

# Vliv typu a množství recyklátu na vlastnosti plastového výrobku

Bc. Jiří Straděj

---

Diplomová práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

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

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Straděj**  
Osobní číslo: **T11170**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv typu a množství recyklátu na vlastnosti  
plastového výrobku**

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 zadání vedoucího DP**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Vojtěch Šenkeřík**  
Ústav výrobního inženýrství

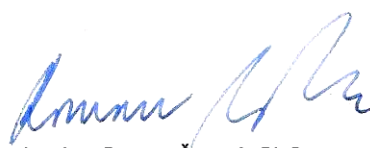
Datum zadání diplomové práce:

**8. února 2013**

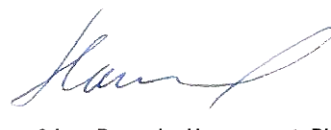
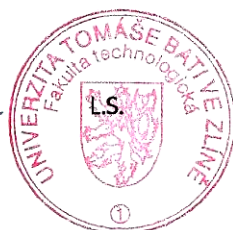
Termín odevzdání diplomové práce:

**10. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



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

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové 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 <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou 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 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> 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 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou 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 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 práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové 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. 2013

Straděj Jiří

---

<sup>1)</sup> 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 nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

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

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

<sup>2)</sup> 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).

<sup>3)</sup> 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**

Předložená diplomová práce se zabývá analýzou vlivu typu a množství recyklátu na mechanické vlastnosti. Zkoumaným materiálem je polykarbonát. Technologií pro přípravu vzorků bylo vstřikování. Recyklát byl vyroben ze stejného materiálu a bylo získáno několik různých typů recyklátu. Vzorky s různým procentuálním zastoupením a typem přidaného recyklátu byly následně podrobovány mechanickým zkouškám. Mezi tyto zkoušky patřila tahová zkouška, zkouška tvrdosti a zkouška vrubové houževnatosti. Z výsledků těchto zkoušek bylo možno stanovit nejvhodnější technologii výroby recyklátu a optimální procentuální zastoupení recyklátu v zadaném materiálu.

Klíčová slova: polykarbonát, vstřikování plastů, výroba recyklátu, zkoušky mechanických vlastností

## **ABSTRACT**

This diploma thesis analyzes influence of type and amount of recyclate on the mechanical properties of material. Method of sample creation was injection molding. Several types of recyclate were prepared from the same material. Material studied is polycarbonate. Samples with different volume and type of recyclate have been submitted to mechanical tests. Some of the tests were tensile test, hardness test and dent toughness test. Results of the tests provided optimal preparation technology and percentual volume of the recyclate for the studied material.

Keywords: polycarbonate, injection molding, production of recyclate, mechanical properties testing

Rád bych poděkoval panu Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi za metodické vedení, odbornou pomoc a cenné připomínky při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl také poděkovat panu Ing. Vladimíru Šumberovi za pomoc při realizaci praktické části.

*„Vzdělání není pouhým nashromážděním jednotlivých vědomostí, jako není těstem mouka, voda, sůl, kvasnice atd. dohromady naházené.“*

*Tomáš Garrigue Masaryk*

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

Dále prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně 10. 5. 2013



Podpis diplomanta

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 RECYKLACE PLASTŮ</b> .....	<b>13</b>
1.1 ROZDĚLENÍ PLASTOVÉHO ODPADU .....	13
1.1.1 Nečistoty v plastovém odpadu .....	14
1.2 ZPŮSOBY RECYKLACE .....	14
1.2.1 Mechanická recyklace .....	15
1.2.1.1 Mlecí zařízení .....	16
1.2.2 Chemická depolymerizace .....	17
1.2.3 Zplyňování a částečná oxidace .....	18
1.2.4 Tepelné procesy.....	18
1.2.5 Hydrogenace.....	19
<b>2 VSTŘIKOVÁNÍ</b> .....	<b>20</b>
2.1 PRŮBĚH VSTŘIKOVÁNÍ.....	20
2.1.1 Vlivy na vlastnosti výrobku .....	22
2.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	22
2.3 VSTŘIKOVACÍ FORMA .....	24
2.3.1 Vtokový systém formy .....	24
2.3.2 Dutina formy .....	25
2.3.3 Temperační systém.....	26
2.3.4 Vyhazovací systém.....	26
<b>3 POLYMERY</b> .....	<b>28</b>
3.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI POLYMERŮ.....	28
3.1.1 Mechanické chování.....	29
3.2 POLYKARBONÁTY PC.....	30
3.2.1 Základní vlastnosti polykarbonátu .....	30
3.2.2 Nasákavost a sušení polykarbonátu.....	30
3.2.3 Použití polykarbonátů .....	31
<b>4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ</b> .....	<b>32</b>
4.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI .....	32
4.2 STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM .....	33
4.2.1 Tahové diagramy polymerních materiálů.....	37
4.3 ZKOUŠKY TVRDOSTI .....	39
4.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella .....	39
4.3.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	40
4.3.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	41
4.3.4 Zkouška tvrdosti Shore D.....	42
4.4 ZKOUŠKA RÁZEM V OHYBU .....	42
4.4.1 Zkoušení rázem v ohybu u polymerních materiálů .....	44



<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE</b> .....	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>ZKOUMANÝ MATERIÁL</b> .....	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>VSTŘIKOVÁNÍ VÝROBKŮ</b> .....	<b>49</b>
7.1	SUŠENÍ MATERIÁLU .....	49
7.2	VSTŘIKOVÁNÍ.....	50
7.3	VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK.....	51
<b>8</b>	<b>VÝROBA RECYKLÁTU</b> .....	<b>53</b>
8.1	MLETÍ POLYKARBONÁTU .....	53
8.2	PROSÉVÁNÍ.....	55
<b>9</b>	<b>VSTŘIKOVÁNÍ RECYKLOVANÝCH DÍLŮ</b> .....	<b>58</b>
<b>10</b>	<b>MECHANICKÉ ZKOUŠKY</b> .....	<b>59</b>
10.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	59
10.1.1	Vyhodnocení modulu pružnosti v tahu .....	60
10.1.2	Vyhodnocení prodloužení v tahu .....	64
10.1.3	Vyhodnocení maximální napětí v tahu.....	68
10.2	ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI .....	72
10.2.1	Vyhodnocení vrubové houževnatosti .....	73
10.2.2	Vyhodnocení síly potřebné k přeražení vzorku.....	78
10.3	ZKOUŠKA TVRDOSTI SHORE D.....	82
10.3.1	Vyhodnocení tvrdosti Shore D .....	83
<b>11</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>85</b>
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>87</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>88</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>91</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>93</b>
	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>96</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>97</b>

## ÚVOD

Makromolekulární látky provází člověka již od nepaměti. Setkávali se s nimi již první lidé v podobě přírodních polymerů. Příkladem hojně využívaného přírodního polymeru, jenž byl na Evropském kontinentě znám od poloviny 18. století, je přírodní kaučuk. Ovšem prudký nárůst spotřeby způsobil tlak na tyto přírodní zdroje a během 20. století byly ve většině výrobních procesů nahrazeny syntetickými polymery. Ty během krátké doby začaly vytlačovat běžné konstrukční materiály v mnoha oborech lidské činnosti. Stalo se tak především díky jejich výjimečným vlastnostem a široké škále využití. Našly uplatnění především v prudce rostoucích odvětvích jako je automobilový průmysl, elektrotechnika či v lékařství. Polymery vynikají vysokou odolností vůči vnějším vlivům, nízkou hustotou a dobrou zpracovatelností.

Současné trendy ve výrobě umožňují masovou výrobu polymerních výrobků za přijatelné ceny, což upevnilo jejich roli mezi ostatními konstrukčními materiály. S ohledem na tlak široké veřejnosti i odborníků na ekologické aspekty výroby, se do popředí dostává oblast recyklace. Některé druhy polymerů můžeme zařadit do oblasti snadno recyklovatelných materiálů, avšak z recyklátu nejsou schopny výrobní podniky v dnešní době vytvořit polymer s naprosto stejnými vlastnostmi, jako měl původní výrobek. Proto se při výrobě přistupuje k přidávání recyklátu pouze v určitém poměru. Tím, je možno druhotně zpracovat vyřazené výrobky a technologický odpad z výroby. Obecně lze říci, že do konstrukčně namáhaných výrobků se může přidávat jen velmi malý nebo vůbec žádný podíl recyklátu. V případech, kdy není potřeba splnit tyto požadavky lze vyrábět součásti s vyšším podílem recyklátu. V praxi je běžné, že některé nekonstrukční pohledové díly jsou vyrobeny výhradně z recyklátu.

Řešení dopadů člověkem vyrobených polymerů na životní prostředí má dnes vysokou prioritu snad v každé průmyslové zemi. Hlasy široké veřejnosti se ozývají především v otázkách odstranění nahromaděného odpadu na skládkách. V dnešní době dochází k velkým chybám při nakládání odpady. Plastový odpad skládky obsahuje dvě třetiny polyolefinů, patnáct procent styrenů a deset procent polyvinylchloridů. Dalších deset procent jsou jiné polymery včetně polyethyltereftalátů známých pod označením PET. Například recyklace PET zaznamenává poslední době velký rozvoj. Největší použití tohoto plastu je v oblasti výrobě vláken. [1]

Celkově dnes plasty představují jen deset hmotnostních procent z celkového množství vyprodukovaného odpadu a to jak domácnostmi, tak průmyslovým odvětvím. Ovšem objemové procento je mnohem vyšší, což je dáno hlavně nízkou hustotou polymerních materiálů. Tyto hodnoty jsou alarmující a je potřeba hledat vhodné cesty jak polymerní materiál recyklovat. [1]

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. [2]

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 RECYKLACE PLASTŮ

Samotným slovem recyklace můžeme rozumět opakované použití daného materiálu. Jedná se zejména o opětovné zpracování technologického odpadu (odpadu vzniklého při výrobě). Do této skupiny patří například vtokové zbytky vzniklé při vstřikování plastů. Další velkou skupinou recyklovaných produktů jsou výrobky, které již nejsou použitelné pro účel, ke kterému byly vyrobeny. Jedná se o výrobky, jejichž životnost byla překročena. Tyto výrobky se vrací formou sběru; v mnoha případech jako znečištěný netříděný odpad.

### 1.1 Rozdělení plastového odpadu

Důležitou součástí recyklace je zpracování plastového odpadu. Odpad musí upraven, aby mohl být použit ve výrobě. Jak dobře a jakým způsobem se bude odpad zpracovávat je silně závislé na stupni jeho znečištění. Podle tohoto kritéria můžeme rozdělit odpad do čtyř základních kategorií. [2]

**Čistý tříděný odpad** je v podstatě nejkvalitnější odpad, který můžeme dostat. Jedná se ve většině případů o odpad, kterým jsou v rámci výrobního podniku například vtokové zbytky, zmetkové díly a podobně. Tento odpad je velmi hodnotný především proto, že není znečištěn a známe jeho přesné složení. Recyklace tohoto typu odpadu je nejméně náročná a mnoho výrobních závodů jí provádí přímo ve vlastních provozovnách. [2]

Tento odpad nevyžaduje žádnou zvláštní úpravu. Nejčastěji je rozemlet na drť a ta je pak přidána do čerstvého polymeru v určitém poměru. Při větších objemech je rozdrčený materiál plastikován a homogenizován na kontinuálním hnětiči. Následně je pak granulován. [2]

**Znečištěný tříděný odpad** není již tak kvalitní. Tento odpad je získán ze sběru a s tím souvisí i jeho náročnější zpracování. Je nejčastěji zpracováván na linkách a jeho hlavní odlišností je zařazení fáze praní a sušení plastové drtě. Významný rozdíl mezi čistým a znečištěným odpadem je také v zpracování před samotnou granulací. Znečištěný odpad se musí před granulací filtrovat. I z tohoto druhu odpadu je možné získat velmi kvalitní regenerát, avšak vše závisí na dobrém odstranění nečistot. [2]

**Čistý netříděný odpad** je pro recyklaci méně vhodný než předešlé dva typy. Největším problémem tohoto odpadu je obsah materiálů s neshodným složením a vlastnostmi. Tento nedostatek se projevuje nejčastěji při plastikaci a homogenizaci. Netříděný odpad je

zpracováván velmi často na diskontinuálním hnětiči. Pokud probíhá zpracování na kontinuální hnětiči musí být hnětič speciálně konstrukčně upraven. Při působení třecího tepla a tlaku dochází v hnětiči k homogenizaci drtě. Tento materiál není natolik hodnotný, aby byl granulován. Jeho využití se našlo na výrobu výlisků například podlahových krytin nebo protihlukových stěn. [2]

**Znečištěný netříděný odpad** patří mezi nejhůře zpracovatelné odpady. Jeho recyklace je velmi náročná a nejméně ekonomická. To jeden z hlavních důvodů proč tento odpad končí většinou na skládkách, kde zůstává, a zatěžuje životní prostředí. Zpracování tohoto druhu odpadu je v dnešní době stále velký problém; cena takového regenerátu převyšuje často cenu čistého materiálu, přičemž zdaleka nedosahuje jeho vlastností. [2]

### 1.1.1 Nečistoty v plastovém odpadu

Netříděný znečištěný plastový odpad určený pro recyklaci může obsahovat rozmanité druhy nečistot. Patří zde špína, barvy, papír, kovy, fólie či přísady. Je tedy jasné, že nečistoty v plastovém odpadu jsou velkým problémem. [3]

Vzhledem k nepřebornému množství zdrojů znečištění je vliv těchto nečistot těžké předvídat a prakticky nemožné vyčíslit. Každý výrobce recyklovaných plastů s tím musí počítat. Nečistoty například v podobě retardérů hoření jsou velmi toxické a mohou představovat určité zdravotní riziko. Z tohoto důvodu je pro potravinové a zdravotnické výrobky přidávání recyklátu nepřijatelné. [3, 4]

## 1.2 Způsoby recyklace

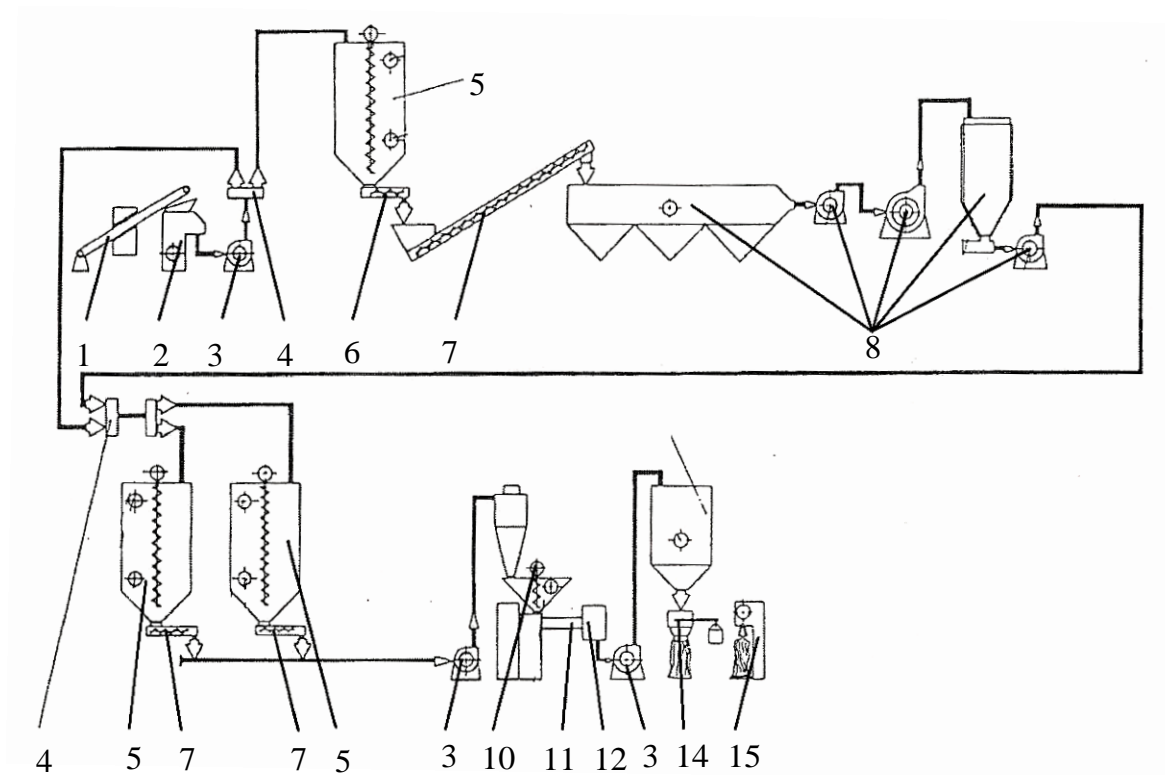
V dnešní době můžeme rozdělit recyklaci do dvou hlavních skupin [5]:

- mechanická (materiálová) recyklace,
- alternativní recyklace.

První skupina je založena na mechanickém principu zpracování materiálu. Druhá skupina vznikla hlavně proto, aby odstranila nedostatky mechanické recyklace. Hlavní princip těchto alternativních metod je většinou založen na rozkladu polymerů pomocí tepla, kdy přidáváme chemická činidla a katalyzátory. Vzniklé produkty mohou pak být výchozí monomery nebo uhlovodíky. [5]

### 1.2.1 Mechanická recyklace

Mechanická nebo také materiálová recyklace zahrnuje mnoho operací. Patří mezi ně separace plastů, odstranění nečistot, broušení, drcení a granulování. Tento způsob zpracování je svou povahou vhodný především pro termoplasty. Mechanická recyklace je také velmi omezena slučitelností různých druhů materiálů. Je zde nutno podotknout, že polymery degradují. Částečná oxidace polymerů vede ke snížení délky polymerních řetězců. Z toho plyne, že takto recyklované polymery nikdy nebudou mít stejné vlastnosti jako polymer původní. Další nevýhodou mechanické recyklace je kombinace různých barevného odpadu. Pokud zpracováváme barevně netříděný odpad, obvykle získáme nežádoucí šedou barvu. [5]



Obr. 1. Linka na zpracování tříděného plastového odpadu [2]

- 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.

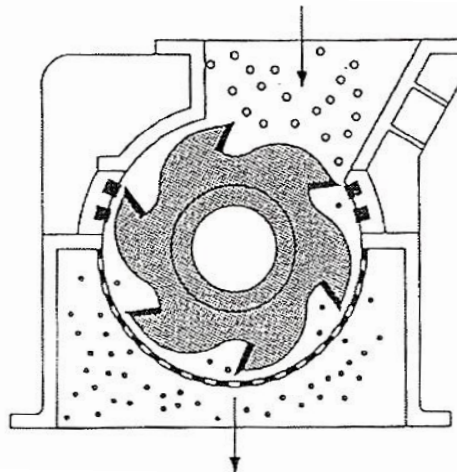
Mechanická recyklace se provádí většinou na linkách k tomu určených. Příklad takové linky, která zpracovává znečištěný tříděný odpad je na obrázku (obr. 1). Důležitým

faktorem je zde však typ znečištění. Nejvíce nás zajímá, jedná-li se o nečistoty rozpustné nebo nerozpustné ve vodě. [2]

### 1.2.1.1 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. [2]

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 (obr. 2) je vidět schéma práce nožového mlýnu. [2]



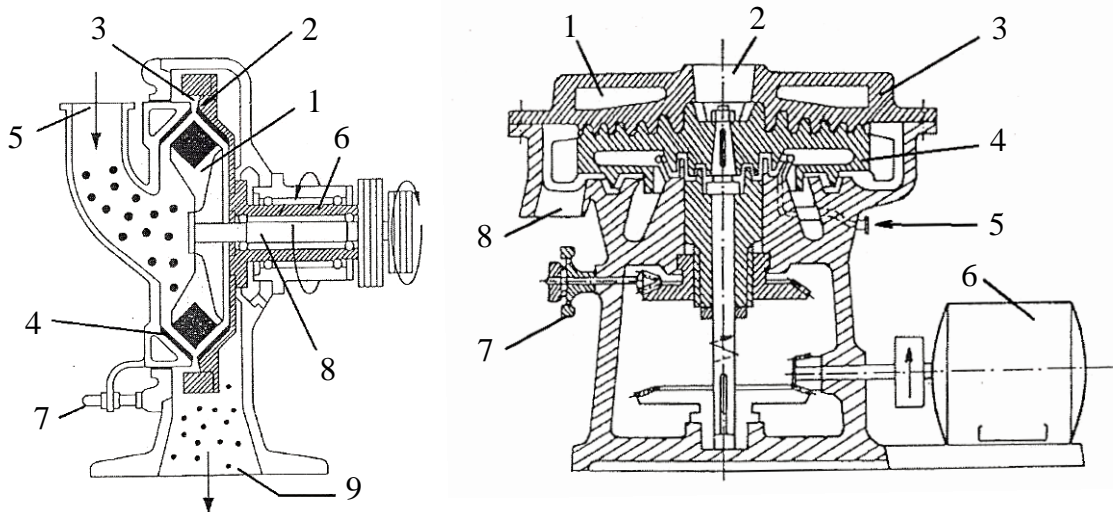
Obr. 2. Nožový mlýn [2]

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 drt' rovnoměrné velikosti, což je velkou výhodou. Pozitivní také je, že při drcení materiálů nevzniká mnoho prachu a tak je provoz poměrně čistý. [2]

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 drt' z nožových mlýnů rozemlít s rovnoměrnou zrnitostí až 100  $\mu\text{m}$ . Takto jemně rozemletý materiál je vhodný například pro fluidní nanášení a podobně. Schéma práce talířového mlýnu je



uvedeno na obrázku (obr. 3). Přiváděný materiál je okamžitě vystřelován rotorem na bočnice, které se otáčejí v opačném smyslu než rotor. Takto je materiál neustále opracováván do té doby, než získá velikost štěrbin mezi bočnicemi a odejde pryč. [2]



Obr. 3. Talířové nárazové mlýny [2]

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.

### 1.2.2 Chemická depolymerizace

Recyklace chemickou depolymerizací je založena na principu reakce polymerů s chemickými látkami, které vedou k rozložení na výchozí monomery. Tyto monomery jsou shodné s těmi, které se používají k výrobě čistých polymerů. Můžeme tedy předpokládat, že polymery vyrobené z depolymerizovaných a čistých monomerů budou mít shodné vlastnosti. Mezi nevýhody tohoto typu recyklace patří to, že je použitelná jen pro kondenzační polymery. Tyto polymery zastávají asi 15 % z celkového počtu plastového odpadu. Jedná se například o polyamidy, polyestery, polykarbonáty apod. Pro recyklaci většiny adičních polymerů se tato technologie nedá použít. Podmínkou této technologie je také podrobení recyklátu intenzivnímu čištění. Musí být odstraněny veškeré nečistoty, které jsou v plastu obsaženy. [5]

Co se týče polyamidů, tak se chemická depolymerizace provádí především hydrolýzou. Hydrolýza nylonu - 6 umožňuje získání výchozího monomeru. Podobným způsobem vede základní hydrolýza nylonu - 6,6 ke vzniku hexamethylen diaminu a kyseliny adipové. [5]

### 1.2.3 Zplyňování a částečná oxidace

Mezi další alternativní technologie recyklace se řadí i zplyňování a částečná oxidace. Tento proces je vlastně, jak název sám napovídá, částečná oxidace uhlíkatých materiálů, která vede ke vzniku směsi oxidu uhelnatého a vodíku. Technologie byla nejdříve vyvinuta pro konverzi uhlí. Později však byla použita pro zpracování zemního plynu a těžkých ropných frakcí. V současné době se toto zpracování může efektivně použít pro recyklaci plastových odpadů. [5]

Technologie zplyňování se řadí mezi procesy, které nazýváme termochemické. Celý proces probíhá za velmi vysokých teplot. Tyto teploty se pohybují v oblastech nad mezí chemické stability materiálu. Následně dochází k rozložení na hořlavé plyny. Při porovnání s normálním spalováním paliv se v tomto případě energie paliva přemění na nový druh energie, který se váže k plynné fázi. [6]

Mezi hlavní výhody této technologie je, že můžeme zpracovávat i různé polymery najednou. Není tedy nutné pracně a nákladně oddělovat a třídit takto zpracovávaný odpad. Ovšem problémy nastávají s následnými čistícími pracemi, které jsou nutné pro vyprodukování syntézního plynu. [5]

### 1.2.4 Tepelné procesy

Tepelný proces je proces rozkladu materiálu při vysoké teplotě v inertní atmosféře. Rozklad polymeru působením vysokých teplot je také používán jako analytický způsob identifikace materiálu. Samotný tepelný rozklad můžeme považovat za depolymeraci, která je však použitelná jen v opravdu ojedinělých případech. [5]

Vhodné polymery pro tuto technologii jsou například polymethylmethakrylát nebo polystyren. Zde dosáhneme poměrně vysokých výtěžků monomerů. Pro ostatní materiály není tento způsob vhodný hlavně z toho důvodu, že obsah získaného monomeru je velmi malý. [5]

### 1.2.5 Hydrogenace

Hydrogenace je velmi zajímavou alternativou mezi recyklačními technologiemi. Je vhodná jak pro plastový, tak pro pryžový odpad. Hlavním cílem této metody je rozklad a přeměna polymerů na kapaliny a plynné produkty. Reakce musí probíhat za působení tlaku a ve většině případů za účasti rozpouštědel. Při tomto technologickém způsobu recyklace je přeměna prováděna ve vodíkovém prostředí. To vede k poměrně vysokému podílu tekuté látky, která obsahuje směs uhlovodíku s dlouhými řetězci. [5]

Většina studií a testování této technologie je založena na tom, že bylo použito katalyzátorů. Byla zkoumána široká paleta katalyzátorů, které se skládaly obvykle ze sloučenin kovů železa, niklu, kobaltu, molybdenu a podobně. Recyklace za pomoci hydrogenace však trpí určitými nedostatky. Zejména podmínkou práce při vysokých tlacích a cenou vodíku. [5]

## 2 VSTŘIKOVÁNÍ

Technologie vstřikování plastů je jednou z nejrozšířenějších výrobních technologií dnešní doby. Tato technologie zaznamenala od doby svého vzniku poměrně velký vzestup. Díky vysoké poptávce po vstřikovaných termoplastech, především v elektronickém a automobilovém průmyslu, se tato technologie dostala na špičku výroby. [7]

Vstřikování se řadí mezi tvářecí procesy probíhající v cyklech. Z fyzikálního hlediska se pak jedná o termodynamický proces, kdy polymer není během cyklu rovnovážný vzhledem k podmínkám, ve kterých se zrovna nalézá. [7]

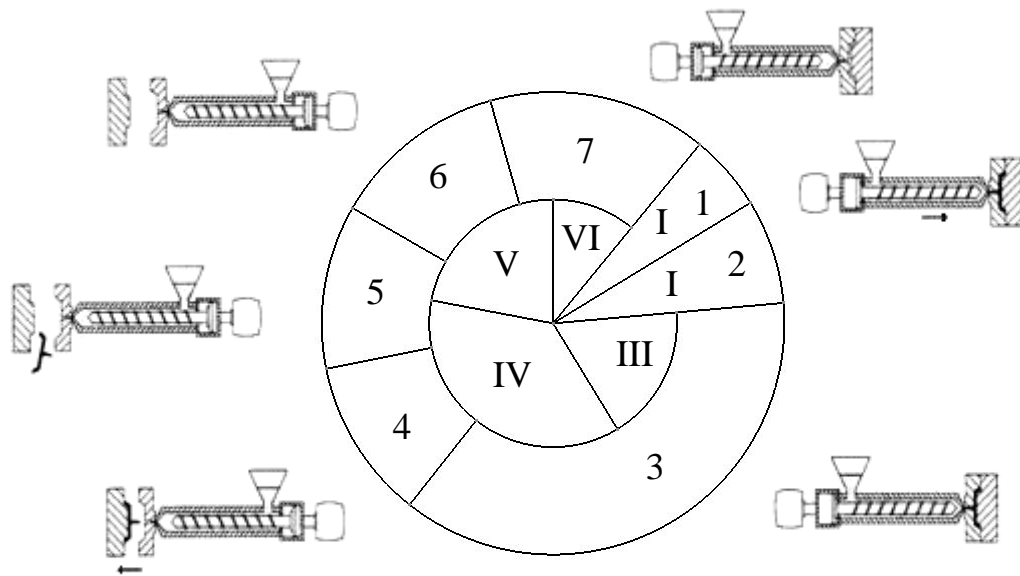
Základní princip vstřikování je velmi jednoduchý. Materiál (polymer) je ve formě granulátu roztaven v plastikační jednotce. Tavenina je poté za pomoci tlaku vstříknuta do dutiny formy. Dutina má požadovaný tvar výrobku, zvětšený o míru smrštění polymeru. Tavenina je ve formě ochlazována do doby, než polymer ztuhne; tím je docíleno požadovaného tvaru výrobku (výstřiku). [8]

### 2.1 Průběh vstřikování

Jak bylo již zmíněno výše, vstřikování je proces probíhající v opakujících se cyklech. Ten se skládá ze souboru operací, jež vedou k výrobě konečného výstřiku. Optimalizace tohoto cyklu je velmi důležitá pro zajištění hospodářské konkurenceschopnosti výrobního procesu. Jelikož investice na pořízení výrobního zařízení (vstřikovací stroj) jsou poměrně vysoké. V rámci vstřikovacího stroje rozdělujeme cyklus vstřikování na [8]:

- cyklus formy,
- cyklus plastikační jednotky.

Grafické znázornění vstřikovacího cyklu můžeme vidět na obrázku (obr. 4). Aby mohlo dojít ke vstřikování, dochází nejprve k uzavření formy a k přísunu plastikační jednotky. Poté dojde k samotnému vstříknutí materiálu do dutiny formy. Následně pak dochází k provedení dotlaku. Chladnutí polymeru ve formě pak probíhá bez působení tlaku. Plastikační jednotka se odsouvá a poté nastává plastikace. Po dostatečném zatuhnutí výrobku se forma otevírá a výrobek je vyhozen. Následující čas je vymezen pro přípravu formy. Nakonec dochází k uzavření formy a přísunu plastikační jednotky do výchozí polohy. [9]

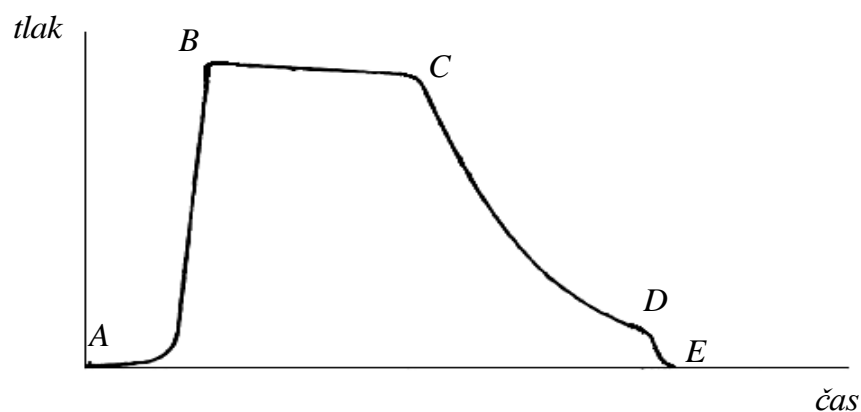


Obr. 4. Grafické znázornění průběhu vstřikovacího cyklu

**Forma:** 1 - vstřikování; 2 - dotlak; 3 - chlazení; 4 - otevření formy; 5 - vyprazdňování formy; 6 - příprava formy; 7 - uzavření formy.

**Plastikační jednotka:** I - vstřikování; II - dotlak; III - odjezd plastikační jednotky; IV - plastikace; V - prodleva; VI - přísun plastikační jednotky.

Průběh vstřikovacího cyklu je možné částečně popsat i na grafu, který popisuje tlak v dutině formy při vstřikování (obr. 5).



Obr. 5. Obecný průběh tlaku v dutině formy

AB - vstřikování; BC - dotlak; CE - chlazení; D - otevření formy.

### 2.1.1 Vlivy na vlastnosti výrobku

Fyzikální a mechanické vlastnosti jsou závislé na druhu polymeru, technologických parametrech, konstrukci formy a zvoleném stroji. Pokud se zaměříme na polymer, tak výsledné vlastnosti výstřiku ovlivňuje především [10, 7]:

- rychlost uvedení plastu do tekutého stavu,
- viskozita plastu,
- vhodná tepelná stabilita, která by měla být zachována v celém rozsahu zpracovatelských teplot,
- velikost vnitřního pnutí,
- a v neposlední řadě smrštění.

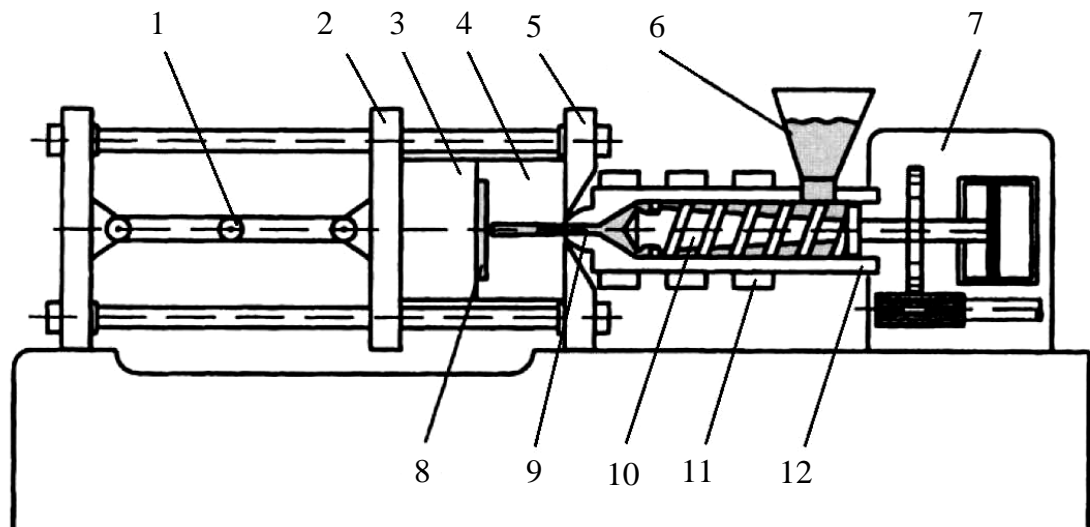
Nezanedbatelnou skupinou faktorů jsou také technologické parametry, které kvalitu výstřiku ovlivňují také ve velké míře. Každá fáze vstřikovacího procesu může negativně ovlivnit výsledný výrobek. Mezi tyto parametry patří [10, 11]:

- vstřikovací tlak, který ovlivňuje rychlost plnění dutiny, výslednou orientaci makromolekul a uzavírací sílu,
- velikost a délka dotlaku zase ovlivňuje rozměrovou stálost výstřiku a jeho vnitřní pnutí,
- teplota formy je závislá především na druhu použitého plastu a má zásadní vliv na dobu chlazení, lesk výrobku, vnitřní pnutí,
- teplota taveniny, jež se odvíjí od druhu použitého plastu. Výrazně ovlivňuje tekutost plastu, ale také dobu chlazení a tím i délku celého vstřikovacího cyklu.

## 2.2 Vstřikovací stroj

Moderní vstřikovací stroje jsou dnes z velké části plně automatizované. Z toho plyne velká produktivita výroby. Technologie vstřikování se nejvíce hodí pro velkosériovou a hromadnou výrobu vzhledem k vysoké ceně strojních zařízení. Obecně můžeme vstřikovací stroj rozdělit na tři hlavní části. Jedná se o vstřikovací jednotku, uzavírací jednotku a řízení a regulaci. Vstřikovací stroje je samozřejmě možné doplnit o další zařízení tak, aby se stal plně automatizovaným pracovištěm. [10]

Na obrázku (obr. 6) je zobrazen obecný vstříkovací stroj s popisem jeho základních částí.



Obr. 6. Schéma vstříkovacího stroje [11]

1 - uzavírací jednotka; 2 - upínací deska levá; 3 - levá strana formy; 4 - pravá strana formy; 5 - upínací deska pravá; 6 - násypka; 7 - pohon vytlačovacího stroje; 8 - dutina formy; 9 - vstříkovací tryska; 10 - šnek; 11 - topné pásy; 12 - válec vytlačovacího stroje.

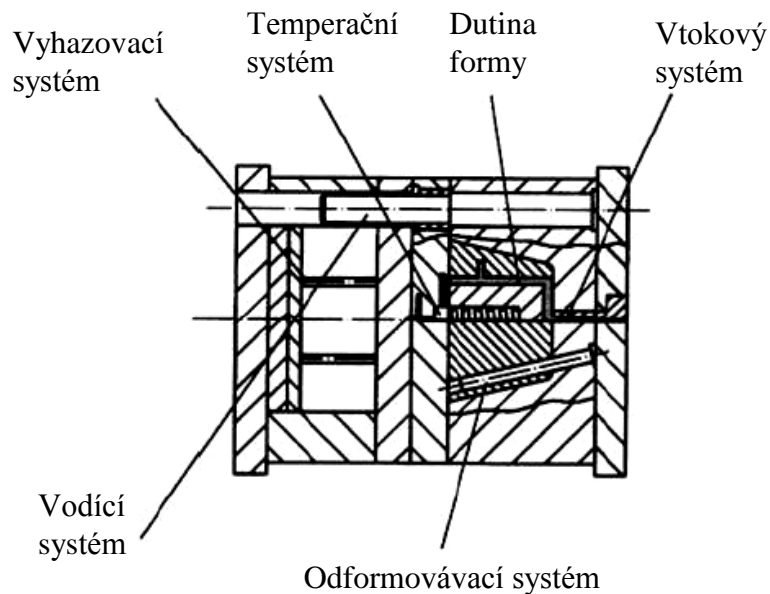
Každý typ vstříkovacího stroje má své specifické parametry. Volba vstříkovacího stroje pro danou aplikaci je velmi důležitá. Mezi tyto parametry patří vstříkovací tlak stroje. Dále je to uzavírací síla, kterou je schopen stroj vyvinout. Velmi důležitým parametrem je vzdálenost mezi sloupky, která udává maximální velikost formy použitelné na stroji. Dalšími charakteristikami jsou například maximální vstříkovaný objem a plastikační kapacita stroje. [12]

Vstříkovací jednotka má za cíl zahřát materiál na specifickou teplotu. Vstříkovací jednotka musí převést přiváděný materiál, v podobě granulátu, na homogenní taveninu, která bude schopná co nejdokonaleji vyplnit dutinu formy. Druhým hlavním úkolem jednotky je vstříknout roztavený materiál určitou silou do dutiny formy. [11, 13]

Vstříkovací stroj musí také dále obsahovat uzavírací jednotku. Její funkcí je otevření a zavření vstříkovací formy, popřípadě vyhození součástí. V dnešní době se používají mechanické nebo hydraulické jednotky. [14]

## 2.3 Vstřikovací forma

Forma je velmi důležitým nástrojem při vstřikování. Je namáhána vysokými tlaky, kterým musí odolat a zároveň musí být schopná vyrobit výrobek s velkou přesností a vysokou jakostí. Konstrukce formy je velmi náročná a její výsledná cena je vysoká. Na obrázku (obr. 7) je vidět příklad formy s jejími hlavními součástmi. [10, 11]



Obr. 7. Schéma obecné vstřikovací formy [11]

### 2.3.1 Vtokový systém formy

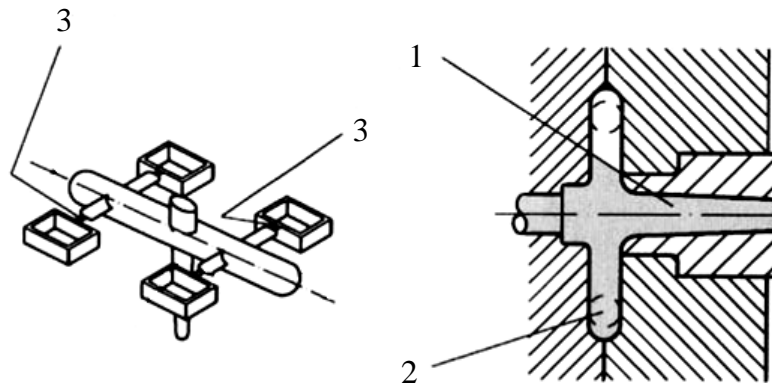
Vtokový systém je velmi důležitý a je na něj kladen veliký důraz. Musí být navržen takovým způsobem, aby homogenní tavenina zaplnila všechny dutiny rovnoměrně a stejnou rychlostí. Samotný tvar soustavy je dán konstrukcí formy a její násobností. Vtokové systémy je možné rozdělit na [11]:

- horké (vyhřívané) vtokové systémy (VVS),
- studené vtokové systémy (SVS).

Horký vtokový systém je ekonomicky náročnější a konstrukčně složitější, ale má mnoho výhod. Jeho použitím je možné zkrátit cyklus vstřikování a také snížit opotřebení nástroje. Tryska horkého vtokového systému ústí přímo do dutiny formy a tak nedochází k tvorbě technologického odpadu. Tento systém je tedy z tohoto hlediska ekologičtější. [11, 15]



Studený vtokový systém se v praxi používá častěji. Oproti horkému systému se tavenina ochlazuje již v rozvodných kanálech a tak do dutiny již přichází částečně ochlazená. Chladnoucí tavenina v rozvodných kanálech klade větší odpor a je tedy potřeba vyvinout větší vstřikovací tlaky. Studený vtokový systém je rozdělen na tři základní části. A to sice vtokový kanál, který navazuje na trysku vstřikovacího stroje, rozvodný kanál a vtokové ústí, jež vyúsťuje přímo do dutiny formy. [11, 12]



Obr. 8. Obecný studený vtokový systém [11]

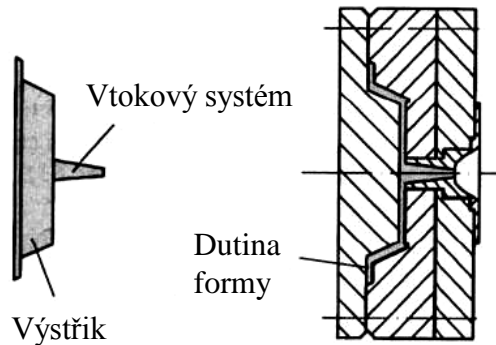
1 - vtokový kanál; 2 - studený rozvodný kanál; 2 - vtokové ústí

Hlavním rozdílem je však fakt, že při použití studeného vtokového systému vzniká značný technologický odpad. U menších dílů může tvořit odpad i 50 % hmotnosti celého výstřiku. Zde vzniká potřeba recyklace tohoto technologického odpadu.

### 2.3.2 Dutina formy

Při vstřikování prochází roztavený polymer skrz vtokovou vložku a rozvodný systém až do dutiny formy. Zde kopíruje tvar dutiny a chladne. Dutina formy je vlastně přesným negativním obrazem daného výrobku. Ovšem během chladnutí dochází ke smrštění polymeru v dutině. Z toho důvodu se dutiny vyrábějí zvětšeny o míru smrštění daného polymeru, pro který jsou určeny. Smrštění se u amorfních termoplastů běžně pohybuje okolo 0,5 - 0,8 %. U krystalických termoplastů je větší a může být zhruba 1 - 2 %. Dalším jevem, který se často vyskytuje, je deformace. Ta se projevuje především u dlouhých plochých površích a to mírným ohnutím. [11]

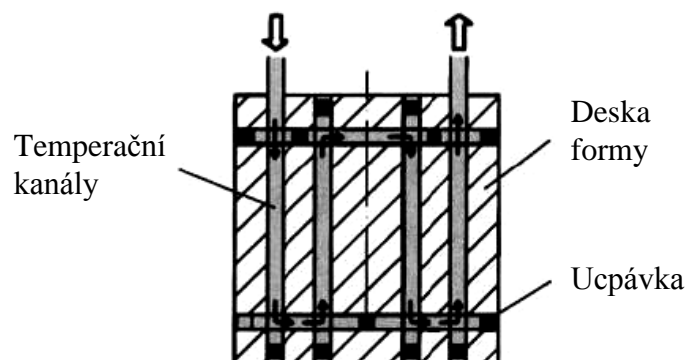
Výroba dutiny se může provádět kombinacemi frézování, vrtání, vystružování a dalších konvenčních technologií. Pro složitější tvary dutin se dnes již využívá velmi často nekonvenčních technologií jako je například EDM. [16]



Obr. 9. Zaformování výrobku [11]

### 2.3.3 Temperační systém

Kvalitní temperační systém formy je klíčovým prvkem. Zajišťuje totiž celkovou tepelnou stabilitu formy a ovlivňuje dobu chlazení polymeru v dutině formy. Má také jistý vliv na výsledná pnutí uvnitř výrobku. Temperačním médiem bývá nejčastěji destilovaná voda nebo olej. Teplota tohoto média se pohybuje obvykle mezi 30 a 100 °C. Přesná teplota závisí na vstříkovaném polymeru. Samotné kanály jsou do jednotlivých desek nejčastěji vrtány. [11]

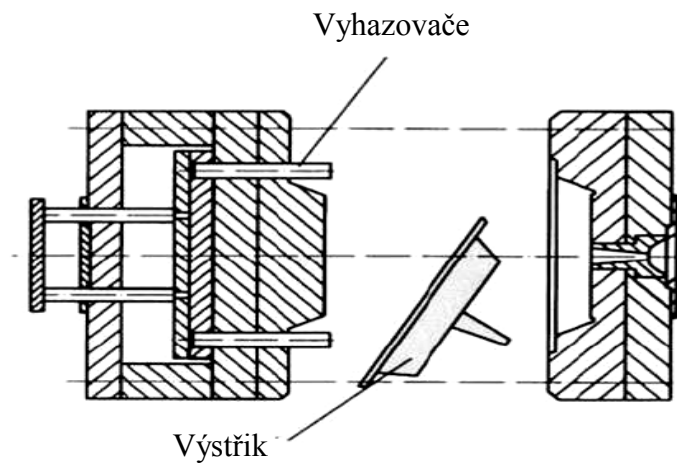


Obr. 10. Temperační systém [11]

### 2.3.4 Vyhazovací systém

Jakmile dojde ke ztuhnutí výrobku v dutině, je důležité zajistit jeho vyhození z formy. Z tohoto důvodu je forma rozdělena dělicí rovinou. V tomto místě se forma otevírá

a vyhazovače poté pohybem proti výrobku zapřičiní jeho vyhození. V této době už musí být výrobek dostatečně ochlazený a tuhý, aby nedošlo k jeho poškození. Vyhazovače jsou pevně zasazeny do pohyblivých vyhazovacích desek. Jejich pohyb bývá zajištěn pomocí hydraulického mechanismu. [11]



Obr. 11. Vyhození výrobku z dutiny formy [11]

### 3 POLYMERY

Pro úspěšné recyklování plastů je nutné mít znalost toho jaké má materiál vlastnosti a jak se pravděpodobně bude chovat. Plastový výrobek se skládá z polymeru a dalších materiálů, které se přidávají, abychom u daného polymeru získali požadované vlastnosti. [4]

Polymery jsou v podstatě chemické látky s velmi rozsáhlou škálou charakteristických vlastností. V molekulách polymerů jsou nejčastěji obsaženy atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, dusíku a chlóru. [17]

Při běžných podmínkách jsou plasty tvrdé a nezřídka i křehké. Za zvýšených teplot jsou plastické a tvarovatelné. Z hlediska opakovatelnosti přechodu z plastického do tuhého stavu rozlišujeme dva typy polymerů. Prvním jsou **termoplasty**, které jsou opakovatelně tavitelné, naopak **reaktoplasty** opakovaně tavit nelze. U reaktoplastů totiž dochází při zvýšených teplotách k chemickým reakcím. [17]

#### 3.1 Fyzikální vlastnosti polymerů

Budeme-li vycházet ze znalosti fyzikálních vlastností kovových materiálů, najdeme mezi nimi a termoplastickými polymery řadu odlišností. U polymerů udává mechanické vlastnosti z velké části amorfni fáze. Materiály jsou amorfni plně nebo obsahují krystalickou část a amorfni matrice je obklopuje. Ostrým bodem tání se vyznačují krystalické materiály, naproti tomu amorfni materiály se mění v taveninu pozvolna v daném intervalu teplot. Tento interval je určen střední teplotou měknutí  $T_m$ . Tyto specifické vlastnosti, kdy se vlastně amorfni materiály chovají spíše jako viskózní medovitá kapalina, se využívá především při zpracovatelských postupech. [18]

Amorfni látky se však při velmi malých teplotách vyznačují ještě jednou, pro ně velmi charakteristickou, veličinou. Jedná se o teplotu skelného přechodu  $T_g$ . Tato teplota materiál výrazně ovlivňuje. Dochází ke snížení pohybu molekul. Tento jev má za následek to, že se polymer chová jako sklo. [18]

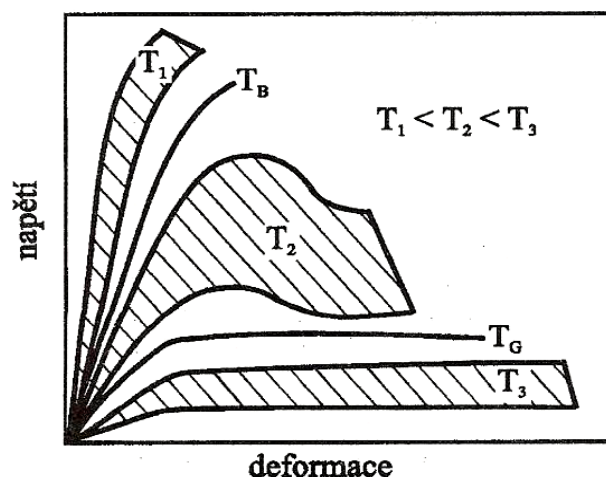
Všechny tyto specifické vlastnosti polymerů mají na fyzikální potažmo mechanické vlastnosti vliv, a proto jsou předmětem zájmu z hlediska konstrukce. Pro tyto účely totiž potřebujeme znát mechanické chování co nejpřesněji, abychom mohli předpokládat chování polymeru při různém zatížení. [18]

### 3.1.1 Mechanické chování

Jak bylo uvedeno výše, znalost mechanického chování a vlastností polymerů jsou pro nás velmi důležité. Pro polymery je obvyklé, že jejich mechanické vlastnosti jsou závislé na čase. V závislosti na působícím napětí totiž makromolekuly zaujímají rozličná uspořádání. Tyto změny závislé na čase jsou hlavním důvodem pro **viskoelastické deformační chování** plastů. Reologické modely, popisující tento jev, jsou sériovou nebo paralelní kombinací ideálních pružin. [19, 20]

Pokud je polymer zatížen velkými silami, dochází k poměrně velké deformaci. Ve většině případů zde již viskoelastický popis chování, nestačí. Dalším popisem chování je coulombovské tření dvou stykových ploch. Sledovaný prvek se chová jako tuhý spoj až do dosažení mezního napětí, kdy dojde k překonání tření a spoj se přetrhne. Toto chování se nazývá plasticitou a je doprovázeno výraznými nevratnými deformacemi. [19]

Mechanické vlastnosti jsou také závislé na teplotě polymeru. S měnící se teplotou dochází k přeměně polymeru z jednoho typu na druhý. Na obrázku (obr. 12) můžeme vidět obecné chování polymeru při různých teplotách. Při malých teplotách je materiál křehký. Za zmínku jistě stojí také teplota  $T_B$ , což je teplota křehnutí. Jak vyplývá z obrázku, v oblastech nad touto teplotou je polymer plastický. Nad teplotou skelného přechodu se plast chová viskoelasticky. [19]



Obr. 12. Vliv teploty na průběh křivky napětí - deformace [19]

$T_B$  - teplota křehnutí;  $T_G$  - teplota skelného přechodu.

## 3.2 Polykarbonáty PC

Jsou známou skupinou polymerů a řadí se mezi termoplastické polymery. Název je odvozen od uhličitanových skupin. Snadno dostupné a svými vlastnostmi výhodné jsou polykarbonáty na bázi 2, 2 - bis (4-hydroxyfenyl) - propanu. Příprava je možná jednou ze dvou metod: fosgenací nebo reesterifikací. [21]

### 3.2.1 Základní vlastnosti polykarbonátu

Pro běžné polykarbonáty je typické, že jsou v pevném stavu amorfni a transparentní. Vyznačují se vysokou propustností světla (až 85 %) a mají vysoký index lomu ( $n_D^{20} = 1,587$ ). Tento polymer je snadno rozpustný v chlorovaných uhlovodících a v cyklohexanonu. Špatně se rozpouští v esterech, ketonech a aromatických uhlovodících. Polykarbonáty jsou tepelně odolné a do 140 °C vynikají dobrou rozměrovou stabilitou. Pro polykarbonáty je také typická vysoká rázová houževnatost. Tuto vlastnost si uchovává i při velmi nízkých teplotách. Mají také poměrně vysokou mechanickou pevnost a to především v tahu. Jejich předností jsou také dobré elektroizolační vlastnosti. Polykarbonát dobře odolává UV záření a je značně stálý proti oxidaci a to až do teplot 120 °C. Odolává také roztokům zředěných kyselin. Mezi nevýhody bezesporu jistě patří nedostatečná odolnost proti působení vroucí vody, páry, amoniaku, methanolu a aminům. Polykarbonáty mají také nižší tekutost a je tedy při vstřikování použít vyšších vstřikovacích tlaků. [21]

### 3.2.2 Nasákavost a sušení polykarbonátu

Při zpracování polykarbonátů nás velmi zajímá jejich navlhavost. Především před vstřikováním je zapotřebí polykarbonáty sušit. Granulát připravený pro vstřikování se dodává v dobře utěsněných obalech a před zpracováním je potřeba dbát na jeho ochranu proti vzdušné vlhkosti. Neochráněný materiál je schopen navlhnout do 20 minut, i když byl předtím již vysušen. [7, 21]

Obsah vodní složky obsažené v polykarbonátu má velký vliv na vlastnosti vstřikovaných dílců. U špatně vysušeného materiálu může dojít k hydrolytické degradaci. Sušení polykarbonátu se provádí suchým vzduchem. Délka sušení je silně odvislá od procenta obsahu vody obsažené v granulátu. Při obsahu 0,02 % vody v materiálu je běžná délka sušení v rozmezí 4 až 6 hodin při teplotě 120 °C. Při sušení je třeba také dbát na to, aby nebyl materiál přesušen. [7]

### 3.2.3 Použití polykarbonátů

Zpracování polykarbonátu je možné v podstatě všemi běžnými způsoby, jaké jsou známy u jiných termoplastů. Mezi asi nejznámější technologií samozřejmě patří vstřikování. To probíhá při teplotách 280 až 310 °C. Forma musí být vyhřívána na 80 až 120 °C. Vstřikované dílce z polykarbonátu jsou vhodné pro použití na místech s vyšším mechanickým a tepelným namáháním. Trubky, tyče a další profily se vyrábí vytlačováním. Dalším možností je výroba fólií a filmů litím z roztoku v methylenchloridu. Výhodou polykarbonátu je dobrá třísková opracovatelnost. Dále mohou být svařovány horkým vzduchem o teplotě 315 °C anebo lepeny. V praxi jsou asi z 65 % využity v automobilovém průmyslu. Dále se využívají v elektrotechnice. [21]

## 4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Rozvoj v oblasti konstrukčních materiálů v poslední době, vedl také k rychlému vzestupu mechanických zkoušek. Tento vývoj také poháněly obavy z nehod způsobené silně namáhanými konstrukčními díly. [22]

Zkoušky mechanických vlastností jsou velmi důležité pro volbu konstrukčních materiálů v technické praxi. Ty nejnütnější údaje pro návrh tvarů, rozměrů získáváme právě těmito zkouškami. Zkoušky mechanických vlastností můžeme rozdělit podle působení síly na zkoušené těleso, tímto způsobem [23, 22]:

- 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.
- Zvláštní technické zkoušky, jež jsou ovlivněny mnoha vedlejšími činiteli. Do tohoto typu zkoušek můžeme zahrnout například zkoušky tvrdosti.
- 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. [23]

### 4.1 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 určujeme 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. [22]

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. [23]

**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. Tvrдость je označena jako  $H$ . Zkoušky v praxi rozdělujeme na vrypové vnikací a odrazové. [23]

**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.

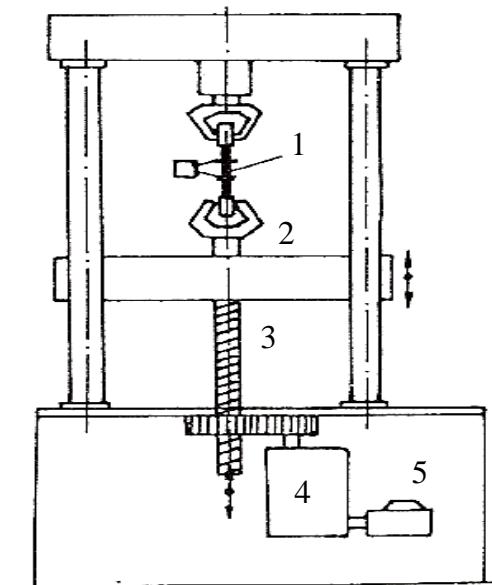
## 4.2 Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem dle ČSN EN 42 0310 je jednou z nejzákladnějších a nejrozšířenějších statických zkoušek. Je potřebné ji provádět u většiny materiálů, jelikož pomocí ní zjistíme několik základních materiálových charakteristik. [23]

Zkouška se provádí na univerzálním zkušebním stroji, který je schopen provádět zkoušky tahem, tlakem a ohybem. Původní princip stroje je zachován již z minulého století. Zkušební stroje bývají poháněny mechanicky. V případě, že je zatěžující síla větší než 200 kN využíváme pohonů hydraulických. [22]

Samotný stroj je tvořen pevným rámem, na kterém je umístěn dynamometr, což je zařízení pro měření zatěžující síly. U hydraulických pohonů zkušebních strojů je zatěžující síla

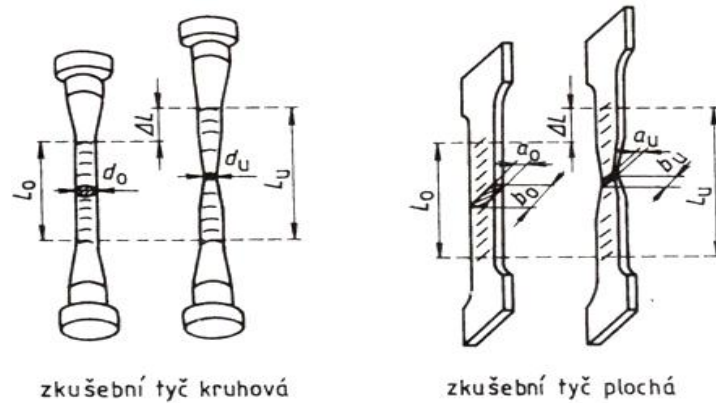
zjišťována v pracovním válci a to z hydrostatického tlaku. Zkušební těleso je přichyceno jedním koncem na dynamometr a druhým koncem na pohyblivou část. Při uvedení do chodu pohyblivé části začne být těleso zatěžováno a následně se deformuje. Pohyb příčnicku, na kterém je pohyblivá část, musí být desetinásobně zvětšen, aby mohla být deformace odečtena. Rozvoj elektroniky v minulém století nám umožnil měření i velmi malých deformací. [22]



*Obr. 13. Schéma univerzálního zkušebního stroje [22]*

- 1 - zkušební těleso; 2 - pohyblivý příčník; 3 - vřeteno; 4 - pohon přístroje;
- 5 - motor

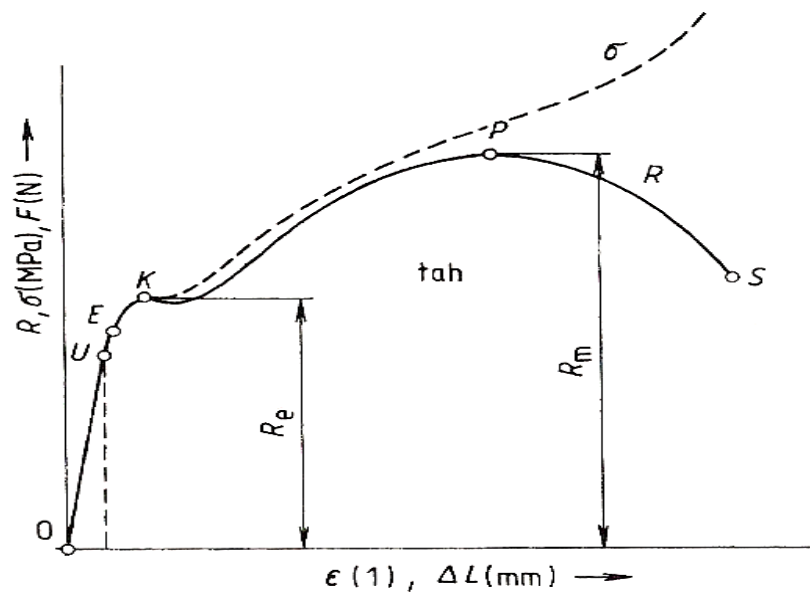
Jak bylo již zmíněno, tak se zkoušky tahem neprovádí přímo na testované součásti. K tomu slouží zkušební tyče, které musí být vyrobeny ze stejného materiálu a stejným postupem, tak abychom docílili co nejpřesnějších výsledků. Velikost zkušebních tělísek je normalizována. [23]



Obr. 14. Tvary normalizovaných zkušebních tyčí [23]

$L_o$  - počáteční délka;  $L_u$  - délka po přetržení;  $\Delta L$  - rozdíl délek;  $d_o$  - počáteční průměr;  $d_u$  - průměr po přetržení;  $a_o$  - počáteční výška;  $a_u$  - výška po přetržení;  $b_o$  - počáteční šířka;  $b_u$  - šířka po přetržení.

Výsledkem tahové zkoušky je především diagram zkoušky tahem viz obrázek (obr. 15)



Obr. 15. Smluvní diagram zkoušky tahem [22, 23]

$R$  - napětí;  $\epsilon$  - poměrné prodloužení;  $U$  - mez úměrnosti;  $E$  - mez elasticity;  $K$  - mez kluzu;  $P$  - mez pevnosti;  $S$  - přetržení;  $R_e$  - napětí na mezi kluzu;  $R_m$  - napětí na mezi pevnosti.

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. [22, 23]

**Smluvní napětí**, v jakémkoliv bodě diagramu je možné vypočítat ze vzorce (1). Jedná se o podíl velikosti zatěžující síly a původního průřezu. [22, 23]

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

**Poměrné prodloužení** zkušební tyče je odvislé od původní délky a od délky tyče po přetržení. [22, 23]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{L_U - L_o}{L_o} \quad (2)$$

**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 a vazeb a přetrhne se. [22, 23]

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

**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. [22, 23]

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

V dnešní době zaveden pojem smluvní meze kluzu. Je to napětí, kdy dojde trvalé deformaci s velikostí  $\varepsilon_p = 0,002$  tedy 0,02%. [22]

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

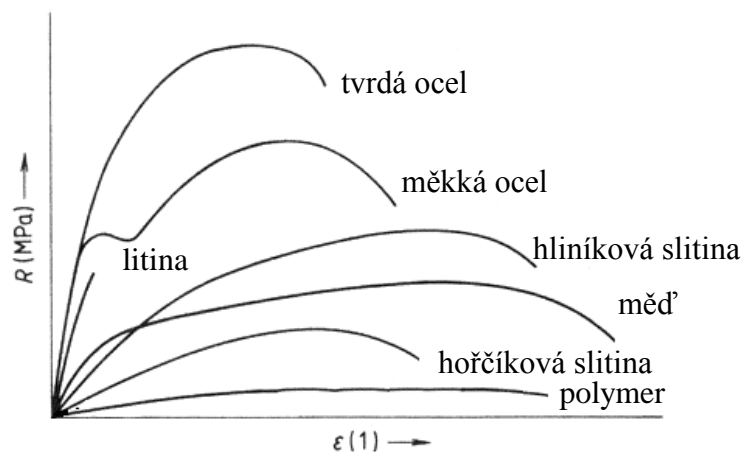
**Tažnost** patří mezi takzvané deformační charakteristiky. Jedná se v podstatě o poměrné prodloužení, pouze v procentuálním vyjádření. U plastů je tato hodnota vysoká a konkrétně u elastomerů může dosahovat až tisíců procent. [22, 23]

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

**Kontrakce**, neboli zúžení patří také do skupiny deformační charakteristik. Vztah (7) pro kontrakci je následující [22, 23]:

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

Je jasné, že tvar pracovního diagramu zkoušky tahem by se měl lišit dle typu použitého materiálu. Na (obr. 16) můžeme vidět porovnání tahových diagramů pro běžně používané materiály v technické praxi. Je to dáno především jejich specifickou vnitřní stavbou krystalografických mřížek.

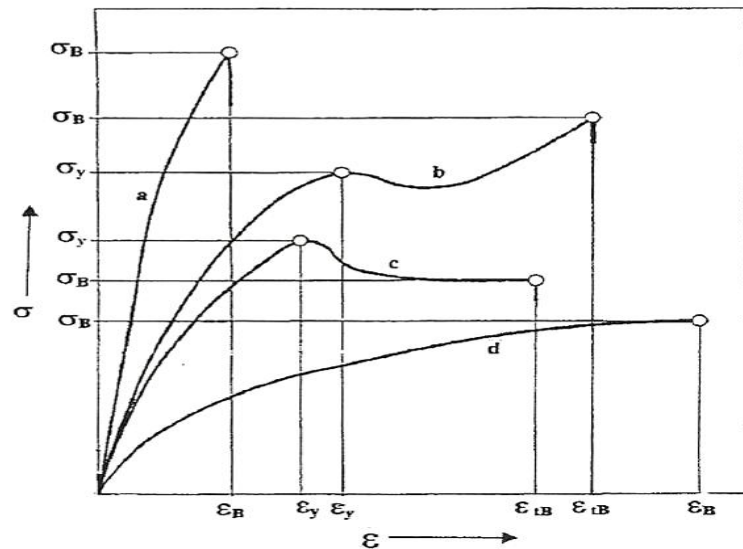


Obr. 16. Tvary pracovních diagramů zkoušky tahem pro různé materiály [23]

#### 4.2.1 Tahové diagramy polymerních materiálů

Tahové zkoušky polymerních materiálů mají svá specifika. Norma ISO 527 popisuje čtyři typy těch nejzákladnějších tvarů pracovních diagramů polymerních materiálů, se kterými se můžeme setkat. Tvary diagramů polymerních materiálů jsou velmi silně závislé na teplotách a rychlosti zatěžování oproti běžným kovovým materiálům. Může se tak stát, že pro jeden určitý typ polymerního materiálu se může objevit, několik naprosto odlišných

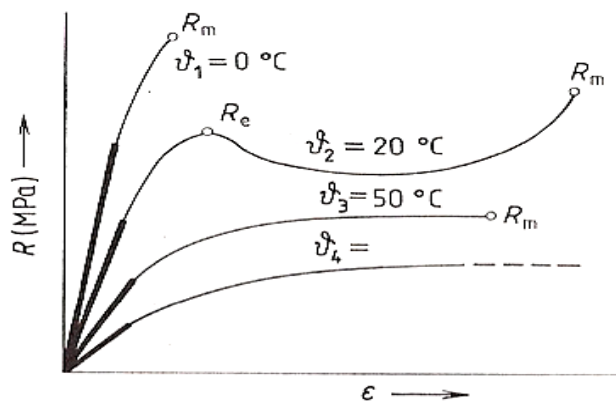
tahových diagramů. Polymerní materiál může tvořit křivky křehkého typu, při nízkých teplotách a vysokých rychlostech zatěžování. Ovšem ten samý materiál může vytvořit křivku s velmi výraznou mezí kluzu. [20, 23]



Obr. 17. Pracovní diagramy polymerních materiálů [20]

$\varepsilon$  - poměrné prodloužení,  $\sigma$  - napětí; a - křehké materiály;  
b - houževnaté materiály; c - houževnaté materiály na  
mezi kluzu; d - houževnaté materiály bez meze kluzu.

Na praktickém příkladu můžeme vidět pro termoplasty tak typické chování při zatěžování. Zobrazuje nám jej obrázek (obr. 18). Polymer byl zatěžován konstantní rychlostí při různých teplotách. Zvýrazněná část označuje elastickou oblast, tedy oblast kdy je napětí přímo úměrné prodloužení. [20, 23]



Obr. 18. Pracovní diagram polyamidu [23]

Pokud budeme mluvit o časové závislosti na deformační chování, musíme se zmínit, že právě tato vlastnost zbránila používání charakteristiky tažnost stejným způsobem jako u kovů. Výpočet vychází z deformací trvalých. [20]

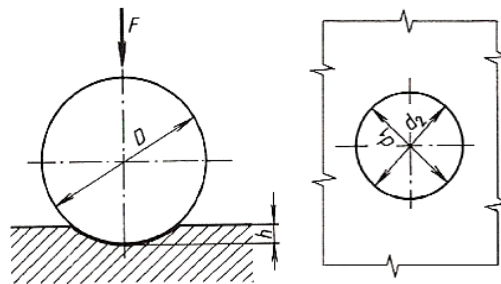
### 4.3 Zkoušky tvrdosti

Zkoušky tvrdosti patří mezi poměrně rychlé a nízko nákladové zkoušky. Pomocí nich lze rychle zjistit základní mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu. V této kapitole se budeme zabývat především zkouškami vnikacími. Princip všech zkoušek je velmi podobný. Vnikací tělíčko (indentor) je vtlačován do materiálu určitou silou. Ovšem hlavní rozdíl v metodách je v jejich vyhodnocení. [22, 23]

#### 4.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Nejstarší zkouškou tvrdosti je Brinellova zkouška tvrdosti dle normy ČSN EN ISO 6506-1. Tuto zkoušku je možné provádět přímo na povrchu zkoušené součásti. Je také možné použít zkušebních těles. Zkouška využívá tvrdokovové kuličky jako indentoru. Ty mohou být případně vyrobeny i z karbidu wolframu. Průměry této kuličky se bývají 1 mm, 2,5 mm, 5 mm a 10 mm. Stanovení průměru kuličky je odvislé od tloušťky zkoušeného materiálu. Obecně při této zkoušce musí platit, že nejmenší tloušťka materiálu je desetkrát větší než hloubka vtisku kuličky. [22, 23]

Zkouška začíná ve chvíli, kdy je vyvinuta síla na kuličku a ta je vtlačena do materiálu. Průběh zkoušky a následný otisk v materiálu je možné vidět na obrázku (obr. 19). Doba, po kterou síla působí je stanovena na základě materiálu. Měkčí materiály se zatěžují až 180 sekund. Tvrdší materiály po dobu 10 - 15 sekund. [22, 23]



Obr. 19. Zkouška tvrdosti podle Brinella [23]

$D$  - průměr indentoru;  $h$  - hloubka vtisku.

Pro vyhodnocení zkoušky musíme změřit průměr vtisku dvou rozměrů, které jsou vzájemně kolmé. Tyto hodnoty pak můžeme dosadit do vztahu (8) zjistit hodnotu Brinellovy tvrdosti. Je však třeba dodržet podmínku, že průměry vtisku se pohybují v rozmezích hodnot (0,3 - 0,6) průměru indentoru. [22]

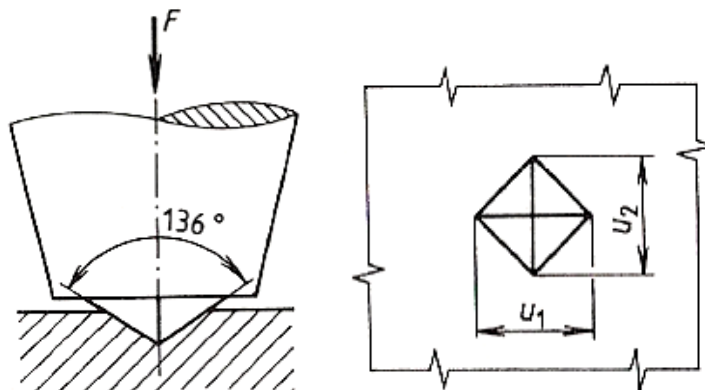
$$HB = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{S} = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (8)$$

Ze vztahu (8) plyne, že je tvrdost podle Brinella vlastně určena poměrem zkušebního zatížení a plochou vtisku. [23]

#### 4.3.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Nejvíce rozšířenou zkouškou tvrdosti na Evropském kontinentu je zkouška podle Vickerse probíhající dle normy ČSN EN ISO 6507-1. V tomto případě je zkušební indentor diamantový ve tvaru jehlanu, jehož základna je čtvercová. Vrcholový úhel tohoto jehlanu je 136 °. Označení Vickersova čísla tvrdosti je písmeny HV. Tato metoda není tak rozšířená jako Brinellova zkouška, z důvodů její náročnosti na přípravu povrchu zkušební materiálu. [22, 23]

Průběh zkoušky je velmi podobný Brinellově zkoušce. Jehlan je danou silou vtlačován do materiálu. Průběh této zkoušky je vidět na obrázku (obr. 20). Po následném odtížení můžeme vidět, že indentor zanechá typické stopy po vtisku. Doba zatížení se pohybuje mezi 10 - 15 sekundami. [22, 23]



Obr. 20. Zkouška tvrdosti podle Vickerse [23]

$u_1, u_2$  - úhlopříčky



Tvrdotost podle Vickerse je tedy vyhodnocena změřením úhlopříček zanechaných po vtisknutí jehlanu. Dosazením do vztahu (9) můžeme následně vypočítat numerickou hodnotu tvrdosti. [22, 23]

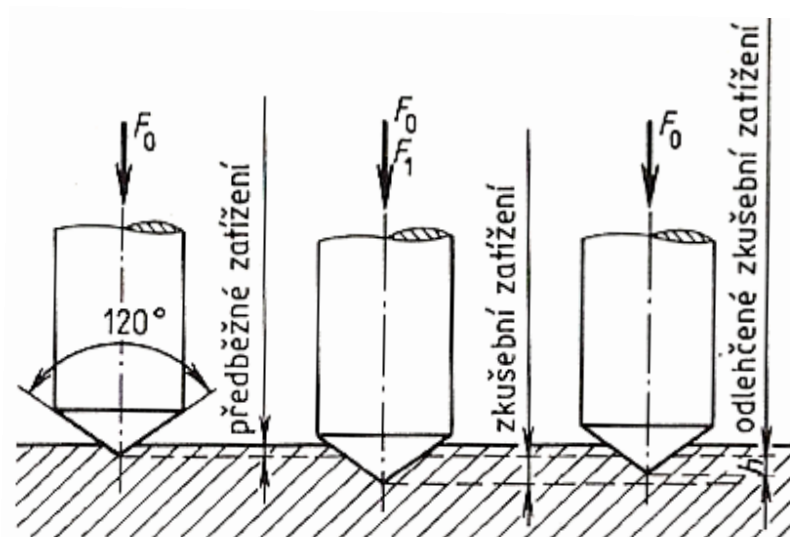
$$HV = 1,8544 \frac{F}{u^2} \quad (9)$$

Vztah pro učení tvrdosti podle Vicerse je dán podílem zatěžující síly k délce úhlopříček.

### 4.3.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Firma Rockwell ve Spojených státech amerických zavedla vlastní způsob měření tvrdosti. Metoda spočívá v tom, že se měří hloubka vtlačení malé kuličky nebo diamantového kužele při působení přesně stanovené síly. Průměr kuličky je udáván v palcích a může být buď 1/16" nebo 1/8". Zkouška probíhá dle normy ČSN EN ISO 6508-1. [22]

Průběh zkoušky tvrdosti se ovšem od předešlých liší. V prvním kroku je indentor zatížen předzatěžující silou. Toto předzatížení  $F_0$  má za úkol eliminovat vliv miniaturních povrchových nerovností. Poté dochází k pozvolnému zvětšování síly tak, aby se maximálního zatížení  $F_1$  dosáhlo za 3 až 6 sekund. Celkové zatížení je pak dáno  $F = F_0 + F_1$ . Následně zase sílu odlehčujeme až zpět na předzatížení  $F_0$ . Výsledná hodnota je pak dána hloubkou vtisku. [22, 23]



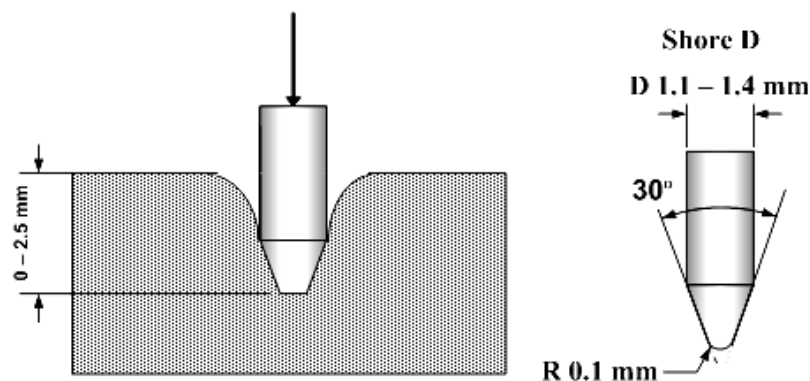
Obr. 21. Zkouška tvrdosti podle Rockwella [23]

$F_0$  - síla předběžného zatížení;  $F_1$  - zatěžující síla.

Odečítání samotné tvrdosti je velmi jednoduché. Není potřeba nic přepočítávat nebo pracně odvozovat. Hodnota tvrdosti se zobrazuje přímo na přístroji a to buď digitálně, nebo na ocejchované stupnici. Nároky na přípravu zkoušeného povrchu materiálu jsou také velmi malé. [22]

#### 4.3.4 Zkouška tvrdosti Shore D

Tvrdot plastů se obvykle měří pomocí tvrdoměru Shore nebo podle Rockwella. Rozeznáváme zkoušku Shore A a D Shore D. Zkouška Shore A se používá pro měkčí materiály (většina elastomerů). Naopak Shore D se používá pro tvrdé elastomery a většinu ostatních termoplastů. Zkouška je popisována evropskou normou EN ISO 868: 2003. Tvrdot Shore je měřítkem odolnosti materiálu proti vnikání jehlicovitého indentoru, který je vtlačen do povrchu silou pružiny. Stupnice Shore D se používá pro tvrdé elastomery a většinu ostatních termoplastů. Zatěžovací síla zkoušky je 4536 g. [24]



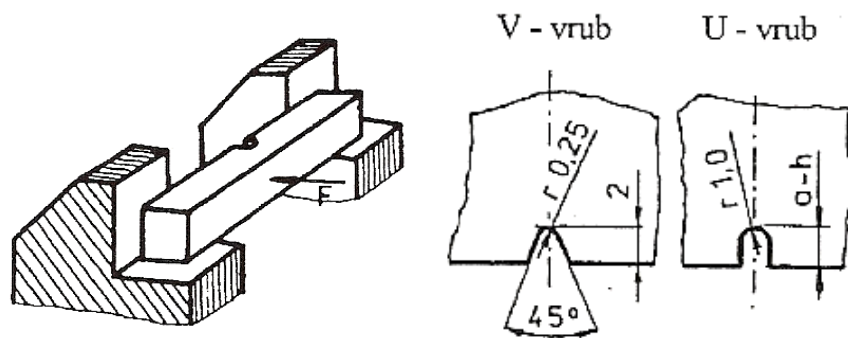
Obr. 22. Schéma zkoušky SHORE D včetně indentoru [24]

Stupnice tvrdosti Shore D se pohybuje v rozmezí 0 až 100. Maximální penetrace indentoru je do hloubky až 2,54 mm. Při maximální hodnotě tvrdosti Shore 100 je hloubka pronikání nulová. [24]

#### 4.4 Zkouška rázem v ohybu

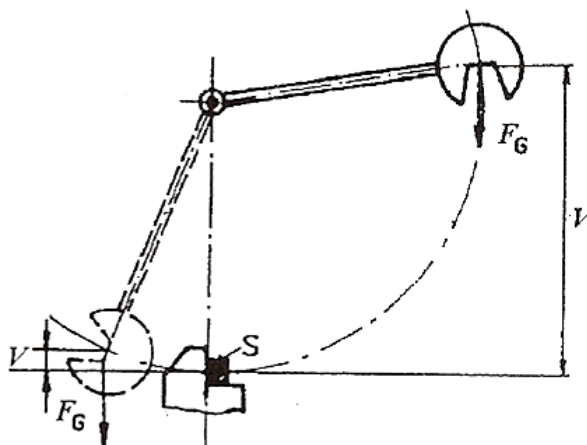
Zkouška rázem v ohybu nebo také zkouška vrubové houževnatosti je v technické praxi velmi používanou zkouškou a je pravdivým ukazatelem o křehkosti nebo naopak houževnatosti. Běžně zkouška probíhá na Charpyho kyvadlovém kladivu dle normy ČSN EN 10045-1. [23]

Zkouška probíhá na normalizovaných zkušebních tyčích. Výška zkušebního 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 (obr. 23). 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. [22, 23]



Obr. 23. Typy používaných vrubů a upevnění zkušebního tělesa [22]

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 (obr. 24). [22, 23]



Obr. 24. Průběh zkoušky na Charpyho kladivu [22]

$F_G$  - tíha kladiva; S - zkušební tyč; V - výška, ze které bylo kladivo spuštěno; v - výška po přeražení.

Pro vyhodnocení zkoušky je potřeba zjistit velikost **nárazové práce**. Ze vzorce (10) plyne, že nárazová práce funkcí výšky, do které se kladivo dostane po přeražení vzorku. [22]

$$K = F_G \cdot (V - v) \quad (10)$$

Samotná **vrubová houževnatost** je přepočítána jako podíl spotřebované nárazové práce a velikosti průřezu v místě vrubu. [22, 23]

$$KC(U/V) = \frac{K(U/V)}{S_o} \quad (11)$$

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 zkušební tělesa. [22]

#### 4.4.1 Zkoušení rázem v ohybu u polymerních materiálů

Zkoušení rázem v ohybu se u polymerních materiálů provádí nejčastěji na Charpyho kladivu podle normy ISO 179. Pokud je zkušební tyč opatřena vrubem jedná se o vrubovou houževnatost. Naopak v případě, že tyč vrub postrádá, měříme rázovou houževnatost. Pro polymerní materiál je typické, že s rostoucí teplotou roste i vrubová a rázová houževnatost. Ovšem tento jev může způsobit i modifikování polymerního materiálu příměsemi nebo přidáním plniva. Jelikož jsou výsledky těchto zkoušek silně ovlivněny teplotou polymeru, musíme zkoušky provádět za stejných teplot, abychom dostali vypovídající výsledky. [23]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE

Tato práce má za cíl zjistit vliv množství a typu recyklátu na mechanické vlastnosti materiálu. Testovaným materiálem je polykarbonát. Hlavní cílem praktické části je provést experiment, při kterém budou výrobky ze studovaného polymeru drceny na drť (recyklát) a následně znovu zpracovány na výrobky. Ty pak budou podrobeny mechanickým zkouškám. Praktická část se bude postupně zabývat těmito body:

- Příprava výrobků z daného materiálu. Výrobky budou připraveny pomocí technologie vstřikování.
- Všechny výrobky budou následně použity pro výrobu recyklátu. Recyklát bude vyroben mletím na nožovém mlýnu.
- Recyklát bude následně proséván tak, aby byl získán materiál zbavený malých částecek a prachu.
- Takto vyrobený recyklát bude míchán v různých poměrech s "čistým" granulátem. Následně pak bude tento namíchaný materiál znovu použit pro vstřikování výrobků.
- Všechny výrobky budou následně podrobovány různým mechanickým zkouškám. Mezi tyto zkoušky patří tahová zkouška, zkouška tvrdosti a zkouška vrubové houževnatosti.
- Závěr práce se bude věnovat vyhodnocení všech získaných výsledků a poznatků. Z těchto dat pak budou vyvozeny náležité závěry a stanoviska.

## 6 ZKOUMANÝ MATERIÁL

Testovaným polymerem je polykarbonát. Jedná se o polykarbonát s obchodním názvem Makrolon<sup>®</sup> 2205 vyráběný firmou Bayer. Oficiální označení podle normy DIN EN ISO 7391-1 je termoplast ISO 7391 - PC, MR, (,) - 24 - 9.

Tento polymer se řadí do skupiny termoplastů. Jedná se o lineární polykarbonát na bázi bisfenolu A. Má nízkou molekulovou hmotnost a je velmi snadno tekoucí. Makrolon 2205 se vyznačuje sice nižší úrovní houževnatosti, přesto má však širokou škálu využití. Materiál také vykazuje velmi dobré tokové vlastnosti a jeho tepelně elektrické vlastnosti jsou do velké míry téměř totožné s materiály vyšších molekulových tříd. Naproti nim však mají horší houževnatost.

Makrolon 2205 je běžně dodáván ve formě granulátu. Tyto granule jsou baleny v polyethylenových pytlích o celkové váze 25 kilogramů. Každý pytel je vzduchotěsný tak, aby se zamezilo působení vzdušné vlhkosti. Makrolon 2205 je dodáván v transparentních, zakalených a neprůhledných barvách. Je nutné pamatovat na to, že vlastnosti materiálu jsou neprůhlednými barevnými pigmenty ovlivněny. Náš materiál je neprůhledný a černě zbarvený.



*Obr. 25. Granule Makrolonu 2205*

Na obrázku (obr. 25) je detail granulí Makrolonu 2205. Pro získání hrubé představy o velikosti granulí je přiloženo pravítko.

V tabulce (tab. 1) jsou uvedeny základní parametry materiálu. První část se zabývá obecnými vlastnostmi, mezi které patří fyzikální vlastnosti a mechanické vlastnosti. Druhá

část se pak zabývá charakteristikami materiálu, které přímo souvisí s procesem vstřikování. Jsou zde popsány především zpracovatelské teploty.

*Tab. 1. Tabulka základních parametrů materiálu dle výrobce*

<b>Hustota</b>	1190 kg/m <sup>3</sup>
<b>Modul v tahu</b>	2400 MPa
<b>Modul ve střihu</b>	869 MPa
<b>Poissonovo číslo</b>	0,38
<b>Modul v tahu (tečení), 1 hodina</b>	2100 MPa
<b>Modul v tahu (tečení), 1000 hodin</b>	1700 MPa
<b>MVR (300 °C/1.2 kg)</b>	35 cm <sup>3</sup> /10 min
<b>Maximální zpracovatelská teplota</b>	360 °C
<b>Rozsah vstřikovacích teplot</b>	280 - 320 °C
<b>Rozsah teplot formy</b>	80 - 120 °C
<b>Vyhazovací teplota</b>	130 °C
<b>Maximální smykové napětí</b>	0,5 MPa
<b>Maximální smyková rychlost</b>	40000 1/s
<b>Maximální obsah vody v granulátu</b>	0,02 %

Specifické vlastnosti Makrolonu 2205, především vysoký index toku taveniny, jej předurčují zejména pro použití na díly tenkostěnné nebo díly, u kterých se vyskytují dlouhá průtoková místa. Tento materiál je konkrétně využíván nejčastěji pro výrobu těl světlometů v automobilovém průmyslu.



## 7 VSTŘIKOVÁNÍ VÝROBKŮ

Prvním úkolem práce bylo vyrobit výrobky za pomoci technologie vstřikování. Takto vyrobené díly pak byly později použity pro získání recyklátu.

### 7.1 Sušení materiálu

Vstřikovaný materiál Makrolon 2205 je velmi navlhavý a měl by být před zpracováním vysušen. V granulích by nemělo více než 0,02 % zbytkové vody pro vstřikování. Vlhkost by vedla k povrchovým vadám v materiálu a dokonce by mohlo dojít i ke snížení molekulové hmotnosti.

Makrolon 2205 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 již vysušeného granulátu. Pro sušení materiálu byla použita sušárna Thermolift od firmy Arburg, kterou je možné vidět na obrázku (obr. 26). Materiál byl sušen 3 hodiny při teplotě 120 °C. Takto vysušený materiál již obsahoval optimální množství vody (menší než 0,02 %).



Obr. 26. Sušárna [25]

Při sušení bylo také nutné dbát na to, aby nedošlo k přesušení materiálu. Tento jev by negativně ovlivnil celý proces vstřikování.

## 7.2 Vstřikování

Vstřikování probíhalo na vstřikovacím stroji od firmy Arburg. Konkrétně se jednalo o vstřikovací stroj Arburg 470 C s hydraulickým uzavíracím systémem. Bylo vyrobeno požadované množství výrobků, které budou poté sloužit k výrobě recyklátu. Na ilustračním obrázku (obr. 27) je možné vidět stroj stejného typu.



Obr. 27. Vstřikovací stroj Arburg 470 C [26]

Základní parametry vstřikovacího stroje jsou popsány v tabulce (tab. 2). Jsou zde uvedeny jen ty nezákladnější. Podle nich je však možné stroj bezpečně identifikovat. Pro účel tohoto experimentu byl stroj naprosto dostačující. Dostatečné místo mezi vodícími sloupky zaručuje prostor pro umístění použité formy. Vstřikovací výkon  $202,2 \text{ cm}^3$  byl také naprosto vyhovující. Daný výrobek včetně vtokového systému měl objem  $35,4 \text{ cm}^3$ .

Tab. 2. Tabulka základních parametrů vstřikovacího stroje

Vzdálenost mezi vodícími sloupky	470 x 470 mm
Velikost upínací desky	650 x 650 mm
Maximální objem vstřikované dávky	$210,2 \text{ cm}^3$
Průměr šneku	40 mm
Celkový příkon stroje	29,4 kW
Maximální uzavírací síla	1500 kN

Velmi důležité bylo pro celý experiment také nastavení vstřikovacích podmínek. Samozřejmě by nebylo možné použít pro výrobu recyklátu kusů, které jsou vadné. Například degradovaný materiál a podobné vady by výrazně ovlivnily i recyklát. Proto bylo třeba maximálně dbát na výrobu výrobků tak, aby bylo dosaženo vysoké jakosti, tak jako tomu je v běžné výrobě v průmyslových podnicích. Nastavené procesní podmínky

vstřikování, jež jsou popsány v tabulce (tab. 3) vycházely z doporučených hodnot zadaných přímo výrobcem daného polymeru.

Tab. 3. Tabulka nastavení vstřikovacích podmínek

Teplota taveniny	300 °C				
Teplota formy	100 °C				
Vyhazovací teplota	130 °C				
Teplota temperačního média	100 °C				
Vstřikování rychlost / tlak	60 mm.s <sup>-1</sup> / 60 MPa				
Dotlak délka / velikost	30 sekund / 35 MPa				
Bod přepnutí	9,5 mm				
Doba cyklu	55 sekund				
Teploty jednotlivých pásem	Výstupní 300 °C	295 °C	290 °C	285 °C	Vstupní 280 °C

Z tabulky je patrné, že výrobek měl poměrně dlouhý vstřikovací cyklus, což bylo dáno poměrně dlouhou dobou dotlaku.

### 7.3 Vstřikovaný výrobek

Při vstřikování byla použita forma na výrobek, který je vidět na obrázku (obr. 28). Jedná se o zkušební tyčinky pro mechanické zkoušky. Nahoře se nachází tyčinka pro mechanickou zkoušku tahem a dole tyčinka pro zkoušku vrubové houževnatosti. Zkušební tělíska byla vstříknuta dle normy ČSN EN ISO 527.



Obr. 28. Vstřikovaný výrobek

Na obrázku jsou tyčinky včetně neodděleného vtokového systému. Ten zaujímá velkou část celého výrobku. V teoretické části bylo zmíněno, že vtokový zbytek tvoří velkou část

celého výstříku. V tabulce (tab. 4) jsou uvedeny hmotnosti vtokového zbytku, výrobku (tyčinek) a výstříku. Je tak možné porovnat jednotlivá hmotnostní zastoupení.

**Výpočet aritmetického průměru:**

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \qquad \bar{X} = \frac{24,4 + 24,4 + 24,5 + \dots + 24,3}{10} = 24,4 \text{ mm} \quad (12)$$

**Výpočet směrodatné odchylky:**

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \qquad S = + \sqrt{\frac{(24,4 - 24,4)^2 + \dots + (24,3 - 24,4)^2}{(10-1)}} = 0,1 \quad (13)$$

Tab. 4. Tabulka hmotnosti výstříku

Číslo měření	Výstřík [g]	Vtok [g]	Výrobek [g]
1.	24,4	10,6	13,8
2.	24,4	10,6	13,8
3.	24,5	10,5	14,0
4.	24,4	10,6	13,8
5.	24,3	10,6	13,7
6.	24,4	10,5	13,9
7.	24,4	10,7	13,7
8.	24,5	10,6	13,9
9.	24,4	10,6	13,8
10.	24,3	10,7	13,6
Aritmetický průměr $\bar{X}$	24,4	10,6	13,8
Směr. odchylka S	0,1	0,1	0,1
Procentuální poměr	100%	43%	57%

Z tabulky (tab. 4) je patrné, že hmotnost výstříku je 24,4 g. Váha odděleného vtokového systému je 10,6 g. Vtok tedy představuje 43 % celkové hmotnosti výstříku. Znamená to, že i zde tvoří odpad téměř polovinu hmotnosti. Při hromadné výrobě by se jednalo o velké množství nevyužitého materiálu.



Obr. 29. Výrobek bez vtokové soustavy

## 8 VÝROBA RECYKLÁTU

Po fázi výroby výstřiků bylo přistoupeno k samotné přípravě recyklovaného materiálu. Tato příprava sestává nejprve z mletí polykarbonátových výrobků a poté z prosévání získané drtě.

### 8.1 Mletí polykarbonátu

Mletí polykarbonátových výrobků probíhalo na nožovém mlýnu typu GK 2218 od výrobce Maskin AB Rapid. Jedná se o stroj starší výroby, avšak pro potřebu daného experimentu byl výkon i pracovní prostor plně dostačující. Stroj byl plněn výrobky přibližně po pětiminutových intervalech. Velikost jedné dávky se pohybovala okolo mezi 15 a 20 kusy.



Obr. 30. Nožový mlýn

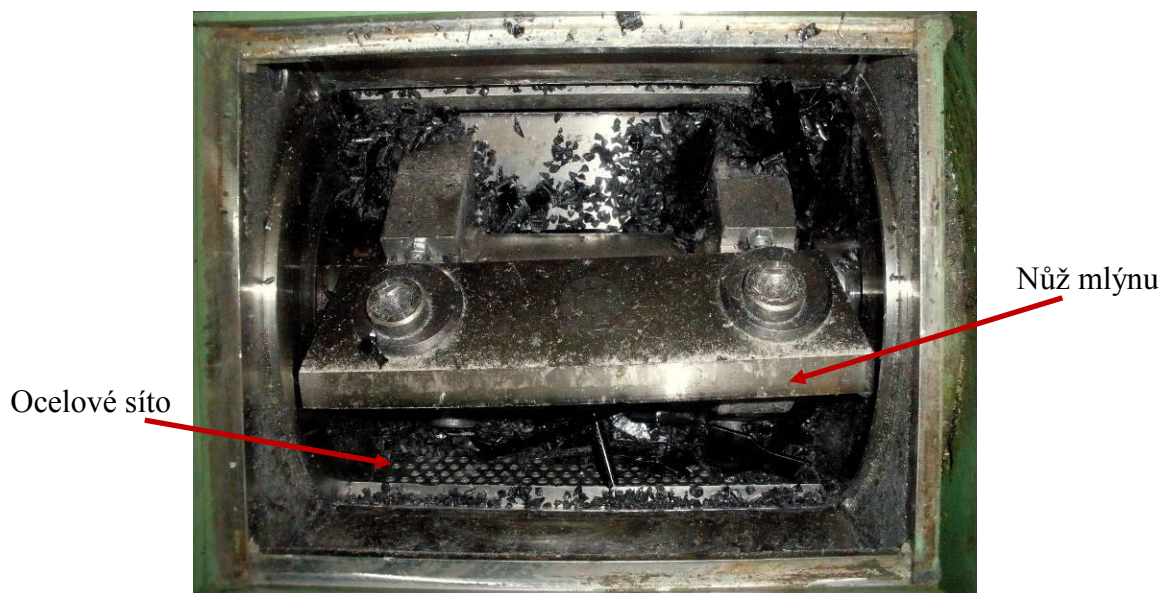
Technická data použitého drtiče jsou uvedena v následující tabulce (tab. 5).

Tab. 5. Tabulka parametrů nožového mlýnu

<b>Výrobce</b>	MASKIN AB RAPID
<b>Typ</b>	GK 2218
<b>Výkon</b>	3 kW
<b>Velikost ok v sítu</b>	4 mm
<b>Průměr rotoru</b>	200 mm
<b>Hmotnost</b>	150 kg

Obrázek (obr. 31) skýtá pohled na pracovní prostor nožového mlýnu. Ten je možné vidět jen v případě, že je stroj vypnutý a je demontována násypka. Rotor mlýnu se otáčí a nože rozemílají výrobky na drť. Když drť dosáhne určité velikosti, odchází skrz ocelové síto pryč. V prostoru se nachází současně velmi malé částičky drti a celé ještě nezpracované kusy výrobků.

Polykarbonát se řadí mezi poměrně pevné materiály. Tato skutečnost zásadně ovlivnila samotné drcení. Při provozu docházelo vlivem velkých třecích sil k relativně vysoké tvorbě tepla. Teplota místy dosahovala takové velikosti, že by mohlo docházet k tavení a případně k dalšímu namáhání polymeru vlivem tepla. Stroj byl tedy plněn pomalu tak, aby měl vždy dostatek času na ochlazení. Pro drcení tohoto konkrétního materiálu by bylo vhodné mlýn intenzivně chladit.



*Obr. 31. Pracovní prostor nožového mlýnu*

Výstupem z nožového mlýna, byla různorodá drť obsahující mnoho částiček rozličných velikostí až po jemný prach. Jsou to právě prachové a velmi jemné částičky, které představují pro další zpracování jisté riziko.

Detailně je možné vidět drť na obrázku (obr. 32). Jedná se především o drť větších rozměrů (větší než 2mm). Je zde přiloženo pravítko, pro hrubé získání představy o velikosti dané směsi. Pokud jej porovnáme s obrázkem (obr. 25), kde je vyobrazen čistý granulát, můžeme vidět, že se velikostí příliš neliší. Ovšem tvar této drti je diametrálně odlišný. Je

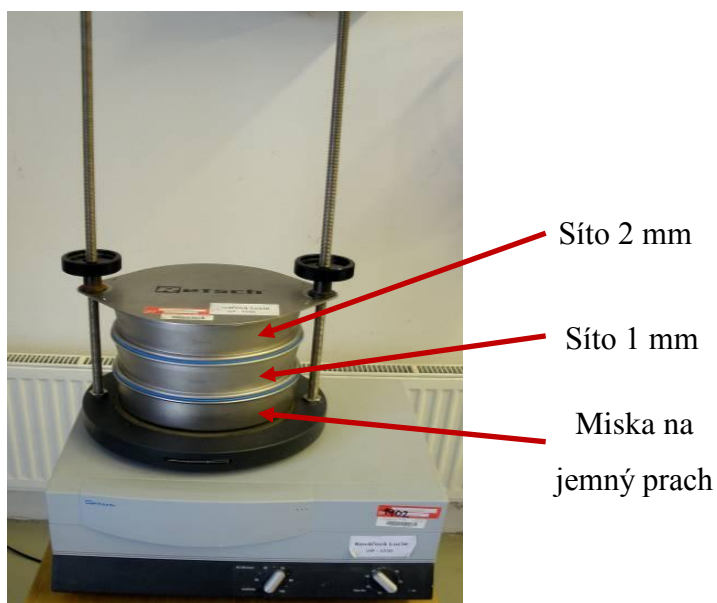
patrné, že se jedná o úlomky s ostrými hranami. Jsou zde také patrné jisté rozdíly ve velikostech mezi částčkami drti.



Obr. 32. Detailní pohled na recyklát

## 8.2 Prosévání

Bezprostředně po mletí následovalo prosévání materiálu. Účelem prosévání bylo odstranit již zmiňované velmi jemné částčky a prach. Prosévání probíhalo na laboratorní prosévačce AS 200 Basic viz obrázek (obr. 33).



Obr. 33. Prosévačka AS 200 Basic

Technické parametry prosévačky jsou zapsány v tabulce (tab. 6). Při práci byla amplituda nastavena na 80 %, což znamená rozsah přibližně 2,4 mm. Velikost jedné navážky byla stanovena na 250 gramů. Délka prosévání jedné navážky pak byla 120 sekund.

Tab. 6. Tabulka parametrů prosévačky

<b>Typ</b>	AS 200 Basic
<b>Druh pohybu</b>	Vibrační s 3D efektem
<b>Rozsah amplitudy</b>	0 - 3 mm
<b>Rozměry Š x V x H</b>	400 x 230 x 350 mm

Pro prosévání byla použita dvě síta. První síto o velikosti ok 2 mm zachytávalo částice větší než 2 mm. Těchto částic bylo nejvíce. Druhé síto mělo velikost ok 1 mm. Na závěr byla umístěna miska pro zachycení prachu.

Na prvním sítu byla zachycena drť složená z částic větších než 2 mm. Tento materiál budeme dále nazývat přeseťou drť. Nepřeseťá drť pak obsahuje částice všech velikostí a je tedy velmi různorodá.

Obrázek (obr. 34) zobrazuje drť zachycenou na druhém sítu. Jedná se částice menší než 2 mm a zároveň větší než 1 mm. Při porovnání s obrázkem (obr. 32) můžeme konstatovat, že částice drti mají téměř shodný tvar a liší se především velikostí.



Obr. 34. Drť zachycená na druhém sítu

V misce byl zachycen velmi jemný prach (velikost menší 1 mm). Tento prach je možné vidět na obrázku (obr. 35). Prach i drť zachycená na druhém sítu tvoří za běžných



podmínek odpad, který není již dále zpracován. Jsou totiž díky své velikosti nevhodné pro běžnou výrobu. Jemné prachové částice se mohou dříve roztavit, což by po delší době mohlo vést až k degradaci. Takto by mohlo dojít k narušení výsledné struktury výrobku.



Obr. 35. Jemný prach zachycený v misce

Tabulka (tab. 7) udává poměr hmotností podle velikosti drtě v jedné 250 gramové navážce. Bylo provedeno celkem deset měření, které byly následně statisticky vyhodnoceny.

Tab. 7. Poměr hmotností různých velikostí částic

Číslo měření	Větší než 2 mm [g]	Menší než 2 mm a větší než 1 mm [g]	Menší než 1 mm [g]
1	229,1	16,3	4,6
2	230,2	15,7	4,1
3	229,6	16,1	4,3
4	229,9	15,6	4,5
5	229,2	16,7	4,1
6	229,1	16,4	4,5
7	230,3	15,6	4,1
8	229,3	16,9	3,8
9	229,4	16,2	4,4
10	229,6	16,5	3,9
Arit. průměr $\bar{X}$	229,6	16,2	4,2
Směr. odchylka S	0,4	0,4	0,3
Procentuální poměr	92%	6%	2%

Z tabulky (tab. 7) plyne, že největší zastoupení mají částičky větší než 2 mm. Těch se v jedné navážce vyskytuje až 92 % celkové hmotnosti. Drť menší než 2 mm a zároveň větší než 1 mm je zastoupena přibližně 6 %. A nakonec drti menší než 1 mm (prach) je v 250 gramech materiálu jen 4,2 gramu, což odpovídá zhruba 2 %.

## 9 VSTŘIKOVÁNÍ RECYKLOVANÝCH DÍLŮ

Ve chvíli kdy byla drť vyrobena, bylo potřeba začít s přípravou na vstřikování nových výrobků z tohoto materiálu. Je důležité mít na paměti, že se jedná o velmi navlhavý materiál, tudíž je potřeba jej vysušit stejným způsobem jak bylo popsáno v kapitole 7.1.

Pro vstřikování byly použity směsi těchto materiálů:

- granule čistého polykarbonátu,
- přeseťá drť,
- nepřeseťá drť.

Vstřikování z recyklátu probíhalo na stejném vstřikovacím stroji jako vstřikování výrobků, jak bylo zmíněno v kapitole 7.2. Od každé sady byl vyroben požadovaný počet vzorků. Po každé sadě musela být násypka i válec vstřikovací jednotky vyčištěn, aby nedošlo ke vzájemné kontaminaci jednotlivých směsí. V tabulce (tab. 8) jsou popsána složení jednotlivých sad vzorků chronologicky tak, jak byly postupně vyrobeny.

Tab. 8. Tabulka vyrobených vzorků

Sada vzorků	Složení
1	Čistý polykarbonát 100 %
2	Čistý polykarbonát 75 % + 25 % přeseťé drti
3	Čistý polykarbonát 50 % + 50 % přeseťé drti
4	Přeseťá drť 100 %
5	Čistý polykarbonát 75 % + 25 % nepřeseťé drti
6	Čistý polykarbonát 50 % + 50 % nepřeseťé drti
7	Nepřeseťá drť 100 %

Všem výrobkům byla bezprostředně po vystříknutí odstraněna celá vtoková soustava, abychom dostali již hotové výrobky. Těmi jsou zkušební tyčinky určené pro mechanické zkoušky, viz (obr. 29).

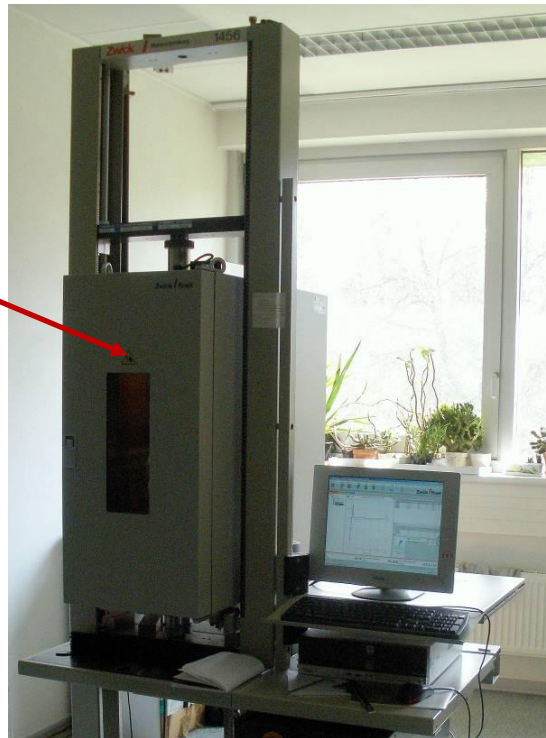
## 10 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Všechny sady vzorků popsané v minulé kapitole byly podrobovány různým mechanickým zkouškám. Jednalo se o tahovou zkoušku, zkoušky vrubové houževnatosti a zkoušku tvrdosti Shore D.

### 10.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na trhačím stroji od firmy Zwick/Roel typu W91255. Trhačí stroj je vybaven temperační jednotkou, která umožňuje provádění tahových zkoušek za různých teplot. Jednotka umožňuje rozsah teplot od - 80 od + 250 °C. Maximální posuv čelistí stroje je 800 mm.min<sup>-1</sup>. Zkouška probíhala podle normy ČSN EN ISO 527.

Temperovaný  
pracovní  
prostor trhačky.



Obr. 36. Trhačí stroj typu W91255

Nejprve bylo nutné vytemperovat celou temperační jednotku a zkušební vzorky na požadovanou teplotu. Po té byly upínací čelisti ustaveny do nulové polohy. Zkušební tělíska byla upnuta za rozšířená místa. Po upnutí bylo nutné znovu vytemperovat na danou teplotu. Při spuštění zkoušky se nejprve ramena extenzometru přitisknou ke zkušebnímu tělísku. Ty zaznamenávají změny délky tělíska. Rychlost posuvu čelistí byla nastavena na 50 mm za minutu. Tělíska byla neustále natahována a zkouška pak skončila ve chvíli, kdy

se zkušební tělísko přetrhlo. Na obrázku (obr. 37) je vidět upnutí zkušebního tělíska do čelistí přímo uvnitř v temperační jednotce.



*Obr. 37. Upnutí tělíska na trhacím stroji*

Na předchozím obrázku můžeme ve spodní části vidět vzorky, které jsou přichystány pro tahovou zkoušku a jsou temperovány na požadovanou teplotu.

### 10.1.1 Vyhodnocení modulu pružnosti v tahu

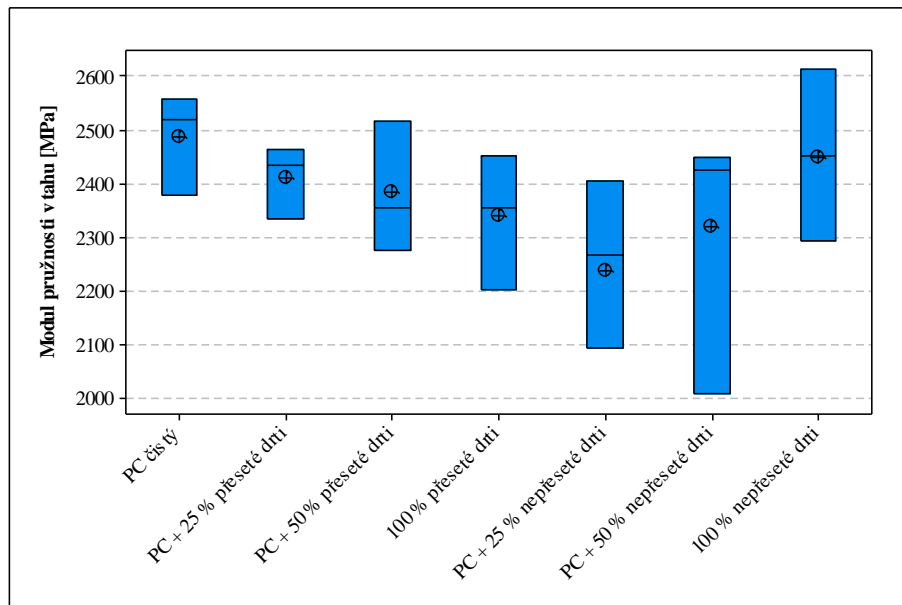
Každý vzorek materiálu byl měřen desetkrát při čtyřech různých teplotách. Jednalo se o teplotu - 24 °C, pokojovou teplotu (23 °C), 100 °C a 145 °C. Veškeré naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze P I Modul pružnosti v tahu. V tabulce (tab. 9) jsou zaznamenány pouze statistické veličiny jako aritmetický průměr a směrodatná odchylka.

*Tab. 9. Modul pružnosti při různých teplotách*

Číslo měření	PC čistý [MPa]	PC + 25 % přeseť drti [MPa]	PC + 50 % přeseť drti [MPa]	100 % přeseť drti [MPa]	PC + 25 % nepřeseť drti [MPa]	PC + 50 % nepřeseť drti [MPa]	100 % nepřeseť drti [MPa]
Měření při teplotě - 24 °C							
$\bar{X}$	2488	2411	2384	2339	2235	2319	2448
S	133	95	147	203	213	246	184
Měření při teplotě 23 °C							
$\bar{X}$	2372	2253	2263	2278	2245	2221	2152
S	79	57	54	83	67	99	184
Měření při teplotě 100 °C							
$\bar{X}$	1891	1558	1898	1911	1694	1578	1601
S	148	289	198	141	409	179	278

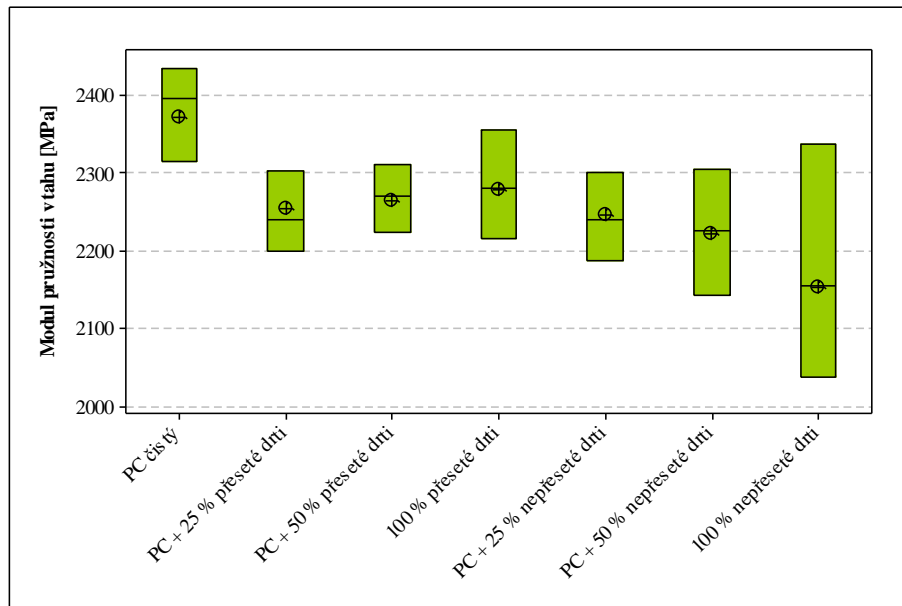
Číslo měření	PC čistý [MPa]	PC + 25 % přeseť drti [MPa]	PC + 50 % přeseť drti [MPa]	100 % přeseť drti [MPa]	PC + 25 % nepřeseť drti [MPa]	PC + 50 % nepřeseť drti [MPa]	100 % nepřeseť drti [MPa]
Měření při teplotě 145 °C							
$\bar{X}$	257	173	175	181	224	200	156
S	33	36	25	48	32	64	31

Výsledky měření jsou dále zpracovány do boxplotových grafů. Pro každou teplotu byl vytvořen samostatný graf. Křížek v grafu znázorňuje aritmetický průměr. Na svislé ose je zaznamenán modul pružnosti a na vodorovné jsou vyneseny jednotlivé materiály.



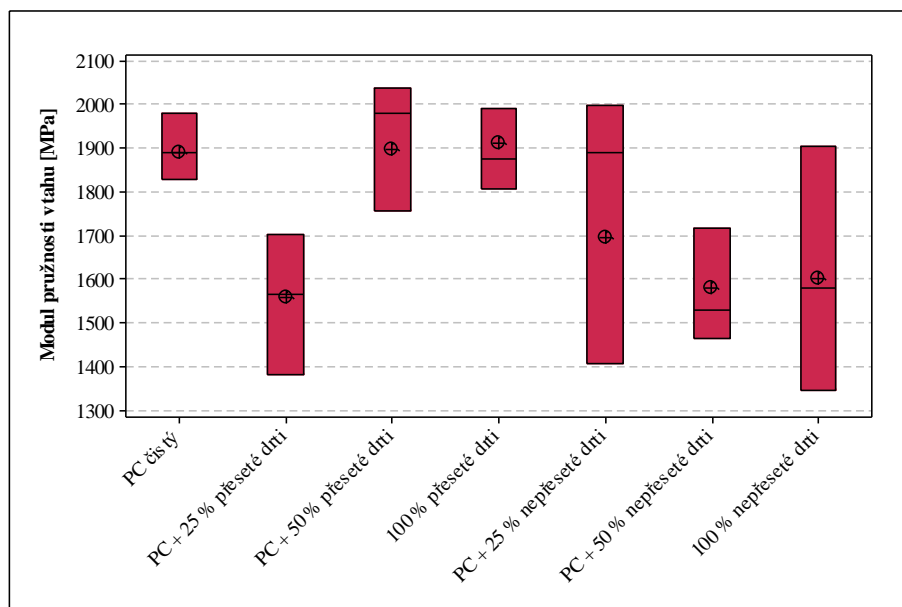
Obr. 38. Graf modulu pružnosti v tahu při teplotě - 24 °C

Z grafu (obr. 38) je patrné, že nejméně jsou rozptýleny hodnoty PC čistého a PC + 25 % přeseť drti. Nejvíce jsou pak rozptýlené hodnoty směsí, kde byla přidána nepřeseť drť. PC čistý má také nejvyšší hodnotu modulu pružnosti. Oproti ostatním hodnotám je vyšší řádově o 100 MPa. Nejnižší hodnotu má pak PC s přídavkem 25 % nepřeseť drti.



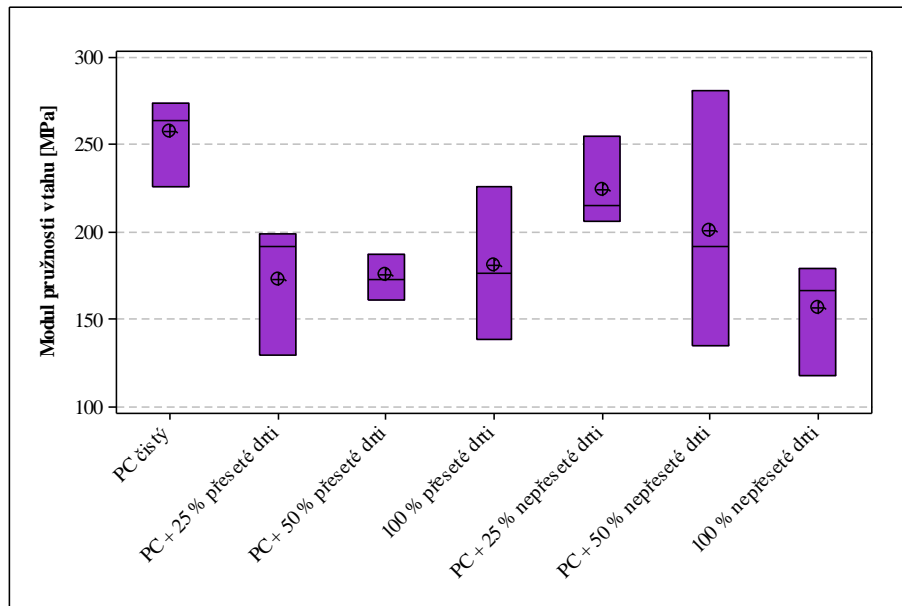
Obr. 39. Graf modulu pružnosti v tahu při teplotě 23 °C

Při teplotě 23 °C je modul má stále nejvyšší modul pružnosti PC čistý viz (obr. 39). Nejnižší hodnotu má směs 100 % nepřeseťé drti, která má také nejvíce rozptýlené hodnoty. Velikost modulů pružnosti ostatních směsí se pohybuje v rozmezí přibližně od 2200 MPa do 2300 MPa.



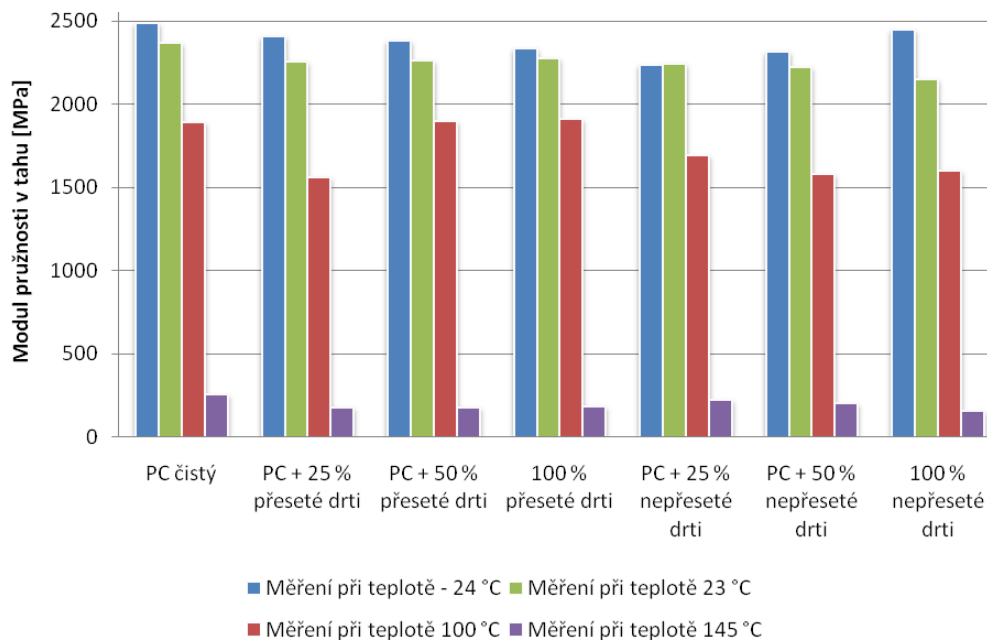
Obr. 40. Graf modulu pružnosti v tahu při teplotě 100 °C

Z obrázku (obr. 40) je zřetelné, že naměřené hodnoty při 100 °C jsou od předchozích případů velmi rozdílné. Můžeme vypořadovat velký rozptyl mezi hodnotami. Největší rozptyl je PC čistého, PC + 25 % nepřeseťé drti a 100 % nepřeseťé drti.



Obr. 41. Graf modulu pružnosti v tahu při teplotě 145 °C

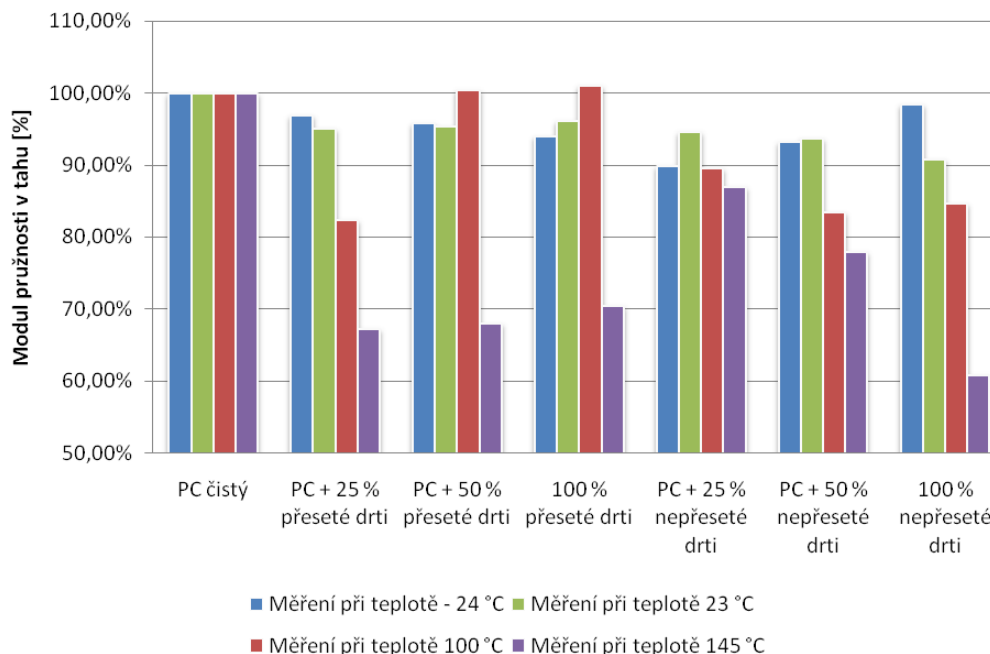
Při teplotě 145 °C jsou hodnoty nejvíce rozptýleny u směsi PC + 50 % nepřeseťé drti viz (obr. 41). Nejvyšší hodnotu modulu pružnosti má PC čistý ten dosahuje v průměru 257 MPa. Nejnižší hodnotu má pak 100 % nepřeseťé drti.



Obr. 42. Graf porovnávací modulu pružnosti při různých teplotách

Obrázek (obr. 42) zobrazuje graf porovnávací modulu pružnosti při všech teplotách. Při pohledu na tento graf je jasné, že nevyšších hodnot modulu pružnosti dosahoval PC čistý při všech teplotách kromě 100 °C. Naproti tomu materiál 100 % nepřeseťé drti sice při

- 24 °C dosáhl poměrně dobrých hodnot, avšak při ostatních teplotách dopadl hůře než ostatní. Další směsi, které vykazují nižší modul, jsou především směsi s přidavkem různých poměrů nepřeseté drti.



*Obr. 43. Graf procentuálně porovnávající modul pružnosti při různých teplotách*

Graf na obrázku (obr. 43) porovnává procentuálně modul pružnosti. Výchozí materiál je pro nás PC čistý, jehož hodnota modulu pružnosti je zobrazena jako 100 %. V tomto případě lze poměrně dobře vidět rozdíly mezi jednotlivými materiály. Až na dva případy, kdy je hodnota modulu pružnosti srovnatelná, je modul pružnosti PC čistého vždy vyšší oproti ostatním směsím.

### 10.1.2 Vyhodnocení prodloužení v tahu

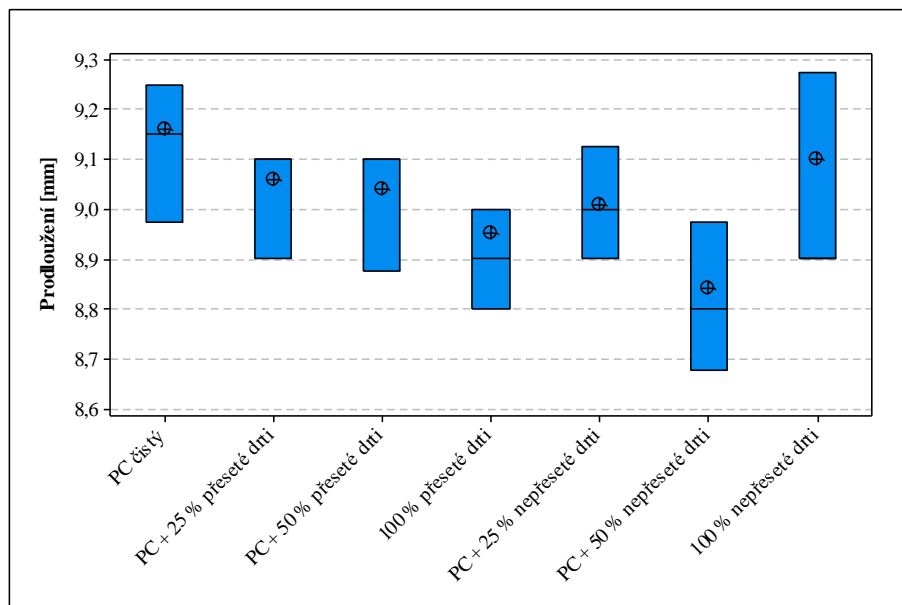
Každý vzorek materiálu byl měřen desetkrát při teplotách - 24 °C, 23 °C, 100 °C a 145 °C. Veškeré naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze P II Prodloužení v tahu. V tabulce (tab. 10) jsou zaznamenány pouze statistické veličiny jako aritmetický průměr a směrodatná odchylka.



Tab. 10. Prodloužení v tahu při různých teplotách

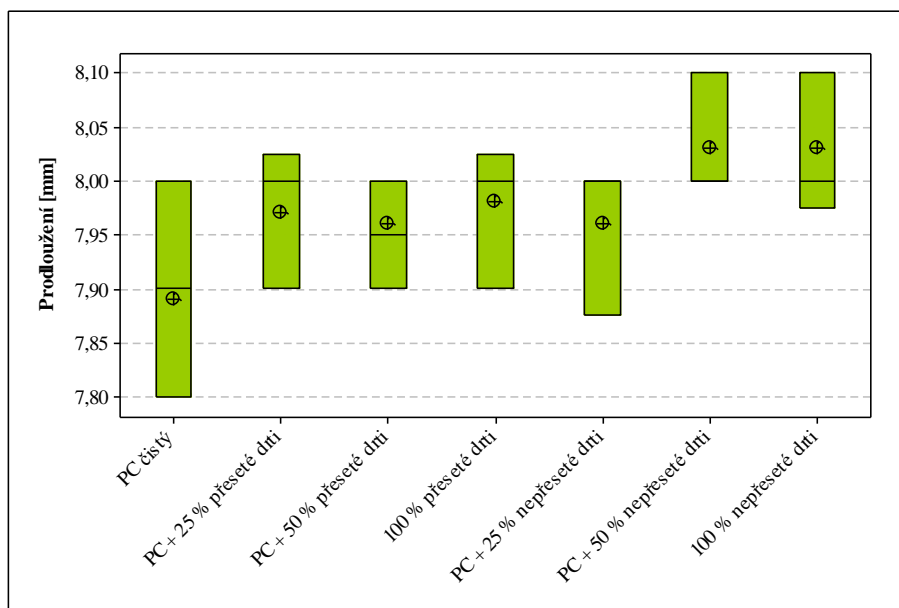
Číslo měření	PC čistý [mm]	PC + 25 % přeseťe drti [mm]	PC + 50 % přeseťe drti [mm]	100 % přeseťe drti [mm]	PC + 25 % nepřeseťe drti [mm]	PC + 50 % nepřeseťe drti [mm]	100 % nepřeseťe drti [mm]
Měření při teplotě - 24 °C							
$\bar{X}$	9,2	9,1	9,0	9,0	9,0	8,8	9,1
S	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
Měření při teplotě 23 °C							
$\bar{X}$	7,9	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
S	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
Měření při teplotě 100 °C							
$\bar{X}$	5,3	5,2	5,2	5,2	5,3	5,3	5,6
S	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,6
Měření při teplotě 145 °C							
$\bar{X}$	3,3	3,6	3,6	3,5	3,6	4,2	4,3
S	0,1	0,2	0,3	0,4	1,0	1,2	1,1

Výsledky měření jsou dále zpracovány do boxplotových grafů. Pro každou teplotu byl vytvořen samostatný graf. Křížek v grafu znázorňuje aritmetický průměr. Na svislé ose je vyneseno prodloužení a na vodorovné jsou pak jednotlivé materiály.



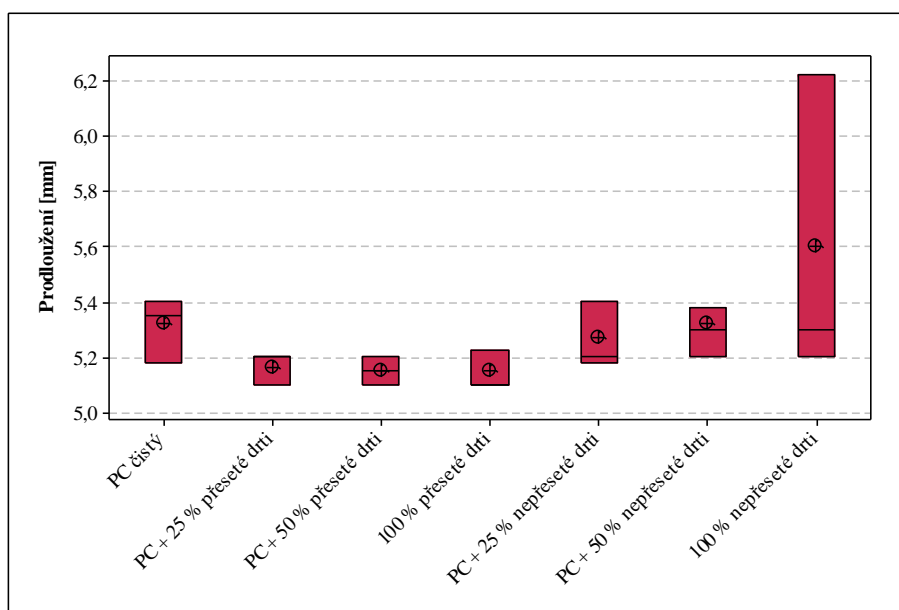
Obr. 44. Graf prodloužení při teplotě - 24 °C

Z obrázku (obr. 44) je patrné, že největšího prodloužení dosáhl materiál PC čistý. Nejmenší prodloužení při natahování pak vykázal materiál PC + 50 % nepřeseťe drti. Hodnoty byly velmi podobné a lišily se v řádu desetin milimetru.



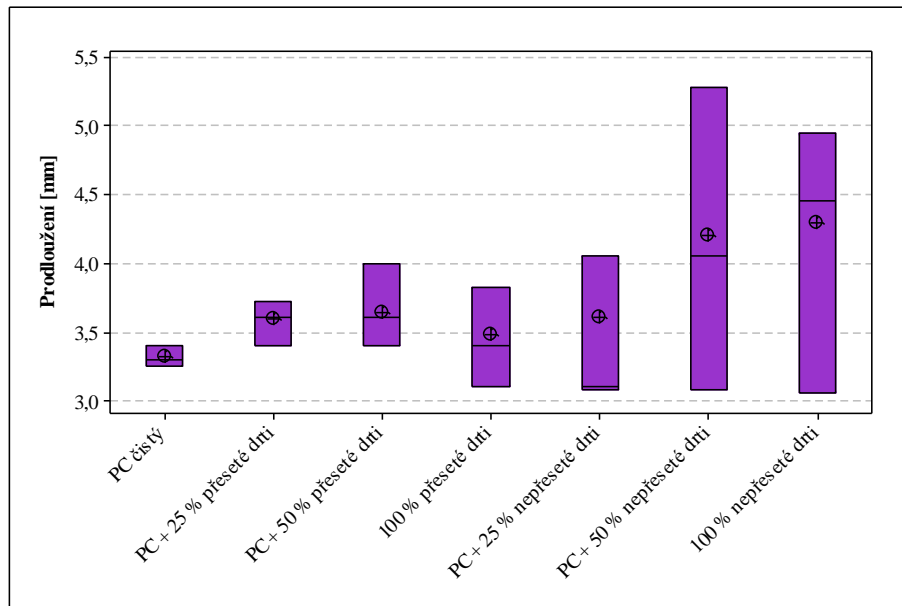
Obr. 45. Graf prodloužení při teplotě 23 °C

V tomto případě vykázal PC čistý nejmenší prodloužení, viz (obr. 45) a jeho hodnoty byly nejvíce rozptýleny. Rozptyl ostatních hodnot byl přibližně stejný, až na směsi PC + 50 % nepřeseť drti a 100 % nepřeseť drti.



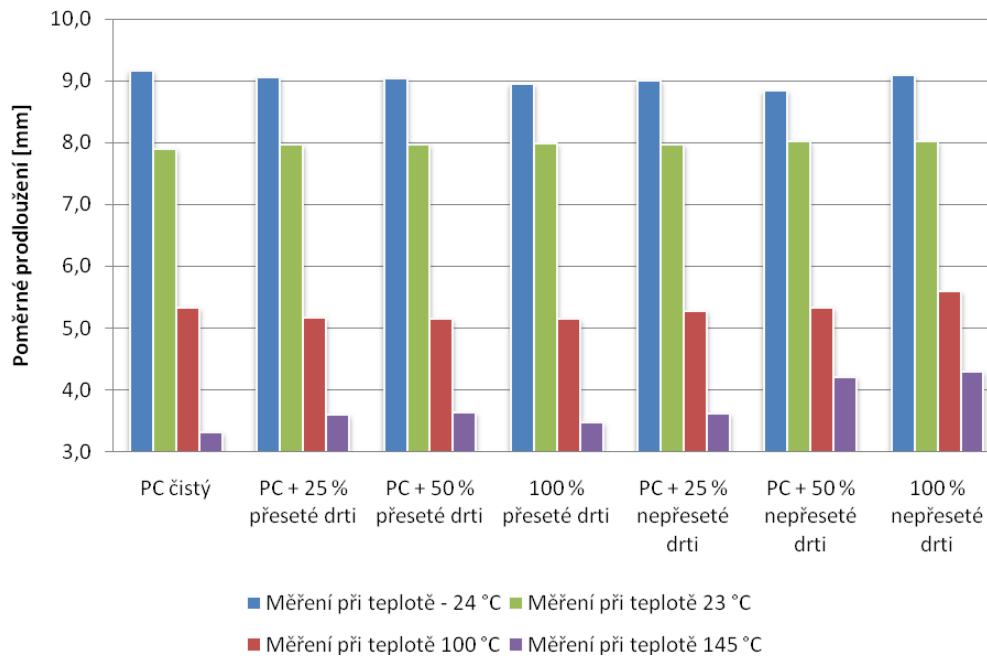
Obr. 46. Graf prodloužení při teplotě 100 °C

Při teplotě 100 °C vykazuje graf (obr. 46) velmi zajímavé rozložení hodnot. Zatímco všechny směsi kromě 100 % nepřeseť drti jsou vyrovnané a liší v řádu 2 až 3 desetín milimetru, tak 100 % nepřeseť drť má rozptýlené hodnoty v rozmezí 1 milimetru. Tento materiál dosahuje také největšího prodloužení.



Obr. 47. Graf prodloužení při teplotě 145 °C

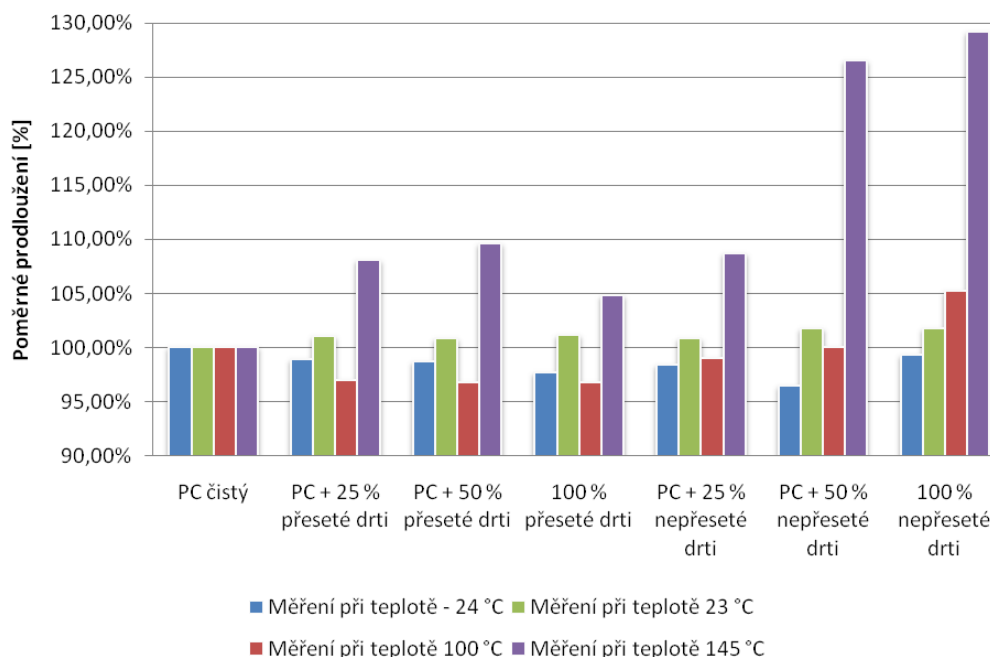
Graf při poslední měřené teplotě je možné vidět na obrázku (obr. 47). Zde je patrné, že největší prodloužení bylo naměřeno u směsi PC + 50 % nepřeseťé drti a 100 % nepřeseťé drti. Nejméně se prodlužoval pak PC čistý, jehož rozptyl hodnot byl nejmenší.



Obr. 48. Graf porovnávací prodloužení při různých teplotách

Graf porovnávací prodloužení při různých teplotách je zobrazen na obrázku (obr. 48). Co se týče porovnávání, byly hodnoty vyrovnanější než v případě modulu pružnosti, až na teplotu 145 °C. Při této teplotě má nejmenší prodloužení PC čistý. Při celkovém

zhodnocení všech teplot pak největšího prodloužení dosahuje právě směs se 100 % nepřeseté drti.



Obr. 49. Graf procentuálně porovnávající prodloužení při různých teplotách

Graf porovnávající procentuálně prodloužení vzorků při různých teplotách je možné vidět na obrázku (obr. 49). Zde je na první pohled patrné, že všechny materiály mají při teplotách - 24 °C, 23 °C, 100 °C srovnatelná prodloužení. Avšak u teploty 145 °C je znatelný jistý nárůst u materiálů s přidaným recyklátem. Největší je pak u 100 % nepřeseté drti.

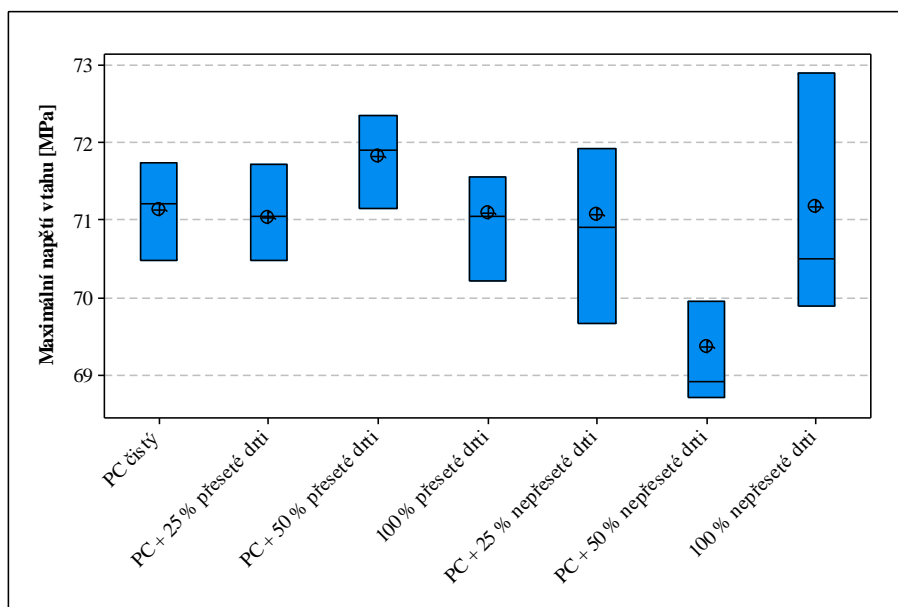
### 10.1.3 Vyhodnocení maximální napětí v tahu

Zkušební vzorky byly změřeny desetkrát při čtyřech teplotách. Nejprve při teplotě - 24 °C, poté 23 °C, 100 °C a nakonec 145 °C. Veškeré naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze P II Maximální napětí v tahu. V tabulce (tab. 11) jsou zaznamenány pouze statistické veličiny jako aritmetický průměr a směrodatná odchylka.

Tab. 11. Maximální napětí při různých teplotách

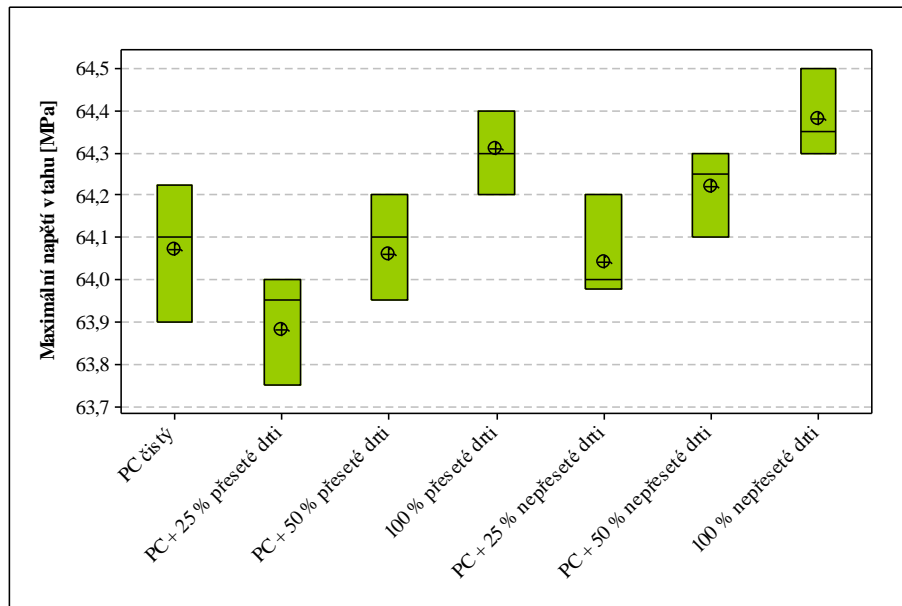
Číslo měření	PC čistý [MPa]	PC + 25 % přeseťe drti [MPa]	PC + 50 % přeseťe drti [MPa]	100 % přeseťe drti [MPa]	PC + 25 % nepřeseťe drti [MPa]	PC + 50 % nepřeseťe drti [MPa]	100 % nepřeseťe drti [MPa]
Měření při teplotě - 24 °C							
$\bar{X}$	71,1	71,0	71,8	71,1	71,1	69,3	71,2
S	0,9	0,7	0,9	1,0	1,4	1,2	1,7
Měření při teplotě 23 °C							
$\bar{X}$	64,1	63,9	64,1	64,3	64,0	64,2	64,4
S	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2
Měření při teplotě 100 °C							
$\bar{X}$	44,7	45,2	42,7	43,6	43,1	45,8	44,7
S	0,7	0,7	0,8	0,6	1,0	0,7	0,9
Měření při teplotě 145 °C							
$\bar{X}$	5,2	2,9	2,5	3,1	4,1	4,3	3,4
S	2,9	0,1	0,4	1,0	0,9	2,1	0,7

Výsledky měření jsou dále zpracovány do boxplotových grafů. Pro každou teplotu byl vytvořen samostatný graf. Křížek v grafu znázorňuje aritmetický průměr. Na svislé ose je vyneseno maximální napětí v tahu a na vodorovné jednotlivé materiály.



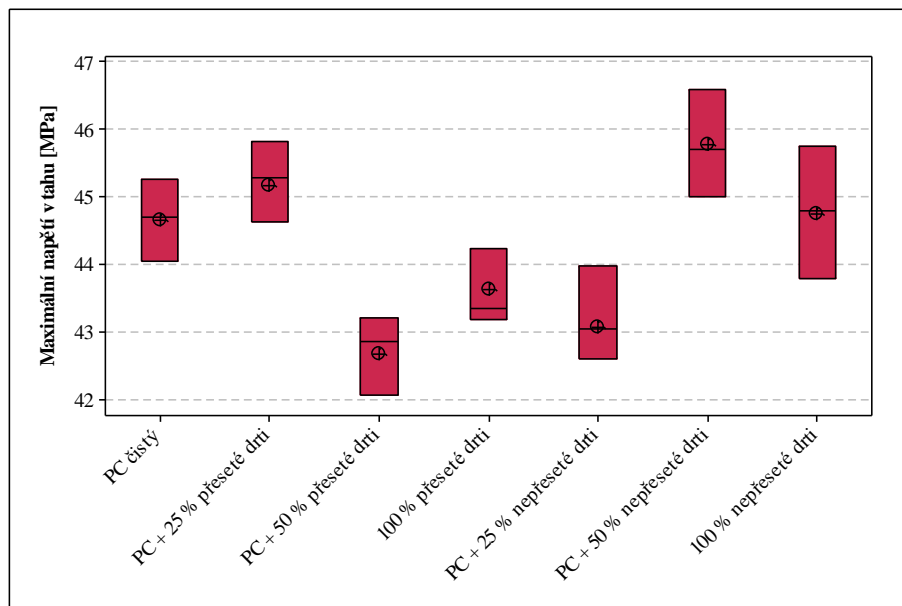
Obr. 50. Graf maximálního napětí v tahu teplotě - 24 °C

V grafu maximálního napětí v tahu při teplotě - 24 °C jsou nejvíce rozptýleny hodnoty u směsi 100 % nepřeseťe drti, viz (obr. 50). Nejvyšší hodnotu vykazuje PC + 50 % nepřeseťe drti je však vyšší jen v řádu 0,5 MPa. Nejnižšího napětí pak nabývá PC + 50 % nepřeseťe drti.



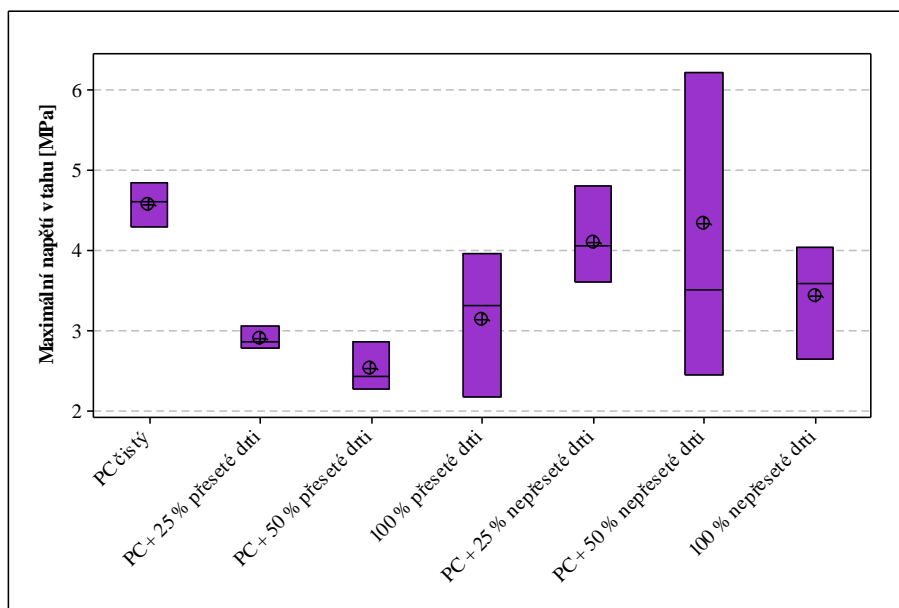
Obr. 51. Graf maximálního napětí v tahu teplotě 23 °C

Při prvním pohledu na obrázek (obr. 51) je jasné, že hodnoty mají přibližně stejný rozptyl. Rozdíl mezi největší hodnotou u 100 % nepřeseťe drti a nejmenší hodnotou PC + 25 % přeseťe drti je pouze asi 6 desetin MPa. Hodnoty jsou tak poměrně vyrovnané.



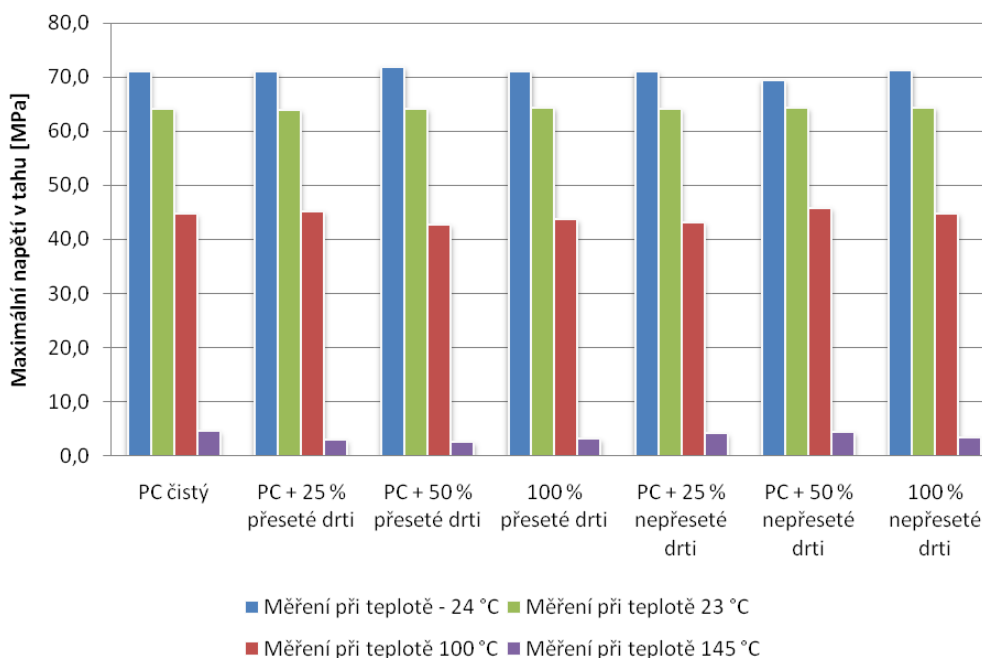
Obr. 52. Graf maximálního napětí v tahu teplotě 100 °C

U grafu při teplotě 100 °C (obr. 52) je patrný větší rozdíl mezi hodnotami než v předchozím případě. Největšího maximálního napětí nabývá PC + 50 % nepřeseťe drti a nejmenší maximální napětí pak můžeme hledat u PC + 50 % přeseťe drti. Rozdíly jsou již v řádu 3 MPa.



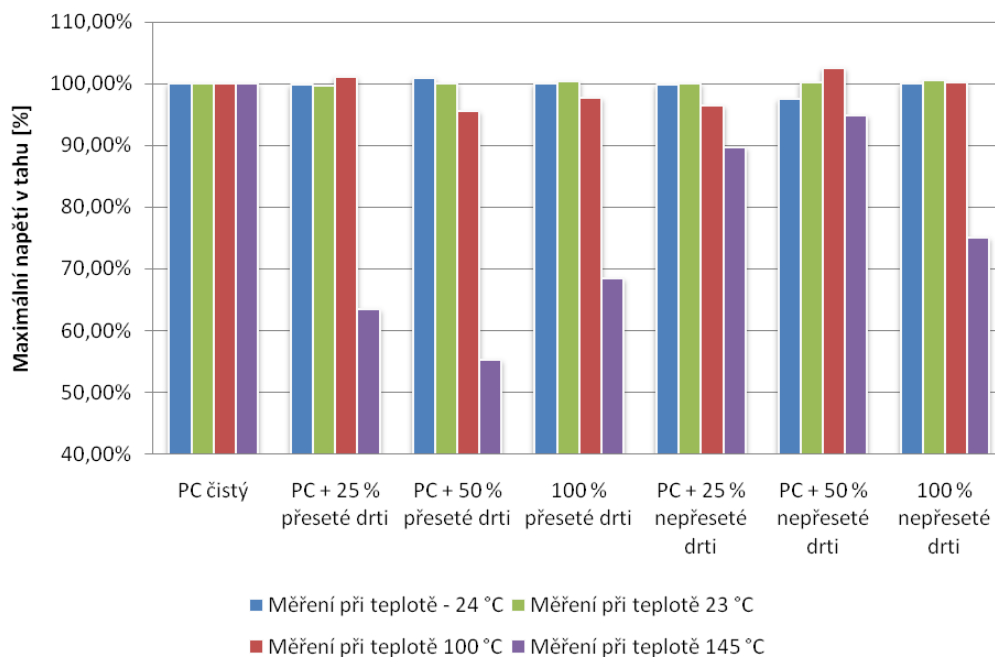
Obr. 53. Graf maximálního napětí v tahu teplotě 145 °C

Při teplotě 145 °C je maximální napětí v tahu největší u PC čistého. Ostatní materiály v tomto případě vykazují nižší hodnoty. Směs PC + 50 % přeseť drti má pak nejmenší maximální napětí v tahu při této teplotě.



Obr. 54. Graf porovnávací maximální napětí v tahu při různých teplotách

Z grafu viz (obr. 54) je patrné, že hodnoty jsou opět dosti vyrovnané. Jistých rozdílů je možné si všimnout až při teplotě 145 °C, kdy nejlépe dopadl materiál PC čistý a nejhůře pak směsi PC + 25 % a PC + 50 % přeseť drti.



Obr. 55. Graf procentuálně porovnávající maximální napětí při různých teplotách

Procentuálně porovnané maximální napětí zobrazuje graf, viz (obr. 55). Zde jsou u všech materiálů vidět opět menší rozdíly až do teploty 145 °C. Při této teplotě materiály s přidáním recyklátu vykazují jistou ztrátu pevnosti. Ta největší je vidět u materiálu PC + 50 % přeseťé drti.

## 10.2 Zkouška vrubové houževnatosti

Druhou mechanickou zkouškou v pořadí byla zkouška vrubové houževnatosti neboli zkouška na Charpyho kladivu. Zkoušení bylo provedeno na zkušebním stroji Resil Impactor junior od firmy CEAST. Tento zkušební stroj dokáže vyvinout rychlost rázu  $2,63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Délka kyvadla je 225 mm a úhel jeho vychýlení je  $40^\circ$ . Zaoblení břitu je  $2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ .





*Obr. 56. Charpyho kladivo*

Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 179. Každému zkoušení předcházela příprava jednotlivých vzorků. Ta sestávala z vytvoření vrubu na vzorku. Vrub byl vytvořen pomocí zařízení, které je zachyceno na obrázku (obr. 57). Byly vytvořeny vruby ve tvaru V s hloubkou 2 mm. Po připravení všech vzorků bylo přistoupeno k samotné zkoušce. Vzorek byl nejprve upnut do zkušebního zařízení a poté byl pomocí kyvadla přeražen.



*Obr. 57. Příklad pro tvorbu vrubů*

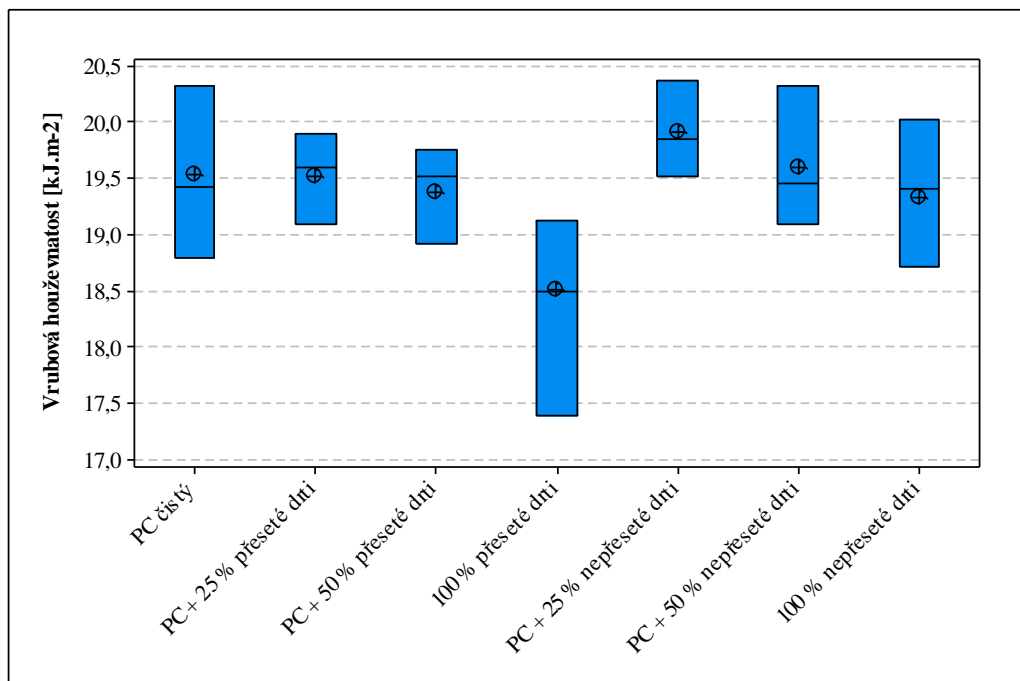
### 10.2.1 Vyhodnocení vrubové houževnatosti

Každý vzorek materiálu byl měřen desetkrát při čtyřech různých teplotách. Jednalo se o teploty - 24 °C, pokojovou teplotu (23 °C), teplotu 100 °C a 145 °C. Veškeré naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze P IV Vrubová houževnatost. V tabulce (tab. 12) jsou zaznamenány pouze statistické veličiny jako aritmetický průměr a směrodatná odchylka.

Tab. 12. Vrubová houževnatost při různých teplotách

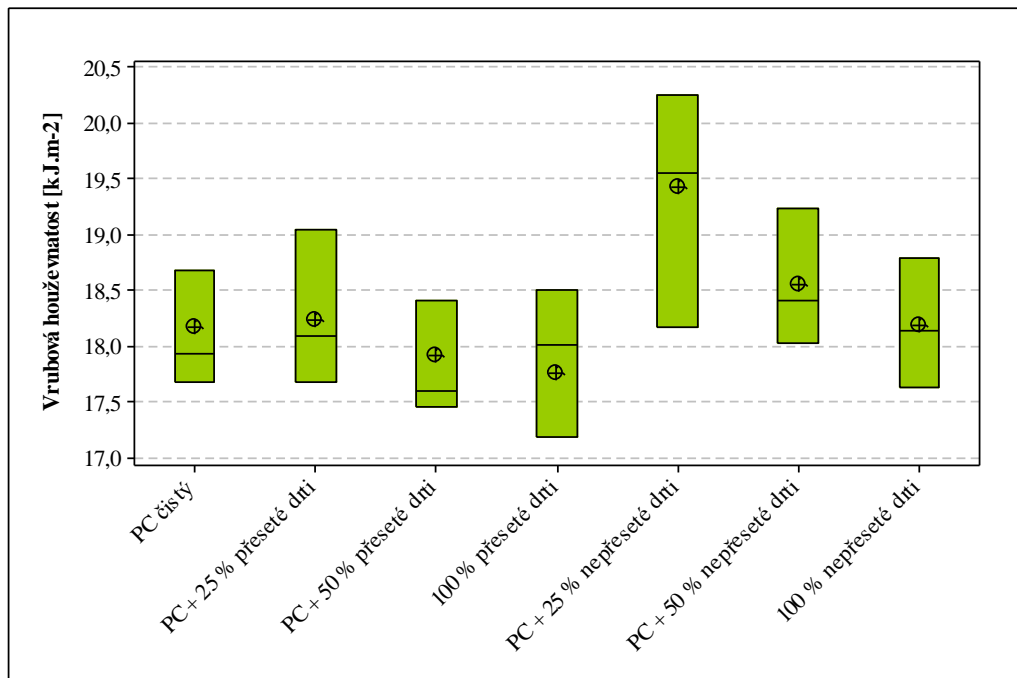
Číslo měření	PC čistý [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 25 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 50 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	100 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 25 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 50 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	100 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]
Měření při teplotě - 24 °C							
$\bar{X}$	19,53	19,51	19,37	18,50	19,91	19,60	19,33
S	1,07	0,74	0,63	1,23	0,84	0,70	0,82
Měření při teplotě 23 °C							
$\bar{X}$	18,17	18,23	17,92	17,76	19,43	18,56	18,18
S	0,85	0,72	0,61	0,83	1,25	0,91	0,63
Měření při teplotě 100 °C							
$\bar{X}$	11,36	10,96	12,37	10,88	12,76	12,67	11,71
S	1,14	1,37	0,87	1,76	1,79	1,61	1,24
Měření při teplotě 145 °C							
$\bar{X}$	4,6	5,41	5,87	5,76	6,69	6,27	5,70
S	0,4	0,38	0,57	0,50	0,61	0,49	0,38

Výsledky měření jsou dále zpracovány do boxplotových grafů. Pro každou teplotu byl vytvořen samostatný graf. Křížek v grafu znázorňuje aritmetický průměr. Svislá osa popisuje vrubovou houževnatost. Vodorovná pak popisuje zkoušené materiály.



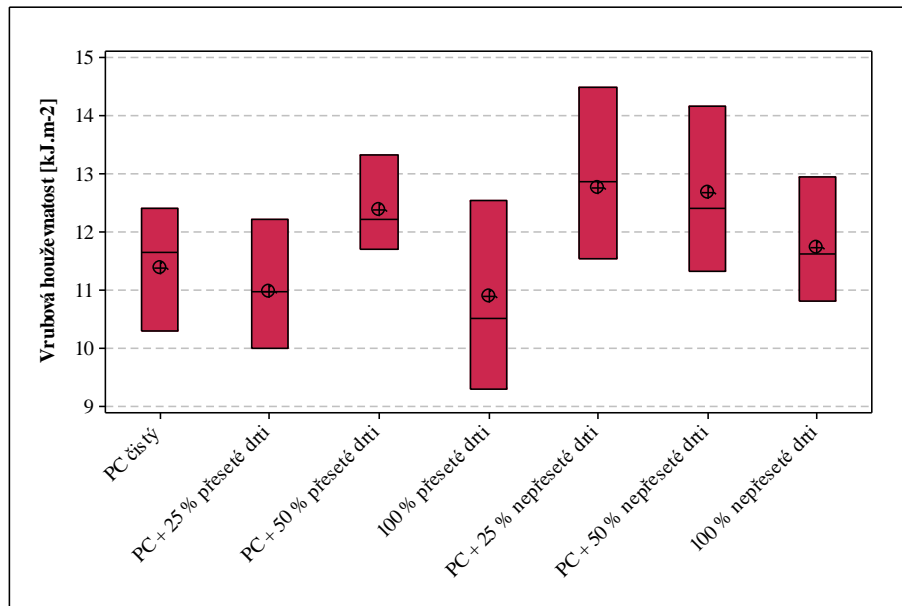
Obr. 58. Graf vrubové houževnatosti při teplotě - 24 °C

Vrubová houževnatost byla při teplotě - 24 °C u většiny hodnoty vyrovnaná až na směs 100 % přeseť drti. Zde byl zaznamenán jistý propad v řádu 1 kJ.m<sup>-2</sup>. Nejvyšší vrubovou houževnatost pak měl PC + 25 % nepřeseť drti.



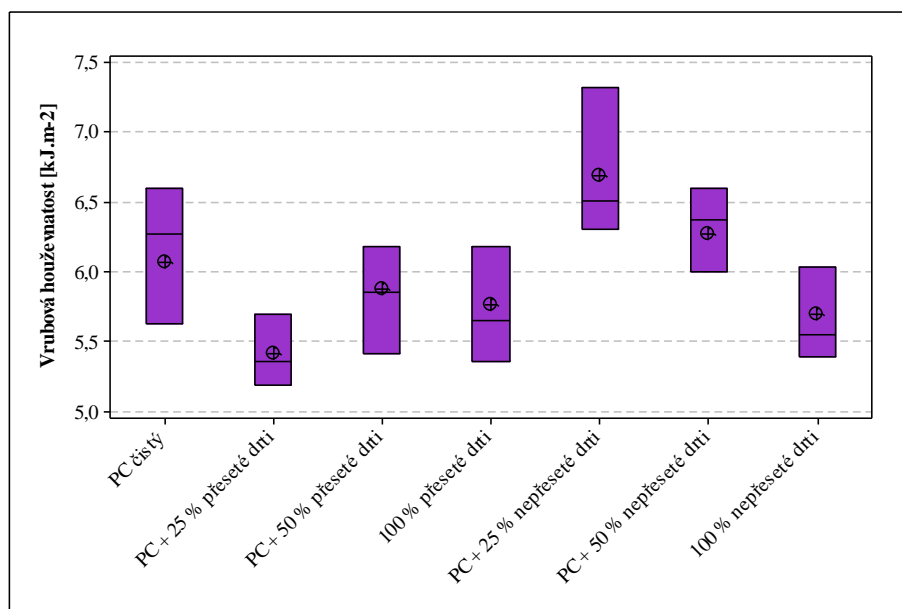
Obr. 59. Graf vrubové houževnatosti při teplotě 23 °C

Graf vrubové houževnatosti při teplotě 23 °C zobrazuje, jak se chovaly jednotlivé materiálové směsi při zkoušce. Jak je možné vidět na obrázku (obr. 59), nejvyšší rozptyl hodnot vrubové houževnatosti je patrný u směsí PC + 25 % nepřeseť drti a PC + 50 % nepřeseť drti. Hodnoty jsou přibližně stejné u všech směsí až na PC + 25 % nepřeseť drti, zde je vidět nárůst vrubové houževnatosti.



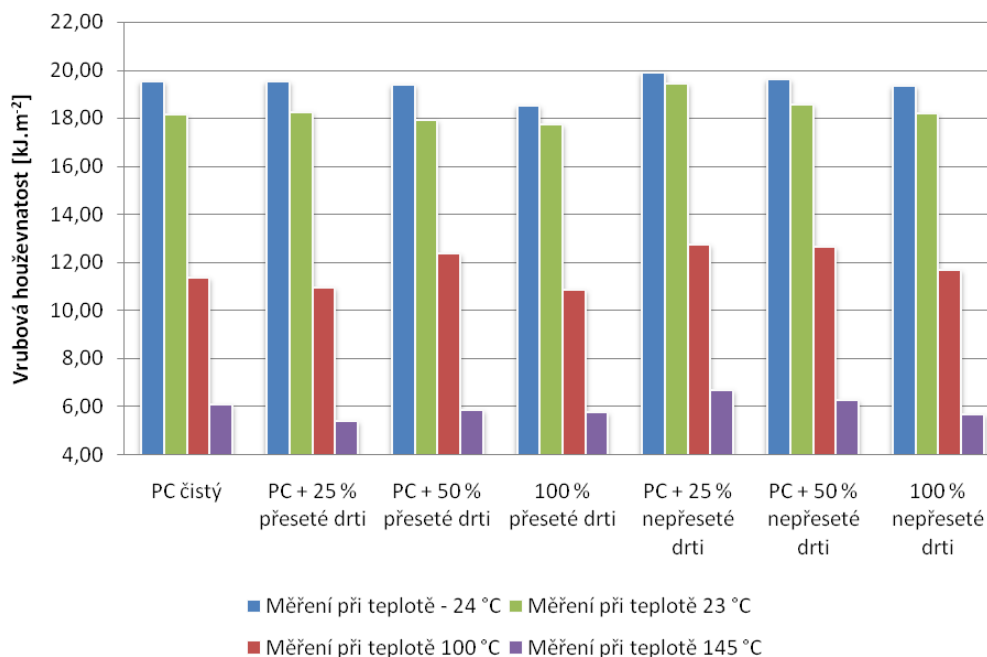
Obr. 60. Graf vrubové houževnatosti při teplotě 100 °C

Obrázek (obr. 60) zobrazuje vrubovou houževnatost jednotlivých materiálů při 100 °C. Na první pohled je jasné, že hodnoty jsou více rozptýleny než v minulém případě. Vrubová houževnatost jednotlivých materiálů není již tak vyrovnaná. Největší rozptyl je pak možné zaznamenat u směsi, kde byla použita jako příměs nepřeseťá dřť.



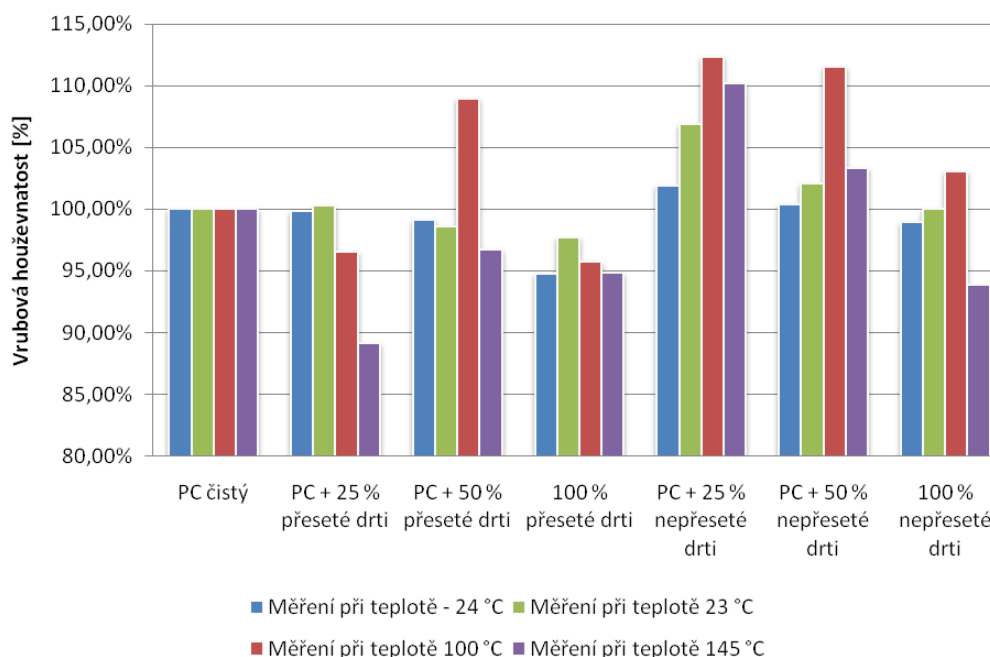
Obr. 61. Graf vrubové houževnatosti při teplotě 100 °C

Vrubová houževnatost je při teplotě 100 °C také poměrně vyrovnaná a liší se v řádu 2 kJ.m<sup>-2</sup>. Nejvyšší vrubová houževnatost je u směsi PC + 25 % nepřeseťé dřti. Nejmenší pak u PC + 25 % přeseťé dřti.



Obr. 62. Graf porovnávající vrubovou houževnatost při různých teplotách

Graf porovnávající vrubovou houževnatost při všech teplotách je možné vidět na obrázku (obr. 62). Z grafu je patrné, že nejvyšší hodnota vrubové houževnatosti se vyskytuje při teplotě - 24 °C (přibližně 19,5 kJ.m<sup>-2</sup>). Při 23 °C je možno pozorovat jistou ztrátu vrubové houževnatosti v průměru na 18 kJ.m<sup>-2</sup>. Úbytek je poměrně malý. Další ztráta je viditelná u teploty 100 °C, kdy je propad přibližně na 12 kJ.m<sup>-2</sup>. Při celkovém zhodnocení tohoto a předchozích grafů je možné konstatovat, že nejvyšších průměrných hodnot vrubové houževnatosti nabývá směs PC + 25 % nepřeseťé drti. Avšak při zahrnutí směrodatných odchylek jsou hodnoty jednotlivých materiálů velmi podobné.



Obr. 63. Graf procentuálně porovnávající vrubovou houževnatost při různých teplotách

Vrubová houževnatost je procentuálně porovnána na obrázku (obr. 63). Oproti PC čistému můžeme pozorovat nárůst vrubové houževnatosti u několika materiálů. Největší je znatelný u PC + 25 % nepřeseťe drti. Zde je nárůst viditelný při všech teplotách. Poté můžeme také mluvit o jistém nárůstu u PC + 50 % nepřeseťe drti.

### 10.2.2 Vyhodnocení síly potřebné k přeražení vzorku

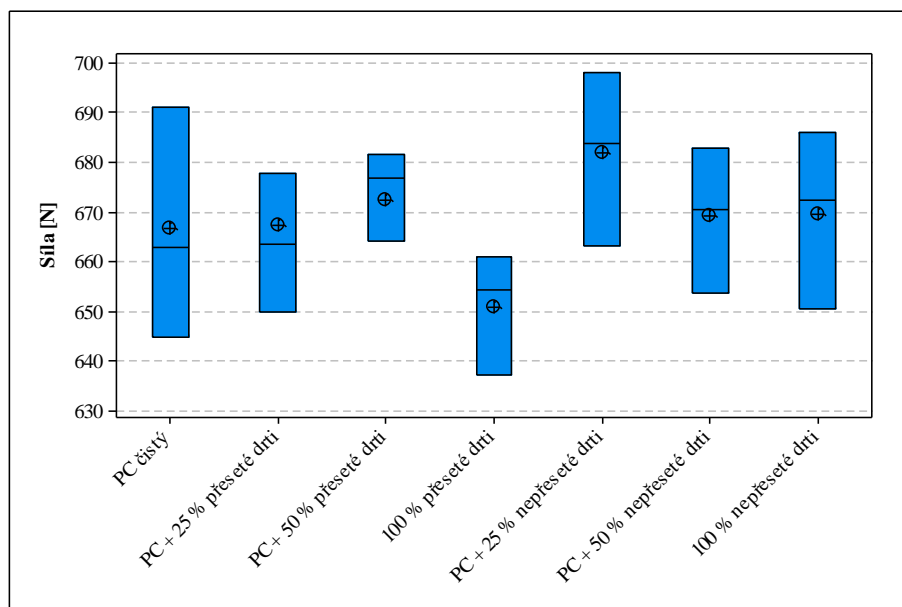
Bylo provedeno deset měření pro každý materiálový vzorek při čtyřech různých teplotách. Teploty byly stanoveny na - 24 °C, 23 °C, 100 °C a 145 °C. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze P V Síla potřebná pro přeražení vzorku. Tabulka (tab. 13) shrnuje pouze statistické veličiny jako aritmetický průměr a směrodatnou odchylku.

Tab. 13. Síla potřebná k přeražení vzorku při různých teplotách

Číslo měření	PC čistý [N]	PC + 25 % přeseťe drti [N]	PC + 50 % přeseťe drti [N]	100 % přeseťe drti [N]	PC + 25 % nepřeseťe drti [N]	PC + 50 % nepřeseťe drti [N]	100 % nepřeseťe drti [N]
Měření při teplotě - 24 °C							
$\bar{X}$	666,74	667,12	672,28	650,65	681,99	669,26	669,51
S	23,92	20,97	16,49	13,15	18,13	16,64	16,70
Měření při teplotě 23 °C							
$\bar{X}$	655,40	642,92	640,90	656,50	662,96	647,84	644,18
S	22,18	17,18	16,07	11,21	22,19	10,17	20,83

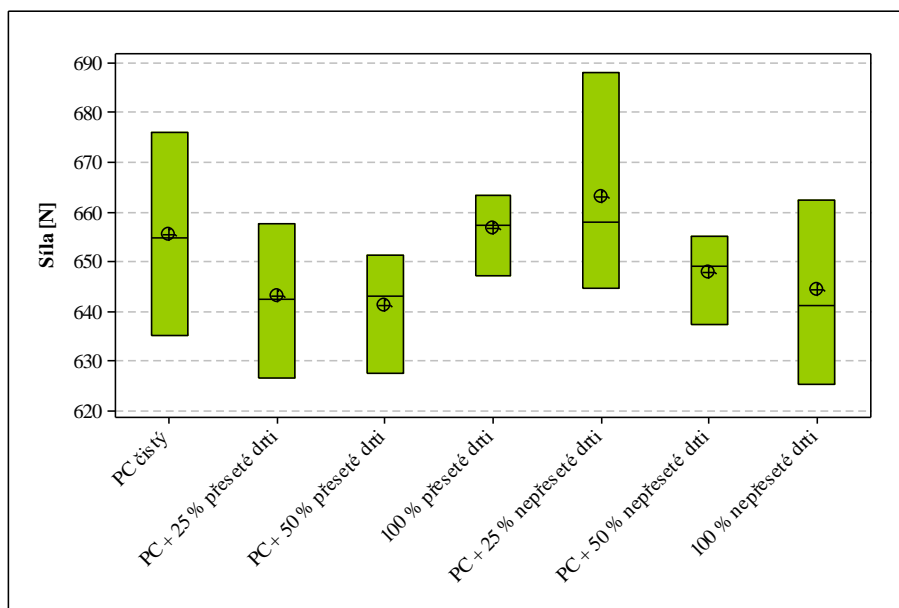
Číslo měření	PC čistý [N]	PC + 25 % přeseť drti [N]	PC + 50 % přeseť drti [N]	100 % přeseť drti [N]	PC + 25 % nepřeseť drti [N]	PC + 50 % nepřeseť drti [N]	100 % nepřeseť drti [N]
Měření při teplotě 100 °C							
$\bar{X}$	543,60	531,42	542,72	546,21	547,38	544,99	524,60
S	37,75	41,52	23,51	33,39	38,50	37,24	34,72
Měření při teplotě 145 °C							
$\bar{X}$	467,10	442,14	451,72	451,09	432,18	464,07	453,49
S	35,47	36,40	26,62	35,47	28,47	59,91	57,07

Výsledky měření jsou dále zpracovány do boxplotových grafů. Pro každou teplotu byl vytvořen samostatný graf. Křížkem je v grafu znázorněn aritmetický průměr. Na svislé ose jsou hodnoty síly potřebné pro přeražení vzorku na vodorovné pak materiály.



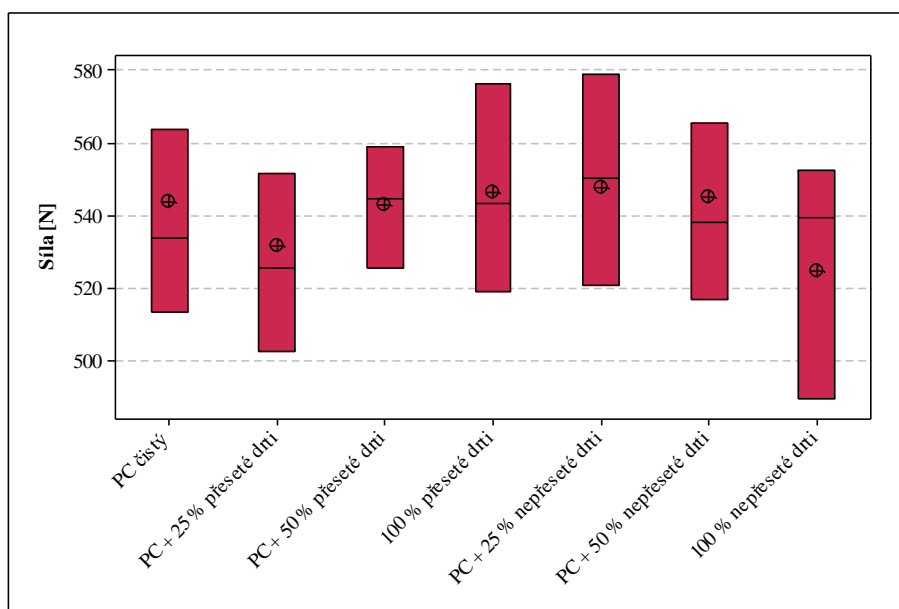
Obr. 64. Graf síly potřebné pro přeražení vzorku při teplotě - 24 °C

Při prvním pohledu na graf (obr. 64) je jasné, že rozptýlení hodnot je poměrně velké. Při pohledu na průměrné hodnoty můžeme konstatovat, že nejmenší sílu pro přeražení vzorku je nutné vyvinout u 100 % přeseť drti. Největší pak u PC + 25 % nepřeseť drti. Ostatní hodnoty se drží v rozmezí 20 N.



Obr. 65. Graf síly potřebné pro přeražení vzorku při teplotě 23 °C

Graf síly potřebné pro přeražení vzorku při teplotě 23 °C zobrazuje velikosti sil pro jednotlivé materiály. Hodnoty se pohybují v rozmezí 70 N. Pokud bereme v potaz jen hodnoty aritmetického průměru, je rozptyl mezi jednotlivými materiály v řádu 20 N. Nejmenší rozptyl vykazují hodnoty směsi 100 % přeseťe drti a PC + 50 % nepřeseťe drti.

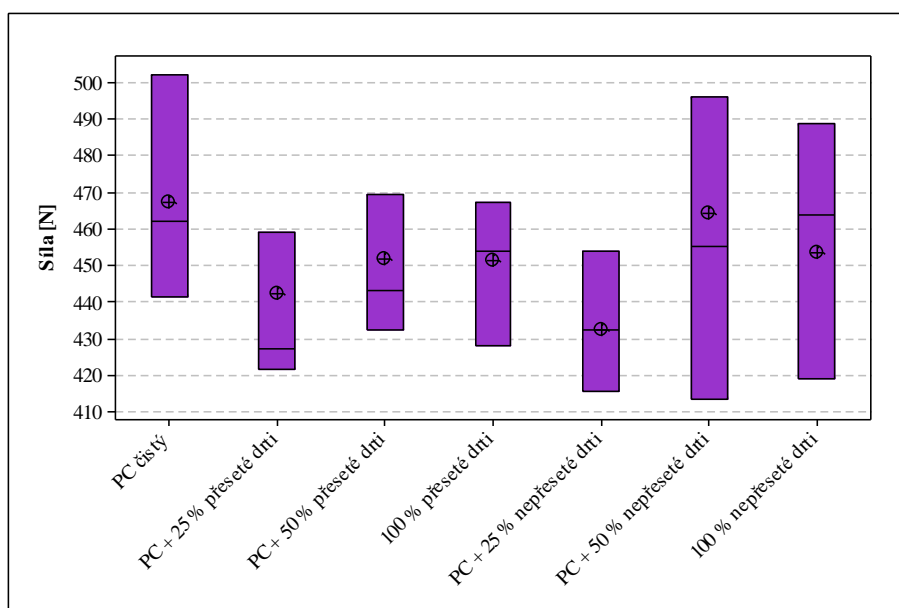


Obr. 66. Graf síly potřebné pro přeražení vzorku při teplotě 100 °C

Při teplotě 100 °C jsou naměřené hodnoty, více rozptýleny než v případě teploty 23 °C. Síla se pohybuje v rozmezí až 100 N. Tak vysoké rozptýlení hodnot je znát u všech materiálových směsí. V tomto případě měla teplota vliv na různorodost materiálu. Pokud se

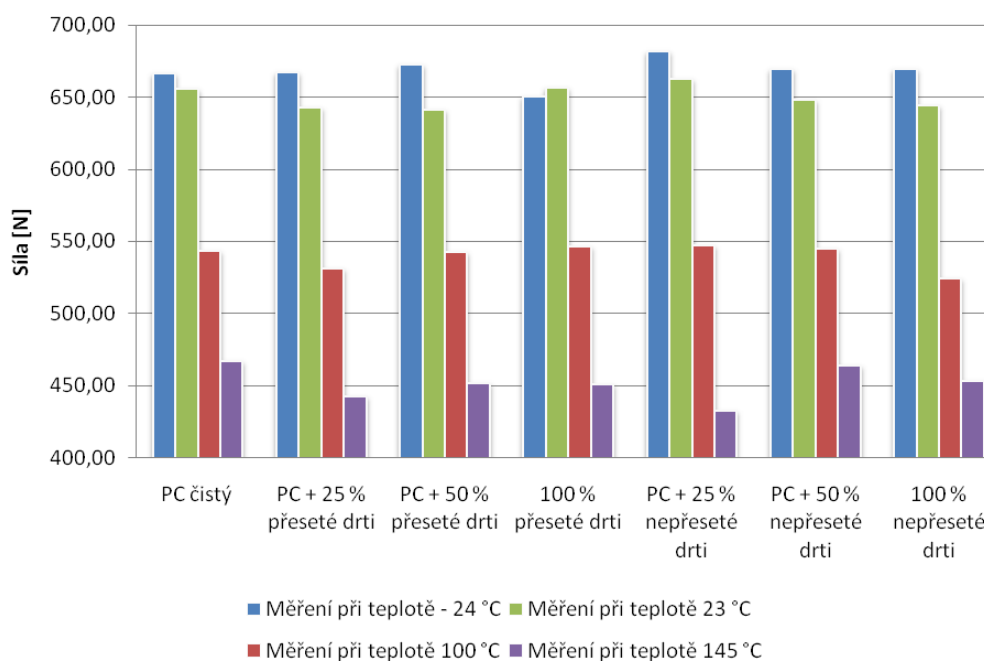


zaměříme na hodnoty aritmetického průměru, jsou hodnoty u všech materiálů na stejné úrovni a liší maximálně v řádu 20 N.



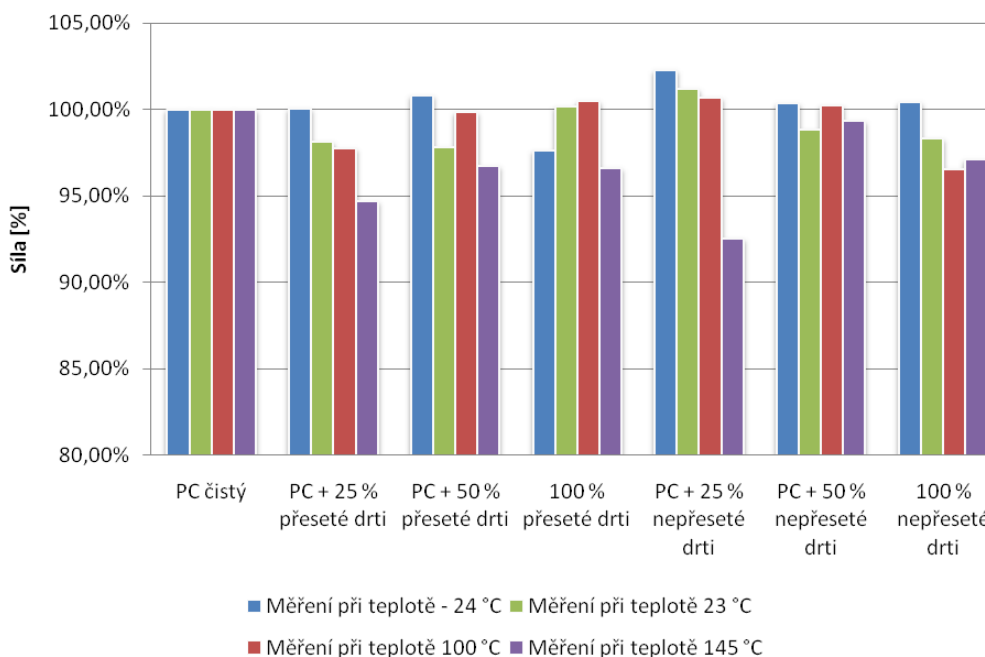
Obr. 67. Graf síly potřebné pro přeražení vzorku při teplotě 145 °C

Tak jako v minulých případech je i zde vidět, že hodnoty síly mají poměrně velký rozptyl. Dosahuje téměř 90 N. Největší síla pro přeražení je potřebná u PC čistého. Naopak nejmenší síla pak u PC + 25 % přeseťe drti a PC + 25 % nepřeseťe drti. Největší rozptýlení hodnot je jasně patrné u směsi PC + 50 % nepřeseťe drti.



Obr. 68. Graf síly potřebné pro přeražení vzorku při různých teplotách

Z grafu na obrázku (obr. 68) lze bezpečně konstatovat, že se zvyšující se teplotou dochází k poklesu síly potřebné pro přeražení zkušební vzorku. Při teplotě - 21 °C se síla pohybuje okolo 660 N. Zvýšení teploty na 23 °C, způsobilo pokles síly přibližně o 10 N. Při teplotě 100 °C došlo k poklesu o dalších 110 N. Nejvyšší sílu nutnou pro přeražení zkušební vzorku bylo potřeba vyvinout u PC + 25 % nepřeseté drti při všech teplotách. Nejnižší pak u vzorku ze 100 % přeseté drti.



Obr. 69. Graf porovnávající procentuálně sílu potřebnou pro přeražení vzorku při různých teplotách

Obrázek (obr. 69) zobrazuje graf porovnávající procentuálně sílu pro přeražení vzorku. Při pohledu na graf je jasné, že jsou výchyly oproti PC čistému minimální, vyjma teploty 145 °C. Při této teplotě dochází k poklesu síly oproti PC čistému nejvíce u materiálu PC + 25 % nepřeseté drti. Jedná se o pokles přibližně 7 %.

### 10.3 Zkouška tvrdosti Shore D

Zkouška tvrdosti Shore D proběhla na tvrdoměru od firmy OMAG s typovým označením ART 13 (obr. 70). Pro účely zkoušky musel být povrch zkušebních tělísek očištěn. Zkoušení bylo provedeno podle normy EN ISO 868. Nejprve byl vzorek umístěn do stojanu tvrdoměru a poté byla přitlačení indentoru na povrch zkušební tělíska započata zkouška. Po uběhnutí časového intervalu 5 sekund 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. 70. Tvrdoměr Shore D

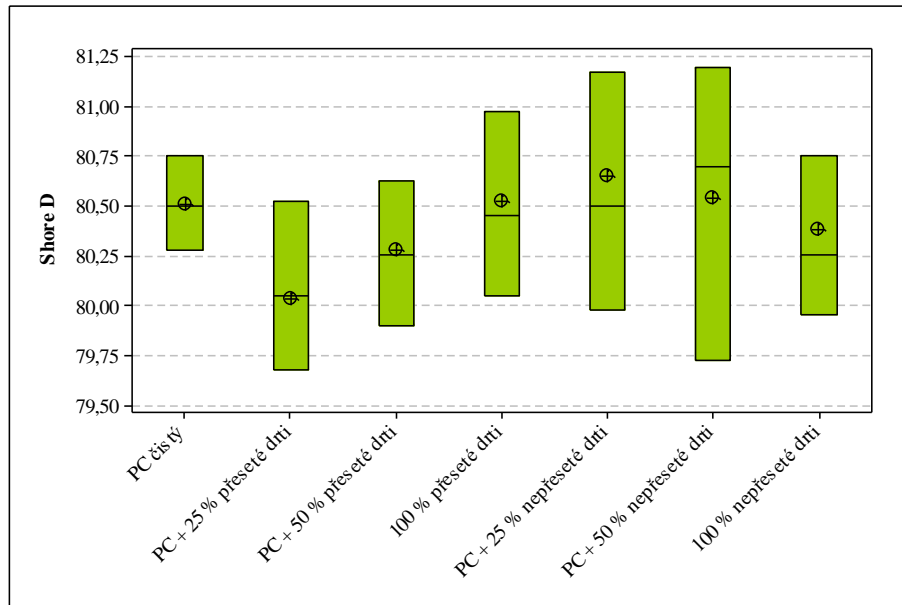
### 10.3.1 Vyhodnocení tvrdosti Shore D

Pro každý vzorek bylo provedeno deset měření při pokojové teplotě (23 °C). Celkem pak tedy bylo provedeno sedmdesát měření. Všechna měření jsou zapsána v tabulce (tab. 14) včetně základního statistické vyhodnocení jako aritmetický průměr a směrodatná odchylka.

Tab. 14. Hodnoty tvrdosti pro jednotlivé typy drtí

Číslo měření	PC čistý	PC + 25 % přeseť drtí	PC + 50 % přeseť drtí	100 % přeseť drtí	PC + 25 % nepřeseť drtí	PC + 50 % nepřeseť drtí	100 % nepřeseť drtí
1.	80,4	79,6	80,3	81,2	81	81,5	79,8
2.	80,9	80,2	79,8	81,3	80	80,6	80
3.	80,3	79,8	80,9	79,9	80,6	80,8	80,5
4.	80,2	79,2	79,9	80,3	79,9	81,2	81,2
5.	80,7	80,2	80,7	80,1	80,1	79,5	80,1
6.	80,9	79,9	80,6	80,6	79,9	80,5	78,7
7.	80,6	80,6	80	80,8	80,4	80,8	80,3
8.	80,6	80,5	79,9	80,2	81,4	79,5	80,2
9.	80,1	79,7	80,5	79,9	81,1	81,2	80,6
10.	80,4	80,6	80,2	80,9	82,1	79,8	81,4
$\bar{X}$	80,5	80,0	80,3	80,5	80,7	80,5	80,3
S	0,3	0,5	0,4	0,5	0,7	0,7	0,8

Grafické vyhodnocení naměřených hodnot je zpracováno formou boxplotového grafu. Na svislé ose je vynesena hodnota tvrdosti Shore D na vodorovné pak jednotlivé typy vzorků. Křížem je v grafu označen aritmetický průměr hodnot.



Obr. 71. Graf tvrdosti Shore D

Na první pohled je z grafu patrné, že se naměřené hodnoty liší jen minimálně. Řádově se jedná o hodnoty 0,5 až 1 Shore. Rozsah tvrdosti Shore D se pohybuje v rozsahu od 79,6 Shore do 81,2 Shore. Největší rozptyly hodnot tvrdosti jsou pozorovatelné u směsí PC + 25 % nepřeseťé drti a PC + 50 % nepřeseťé drti. Nejméně jsou pak hodnoty rozptýleny v případě PC čistého.

## 11 DISKUZE VÝSLEDKŮ

První mechanickou zkouškou byla tahová zkouška. U této zkoušky byl vyhodnocován modul pružnosti v tahu. V tomto případě nejlépe dopadla směs PC čistého, která měla nejvyšší modul u tří měřených teplot ze čtyř. Pouze při teplotě 100 °C byly hodnoty modulu pružnosti v tahu srovnatelné s PC čistým - u PC + 50 % přeseťé drti a PC + 25 % přeseťé drti. Nejnižší modul pružnosti v tahu pak vykazala směs 100 % nepřeseťé drti. Při teplotě -24 °C byl její modul pružnosti v tahu srovnatelný s ostatními materiály avšak při ostatních teplotách byl nižší. Dále bylo při tahové zkoušce vyhodnocováno prodloužení. Při zkoušce se nejvíce prodloužoval materiál 100 % nepřeseťé drti. Jeho prodloužení bylo oproti PC čistému větší až o 28 %. U materiálu PC + 50 % nepřeseťé drti se jedná přibližně o 26 % nárůst v porovnání s PC čistým. Hodnoty ostatních materiálů jsou vyrovnané. Hodnota maximálního napětí v tahu je nejvyšší u PC čistého. Materiály s přídavkem přeseťé drti vykazaly výrazně nižší maximální napětí v tahu při teplotě 145 °C. Například u materiálu PC + 50 % přeseťé drti je napětí v tahu nižší až o 45 % oproti PC čistému. Celkovým zhodnocením všech výsledků zkoušky tahem dopadla nejlépe směs PC čistý. Tento výsledek tedy podporuje tvrzení, že recyklát mechanické vlastnosti spíše zhoršuje a proto by měl čistý materiál vykazovat lepší výsledky směsi materiálů recyklovaných.

Druhou mechanickou zkouškou, jíž byl testovaný materiál podroben, byla zkouška vrubové houževnatosti. První vyhodnocovanou veličinou je vrubová houževnatost. Největší odchylky od PC čistého jsou patrné při teplotách 100 °C a 145 °C. Zajímavé jsou výsledky materiálu PC + 25 % nepřeseťé drti, kdy došlo dokonce k jistému nárůstu vrubové houževnatosti při všech teplotách. Je tedy možné konstatovat, že tento materiál dopadl nejlépe. Naopak materiál 100 % přeseťé drti dopadl nejhůře. Tato směs vykazala průměrně nižší hodnoty vrubové houževnatosti oproti ostatním materiálům. V rámci zkoušky vrubové houževnatosti byla vyhodnocována také síla potřebná pro přeražení zkušební vzorku. Zde jsou již vidět jisté rozdíly v naměřených hodnotách. Při nižších teplotách (-24 °C a 23 °C) bylo potřeba vyvinout největší sílu u směsi PC + 25 % nepřeseťé drti. Zato při vyšších teplotách (100 °C a 145 °C) bylo potřeba největší síly u PC čistého. Ovšem je třeba opět konstatovat, že rozdíly mezi naměřenými hodnotami byly malé.

Poslední zkouška byla zkouška tvrdosti Shore D. Z naměřené tvrdosti je možné usoudit, že v případě tohoto experimentu má přidaný recyklát jen malý vliv na rozdílnost hodnot

tvrdosti. Rovněž lze vyzorovat, že v případě čistého PC bez příměsi recyklátu je rozptyl naměřených hodnot malý. Naopak je tomu v případě, kdy přidáváme nepřesetou drť v různých poměrech; rozptyl naměřených hodnot dosahuje vyšších hodnot. U směsi čistého PC a přeseť drti jsou rozptyly hodnot menší, avšak stále markantnější než u čistého PC. Z toho lze usuzovat, že přidáním drti získáme z hlediska tvrdosti různorodější materiál.

Souhrnně je možné konstatovat, že výsledky měření všech zkoušek jsou velmi vyrovnané a tak nelze s určitostí stanovit, jakým směrem přídavek recyklátu ovlivní mechanické vlastnosti v tomto případě. Z obecného předpokladu lze však tvrdit, že recyklát bude vlastnosti spíše zhoršovat. Tento jev by se pravděpodobně výrazně projevil při opakovaném recyklování tohoto materiálu. Je tedy možné konstatovat, že jednou recyklovaný materiál není svými vlastnostmi příliš odlišný od původního "čistého" materiálu.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zjištění vlivu typu a množství recyklátu na vlastnosti plastového výrobku. Samotnému praktickému zkoumání předcházelo zpracování teoretické části, jež se primárně věnovala problematice recyklace plastů a to především způsobům recyklace plastového odpadu. Dále byly v teoretické části popsány základy technologie vstřikování. Třetí kapitola byla pak věnována polymerům a jejich základním vlastnostem. Byl zde také podrobněji popsán polykarbonát, který byl předmětem zkoumání v praktické části. Poslední kapitola se zabývá zkouškami mechanických vlastností. Celá teoretická část slouží jako podklad pro část praktickou.

Předmětem praktické části bylo testování materiálových směsí složených z PC čistého, přeseťé drti a nepřeseťé drti, které musely být nejprve vyrobeny. Testování proběhlo pomocí mechanických zkoušek (tahová zkouška, zkouška vrubové houževnatosti, zkouška tvrdosti Shore D). Tahová zkouška a zkouška vrubové houževnatosti proběhly při různých teplotách - 24 °C, 23 °C, 100 °C a 145 °C. Zkouška tvrdosti Shore D proběhla pouze při teplotě 23 °C.

Z výsledků mechanických zkoušek vyplývá, že vliv typu a množství recyklátu byl v tomto případě (polykarbonát Makrolon 2205) zanedbatelný. Vše nasvědčuje tomu, že tento výsledek je způsoben pouze jedinou recyklací testovaného polykarbonátu. Je možné předpokládat, že pokud by byl materiál recyklován opakovaně, docházelo by k postupným změnám v mechanických vlastnostech. K tomuto tvrzení se přiklání i obecná teorie o recyklaci termoplastických polymerů. Z tohoto důvodu není dovoleno používat plastové recyklované díly v případech, kdy je potřeba zaručit mechanické vlastnosti konstrukčních prvků.

V případech, kdy není kladen vysoký důraz na požadované mechanické vlastnosti, by mělo být používání recyklovaných materiálů v praxi samozřejmostí. Mezi hlavní aspekty recyklace patří její ekonomičnost, kdy je podnik schopný zpracovat vlastní technologický odpad z výroby a sníží tak náklady na pořízení materiálu nového. Recyklace také snižuje průmyslovou výrobu nových polymerů a spotřebu surovin s ní spojenou. Tím pomáhá snižovat celkový dopad na životní prostředí.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] LA MANTIA, Francesco Paolo. *Recycling of plastic materials*. Toronto: ChemTec Pub., c1993, vi, 189 p. ISBN 18-951-9803-8.
- [2] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999, 203 s. ISBN 80-708-0367-3.
- [3] FRANCESCO PAOLO LA MANTIA, Editor. *Recycling of PVC and mixed plastic waste*. Toronto: ChemTec Pub, 1996, 207 p. ISBN 978-1-895198-11-9.
- [4] GOODSHIP, Vannessa. *Introduction to plastics recycling*. 2nd ed. Shawbury, U.K.: Smithers Rapra, 2007, 174 p. ISBN 978-1-84735-078-7.
- [5] JOSÉ AGUADO, David P. *Feedstock recycling of plastic wastes*. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 1999, 206 p. ISBN 978-085-4045-310.
- [6] STEPKOVÁ, Kateřina, Barbora GRÝCOVÁ, Jiří FIEDOR a Karel OBROUČKA. Zplyňování vybraných druhů polymerních odpadních materiálů v laboratorních podmínkách. *Odpadové fórum: odborný měsíčník o odpadech a druhotných surovinách* [online]. České ekologické manažerské centrum, 2011 [cit. 2013-02-13]. ISSN 1212-7779. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/OF2011/dokumenty/prispevky/052.pdf>.
- [7] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 246 s. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [8] CUNHA, A.M. a A.S. POUZADA. Conventional processing: twin screw extruder and injection molding. In: *Naturplas* [online]. [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: <http://cvnaturplas.dnsalias.com/natural-materials/polymers-and-composites-bio-degradables/conventional>.
- [9] MAŇAS, Miroslav, HELŠTÝN, Josef. *Výrobní stroje a zařízení: Gumárenská a plastikářské stroje II*. Editační středisko VUT Brno, 1990, 199 s. ISBN 80-214-0213.
- [10] Vstřikování plastů. In: *Katedra strojírenské technologie* [online]. [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/04.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm).



- [11] MICHAELI, Walter. *Training in injection molding: a text- and workbook*. 2nd ed. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, c2001, x, 154 p. ISBN 15-699-0302-6.
- [12] JOHANNABER, Friedrich. *Injection molding machines: a user's guide*. 4. ed. Munich, Germany: Hanser [u.a.], 2008, 378 p. ISBN 978-344-6225-817.
- [13] Injection Unit. In: *Beejaymolding* [online]. 2006 [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: <http://www.beejaymolding.com/Injection-unit.html>.
- [14] Clamping Unit. In: *Beejaymolding* [online]. 2006 [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: <http://www.beejaymolding.com/Clamping-unit.html>.
- [15] Hot manifold / runnerless molds. *DMS* [online]. 2011, 16.4.2011 [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: [http://www.dsm.com/en\\_US/html/dep/hotrunner.html](http://www.dsm.com/en_US/html/dep/hotrunner.html).
- [16] BRYCE, Douglas M. *Plastic injection molding: manufacturing process fundamentals*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c1996, xvii, 277 p. ISBN 08-726-3472-8.
- [17] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-708-0617-6.
- [18] LUKÁŠ, David. *Fyzika polymerů*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008, 181 s. ISBN 978-80-7372-312-5.
- [19] LAPČÍK, Lubomír a Miroslav RAAB. *Nauka o materiálech II*. Vyd. 2., rozš. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2004, 133 s. ISBN 80-731-8229-7.
- [20] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, c1999, 350 s. ISBN 80-720-4130-4.
- [21] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7.
- [22] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, c2001, 505 s. ISBN 80-720-4193-2.
- [23] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie I*. 3., přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 266 s. ISBN 80-718-3262-6.

- [24] KOPELIOVICH, Dmitri. Shore (Durometer) hardness test. In: *SubsTech* [online]. 2012 [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shore\\_durometer\\_hardness\\_test](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shore_durometer_hardness_test).
- [25] ARBURG [online]. Combined drying and conveying of plastic granulate. © 2012. [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: [http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediatek/Prospekte/ARBURG\\_THERMOLIFT\\_522800\\_en\\_GB.pdf](http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediatek/Prospekte/ARBURG_THERMOLIFT_522800_en_GB.pdf).
- [26] Plastics Machine Maker Arburg's New Mexican Ops at Plastimagen. In: Jobwerx: manufacturing network [online]. 2012 [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: [http://www.jobwerx.com/news/2008/arburg\\_news\\_949718\\_108.html](http://www.jobwerx.com/news/2008/arburg_news_949718_108.html).

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PET	Polyethylentereftalát
VVS	Vyhřívaný vtokový systém
SVS	Studený vtokový systém
EDM	Electric discharge machining Elektrojiskrové obrábění
PC	Polykarbonát
$T_B$	Teplota křehnutí [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_G$	Teplota skelného přechodu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$n_D^{20}$	Index lomu [1]
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]
G	Modul pružnosti ve smyku [MPa]
$L_o$	Počáteční délka [mm]
$L_u$	Délka po přetržení [mm]
$\Delta L$	Rozdíl délek [mm]
$d_o$	Počáteční průměr [mm]
$d_u$	Průměr po přetržení [mm]
$a_o$	Počáteční výška [mm]
$a_u$	Výška po přetržení [mm]
$b_o$	Počáteční šířka [mm]
$b_u$	Šířka po přetržení [mm]
R, $\sigma$	Napětí [MPa]
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení [1]
U	Mez úměrnosti [MPa]
E	Mez elasticity [MPa]

---

K	Mez kluzu [MPa]
P	Mez pevnosti [MPa]
S	Mez přetržení [MPa]
R <sub>e</sub>	Napětí na mezi kluzu [MPa]
R <sub>m</sub>	Napětí na mezi pevnosti [MPa]
F	Síla [N]
S <sub>o</sub>	Průřez zkušebního tělesa [mm <sup>2</sup> ]
S <sub>u</sub>	Průřez zkušebního tělesa po přetržení [mm <sup>2</sup> ]
F <sub>max</sub>	Maximální síla [N]
F <sub>e</sub>	Síla na mezi kluzu [N]
R <sub>p</sub>	Smluvní mez kluzu [MPa]
A	Tažnost [%]
Z	Kontrakce [%]
D	Průměr indentoru [mm]
h	Hloubka vtisku [mm]
S	Plocha [mm <sup>2</sup> ]
u	Velikost úhlopříčky [mm]
F <sub>0</sub>	Síla předzatěžující [N]
F <sub>1</sub>	Zatěžující síla [N]
K	Nárazová práce [J]
F <sub>G</sub>	Tíhová síla kladiva [N]
KC	Vrubová houževnatost [kJ.m <sup>-2</sup> ]
$\overline{X}$	Aritmetický průměr [mm]
n	Počet měření [1]
S	Směrodatná odchylka

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1. Linka na zpracování tříděného plastového odpadu [2]</i> .....	15
<i>Obr. 2. Nožový mlýn [2]</i> .....	16
<i>Obr. 3. Talířové nárazové mlýny [2]</i> .....	17
<i>Obr. 4. Grafické znázornění průběhu vstřikovacího cyklu</i> .....	21
<i>Obr. 5. Obecný průběh tlaku v dutině formy</i> .....	21
<i>Obr. 6. Schéma vstřikovacího stroje [11]</i> .....	23
<i>Obr. 7. Schéma obecné vstřikovací formy [11]</i> .....	24
<i>Obr. 8. Obecný studený vtokový systém [11]</i> .....	25
<i>Obr. 9. Zaformování výrobku [11]</i> .....	26
<i>Obr. 10. Temperační systém [11]</i> .....	26
<i>Obr. 11. Vyhození výrobku z dutiny formy [11]</i> .....	27
<i>Obr. 12. Vliv teploty na průběh křivky napětí - deformace [19]</i> .....	29
<i>Obr. 13. Schéma univerzálního zkušebního stroje [22]</i> .....	34
<i>Obr. 14. Tvary normalizovaných zkušebních tyčí [23]</i> .....	35
<i>Obr. 15. Smluvní diagram zkoušky tahem [22, 23]</i> .....	35
<i>Obr. 16. Tvary pracovních diagramů zkoušky tahem pro různé materiály [23]</i> .....	37
<i>Obr. 17. Pracovní diagramy polymerních materiálů [20]</i> .....	38
<i>Obr. 18. Pracovní diagram polyamidu [23]</i> .....	38
<i>Obr. 19. Zkouška tvrdosti podle Brinella [23]</i> .....	39
<i>Obr. 20. Zkouška tvrdosti podle Vickerse [23]</i> .....	40
<i>Obr. 21. Zkouška tvrdosti podle Rockwella [23]</i> .....	41
<i>Obr. 22. Schéma zkoušky SHORE D včetně indentoru [24]</i> .....	42
<i>Obr. 23. Typy používaných vrubů a upevnění zkušebního tělesa [22]</i> .....	43
<i>Obr. 24. Průběh zkoušky na Charpyho kladivu [22]</i> .....	43
<i>Obr. 25. Granule Makrolonu 2205</i> .....	47
<i>Obr. 26. Sušárna [25]</i> .....	49
<i>Obr. 27. Vstřikovací stroj Arburg 470 C [26]</i> .....	50
<i>Obr. 28. Vstřikovaný výrobek</i> .....	51
<i>Obr. 29. Výrobek bez vtokové soustavy</i> .....	52
<i>Obr. 30. Nožový mlýn</i> .....	53
<i>Obr. 31. Pracovní prostor nožového mlýnu</i> .....	54

<i>Obr. 32. Detailní pohled na recyklát .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 33. Prosévačka AS 200 Basic .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 34. Drť zachycená na druhém sítu.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 35. Jemný prach zachycený v misce .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 36. Trhací stroj typu W91255 .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 37. Upnutí těliska na trhacím stroji.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 38. Graf modulu pružnosti v tahu při teplotě - 24 °C .....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 39. Graf modulu pružnosti v tahu při teplotě 23 °C.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 40. Graf modulu pružnosti v tahu při teplotě 100 °C.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 41. Graf modulu pružnosti v tahu při teplotě 145 °C.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 42. Graf porovnávací modul pružnosti při různých teplotách .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 43. Graf procentuálně porovnávací modul pružnosti při různých teplotách .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 44. Graf prodloužení při teplotě - 24 °C .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 45. Graf prodloužení při teplotě 23 °C .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 46. Graf prodloužení při teplotě 100 °C .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 47. Graf prodloužení při teplotě 145 °C .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 48. Graf porovnávací prodloužení při různých teplotách .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 49. Graf procentuálně porovnávací prodloužení při různých teplotách .....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 50. Graf maximálního napětí v tahu teplotě - 24 °C .....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 51. Graf maximálního napětí v tahu teplotě 23 °C.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 52. Graf maximálního napětí v tahu teplotě 100 °C.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 53. Graf maximálního napětí v tahu teplotě 145 °C.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 54. Graf porovnávací maximální napětí v tahu při různých teplotách .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 55. Graf procentuálně porovnávací maximální napětí při různých teplotách .....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 56. Charpyho kladivo .....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 57. Přístroj pro tvorbu vrubů .....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 58. Graf vrubové houževnatosti při teplotě - 24 °C .....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 59. Graf vrubové houževnatosti při teplotě 23 °C.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 60. Graf vrubové houževnatosti při teplotě 100 °C.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 61. Graf vrubové houževnatosti při teplotě 100 °C.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 62. Graf porovnávací vrubovou houževnatost při různých teplotách .....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 63. Graf procentuálně porovnávací vrubovou houževnatost při různých teplotách .....</i>	<i>78</i>

---

<i>Obr. 64. Graf síly potřebné pro přeražení vzorku při teplotě - 24 °C .....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 65. Graf síly potřebné pro přeražení vzorku při teplotě 23 °C .....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 66. Graf síly potřebné pro přeražení vzorku při teplotě 100 °C .....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 67. Graf síly potřebné pro přeražení vzorku při teplotě 145 °C .....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 68. Graf síly potřebné pro přeražení vzorku při různých teplotách .....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 69. Graf porovnávací procentuálně sílu potřebnou pro přeražení vzorku při různých teplotách .....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 70. Tvrdoměr Shore D .....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 71. Graf tvrdosti Shore D .....</i>	<i>84</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Tabulka základních parametrů materiálu dle výrobce</i> .....	48
<i>Tab. 2. Tabulka základních parametrů vstřikovacího stroje</i> .....	50
<i>Tab. 3. Tabulka nastavení vstřikovacích podmínek</i> .....	51
<i>Tab. 4. Tabulka hmotnosti výstřiku</i> .....	52
<i>Tab. 5. Tabulka parametrů nožového mlýnu</i> .....	53
<i>Tab. 6. Tabulka parametrů prosévačky</i> .....	56
<i>Tab. 7. Poměr hmotností různých velikostí částic</i> .....	57
<i>Tab. 8. Tabulka vyrobených vzorků</i> .....	58
<i>Tab. 9. Modul pružnosti při různých teplotách</i> .....	60
<i>Tab. 10. Prodloužení v tahu při různých teplotách</i> .....	65
<i>Tab. 11. Maximální napětí při různých teplotách</i> .....	69
<i>Tab. 12. Vrubová houževnatost při různých teplotách</i> .....	74
<i>Tab. 13. Síla potřebná k přeražení vzorku při různých teplotách</i> .....	78
<i>Tab. 14. Hodnoty tvrdosti pro jednotlivé typy drtí</i> .....	83



**SEZNAM PŘÍLOH**

- P I    MODUL PRUŽNOSTI V TAHU
- P II    PRODLOUŽENÍ V TAHU
- P III   MAXIMÁLNÍ NAPĚTÍ V TAHU
- P IV    VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST
- P V    SÍLA POTŘEBNÁ PRO PŘERAŽENÍ VZORKU
- P VI    CD - disk obsahující diplomovou práci

## PŘÍLOHA P I: MODUL PRUŽNOSTI V TAHU

Tab. 15. Hodnoty modulu pružnosti při teplotě - 24 °C

Číslo měření	PC čistý [MPa]	PC + 25 % přeseť drti [MPa]	PC + 50 % přeseť drti [MPa]	100 % přeseť drti [MPa]	PC + 25 % nepřeseť drti [MPa]	PC + 50 % nepřeseť drti [MPa]	100 % nepřeseť drti [MPa]
1.	2700	2470	2200	2080	2230	2700	2760
2.	2550	2430	2300	2240	2450	2470	2650
3.	2550	2450	2510	2330	2210	2320	2320
4.	2270	2580	2340	2710	2520	2440	2600
5.	2500	2380	2360	2330	2140	2440	2310
6.	2280	2440	2500	2450	2320	2000	2450
7.	2580	2460	2350	1990	1840	2010	2450
8.	2410	2320	2540	2380	2300	2420	2200
9.	2520	2240	2590	2450	2390	1960	2500
10.	2520	2340	2150	2430	1950	2430	2240
$\bar{X}$	2488	2411	2384	2339	2235	2319	2448
S	133	95	147	203	213	246	184

Tab. 16. Hodnoty modulu pružnosti při teplotě 23 °C

Číslo měření	PC čistý [MPa]	PC + 25 % přeseť drti [MPa]	PC + 50 % přeseť drti [MPa]	100 % přeseť drti [MPa]	PC + 25 % nepřeseť drti [MPa]	PC + 50 % nepřeseť drti [MPa]	100 % nepřeseť drti [MPa]
1.	2380	2200	2340	2230	2190	2050	2360
2.	2430	2290	2340	2270	2370	2170	2200
3.	2240	2260	2230	2280	2170	2290	2380
4.	2340	2250	2300	2140	2330	2350	2210
5.	2230	2230	2200	2370	2180	2230	2110
6.	2390	2350	2270	2170	2240	2280	2080
7.	2410	2220	2270	2290	2240	2350	2110
8.	2450	2190	2230	2280	2250	2220	1830
9.	2400	2340	2270	2400	2190	2150	1910
10.	2450	2200	2180	2350	2290	2120	2330
$\bar{X}$	2372	2253	2263	2278	2245	2221	2152
S	79	57	54	83	67	99	184

Tab. 17. Hodnoty modulu pružnosti při teplotě 100 °C

Číslo měření	PC čistý [MPa]	PC + 25 % přeseť drti [MPa]	PC + 50 % přeseť drti [MPa]	100 % přeseť drti [MPa]	PC + 25 % nepřeseť drti [MPa]	PC + 50 % nepřeseť drti [MPa]	100 % nepřeseť drti [MPa]
1.	2130	1590	2030	1810	1510	1440	1550
2.	2070	1600	2030	1980	2050	1950	1580
3.	1950	1000	2060	1900	931	1760	1380
4.	1860	1500	2000	2220	1090	1510	1620
5.	1860	1950	1960	2030	1560	1480	1990
6.	1610	1380	1570	1950	1980	1580	1580
7.	1880	1540	1820	1730	1960	1700	1230
8.	1910	2020	2060	1840	1930	1470	1970
9.	1900	1620	1920	1800	1850	1340	1880
10.	1740	1380	1530	1850	2080	1550	1230
$\bar{X}$	1891	1558	1898	1911	1694	1578	1601
S	148	289	198	141	409	179	278

Tab. 18. Hodnoty modulu pružnosti při teplotě 145 °C

Číslo měření	PC čistý [MPa]	PC + 25 % přeseť drti [MPa]	PC + 50 % přeseť drti [MPa]	100 % přeseť drti [MPa]	PC + 25 % nepřeseť drti [MPa]	PC + 50 % nepřeseť drti [MPa]	100 % nepřeseť drti [MPa]
1.	212	194	173	220	213	122	168
2.	273	132	163	247	217	184	105
3.	247	120	153	143	275	130	165
4.	324	177	134	141	206	282	178
5.	264	197	224	118	232	216	162
6.	230	113	167	243	262	168	116
7.	275	197	172	180	206	136	195
8.	268	189	198	131	167	198	180
9.	214	204	181	214	252	286	118
10.	264	205	183	172	205	280	176
$\bar{X}$	257	173	175	181	224	200	156
S	33	36	25	48	32	64	31

## PŘÍLOHA P II: PRODLOUŽENÍ V TAHU

Tab. 19. Hodnoty prodloužení při teplotě - 24 °C

Číslo měření	PC čistý [mm]	PC + 25 % přeseť drti [mm]	PC + 50 % přeseť drti [mm]	100 % přeseť drti [mm]	PC + 25 % nepřeseť drti [mm]	PC + 50 % nepřeseť drti [mm]	100 % nepřeseť drti [mm]
1.	9,2	9,1	9,4	9,3	9,3	9,2	9,8
2.	9,0	9,1	9,1	8,9	9,2	8,9	9,5
3.	9,6	9,3	9,1	8,8	8,9	8,8	9,2
4.	9,1	9,1	9,1	9,3	9,0	8,6	9,2
5.	9,2	8,9	9,1	8,9	9,1	9,3	8,9
6.	9,2	9,1	9,1	8,9	9,0	8,7	8,9
7.	9,1	8,9	9,1	8,9	8,9	8,6	8,8
8.	9,4	9,1	8,8	8,8	9,1	8,8	8,9
9.	8,9	8,9	8,9	8,9	8,7	8,8	8,9
10.	8,9	9,1	8,7	8,8	8,9	8,7	8,9
$\bar{X}$	9,2	9,1	9,0	9,0	9,0	8,8	9,1
S	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3

Tab. 20. Hodnoty prodloužení při teplotě 23 °C

Číslo měření	PC čistý [mm]	PC + 25 % přeseť drti [mm]	PC + 50 % přeseť drti [mm]	100 % přeseť drti [mm]	PC + 25 % nepřeseť drti [mm]	PC + 50 % nepřeseť drti [mm]	100 % nepřeseť drti [mm]
1.	7,8	8,1	7,9	8,0	8,0	8,1	8,0
2.	7,9	7,9	8,0	7,8	8,0	8,1	8,0
3.	7,6	8,0	7,9	8,0	7,8	8,0	8,0
4.	7,9	8,0	8,0	7,9	8,0	8,0	7,9
5.	8,0	7,8	7,9	8,0	8,0	8,0	8,0
6.	7,8	8,0	8,0	8,1	7,8	8,0	7,9
7.	7,9	8,0	7,9	8,0	7,9	8,1	8,1
8.	8,1	7,9	8,0	8,0	8,0	8,0	8,2
9.	7,9	7,9	8,1	8,1	8,1	8,0	8,1
10.	8,0	8,1	7,9	7,9	8,0	8,0	8,1
$\bar{X}$	7,9	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
S	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1

Tab. 21. Hodnoty prodloužení při teplotě 100 °C

Číslo měření	PC čistý [mm]	PC + 25 % přeseť drti [mm]	PC + 50 % přeseť drti [mm]	100 % přeseť drti [mm]	PC + 25 % nepřeseť drti [mm]	PC + 50 % nepřeseť drti [mm]	100 % nepřeseť drti [mm]
1.	5,4	5,1	5,1	5,1	5,1	5,3	5,3
2.	5,0	5,1	5,2	5,1	5,2	5,2	5,3
3.	5,7	5,2	5,1	5,0	5,6	5,2	5,2
4.	5,4	5,2	5,1	5,4	5,4	5,2	5,2
5.	5,3	5,2	5,2	5,1	5,1	5,3	5,3
6.	5,2	5,2	5,1	5,1	5,2	5,2	6,6
7.	5,1	5,0	5,2	5,1	5,3	5,3	6,1
8.	5,4	5,3	5,2	5,3	5,2	5,6	5,2
9.	5,3	5,1	5,2	5,2	5,2	5,6	5,2
10.	5,4	5,2	5,1	5,1	5,4	5,3	6,6
$\bar{X}$	5,3	5,2	5,2	5,2	5,3	5,3	5,6
S	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,6

Tab. 22. Hodnoty prodloužení při teplotě 145 °C

Číslo měření	PC čistý [mm]	PC + 25 % přeseť drti [mm]	PC + 50 % přeseť drti [mm]	100 % přeseť drti [mm]	PC + 25 % nepřeseť drti [mm]	PC + 50 % nepřeseť drti [mm]	100 % nepřeseť drti [mm]
1.	3,4	3,5	3,6	3,5	5,5	5,5	3,1
2.	3,3	3,7	4	3,8	3,1	4,5	4,4
3.	3,4	3,8	4	4,2	3,1	6,3	2,9
4.	3,3	3,6	4	3,1	3,1	5,2	2,9
5.	3,1	3,4	3,4	3,2	5,4	4,6	4,5
6.	3,1	3,6	3,4	3,9	3	3	5,1
7.	3,3	3,4	3,2	3,3	3,1	3,6	4,9
8.	3,4	3,9	3,6	3,1	3,6	3	4,4
9.	3,3	3,6	3,6	3,6	3	3,1	6,2
10.	3,6	3,4	3,6	3,1	3,2	3,2	4,5
$\bar{X}$	3,3	3,6	3,6	3,5	3,6	4,2	4,3
S	0,1	0,2	0,3	0,4	1,0	1,2	1,1

## PŘÍLOHA P III: MAXIMÁLNÍ NAPĚTÍ V TAHU

Tab. 23. Hodnoty maximálního napětí v tahu při teplotě - 24 °C

Číslo měření	PC čistý [MPa]	PC + 25 % přeseť drti [MPa]	PC + 50 % přeseť drti [MPa]	100 % přeseť drti [MPa]	PC + 25 % nepřeseť drti [MPa]	PC + 50 % nepřeseť drti [MPa]	100 % nepřeseť drti [MPa]
1.	72,8	70,8	73,6	73,2	73,7	71,8	74,4
2.	70,6	71,3	72,5	71,3	72,6	71,0	73,2
3.	71,7	71,8	72,0	70,8	71,6	69,6	72,8
4.	71,9	71,7	71,6	72,0	69,5	69,1	71,3
5.	71,3	71,4	72,3	71,4	71,7	68,0	71,0
6.	71,1	71,8	72,1	71,4	71,1	68,9	70,0
7.	70,6	70,6	71,8	70,2	70,6	68,8	69,4
8.	71,4	70,7	70,7	70,4	70,7	68,9	69,8
9.	69,8	70,1	71,3	70,2	69,4	68,9	69,9
10.	70,1	70,0	70,4	70,0	69,7	68,4	69,9
$\bar{X}$	71,1	71,0	71,8	71,1	71,1	69,3	71,2
S	0,9	0,7	0,9	1,0	1,4	1,2	1,7

Tab. 24. Hodnoty maximálního napětí v tahu při teplotě 23 °C

Číslo měření	PC čistý [MPa]	PC + 25 % přeseť drti [MPa]	PC + 50 % přeseť drti [MPa]	100 % přeseť drti [MPa]	PC + 25 % nepřeseť drti [MPa]	PC + 50 % nepřeseť drti [MPa]	100 % nepřeseť drti [MPa]
1.	64,3	64,1	64,1	64,3	64,3	64,2	64,5
2.	63,9	64,0	64,2	64,5	64,2	64,3	64,4
3.	63,9	64,0	63,7	64,4	64,1	64,3	64,5
4.	64,3	63,9	64,2	64,3	64,2	64,1	64,3
5.	64,1	64,0	64,2	64,4	64,0	64,3	64,4
6.	63,9	64,0	64,1	64,1	63,7	64,4	64,3
7.	64,1	63,6	64,0	64,2	64,0	64,3	64,3
8.	64,2	63,9	63,8	64,2	64,0	64,1	64,8
9.	63,9	63,8	64,0	64,3	63,9	64,2	64,0
10.	64,1	63,5	64,3	64,4	64,0	64,0	64,3
$\bar{X}$	64,1	63,9	64,1	64,3	64,0	64,2	64,4
S	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2

Tab. 25. Hodnoty maximálního napětí v tahu při teplotě 100 °C

Číslo měření	PC čistý [MPa]	PC + 25 % přeseť drti [MPa]	PC + 50 % přeseť drti [MPa]	100 % přeseť drti [MPa]	PC + 25 % nepřeseť drti [MPa]	PC + 50 % nepřeseť drti [MPa]	100 % nepřeseť drti [MPa]
1.	43,9	44,7	41,6	43,2	42,9	45,3	43,5
2.	44,8	44,4	42,2	43,2	42,7	45,0	43,9
3.	44,1	45,4	42,4	43,4	43,2	45,0	43,4
4.	45,5	45,2	43,5	43,1	44,3	45,6	44,4
5.	45,0	45,7	42,8	43,8	42,6	45,0	45,1
6.	45,2	45,8	42,9	44,3	42,6	45,8	45,7
7.	43,6	45,9	43,1	43,0	43,9	46,6	45,9
8.	45,7	46,0	43,1	43,3	43,5	46,4	44,7
9.	44,6	44,0	43,7	44,2	44,2	46,6	44,9
10.	44,2	44,7	41,3	44,7	40,8	46,6	45,9
$\bar{X}$	44,7	45,2	42,7	43,6	43,1	45,8	44,7
S	0,7	0,7	0,8	0,6	1,0	0,7	0,9

Tab. 26. Hodnoty maximálního napětí v tahu při teplotě 145 °C

Číslo měření	PC čistý [MPa]	PC + 25 % přeseťé drti [MPa]	PC + 50 % přeseťé drti [MPa]	100 % přeseťé drti [MPa]	PC + 25 % nepřeseťé drti [MPa]	PC + 50 % nepřeseťé drti [MPa]	100 % nepřeseťé drti [MPa]
1.	4,88	2,76	2,22	1,62	2,59	2,46	3,29
2.	5,3	2,73	2,27	2,19	4	2,35	4,11
3.	4,7	2,79	1,95	4	5,17	2,38	3,1
4.	4,51	2,85	2,96	3,68	4,03	2,57	4,31
5.	4,83	2,84	3,07	3,93	2,75	6,03	3,98
6.	4,76	3,12	2,43	2,08	4,77	3,46	2,68
7.	4,28	2,97	2,35	2,55	3,88	3,54	3,88
8.	4,33	2,76	2,7	3,51	4,08	7,69	3,99
9.	3,7	3,03	2,41	3,09	4,73	5,98	2,5
10.	4,3	3,05	2,81	4,54	4,86	6,76	2,35
$\bar{X}$	4,6	2,9	2,5	3,1	4,1	4,3	3,4
S	0,4	0,1	0,4	1,0	0,9	2,1	0,7

## PŘÍLOHA P IV: VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST

Tab. 27. Hodnoty vrubové houževnatosti při teplotě - 24 °C

Číslo měření	PC čistý [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 25 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 50 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	100 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 25 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 50 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	100 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]
1.	19,72	19,39	19,42	20,93	19,81	19,19	19,93
2.	19,27	19,75	19,72	18,60	19,76	20,26	18,73
3.	18,88	19,94	19,74	18,50	20,14	20,49	20,50
4.	20,12	18,27	19,58	18,42	20,72	20,75	20,30
5.	19,28	19,89	19,10	17,53	19,87	19,67	18,65
6.	17,78	19,69	19,79	16,97	18,79	18,76	19,23
7.	21,34	20,90	19,46	18,48	19,83	19,31	19,67
8.	20,90	19,30	18,30	19,81	21,40	18,73	18,79
9.	18,49	19,50	18,34	18,90	18,48	19,61	17,91
10.	19,56	18,49	20,25	16,89	20,25	19,24	19,59
$\bar{X}$	19,53	19,51	19,37	18,50	19,91	19,60	19,33
S	1,07	0,74	0,63	1,23	0,84	0,70	0,82

Tab. 28. Hodnoty vrubové houževnatosti při teplotě 23 °C

Číslo měření	PC čistý [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 25 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 50 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	100 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 25 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 50 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	100 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]
1.	18,70	18,20	18,19	18,73	17,51	20,24	18,33
2.	17,51	17,87	17,62	18,02	19,60	18,12	18,27
3.	20,15	19,02	17,37	18,01	20,05	18,99	17,26
4.	17,72	17,96	17,48	18,44	19,23	19,22	17,66
5.	17,81	18,39	18,99	17,44	19,51	17,73	17,86
6.	18,19	17,74	18,84	17,35	18,22	18,39	17,53
7.	18,68	17,48	17,40	18,01	20,89	19,26	19,13
8.	17,10	17,20	17,46	16,24	19,87	18,20	19,04
9.	17,90	19,10	17,56	16,68	17,99	18,42	18,71
10.	17,97	19,32	18,26	18,66	21,45	16,99	18,00
$\bar{X}$	18,17	18,23	17,92	17,76	19,43	18,56	18,18
S	0,85	0,72	0,61	0,83	1,25	0,91	0,63

Tab. 29. Hodnoty vrubové houževnatosti při teplotě 100 °C

Číslo měření	PC čistý [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 25 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 50 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	100 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 25 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 50 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	100 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]
1.	10,27	12,13	12,19	13,39	13,10	10,98	12,29
2.	9,45	10,82	11,29	12,24	14,37	11,42	9,69
3.	11,63	8,82	13,73	12,81	12,63	14,61	11,25
4.	11,65	11,73	12,50	9,22	14,98	11,70	13,37
5.	10,25	12,40	13,54	9,42	9,57	10,47	12,83
6.	10,80	10,95	13,23	12,44	12,49	11,92	11,85
7.	12,24	10,37	11,85	11,59	13,30	13,99	11,38
8.	11,63	12,70	11,40	9,30	14,86	12,88	13,21
9.	12,80	8,74	11,77	8,99	10,39	13,50	10,19
10.	12,85	10,94	12,21	9,38	11,90	15,20	11,01
$\bar{X}$	11,36	10,96	12,37	10,88	12,76	12,67	11,71
S	1,14	1,37	0,87	1,76	1,79	1,61	1,24



Tab. 30. Hodnoty vrubové houževnatosti při teplotě 145 °C

Číslo měření	PC čistý [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 25 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 50 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	100 % přeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 25 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	PC + 50 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]	100 % nepřeseť drti [kJ.m <sup>-2</sup> ]
1.	5,90	5,27	6,86	6,74	6,76	5,88	5,23
2.	5,78	5,21	5,91	6,14	7,57	7,02	5,44
3.	6,45	5,19	5,99	5,81	6,52	6,70	5,63
4.	6,69	6,10	6,75	5,37	6,31	6,34	6,10
5.	6,41	5,43	5,62	5,46	6,48	6,08	5,94
6.	5,15	5,54	5,47	5,17	6,32	5,26	5,39
7.	6,13	4,75	5,24	5,31	7,24	6,56	5,39
8.	6,68	5,65	5,88	5,61	5,79	6,44	6,37
9.	4,92	5,80	5,14	5,68	6,26	6,03	6,00
10.	6,57	5,17	5,82	6,29	7,64	6,40	5,47
$\bar{X}$	6,07	5,41	5,87	5,76	6,69	6,27	5,70
S	0,63	0,38	0,57	0,50	0,61	0,49	0,38

## PŘÍLOHA P V: SÍLA POTŘEBNÁ PRO PŘERAŽENÍ VZORKU

Tab. 31. Hodnoty síly pro přeražení vzorku při teplotě - 24 °C

Číslo měření	PC čistý [N]	PC + 25 % přeseť drti [N]	PC + 50 % přeseť drti [N]	100 % přeseť drti [N]	PC + 25 % nepřeseť drti [N]	PC + 50 % nepřeseť drti [N]	100 % nepřeseť drti [N]
1.	690,69	659,18	678,09	659,59	676,82	670,52	676,82
2.	671,78	666,74	675,56	644,05	656,66	696,99	651,62
3.	642,79	673,04	693,21	668,00	686,91	674,30	686,91
4.	688,17	660,44	684,39	650,36	680,61	689,43	685,65
5.	647,84	691,95	673,04	637,75	698,25	670,52	665,48
6.	654,14	671,78	680,61	630,19	655,40	651,62	676,82
7.	698,25	709,59	680,61	664,22	695,73	647,84	690,69
8.	691,95	647,84	641,53	657,92	705,81	656,66	646,58
9.	636,49	650,36	645,23	635,23	665,48	654,14	646,58
10.	645,32	640,27	670,52	659,18	698,25	680,61	668,00
$\bar{X}$	666,74	667,12	672,28	650,65	681,99	669,26	669,51
S	23,92	20,97	16,49	13,15	18,13	16,64	16,70

Tab. 32. Hodnoty síly pro přeražení vzorku při teplotě 23 °C

Číslo měření	PC čistý [N]	PC + 25 % přeseť drti [N]	PC + 50 % přeseť drti [N]	100 % přeseť drti [N]	PC + 25 % nepřeseť drti [N]	PC + 50 % nepřeseť drti [N]	100 % nepřeseť drti [N]
1.	633,97	669,26	645,32	679,35	636,49	662,96	657,92
2.	675,56	641,53	664,22	662,96	655,40	661,70	647,84
3.	686,91	647,84	661,70	647,84	665,48	637,75	671,78
4.	674,30	615,07	647,84	645,32	660,44	644,05	617,59
5.	635,23	664,22	640,27	641,53	641,53	649,10	621,37
6.	650,36	626,41	647,84	660,44	645,32	635,23	631,45
7.	676,82	642,79	622,63	659,18	695,73	649,10	674,30
8.	637,75	626,41	628,93	648,76	685,65	633,97	659,18
9.	659,18	640,27	613,81	655,40	647,84	651,62	633,97
10.	623,89	655,40	636,49	664,22	695,73	652,88	626,41
$\bar{X}$	655,40	642,92	640,90	656,50	662,96	647,84	644,18
S	22,18	17,18	16,07	11,21	22,19	10,17	20,83

Tab. 33. Hodnoty síly pro přeražení vzorku při teplotě 100 °C

Číslo měření	PC čistý [N]	PC + 25 % přeseť drti [N]	PC + 50 % přeseť drti [N]	100 % přeseť drti [N]	PC + 25 % nepřeseť drti [N]	PC + 50 % nepřeseť drti [N]	100 % nepřeseť drti [N]
1.	512,98	511,71	579,78	591,12	544,48	507,93	553,31
2.	512,98	502,89	514,24	545,74	591,12	526,84	486,51
3.	598,68	500,37	558,35	535,66	540,70	570,95	536,92
4.	617,59	539,44	535,66	571,38	572,21	519,28	552,05
5.	506,67	545,74	558,35	516,76	501,63	505,41	555,83
6.	516,76	544,48	549,53	597,42	555,83	521,80	541,96
7.	550,79	507,93	529,36	540,70	574,73	557,09	529,36
8.	529,36	618,85	539,44	491,55	592,38	549,53	544,48
9.	538,18	473,90	501,63	552,48	473,90	563,39	490,29
10.	552,05	568,86	560,87	519,28	526,84	627,67	455,32
$\bar{X}$	543,60	531,42	542,72	546,21	547,38	544,99	524,60
S	37,75	41,52	23,51	33,39	38,50	37,24	34,72

Tab. 34. Hodnoty síly pro přeražení vzorku při teplotě 145 °C

Číslo měření	PC čistý [N]	PC + 25 % přeseť drti [N]	PC + 50 % přeseť drti [N]	100 % přeseť drti [N]	PC + 25 % nepřeseť drti [N]	PC + 50 % nepřeseť drti [N]	100 % nepřeseť drti [N]
1.	502,89	423,49	473,90	476,42	451,22	451,22	463,82
2.	438,61	422,23	439,87	433,57	472,64	598,68	335,26
3.	461,30	402,06	428,53	520,54	399,54	501,63	463,82
4.	509,19	514,24	467,60	391,98	378,11	390,72	393,24
5.	501,63	423,49	436,09	442,39	431,05	494,07	526,84
6.	442,39	431,05	427,27	410,88	433,57	405,84	465,08
7.	398,28	444,91	512,98	463,82	424,75	444,91	427,27
8.	462,56	439,87	433,57	463,82	448,70	458,78	521,80
9.	458,78	500,37	446,17	449,96	420,97	478,94	460,04
10.	495,33	419,71	451,22	457,52	461,30	415,93	477,68
$\bar{X}$	467,10	442,14	451,72	451,09	432,18	464,07	453,49
S	35,47	36,40	26,62	35,47	28,47	59,91	57,07