

Porovnání vlastností konstrukčních materiálů

Bc. Filip Severa

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Filip Severa**
Osobní číslo: **T13505**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Porovnání vlastností konstrukčních materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních vzorků pro experiment
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení naměřených výsledků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. David Mañas, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

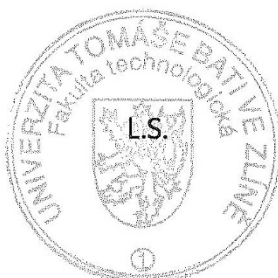
30. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2015

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 12.5.2015

.....


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

(1) Vysoká škola 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.

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

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

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

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

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

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

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-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 přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Náplní této diplomové práce je porovnání mechanických vlastností polymerních materiálů. V teoretické části práce jsou uvedeny možné způsoby klasifikace polymerních materiálů podle teplotního chování, struktury a použití. Následuje popis vybraných polymerů, včetně jejich základních vlastností. V závěru teoretické části jsou popsány vybrané typy mechanických zkoušek. Praktická část se zabývá postupem přípravy zkušebních těles a následným zhodnocením výsledků ze zkoušky v tahu, tvrdosti, mikrotvrdosti a rázové houževnatosti.

Klíčová slova: polymer, mechanické zkoušky, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

This thesis deals with the comparison of the mechanical properties of polymeric materials. The theoretical part presents possible methods of the classification of polymeric materials according to their thermal behavior, structure and application. Next part describes selected polymers and their basic properties. The end of the theoretical part describes selected types of mechanical tests. The practical part deals with the process of test samples preparation, followed by evaluation of the results from the tests of tensile, hardness, micro-hardness and toughness.

Keywords: polymer, mechanical tests, mechanical properties

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, doc. Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D. za jeho trpělivý přístup, cenné rady a odborné vedení.

Upřímné poděkování patří také mé rodině a blízkým přátelům za jejich oporu během celého studia.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERY	12
1.1 KLASIFIKACE POLYMERŮ PODLE TEPLOTNÍHO CHOVÁNÍ	12
1.1.1 Elastomery.....	12
1.1.2 Plastomery.....	13
1.2 KLASIFIKACE POLYMERŮ PODLE MOLEKULÁRNÍ STRUKTURY.....	13
1.2.1 Lineární makromolekuly.....	14
1.2.2 Rozvětvené makromolekuly.....	14
1.2.3 Zesíťované makromolekuly	14
1.3 KLASIFIKACE POLYMERŮ PODLE NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURY.....	15
1.3.1 Amorfnní polymery.....	15
1.3.2 Krystalické (semikrystalické) polymery	16
1.4 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ PODLE POUŽITÍ	17
1.4.1 Standartní (komoditní) polymery	18
1.4.2 Konstrukční polymery.....	18
1.4.3 Speciální (hi-tech) polymery.....	18
2 VLASTNOSTI VYBRANÝCH POLYMERŮ	20
2.1 POLYOLEFINY.....	20
2.1.1 Polyethylen (PE)	20
2.1.2 Polypropylen (PP)	21
2.2 VINILOVÉ POLYMERY.....	22
2.2.1 Polyvinylchlorid (PVC)	22
2.2.2 Polyvinylalkohol (PVAL)	23
2.2.3 Polyvinylacetát (PVAC).....	24
2.3 STYRENOVÉ POLYMERY	24
2.3.1 Polystyren (PS).....	24
2.3.2 Houževnatý polystyren (HIPS)	25
2.3.3 Kopolymer styrenu s akrylonitrilem (SAN).....	25
2.3.4 Akrylonitril-butadien-styren (ABS)	26
2.4 POLYAMIDY	27
2.4.1 Polyamid 6 (PA 6).....	28
2.4.2 Polyamid 66 (PA 66).....	29
2.4.3 Polyamid 612 (PA 612).....	30

2.5	POLYMETHYLMETHAKRYLÁT (PMMA)	31
2.6	POLYETHYLENTEREFTALÁT (PET)	32
2.7	POLYKARBONÁT (PC)	33
2.8	POLYOXYMETHYLÉN (POM).....	34
2.9	POLYFENYLENOXID (PPO)	35
2.10	POLYTETRAFLUORETHYLEN (PTFE)	37
2.11	POLYETERETERKETON (PEEK)	38
2.12	POLYIMIDY (PI).....	39
2.13	POLYFENYLSULFID (PPS).....	40
2.14	POLYSULFON (PSU)	41
2.15	TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY (TPE).....	42
2.15.1	Termoplastické polyuretany (TPU).....	43
2.15.2	Termoplastické olefiny (TPO)	44
2.15.3	Styrenový blokový kopolymer (SBS)	45
3	MECHANICKÉ ZKOUŠKY.....	47
3.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA	47
3.1.1	Zkušební tělíska	48
3.1.2	Pracovní diagram	49
3.1.2.1	Mez úměrnosti	51
3.1.2.2	Mez pružnosti	51
3.1.2.3	Mez kluzu	52
3.1.2.4	Mez pevnosti v tahu.....	52
3.2	ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	53
3.2.1	Zkouška tvrdosti podle Brinella.....	53
3.2.2	Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	54
3.2.3	Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	55
3.2.4	Zkouška tvrdosti podle Shoreho.....	55
3.2.5	Mikrotvrdost.....	56
3.3	RÁZOVÉ ZKOUŠKY.....	56
3.3.1	Metoda Charpy	56
II	PRAKTICKÁ ČÁST	58
4	CÍL PRÁCE	59
5	POPIS JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ	60
5.1	PŘÍPRAVA VZORKŮ	60
6	ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	62
6.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA	62
6.1.1	Srovnání modulu pružnosti v tahu	63
6.1.2	Srovnání meze pevnosti v tahu	63
6.1.3	Srovnání maximální síly	64
6.2	ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	64
6.2.1	Srovnání tvrdosti	65
6.3	INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI.....	66
6.3.1	Srovnání závislosti indentační síly na indentační hloubce.....	67
6.3.2	Srovnání závislosti indentační hloubky na čase indentace.....	67

6.3.3	Srovnání vtiskové tvrdosti.....	68
6.3.4	Srovnání vtiskového modulu.....	69
6.3.5	Srovnání vtiskového tečení	69
6.3.6	Srovnání deformační práce	70
6.4	RÁZOVÁ ZKOUŠKA V OHYBU (VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST)	70
6.4.1	Srovnání maximální síly	71
6.4.2	Srovnání energie potřebné k přeražení zkušebního tělesa	72
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ	73
	ZÁVĚR	74
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ	81
	SEZNAM TABULEK.....	82

ÚVOD

V průběhu 20. století pronikly do každodenního života obyvatel vyspělých průmyslových zemí syntetické makromolekulární látky, nazývané polymery. Ještě poměrně nedávno byly polymery brány jako náhražkový materiál, s často jednoúčelovou funkcí, kterou plnily pouze po omezenou dobu.

V dnešní době se však staly materiály, bez kterých bychom si nedokázali představit celou řadu aplikací v nejrůznějších odvětvích průmyslu. Prudký růst celosvětové produkce polymerů byl zapříčiněn zejména díky velice různorodým vlastnostem, které nám jednotlivé typy polymerních materiálů propůjčují. Velkou výhodou je také jejich nízká cena, snadná zpracovatelnost, nízká hmotnost, odolnost vůči korozi, dobré tepelně izolační a elektrické vlastnosti. Nejenom díky těmto vlastnostem polymery stále častěji doplňují, nebo úplně nahrazují tradiční materiály, jako je dřevo, kov, sklo apod.

Vhodně zvolený typ materiálu je velice důležitým krokem k návrhu konstrukčního řešení a k následné realizaci finálního výrobku, nebo aplikace. K zvolení vhodného materiálu, nebo srovnání více materiálů mezi sebou, je nutná důkladná znalost vlastností a chování daného materiálu. Za tímto účelem se provádí celá řada fyzikálních, mechanických a chemických zkoušek. Aby bylo možné výsledky z těchto zkoušek mezi sebou objektivně porovnávat, je nutné v průběhu zkoušek dodržovat stejné zkušební podmínky a postupy. Z tohoto důvodu jsou veškeré zkoušky normalizovány.

Obsahem této diplomové práce je srovnání mechanických vlastností několika vybraných polymerních materiálů pomocí různých druhů mechanických zkoušek a na základě výsledků z nich následně porovnat testované materiály.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

Polymery lze chápat jako chemické látky, oplývající celou řadou různých vlastností. Jsou obvykle tvořeny mimořádně velkými molekulami. Vlastnosti polymeru se odvíjí nejen od chemického složení, ale také od počtu, vzájemného uspořádání a propojení stavebních jednotek v řetězci molekuly. Makromolekuly jsou tvořeny vzájemným spojením stavebních jednotek, nazývaných jako mery. Mezi základní prvky takovýchto makromolekul patří atomy uhlíku, vodíku a kyslíku. Často jsou to také atomy dusíku, chloru a dalších prvků. Počet atomů se u těchto organických, nebo anorganických sloučenin pohybuje v řádu stovek, až milionů. Navzájem jsou spojeny chemickými vazbami, které mohou být jednoduché, ale i násobné. Každý typ vazby má různou pevnost a délku.

Polymery se vyznačují rovněž velkými molekulovými hmotnostmi. Pokud je relativní molekulová hmotnost do 20 000, lze hovořit o nízkomolekulárních polymerech. Pokud je tato hodnota větší než 20 000, lze hovořit o polymerech vysokomolekulárních. Tyto hodnoty je však nutné chápat pouze jako orientační, protože vlastnosti molekul stejného typu se mění v závislosti na zvyšujícím se počtu stavebních jednotek, tedy se stoupající molekulovou hmotností, plynule a pozvolna.

Ve formě výrobku jsou polymery prakticky v tuhém stavu. Při zpracování se naopak využívá jejich tekutosti, které je docíleno většinou zvýšením teploty a tlaku v průběhu zpracování. Tímto je možné vyrábět výrobky nejrůznějších tvarů a vlastností, v závislosti na přepokládaném využití. [1], [2], [3]

1.1 Klasifikace polymerů podle teplotního chování

Polymery lze rozdělit dle mnoha hledisek. Bohužel, všechny způsoby systematického dělení mají své určité nevýhody. Nejčastěji se polymery dělí dle jejich chování za zvýšené teploty a to celkem do čtyř základních skupin. Jmenovitě jsou to elastomery, plastomery, termoplasty a reaktoplasty. [2], [4]

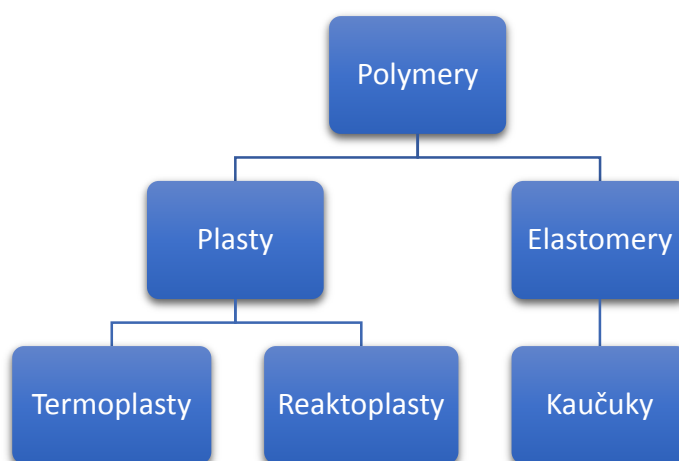
1.1.1 Elastomery

Jak už samotný název napovídá, elastomery jsou vysoce elastické polymery, které můžeme za běžných podmínek a malou silou značně deformovat bez porušení, kdy deformace je převážně vratná. Nejčastějším zástupcem elastomerů jsou přírodní a syntetické kaučuky, které slouží jaký výchozí materiál pro výrobu pryže. [1], [2]

1.1.2 Plastomery

Plastomery neboli plasty jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Pokud jsou vystaveny zvýšené teplotě, stávají se plastickými a tvarovatelnými. V případě, že je změna z plastického do tuhého stavu vratná, nazýváme takovéto polymery termoplasty. Mezi termoplasty patří například polyetylen, polypropylen, polyvinylchlorid, polyamid a další.

U některých typů polymerů dojde při zvýšené teplotě k chemické reakci a změna z plastického do tuhého stavu není vratná. Tyto polymery nazýváme reaktoplasty. Do této skupiny polymerů patří například polyesterové, epoxidové a fenolformaldehydové pryskyřice. [1], [2]



Obr. 1 – Rozdělení polymerů [1], [2]

1.2 Klasifikace polymerů podle molekulární struktury

Dva polymery, které mají stejné chemické složení, ale rozdílnou molekulární strukturu, mohou vykazovat značné rozdíly ve fyzikálních vlastnostech, reologii, krystalinitě a dalších vlastnostech. Například rozdílné hodnoty hustoty, krystalinity, mechanických a reologických vlastností mezi nízkohustotním polyethylenem (LDPE) a vysokohustotním polyethylenem (HDPE) jsou závislé na přítomnosti, nebo absenci vedlejších větví podél hlavního řetězce polymeru. [8]

Mezimolekulární soudružnost ovlivňuje pravidelnost řetězce a počet postranních skupin. Z tohoto důvodu se v praxi věnuje pozornost takovým výrobním metodám, které umožňují získání minimálně rozvětvených produktů s co nejpravidelnější konfigurací. Vytvoří-li

se vysoký stupeň rozvětvení, nebo propojení molekulárních řetězců zesíťováním, rozpustnost a možnost viskózního toku polymeru se sníží. [5]

1.2.1 Lineární makromolekuly

Jde o dlouhé řetězce sestavené z jednotlivých článků, vznikající z monomerů, které obsahují dvě reaktivní skupiny. Tyto skupiny jsou schopné tvořit chemické vazby. Ve skutečnosti nejsou řetězce rovné, ale nahodile zkroucené a svinuté bez zřetelné orientace v hmotě. Z prostorových důvodů se mohou k sobě více přiblížit a vyplnit tak efektivně prostor, což má za následek větší hustotu polymeru. Příkladem může být výše uvedený vysokohustotní polyethylen.

Lineární makromolekuly také snáze vytvářejí pravidelné shluky. Proto mají tyto polymery vyšší obsah krystalických podílů, jsou dobře rozpustné, tavitelné a ve formě taveniny dobře zpracovatelné. V tuhém stavu jsou houževnaté. [7], [9]

1.2.2 Rozvětvené makromolekuly

Tyto makromolekuly jsou tvořeny lineárními řetězci, obsahující alespoň jednu boční větev připojenou k hlavnímu řetězci. Jejich pohyblivost je zpravidla menší, než v případě lineárních řetězců. Vedlejší větve lze dále rozdělit na krátké a dlouhé. Krátké vedlejší větve obvykle obsahují do 10 opakujících se jednotek. Na rozdíl od lineárních makromolekul se k sobě díky bočním větvím nemohou dostatečně přiblížit a proto je i jejich hustota nižší. Příkladem může být výše uvedený nízkohustotní polyethylen.

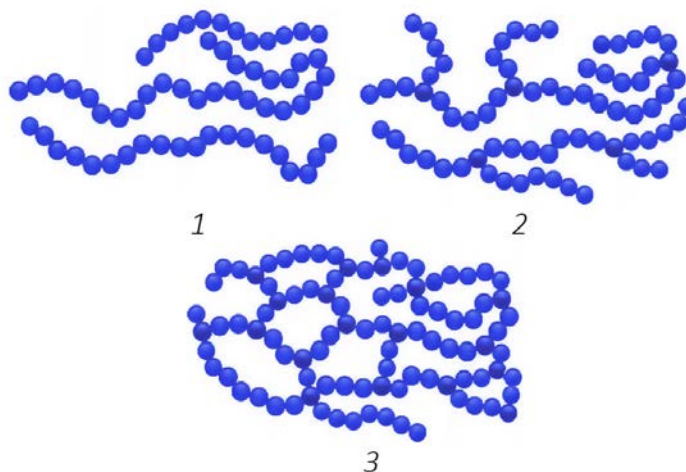
Nízká uspořádanost shluků vede k nižšímu stupni krystalinity. Boční řetězce mají za následek horší pohyblivost a tedy i tekutost polymeru ve formě taveniny. Kromě toho také způsobují pokles makromolekulárních sil vlivem oddálení sousedních makromolekul, a tudíž zhoršují i většinu mechanických vlastností. [7], [8], [9]

1.2.3 Zesíťované makromolekuly

Lze je opět chápat jako lineární řetězce, hustěji nebo řidčeji spojené na různých místech pomocí můstků. Svázání řetězců má za následek horší pohyblivost, která je omezena jen na segmenty řetězců mezi můstky.

Takováto síť vede ke ztrátě tavitelnosti a rozpustnosti. Zesíťované makromolekuly propůjčují polymeru velkou tvrdost, tuhost a odolnost vůči vysokým teplotám, avšak nízkou

odolnost proti rázovému namáhání. Řídké sítě jsou typické pro elastomerní kaučukovité polymery. Naopak husté sítě jsou charakteristickým znakem reaktoplastů. [7], [9]



Obr. 2 – Typy makromolekul [8]

1 – lineární makromolekuly, 2 – rozvětvené makromolekuly, 3 – zesíťované makromolekuly

1.3 Klasifikace polymerů podle nadmolekulární struktury

Makromolekulární látky jsou schopny v závislosti na vlastní vnitřní chemické struktuře tvořit i strukturu nadmolekulární. Tuto oblast hlouběji studuje morfologie polymerů, podle které lze nadmolekulární strukturu dělit na amorfní a krystalickou (semikrystalickou). [2], [3]

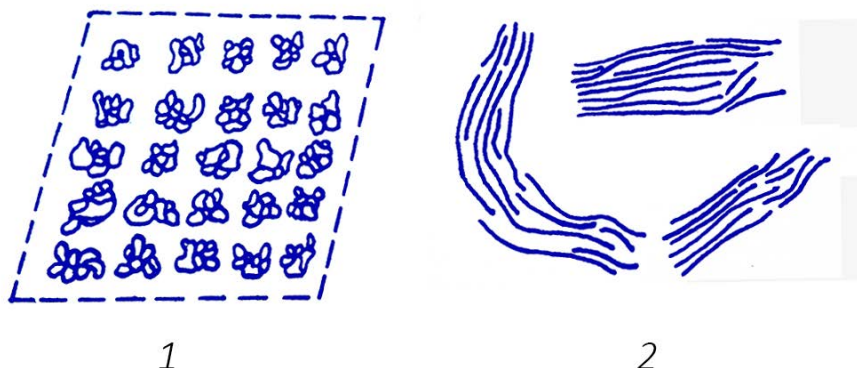
1.3.1 Amorfní polymery

Tyto polymery jsou typické tím, že nevykazují strukturní uspořádání mezi řetězci makromolekul. Elektronovou mikroskopií bylo zjištěno, že nejjednodušším typem uspořádání amorfní struktury jsou tzv. globuly. Jejich velikost se pohybuje od 10 do 20 μm . Ty mohou být dále spořádány do složitějších tvarů, ve kterých jednotlivé monomolekulární globuly neztrácejí svou individuálnost. Některé útvary jsou schopny vytvářet makroskopické celky s krystalickým uspořádáním, u kterých jsou například patrné hrany.

Vyšším stupněm uspořádanosti jsou tzv. svazky neboli balíčky. Jde o řetězce tvořené rozvinutými lineárními makromolekulami většinou paralelně sdruženými, které při pozorování elektronovým mikroskopem jeví ještě větší známky krystalizace, ale oproti globulárnímu uspořádání se u nich již výrazně neprojevuje individuální charakter.

Amorfní polymery jsou charakteristické tvrdostí, křehkostí a vysokou pevností. Díky nízkému indexu lomu mohou být průhledné až čiré. Použitelnost amorfních polymerů je do

teploty zesklennění T_g . Do této skupiny polymerů patří například polystyren, polymethylmethakrylát, polykarbonát a další plasty. [2], [5], [6]



Obr. 3 – Nadmolekulární struktura amorfních polymerů [5]

1 – globuly, 2 – svazky

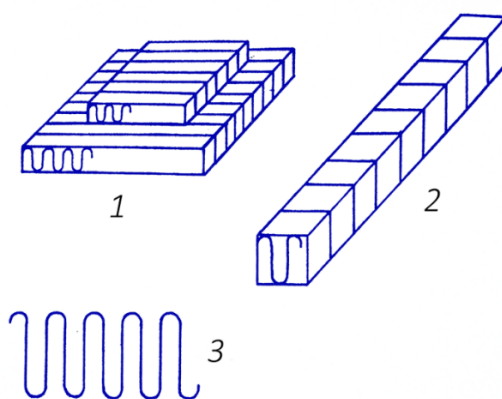
1.3.2 Krystalické (semikrystalické) polymery

Základní morfologickou formou krystalických polymerů jsou lamely a fibrily, tvořené z tzv. proužků. Tyto proužky vznikají pravidelným rozložením polymerních řetězců a následným mnohonásobným skládáním a ohýbáním o 180° . Hlavním důvodem tvorby proužků je snaha zmenšovat povrchové napětí krystalizujícího systému. Lamely mohou být skládány na sebe i spirálovým způsobem.

Existují i složitější útvary tzv. sférolity, vznikající skládáním lamel nebo fibril radiálně. Takovéto sférolity dosahují vzhledem k molekulární struktuře a podmínkám krystalizace různých rozměrů od mikroskopických, až po rozměry viditelné pouhým okem. V okolí sférolitů se nachází větší, či menší oblasti méně uspořádaného polymeru nebo přímo amorfni látky. [5]

Ve skutečnosti krystalické polymery nekystalizují úplně, ale pouze v omezené míře. Proto jsou někdy nazývány jako polymery semikrystalické. Zastoupení krystalických oblastí vyjadřuje tzv. stupeň krystalinity, který je uváděn v procentech. [6]

Oproti amorfním polymerům jsou mléčné zakalené, více houževnaté. S rostoucím stupněm krystalinity roste i jejich pevnost a modul pružnosti. Použitelnost semikrystalických polymerů je do teploty tání T_m . K semikrystalickým polymerům patří například polyethylen, polypropylen, polyamid, polytetrafluorethylen, polyoxymethylen a další plasty. [7]

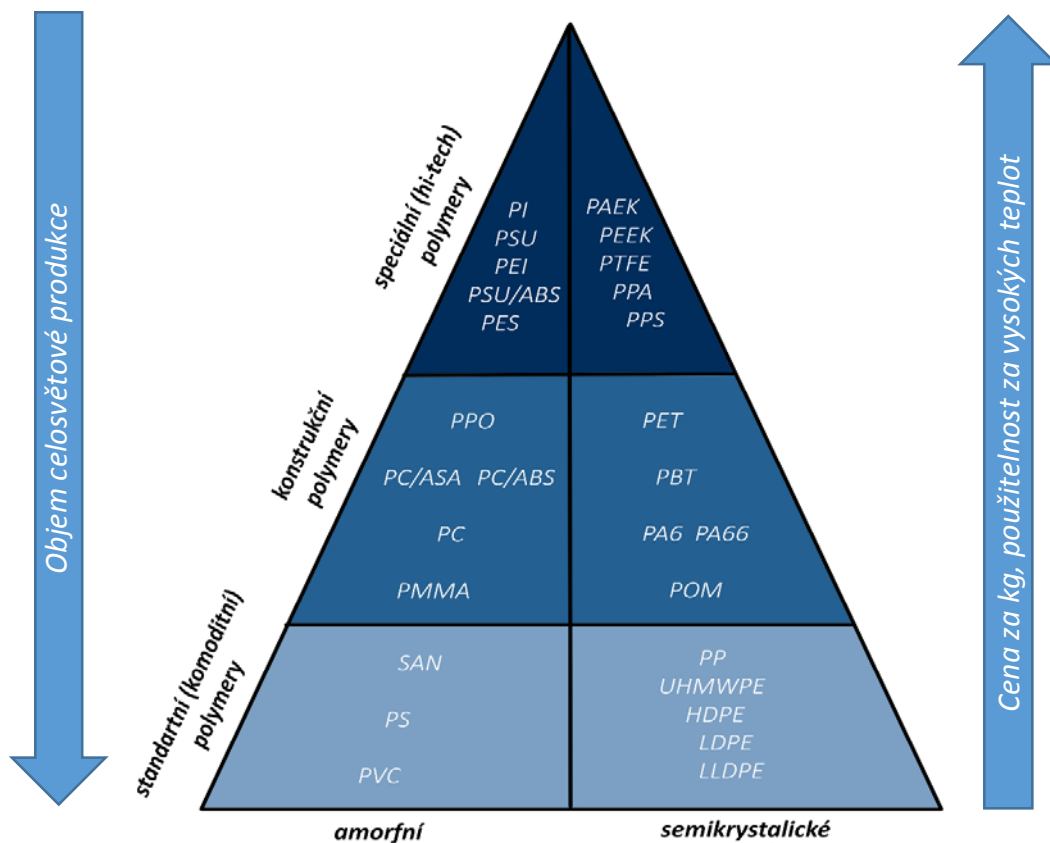


Obr. 4 – Nadmolekulární struktura semikrystalických polymerů [5]

1 – lamela, 2 – fibrila, 3 – proužek

1.4 Rozdělení polymerů podle použití

Polymery lze dle jejich použití a zastoupení na trhu vhodně rozdělit do celkem tří hlavních kategorií. Do první z nich spadají polymery standardní neboli komoditní, následovány polymery konstrukčními. Poslední skupinu tvoří speciální neboli hi-tech polymery. V prvních dvou více uvedených kategoriích jsou zastoupeny zejména termoplasty. [10], [11], [12]



Obr. 5 – Rozdělení polymerů podle aplikace a nadmolekulární struktury [2]

1.4.1 Standartní (komoditní) polymery

Tyto polymery mají v současnosti dominantní postavení na trhu a jejich výrobní objem je ze všech polymerů největší, mají široké využití a zároveň jsou nejlevnější. Jednou z hlavních výhod těchto polymerů je dobrá zpracovatelnost, což je z části dáno nízkou teplotou tání těchto polymerů. K dalším výhodám patří nízká hmotnost, dobré tepelné a elektrické izolační vlastnosti. S těmito plasty přicházíme do kontaktu každý den.

Standartní polymery jsou používány v obalové technice, na výrobu oblečení apod. K nejpoužívanějším zástupcům patří PE, PP, PS, PVC, SAN a další. [10], [11], [12]

1.4.2 Konstrukční polymery

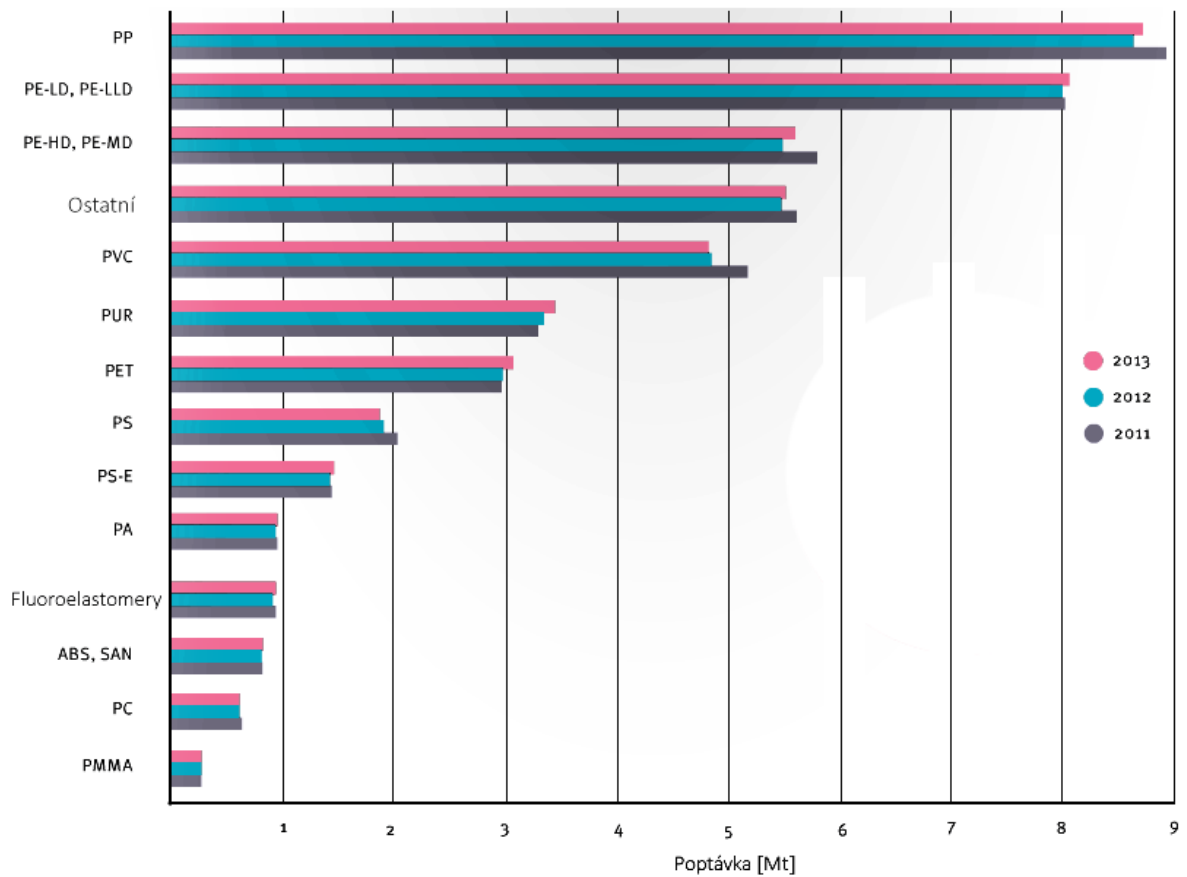
V prostřední skupině se nachází polymery konstrukční. Při srovnání s komoditními polymery se vyznačují lepší pevností, tuhostí, dobrou houževnatostí, rozměrovou stabilitou, odolávají zvýšeným teplotám a jsou schopny odolávat větším zatížením po delší dobu. V případě, že nejsou využívány pouze k nenáročným konstrukčním aplikacím, je často nutné tyto polymery plnit skelnými vlákny a dalšími plnivými, k dosažení námi požadovaných vlastností. Oproti standartním polymerům jsou dražší a jsou vyráběny v menším množství.

Díky těmto vlastnostem nacházejí čím dál tím větší uplatnění nejen v automobilovém, leteckém, vojenském a telekomunikačním průmyslu, ale i v domácnostech a spotřební elektronice, kde vhodně doplňují, nebo úplně nahrazují konvenční materiály, jako jsou kovy, keramika, sklo apod. Hlavním důvodem jsou nižší náklady na výrobu a nízká hmotnost ve srovnání s konvenčními materiály. Oproti těmto materiálům mají i své nevýhody. Zejména pak horší chemickou stabilitu při vystavení dlouhodobému působení ultrafialového záření a vysokým teplotám. Ke konstrukčním polymerům lze zařadit například PA, PPO, PET, PC, PMMA, POM, PPE, HIPS, ABS, TPE a další. [10], [11], [12], [13]

1.4.3 Speciální (hi-tech) polymery

Poslední kategorii zastupují polymery speciální neboli hi-tech. Nejsou tak nazývány kvůli vynikajícím vlastnostem, které by vlastnily. Ty mohou být ve skutečnosti při srovnání s předchozími polymery v některých případech i horší. Hlavním důvodem, proč jsou nazývány jako speciální, je ten, že jsou si schopny zachovat své užitečné mechanické vlastnosti i při poměrně velkých teplotách a to i po delší časový úsek. Většina takových polymerů je schopna odolávat teplotám okolo 160 °C, v některých případech i teplotám přesahující více než 250 °C.

Jejich zastoupení na trhu tvoří z uvedených polymerů nejmenší část, jsou velice drahé a jsou určeny ke speciálním aplikacím například v leteckém a kosmickém odvětví. K zástupcům hi-tech polymerů patří PPS, PSU, PTFE, PSF, PES, PEI, PAI, PEK, PEEK, LCP a další. [2], [10], [12], [13]



Obr. 6 – Poptávka polymerů v Evropě v roce 2011, 2012 a 2013 [26]

2 VLASTNOSTI VYBRANÝCH POLYMERŮ

Výběrem monomerů a jejich kombinací, výběrem polymeračních podmínek, polymeračních technik a využitím různých polyreakcí je možné vytvořit širokou škálu, často velmi speciálních polymerů, určených k nejrůznějším aplikacím. Kvůli technickým a ekonomickým důvodům však pouze omezený počet z nich tvoří převážnou část roční světové produkce polymerů, která je více než 250 milionů tun a její meziroční nárůst se odhaduje na 4 až 6% ročně. [3]

2.1 Polyolefiny

Polyolefiny tvoří největší skupinu synteticky vyráběných polymerů na trhu a to zejména díky objemu výroby polyethylenu a polypropylenu. Hlavním důvodem jsou jednak levné petrochemické suroviny, jako je zemní plyn a ropa. Z těchto surovin jsou následně krakováním a rektifikací získávány monomery. Dalším důvodem jsou specifické užité vlastnosti polyolefinů a jejich snadná zpracovatelnost za použití různých technologií. [4]

2.1.1 Polyethylen (PE)

Polyethylen slouží jako základní materiál pro širokou řadu produktů s různými zpracovatelskými a užitnými vlastnostmi, které jsou dány mírou větvení polymerních řetězců, rozdílnou molekulovou hmotností a rozdílným obsahem krystalické fáze u jednotlivých typů PE. Rozdílná krystalinita různých typů PE má za následek rozdílnou hustotu. Hustota polyethylenu a tvar řetězce se staly základními parametry pro třídění různých typů polyethylenů. Některé z nich jsou uvedeny v tabulce 1 níže. [4]

Tab. 1 – Dělní polyethylenů dle hustoty [4]

Typ	Zkratka	Hustota [kg·m ³]
PE s velmi nízkou hustotou	ULDPE	888 ÷ 915
PE s nízkou hustotou	LDPE	910 ÷ 955
Lineární PE s nízkou hustotou	LLDPE	918 ÷ 955
PE se střední hustotou	MDPE	925 ÷ 940
PE s vysokou hustotou	HDPE	941 ÷ 954
PE s vysokou molekulovou hmotností	HMW-HDPE	944 ÷ 954
PE s ultravysokou molekulovou hmotností	UHMW-HDPE	955 ÷ 957

Tenké vrstvy polyethylenu se vyznačují ohebností a elasticitou. Jde o látku téměř průhlednou, popřípadě mléčně zakalenou s voskovitým charakterem při omaku. Všechny

typy polyethylenu mají vysoký krystalický podíl, houževnatost a tažnost. Teplota tání se nachází mezi 105 až 135 °C. K výhodným vlastnostem patří nízká cena, zpracovatelnost, elektroizolační vlastnosti, chemická odolnost, odolnost vůči nízkým teplotám, zdravotní nezávadnost. Použitelnosti je naopak ovlivněna nízkým bodem měknutí a sklonem k praskání, zejména u nízkomolekulárních typů. Možnosti aplikace dále omezuje sklon k oxidaci, nízká odolnost vůči poškrábání, nízká pevnost v tahu a hořlavost.

Převážná část produkce rozvětveného polyethylenu nachází uplatnění při výrobě fólií. Často je také používán jako izolační materiál při výrobě elektrických kabelů. Slouží k výrobě trubek, kanystrů, hraček apod. Jedná se o nejpoužívanější materiál v obalové technice. Jeho světová produkce v roce 2012 činila zhruba 80 milionů tun. [4]

Tab. 2 – Přibližné vlastnosti HDPE [22]

Materiál: Vysokohustotní polyethylen (HDPE)			
Morfologie:	Semikrystalický	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	941 ÷ 954	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	18 ÷ 30	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	690 ÷ 1600	MPa
	Smrštění	1,1 ÷ 1,4	%
	Teplota T _g / T _m	-40 / 105 ÷ 135	°C
	Doporučená teplota taveniny	200 ÷ 280	°C
	Doporučená teplota formy	10 ÷ 60	°C
	Maximální teplota použitelnosti	70 (dlouze) ÷ 80 (krátce)	°C

2.1.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen je druhý nejdůležitější polyolefin s roční celosvětovou produkcí okolo 60 milionů tun. Spolu s polyethylenem se řadí ke klasickým zástupcům komoditních polymerů.

Polypropylen a polyethylenem sdílí i obdobné vlastnosti. Vzhledem ke stupni krystalinity dosahujícímu 60 až 75 % je ale neprůhledný. Teplota tání se u polypropyleny pohybuje v rozmezí 160 až 170 °C. S tím roste oproti polyethyleny i jeho použitelnost za vyšších teplot. Má menší hustotu a i odolnost vůči nízkým teplotám, oxidaci a povětrnostním vlivům, a proto je nutná jeho stabilizace pomocí absorbérů UV záření, antioxidanty a sazemi. Naopak prokazuje větší pevnost, tvrdost, odolnost vůči oděru a je méně propustný pro plyny a páry.

Podstatná část produkce se využívá v textilním průmyslu, kde polypropylenové vlákna mají podobné mechanické vlastnosti, jako vlákna polyamidové. Další uplatnění nachází při výrobě lepidel, izolací elektrických kabelů, v domácích spotřebičích a v obalové technice. Vyztužené typy polypropylenu se úspěšně používají v automobilovém průmyslu na kryty světlometů, nádržky a rozvody chladicí kapaliny a na díly topení. Slouží jako výchozí materiál pro výrobu trubek, desek, fólií a profilů nejrůznějších tvarů a rozměrů. [1], [2], [3]

Tab. 3 – Přibližné vlastnosti PP [22]

Materiál: Polypropylen (PP)			
Morfologie:	Semikrystalický	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	900	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	28	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	1180	MPa
	Smrštění	0,5 ÷ 2	%
	Teplota tání T _m	160 ÷ 170	°C
	Doporučená teplota taveniny	200 ÷ 275	°C
	Doporučená teplota formy	30 ÷ 80	°C
	Maximální teplota použitelnosti	100	°C

2.2 Vinylové polymery

Jsou to polymery se základní jednotkou vinylového monomeru a v dnešní době patří k nejpoužívanějším a nejdůležitějším plastům. K nejznámějším zástupcům této skupiny patří polyvinylchlorid, polyvinylalkohol a polyvinylacetát. [4]

2.2.1 Polyvinylchlorid (PVC)

Je jedním z nejdůležitějších termoplastů s řadou výhodných vlastností a relativně nízkou cenou. Roční celosvětová produkce v roce 2012 dle odhadů činila asi 40 milionů tun, což tento polymer řadí na třetí místo za PE a PP. K hlavním příčinám mimořádného rozšíření PVC patří poměrně dobrá zpracovatelnost, která lze provést všemi základními postupy, jako je válcování, vytlačování, vstřikování, vyfukování, vakuové tvarování apod. Výhodou je také jeho snadná želatínace s různými změkčovadly a vysoká chemická odolnost. Zpracovává se buď bez použití změkčovadel, pouze za použití stabilizátorů, maziv a modifikátorů. V takovém případě hovoříme o tvrdém PVC. V případě použití změkčovadel vzniká tzv. měkčený PVC.

PVC má vynikající odolnost vůči vodě, kyselinám, nízkou propustnost plynů a dobré elektroizolační vlastnosti. K dalším výhodným vlastnostem patří jeho tvrdost, vysoká pevnost a odolnost vůči oděru. Díky velkému obsahu chloru je samozhášivý. Teplota skelného přechodu T_g se pohybuje kolem 80 °C, proto lze výrobky z tvrdého PVC používat krátkodobě to teploty 75 °C a dlouhodobě do 60 až 65 °C.

Žádný jiný polymer nemá tak široké možnosti aplikace, jako právě PVC. Neměkčený typ PVC se používá při výrobě trubek, profilů, desek, okenních rámců, elektrických skříní apod. Měkčený typ se používá na výrobky polotuhé až elastické. Příkladem mohou být různé fólie, ubrusy, koženky, podlahové krytiny, plachty, hračky, nádoby, ochranné rukavice atd. [1], [2], [4]

Tab. 4 – Přibližné vlastnosti neměkčeného PVC [22]

Materiál: Neměkčený polyvinylchlorid (PVC)			
Morfologie:	Amorfní	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1380	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	42	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	2400	MPa
	Smrštění	0,1 ÷ 2,5	%
	Teplota T_g / T_m	80 / 180 ÷ 200	°C
	Doporučená teplota taveniny	185 ÷ 205	°C
	Doporučená teplota formy	30 ÷ 60	°C
	Maximální teplota použitelnosti	60 (dlouze) ÷ 75 (krátce)	°C

2.2.2 Polyvinylalkohol (PVAL)

Je bílá práškovitá hmota se zřetelným krystalickým charakterem.

Hlavními veličinami ovlivňující jeho fyzikální vlastnosti jsou polymerační stupeň, stupeň hydrolyzy a molekulová hmotnost. S rostoucím polymeračním stupněm a s rostoucí molekulovou hmotností klesá jeho rozpustnost. Polyvinylalkohol je málo termoplastický a je použitelný v rozmezí -50 až 130 °C. Nad teplotou 220 °C se začíná rozkládat.

Svým chováním značně připomíná želatinu, z čehož vyplývá i jeho použití v potravinářském průmyslu pro přípravu želé. V chemickém průmyslu slouží jako zahušťovadlo pro barvy, pro výrobu lepidel a impregnačních hmot odolávající benzinu, olejům tukům a rozpouštědlům. Další využití nachází při výrobě nití, textilních vláken, těsnění, hadic apod.

[1], [4]

2.2.3 Polyvinylacetát (PVAC)

Na trh je dodáván v pevném skupenství ve formě prášku, nebo jako transparentní hmota v podobě roztoku.

Polyvinylacetát je čirý, amorfní, bezbarvý a poměrně křehký polymer s T_g kolem 28 °C a T_m až 80 °C. Vzhledem k nízké teplotě měknutí, nízké odolnosti proti tepelné destrukci a studenému toku je jeho aplikace jako termoplast pro konstrukční účely nemožná.

Vynikající vlastností je však jeho adheze k pokladu, proto se používá především k výrobě lepidel na dřevo, kůži, papír, textil atd. Polyvinylacetátové latexy slouží jako pojiva pro nátěrové hmoty, tmely a nástřikové hmoty. [1], [4]

2.3 Styrenové polymery

Plasty, spadající do této skupiny polymerů, zaujímá svým objemem výroby třetí místo za olefiny a vinylovými polymery. Svým podílem zaujímají asi 10% celkového objemu výroby všech plastů. V roce 2010 dosahovala spotřeba styrenu zhruba 22 milionů tun. V zásadě je lze dále dělit na standardní, zpěňovatelné a houževnaté. [1], [3]

2.3.1 Polystyren (PS)

Standardní polystyren je jedním z nejstarších syntetických polymerů. Je tvrdý, lesklý s vynikající průzračností, avšak značně křehký. Zpracovává se převážně vstřikováním do forem. Při běžných podmínkách dobře odolává oxidaci, ale i přesto není vhodné dlouhodobé venkovní používání, protože fotooxidací dohází ke křehnutí a žloutnutí. Teplotní hranice použitelnosti je asi 75 °C. Jeho další nevýhodou je vysoká hořlavost s velkou produkcí sazí a náchylnost ke korozi při napětí, kdy společným účinkem koroze a mechanických napětí vznikají jemné vlasové trhlinky, projevující se zbělením postižených míst, což vylučuje jeho použití na mechanicky namáhané výrobky přicházející do styku s povrchově aktivními látkami, jako jsou uhlovodíky, freony, alkoholy apod.

Použití nachází v obalové technice a na nenáročném spotřebním zboží, jako jsou různé kelímky, misky, podnosy, hračky, ozdobné předměty, v elektrotechnice a audio-video technice jako obal na kazety, CD disky atd.

Široké možnosti aplikace našel pěnový (expandovaný) polystyren, nazývaný jako EPS. Tento typ polystyrenu má vynikající termoizolační a zvukově izolační vlastnosti, z čehož vyplývá jeho použití ve stavebnictví. Často je využíván i v obalové technice, kde slouží jako ochrana přístrojů proti nárazu, při dopravě a manipulaci. [1], [2], [4]

Tab. 5 – Přibližné vlastnosti PS [22]

Materiál: Polystyren (PS)			
Morfologie:	Amorfní	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1005	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	42	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	3100	MPa
	Smrštění	0,5 ÷ 0,8	%
	Teplota skelného přechodu T _g	80 ÷ 100	°C
	Doporučená teplota taveniny	200 ÷ 250	°C
	Doporučená teplota formy	10 ÷ 80	°C
	Maximální teplota použitelnosti	50 (dlouze) ÷ 75 (krátce)	°C

2.3.2 Houževnatý polystyren (HIPS)

Pro některé typy aplikací je nutné odstranit nežádoucí vlastnosti standardního polystyrenu, zejména jeho vysokou křehkost a zároveň je výhodné zachovat jeho přednosti. Jednou z možností je modifikace roubování kopolymeru styrenu na butadienový, nebo butadienstyrenový kaučuk.

Nevýhodou oproti standardnímu PS je jeho neprůhlednost, kterou vyvažuje jeho podstatně vyšší rázovou houževnatostí, ale i větší pevností v tahu. Nevýhodou je i určitý pokles tvrdosti, pevnosti v ohybu a zhoršení odolnosti proti stárnutí na venkovním prostředí. Proto není doporučován na venkovní aplikace. Lze jej zpracovávat vstřikováním, vytlačováním, vakuovým tvarováním i vyfukováním.

Používá se všude tam, kde křehkost standardního polystyrenu už nevyhovuje. Příkladem mohou být různé nádoby, kontejnery, zásuvky v nábytkářském průmyslu, potřeby pro domácnost, díly chladniček, elektropřístrojů atd. [1], [2], [4]

2.3.3 Kopolymer styrenu s akrylonitrilem (SAN)

Tento kopolymer styrenu obsahuje 22 až 27 hmotnostních procent akrylonitrilu. Při srovnání se standardním typem polystyrenu má o 30 až 40% větší rázovou houževnatost, vyšší tvrdost,

pevnost v tahu a v ohybu a zároveň vyšší tvarovou stálost za tepla. Chemicky je ze všech styrenových plastů nejodolnější. Jeho dlouhodobá aplikace je možná do teplot okolo 85 °C a krátkodobě až 95 °C. Oproti standartnímu polystyrenu má však horší elektroizolační vlastnosti, nasákavost a nevýhodou může být i sklon k žloutnutí.

Značné množství vyráběného SAN bývá vyztuženo skelnými vlákny. Používá se na technické výrobky, jako jsou kryty projektorů, součástky vnitřního vybavení automobilů, klimatizační zařízení atd. [1], [2], [4]

Tab. 6 – Přibližné vlastnosti SAN [22]

Materiál: Kopolymer styrenu s akrylonitrilem (SAN)			
Morfologie:	Amorfní	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1060 ÷ 1080	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	62 ÷ 82	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	2700 ÷ 3900	MPa
	Smrštění	0,3 ÷ 0,5	%
	Teplota skelného přechodu T _g	100 ÷ 120	°C
	Doporučená teplota taveniny	185 ÷ 285	°C
	Doporučená teplota formy	30 ÷ 85	°C
	Maximální teplota použitelnosti	85 (dlouze) ÷ 95 (krátce)	°C

2.3.4 Akrylonitril-butadien-styren (ABS)

Terpolymery ABS představují kombinaci monomerů akrylonitril-butadien-styren. Vlivem akrylonitrilové složky se podařilo zvětšit chemickou odolnost a současně kopolymerací s butadienovou složkou podstatě zvýšit houževnatost a to bez zásadního poklesu pevnosti a tuhosti materiálu. Použitelnost se nachází v rozmezí 80 až 115 °C. Mrazuvzdorné typy je možné použít do teplot -30 °C.

Zpracování je možné prakticky všemi konvenčními technologickými postupy používanými pro termoplasty, jako je tváření i tvarování. K nejčastějším metodám z hlediska objemu zpracování ABS, patří vstřikování, následované vytlačováním. Na trhu se nachází celá řada různých typů s odlišnými mechanickými vlastnostmi, které prokazují charakteristickou tvrdost, houževnatost, či chemickou odolnost. ABS lze i povrchově upravovat. Příkladem může být galvanické pokovování, kdy je konečný vzhled plně srovnatelný s kovy a zároveň se zvyšuje pevnost materiálu a chemická odolnost proti rozpouštědlům.

Možnosti použití jsou velmi široké a to především v strojírenství, automobilovém průmyslu, v obalové technice, při stavbě lodí, ve stavebnictví ale i ve spotřebním průmyslu. Běžně se uplatňují ve formě kompozitních materiálů, kdy jsou například plněny skleněnými vlákny. [1], [2], [4]

Tab. 7 – Přibližné vlastnosti ABS [22]

Materiál: Akrylonitril-butadien-styren (ABS)			
Morfologie:	Amorfní	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1005	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	35	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	2100	MPa
	Smrštění	0,4 ÷ 0,7	%
	Teplota skelného přechodu T_g	85 ÷ 115	°C
	Doporučená teplota taveniny	210 ÷ 270	°C
	Doporučená teplota formy	50 ÷ 80	°C
	Maximální teplota použitelnosti	80 (dlouze) ÷ 115 (krátce)	°C

2.4 Polyamidy

Polyamidy neboli nylony, jsou to syntetické lineární polymery, charakterizované hlavním polymerním řetězcem, v němž se pravidelně opakují amidové skupiny. Zpravidla se vyrábějí polykondenzací dikarboxylových kyselin a diaminů. Vlastnosti polyamidů závisí na výchozích monomerech a vodíkových vazbách, které jsou vytvářeny mezi amidovými skupinami a ovlivňují krystalickou strukturu, bod tání krystalů i T_g amorfní fáze.

U typických polyamidů se krystalinita pohybuje v rozmezí 30 až 50 %. Jsou tvrdé, houževnaté, odolné vůči oděru a vykazují dobré elektroizolační vlastnosti. Odolávají olejům, tukům a rozpouštědlům. Jako nevýhodu lze považovat jejich značnou navlhavost, která negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti a rozměrovou stálost daného výrobku. K nejpoužívanějším zástupcům patří polyamid 6 (PA 6) a polyamid 66 (PA 66), kde první číslo symbolizuje počet atomů uhlíku v diaminu, druhé v dikarboxylové kyselině. [1], [2], [13]

Polyamidy jsou běžně modifikovány použitím monomerních směsí, které vedou ke vzniku polyamidových kopolymerů. Ty jsou obvykle méně krystalické a pružnější, než homopolymery. Vlákenná a minerální plniva zlepšují tepelnou a fotolytickou stabilitu, usnadňují zpracování, snižují hořlavost, snižují navlhavost a zlepšují kluzné vlastnosti. [13]

2.4.1 Polyamid 6 (PA 6)

Polyamid 6 spadá do skupiny konstrukčních polymerů. Důvodem nejsou pouze vynikající vlastnosti, ale široké možnosti jeho zpracování a lehká modifikovatelnost základního polymeru. Kromě základního typu PA 6 jsou na trhu dostupné i typy se zvýšenou houževnatostí a typy plněné, ať už to skelnými, nebo minerálními plnivými.

PA 6 je mléčně zakalený a se zvyšující se obsahem krystalické fáze, kterou lze ovlivnit například rychlostí chlazení výrobku ve formě a urychlovači krystalizace, jeho světelná propustnost klesá. Propustnost světla se zároveň snižuje i s použitím plniv a modifikátorů. Vlivem vysoké frekvence opakujících se amidových skupin, trpí nemodifikovaný PA 6 velkou absorpcí vody, se kterou souvisí už zmiňovaná rozměrová stálost výrobku. Proto není vhodné používat PA 6 na výrobky, u kterých je požadována vysoká rozměrová stálost. Krátkodobě je možné polyamid 6 vystavit teplotám do 200 °C a dlouhodobě od 80 °C do 150 °C.

Vytlačováním se z PA 6 vyrábějí tyče, desky, fólie, trubky, struny a jiné profily. Vytlačováním se též opláštějí dráty a kabely. Duté předměty, např. barely, se vyrábí vstříkováním. Lze je zpracovat i pomocí rotačního odlévání. Před jakýmkoliv zpracováním je nutné polymer vysušit.

Používá se pro výrobu textilních vláken a jako konstrukční materiál nachází uplatnění při výrobě ozubených kol, ložisek, cívek, vaček, ovládacích elementů, součástek do pump, karburátorů, sacích potrubí pro motorová vozidla, těsnících prvků, ventilátorů apod. [2], [13], [14]

Tab. 8 – Přibližné vlastnosti PA 6 plněného skelným vláknem [22]

Materiál: Polyamid 6 plněný z 33% skelným vláknem			
Morfologie:	Semikrystalický	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1300	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	90	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	5500	MPa
	Smrštění	0,2 ÷ 0,6	%
	Teplota tání T _m	255	°C
	Doporučená teplota taveniny	275 ÷ 305	°C
	Doporučená teplota formy	60 ÷ 95	°C
	Maximální teplota použitelnosti	150 (dlouze) ÷ 200 (krátce)	°C

2.4.2 Polyamid 66 (PA 66)

Jde o nejstarší průmyslově vyráběný syntetický polyamid. Patří do skupiny semikrystalických polymerů s obsahem krystalické fáze asi 50 %. Vlivem krystalického podílu jsou dílce z PA 66 průsvitné, až mléčně zakalené. Tenké vrstvy, např. filmy a fólie nemodifikovaného PA 66 jsou téměř transparentní.

Velkou výhodou je jeho vynikající bariérová schopnost vůči kyslíku a oxidu uhličitému, olejům, lubrikantům a chladicím plynům. Vysoká teplota tání a velmi dobrá tepelná stabilita a odolnost vůči hoření, umožňuje aplikaci při zvýšených teplotách. Krátkodobě lze PA 66 vystavit teplotám do 250 °C a dlouhodobě od 80 °C do 150 °C. Nevýhodou je jeho degradace způsobená UV zářením a relativně nízká odolnost vůči povětrnostním vlivům, což lze z části zlepšit stabilizátory. Oproti PA 6 vykazuje větší pevnost a bod tání. Navlhavost PA 66 oproti PA 6 je menší.

Převážná část produkce PA 66 se zpracovává zvlákněním z kapaliny. Pro konstrukční účely je zpracováván zejména vstřikováním, dále vytlačováním a vyfukováním.

Možnosti použití jsou velice podobné, jako u PA 6. Díky svým bariérovým schopnostem slouží jako vhodný materiál pro výrobu potravinářských fólií. Z PA 66 se dále vyrábí textilní, technické vlákna a součástky, jako jsou například ozubená kola, pastorky, matice, ložiska, těsnění, spojovací součástky, vodící lišty, armatury, kladky, kluzné, tlumící a pružné elementy, olejové a palivové nádrže, kliky, blatníky, závěsy bezpečnostních pásů u automobilů a celá řada dalších výrobků. [2], [13], [14]

Tab. 9 – Přibližné vlastnosti PA 66 plněného skelným vláknem [22]

Materiál: Polyamid 66 plněný z 33% skelným vláknem			
Morfologie:	Semikrystalický	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1380	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	125	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	6200	MPa
	Smrštění	0,2 ÷ 0,6	%
	Teplota tání T _m	255	°C
	Doporučená teplota taveniny	275 ÷ 305	°C
	Doporučená teplota formy	25 ÷ 95	°C
	Maximální teplota použitelnosti	150 (dlouze) ÷ 250 (krátce)	°C

2.4.3 Polyamid 612 (PA 612)

Tento polyamid má při porovnání s PA 66 charakter více polyolefinický a blíží se více HDPE, nežli PA 66. Často bývá modifikován s cílem zlepšení zpracovatelských a aplikačních možností. Vynikající tuhosti i ve vlhkém prostředí lze dosáhnout přidáním sklených vláken nebo grafitu. V případě, že aplikace vyžaduje změkčení polyamidu, lze tento požadavek dosáhnout přísadou částečně oxidovaného nízkomolekulárního polyethylenu.

Při 23 °C a 50 % relativní vlhkosti je nasákavost zhruba o 50 % menší, než u PA 66 a PA 6, což mu zaručuje dobrou rozměrovou stabilitu. Podobně, jako je tomu u PA 66, má i tento typ polyamidu vynikající bariérové schopnosti vůči kyslíku, vodě a uhlovodíkům. T_m se nachází v rozmezí 212 až 217 °C a T_g v rozmezí 40 až 60 °C. Velmi výhodnou vlastností je nízká teplota křehnutí -126 °C. PA 612 odolává mnohým olejům, rozpouštědlům a alkáliím. K nejčastějším způsobům zpracování patří opět vstřikování a vytlačování.

Výjimečná kombinace vlastností, jako je rozměrová stabilita, vysoká tuhost a pevnost při zvýšených teplotách, odolnost vůči oděru či olejům, umožňuje tomuto polymeru široké možnosti použití. V automobilovém průmyslu se používá na výrobu těsnění hadic palivového systému a na povrchovou ochranu vnějších kovových dílů a součástí automobilu proti působení solí. V elektrotechnice se uplatňuje při výrobě transformátorových skříní, konektorů, opláštění vodičů apod. Dále pak při výrobě štětín do zubních kartáčků a významný podíl produkce je využíván v obalové technice na maso a mastné výrobky. [2]

Tab. 10 – Přibližné vlastnosti PA 612 plněného skelným vláknem [22]

Materiál: Polyamid 612 plněný z 33% skelným vláknem			
Morfologie:	Semikrystalický	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1320	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	140	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	6200	MPa
	Smrštění	0,2 ÷ 0,6	%
	Teplota T_g / T_m	40 ÷ 60 / 210	°C
	Doporučená teplota taveniny	210 ÷ 300	°C
	Doporučená teplota formy	25 ÷ 95	°C
	Maximální teplota použitelnosti	95 (dlouze) ÷ 150 (krátce)	°C

2.5 Polymethylmethakrylát (PMMA)

Polymethylmethakrylát, nazývaný v některých případech jako organické sklo nebo plexisklo, je typickým a zároveň nejpoužívanějším zástupcem akrylových polymerů.

PMMA nejvíce charakterizuje jeho čirost a naprostá bezbarvosť i v případě aplikace v tlustých vrstvách. Propustnost světla je kolem 92 % v celém spektru včetně ultrafialové oblasti. Tuto vlastnost spolu s bezbarvosťi si uchovává po dlouhou dobu používání i v náročných klimatických podmínkách. Světelnou propustnost neztrácí ani při vybarvování pomocí transparentních barviv. PMMA vykazuje tvarovou paměť, která se projevuje vrácením vytvarované desky do původního tvaru, po jejím zahřátí na teplotu tvarování nebo vyšší. Dobře odolává zředěným roztokům kyselin, zásad, solí i oxidační atmosféře. Vyznačuje se vysokou hodnotou tvrdosti, pevnosti a vyniká velmi vysokou tuhostí. Vysoká je i kvalita povrchu a odolnost proti poškrábání. Mezi nevýhody PMMA patří jeho křehkost, hořlavost a náchylnost ke korozi za napětím. Teplota T_g je 110 °C a výrobky je možné dlouhodobě používat do teplot 70 °C, krátkodobě snese teploty do 90 °C. Zahřátím na 120 °C měkne a je tvárný. Odolává zředěným kyselinám, nepolárním rozpouštědlům, tukům, olejům, vodě a má dobré elektroizolační a dielektrické vlastnosti.

Zpracování probíhá obvykle vstřikováním a vytlačováním s předsoušením granulátu na 70 až 100 °C v závislosti na molární hmotnosti. PMMA je možné lakovat, povlakovat, pokovovat, svářet a je možné jej snadno mechanicky opracovávat, například pomocí třískového obrábění.

Uplatnění vychází z jeho vynikajících optických vlastností. Z polymethylmethakrylátu se vyrábí různé typy krytů svítidel a displejů. V oblasti automobilového průmyslu se používá při výrobě krytů zadních světel, tachometrů, nebo výstražných trojúhelníků. V optice se uplatňuje při výrobě čoček do přístrojů i brýlí. [1], [2], [4]

Tab. 11 – Přibližné vlastnosti PMMA [22]

Materiál: Polymethylmethakrylát (PMMA)			
Morfologie:	Amorfní	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1170	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	52	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	2600	MPa
	Smrštění	0,3 ÷ 0,6	%
	Teplota skelného přechodu T_g	110	°C
	Doporučená teplota taveniny	210 ÷ 300	°C
	Doporučená teplota formy	60 ÷ 90	°C
	Maximální teplota použitelnosti	70 (dlouze) ÷ 90 (krátce)	°C

2.6 Polyethyltereftalát (PET)

Svou chemickou strukturou se polyethyltereftalát řadí k polyesterům. Rozlišujeme dva základní typy a to polyestery termoplastické, které jsou lineární a polyestery reaktoplastické, které jsou rozvětvené a v průběhu zpracování u nich dochází k síťování. PET patří do skupiny termoplastických polyesterů.

Homopolymer PET je semikrystalický materiál s teplotou tavení okolo 255 °C. Je tvrdý, křehký, mléčně zakalený. Rychlým ochlazením při zpracování lze ale docílit vzniku většího podílu amorfní fáze. Takovýto PET je více houževnatý a zároveň dostatečně tuhý materiál. Má výborné optické vlastnosti a je transparentní. Teplota skelného přechodu je okolo 70 až 80 °C. Výhodnou vlastností je jeho velmi malá propustnost pro plyny, zejména pro kyslík a oxid uhličitý. Teplotní rozsah je vzhledem k nízké T_g omezený. Při vystavení PET nad T_g dochází k jeho samovolné a pozvolné krystalizaci.

Největší komplikací při zpracování PET je náchylnost k hydrolytické degradaci. Při zpracování dochází prakticky vždy k poklesu střední molární hmotnosti vlivem stopové koncentrace vody v polymeru, a protože mechanické vlastnosti PET úzce souvisí s molární hmotností, je nutné před zpracováním polymer dokonale vysušit. K nejběžnějším způsobům zpracování patří vytlačování, vstřikování a pomocí vyfukování jsou vyráběny lahve a duté nádoby. K dosažení lepší tuhosti a pevnosti je možné PET plnit skelnými a uhlíkovými vlákny, ale i kombinací skelných vláken s minerálními plnivými.

Celková roční produkce činí zhruba 50 milionů tun. Největší část se spotřebuje na výrobu vláken, v menším rozsahu na výrobu fólií a lahví. Vlákna se dále zpracovávají na

spotřební textilie, technické tkaniny a lana. Používají se i k oplétání vodičů a jako výztuže pro pneumatiky a dopravní pásy. [1], [2], [13]

Tab. 12 – Přibližné vlastnosti PET plněného skelným vláknem [22]

Materiál: Polyethyltereftalát (PET) plněný z 30 % skelným vláknem			
Morfologie:	Semikrystalický	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1670	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	152	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	1150	MPa
	Smrštění	0,2 ÷ 0,9	%
	Teplota T _g / T _m	70 ÷ 80 / 255	°C
	Doporučená teplota taveniny	265 ÷ 295	°C
	Doporučená teplota formy	65 ÷ 120	°C
	Maximální teplota použitelnosti	130 (dlouze) ÷ 180 (krátce)	°C

2.7 Polykarbonát (PC)

Nemodifikované polykarbonáty jsou amorfní, transparentní polymery s vysokou propustností světla okolo 85% a vysokým povrchovým leskem. Vzhledem k tomu, že mají menší sklon ke krystalizaci, bod tání u těchto polymerů není tak ostrý a na taveninu přecházejí v teplotním rozmezí 220 až 260 °C. Díky této vlastnosti mají velmi dobrou odolnost ke zvýšeným teplotám. Maximální krátkodobá provozní teplota je do 150 °C, dlouhodobě lze polykarbonát vystavit teplotám do 130 °C. Oproti ostatním termoplastům se vyznačují i značnou tepelnou tvarovou stálostí, ke změně tvar dochází až při teplotách nad 170 °C.

Vysoká mechanická pevnost v tahu a rázová i vrubová houževnatost, jsou vlastnosti, kterými PC předčí osvědčené materiály, jakou jsou například polyamidy. Svou vynikající mechanickou odolnost si zachovávají v širokém teplotním rozmezí od -100 do 135 °C. Velkou výhodou PC je vysoká rázová houževnatost i při nízkých teplotách. Malá nasákavost, povětrnostní odolnost a odolnost vůči UV záření zaručují rozměrovou stabilitu výrobku a chemickou stálost i při použití na venkovním prostředí.

Polykarbonáty lze bez potíží zpracovávat vstřikováním, vytlačováním, lisováním a litím. Možné je polykarbonáty zvláknovat na velmi pevná a odolná vlákna. Před zpracováním je nutné granulát vysušovat, protože jakákoliv vlhkost v tavenině způsobuje při zpracování problémy a ve výrobku vznikají bubliny. Vstřikováním se z PC vyrábějí převážně technické díly určené pro větší mechanické a tepelné namáhání. Tyče, trubky, profily a méně

často fólie se z PC vyrábějí vytlačováním. Lisováním se vyrábějí desky do tloušťky až 20 mm. Polykarbonát je možné velmi snadno opracovávat třískovým obráběním.

Spojování se provádí nejčastěji lepením a svařováním pomocí horkého vzduchu. K dalším úpravám patří časté barvení, povrchové potiskování nebo vakuové pokovování.

Uplatnění polykarbonátů je nejčastější v elektrotechnice a optice, kde PC fólie slouží pro výrobu kondenzátorů, membrán do reproduktorů, spojovacích dílců, krytů osvětlovacích těles, akumulátorových nádob, konstrukčních dílů pro fotoaparáty, kamery, blesky, promítací přístroje, dalekohledy apod. V automobilovém průmyslu jsou používány na výrobu světel, pohledových krytů ukazatelů, na kryty svítidel a signálních světel. Jeho průsvitnost v kombinaci s odolností vůči nárazu je využívána při výrobě ochranných štítů, brýlí a přileb. [5], [13], [14]

Tab. 13 – Přibližné vlastnosti PET plněného skelným vláknem [22]

Materiál: Polykarbonát (PC) plněný z 30 % skelným vláknem			
Morfologie:	Amorfní	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1400	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	130	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	5500 ÷ 8500	MPa
	Smrštění	0,15 ÷ 0,6	%
	Teplota T _g / T _m	145 ÷ 150 / 220 ÷ 260	°C
	Doporučená teplota taveniny	220 ÷ 325	°C
	Doporučená teplota formy	80 ÷ 120	°C
	Maximální teplota použitelnosti	130 (dlouze) ÷ 150 (krátce)	°C

2.8 Polyoxymethylén (POM)

Je to nejdůležitější představitel skupiny polyacetalů, známý také pod názvem polyformaldehyd. Zvláštností tohoto polymeru je stavba makromolekul. Zatímco co u většiny ostatních polymerů se v makromolekule střídají kratší nebo delší úseky na sebe navázaných atomů uhlíku, v makromolekule POM se střídají pravidelně methylenové skupiny s atomy kyslíku. Takováto struktura má za následek vysokou krystalinitu v rozmezí 85 až 90 % a zároveň vysokou houževnatost a to i za nízkých teplot do -40 °C.

Polyformaldehydy patří k plastům s největší tuhostí a pevností i v případě, že nejsou nijak plněny nebo vyztužovány. Mimořádná je odolnost vůči oděru, kterou převyšuje většinu termoplastů (kromě polyamidů), ale i některé kovové materiály, jako je například hliník a

měkká ocel. Teplota tání se nachází v rozmezí 175 až 180 °C. Krátkodobě lze POM použít do 120 °C a dlouhodobě do 100 °C. Navlhavost je velmi dobrá, srovnatelná například s PVC. Zmiňovaná vysoká krystalinita zaručuje dobrou odolnost proti tečení za studena a únavě, dobrou houževnatost, ale nižší tažnost.

POM lze zpracovávat podobně jako ostatní termoplasty vstřikováním, vytlačováním a vyfukováním. Při zpracování je nutné uvažovat se smrštěním v rozmezí 1,5 až 2,5 % avšak oproti polyamidům nebo polykarbonátům není nutné předsoušení. Desky a fólie lze tvarovat za tepla i za studena. Fluidním nanášením se dají vytvářet velmi dobré, korozně odolné povlaky. Obrábění je možné pomocí řezání, soustružení, frézování, vrtání apod. Lze jej lakovat, potiskovat a svařovat. Dobrou rázovou houževnatost POM je možné dále zvýšit přidávkou polyuretanových kaučuků. Výsledkem je rázuvzdorný polyoxymethylén.

POM je vhodný na výrobu předmětů, které jsou vystavovány náhlým nárazům, proto se používá například jako klín západky u dveří automobilů, na ozubená kola apod. Využívá se při výrobě ložisek, součástí motorů, krytů, měřících a fotografických přístrojů, čerpadel, zařízení pro hydraulické a mazací systémy, kola dmychadel a dalších součástí, kde se využívá jeho odolnost proti oděru a únavě, tvarová stálost a nízký součinitel tření. [4], [5], [13]

Tab. 14 – Přibližné vlastnosti POM [22]

Materiál: Polyoxymethylén (POM)			
Morfologie:	Amorfní	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1420	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	70	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	2800	MPa
	Smrštění	1,9 ÷ 2,3	%
	Teplota tání T _m	175 ÷ 180	°C
	Doporučená teplota taveniny	190 ÷ 230	°C
	Doporučená teplota formy	60 ÷ 90	°C
	Maximální teplota použitelnosti	100 (dlouho) ÷ 120 (krátce)	°C

2.9 Polyfenylenoxid (PPO)

Polyfenylenoxid je poměrně novým termoplastem a svými vlastnostmi se podobá polyamidům, polykarbonátům a polyacetalům. Na trh byl uveden v roce 1964 pod obchodním názvem PPO, ale často je označován jako polyfenylenether (PPE).

PPO se v první řadě vyznačuje velikou tuhostí, houževnatostí a odolností proti oděru. Těmito vlastnostmi předčí polykarbonáty, polyamidy i ABS. Další výhodnou vlastností, využívanou při konstrukčních účelech, je malá nasákavost vody a malá teplotní roztažnost. S tím souvisí vysoká rozměrová stálost výrobků. Výrazné elektroizolační vlastnosti nejsou ohroženy ani při nasazení v prostředí s kolísající relativní vlhkostí. Výborná je samozhášivost a malý sklon k tečení za studena. Svě vynikající vlastnosti si zachovává v širokém teplotním spektru od -170 do 170 °C. Trvale lze PPO použít do teploty 110 °C a krátkodobě až do 170 °C.

Nevýhodou nemodifikovaného PPO je poměrně obtížné zpracování, protože i při teplotách 300 až 350 °C je viskozita taveniny stále vysoká a hrozí riziko oxidace. Tento základní problém lze vyřešit mechanickým smícháním PPO s jinými polymery, nejčastěji s 30 až 40 % polystyrenu, čímž vzniká levnější, amorfnní termoplast vhodný pro vstřikování, vytlačování a vyfukování. Smícháním PPO s PS zůstává většina vlastností čistého PPO zachována, pouze tepelná odolnost klesne zhruba o 30 °C. Modifikací se navíc zvýší odolnost proti oxidačnímu stárnutí a odolnost proti korozi za napětí. Pro zvýšení tuhosti se vyrábějí i plněné typy pomocí skelných vláken. Na trhu jsou také dostupné samozhášivé a nehořlavé typy.

Samotný charakter PPO předurčuje jeho využití při výrobě speciálních součástí pro náročné technické a konstrukční aplikace. Používá se při výrobě součástí pro jemnou mechaniku, elektrotechniku, dále při výrobě čerpadel, filtrů, ventilů, praček a mycích linek. Široké využití nachází také v automobilovém průmyslu. [5], [15], [16]

Tab. 15 – Přibližné vlastnosti PPO plněného skelným vláknem [22]

Materiál: Polyfenylenoxid (PPO) plněný z 30 % skelným vláknem			
Morfologie:	Amorfnní	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1250	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	100	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	7600	MPa
	Smrštění	0,2 ÷ 0,6	%
	Teplota T _g / T _m	205 / 270	°C
	Doporučená teplota taveniny	280 ÷ 315	°C
	Doporučená teplota formy	70 - 105	°C
	Maximální teplota použitelnosti	110 (krátka) ÷ 170 (dlouho)	°C

2.10 Polytetrafluorethylen (PTFE)

Tento polymer patří k tzv. fluoroplastům. PTFE, známý pod obchodní značkou Teflon, má podobu šedobílého prášku voskovitého charakteru. Známý je i ve formě vodné disperze s obsahem sušiny od 30 do 60 %.

Vynikající chemická odolnost a tepelná stálost polytetrafluorethylenu je dána vysoce symetrickou a lineární strukturou makromolekuly, obsahující atomy fluoru. Symetrie lineárního řetězce makromolekuly PTFE ovlivňuje krystalinitu tohoto polymeru, která je v rozmezí 93 až 97 %. K narušení krystalické struktury dochází při teplotě 327 °C. Při této teplotě se polymer stává amorfním a nabývá vlastností typických pro tvrdé pryže. Použití je vymezeno teplotním rozsahem od -270 do 260 °C. V tomto rozmezí se téměř nemění jeho vysoká rázová odolnost. K rozkladu polymeru dochází až při teplotách okolo 400 °C za vzniku pro člověka jedovatých produktů. Je velmi ohebný a pevností je srovnatelný s PE. Charakteristickou a ceněnou vlastností tohoto polymeru je malý součinitel tření. Ten je menší, než například u grafitu.

Zpracování PTFE je velmi obtížné. Hlavním důvodem je vysoká viskozita polymeru i při teplotách okolo 320 °C a blízkost bodu rozpadu k této teplotě. Pro výrobu menších součástí a dílů se z tohoto důvodu používají technologické metody zpracování, podobné z technologie práškové metalurgie, jako je slinování nebo sintrování. Prášek PTFE je nasypan do formy a za studena slisován za působení tlaku od 20 do 100 MPa. Výlisek je následně zahříván v sušárně na teploty 360 až 380 °C. Pomocí speciálních vytlačovacích strojů lze zpracovávat PTFE vytlačováním na trubky, tyče a různé profily. Šnek dopravuje a práškový polymer, který je ve speciální hubici zahříván na teplotu okolo 380 °C a za působení tření a tlaku sline. Oproti klasickým vytlačovacím strojům na běžné termoplasty je ale výkon takového zařízení podstatně menší.

PTFE se používá na výrobu těsnění, ucpávek, pístních kroužků, hadic, armatur, na izolaci vodičů, izolačních fólií, při výrobě tištěných spojů, kluzných elementů a jako povlakový materiál nejrůznějších povrchů. V domácnostech je často používán na pánvice, hrnce apod. [5], [13], [14]

Tab. 16 – Přibližné vlastnosti PTFE [22]

Materiál: Polytetrafluorethylen (PTFE)			
Morfologie:	Semikrystalický	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	2130 ÷ 2200	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	24 ÷ 31	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	400	MPa
	Koeficient součinitele tření	0,02	-
	Teplota T _g / T _m	130 / 340	°C
	Teplota zpracování	365 ÷ 380	°C
	Maximální teplota použitelnosti	260	°C

2.11 Polyetereterketon (PEEK)

Polyetereterketon spadá do skupiny aromatických lineárních semikrystalických polymerů. Vyznačují se velmi dobrými mechanickými vlastnostmi spolu s vynikající tepelnou a chemickou odolností. Kombinace těchto vlastností ho řadí do konstrukčních materiálů pro speciální aplikace.

Neplněný PEEK má šedou, až nahnědlou barvu. Kromě vysoké mechanické pevnosti, tuhosti a otěruvzdornosti má oproti ostatním polymerům vynikající odolnost vůči gama záření. Je odolný vůči většině organických i anorganických tekutin a chemická odolnost je srovnatelná s fluoropolymerem. Výborně odolává hydrolýze i při působení přehřáté vodní páry. Výborná je i tvarová stálost spolu s elektroizolačními vlastnostmi. Je téměř nehořlavý a to i bez přidaných retardérů hoření. Biologická snášenlivost je taktéž bezproblémová. Teplota tání u tohoto polymeru je 340 °C a teplota skelného přechodu je 145 °C. Krátkodobě lze PEEK vystavit teplotám okolo 260 °C. Dlouhodobě snáší teploty do 250 °C.

PEEK lze zpracovávat vstřikováním i vytlačováním za podmínky, že vstřikovací respektive vytlačovací stroj je konstruovaný na pracovní teploty pohybující se do 450 °C.

Polyetereterketon je dostupný ve formě prášku i granulátu. Širší možnosti aplikace nabízí kompozitní materiály na bázi PEEK s přídavkem až 30 % skelných, nebo uhlíkových vláken.

Je vhodný pro výrobky vystavené velké teplotě, radiaci nebo agresivním chemikáliím. Využívá se zejména v letectví a ve vojenské technice na výrobu ventilových sedel, palivových ventilů, oběžných kol čerpadel, ložiskových klecí, apod. Využití nachází ve speciálních aplikacích v elektrotechnice a automobilovém průmyslu. Díky výborné biologické snášenlivosti slouží vysoce čistý PEEK v medicíně při výrobě implantátů. [14], [15], [16]

Tab. 17 – Přibližné vlastnosti PEEK [22]

Materiál: Polyetereterketon (PEEK)			
Morfologie:	Semikrystalický	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1300 ÷ 1600	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	90 ÷ 270	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	10000	MPa
	Smrštění	1 ÷ 1,8	%
	Teplota Tg / Tm	145 / 340	°C
	Doporučená teplota taveniny	350 ÷ 420	°C
	Doporučená teplota formy	120 ÷ 220	°C
	Maximální teplota použitelnosti	250 (dlouho) ÷ 260 (krátce)	°C

2.12 Polyimidy (PI)

Podobně jako polyfenylenoxid, i polyimidy patří k poměrně nově vyvinutým, perspektivním polymerům. Základem jsou imidové skupiny, které tyto polymery obsahují. Polyimidy mohou být jak termoplastického, tak i reaktoplastického typu.

Charakteristickou vlastností PI je mimořádná odolnost vůči vysokým teplotám a účinkům beta a gama záření. Vynikající jsou ale i mechanické vlastnosti, ke kterým patří zejména vysoká pevnost v tahu, modul pružnosti ale i vysoká houževnatost a odolnosti vůči oděru. Mají výborné elektroizolační vlastnosti, které si spolu s mechanickými vlastnostmi dlouhodobě uchovávají ve velmi širokém teplotním spektru od -170 až do 400 °C. Krátkodobě tyto polymery odolávají teplotám okolo 480 °C. Tenké filmy z PI lze použít do 370 °C, technické díly a součásti pak snášejí dlouhodobě teploty do 260 °C na vzduchu a až 315 °C v inertní atmosféře. Polyamidy taktéž vykazují odolnost vůči studenému toku, rozpouštědům a jsou odolné vůči nasákavosti. Taktéž mají dobré kluzné vlastnosti a jsou nehořlavé.

Vzhledem k vysoké teplotě skleného přechodu, která se u polyimidů nachází okolo 400 °C, je zpracování poměrně technologicky a energeticky náročné. Nejčastěji jsou polyimidy zpracovávány do práškové podoby a následně do tenkých fólií a filmů. Zajímavostí je, že netají. Dochází pouze k určitému slinování, pomocí kterého je možné za vysokých teplot (až 800 °C) a vysokých tlaků připravit výlisky a polotovary.

Široký souhrn vynikajících vlastností, ale i obtížné zpracování a vysoká cena, předurčuje tyto polymery ke špičkovým aplikacím v odvětvích, jako je kosmonautika a letecký

průmysl. Využívány jsou také pro speciální aplikace v automobilovém průmyslu a v elektrotechnice. [4], [13], [14], [15]

Tab. 18 – Přibližné vlastnosti PI [22]

Materiál:		Název	
Morfologie	Amorfní	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1430	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	170 ÷ 230	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	2500 ÷ 3000	MPa
	Smrštění	0,17 ÷ 1,25	%
	Teplota skelného přechodu T_g	360 ÷ 410	°C
	Teplota zpracování	365 ÷ 800	°C
	Maximální teplota použitelnosti	315 (dlouze) ÷ 480 (krátce)	°C

2.13 Polyfenylsulfid (PPS)

Polyfenylsulfidy jsou tvořeny alternujícími aromatickými jádry a atomy síry. Jsou to semikrystalické termoplasty, spadající do skupiny speciálních, vysoce účinných polymerů. Existují jak lineární, tak rozvětvené typy. Díky vynikající kombinaci vlastností je PPS využíván jako konstrukční materiál.

Typickou vlastností polyfenylsulfidu je výjimečná odolnost vůči chemikáliím, zejména vůči rozpouštědlům. V organických rozpouštědlech není prakticky rozpustný vůbec a to až do teplot okolo 200 °C. Za vysokých teplot podléhá pouze některým minerálním kyselinám a silným oxidačním činidlům. Vzhledem k chemické struktuře, lze PPS spálit. Pokud však není vystaven dlouhodobému působení ohně, je nehořlavý. Teplota T_g je 85 °C a teplota T_m se nachází okolo 280 °C. Krátkodobě jej lze použít při aplikacích, kde teplota přesahuje 250 °C. Dlouhodobě snáší teploty do 230 °C. Polyfenylsulfidy jsou pevné a vykazují vysokou rozměrovou stálost. Výhodou je i malý sklon ke studenému toku a zároveň velmi nízká viskozita taveniny. Lze jej sterilizovat horkou vodou, nebo parou a je zdravotně nezávadný. Nevýhodou je jeho křehkost a malá rázová houževnatost. Nestabilizovaný PPS podléhá UV záření. Tyto nevýhody je ale možné podstatě zlepšit modifikátory.

PPS je možné zpracovávat běžnými technologiemi používanými při zpracování plastů, mezi které patří vstřikování, vytlačování a lisování. Vzhledem k nízké viskozitě taveniny jsou polyfenylsulfidy velice často modifikovány plnivý, nebo vyztužujícími materiály. Pomocí technologie vstřikování lze vytvářet i tenkostěnné výrobky.

Hlavní oblasti použití jsou strojírenství, elektrotechnika, letectví, astronautika, automobilový průmysl a armádní technika. Používá se rovněž pro výrobu ozubených kol, kluzných ložisek, pouzder a těles čerpadel. [13], [14], [15], [16]

Tab. 19 – Přibližné vlastnosti PPS plněného skelným vláknem [22]

Materiál: Polyfenylsulfid (PPS) plněný z 30% skelným vláknem			
Morfologie:	Semikrystalický	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1380	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	150	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	11700	MPa
	Smrštění	0,6 ÷ 3,5	%
	Teplota T _g / T _m	85 / 280	°C
	Doporučená teplota taveniny	315 ÷ 380	°C
	Doporučená teplota formy	135 ÷ 160	°C
	Maximální teplota použitelnosti	230 (dlouze) ÷ 250 (krátce)	°C

2.14 Polysulfon (PSU)

Polysulfony jsou polykondenzáty, obsahující v řetězci pro ně charakteristické arylsulfonové skupiny. Na rozdíl od polyfenylsulfidů jsou amorfním materiálem s jantarovou transparentí. Svými vlastnostmi spadá podobně jako PPS do skupiny speciálních polymerů.

V případě, že není nijak modifikován, vykazuje PSU velký stupeň transparentnosti. Má mimořádně velkou teplotní odolnost, vysokou tuhost, pevnost a rozměrovou stálost, avšak je poměrně náchylný k lomu a málo odolný vůči oděru. Teplota skelného přechodu leží na hranici 190 °C. Dlouhodobě je možné polysulfon provozovat při teplotách do 160 °C. K výhodám tohoto plastu patří i jeho samozhášivost. Dobré jsou i kluzné vlastnosti, které lze dále zlepšit přidáním PTFE, nebo grafitu. PSU dobře odolává chemikáliím, nicméně je náchylný na polární rozpouštědla. Při venkovním použití je nutné PSU chránit proti UV záření přidáním přírodních stabilizátorů. Odolává hydrolyze, horkým parám a je zdravotně nezávadný.

K nejpoužívanějším způsobům zpracování patří opět vstřikování a vytlačování. V případě potřeby je možné PSU plnit skelnými vlákny za zlepšení pevnosti a tuhosti. Přidáním minerálních plniv je možné zlepšit náchylnost k lomu a zvýšit odolnost vůči tepelné deformaci.

Oblasti použití pro PSU jsou výroba přístrojů, nástrojů, laboratorních zařízení, lékařské techniky a zařízení pro potravinářský průmysl. Příklady použití jsou čerpadla, filtrační rámy, filtrační desky, součásti počítačů, kryty baterií, lékařské nástroje, ukazatele stavu oleje, elektronické součásti a sterilizované součásti v technice potravinářského průmyslu. [13], [14]

Tab. 20 – Přibližné vlastnosti PSU plněného skelným vláknem [22]

Materiál: Polysulfon (PSU) plněný z 30% skelným vláknem			
Morfologie:	Amorfní	Hodnota	Jednotka
Vlastnost:	Hustota	1460	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	100	MPa
	Modul pružnosti v tahu (23 °C)	9300	MPa
	Smrštění	0,5 ÷ 0,8	%
	Teplota skelného přechodu T _g	190	°C
	Doporučená teplota taveniny	315 ÷ 380	°C
	Doporučená teplota formy	95 ÷ 180	°C
	Maximální teplota použitelnosti	160 (dlouze) ÷ 175 (krátce)	°C

2.15 Termoplastické elastomery (TPE)

TPE je obecným názvem pro termoplastický elastomer, nazývaný také jako termoplastický kaučuk, který kombinuje vlastnosti termoplastů a pryže. Jsou to materiály s charakteristickými vlastnostmi pryže, ale zpracovatelností termoplastů. Vlastnosti TPE ovlivňuje zejména chemická struktura a morfologie základní matrice. Velkou výhodou oproti elastomerům jsou jejich možnosti recyklace.

Většina termoplastických elastomerů jsou v podstatě fázově oddělné systémy. Jedna fáze (termoplast) je za okolní teploty tuhá a tvrdá, zatímco druhá fáze (elastomer) je pružná a houževnatá. Často jsou fáze spojeny blokovou, nebo štěpnou polymerací. Tuhá fáze propůjčuje pevnost a fyzicky představuje příčné vazby. Bez tvrdé fáze by elastomerní fáze nemohla téci a takovýto polymer by byl prakticky nepoužitelný. Na druhou stranu elastomerní fáze poskytuje flexibilitu a elasticitu celkového systému. Při roztavení, nebo rozpuštění tuhé fáze, materiál může téci a tím pádem může být zpracováván pomocí obvyklých zpracovávateľských metod. Po ochladnutí, nebo odpaření rozpouštědla pevná fáze ztuhne a materiál získá zpět svou pružnost a pevnost. [13], [14], [17]

2.15.1 Termoplastické polyuretany (TPU)

Termoplastické polyuretanové elastomery byly prvními homogenními materiály, které šlo zpracovávat běžnými technologiemi pro zpracování termoplastů. Jejich rychlý růst zapříčil rozvoj dalších typů termoplastických polymerů.

TPU lze dále rozdělit na polyesterové a polyetherové typy. TPU na bázi polyesteru mají všeobecně lepší fyzikální vlastnosti, jako je termooxidační stabilita a odolnost vůči olejům, zatímco TPU na bázi polyetheru vykazují lepší hydrolytickou stabilitu a odolnost vůči mikrobiálnímu napadání. Termoplastické polyuretany jsou v praxi známé pro svou transparentnost, vynikající odolnost vůči oděru a pružnost a to i za nízkých teplot. Odolávají tukům, olejům a rozpouštědlům. V závislosti na struktuře se rozpadají při 200 až 250 °C. Dlouhodobě je však lze používat pouze při teplotách od -40 do 80 °C. Krátkodobě lze TPU vystavit i teplotám do 120 °C. Při vystavení slunečnímu záření ztrácí řadu svých mechanických a optických vlastností, což lze zlepšit použitím UV stabilizátorů. Hydrofilní charakter nemodifikovaného TPU brání použití při aplikacích, kde je vyžadován trvalý izolační odpor vůči elektrickému napětí. Často slouží jako modifikátor jiných termoplastů. Využívá se například k zlepšení modulu pružnosti v ohybu u termoplastů PVC, ABS a dalších.

Snadnost zpracování je jednou z hlavních výhod TPU. Termoplastické polyuretany lze vstříkovat, vytlačovat, odlévat a válcovat. Před zpracováním je nutné sušení. Lze jej sterilizovat, svařovat, vybarvovat a potiskovat. Přidáním skelných vláken a dalších plniv je možné mechanické vlastnosti TPU dále zlepšovat.

Oblasti možného použití TPU jsou velice široké. Termoplastický polyuretan jsou schopny zastoupit jak tvrdé pryže, tak klasické termoplastické materiály. V automobilovém průmyslu slouží jako zvukotěsná izolace, při výrobě bezpečnostních pásů, krytek, záslepek, řemenů, palubních desek, kloubových těsnění, výplní dveří apod. TPU je nepostradatelným materiálem v dnešním obuvnickém průmyslu, při výrobě sportovního vybavení a oblečení. Uplatnění nachází také ve zdravotnictví, letectví a celé řadě dalších odvětvích. [13], [14], [17]

Tab. 21 – Přibližné vlastnosti tvrdého TPU [22]

Materiál: Termoplastický polyuretan (TPU) - tvrdý			
	Vlastnost	Hodnota	Jednotka
	Hustota	1120 ÷ 1210	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	35 ÷ 80	MPa
	Poměrné prodloužení při přetržení	160 ÷ 450	%
	Smrštění	0,6 ÷ 0,85	%
	Teplota skelného přechodu T _g	160	°C
	Doporučená teplota taveniny	200 ÷ 230	°C
	Doporučená teplota formy	65	°C
	Maximální teplota použitelnosti	80 (dlouze) ÷ 120 (krátce)	°C

2.15.2 Termoplastické olefiny (TPO)

TPO je dalším zástupcem termoplastických elastomerů. Termoplastické olefiny jsou založeny primárně na kopolymeru ethylenu s propylenem (EPM, etylen-propylenový kaučuk) a izostatickým polypropylenem (iPP), reprezentující důležitou oblast konstrukčních materiálů.

Vlastnosti jsou velice komplexní a jsou dány velikostí, tvarem a distribucí, jak kaučukových, tak polyolefinických složek. Svými vlastnostmi překlenují prospat mezi měkkými pryžemi a konstrukčními plasty. V závislosti na potřebách budoucí aplikace, jsme schopni vytvořit termoplastické olefiny, které mají modul pružnosti od 7 až do 1700 MPa. Specifická kombinace vlastností, jako je například tvrdost, pevnost v ohybu, pevnost v tahu atd. se u jednotlivých typů velmi liší. Teplotní použitelnost ovlivňují zejména částice PP. Běžný homopolymer PP taje při 160 °C. Z tohoto důvodu je možné termoplastické olefiny krátkodobě vystavit teplotám zhruba do 140 °C. Nejlepší, stabilizované typy TPO odolávají dlouhodobému působení teplot do 105 až 125 °C. Komerční typy vykazují tvrdost nejčastěji od 60 Shore A do 70 Shore D. Většina termoplastických polyolefinů nepodléhá dlouhodobému používání na venkovním prostředí a mechanické vlastnosti zůstávají zachovány, avšak při vystavení slunečnímu svitu může dojít k vyblednutí, což lze opět zlepšit přidáním patřičných stabilizátorů. Všechny typy TPO odolávají vodě, vodným roztokům chemikálií, kyselinám a zásadám. Neabsorbují vlhkost a je tedy možné použít TPO jako izolační materiál.

Jsou velmi dobře zpracovatelné metodami známými pro zpracování termoplastů a nevyžadují žádné speciální zpracovatelské a tvářecí stroje. Kromě toho je lze podobně jako TPU válcovat. Vzhledem k už zmíněné nenavlhavosti, není nutné termoplastické olefiny

před samotným zpracováním předsoušet, což je oproti TPU jistou výhodou. K obarvení vstříkovaných výrobků je nutné povrch výrobku upravit za cílem zvýšení adheze a tvorby polárních skupin, z důvodu lepší přilnavosti barvy. Toho je možné docílit například plazmovou úpravou povrchu, nebo povrchovou úpravou pomocí plamene.

Většina vyprodukovaného množství TPO je používána v automobilovém průmyslu, například na vnější díly automobilu, které mají za úkol pohltit drobnější nárazy. Konkrétním příkladem mohou být kryty nárazníků, boční lišty, mřížky apod. V motorové části je TPO využíván na vzduchové kanály topení, potrubí, opláštění kabelů atd. Aplikace v interiéru zahrnují kryty airbagů, díly přístrojových desek, dveřní výplně a další díly. Kromě automobilového průmyslu se uplatňuje také v elektrotechnice při opláštění vodičů, při výrobě elektrických zařízení do domácností a v dalších odvětvích. [13], [14], [17]

Tab. 22 – Přibližné vlastnosti tvrdého TPO [22]

Materiál: Termoplastické olefiny (TPO) - tvrdé			
	Vlastnost	Hodnota	Jednotka
	Hustota	880 ÷ 980	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	28	MPa
	Poměrné prodloužení při přetržení	20	%
	Smrštění	0,7 ÷ 2,1	%
	Teplota tání T _m	165	°C
	Doporučená teplota taveniny	260	°C
	Doporučená teplota formy	65	°C
	Maximální teplota použitelnosti	105 (dlouze) ÷ 140 (krátce)	°C

2.15.3 Styrenový blokový kopolymer (SBS)

Styrenový blokový kopolymer je v podstatě tvořen jednoduchými molekulami typu S-B-S, kde je S je označení pro styren a B pro elastomerní segment. Elastomerním segmentem je nejčastěji myšlen butadien, nebo isopren. Materiály s takovou strukturou tvoří dva rozdělené, fázové systémy, které jsou při porovnání s příslušným statickým kopolymerem velice rozdílné a udržují si každý své vlastnosti, včetně dvou rozdílných teplot skelného přechodu, na rozdíl od kopolymeru, který má teplotu skelného přechodu pouze jednu.

Teplota skelného přechodu pro měkkou fázi je u většiny SBS -90 °C a teplota skelného přechodu pro tvrdou fázi je 95 °C. Dlouhodobé použití je možné pouze do teplot okolo 45 až 60 °C. Ve srovnání s TPO a TPU mají podstatně nižší pevnost v tahu. Vyráběny jsou

v širokém rozsahu tvrdostí od 35 Shore A po 70 Shore D. Svou flexibilitou, měkkostí a poddajností připomínají pryže. Vynikající je také koeficient tření spolu s elektrickými vlastnostmi. Podléhají oxidaci a v některých případech i slunečnímu záření. Při venkovním použití je tedy nutná jejich stabilizace.

Nejčastěji slouží jako adheziva, těsnící materiály a povlaky. V mnohých aplikacích zastupují pryže. Mezi další oblasti použití patří obuvnický, gumárenský, stavební a lékařský průmysl. V neposlední řadě slouží nejen jako modifikátor dalších typů polymerů, ale i asfaltů a sportovních ploch. V elektrotechnice našel uplatnění v podobě izolačního materiálu vodičů. [13], [14], [17]

Tab. 23 – Přibližné vlastnosti tvrdého SBS [22]

Materiál: Termoplastické polyuretany (SBS) - tvrdý			
	Vlastnost	Hodnota	Jednotka
	Hustota	900 ÷ 1280	kg·m ³
	Pevnost v tahu (23 °C)	25	MPa
	Poměrné prodloužení při přetržení	250	%
	Smrštění	0,3 ÷ 0,6	%
	Teplota tání T _m	165	°C
	Doporučená teplota taveniny	225	°C
	Doporučená teplota formy	35	°C
	Maximální teplota použitelnosti	45 (dlouze) ÷ 60 (krátce)	°C

3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu je možné podle účelu a způsobu zkoušení rozdělit do tří základních skupin:

a) Mechanické vlastnosti zjišťované krátkodobým působením statické síly nebo statického napětí. Při tomto typu zkoušky se zjišťuje chování zkoušeného materiálu za konkrétních podmínek napětí, deformace, teploty a času. Podle účelu zkoušky se tyto podmínky mohou měnit v širokém rozmezí, s výjimkou doby trvání zkoušky, která je neměnná, nebo jen v mezích, které neovlivňují zjišťovanou hodnotu. Krátkodobé zkoušky jsou používány zejména k rychlé kontrole jakosti. V případě krátkodobých zkoušek je dobrá reprodukovatelnost výsledků přednější, než jejich širší použitelnost pro praxi.

b) Mechanické vlastnosti zjišťované dlouhodobým působením statické síly nebo statického napětí. Chování materiálu se při srovnání s krátkodobými zkouškami zjišťuje v podstatně delším časovém úseku. Zjišťují se závislosti zkoušených hodnot na čase. Podmínky zkoušky, jako je teplota, napětí, případně vlhkost, se mohou měnit v širokém rozmezí podle účelu zkoušky. Tímto typem zkoušek jsou zjišťovány inženýrské vlastnosti, jejichž znalost podmiňuje správnou aplikaci materiálů.

c) Mechanické vlastnosti zjišťované cyklicky nebo acyklicky měnícím se napětím. Cílem je zjistit únavu materiálu za určitých podmínek časově proměnného namáhání, konstantní teploty, případně vlhkosti. Doba zkoušky je buď předepsána, nebo probíhá do doby, kdy je zkoušený materiál porušen. [18]

3.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška je jednou z prvních zkoušek, které se provádí k vyhodnocení pevnosti jakýchkoliv materiálů. Podstata zkoušky spočívá v namáhání zkušebního tělíska tahem za stanovené rychlosti deformace. Cílem je určit charakteristické mechanické vlastnosti materiálu, mezi které patří mez pevnosti v tahu, mez kluzu v tahu, napětí při smluvní mezi kluzu, poměrné prodloužení a další vlastnosti.

Za předpokladu, že zkoušený materiál je izotropní, je napětí v tahu rozloženo po celém průřezu zkušebního tělesa rovnoměrně. V praxi však takovýto stav neexistuje. Díky anizotropii zkoušeného materiálu se vlastnosti v různých místech liší, takže napětí v tahu je rozloženo po průřezu nerovnoměrně, což má za následek vznik smykových napětí.

Jelikož se průřez zkušebního tělesa při tahové zkoušce neustále mění, je zjišťování skutečného napětí technicky obtížné. Z toho důvodu se v praxi stanovuje tzv. smluvní napětí, což je síla vztažená na počáteční průřez zkušebního tělesa. Tento způsob vyjadřování je užíván při zkoušení kovů a odtud byl převzat i pro další materiály, včetně polymerů. Prodlužováním zkušebního tělesa se mění i průřez, který se následkem toho zužuje. Poměr mezi relativní změnou průřezu a relativní změnou délky vyjadřuje Poissonovo číslo. Výsledkem tahové zkoušky je pracovní diagram, což je grafické znázornění závislosti napětí na poměrném prodloužení zkušebního vzorku. [5], [18]

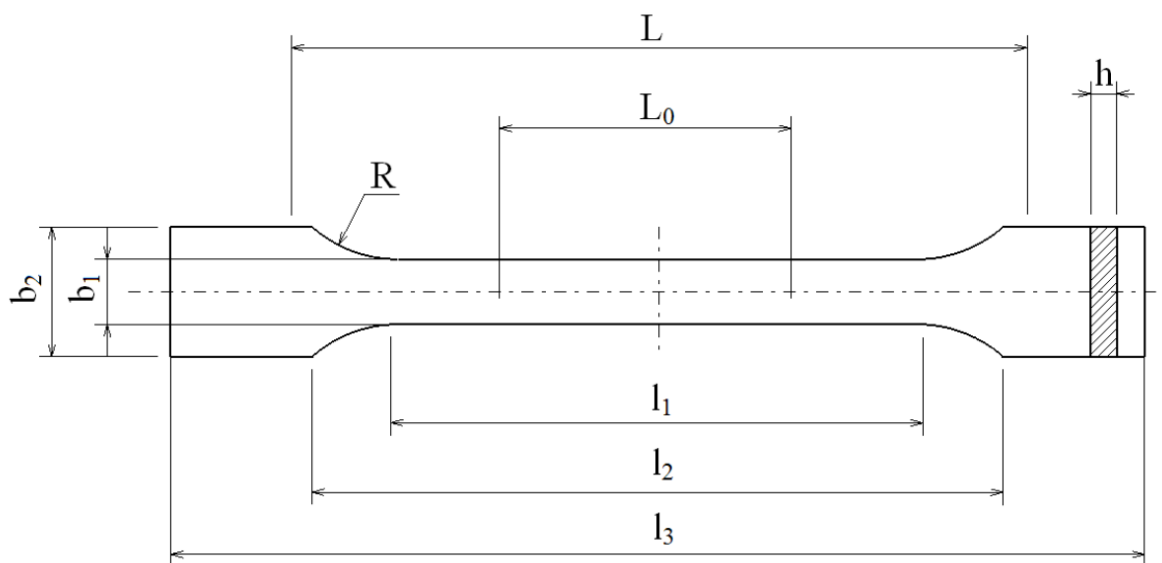
3.1.1 Zkušební tělíska

Polymery určené k mechanickým zkouškám je nutné nejprve uvést do vhodného tvaru, tzn. vyrobít z nich zkušební tělíska. Rozměry zkušebních tělísek přikazují příslušné normy. V případě tahové zkoušky jsou rozměry zkušebních tělísek dány normou ČSN EN ISO 527. Rozměry se liší dle druhu zkušebních režimů.

Podle způsobu výroby lze zkušební tělíska rozdělit na tyto druhy:

a) Tělíska přímo získaná ze zkoušených polymerů pomocí vstřikováním, lisování, vulkanizací, nebo vytvrzováním v příslušných formách s tvarem zkušebního tělíska nebo vzorku, ze kterého je možné zkušební tělísko vysekat.

b) Tělíska připravená vysekáním, vyřezáním nebo obráběním z hotových výrobků nebo polotovarů. [5]



Obr. 7 – Rozměry zkušebního tělesa pro zkoušku tahem [19]

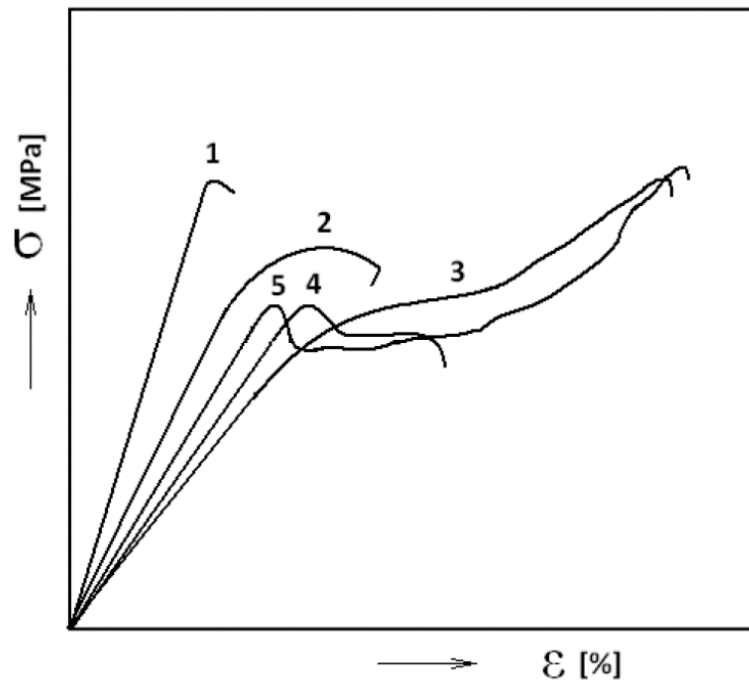
Tab. 24 – Rozměry zkušebního tělesa pro zkoušku tahem [19]

Rozměry zkušebního tělesa [mm]			
	Rozměr	Typ 1A	Typ 2B
b_1	Šířka pracovní části	$10 \pm 0,2$	
b_2	Šířka upínací části	$20 \pm 0,2$	
l_1	Délka pracovní části	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
l_2	Vzdálenost mezi širokými částmi	$104 \div 113$	$106 \div 120$
l_3	Celková vzdálenost	≥ 150	
l_0	Počáteční měřená délka	$50 \pm 0,5$	
L	Vzdálenost čelistí na počátku	115 ± 1	$l_{20}^{+0,5}$
h	Tloušťka tělíska	$4 \pm 0,2$	
R	Poloměr	$20 \div 25$	≥ 60

3.1.2 Pracovní diagram

Pracovní diagram, znázorňující závislost napětí σ na poměrném prodloužení měřeného zkušebního tělíska $\Delta l = l - l_0$, je rozdílný pro každý materiál. Pracovní diagram je možné rozdělit mezi pět typů, které jsou uvedené na obrázku 8 níže.

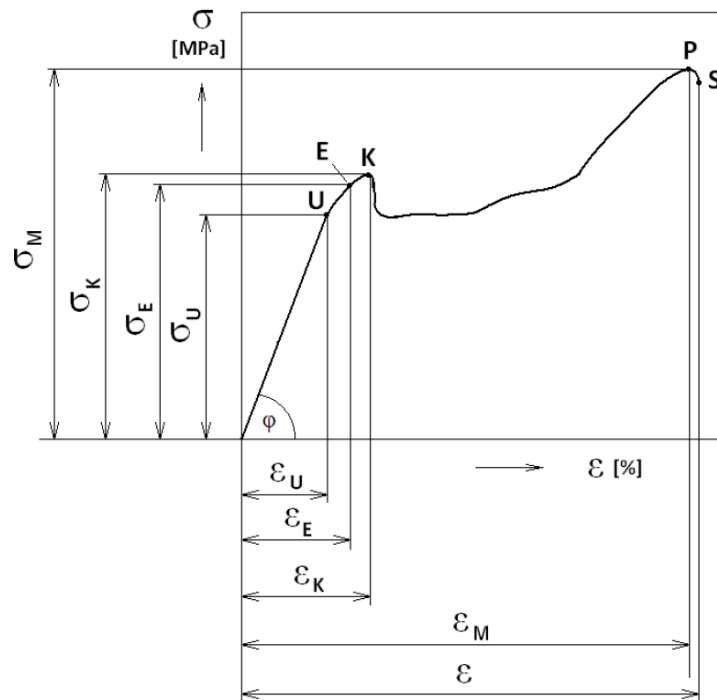
Typ 1 zahrnuje polymery s malou průtažností, jako jsou reaktoplasty, polystyreny, polymetakryláty apod. Typ 2 charakterizuje houževnatější materiály. Zkušební těleso se přetrhne ihned po překročení meze úměrnosti. Příkladem takového materiálu může být například neměkčený polyvinylchlorid. Typ 3 je charakteristický dlouhým prodloužením, bez výrazné meze kluzu. Sem patří například měkčený polyvinylchlorid. Typ 4 se vyznačuje horní a dolní mezí kluzu. Ten je typický pro polyethylen a polypropylen. Typ 5 má obdobný začátek průběhu jako typ 4, po kterém následuje průběh podobný typu 3. Takovéto chování vykazují materiály, jejichž mechanické vlastnosti se zlepšují prodloužením, například polyamidy. [18]



Obr. 8 – Typy pracovních diagramů plastických hmot [18], [19]

1 – křehká, 2 – houževnatější, 3 – houževnatá s velkým prodloužením, 4 – vyznačující se s horní a dolní mezí kluzu, ale malou tažností, 5 – s horní a dolní mezí kluzu a velkou tažností

Na křivce pracovního diagramu se nachází rovněž několik podstatných bodů. Prvním bod se značí U – mez úměrnosti σ_U , následuje bod E – mez pružnosti σ_E , dále bod K – mez kluzu neboli průtažnosti σ_K , předposlední je bod P – mez pevnosti σ_M neboli pevnost v tahu a poslední bod S – napětí při přetržení. K jednotlivým bodům odpovídají hodnoty tažnosti ε_U , ε_E , ε_K , ε_M . Jednotlivé body jsou popsány níže na obr. 9. [18]



Obr. 9 – Popis pracovního diagramu tahové zkoušky [18], [19]

3.1.2.1 Mez úměrnosti

Mez úměrnosti je mezním napětím v tahu, u kterého platí úměrnost mezi napětím a celkovou deformací. V této oblasti platí Hookův zákon: [18]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

kde σ je napětí v tahu, E je modul pružnosti neboli Youngův modul a ε je poměrné prodloužení $\frac{\Delta l}{l_0}$. [18]

3.1.2.2 Mez pružnosti

Po překročení meze úměrnosti vzrůstá deformace zkušebního tělesa neúměrně s napětím. Pokud přestane napětí působit, deformace okamžitě zcela nevymizí. Po okamžitém vymizení ideálně elastické deformace nadále zůstává deformace viskoelastická, jejíž vymizení je závislé na čase. Pokud napětí působí delší dobu, dochází k částečné plastické deformaci, dokonale nevratné. Největší napětí, při jehož odstranění prakticky zcela mizí deformace měřného zkušebního tělesa, se nazývá mez pružnosti a značí se σ_E . [18]

$$\sigma_E = \frac{F_E}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

kde σ_E je mez pružnosti, F_E je síla na mezi pružnosti a S_0 je počáteční průřez zkušebního tělesa.

3.1.2.3 Mez kluzu

Budeme-li zvyšovat napětí nad mez úměrnosti, hodnota modulu pružnosti klesá. I při malém zvýšení hodnoty, nebo úplném zastavení růstu napětí se prodloužení stále více zvětšuje. Mez kluzu σ_K je nejmenším napětím, při kterém nastávají podstatné trvalé deformace. Tento úsek se u materiálů s malou tažností vůbec neobjeví, nebo je shodný s mezí pevnosti. Proto se např. u neměkčeného PVC, reaktoplastů apod. zjišťuje smluvní mez kluzu. [18]

$$\sigma_K = \frac{F_K}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

kde σ_K je mez kluzu, F_K je síla na mezi kluzu a S_0 je počáteční průřez zkušebního tělesa.

3.1.2.4 Mez pevnosti v tahu

Při dalším zvětšení napětí nad mez kluzu, dochází k přetržení zkušebního tělesa. Průběhy jednotlivých křivek jsou znázorněny na obrázku 8. Materiály, u kterých po překročení meze kluzu dochází k rychlé ztrátě pevnosti a přetržení zastupuje křivka č. 1 a mez pevnosti je současně i pevností v tahu. Zkušební těleso se náhle přetrhne, lom je prakticky rovinný a nedochází k výraznému zúžení původního průřezu.

U křivky č. 2 se zkušební těleso přetrhne brzy po překročení meze kluzu, což je největší napětí dosažené při zkoušce a zároveň je i pevností v tahu. Přetržení předchází vznik krčku na zkušebním tělese a charakteristické je také jeho zbělení.

Křivka č. 3 se nevyznačuje mezí kluzu, proto se u materiálů, které tato křivka popisuje, stanovují zpravidla smluvní mez kluzu a ta je následně z konstrukčního hlediska považována za pevnost v tahu.

Křivka č. 4 se vyznačuje horní a dolní mezí kluzu. Zkoušený materiál se přetrhne brzy po překročení meze kluzu, kdy materiál ztrácí svou pevnost.

Křivka č. 5 se svým průběhem na počátku podobá křivce č. 4, avšak liší se chováním za dolní mezí kluzu. U takových materiálů dochází k orientaci molekul. [18]

3.2 Zkoušky tvrdosti

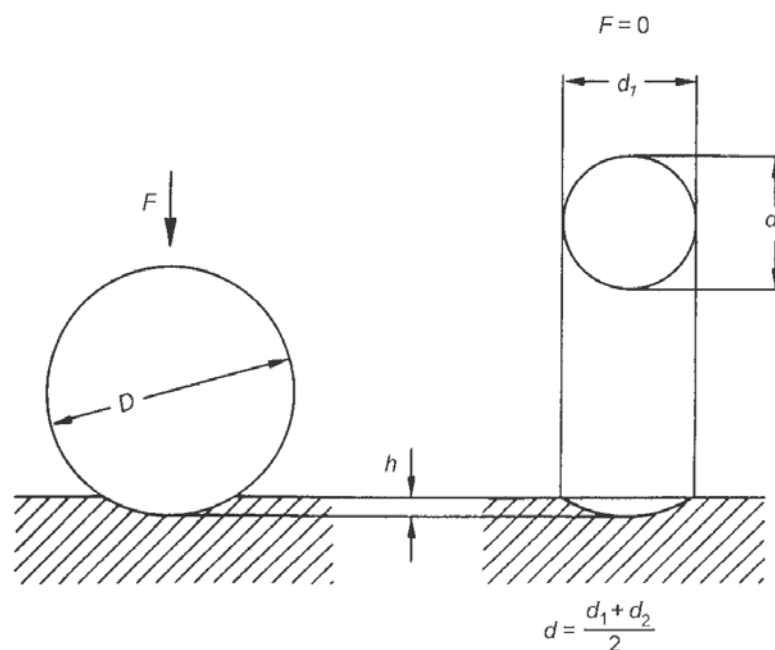
Podstatu tvrdosti jakéhokoliv materiálu a tedy i plastů tvoří jeho odpor vůči vnikání tělesa z jiného, než zkoušeného materiálu za působení vnější síly. Tvrdost se zkouší na povrchu materiálu. Tvrdost se následně hodnotí podle rozměrů vtisku, které zanechalo cizí těleso (kulička, jehlan atd.) ve zkoušeném dílci, nebo zkušebním vzorku (tělese). Při zkoušení se dílec neporuší, proto jsou zkoušky tvrdosti vhodné ke zkoušení hotových výrobků.

Hodnoty tvrdosti se jsou závislé na době působení cizího tělesa, na jeho vlastnostech, rozměrech, na velikosti zatížení, elastických vlastnostech zkoušeného materiálu a na teplotě při zkoušce. Proto musí být hodnoty tvrdosti doplněny popisem podmínek při zkoušce.

[5], [18]

3.2.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Tvrdost zjištěná metodou dle Brinella vyjadřuje závislost mezi silou F , pomocí které se vtlačuje kulička ze slinutých karbidů o průměru D do zkoušeného materiálu a velikostí plochy důlku S , který tím po určité době působení ve zkušebním tělese vznikne. Následně je změřena hloubka nebo průměr vtisku do povrchu vzorku. Obvykle používané průměry kuliček jsou 1 mm, 2,5 mm 5 mm a 10 mm. Zkoušku pro kovové materiály více popisuje norma ČSN EN ISO 6506, pro nekovové materiály byla norma zrušena. [5], [20]



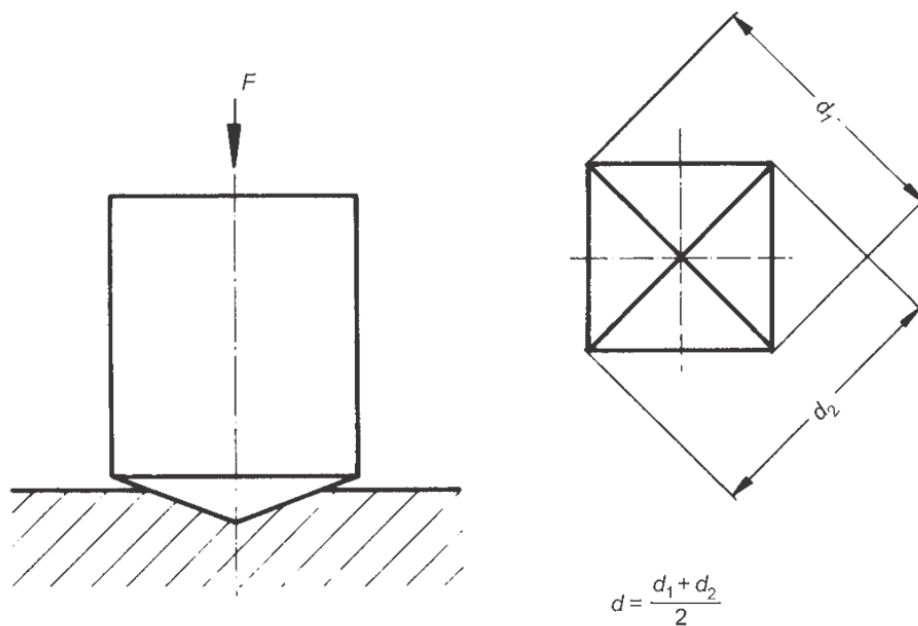
Obr. 10 – Schématické znázornění zkoušky tvrdosti podle Brinella [20]

$$HBW = \frac{F}{S} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

$$HBW = 0,102 \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

3.2.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Princip Vickersovy metody spočívá ve vtlačování čtyřbokého diamantového jehlanu o vrcholovém úhlu 136° do zkoušené látky. Po provedení vtisku konstantní silou F se měří úhlopříčka vtisku d , podle které lze vypočítat povrch vtisku S . Velikost tvrdosti je dána jako podíl zatěžující síly F a velikosti plochy vtisku S . Tvrdost podle Vickerse se značí HV. Předností této zkoušky je, že je možné použít různých zatížení, aniž by se změnila hodnoty tvrdosti. Zkoušku tvrdosti a mikrotvrdosti podle Vickerse popisuje norma ČSN EN ISO 6507. [5], [18], [20]



Obr. 11 – Schématické znázornění zkoušky tvrdosti podle Vickerse [20]

$$S = \frac{d^2}{2 \cdot \sin 68^\circ} \cong \frac{d^2}{1,854} \quad [\text{mm}^2] \quad (6)$$

$$HV = 0,102 \frac{1,854 \cdot F}{d^2} \cong \frac{0,1891 \cdot F}{d^2} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

3.2.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Měřítkem pro posouzení tvrdosti není u této zkoušky plocha vtisku, ale jeho hloubka, což je zásadní rozdíl oproti metodě dle Vickerse. Při měření je zjišťováno číslo tvrdosti. Jednotkou čísla tvrdosti je hloubka vtisku 0,002 mm.

Jsou možné dva postupy měření. Prvním postupem se stanovuje hloubka vtisku po odstranění hlavního zatížení. Tato metoda se používá u plastů s velkým sklonem k tečení za studena, nebo u nichž pružná deformace vyvolaná zatížením nemůže být zanedbána. Pro ostatní plasty se používá druhá metoda, při které se měří hloubka stopy při zatížení.

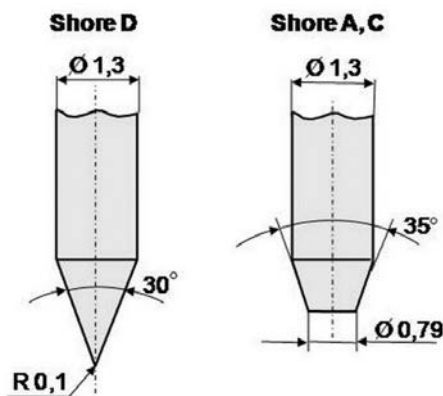
Rozeznávají se různé typy tvrdosti podle Rockwella, které se podle druhu zkoušeného materiálu. Pro plastomery a elastomery se používá stupnice Rockwell R, pro barevné kovy a hliník Rockwell M, pro ocel a litinu stupnice Rockwell B. Pilníky, řezné nástroje, nitridované oceli a další tvrdé materiály se měří na stupnici Rockwell C. [5], [18], [20]

$$HR = N - \frac{h}{S} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

kde N je číselná hodnota (konstanta), h konečná hloubka vtisku a S je jeden dílek stupnice [20]

3.2.4 Zkouška tvrdosti podle Shoreho

Principem metody Shore je vlačování hrotu do zkušební tělesa. Odpor zkušební tělesa proti vnikání hrotu daného typu zajišťuje pružina. Tvrdost není přímo úměrná vniku ocelového hrotu do zkušební tělesa. Tvrdost závisí na modulu pružnosti a viskoelastickém stavu zkušební vzorku. K nejpoužívanější metodám patří typ A a typ D. Metodou A se měří měkčí materiály, zatímco metoda D je určena pro materiály tvrdší, kdy tvrdost materiálu překročí 85 jednotek na stupnici Shore A. [21]



Obr. 12 – Typy hrotů pro metodu Shore [21]

3.2.5 Mikrotvrдость

Semikrystalické polymery obsahují v některých případech sférolity. Při použití konvenčních metod měření tvrdosti nelze tvrdost jednotlivých fází měřit odděleně, protože stopa po měřícím elementu je příliš velká a plocha se rozprostírá jak přes sférolity, tak přes amorfni část.

V takovýchto případech je výhodné použít metodu mikrotvrđosti. Princip je velmi podobný metodě podle Vickerse, popsanou v kapitole 3.2.2. Hlavní rozdíl je v rozměru úhlopříčky jehlanu, který se v případě mikrotvrđosti měří v mikronech. Dalším podstatným rozdílem je velikost zatížení, které je jen několik gramů. Mikrotvrđoměr je zpravidla používán ve spojení s mikroskopem, ze kterého je možné okamžitě odečítat úhlopříčky. [18]

3.3 Rázové zkoušky

Porušení plastické hmoty nárazem souvisí s deformační schopností dané hmoty, tj. schopností deformovat se určitou rychlostí. Při pomalém zvyšování napětí, např. v ohybu, dochází u houževnatého materiálu k velkým deformacím a zkušební těleso se nezlomí vůbec, nebo se zlomí až při velkém průhybu. Čím více se bude zvyšovat rychlost ohybu, tím více se bude materiál jevit jako křehký.

Výsledky a informace z rázových zkoušek ale není možné všeobecně přenášet na různé tvary výrobků. Rázové zkoušky je možné podle způsobu namáhání rozdělit na

- a) rázové zkoušky v tahu a tlaku
- b) rázové zkoušky v ohybu
- c) rázové zkoušky v krutu

Nejdůležitější a nejpoužívanější je rázová zkouška v ohybu spolu s rázovou zkouškou tahovou. [18]

3.3.1 Metoda Charpy

Svým charakterem se řadí mezi zkoušky jednorázové dynamické. Pomocí této zkoušky je možné hodnotit chování materiálu při namáhání rázem, jeho křehkost nebo houževnatost. Zkouška je vhodná jak pro tuhé termoplasty, tak pro vrstvené materiály a lamináty. Informace o zkoušení plastů pomocí metody Charpy podává norma ČSN EN ISO 179. [4]

Metodou Charpy se zjišťuje rázová energie pomocí kyvadlového kladiva, které je znázorněné na obrázku 13 níže. Otočně zavěšené kladivo má ve své horní poloze potenciální energii

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad [J] \quad (9)$$

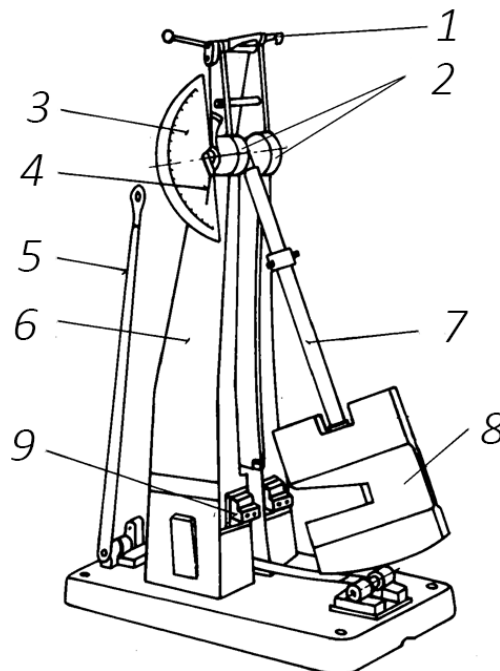
kde m je hmotnost kladiva, g je gravitační konstanta a h je výška horní polohy kladiva

Po uvolnění kladivo padá, při čemž projde bodem maximální kinetické energie, pro který platí

$$E_p = E_k \quad [J] \quad (10)$$

V tomto bodě je umístěn střed zkušebního tělesa, na které tedy působí maximální kinetická energie. Hodnota maximální kinetické energie je dána energií polohy v zavěšení. Protože je hmota kyvadla konstantní, je výška kladiva v kterémkoliv okamžiku zkoušky měřítkem energie. Energie polohy se při pádu kladiva přemění v energii kinetickou. Část kinetické energie se spotřebuje na přeražení a odmrštění zkušebního tělesa, opatřeného vrubem.

[4], [18]



Obr. 13 – Schéma Charpyho kladiva [21]

1 – západka, 2 – hřídel v ložiscích, 3 – stupnice, 4 – vlečná ručička, 5 – brzdná páka, 6 – rám, 7 – otočné rameno, 8 – beran kladiva, 9 – opěry pro zkušební vzorek

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo srovnání mechanických vlastností vybraných typů polymerních materiálů. Vybrané materiály byly Calibre, Makrolon 2207, Makrolon R30, Nirion, Tyril 905 UV, Slovamid 6 GF 10 a Slovamid 6 GF 15.

Pro testy mechanických vlastností bylo použito celkem čtyř zkoušek. Statickou zkouškou v tahu byl zjišťován modul pružnosti v tahu E , maximální síla F_m a mez pevnosti v tahu σ_m . K měření tvrdosti byla použita zkouška tvrdosti metodou Shore D. Pro měření mikrotvrdosti byla zvolena instrumentovaná zkouška mikrotvrdosti, pomocí které byla vyhodnocena vtisková tvrdost H_{IT} , vtiskový modul E_{IT} , vtiskové tečení C_{IT} a deformační práce. Jako poslední byla provedena rázová zkouška v ohybu (vrubová houževnatost), kde byla srovnávána maximální síla F_{max} a energie potřebná k přeražení zkušebního tělesa W_{max} . Ke každé zkoušce bylo použito a změřeno vždy 10 kusů zkušebních těles. Výsledky měření byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Cíle diplomové práce jsou následující:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních vzorků
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení naměřených výsledků

5 POPIS JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ

Ke zkoušeným a vyhodnocovaným materiálům patří Calibre, Makrolon 2207, Makrolon R30, Nirion, Tyril 905 UV, Slovamid 6 GF 10 (dále jen Slovamid 10) a Slovamid 6 GF 15 (dále jen Slovamid 15). První čtyři uvedené materiály patří do skupiny polykarbonátů. Tyril 905 UV je zástupcem kopolymerů styrenu s akrylonitrilem a poslední dva výše uvedené materiály zastupují skupinu polyamidů.

5.1 Příprava vzorků

Zkušební tělesa byla zhotovena pomocí vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 470 H. Rozměry zkušebních těles pro zkoušku v tahu odpovídaly normě ČSN EN ISO 527-1 a pro rázovou zkoušku v ohybu (vrubová houževnatost) pak normě ČSN EN ISO 179-1. Vzhledem k tomu, že všechny zkoušené materiály, zejména pak PA a SAN, jsou navlhavé, bylo nutné před samotným vstřikováním provést sušení granulátu pomocí sušícího zařízení ARBURG THERMOLIFT 100-2. Při nastavování veškerých zpracovatelských podmínek se vycházelo z doporučených parametrů výrobce daného materiálu.



Obr. 14 – Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 470 H [23]

Tab. 25 – Základní parametry vstřikovacího stroje [27]

Parametry vstřikovacího stroje		
	Hodnota	Jednotka
Uzavírací síla (max)	1000	kN
Vyhazovací síla (max)	40	kN
Vzdálenost mezi vodícími sloupy	470x470	mm
Objem dávky (max)	182	cm ³
Vstřikovací tlak (max)	2120	bar
Objemová vstřikovací rychlost (max)	168	cm ³ .s ⁻¹

Tab. 26 – Zpracovatelské podmínky pro polyamidy

Zpracovatelské podmínky pro materiály Slovamid 10 a Slovamid 15		
	Hodnota	Jednotka
Teplota taveniny	270	°C
Teplota formy	80	°C
Vstřikovací tlak	80	MPa
Dotlak	30	MPa
Sušení	4; 80	h; °C

Tab. 27 – Zpracovatelské podmínky pro kopolymer styrenu s akrylonitrilem

Zpracovatelské podmínky pro Tyril 905 UV		
	Hodnota	Jednotka
Teplota taveniny	230	°C
Teplota formy	60	°C
Vstřikovací tlak	80	MPa
Dotlak	30	MPa
Sušení	4; 80	h; °C

Tab. 28 – Zpracovatelské podmínky pro polykarbonáty

Zpracovatelské podmínky pro materiály Calibre, Makrolon 2207, Makrolon R30 a Nirion		
	Hodnota	Jednotka
Teplota taveniny	290	°C
Teplota formy	90	°C
Vstřikovací tlak	60	MPa
Dotlak	35	MPa
Sušení	4; 120	h; °C

6 ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Veškeré výsledky, naměřené při jednotlivých zkouškách byly zpracovány podle následujících vztahů:

a) aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

kde \bar{x} je aritmetický průměr, n je počet měření a x_i je i -té měření

b) směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

kde s je směrodatná odchylka, n je počet měření, \bar{x} je aritmetický průměr, x_i je i -té měření

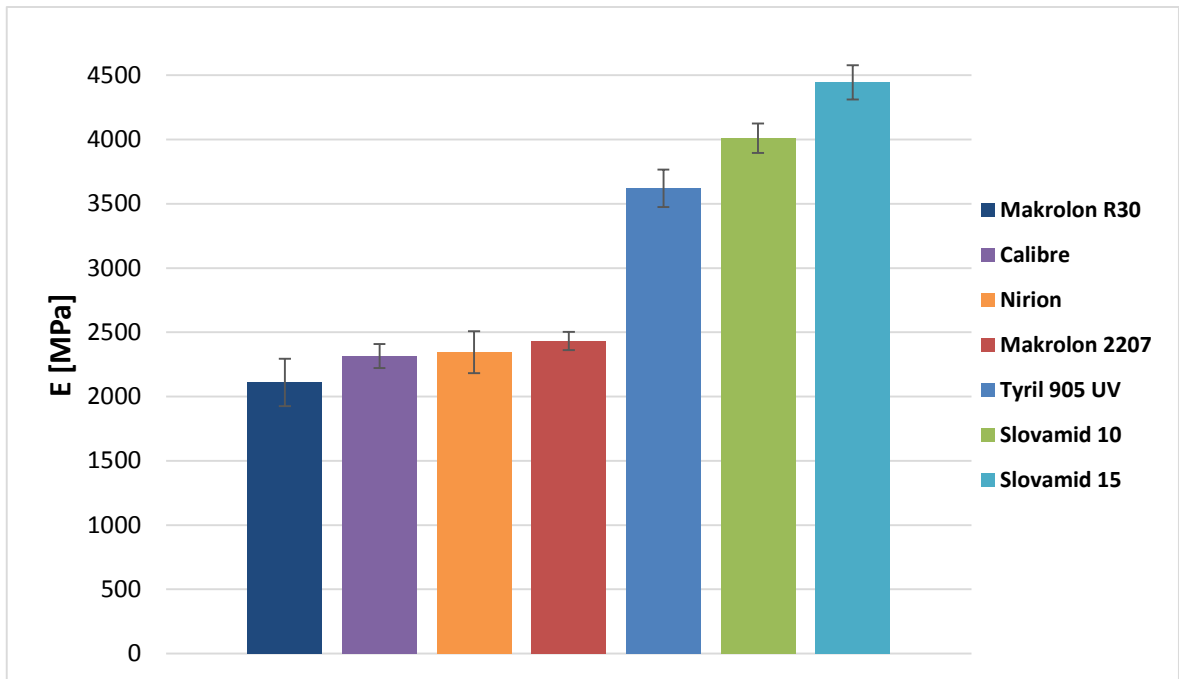
6.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena pomocí trhacího stroje Zwick Roell 1456, propojeného s testovacím softwarem testXpert, pomocí kterého byla naměřená data ukládána. Při tahové zkoušce byly měřeny hodnoty modulu pružnosti v tahu E , maximální síly F_m a mez pevnosti v tahu σ_m . Teplota okolí při měření byla 23 °C.



Obr. 15 – Zwick Roell 1456

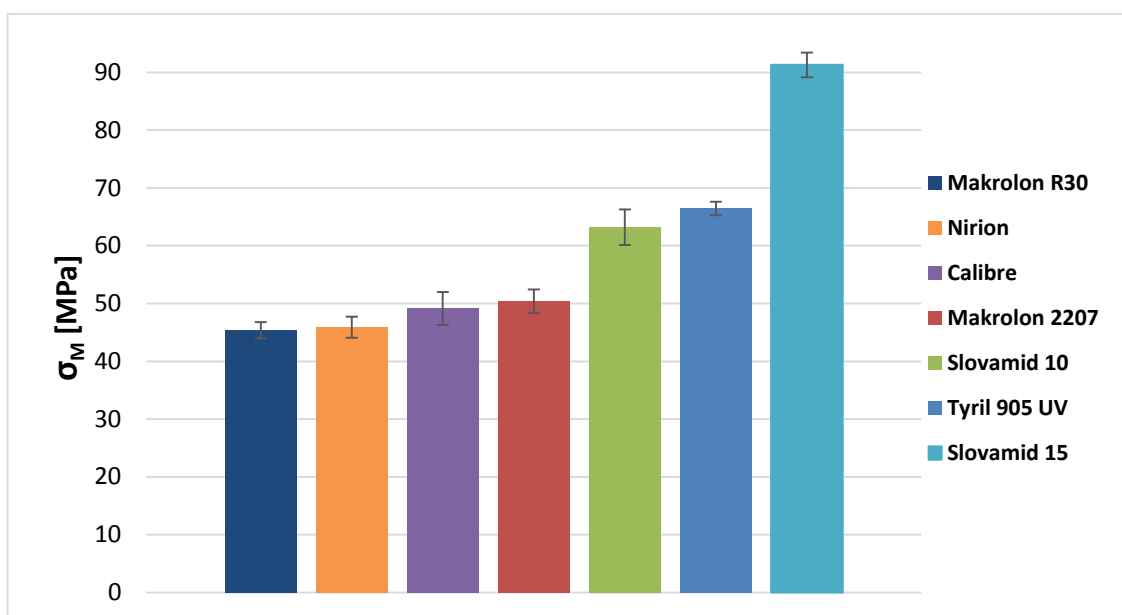
6.1.1 Srovnání modulu pružnosti v tahu



Obr. 16 – Srovnání modulu pružnosti v tahu

Z tahové zkoušky vyplynulo, že největší hodnotu modulu pružnosti v tahu, který reprezentuje tuhost testovaného zkušební tělesa, vykazuje materiál Slovamid 15 ($E = 4445$ MPa). Nejnižší modul pružnosti byl naměřen u Materiálu Makrolon R30 ($E = 2110$ MPa), jak je patrné z obr. 16.

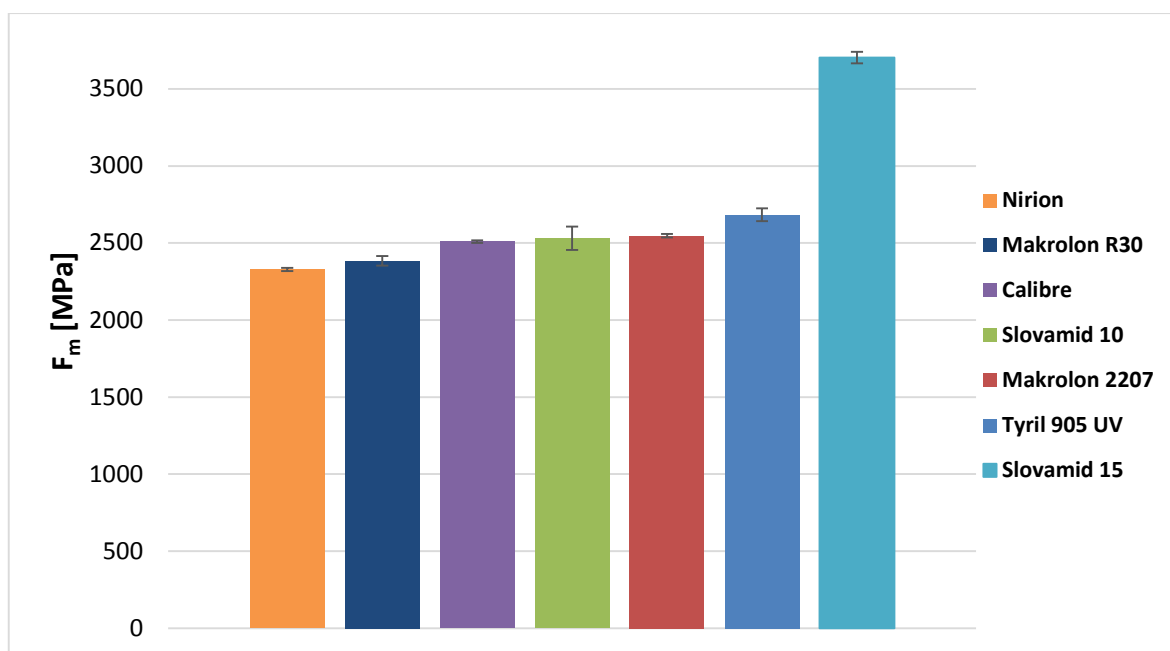
6.1.2 Srovnání meze pevnosti v tahu



Obr. 17 – Srovnání meze pevnosti v tahu

Ze zkoušky v tahu byla rovněž zjištěna i největší mez pevnosti v tahu jednotlivých materiálů. Hodnota největší meze pevnosti byla naměřena u polyamidu Slovamid 15 ($\sigma_M = 91,31$ MPa). Naopak nejnižší mez pevnosti byla naměřena u Makrolonu R30 ($\sigma_M = 45,4$ MPa), viz obrázek 17 na předchozí straně.

6.1.3 Srovnání maximální síly



Obr. 18 – Srovnání maximální síly

Poslední měřenou veličinou při zkoušce v tahu byla maximální síla. Největší hodnota byla naměřena opět u materiálu Slovamid 15 ($F_m = 3703$ N). Nejnižší hodnota byla zjištěna u materiálu Nirion ($F_m = 2328$ N), jak je zřejmé z obrázku 18.

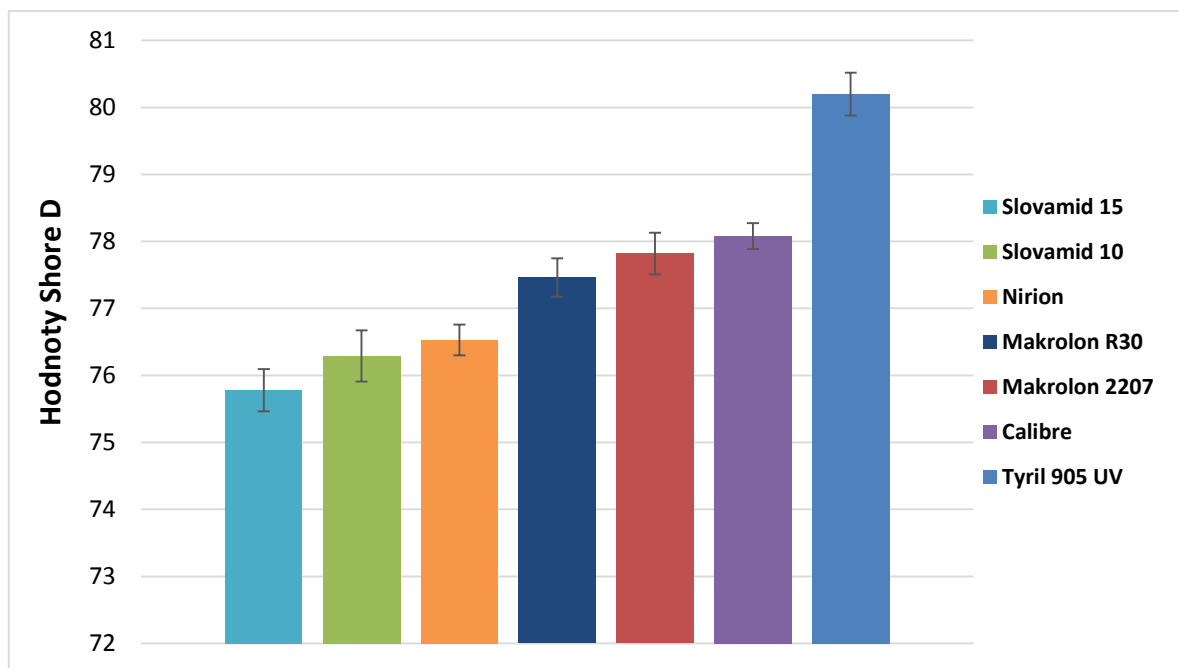
6.2 Zkouška tvrdosti

Pro zjištění tvrdosti jednotlivých zkoušených materiálů byla použita zkouška tvrdosti Shore D. U každého materiálu bylo provedeno celkem 10 měření v různých místech zkušební vzorku tak, jak určuje norma ČSN EN ISO 868. Každé měření probíhalo po dobu 5 s, po které byla odečtena hodnota z přístroje OMAG Affri ART 13 (viz obr. 19). Teplota po celou dobu měření byla 23 °C.



Obr. 19 – Tvrdoměr OMAG Affri ART 13 [24]

6.2.1 Srovnání tvrdosti



Obr. 20 – Srovnání tvrdosti Shore D

Při zkoušce tvrdosti metodou Shore D prokázal největší tvrdost materiál Tyril 905 UV (80,2 Shore D). Nejmenší hodnota tvrdosti byla zjištěna u materiálu Slovamid 15 (75,8 Shore D), jak je patrné z obrázku 20.

6.3 Instrumentovaná zkouška mikrotvrlosti

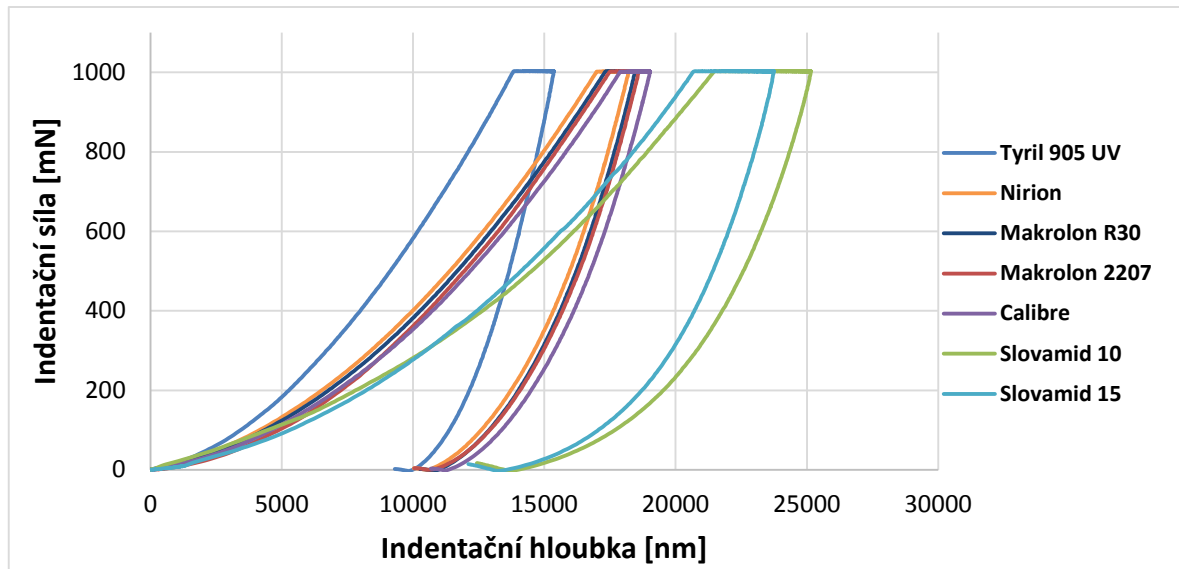
K měření mikro-mechanických vlastností metodou DSI (Depth Sensing Indentation) byl použit přístroj Micro-Combi Tester od společnosti CSM Instruments. První získanou veličinou této zkoušky byla vtisková tvrdost H_{IT} . Další sledovanou veličinou byl vtiskový modul E_{IT} . Při zkoušce mikrotvrlosti byl rovněž sledováno a vyhodnoceno vtiskové tečení C_{IT} . Poslední získanou a sledovanou veličinou v této zkoušce byla deformační práce.

Maximální indentační síla byla pro všechny materiály zvolena shodně a to 1 N. Zátěžovací a odtěžovací rychlost byla nastavena na $2 \text{ N}\cdot\text{min}^{-1}$. Výdrž na maximálním zatížení byla zvolena na hodnotu 90 s. Teplota okolí byla v průběhu zkoušky $23 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 21 – Přístroj Micro-Combi Tester pro měření mikrotvrlosti [25]

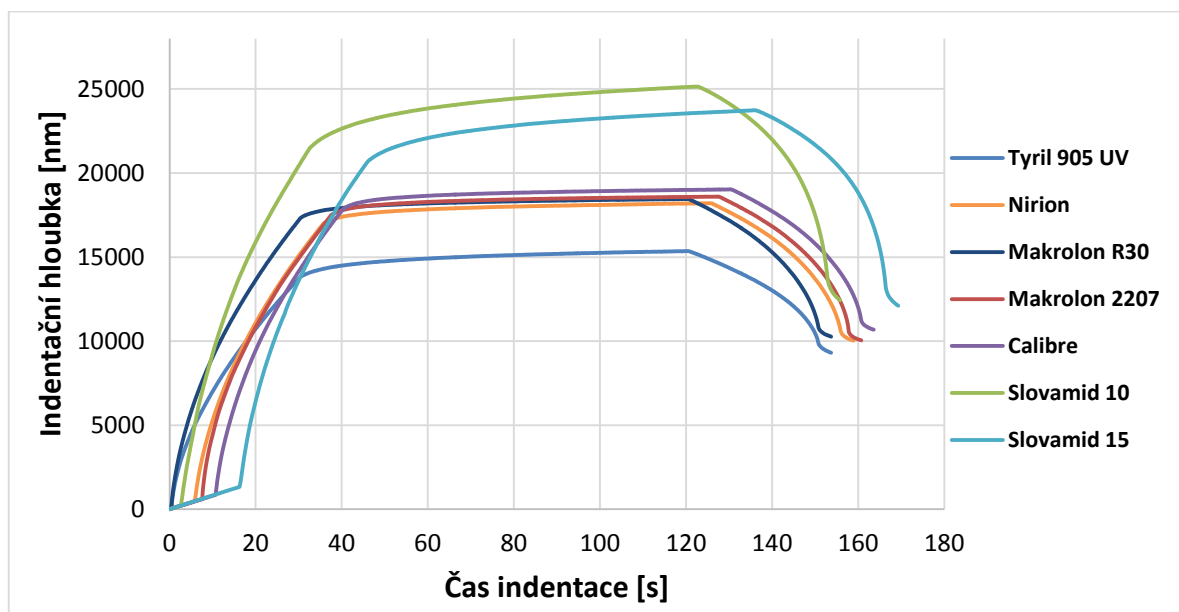
6.3.1 Srovnání závislosti indentační síly na indentační hloubce



Obr. 22 – Srovnání závislosti indentační síly na indentační hloubce

Z instrumentované zkoušky mikrotvrdomosti byla získána závislost indentační síly na indentační hloubce. Největší hloubky vtisku (přibližně 25100 nm) bylo dosaženo u materiálu Slovamid 10 a po odlehčení indentoru došlo k relaxaci hloubky vtisku na hodnotu přibližně 13700 nm. Nejmenší hloubky vtisku (přibližně 15400 nm) bylo dosaženo u materiálu Tyril 905 UV. Po následné relaxaci dosáhla hodnota hloubky vtisku u tohoto materiálu přibližně 10000 nm, jak je patrné na obrázku 22.

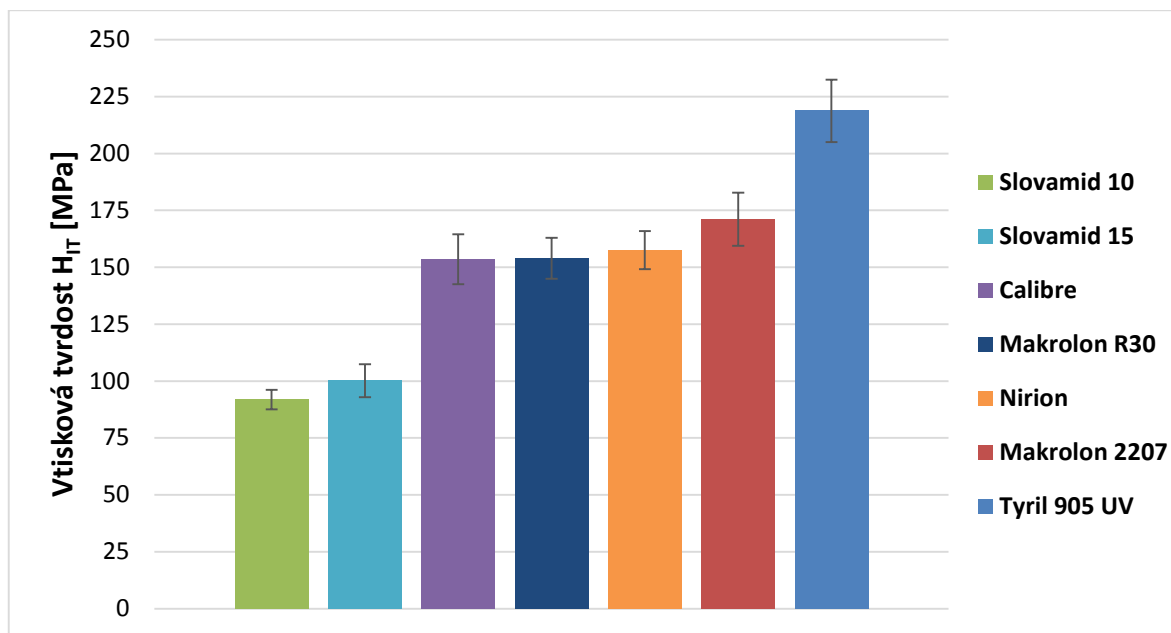
6.3.2 Srovnání závislosti indentační hloubky na čase indentace



Obr. 23 – Srovnání závislosti indentační hloubky na čase indentace

Další získanou závislostí z instrumentované zkoušky mikrotvrdomosti byla změna velikosti indentační hloubky na čase indentace při dosažení maximálního zatížení. Po dosažení maximálního zatížení se vlivem vtiskového tečení propadá indentor do větší hloubky. Největší hodnota indentační hloubky byla zaznamenána u Slovamidu 10, zatímco nejmenší hodnota indentační hloubky byla změřena u materiálu Tyril 905 UV, jak je patrné z obrázku 23.

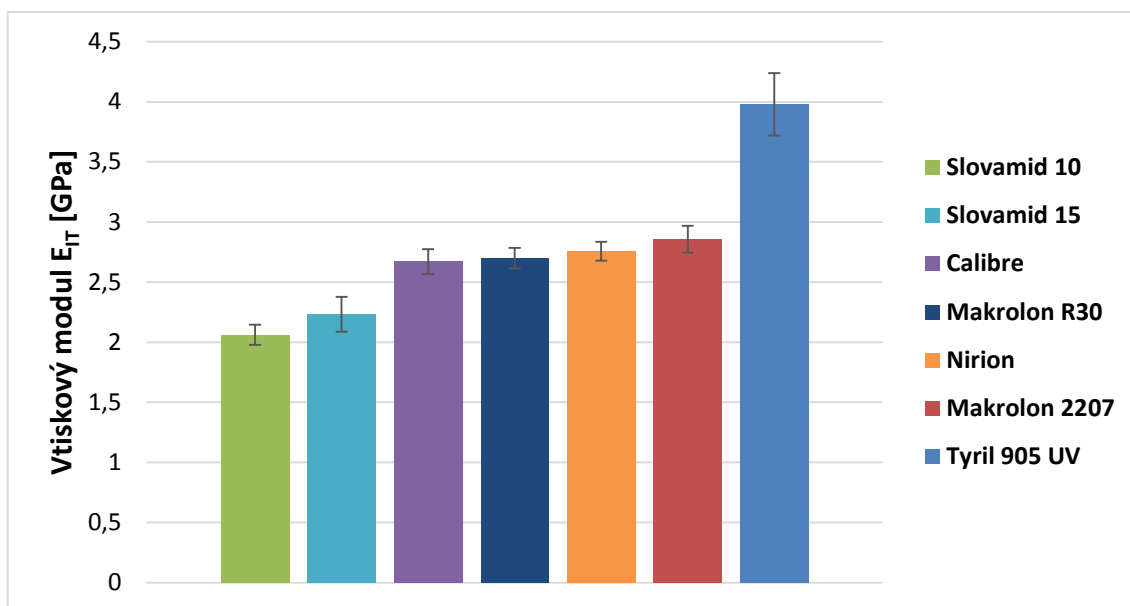
6.3.3 Srovnání vtiskové tvrdosti



Obr. 24 – Srovnání vtiskové tvrdosti

Vtisková tvrdost je základní veličinou získanou z instrumentované zkoušky mikrotvrdomosti. Jak je zřejmé z obrázku 24, největší hodnotu vykazuje materiál Tyril 905 UV ($H_{IT}= 218,7$ MPa). Nejmenších hodnot dosahují polyamidy, konkrétně Slovamid 10 s hodnotou $H_{IT}= 91,8$ MPa.

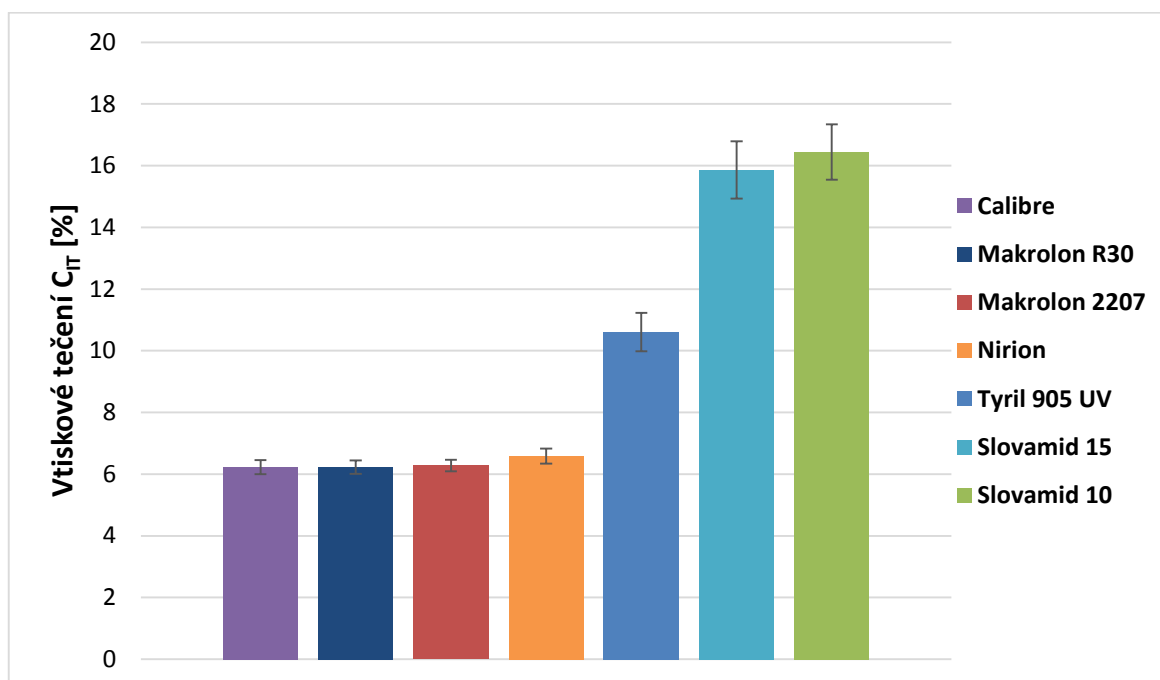
6.3.4 Srovnání vtiskového modulu



Obr. 25 – Srovnání vtiskového modulu

Při porovnání obrázků 24 a 25 je zřejmé, že výsledky spolu korespondují. S rostoucí vtiskovou tvrdostí roste i vtiskový modul. Největší hodnota byla zjištěna u materiálu Tyril 905 UV ($E_{IT}= 3,98$ GPa). Nejmenší vtiskový modul byl změřen u Slovamidu 10 ($E_{IT}= 2,06$ GPa).

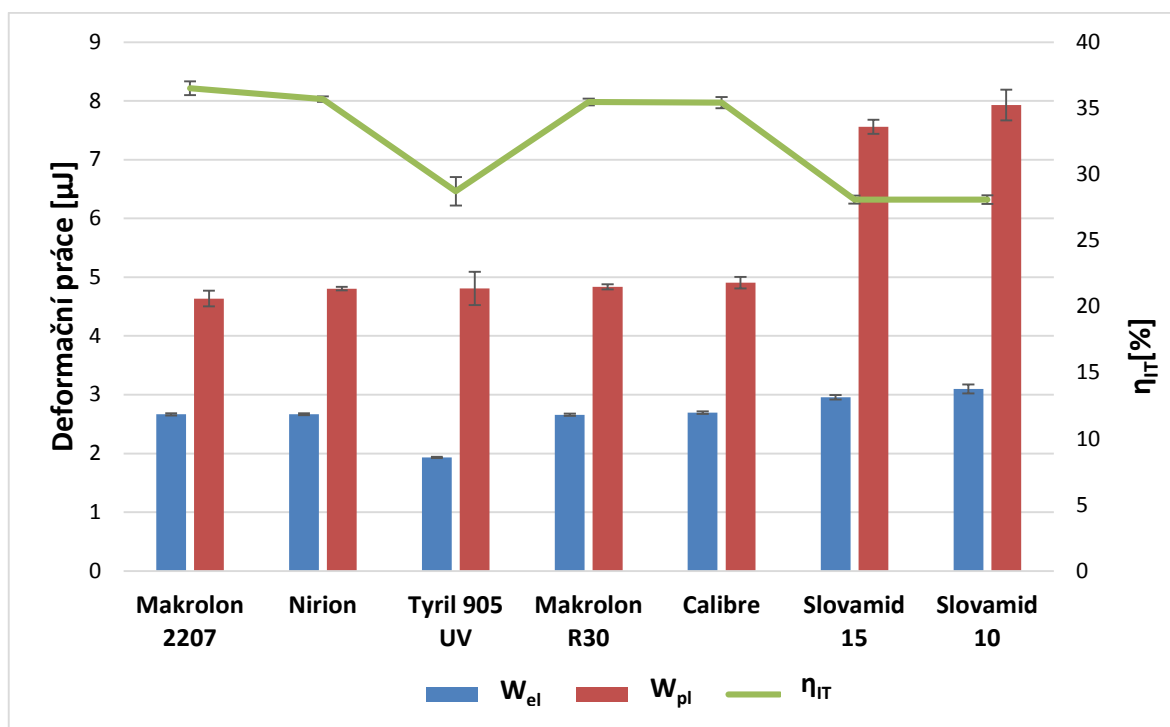
6.3.5 Srovnání vtiskového tečení



Obr. 26 – Srovnání vtiskového tečení

Další měřenou veličinou při instrumentované zkoušce tvrdosti bylo vtiskové tečení (vtiskový creep). Jak znázorňuje obrázek 26, polyamidy tiskovému tečení podléhaly nejvíce. Konkrétně pak materiál Slovamid 10 ($C_{IT} = 16,4\%$). Ze zkoušených materiálů odolávaly vtiskovému tečení nejlépe polykarbonáty, konkrétně Calibre ($C_{IT} = 6,2\%$).

6.3.6 Srovnání deformační práce

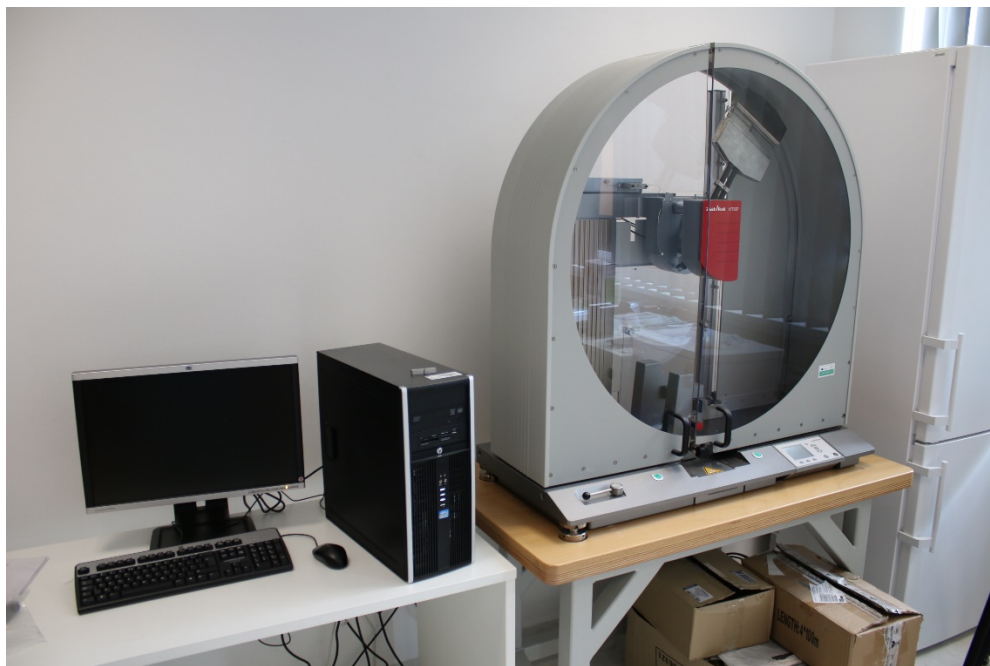


Obr. 27 – Srovnání deformační práce

Na obrázku 27 je porovnávána elastická část deformační práce W_{el} , plastická část deformační práce W_{pl} a koeficient zpětné deformace η_{IT} . Nejvyšší hodnoty W_{el} a W_{pl} byly zjištěny u materiálu Slovamid 10. Nejmenší hodnoty W_{pl} dosáhl materiál Makrolon 2207. Nejmenší hodnota W_{el} byla naměřena u materiálu Tyrl 905 UV.

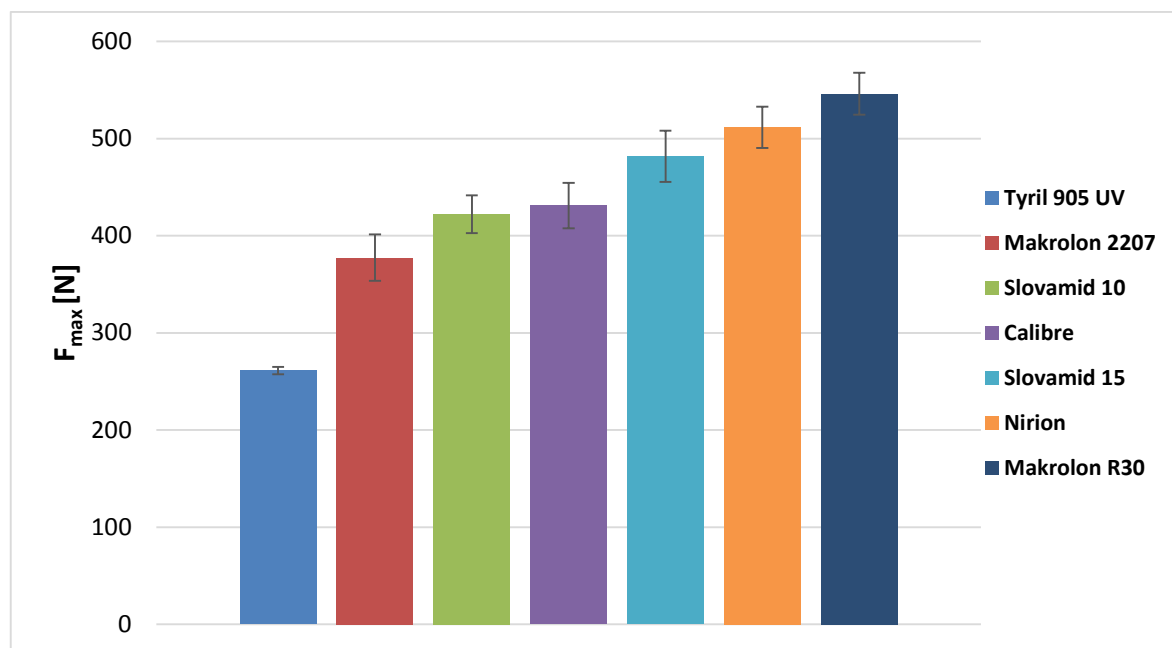
6.4 Rázová zkouška v ohybu (vrubová houževnatost)

Rázová zkouška v ohybu (vrubová houževnatost) probíhala na zařízení Zwick Roell HIT50P. Díky širokému rozsahu vyměnitelných kladiv a příslušenství lze na zařízení provádět zkoušky dle několika norem včetně ČSN EN ISO 179-1. V této zkoušce byly sledovány hodnoty maximální síly F_{max} a energie nutné k přeražení zkušebního tělesa W_{max} . Pro každý materiál bylo provedeno 10 měření a výsledky byly graficky zpracovány a vyhodnoceny. Po celou dobu zkoušky byla teplota okolí 23 °C.



Obr. 28 – Přístroj Zwick Roell HIT50P

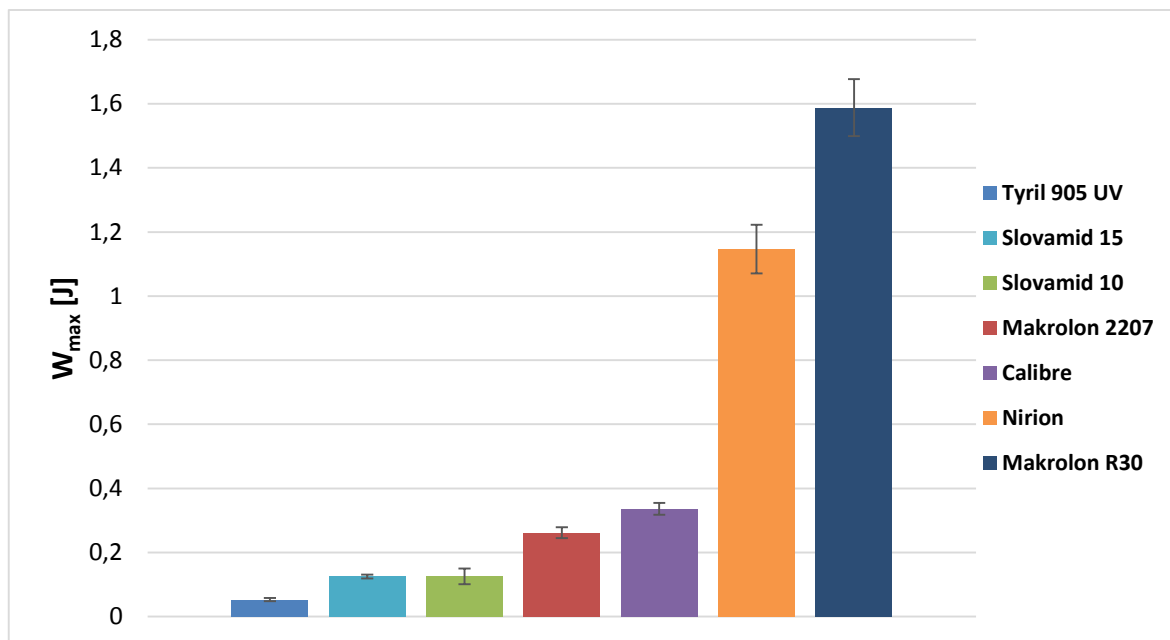
6.4.1 Srovnání maximální síly



Obr. 29 – Srovnání maximální síly

Z výsledků rázové zkoušky v ohybu (vrubová houževnatost) vyplývá, že největší hodnota maximální síly byla zjištěna u materiálu Makrolon R30 ($F_{max}= 546$ N). Naopak nejnižší naměřená hodnota ($F_{max}= 261$ N) náleží vzorku z materiálu Tyril 905 UV, jak je patrné z obrázku 29.

6.4.2 Srovnání energie potřebné k přeražení zkušebního tělesa



Obr. 30 – Srovnání energie potřebné k přeražení

Obrázek 30 znázorňuje hodnoty energie potřebné k přeražení zkušebního tělesa pro jednotlivé materiály. Největší hodnota energie potřebné k přeražení vzorku byla změřena u materiálu Makrolon R30 ($W_{\max} = 1,59$ J). Nejmenší hodnota energie potřebné k přeražení ($W_{\max} = 0,05$ J) náleží materiálu Tyril 905 UV.

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Diplomová práce se zabývala testováním fyzikálních (mechanických) vlastností vybraných typů polymerních materiálů. Vybrány byly materiály Calibre, Makrolon 2207, Makrolon R30, Nirion, Tyril 905 UV, Slovamid 10 a Slovamid 15. Testy fyzikálních (mechanických) vlastností byly provedeny pomocí tahové zkoušky, zkouškou tvrdosti, instrumentovanou zkouškou mikrotvrdosti a rázovou zkouškou v ohybu. U každé zkoušky bylo pro vybraný polymerní materiál provedeno vždy 10 měření. Výsledky měření byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Jako první byla provedena zkouška v tahu, pomocí které bylo zjištěno, že největší modul pružnosti v tahu, který reprezentuje tuhost zkoušeného tělesa, vykazuje materiál Slovamid 15 s hodnotou $E = 4445$ MPa. Nejmenší hodnoty modulu pružnosti naopak dosáhl materiál Makrolon R30 s hodnotou $E = 2110$ MPa. Slovamid 15 zároveň dosáhl i největší hodnoty meze pevnosti v tahu, která činila 91 MPa. Nejmenší hodnoty dosáhl opět Makrolon R30 s hodnotou $\sigma_m = 45$ MPa. Ve srovnání maximální síly F_m dosáhl největší hodnoty Slovamid 15 ($F_m = 3703$ N) a nejmenší maximální síla $F_m = 2328$ N byla změřena u materiálu Nirion.

Při zkoušce tvrdosti prokázal největší tvrdost materiál Tyril 905 UV s hodnotou 80 Shore D. Nejmenší tvrdost z testovaných vzorků byla změřena u materiálu Slovamid 15 s hodnotou 76 Shore D.

Na testovaných vzorcích byla následně zkoušena mikrotvrdost. Největší hodnoty vtiskové tvrdosti dosáhl materiál Tyril 905 UV s hodnotou $H_{IT} = 219$ MPa. Nejmenší hodnota $H_{IT} = 92$ MPa byla zjištěna u materiálu Slovamid 10. Při srovnání vtiskového modulu E_{IT} bylo zjištěno, že největší hodnoty $E_{IT} = 3,98$ GPa dosáhl materiál Tyril 905 UV. Nejnižší hodnota byla změřena opět u materiálu Slovamid 10. Je zároveň zřejmé, že s rostoucí vtiskovou tvrdostí roste i vtiskový modul. Poslední sledovanou veličinou při zkoušce mikrotvrdosti bylo vtiskové tečení C_{IT} . Z testovaných materiálů podléhal vtiskovému tečení nejvíce Slovamid 10 ($C_{IT} = 16,4\%$). Nejmenší hodnota $C_{IT} = 6,2\%$ byla zjištěna u materiálu Calibre.

Poslední provedenou a vyhodnocenou zkouškou byla rázová zkouška v ohybu (vrubová houževnatost), kde byla srovnávána maximální síla F_{max} a energie nutná k přeražení zkušebního vzorku W_{max} . Největší hodnoty F_{max} dosáhl materiál Makrolon R30 ($F_{max} = 546$ N). Naopak nejmenší hodnota byla změřena u materiálu Tyril 905 UV. Největší $W_{max} = 1,59$ J byla změřena u materiálu Tyril 905 UV. Nejmenší hodnota $W_{max} = 0,05$ J byla naopak změřena u materiálu Tyril 905 UV.

ZÁVĚR

V diplomové práci bylo provedeno srovnání mechanických vlastností zkušebních těles z materiálů Calibre, Makrolon 2207, Makrolon R30, Nirion, Tyril 905 UV, Slovamid 6 GF 10 a Slovamid 6 GF 15, které byly zhotoveny technologií vstřikování. Srovnání bylo provedeno na základě výsledků z mechanických zkoušek v tahu, tvrdosti, mikrotvrdosti a rázové zkoušky v ohybu (vrubová houževnatost).

Z výsledků mechanických zkoušek vyplynulo, že největšího modulu v tahu, který reprezentuje tuhost testovaného zkušební vzorku, dosáhl materiál Slovamid 6 GF 15, který rovněž dosáhl i největší hodnoty meze pevnosti v tahu. Tento materiál naopak vykázal nejhorší výsledek ve zkoušce tvrdosti. Ve zkoušce v tahu dopadl nejhůře materiál Makrolon R30, naopak při zkoušce rázové houževnatosti dosáhl nejlepších výsledků. Ze všech testovaných materiálů vykázal největší tvrdost materiál Tyril 905 UV, který zároveň dosáhl největší hodnoty vtiskové tvrdosti, avšak při rázové zkoušce v ohybu (vrubová houževnatost) byly u tohoto materiálu naměřeny hodnoty nejhorší. Z výsledků zkoušky mikrotvrdosti rovněž vyplývá, že vtiskovému tečení podléhá nejvíce materiál Slovamid 6 GF 10, u kterého byla zjištěna i nejmenší vtisková tvrdost. Vtiskovému tečení podléhá naopak nejméně materiál Calibre. Na základě výsledků z provedených mechanických zkoušek lze konstatovat, že nejvyrovnanějších mechanických vlastností dosáhly polykarbonáty Calibre, Makrolon 2207, Makrolon R30 a Nirion.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2011, 276 s. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [2] KNIEWALD, Dušan. *Náuka o plastoch*. Vyd. 1. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2007, 244 s. ISBN 978-80-8073-815-0.
- [3] ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Makromolekulární chemie: úvod do chemie a technologie polymerů*. Vyd. 3., dopl. a upr. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014, 187 s. ISBN 978-80-7395-761-2.
- [4] MLEZIVA, Josef. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-85920-72-7.
- [5] ŠKERŮ, Jan. *Plasty v elektrotechnice a elektronice*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1991, 514 s. ISBN 80-03-00657-0.
- [6] VÁRKOLY, Ladislav. *Technické plasty, výroba, spracovania a skúšanie*. Vyd. 1. V Žiline: Vysoká škola dopravy a spojov, 1995, 103 s. ISBN 80-7100-285-2.
- [7] LENFELD, Petr. *Technologie II: Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit 2015-05-5]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm#012
- [8] SALDÍVAR-GUERRA, Enrique a Eduardo VIVALDO-LIMA. *Handbook of polymer synthesis, characterization, and processing*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2013, 622 s. ISBN 978-0-470-63032-7.
- [9] MOHYLA, Miroslav a Petr MOHYLA. *Strojírenské materiály II*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006, 119 s. ISBN 80-248-1019-0.
- [10] PRITCHARD, Geoffrey. *Reinforced plastics durability*. Boca Raton: CRC Press, 1999, 374 s. ISBN 978-1-85573-320-6.
- [11] MITTAL, Vikas. *High performance polymers and engineering plastics*. Hoboken: John Wiley, 2011, 430 s. ISBN 978-1-118-01669-5
- [12] MISRA, Ashok a Anup K. Ghosh. *Engineering polymers as functional materials. Popular Plastics* [online]. 2008, roč. 53, č. 1, s. 13-21 [cit. 2015-05-05].
- [13] CAMPO, E. *Selection of polymeric materials: how to select design properties from different standards*. Norwich, NY: William Andrew, 2008, 253 s. ISBN 978-0-8155-1551-7

- [14] OSSWALD, Tim A. *International plastics handbook: the resource for plastics engineers*. 4. přeprac. vyd. Cincinnati: Hanser, 2006, 902 s. ISBN 978-1-56990-399-5.
- [15] KUTZ, Myer. *Applied plastics engineering handbook: processing and materials*. 1. vyd. Boston: Elsevier/William Andrew, 2011, 644 s. ISBN 978-1-4377-3514-7
- [16] FINK, Johannes Karl. *High performance polymers*. 2. vyd. New York: Elsevier/William Andrew, 2009, 420 s. ISBN 978-0-8155-1580-7.
- [17] DROBNY, Jiri. *Handbook of thermoplastic elastomers*. New York: PDL/William Andrew Pub., 2007, 404 s. ISBN 0-8155-1549-9.
- [18] RYBNIKÁŘ, František. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 418 s.
- [19] VACULÍK, Jan. *Vlastnosti radiačně síťovaných polymerů*. Zlín, 2010. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
- [20] HERRMANN, Konrad. *Hardness testing: principles and applications*. Ohio: ASM International, 2011, 255 s. ISBN 978-1-61503-832-9
- [21] KREJCÁREK, Lukáš. *Měření mechanických vlastností vybraných typů polykarbonát*. Bakalářská práce. Zlín, 2014. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
- [22] CAMPO, E. Alfredo. *Industrial polymers*. Munich: Hanser, 2008. 192 s. ISBN 3446411194.
- [23] ARBURG. *Allrounder 470H* [online]. [cit. 2015-05-5]. Dostupné z: http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Bil-der/Presse_300dpi/ARBURG_26594_ALLROUNDER_470H.jpg
- [24] LÖWENER. *Affri hardness tester* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://lowener.dk/wp-content/uploads/2015/03/Affri-shore-tester-brochure.pdf>
- [25] STINSTRUMENTS. *CSM instruments* [online]. [cit. 2015-05-5]. Dostupné z: <http://www.stinstruments.com/uploads/editor/brochures/CSM%20company.pdf>
- [26] ISSU. *Plastics—the facts 2014/2015* [online]. [cit. 2015-05-5]. Dostupné z: http://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/final_plastics_the_facts_2014_19122
- [27] ARBURG. *Allrounder 470H* [online]. [cit. 2015-05-5]. Dostupné z: http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_470H_TD_680311_en_GB.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

E_k	Kinetická energie
E_p	Potencionální energie
F_E	Síla na mezi pružnosti
F_K	Síla na mezi kluzu
S_0	Počáteční průřez zkušebního tělesa
\bar{x}	Aritmetický průměr
x_i	Í-té měření
ε_E	Poměrná deformace na mezi pružnosti
ε_K	Poměrná deformace na mezi kluzu
ε_M	Poměrná deformace na mezi pevnosti
ε_U	Poměrná deformace na mezi úměrnosti
σ_E	Mez pružnosti
σ_K	Mez kluzu
σ_M	Mez pevnosti
σ_U	Mez úměrnosti
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
b_1	Šířka pracovní části
b_2	Šířka upínací části
CD	Kompaktní disk
C_{IT}	Vtiskové tečení
E	Bod meze pružnosti
E_{IT}	Vtiskový modul
F	Síla
F_m, F_{max}	Maximální síla

g	Gravitační konstanta
h	Tloušťka tělíska
h	Konečná hloubka vtisku
h	Horní poloha výšky kladiva
HBW	Hodnota tvrdosti dle Brinella
HDPE	Polyethylen s vysokou hustotou
HIPS	Houževnatý polystyren
H _{IT}	Vtisková tvrdost
HMW-HDPE	Polyethylen s vysokou molekulovou hmotností
HR	Hodnota tvrdosti Rockwella
HV	Hodnota tvrdosti Vickerse
K	Bod meze kluzu
L	Vzdálenost čelistí na počátku
l	Konečná
L ₀	Počáteční měřená délka
l ₀	Počáteční délka
l ₁	Délka pracovní části
l ₂	Vzdálenost mezi širokými částmi
l ₃	Celková vzdálenost
LDPE	Polyethylen s nízkou hustotou
m	Hmotnost
MDPE	Polyethylen se střední hustotou
N	Číselná hodnota (konstanta)
n	Počet měření
P	Bod meze pevnosti

PA 6	Polyamid 6
PA 612	Polyamid 612
PA 66	Polyamid 66
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetereterketon
PET	Polyethylentereftalát
PI	Polyimid
PMMA	Polymethylmethakrylát
POM	Polyoxymethylén
PP	Polypropylen
PPO	Polyfenylenoxid
PPS	Polyfenylsulfid
PS	Polystyren
PSU	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVAC	Polyvinylacetát
PVAL	Polyvinylalkohol
PVC	Polyvinylchlorid
R	Poloměr
S	Bod přetržení
S	Plocha
S	Jeden dílek stupnice
s	Směrodatná odchylka
SAN	Kopolymer styrenu s akrylonitrilem
SBS	Styrenový blokový kopolymer

T_g	Teplota skelného přechodu
T_m	Teplota tání
TPE	Termoplastické elastomery
TPO	Termoplastické olefiny
TPU	Termoplastické polyuretany
U	Bod meze úměrnosti
UHMW-HDPE	Polyethylen s ultra vysokou molekulovou hmotností
ULDPE	Polyethylen s velmi nízkou hustotou
UV	Ultrafialové záření
W_{max}	Energie nutná k přeražení vzorku
Δl	Rozdíl délek
ε	Poměrná deformace
σ	Napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 – Rozdělení polymerů</i>	13
<i>Obr. 2 – Typy makromolekul</i>	15
<i>Obr. 3 – Nadmolekulární struktura amorfních polymerů</i>	16
<i>Obr. 4 – Nadmolekulární struktura semikrystalických polymerů</i>	17
<i>Obr. 5 – Rozdělení polymerů podle aplikace a nadmolekulární struktury</i>	17
<i>Obr. 6 – Poptávka polymerů v Evropě v roce 2011, 2012 a 2013</i>	19
<i>Obr. 7 – Rozměry zkušebního tělesa pro zkoušku tahem]</i>	48
<i>Obr. 8 – Typy pracovních diagramů plastických hmot</i>	50
<i>Obr. 9 – Popis pracovního diagramu tahové zkoušky</i>	51
<i>Obr. 10 – Schématické znázornění zkoušky tvrdosti podle Brinella</i>	53
<i>Obr. 11 – Schématické znázornění zkoušky tvrdosti podle Vickerse</i>	54
<i>Obr. 12 – Typy hrotů pro metodu Shore</i>	55
<i>Obr. 13 – Schéma Charpyho kladiva</i>	57
<i>Obr. 14 – Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 470 H</i>	60
<i>Obr. 15 – Zwick Roell 1456</i>	62
<i>Obr. 16 – Srovnání modulu pružnosti v tahu</i>	63
<i>Obr. 17 – Srovnání meze pevnosti v tahu</i>	63
<i>Obr. 18 – Srovnání maximální síly</i>	64
<i>Obr. 19 – Tvrdoměr OMAG Affri ART 13</i>	65
<i>Obr. 20 – Srovnání tvrdosti Shore D</i>	65
<i>Obr. 21 – Přístroj Micro-Combi Tester pro měření mikrotvrdosti</i>	66
<i>Obr. 22 – Srovnání závislosti indentační síly na indentační hloubce</i>	67
<i>Obr. 23 – Srovnání závislosti indentační hloubky na času indentace</i>	67
<i>Obr. 24 – Srovnání vtiskové tvrdosti</i>	68
<i>Obr. 25 – Srovnání vtiskového modulu</i>	69
<i>Obr. 26 – Srovnání vtiskového tečení</i>	69
<i>Obr. 27 – Srovnání deformační práce</i>	70
<i>Obr. 29 – Přístroj Zwick Roell HIT50P</i>	71
<i>Obr. 29 – Srovnání maximální síly</i>	71
<i>Obr. 30 – Srovnání energie potřebné k přeražení</i>	72

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 – Dělní polyethylenů dle hustoty</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 2 – Přibližné vlastnosti HDPE.....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 3 – Přibližné vlastnosti PP</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 4 – Přibližné vlastnosti neměkčeného PVC</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 5 – Přibližné vlastnosti PS.....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 6 – Přibližné vlastnosti SAN</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 7 – Přibližné vlastnosti ABS</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 8 – Přibližné vlastnosti PA 6 plněného skelným vláknem</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 9 – Přibližné vlastnosti PA 66 plněného skelným vláknem</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 10 – Přibližné vlastnosti PA 612 plněného skelným vláknem</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 11 – Přibližné vlastnosti PMMA.....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 12 – Přibližné vlastnosti PET plněného skelným vláknem</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 13 – Přibližné vlastnosti PET plněného skelným vláknem</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 14 – Přibližné vlastnosti POM.....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 15 – Přibližné vlastnosti PPO plněného skelným vláknem.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 16 – Přibližné vlastnosti PTFE.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 17 – Přibližné vlastnosti PEEK</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 18 – Přibližné vlastnosti PI</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 19 – Přibližné vlastnosti PPS plněného skelným vláknem</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 20 – Přibližné vlastnosti PSU plněného skelným vláknem</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 21 – Přibližné vlastnosti tvrdého TPU</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 22 – Přibližné vlastnosti tvrdého TPO</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 23 – Přibližné vlastnosti tvrdého SBS.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 24 – Rozměry zkušební tělesa pro zkoušku tahem</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 25 – Základní parametry vstřikovacího stroje.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 26 – Zpracovatelské podmínky pro polyamidy</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 27 – Zpracovatelské podmínky pro kopolymer styrenu s akrylonitrilem.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 28 – Zpracovatelské podmínky pro polykarbonáty.....</i>	<i>61</i>