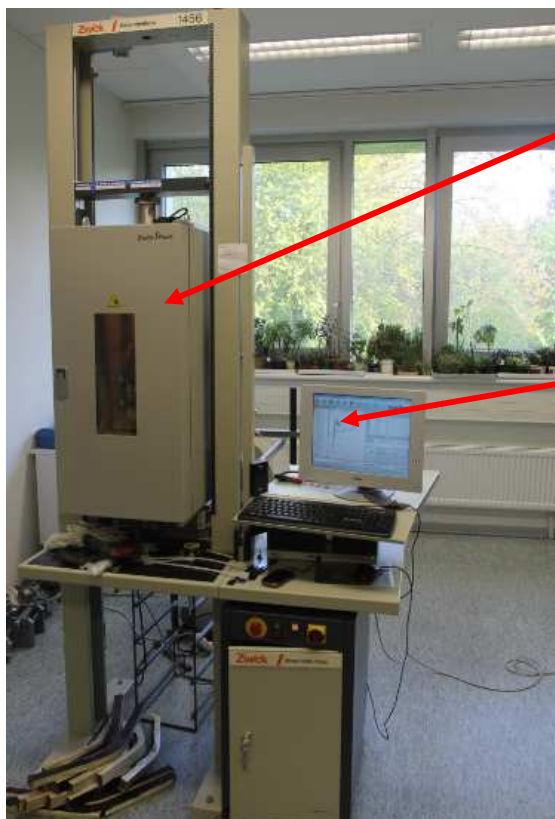
10 MECHANICKÉ ZKOUŠKY PA6

Všechny vzorky byly podrobeny mechanickým zkouškám. Jednalo se o tahovou zkoušku, zkoušku vrubové houževnatosti a zkoušku tvrdosti Shore D.

10.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na univerzálním zkušebním stroji *Zwick 1456*. Jde o univerzální zkušební stroj, na kterém je možné provádět i jiné druhy zkoušek, jako zkouška tlaková a zkouška ohybová. Součástí zkušebního stroje je i temperační komora. Tato komora umožňuje provádět zkoušky v rozmezí teplot od -80°C do 250°C . Toto teplotní rozmezí umožňuje simulovat prakticky všechny možné stavy polymeru při jejich použití. Maximální posuvová rychlost upínacích čelistí je 800 mm/min.

Na obrázku (obr.45) lze pozorovat zkušební přístroj na tahovou zkoušku. Při spuštění zkoušky se nejprve ramena extenzometru přitisknou ke zkušebnímu tělísku. Ty zaznamenávají změny délky tělíska. Tělíska bylo neustále natahováno a zkouška pak skončila ve chvíli, kdy se zkušební těleso přetrhlo.



Temperační komora

Počítač na vyhodnocování
tahové zkoušky

Obr. 45 Zwick 1456

Na obrázku (obr.46) můžeme pozorovat upnutí těles přímo v temperační komoře.



Obr. 46 Upnutí v temperační komoře

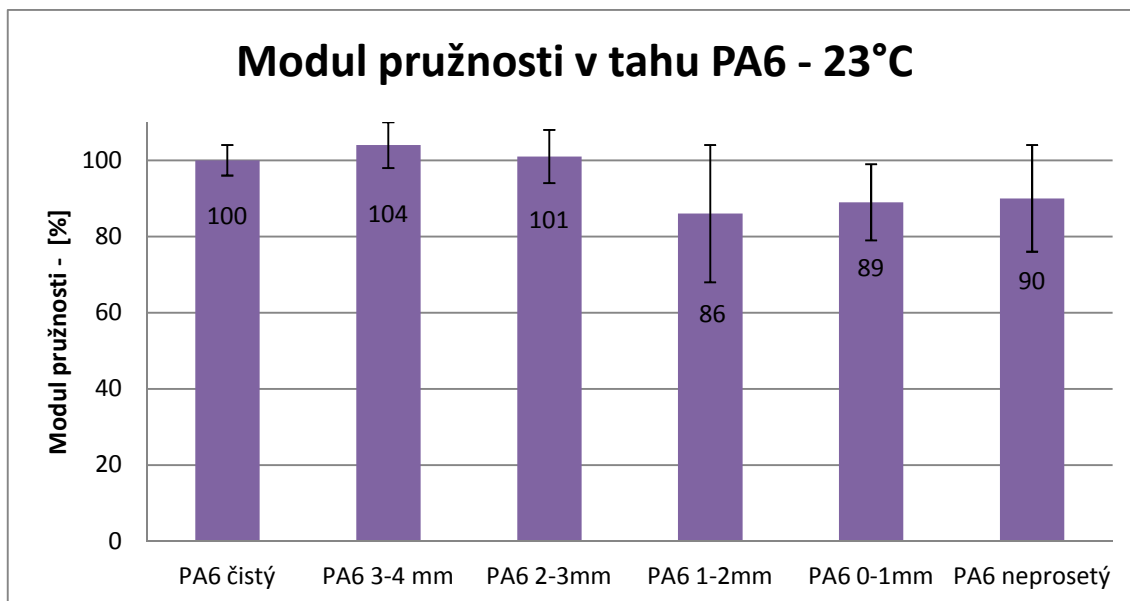
10.1.1 Modul pružnosti v tahu

Každý ze vzorků materiálu byl podroben deseti měření při dvou různých teplotách a to při pokojové teplotě 23°C a při teplotě 60°C. V tabulce (tab. 12) jsou zaznamenány statistické veličiny jako aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Všechny naměřené hodnoty je možno najít v příloze P I Modul pružnosti v tahu.

Tab. 12 Modul pružnosti v tahu

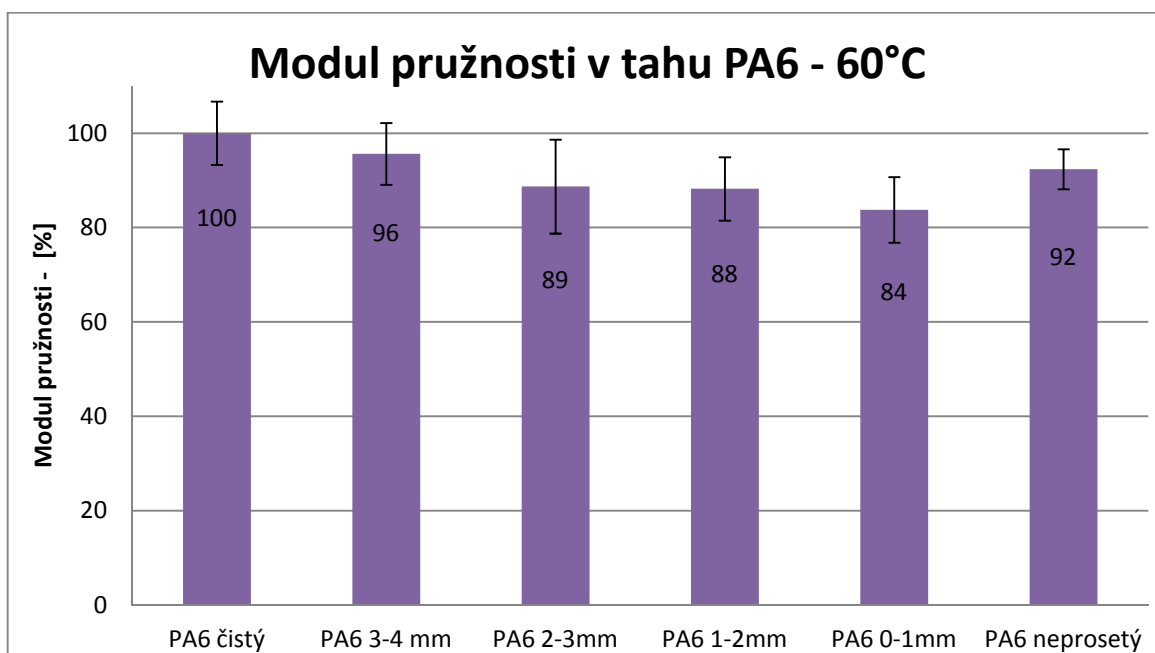
		Modul pružnosti				
Materiál PA6	čistý[MPa]	3-4mm [MPa]	2-3mm [MPa]	1-2mm [MPa]	0-1mm [MPa]	Neprosetý [MPa]
23°C						
\bar{x}	3445	3591	3484	2966	3085	3112
S	141	232	237	550	336	441
60°C						
\bar{x}	1048,8	1003	930,3	925,2	878,4	968,7
S	70	66	93	62	61	41

Výsledky měření jsou vypracovány do sloupcových grafů. Pro každou teplotu byl vytvořen jeden graf. V grafu jsou vyznačeny hodnoty modulu pružnosti v procentech, přičemž PA6 čistý představuje 100% a ostatní hodnoty se od této nominální hodnoty odvíjejí. Ohraničené čáry v každém sloupci představují směrodatnou odchylku



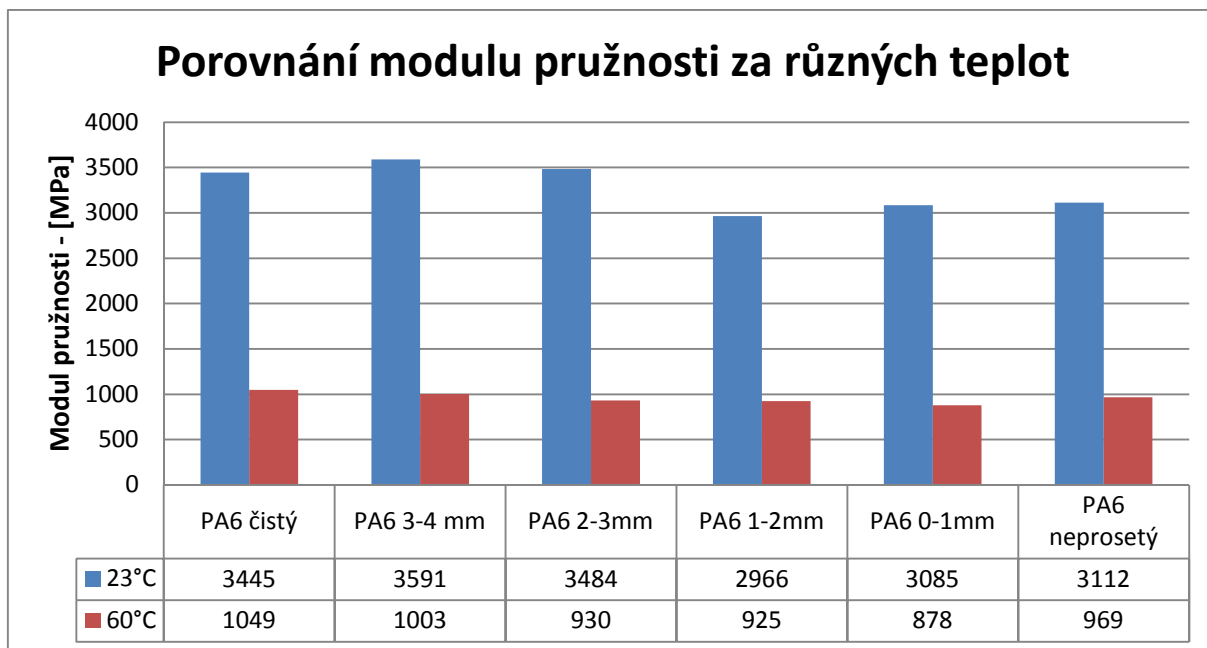
Obr. 47 Modul pružnosti při teplotě 23°C

Z grafu (obr.47) lze konstatovat, že modul pružností PA6 čistý, PA6 s velikostí částic recyklátu 3-4 mm a PA6 2 – 3 mm jsou téměř shodné. Liší se až hodnoty PA6 1-2, 0-1 a neprosetého PA6 a to téměř o 10%.



Obr. 48 Modul pružnosti při teplotě 60°C

Z grafu (obr.48) je patrné, že nejmenší modul pružnosti má PA6 s velikostmi částic 0 – 1 mm a to téměř o 15% nižší než je modul pružnosti PA6 čistý. Nejvíce shodný modul pružnosti oproti PA6 čistý má PA6 s velikostmi částic 3 – 4 mm.



Obr. 49 Porovnání modulu pružnosti za různých teplot

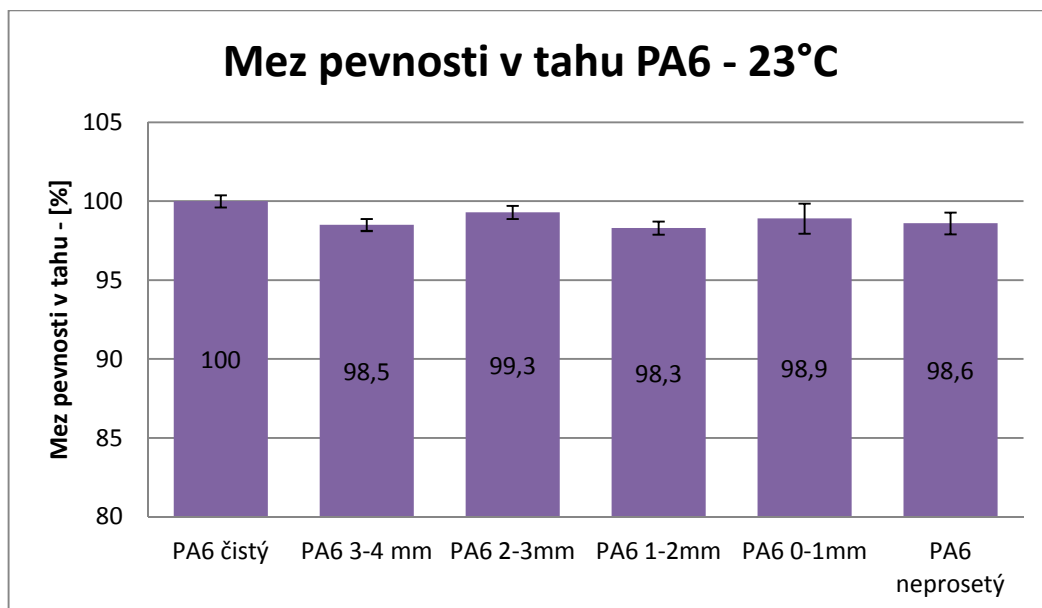
Graf (obr.49) porovnává modul pružnosti za teploty 23°C a za teploty 60°C. Modul pružnosti PA6 čistý je až na dvě hodnoty za teploty 23°C vždy vyšší oproti různým velikostem částic recyklátu. Modul pružnosti PA6 čistého za teploty 60°C je 1049 MPa. Za teploty 60°C jsou moduly pružnosti přibližně 3x menší oproti teplotě 23°C.

10.1.2 Mez pevnosti v tahu

Každý ze vzorků materiálu byl podroben deseti měření při dvou různých teplotách a to při pokojové teplotě 23°C a při teplotě 60°C. V tabulce (tab. 13) jsou zaznamenány statistické veličiny jako aritmetický průměr a směrodatná odchylka. V grafu jsou vyznačeny hodnoty meze pevnosti v procentech, přičemž PA6 čistý představuje 100% a ostatní hodnoty se od této nominální hodnoty odvíjejí. Všechny naměřené hodnoty je možno najít v příloze P II.

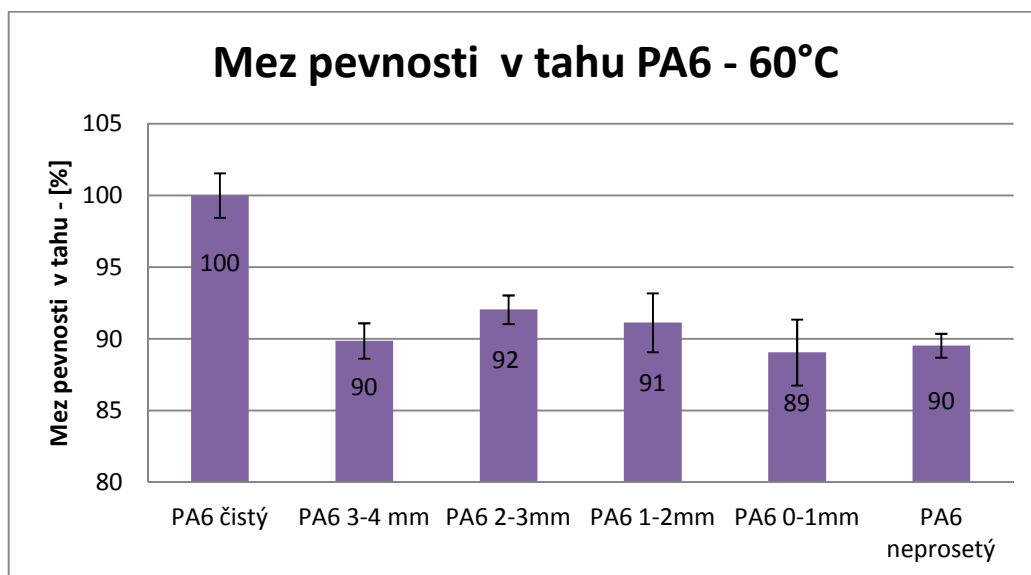
Tab. 13 Mez pevnosti v tahu

		Mez pevnosti v tahu				
Materiál PA6	čistý[MPa]	3-4mm [MPa]	2-3mm [MPa]	1-2mm [MPa]	0-1mm [MPa]	Neprosetý [MPa]
23°C						
\bar{x}	80,9	79,2	80,9	79,7	80,1	79,9
S	0,3	0,3	0,3	0,3	0,8	0,6
60°C						
\bar{x}	42,6	38,3	39,2	38,8	37,9	38,1
S	0,7	0,5	0,4	0,8	0,9	0,3



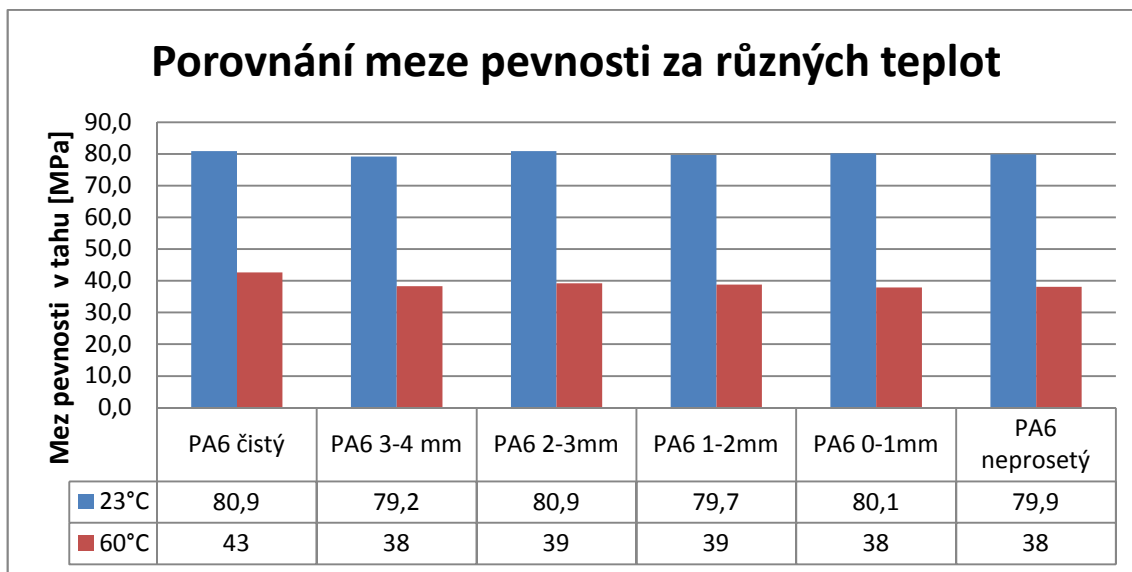
Obr. 50 Mez pevnosti při teplotě 23°C

Z grafu (obr.50) je patrné, že naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu různě velikých částic recyklátu se při pokojové teplotě od základní hodnoty PA6 téměř neliší. Největší rozdíl je u PA6 1 - 2 mm, jehož mez pevnosti je v průměru o 1,7 % nižší oproti PA6 čistý.



Obr. 51 Mez pevnosti při teplotě 60°C

Z grafu (obr.51) lze konstatovat, že oproti teplotě 23°C jsou rozdíly meze pevnosti při teplotě 60°C markantnější. Lze říci, že všechny velikosti částic mají oproti PA6 čistý přibližně o 10% nižší mez pevnosti. Nejnižší mez pevnosti má v tomto případě PA6 s velikostmi částic 0 – 1 mm a to 89% PA6 čistého.



Obr. 52 porovnání meze pevnosti za různých teplot

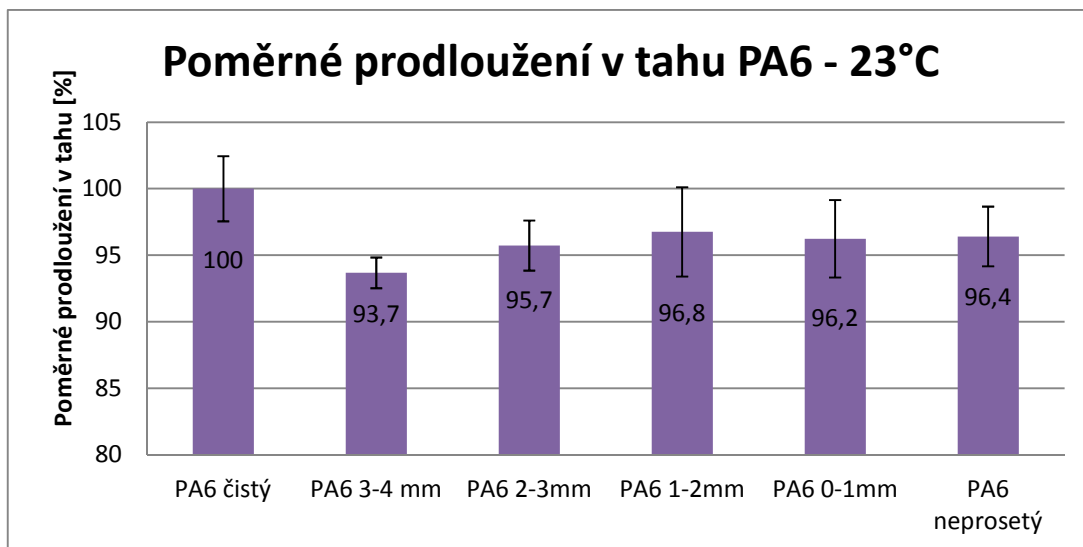
Graf (obr.52) porovnává mez pevnosti za teploty 23°C a za teploty 60°C. Z grafu lze pozorovat, že při teplotě 23°C se hodnoty oproti PA6 čistému téměř neliší. Při teplotě 60°C se pohybuje mez pevnosti kolem 40 MPa a je to přibližně o polovinu menší, než se pohybují meze pevnosti za teploty 23°C.

10.1.3 Poměrné prodloužení v tahu

Každý ze vzorků materiálu byl podroben deseti měření při dvou různých teplotách a to při pokojové teplotě 23°C a při teplotě 60°C. V tabulce (tab. 14) jsou zaznamenány statistické veličiny jako aritmetický průměr a směrodatná odchylka. V grafu jsou vyznačeny hodnoty poměrného prodloužení v procentech, přičemž PA6 čistý představuje 100% a ostatní hodnoty se od této nominální hodnoty odvíjejí. Všechny naměřené hodnoty je možno najít v příloze P III.

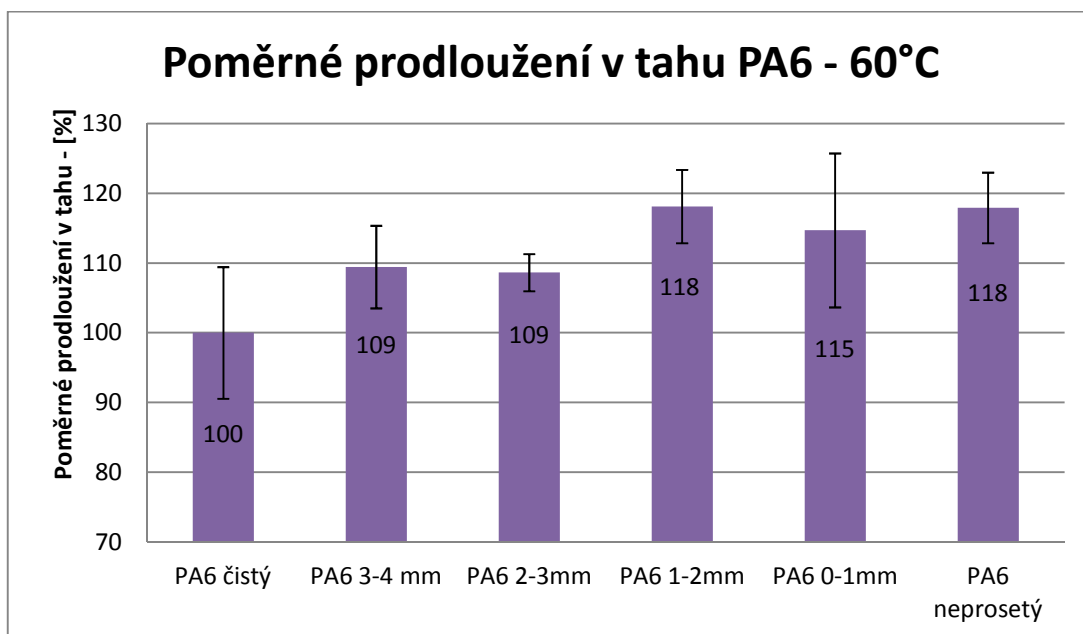
Tab 14 Poměrné prodloužení v tahu

Poměrné prodloužení v tahu						
Materiál PA6	čistý [mm]	3-4mm [mm]	2-3mm [mm]	1-2mm [mm]	0-1mm [mm]	Neprosetý [MPa]
23°C						
\bar{x}	5,85	5,48	5,60	5,66	5,63	5,64
S	0,14	0,06	0,11	0,19	0,16	0,13
60°C						
\bar{x}	23,07	28,53	28,32	30,79	29,90	30,74
S	2,46	1,69	0,75	1,62	3,30	1,55



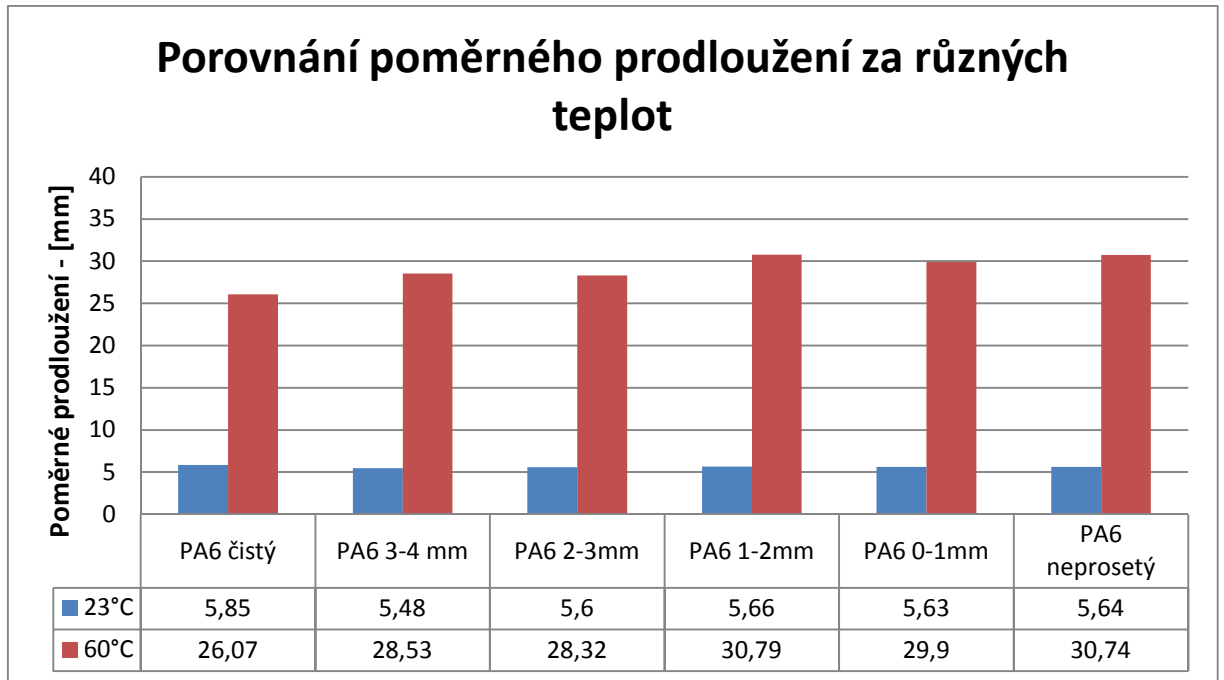
Obr. 53 poměrné prodloužení při 23°C

Z grafu (obr.53) je patrné, že nejnižší hodnotu poměrného prodloužení měl PA6 s velikostmi částic 3 – 4 mm. Nejvyšší hodnotu poměrného prodloužení měl PA6 s velikostmi částic 1 – 2 mm a to přibližně o 3% nižší než PA 6 čistý.



Obr. 54 Poměrné prodloužení při 23°C

Z grafu (obr.54) je patrné, že všechny velikosti částic recyklátu dosáhly většího poměrného prodloužení než PA 6 čistý. Největšího poměrného prodloužení dosáhl recyklát s velikostí částic 1 – 2 mm a PA6 neprosetý a to o 18% vyššího oproti PA6 čistému.



Obr. 55 porovnání poměrného prodloužení za různých teplot

Graf (obr.55) porovnává poměrné prodloužení za teploty 23°C a za teploty 60°C. Za teploty 23°C mají všechny velikosti částic recyklátu menší poměrné prodloužení. Nejmenší prodloužení lze vidět u PA6 s velikostí částic 3 – 4 mm. Naopak za teploty 60°C mají všechny velikosti částic recyklátu větší poměrné prodloužení a to až 6x vyšší oproti teplotě 23°C. Největší poměrné prodloužení lze sledovat u recyklátu s velikostí částic 1 – 2 mm a u PA6 nepřesetého. Jejich prodloužení oproti PA6 čistému je o 18% větší.

10.2 Zkouška vrubové houževnatosti

Zkouška vrubové houževnatosti byla provedena na zkušebním stroji Charpyho kladivu RESIL IMPACTOR junior italské firmy CEAST. Tento zkušební stroj je plně nastavitelný pro individuální polymerní a kompozitní materiály. Tento stroj je spojen s počítačem a všechny hodnoty a měření jsou zaznamenávány a zpracovány. Tento Software je dobře ovladatelný, práce s ním velmi ulehčuje měření. Zaznamenává data získaná od snímačů stroje.



Obr. 56 Charpyho kladivo

Zkušební vzorky pro zkoušku vrubové houževnatosti byly opatřeny normalizovaným vrubem. Tento vrub o hloubce 2mm byl zhotoven na ručně poháněném stroji CEAST. Pomocí černého kola vyvozujeme kmitavý pohyb nože. Tento nůž svým pohybem řeže vrub do vloženého vzorku. Hloubku vrubu korigujeme pomocí mikrometrického šroubu a hloubku. Vrub byl zhotoven postupným přidáváním hloubky.



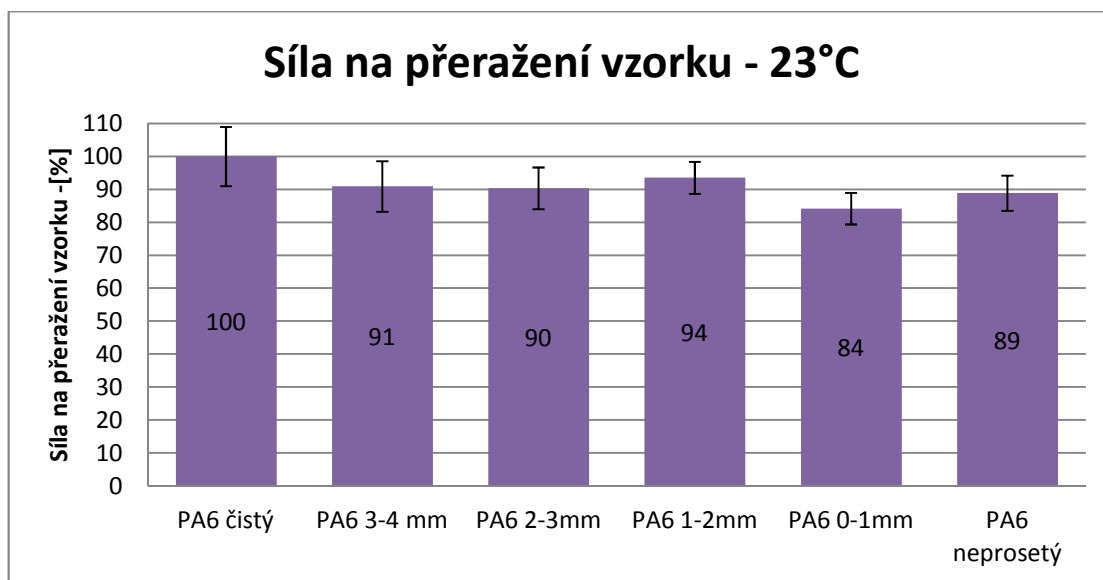
Obr. 57 Příklad na výrobu vrubů

10.2.1 Vyhodnocení síly potřebné k přeražení

Každý ze vzorků materiálu byl podroben deseti měření při dvou různých teplotách a to při pokojové teplotě 23°C a při teplotě 60°C. V tabulce (tab.15) jsou zaznamenány statistické veličiny jako aritmetický průměr a směrodatná odchylka. V grafu jsou vyznačeny hodnoty síly potřebné k přeražení v procentech, přičemž PA6 čistý představuje 100% a ostatní hodnoty se od této nominální hodnoty odvíjejí. Všechny naměřené hodnoty je možno najít v příloze P IV.

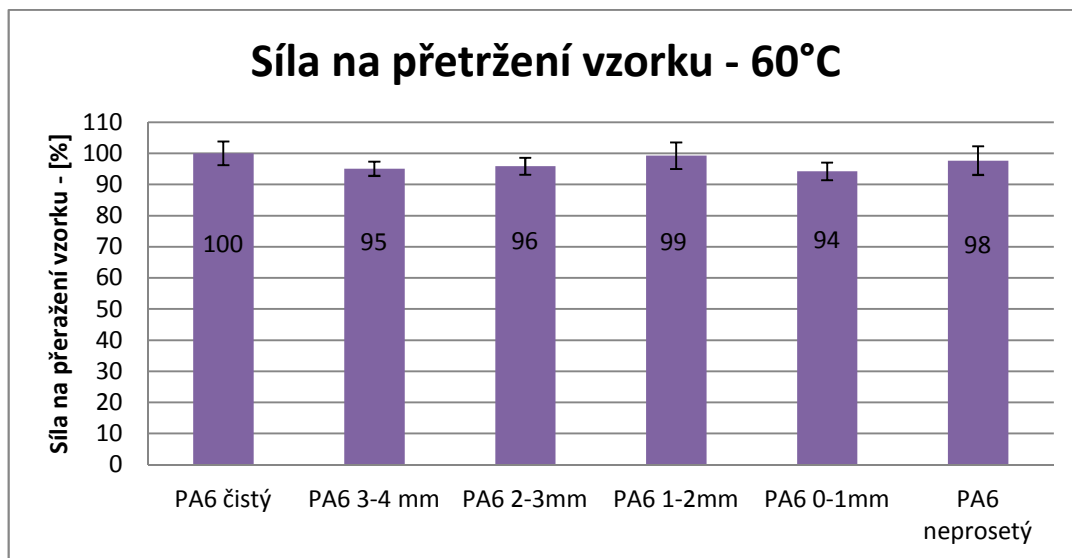
Tab. 15 Síla potřebná k přeražení vzorků

Materiál PA6	Síla potřebná k přeražení					
	čistý[N]	3-4mm [N]	2-3mm [N]	1-2mm [N]	0-1mm [N]	Neprosetý [N]
23°C						
\bar{x}	603,6	548,8	545,3	564,5	508,1	536,4
s	54,2	42,1	34,7	27,5	24,3	28,8
60°C						
\bar{x}	666,4	633,3	638,7	661,3	627,8	650,9
s	25,5	14,5	17,5	28,3	17,6	30



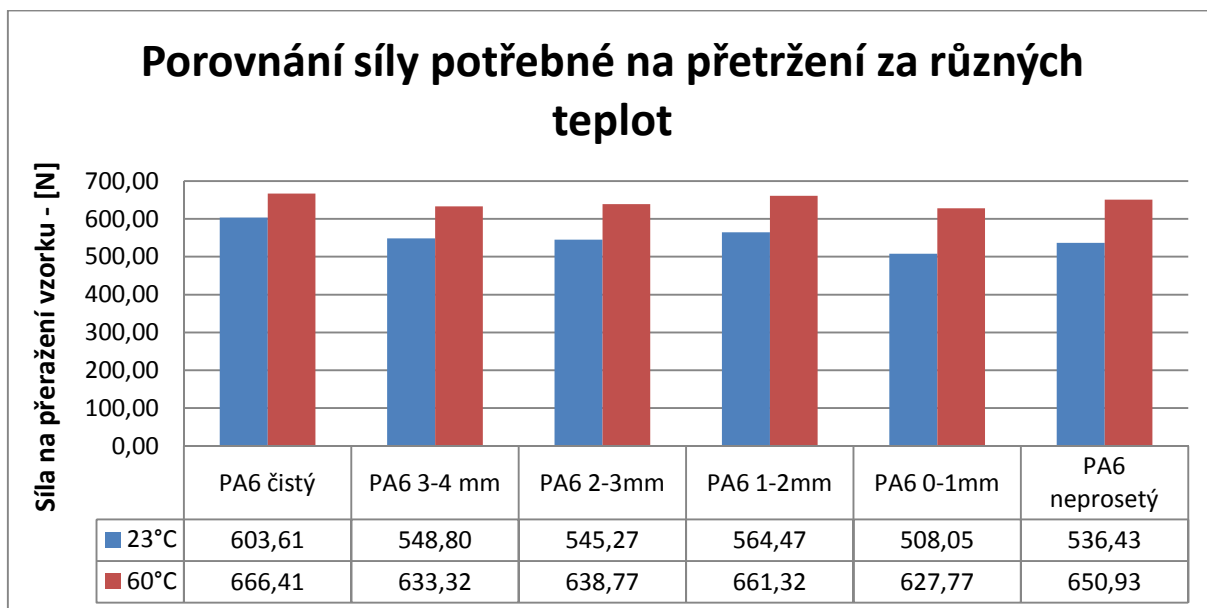
Obr. 58 Síla na přetržení při 23°C

Z grafu (obr.58) je patrné, že nejnižší hodnotu na přeražení vykazuje recyklát o velikosti částic 0 – 1 mm a to až o 16% nižší než PA6 čistý. Naopak nejvyšší hodnotu na přeražení oproti PA6 čistému vykazuje recykláž s velikostmi částic 1 – 2 mm a to o 6 % nižší než PA6 čistý.



Obr. 59 Síla na přetržení při 23°C

Z grafu (obr.59) můžeme konstatovat, že oproti grafu (obr.58) nejsou rozdíly hodnot tak markantní. Zatím co při 23°C se hodnoty lišily až o 10%, tak při teplotě 60°C se hodnoty liší přibližně o 5%.



Obr. 60 Porovnání síly na přetržení za různých teplot

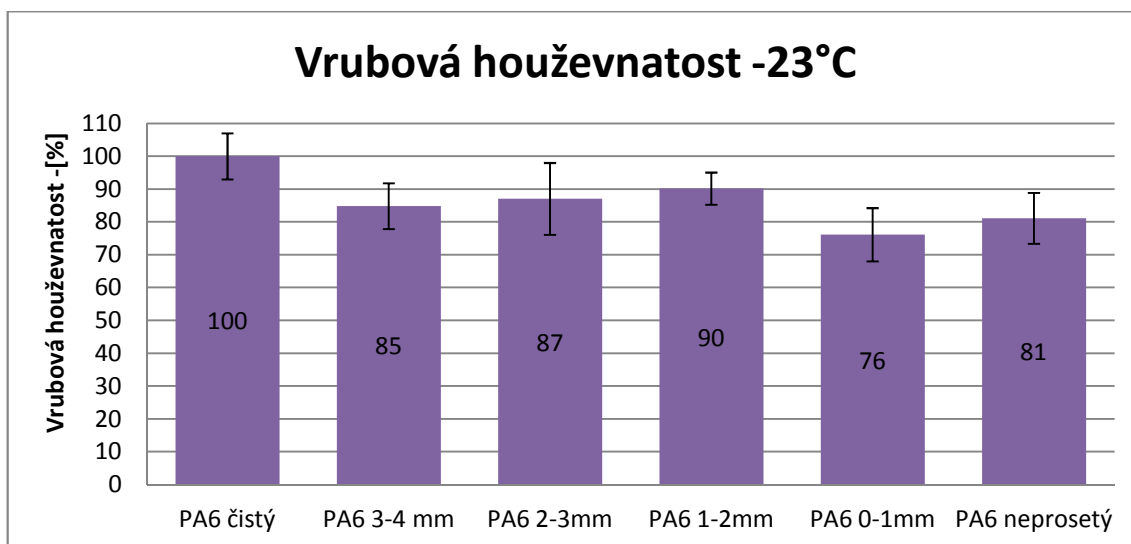
Graf (obr.60) porovnává sílu potřebnou na přetržení za teploty 23°C a za teploty 60°C. Z grafu je patrné, že síla potřebná na přetržení byla větší za teploty 60°C. Nejmenší sílu na přeražení vykazuje recyklát s velikostmi částic 0 – 1 mm a to až o 16% nižší oproti PA6 čistému. Jak je patrné z grafu, všechny vzorky za obou teplot měly oproti PA6 čistému nižší potřebou sílu na přeražení.

10.2.2 Vyhodnocení vrubové houževnatosti

Každý ze vzorků materiálu byl podroben deseti měření při dvou různých teplotách a to při pokojové teplotě 23°C a při teplotě 60°C. V tabulce (tab. 16) jsou zaznamenány statistické veličiny jako aritmetický průměr a směrodatná odchylka. V grafu jsou vyznačeny hodnoty vrubové houževnatosti v procentech, přičemž PA6 čistý představuje 100% a ostatní hodnoty se od této nominální hodnoty odvíjejí. Všechny naměřené hodnoty je možno najít v příloze P V.

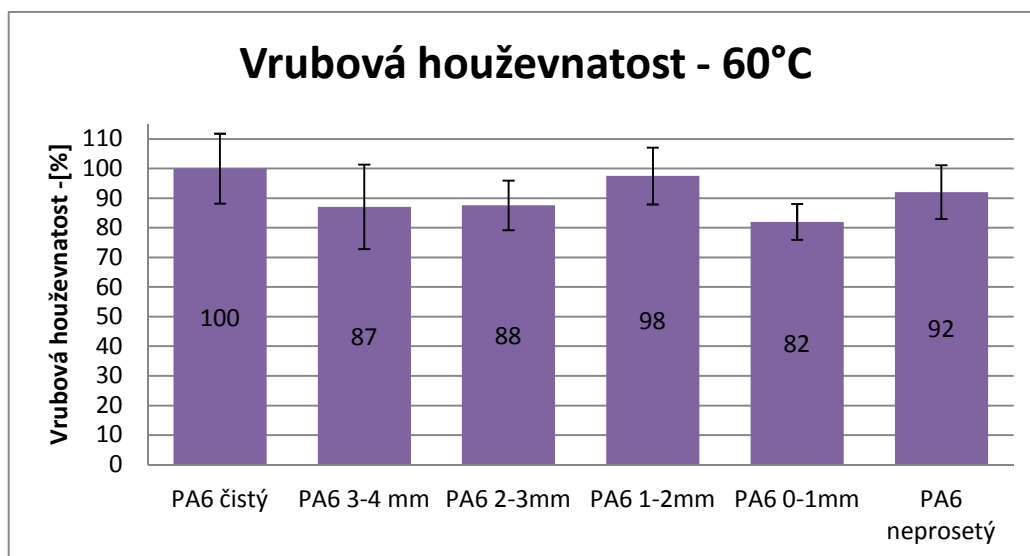
Tab. 16 Vrbová houževnatost vzorků

Materiál PA6	Vrbová houževnatost					
	Čistý [kJ. m ⁻²]	3-4mm [kJ. m ⁻²]	2-3mm [kJ. m ⁻²]	1-2mm [kJ. m ⁻²]	0-1mm [kJ. m ⁻²]	Neprosetý [kJ. m ⁻²]
	23°C					
\bar{x}	6,94	5,89	6,04	6,26	5,28	5,63
S	0,49	0,41	0,66	0,31	0,43	0,44
	60°C					
\bar{x}	13,71	11,94	12,01	13,37	11,24	12,63
S	1,62	1,70	1,01	1,28	0,68	1,14



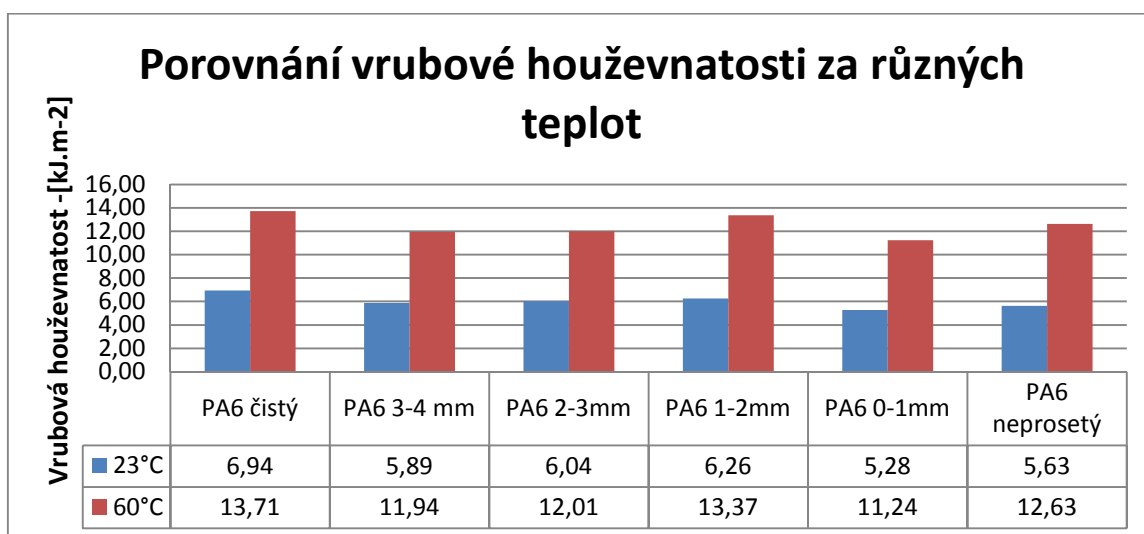
Obr. 61 Vrbová houževnatost při 23°C

Z grafu (obr.61) je patrné, že žádná z velikostí částic recyklátu nemá větší vrbovou houževnatost jako PA6 čistý. Nejnížší vrbovou houževnatost vykazuje PA6 s velikostí částic recyklátu 0 – 1 mm a to až o 24% nižší oproti PA 6 čistému. Naopak nejvíce se přibližuje PA6 čistému PA6 s velikostí částic recyklátu 1 – 2 mm.



Obr. 62 Vrubová houževnatost při 60°C

Z grafu (obr.62) lze konstatovat, že stejně jako za teploty 23°C má nejnižší vrubovou houževnatost recyklát s velikostí částic 0 – 1 mm a to o 18% nižší než má PA 6 čistý. Naopak nejbližší vrubové houževnatosti PA6 čistého má recyklát s velikostí částic 1 – 2 mm. Oproti PA6 čistému se liší jen o 2%.



Obr. 63 Porovnání vrubové houževnatosti za Z různých teplot

Graf (obr.63) porovnává vrubovou houževnatost za teploty 23°C a za teploty 60°C. grafu je patrné, že za při teplotě 60°C měly vzorky přibližně 2x vyšší vrubovou houževnatost oproti vrubové houževnatosti při teplotě 23°C. Nejmenší sílu na přeražení vykazuje recyklát s velikostmi částic 0 – 1 mm a to až o 24% při teplotě 23°C a o 18% při teplotě 60°C nižší oproti PA6 čistému. Jak je patrné z grafu, všechny vzorky za obou teplot měly oproti PA6 čistému nižší vrubovou houževnatost.

10.3 Zkouška tvrdosti Shore D

Pro zkoušku tvrdosti Shore D byl použit tvrdoměr firmy OMAG model ART 13, s indikátorem tvaru kuželu z oceli. Tvrdoměr se skládá z těla tvrdoměru s indikační sondou a vyhodnocovacího zařízení s mikroprocesorem. Tento přístroj pracuje poměrně rychle a jednoduše. Zkoušení bylo provedeno podle normy EN ISO 868. Vzorek byl nejprve umístěn na stojan a poté byla přitlačení indentoru na povrch zkušebního tělesa započata zkouška. 5 sekundách se na displeji zobrazila hodnota tvrdosti Shore D. Tvrdost Shore D je určena z hloubky vtisku indentoru a rozsah její stupnice je pak 0 - 100 Shore.



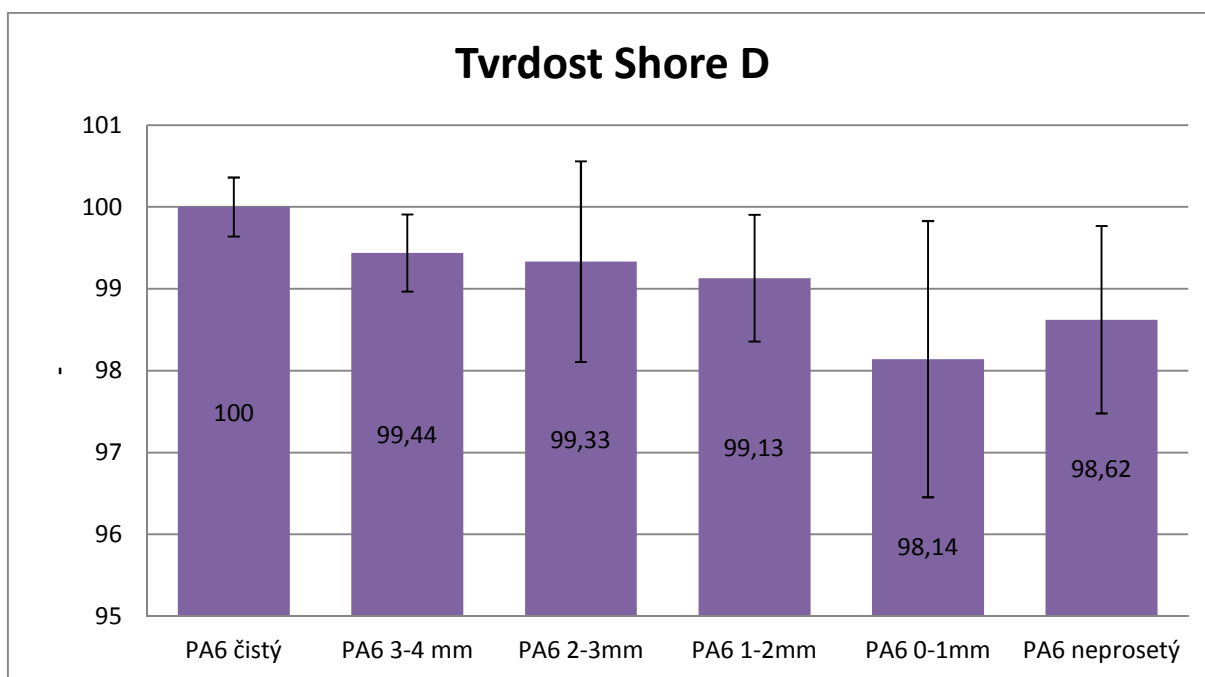
Obr. 64 Tvrdoměr Shore D

10.3.1 Vyhodnocení tvrdosti Shore D

Každý ze vzorků materiálu byl podroben deseti měření při pokojové teplotě 23°C. Celkově bylo tedy provedeno 70 měření. V tabulce (tab. 17) jsou zaznamenány statistické veličiny jako aritmetický průměr a směrodatná odchylka. V grafu jsou vyznačeny hodnoty tvrdosti Shore D v procentech, přičemž PA6 čistý představuje 100% a ostatní hodnoty se od této nominální hodnoty odvíjejí.

Tab. 17 Tvrdość Shore D

číslo měření	Tvrdość Shore D					
	PA6 čistý	PA6 3-4 mm	PA6 2-3mm	PA6 1-2mm	PA6 0-1mm	PA6 neprosetý
1.	74,4	76	75,1	74,9	73,8	73,3
2.	75,2	73,1	74,9	75,1	73,9	73,5
3.	74,7	73,3	74,6	75,8	74,6	73,8
4.	74,3	73,9	74,4	75,6	72,4	72,7
5.	75	74,6	74,8	73,1	72,9	73,3
6.	75,4	75,6	74,3	72,1	73,1	73,3
7.	74,9	74,5	73,8	72,6	72,3	74,5
8.	74,6	74,2	73,6	73,9	74,7	73,2
9.	74,5	73,9	73,5	74,2	72,9	75,4
10.	74,8	74,5	73,8	74	73,3	74,5
\bar{x}	74,8	74,4	74,3	74,1	73,4	73,8
S	0,4	0,9	0,6	1,3	0,8	0,8



Obr. 65 Tvrdość Shore D

Z grafu (obr.65) je patrné, že hodnoty tvrdosti se liší maximálně ve 2%. Nejnižší hodnota tvrdosti Shore je u recyklátu s velikostmi částic 0 – 1 mm a to o přibližně o 2 % nižší než je tvrdost PA6 čistého. PA6 čistému se naopak nejvíce přibližuje hodnota tvrdosti recyklátu s velikostmi částic 3 – 4 mm.

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Vzorky byly podrobeny celkem třem mechanickým zkouškám:

- tahové zkoušce,
- zkoušce vrubové houževnatosti
- tvrdosti Shore D.

První zkouškou byla tahová zkouška. U této zkoušky byl vyhodnocován modul pružnosti, mez pevnosti a poměrné prodloužení. Modul pružnosti u zkoušených vzorků byl vždy největší u PA6 čistého a to jak za teploty 23°C, tak za teploty 60°C. Za teploty 23°C měl nejnižší modul pružnosti recyklát s velikostmi svých částic 1 – 2 mm a to o 16 % nižší než PA6 čistý. Za teploty 60°C měl nejnižší modul recyklát s velikostmi částic 0 – 1 mm a to přibližně o 16% nižší než PA6 čistý. Při porovnání modulu pružnosti za obou teplot je patrné, že za teploty 60°C jsou moduly pružnosti přibližně 3x menší oproti teplotě 23°C. Dalším vyhodnocovaným parametrem byla mez pevnosti. Naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu různě velkých částic recyklátu se při teplotě 23°C od základní hodnoty PA6 téměř neliší. Největší rozdíl je u PA6 s velikostí částic 1 - 2 mm, jehož mez pevnosti je v průměru o 1,7 % nižší oproti PA6 čistý. Při teplotě 23°C jsou rozdíly meze pevnosti při teplotě 60°C markantnější. Nejnižší mez pevnosti má v tomto případě PA6 s velikostmi částic 0 – 1 mm a to 89% PA6 čistého. Při teplotě 60°C se pohybovala mez pevnosti kolem 40 MPa a je to přibližně o polovinu menší, než se pohybují meze pevnosti za teploty 23°C. Třetím vyhodnocovaným parametrem u tahové zkoušky bylo poměrné prodloužení. Při teplotě 23°C měl nejnižší hodnotu poměrného prodloužení PA6 s velikostmi částic 3 – 4 mm. Nejvyšší hodnotu poměrného prodloužení měl PA6 s velikostmi částic 1 – 2 mm a to přibližně o 3% nižší než PA 6 čistý. Za teploty 60°C dosáhly všechny velikosti částic recyklátu většího poměrného prodloužení než PA 6 čistý. Největšího poměrného prodloužení dosáhl recyklát s velikostí částic 1 – 2 mm a PA6 neprosetý a to o 18% vyššího oproti PA6 čistému. Za teploty 60°C mají všechny velikosti částic recyklátu větší poměrné prodloužení a to až 6x vyšší oproti teplotě 23°C. Celkovým zhodnocením všech výsledků zkoušky tahem dopadla nejlépe směs PA6 čistý.

Druhou zkouškou byla zkouška vrubové houževnatosti. U této zkoušky byly vyhodnocovány dva parametry, síla na přetržení a vrubová houževnatost. Při teplotě 23°C je patrné, že nejnižší hodnotu na přeražení vykazoval recyklát o velikosti částic 0 – 1 mm a to až o 16% nižší než PA6 čistý. Za teploty 60°C můžeme konstatovat, že oproti teplotě 23°C nejsou rozdíly

hodnot tak markantní. Zatímco při 23°C se hodnoty lišily až o 16%, tak při teplotě 60°C se hodnoty liší přibližně o 5%. Při porovnání obou teplot je patrné, že síla potřebná na přetržení byla větší za teploty 60°C. Jak je patrné z grafu, všechny vzorky za obou teplot měly oproti PA6 čistému nižší potřebou sílu na přeražení. Druhým vyhodnocovaným parametrem byla vrubová houževnatost. Při teplotě 23°C je patrné, že žádná z velikostí částic recyklátu nemá větší vrubovou houževnatost jako PA6 čistý. Nejnižší vrubovou houževnatost vykazuje PA6 s velikostí částic recyklátu 0 – 1 mm a to až o 24% nižší oproti PA 6 čistému. Za teploty 60°C lze konstatovat, že stejně jako za teploty 23°C má nejnižší vrubovou houževnatost recyklát s velikostí částic 0 – 1 mm a to o 18% nižší než má PA 6 čistý. Při porovnání obou teplot je patrné, že za při teplotě 60°C měly vzorky přibližně 2x vyšší vrubovou houževnatost oproti vrubové houževnatosti při teplotě 23°C.

Třetí zkouškou byla zkouška tvrdosti Shore D. Je patrné, že hodnoty tvrdosti se liší maximálně ve 2%. Nejnižší hodnota tvrdosti Shore je u recyklátu s velikostmi částic 0 – 1 mm a to o přibližně o 2 % nižší než je tvrdost PA6 čistého.

Při celkovém shodnocení je možné říci, že PA6 čistý dosahoval nejlepších mechanických vlastností. Je tedy pravděpodobné, že recyklát mechanické vlastnosti spíše zhoršuje. Tento jev by se pravděpodobně výrazně projevil při opakovaném recyklování tohoto materiálu. Dále je možno konstatovat, že nejhorší mechanické vlastnosti oproti PA6 čistému téměř u všech zkoušek měl PA6 s velikostmi částic 0 – 1 mm. U zkoušky vrubové houževnatosti dosáhl vyšších hodnot Polyamid při teplotě 60°C, je možné si to vysvětlit tím, že za vyšší teploty má materiál menší křehkost a proto je vrubová houževnatost vyšší.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zkoumání vlivu velikosti částic recyklátu na mechanické vlastnosti výrobku. Před samotnou praktickou částí, která měla zkoumat mechanické vlastnosti předcházela část teoretická. Teoretická část se sestavovala ze čtyř částí. V první části byly obecně popsány polymery. Dále byl v této části podrobněji popsán Polyamid 6, který byl v praktické části podrobován mechanickým zkouškám. V druhé části byl popsán proces vstřikování. Pomocí této technologie byly zhotoveny zkušební vzorky. Třetí část se zabývala mechanickými zkouškami, které byly používány v praktické části. Závěrečná část se zabývala recyklací polymerů a to především mechanickou recyklací.

Praktická část byla předmětem zkoumání mechanických vlastností Polyamidu 6. Vzorky byly podrobeny tahové zkoušce, zkoušce vrubové houževnatosti a zkoušce tvrdosti Shore D. Tahová zkouška a zkouška vrubové houževnatosti probíhala za dvou různých teplot, a to za teploty 23°C a 60°C. Pro zkoušky bylo zhotoveno 6 sad vzorků. Byl to PA6 čistý, Polyamid recyklovaný s neprosetými částicemi a PA6 recyklovaný s prosetými částicemi velikostí 0 – 1 mm, 1 – 2 mm, 2- 3 mm a 3 – 4 mm.

Výsledky měření byly zpracovány do sloupcových grafů. Ke každé teplotě byl zhotoven jeden graf a u každého vyhodnocovaného parametru byl také zhotoven graf, který porovnával vlastnosti za obou teplot.

Z výsledků je patrné, že recyklát mechanické vlastnosti spíše zhoršuje. Rozdíly mechanických vlastností recyklátu oproti PA6 čistému nejsou tak markantní. Větší rozdíly by se pravděpodobně objevily při opakované recyklaci. K tomuto tvrzení se přiklání i teorie, že není dovoleno používat plastové recyklované díly v případech, kdy je potřeba zaručit mechanické vlastnosti konstrukčních dílů. Nejhorší mechanické vlastnosti vykazoval podle předpokladu PA6 s velikostmi částic recyklátu 0- 1 mm.

Recyklát by neměl být používán pro konstrukční díly, u kterých je nutno zaručit mechanické vlastnosti. Naopak u méně namáhaných dílů by mělo být přidávání recyklátu do čistého polymeru samozřejmostí a to jak z důvodu snížení nákladů podniku na nákup nového materiálu, tak z důvodu snížení výroby nových polymerů a spotřebou surovin s ní spojenou.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [17] *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [2] *Plasty* [online]. [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/download/plasty.pdf>
- [3] *Rozdělení plastů podle aplikace*. In: [online]. [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: http://www.libeos.cz/upload/06-aplikace_pyramida.jpg
- [4] *Struktura polymerů* [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzv1a/FMkomplet3.htm>
- [5] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, použití*. Praha, 2006.
- [6] BĚHÁLEK, Luboš. *Navlhavost polymerů* [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c5/Navlhavost.pdf
- [7] Bobčík, L., aj. *Formy pro zpracování plastu; I. díl – Vstrikování termoplastu*. 2. opr. vyd. Uniplast Brno, 1999.
- [8] Manas, M., Vlcek, J. *Aplikovaná reologie*. 1. vyd. UTB Zlín, 2001. ISBN 80-7318-039-1.
- [9] Custompartnet.com [online]. 2007 [cit. 2014-01-11]. Injection Molding. Dostupné z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>>.
- [10] Manas, M.- Helštýn, J.: *Výrobní stroje a zařízení – Gumárenské a plastikářské stroje II*, VUT Brno, 1990
- [11] *Vstříkovací formy* [online]. [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/htn__tvareci_nastroje_vstrikovaci_formy__zak.pdf
- [12] BOBČÍK, L. a kol. *Formy pro zpracování plastů: I.díl - Vstříkování termoplastů*. 2.vydání – Brno: Uniplast, 1999. 134s.
- [13] [Ust.fme.vutbr.cz](http://ust.fme.vutbr.cz) [online]. 2005, Poslední aktualizace: 20.12.2010 [cit. 2014-4-15]. Odbor technologie tváření kovů a plastů. Dostupné z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/htn__tvareci_nastroje_vstrikovaci_formy__zak.pdf>.
- [14] STANĚK, M. *přednášky T5KF*

- [15] MENGES, Georgie. MICHAELL, Walter., MOHREN, Paul. *How to make Injection Molds*. 3rd edition. Munich: Carl Hanser Verlag, 2001. 612 s.
- [16] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, c2001, 505 s. ISBN 80-720-4193-2.
- [17] RYBNÍKÁŘ, F., et al. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 420 s.c
- [18] SCHÄTZ, Miroslav a Petr VONDRÁČEK. *Zkoušení polymerů*. 2., přepr. a dopl. vyd. Praha: VŠCHT, 1988, 276 s.
- [19] Tvrdost (mikrotvrdost) – významná mechanická vlastnost materiálů. CHEMPOINT: Vědci pro průmysl a praxi [online]. 2012 [cit. 2014-15-04]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/tvrdost-mikrotvrdost>
- [20] ČSN EN ISO 2039-2. *Plasty - stanovení tvrdosti – Část 2: Tvrdost dle Rockwella*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [21] ČSN EN ISO 868. *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtláčováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 12 s
- [22] Strojírenská technologie – 1. ročník Vlastnosti materiálů – pružnost, pevnost. *Strojírenství* [online]. 2005-2007 [cit. 2012-11-04]. Dostupné z: http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php
- [23] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2002. 174 s.
- [24] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999, 203 s.
- [25] KUDLÁČEK, Ivan. *Ekologie průmyslu*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997, 209 s
- [26] MLEZIVA, J.; ŠŇUPÁREK, J. *Polymery výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 2000. 544 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PA6	Polyamid 6
VVS	Vyhřívaný vtokový systém
SVS	Studený vtokový systém
S	Směrodatná odchylka
N	Počet měření
X	Aritmetický průměr [mm]
KC	Vrubová houževnatost [kJ.m ²]
F _G	Tíhová síla kladiva [N]
K	Nárazová práce [J]
F ₁	Zatěžující síla [N]
F ₀	Síla předzatěžující [N]
U	Velikost úhlopříčky [mm]
S	Plocha [mm ²]
H	Hloubka vtisku
D	Průměr indentoru [mm]
Z	Kontrakce [%]
A	Tažnost [%]
R _p	Smluvní mez kluzu [MPa]
F	Síla na mezi kluzu [N]
F _{max}	Maximální síla [N]
S _u	Průřez zkušebního tělesa po přetržení [mm]
S _o	Průřez zkušebního tělesa [mm]
R _m	Napětí na mezi pevnosti [MPa]
R _e	Napětí na mezi kluzu [MPa]

S	Mez přetržení [MPa]
P	Mez pevnosti [MPa]
K	Mez kluzu [MPa]
E	Mez elasticity
U	Mez úměrnosti [MPa]
ε	Poměrné prodloužení
b_u	Šířka pro přetržení [mm]
b_0	Počáteční šířka [mm]
a_u	Výška pro přetržení [mm]
a_0	Počáteční výška [mm]
d_u	Průměr po přetržení [mm]
d_0	Počáteční průměr [mm]
L_u	Délka pro přetržení [mm]
L_0	Počáteční délka [mm]
G	Modul pružnosti ve smyku [MPa]
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. rozdělení polymerů [2]</i>	12
<i>Obr. 2. Rozdělení plastů podle aplikace [3]</i>	13
<i>Obr. 3. Polymerní makromolekuly [4]</i>	14
<i>Obr. 4. Nadmolekulární struktura amorfních plastů [1]</i>	15
<i>Obr. 5. Nadmolekulární struktura krystalických plastů [1]</i>	15
<i>Obr. 6. Sférolitická struktura semikrystalických termoplastů [1]</i>	16
<i>Obr. 7. Podmínky sušení vybraných polymerů [6]</i>	18
<i>Obr. 8. Vstřikovací cyklus [8]</i>	19
<i>Obr. 9. Vstřikovací stroj [9]</i>	20
<i>Obr. 10. Vstřikovací forma [9]</i>	21
<i>Obr. 11. Studený vtokový systém</i>	22
<i>Obr. 12. Srovnání základních typů kanálů podle smáčivého čísla</i>	23
<i>Obr. 13. plný kuž. Vtok [12]</i>	23
<i>Obr. 14. tunelový vtok [12]</i>	24
<i>Obr. 15. filmový vtok [12]</i>	24
<i>Obr. 16. banánový vtok [12]</i>	24
<i>Obr. 17. Vyhříváný vtokový systém [14]</i>	25
<i>Obr. 18. Normalizované rozměry pro zkušební těleso pro tahovou zkoušku plastů</i>	29
<i>Obr. 19. Typy pracovních diagramů polymerních materiálů [17]</i>	30
<i>Obr. 20. Pracovní diagram tahové zkoušky [17]</i>	30
<i>Obr. 21. Princip měření tvrdosti kuličkou dle Brinella [18]</i>	33
<i>Obr. 22. Měření tvrdosti dle Vickerse [19]</i>	35
<i>Obr. 23 Tvrdost dle Rockwella</i>	35
<i>Obr. 24 Schematické zobrazení zkušebního hrotu typu Shore A (vlevo) a typu shore D [21]</i>	37
<i>Obr. 25. Typy používaných vrubů [16]</i>	38
<i>Obr. 26. Schéma Charpyho kladiva [22]</i>	38
<i>Obr. 27. Schéma recyklačního cyklu [23]</i>	41
<i>Obr. 28. Linka na zpracování tříděného plastového odpadu [24]</i>	42
<i>Obr. 29. Nožový mlýn [24]</i>	43
<i>Obr. 30. Talířové nárazové mlýny [24]</i>	44
<i>Obr. 31 Granulát PA6</i>	48

<i>Obr. 32</i> Sušárna Thermolift	50
<i>Obr. 33</i> Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 H	51
<i>Obr. 34</i> zkušební tělesa včetně vtokového systému	53
<i>Obr. 35</i> Nožový mlýn	55
<i>Obr. 36</i> Pracovní prostor mlýnu	56
<i>Obr. 37</i> Síto mlýnu	56
<i>Obr. 38</i> Nepřesetá drť	57
<i>Obr. 39</i> AS 200 Basic	57
<i>Obr. 40</i> Síto přístroje na prosévání	58
<i>Obr. 41</i> Velikosti částic 3 – 4 mm	59
<i>Obr. 42</i> Velikosti částic 2 – 3 mm	59
<i>Obr. 43</i> Velikosti částic 1 – 2 mm	59
<i>Obr. 44</i> Velikosti částic 0 – 1 mm	60
<i>Obr. 45</i> Zwick 1456	62
<i>Obr. 46</i> Upnutí v temperanční komoře	63
<i>Obr. 47</i> Modul pružnosti při teplotě 23°C	64
<i>Obr. 48</i> Modul pružnosti při teplotě 60°C	64
<i>Obr. 49</i> Porovnání modulu pružnosti za různých teplot	65
<i>Obr. 50</i> Mez pevnosti při teplotě 23°C	66
<i>Obr. 51</i> Mez pevnosti při teplotě 60°C	66
<i>Obr. 52</i> porovnání meze pevnosti za různých teplot	67
<i>Obr. 53</i> poměrné prodloužení při 23°C	68
<i>Obr. 54</i> Poměrné prodloužení při 23°C	68
<i>Obr. 55</i> porovnání poměrného prodloužení za různých teplot	69
<i>Obr. 56</i> Charpyho kladivo	70
<i>Obr. 57</i> Přístroj na výrobu vrubů	70
<i>Obr. 58</i> Síla na přetržení při 23°C	71
<i>Obr. 59</i> Síla na přetržení při 23°C	72
<i>Obr. 60</i> Porovnání síly na přetržení za různých teplot	72
<i>Obr. 61</i> Vrubová houževnatost při 23°C	73
<i>Obr. 62</i> Vrubová houževnatost při 60°C	74
<i>Obr. 63</i> Porovnání vrubové houževnatosti za Z různých teplot	74
<i>Obr. 64</i> Tvrdoměr Shore D	75

Obr. 65 Tvrdost Shore D..... 76

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. srovnání vlastností vybraných polyamidů [5]</i>	17
<i>Tab. 2. Ekonomické a technické aspekty pro rozhodování o použití VVS [15]</i>	26
<i>Tab. 3. Rozměry těles pro tahovou zkoušku plastů</i>	29
<i>Tab. 4. Hodnoty přídatných zatížení, předběžného zatížení a průměrů měřící kuličky [20]</i>	36
<i>Tab. 5 Vlastnosti Novamid PA6 B30 P</i>	49
<i>Tab. 6 Základní parametry vstřikovacího stroje</i>	52
<i>Tab. 7 Nastavení vstřikovacích podmínek</i>	52
<i>Tab. 8 Procentuální zastoupení</i>	54
<i>Tab. 9 parametry nožového mlýnu</i>	55
<i>Tab. 10 Technické parametry AS 200 Basic</i>	58
<i>Tab. 11 Poměr hmotností různých velikostí částic recyklátu</i>	60
<i>Tab. 12 Modul pružnosti v tahu</i>	63
<i>Tab. 13 Mez pevnosti v tahu</i>	65
<i>Tab 14 Poměrné prodloužení v tahu</i>	67
<i>Tab. 15 Síla potřebná k přeražení vzorků</i>	71
<i>Tab. 16 Vrubová houževnatost vzorků</i>	73
<i>Tab. 17 tvrdost Shore D</i>	76
<i>Tab. 18 Hodnoty modulu pružnosti při 23 °C</i>	89
<i>Tab.19 Hodnoty modulu pružnosti při 60 °C</i>	89
<i>Tab. 20 Mez pevnosti v tahu při 23 °C</i>	90
<i>Tabulka 21 Mez pevnosti v tahu při 60 °C</i>	90
<i>Tab2. 22 Poměrné prodloužení při teplotě 23°C</i>	91
<i>Tab. 23 Poměrné prodloužení při teplotě 60°C</i>	91
<i>Tab. 24 Síla potřebná na přeražení při teplotě 23°C</i>	92
<i>Tab. 25 Síla potřebná na přeražení při teplotě 60°C</i>	92
<i>Tab. 26 Vrubová houževnatost při 23°C</i>	93
<i>Tab. 27 Vrubová houževnatost při 60°C</i>	93

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Modul pružnosti v tahu
- P II Mez pevnosti
- P III Poměrné prodloužení
- P IV Síla potřebná na přeražení vzorků
- P V Vrubová houževnatost

PŘÍLOHA P I: MODUL PRUŽNOSTI V TAHU

Tab. 18 Hodnoty modulu pružnosti při 23 °C

Modul pružnosti 23°C						
Matariál PA6	Čistý [MPa]	3 – 4 mm [MPa]	2 – 3 mm [MPa]	1 – 2 mm [MPa]	0-1 mm [MPa]	Neprosetý [MPa]
1.	3610	3590	3720	3910	3000	2900
2.	3400	3410	3120	3100	2590	2970
3.	3340	3340	3790	2150	3380	3450
4.	3210	3620	3520	2840	3440	3540
5.	3450	3860	3210	3180	2980	2730
6.	3430	3930	3560	3340	3230	3460
7.	3430	3440	3270	3270	2840	3090
8.	3450	3890	3320	2180	3380	2170
9.	3400	3530	3700	3170	2580	3580
10.	3730	3300	3630	2520	3430	3230
\bar{x}	3445	3591	3484	2966	3085	3112
S	141	232	237	550	336	441

Tab.19 Hodnoty modulu pružnosti při 60 °C

Modul pružnosti 60°C						
Matariál PA6	Čistý [MPa]	3 – 4 mm [MPa]	2 – 3 mm [MPa]	1 – 2 mm [MPa]	0-1 mm [MPa]	Neprosetý [MPa]
1.	995	3590	3720	3910	3000	2900
2.	1000	3410	3120	3100	2590	2970
3.	1000	3340	3790	2150	3380	3450
4.	1170	3620	3520	2840	3440	3540
5.	1010	3860	3210	3180	2980	2730
6.	1020	3930	3560	3340	3230	3460
7.	983	3440	3270	3270	2840	3090
8.	3450	3890	3320	2180	3380	2170
9.	3400	3530	3700	3170	2580	3580
10.	3730	3300	3630	2520	3430	3230
\bar{x}	3445	3591	3484	2966	3085	3112
S	141	232	237	550	336	441

PŘÍLOHA P II: MEZ PEVNOSTI V TAHU

Tab. 20 Mez pevnosti v tahu při 23 °C

Mez pevnosti 23°C						
Matariál PA6	Čistý [MPa]	3 – 4 mm [MPa]	2 – 3 mm [MPa]	1 – 2 mm [MPa]	0-1 mm [MPa]	Neprosetý [MPa]
1.	81,3	79,2	81,2	79,3	79	79,1
2.	81	79,2	81,5	79	79,1	79,7
3.	81	79,4	81	79,7	80,8	79,8
4.	80,6	79,1	81	79,6	80,5	80,5
5.	80,6	79	80,8	79,9	79,1	79,9
6.	81,4	78,8	81,1	79,9	80,5	78,8
7.	80,6	78,8	80,8	79,9	80,8	80,5
8.	80,6	79,3	80,8	80,1	80,6	80,1
9.	81,2	79	80,4	79,9	80,8	80,2
10	81	79,8	80,4	79,6	80,1	79,9
\bar{x}	80,9	79,2	80,9	79,7	80,1	79,9
S	0,3	0,3	0,3	0,3	0,8	0,6

Tabulka 21 Mez pevnosti v tahu při 60 °C

Mez pevnosti 60°C						
Matariál PA6	Čistý [MPa]	3 – 4 mm [MPa]	2 – 3 mm [MPa]	1 – 2 mm [MPa]	0-1 mm [MPa]	Neprosetý [MPa]
1.	42,1	37,8	39,3	36,9	36,7	38,6
2.	42	39,1	39	38,9	38,2	38,3
3.	43,1	37,9	39,7	38,7	36,9	37,6
4.	42,2	38,1	39,3	38,7	38,6	38,3
5.	44,2	39	39,8	39	36,9	38
6.	42,6	37,9	39,3	38,7	38,1	38,5
7.	42,6	38	39,1	39,8	38,7	37,8
8.	42,3	38	39	39,8	37,5	37,9
9.	42,8	38,4	38,4	38,7	38,9	38,3
10.	42,1	38,6	39,2	39	38,9	38,1
\bar{x}	42,6	38,3	39,2	38,8	37,9	38,1
S	0,7	0,5	0,4	0,8	0,9	0,3

PŘÍLOHA P III : POMĚRNÉ PRODLOUŽENÍ V TAHU

Tab. 22 Poměrné prodloužení při teplotě 23°C

Poměrné prodloužení 23°C						
Matariál PA6	Čistý [MPa]	3 – 4 mm [MPa]	2 – 3 mm [MPa]	1 – 2 mm [MPa]	0-1 mm [MPa]	Neprosetý [MPa]
1.	5,8	5,5	5,6	5,4	5,7	5,7
2.	5,9	5,6	5,8	5,5	5,6	5,7
3.	6	5,5	5,5	5,9	5,6	5,6
4.	5,6	5,4	5,6	5,7	5,5	5,5
5.	5,8	5,5	5,7	5,6	6	5,7
6.	5,7	5,4	5,5	5,6	5,5	5,5
7.	5,9	5,5	5,7	5,5	5,8	5,7
8.	5,8	5,5	5,6	6	5,5	5,9
9.	5,9	5,5	5,5	5,6	5,6	5,5
10.	6,1	5,4	5,5	5,8	5,5	5,6
\bar{x}	5,85	5,48	5,6	5,66	5,63	5,64
S	0,14	0,06	0,11	0,19	0,16	0,13

Tab. 23 Poměrné prodloužení při teplotě 60°C

Poměrné prodloužení 60°C						
Matariál PA6	Čistý [MPa]	3 – 4 mm [MPa]	2 – 3 mm [MPa]	1 – 2 mm [MPa]	0-1 mm [MPa]	Neprosetý [MPa]
1.	32,1	26,3	28,5	31,7	26,3	29
2.	25,5	31,4	28,7	27,7	27,5	29,6
3.	24,8	29,4	28,6	32,4	29,6	31,9
4.	27,6	29,3	29,2	30,3	27,2	29,6
5.	25	27,6	27	28,6	32,3	33
6.	25,2	29,7	27,2	31,7	31,1	30,4
7.	23,9	29,7	28,7	32,3	26,3	32,6
8.	23,6	28,6	29	31,3	32,5	32,4
9.	27,1	27,1	28,6	29,9	36,6	29,4
10.	25,9	26,2	27,7	32	29,6	29,5
\bar{x}	26,07	28,53	28,32	30,79	29,9	30,74
S	2,46	1,69	0,75	1,62	3,30	1,55

PŘÍLOHA P IV: SÍLA POTŘEBNÁ NA PŘERAŽENÍ VZORKŮ

Tab. 24 *Síla potřebná na přeražení při teplotě 23°C*

Síla pro třetržení						
Matariál PA6	Čistý [N]	3 – 4 mm [N]	2 – 3 mm [N]	1 – 2 mm [N]	0-1 mm [N]	Neprosetý [N]
1.	635,23	568,43	526,84	526,84	540,70	500,37
2.	683,13	549,53	519,28	603,72	491,55	512,98
3.	586,84	471,38	564,65	572,21	492,81	534,40
4.	560,87	586,08	569,69	547,01	502,89	572,21
5.	555,83	490,29	547,01	569,32	506,67	525,58
6.	700,77	515,50	467,60	534,98	481,47	558,35
7.	586,08	563,39	534,40	600,78	539,37	572,36
8.	534,40	581,57	568,31	592,34	479,36	568,37
9.	589,12	592,66	583,59	546,29	503,36	512,37
10.	603,85	569,16	571,36	551,26	542,37	507,37
\bar{x}	603,61	548,80	545,27	564,47	508,05	536,43
S	54,2	42,1	34,7	27,5	24,3	28,8

Tab. 25 *Síla potřebná na přeražení při teplotě 60°C*

Síla pro přetržení						
Matariál PA6	Čistý [N]	3 – 4 mm [N]	2 – 3 mm [N]	1 – 2 mm [N]	0-1 mm [N]	Neprosetý [N]
1.	685,65	647,25	635,23	633,97	646,58	671,78
2.	675,56	637,75	669,26	655,40	625,15	647,84
3.	713,38	612,55	616,33	708,33	645,32	617,59
4.	661,70	646,58	636,49	689,43	623,89	675,56
5.	651,62	613,81	627,42	640,65	660,44	691,95
6.	622,63	620,11	636,49	683,65	615,37	690,69
7.	650,36	628,93	615,07	665,67	627,37	623,37
8.	657,50	630,25	650,36	631,37	610,67	637,65
9.	655,37	652,33	660,37	625,37	606,62	642,87
10.	690,33	643,66	640,65	679,37	616,33	609,99
\bar{x}	666,41	633,32	638,77	661,32	627,77	650,93
S	25,49	14,43	17,48	28,37	17,56	30,01

PŘÍLOHA P V: VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST

Tab. 26 Vrubová houževnatost při 23°C

Vrbová Houževnatost						
Matariál PA6	Čistý [kJ. m ⁻²]	3 – 4 mm [kJ. m ⁻²]	2 – 3 mm [kJ. m ⁻²]	1 – 2 mm [kJ. m ⁻²]	0-1 mm [kJ. m ⁻²]	Neprosetý [kJ. m ⁻²]
1.	7,29	5,88	5,93	6,08	5,92	5,15
2.	8,04	5,59	5,01	6,63	4,86	5,19
3.	6,30	5,83	6,74	6,70	4,74	5,53
4.	6,74	6,26	6,63	6,29	5,09	6,27
5.	6,95	5,00	7,12	5,98	5,16	5,31
6.	7,25	5,56	5,53	6,12	5,03	5,54
7.	6,60	6,24	5,39	6,71	5,89	6,19
8.	6,68	6,16	5,68	5,96	5,33	6,12
9.	6,81	6,02	6,22	6,04	5,76	5,22
10.	6,75	6,32	6,16	6,05	5,06	5,78
\bar{x}	6,94	5,89	6,04	6,26	5,28	5,63
S	0,49	0,41	0,66	0,31	0,43	0,44

Tab. 27 Vrubová houževnatost při 60°C

Vrbová Houževnatost						
Matariál PA6	Čistý [kJ. m ⁻²]	3 – 4 mm [kJ. m ⁻²]	2 – 3 mm [kJ. m ⁻²]	1 – 2 mm [kJ. m ⁻²]	0-1 mm [kJ. m ⁻²]	Neprosetý [kJ. m ⁻²]
1.	14,23	11,12	11,39	14,30	12,25	12,17
2.	11,39	10,06	11,07	12,45	10,99	13,12
3.	14,65	13,34	11,93	15,02	11,84	14,48
4.	14,23	11,46	13,28	15,80	10,48	12,32
5.	13,00	10,09	10,01	12,74	11,73	13,74
6.	13,23	11,17	11,99	13,37	10,63	13,80
7.	10,81	10,89	11,83	11,94	12,02	12,36
8.	15,59	13,59	13,02	12,37	10,37	10,90
9.	15,63	15,36	12,74	13,37	11,26	12,02
10.	14,37	12,37	12,83	12,37	10,86	11,33
	13,71	11,94	12,01	13,37	11,24	12,63
	1,62	1,70	1,01	1,28	0,68	1,14