

Polymery jako konstrukční materiály

Petr Stuchlík

Bakalářská práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr STUHLÍK**
Osobní číslo: **T08654**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Polymery jako konstrukční materiály**

Zásady pro vypracování:

- 1) Vypracujte literární rešerši na dané téma
- 2) Charakterizujte vybrané plasty
- 3) Popište možnosti modifikace vlastností polymerů
- 4) Připravte zkušební tělesa a zjistěte vlastnosti vybraných konstrukčních polymerů

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího BP

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

14. února 2011

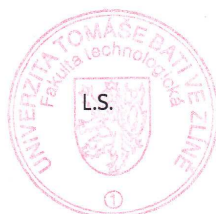
Termín odevzdání bakalářské práce:

3. června 2011

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
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 užit 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 20. 5. 2011



.....

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:

(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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je porovnání mechanických vlastností vybraných polymerů s kovovými materiály. Práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou.

V teoretické části je popsáno obecné rozdělení plastů. Dále jsou specifikovány mechanické vlastnosti, tepelná odolnost, použití jednotlivých druhů polymerů se zařazením do skupin – běžných, konstrukčních a speciálních plastů, a jejich základní mechanické zkoušky.

Praktická část srovnává jednotlivé skupiny polymerů s kovovými materiály s využitím specifické pevnosti v tahu. Dále popisuje tahovou zkoušku a předkládá závěrečné zhodnocení výsledků.

Klíčová slova: plasty, polymery, pevnost v tahu, modul pružnosti, zkouška tahem

ABSTRACT

The purpose of Bachelor thesis is to compare the mechanical properties of polymers with metallic materials. The thesis is divided into theoretical part and practical part.

The theoretical part describes the general distribution of plastic.

The following are specified mechanical properties, thermal resistance, the use of individual types of polymers are classified into groups - standard, engineering and hi-tech plastics, and basic mechanical tests.

The practical part of the compares each groups of polymer with metallic materials for the use of specific tensile strength. It also describes the tensile test and submits the final evaluation of results.

Keywords: plastics, polymers, tensile strength, modulus, tensile test

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Miroslavu Maňasovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a velkou ochotu, kterou mi při vypracování bakalářské práce věnoval. Dále bych chtěl také poděkovat panu Ing. Zdeňku Holíkovi za pomoc a ochotu při laboratorním měření.

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

Ve Zlíně 20. 5. 2011


.....

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA PLASTŮ	13
1.1 DĚLENÍ PLASTŮ	13
1.1.1 Dle aplikace složitosti výroby plastových dílců.....	13
1.1.2 Dle teplotního chování	14
1.1.3 Dle nadmolekulární struktury	15
1.1.4 Dle druhu přísad (plněné a neplněné plasty).....	17
1.1.5 Dle polaritý.....	17
1.1.6 Dle chemické struktury	17
1.1.7 Dle původu	17
1.1.8 Dle druhu polymerních makromolekul	17
2 PŘÍSAKY DO POLYMERŮ	19
2.1 ZPRACOVATELSKÉ PŘÍSAKY	19
2.1.1 Plastikační činidla	19
2.1.2 Maziva.....	19
2.1.3 Separační činidla	19
2.1.4 Pomocné zpracovatelské prostředky	20
2.1.5 Změkčovadla	20
2.1.6 Tepelné stabilizátory	20
2.2 ANTIDEGRADANTY	20
2.2.1 Světelné stabilizátory	20
2.2.2 Antioxidanty.....	21
2.2.3 Antiozonanty	21
2.3 SÍŤOVACÍ PROSTŘEDKY	21
2.3.1 Síťovací činidla	22
2.3.2 Aktivátory síťování	22
2.3.3 Urychlovače síťování	22
2.4 PŘÍSAKY OVLIVŇUJÍCÍ DALŠÍ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	23
2.4.1 Plniva.....	23
2.4.2 Nadouvadla	24
2.4.3 Pigmenty	24
2.4.4 Opticky zjasňující látky.....	24
2.5 ZVLÁŠTNÍ PŘÍSAKY.....	24
2.6 OZAŘOVÁNÍ PLASTŮ	25
3 SPECIFIKACE STANDARDNÍCH POLYMERŮ	26
3.1 POLYOLEFÍNY.....	26
3.1.1 Polyetylen (PE)	26
3.1.2 Polypropylen (PP)	28
3.2 STYRENOVÉ POLYMERY	29
3.2.1 Polystyren (PS).....	30
3.2.2 Kopolymer styren-akrylonitril (SAN).....	31
3.2.3 Kopolymer akrylonitril-butadien-styren (ABS).....	32
3.2.4 Kopolymer akrylonitril-styren-akrylát (ASA)	33

3.3	POLYMETYLMETAKRYLÁT (PMMA).....	34
3.3.1	Kopolymery esterů kyseliny metakrylové	35
4	SPECIFIKACE KONSTRUKČNÍCH POLYMERŮ	36
4.1	POLYAMIDY (NYLON).....	36
4.1.1	Polyamid 6 (PA6).....	37
4.1.2	Polyamid 66 (PA66).....	38
4.1.3	Polyamid 612 (PA612).....	38
4.1.4	High temperature Nylon a jeho vlastnosti (HTN).....	39
4.1.5	Polyarilamidy (aromatické polyamidy).....	40
4.1.6	Poly (m – fenylenisoftalamid) (Nomex)	40
4.1.7	Poly(p-fenylentereftalamid) (Kevlar).....	41
4.2	POLYKARBONÁT (PC)	41
4.3	POLYOXYMETYLEN – POLYACETAL – POLYFORMALDEHYD (POM).....	42
4.4	POLYETYLENTEREFTALÁT (PET)	44
4.5	POLYBUTYLENTEREFTALÁT (PBT).....	45
4.6	POLYVINYLCHLORID (PVC)	46
4.7	POLYESTER ALKYD (PAK)	48
4.8	POLYFENYLÉN OXID (PPO)	48
4.9	POLYMERY S TEKUTÝMI KRYSTALY (LCP)	49
5	SPECIFIKACE SPECIÁLNÍCH POLYMERŮ.....	51
5.1	POLYIMIDY (PI).....	51
5.2	POLYÉTERIMIDY (PEI)	52
5.3	POLYTETRAFLUORETYLEN (PTFE)	53
5.4	POLYÉTERÉTERKETON (PEEK)	54
5.5	POLYFENYLÉN SULFID (PPS).....	55
5.6	POLYSULFON (PSU)	56
5.7	TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY (TPE).....	57
5.7.1	Termoplastický polyuretanový elastomer (TPU).....	58
5.7.2	Styrenový blokový kopolymer (SBS)	59
5.7.3	Termoplastický polyolefinový elastomer (TPO)	60
6	STATICKÉ MECHANICKÉ ZKOUŠKY	62
6.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA	62
6.1.1	Zkušební tělesa.....	63
6.1.2	Pracovní diagram tahové zkoušky	64
6.1.2.1	Mez úměrnosti R_U (σ_U).....	66
6.1.2.2	Mez pružnosti R_e (σ_E)	67
6.1.2.3	Mez kluzu R_K (σ_K)	67
6.1.2.4	Mez pevnosti v tahu	67
6.2	ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	68
6.2.1	Zkouška tvrdosti podle Brinella	68
6.2.2	Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	69
6.2.3	Zkouška tvrdost podle Rockwella.....	69
6.2.4	Metoda Shore	69
6.2.5	Metoda IRHD	69

6.3	RÁZOVÁ ZKOUŠKA (CHARPYHO KLADIVO).....	69
6.4	KRÍP U PLASTŮ	70
II PRAKTICKÁ ČÁST		72
7	SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH SKUPIN POLYMERŮ SE ZÁKLADNÍMI KOVOVÝMI MATERIÁLY	73
7.1	SROVNÁNÍ HUSTOTY A R_M STANDARDNÍCH PLASTŮ S KOVOVÝMI MATERIÁLY	74
7.1.1	Specifická pevnost v tahu R_{ms} u semi-krystalických standardních plastů	76
7.1.2	Specifická pevnost v tahu R_{ms} u amorfních standardních plastů	77
7.2	SROVNÁNÍ HUSTOTY A R_M KONSTRUKČNÍCH PLASTŮ S KOVOVÝMI MATERIÁLY	79
7.2.1	Specifická pevnost v tahu R_{ms} u semi-krystalických konstrukční plasty	81
7.2.2	Specifická pevnost v tahu R_{ms} u amorfních konstrukčních plastů	82
7.3	SROVNÁNÍ HUSTOTY A R_M SPECIÁLNÍCH PLASTŮ S KOVOVÝMI MATERIÁLY	83
7.3.1	Specifická pevnost v tahu R_{ms} u semi-krystalických speciálních plastů	85
7.3.2	Specifická pevnost v tahu R_{ms} u amorfních speciálních plasty	86
8	TAHOVÁ ZKOUŠKA	88
8.1	VZTAHY PRO VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	89
8.2	NAMĚŘENÁ DATA	91
8.2.1	Pevnost v tahu σ_M	92
8.2.2	Modul pružnosti E	94
8.2.3	Poměrná deformace při maximálním napětí ε_M	95
8.2.4	Deformace při maximální síle ε_{FM}	96
8.3	SROVNÁNÍ DURAMIDU PA (60% SV) S KOVOVÝMI MATERIÁLY	97
ZÁVĚR		99
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		102
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		104
SEZNAM OBRÁZKŮ		107
SEZNAM TABULEK		109
SEZNAM PŘÍLOH		111

ÚVOD

Každá doba lidské existence na tomto světě s sebou nese i nějaké přirovnání, ať už to byla v pravěku doba kamenná, bronzová, nebo následně železná, tak ta dnešní by se dala určitě označit, jako „doba polymerní“. Polymery se staly nezbytnou součástí našeho běžného života.

Po více než stoleté existenci plastů objevujeme stále nové druhy polymerů, ale především zkoumáme zdokonalení a přizpůsobení jejich vlastností daným požadavkům. Polymerní materiály s výhodou využíváme jako náhradu jiných materiálů, a to především díky jejich cenové dostupnosti, rozsáhlé škále jednotlivých druhů polymerů, variabilitě zpracování a rozmanitosti fyzikálních vlastností.

Tato bakalářská práce má ukázat, že i polymerní materiály mohou vzhledem ke své nižší hustotě a pevnosti v tahu dosahovat podobných nebo i výhodnějších vlastností než kovové materiály. Zaměřuje se především na specifickou pevnost v tahu, která zohledňuje kromě již zmíněné pevnosti, i hustotu daného materiálu.

Bakalářská práce porovnává specifickou pevnost v tahu vybraných polymerů ze skupin standardních, konstrukčních a speciálních plastů s kovovými materiály. Zabývá se i tahovou zkouškou polymeru Duramid PA s následným vyhodnocením naměřených výsledků a porovnáním s kovy.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA PLASTŮ

Plasty jsou obecně makromolekulární látky o molekulové hmotnosti vyšší než 10^4 a z chemického hlediska jsou to látky organické. Podstatou polymerů je makromolekulární látka přírodního nebo syntetického původu, která je tvářitelná za působení teploty T a tlaku p . V jejich makromolekulách se jako článek řetězce mnohokrát opakuje základní monomerní jednotka. Základním prvkem řetězce je atom uhlíku. Uhlíkové atomy mají schopnost vzájemně se vázat a vytvářet dlouhé řetězce. [1]

V současnosti existuje několik tisíc druhů plastů. Ovšem využitelnost ve výrobě nachází jen několik desítek z nich. Více než 2/3 celosvětové výroby zauímají pouze 3 druhy plastů (polyolefiny, styrenové hmoty a polyvinylchlorid). Momentální vývoj v oblasti plastů je rozdělen na dva úseky - výroba nových polymerů, a modifikace již známých polymerů. [4]

1.1 Dělení plastů

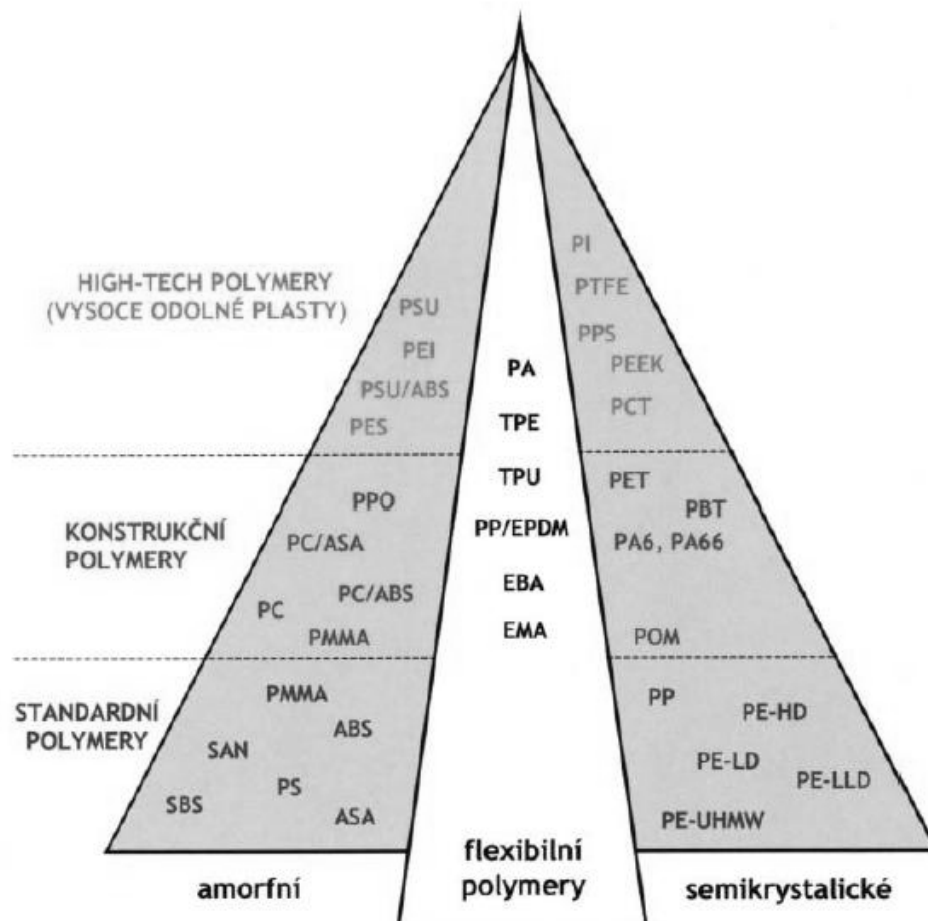
- dle aplikace a složitosti výroby plastových dílců (komoditní, konstrukční, speciální)
- dle teplotního chování (termoplasty, reaktoplasty a kaučuky, pryže, elastomery)
- dle nadmolekulární struktury (amorfní, krystalické)
- dle druhu přísad (plněné a neplněné plasty)
- dle polaritity (polární, nepolární)
- dle chemické struktury (polyolefiny, styrenové plasty, polyamidy aj.)
- dle původu (přírodní, syntetické)
- dle druhu polymerních makromolekul (lineární, rozvětvené a zesíťované) [1]

1.1.1 Dle aplikace složitosti výroby plastových dílců

- **Standardní (dále též komoditní)** – plasty pro široké použití, velké objemy výroby, patří zde – polyolefiny (PE, PP), polystyrénové hmoty (PS), polyvinylchlorid (PVC), fenolformaldehydové (PF) a močovinoformaldehydové hmoty (UF), aj.
- **konstrukční** – plasty, které jsou schopny vydržet namáhání v konstrukčních aplikacích, lze mezi ně zařadit polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyoximetylen (POM), polymethylmetakrylát (PMMA), terpolymer ABS, polyethyltereftalát (PET), polybutyltereftalát (PBT), kopolymery styren-akrylonitril (SAN), poly-

mer ASA, polyfenilénoxid (PPO), polyuretan (PU), epoxidové (EP) a polyesterové (UP) pryskyřice, aj.

- **speciální (dále též high - tech)** – plasty pro špičkové aplikace, které mají především odolnost vůči vysoké teplotě, do kterých lze zařadit polysulfon (PSU), polyfenylénsulfid (PPS), polytetrafluoretylén (PTFE), polyimidy (PI), aj. [2]



Obr. 1: Rozdělení polymerů dle aplikace a nadmolekulární struktury [5]

1.1.2 Dle teplotního chování

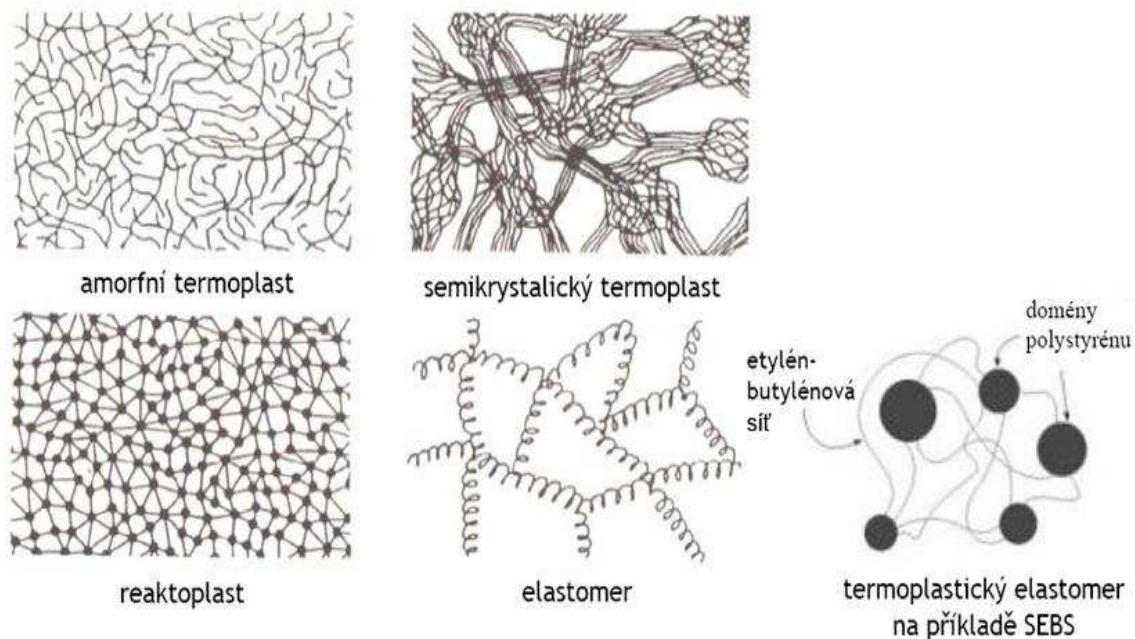
- **termoplasty** – jedná se o polymerní materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu, do stavu vysoce viskózních neneutronovských kapalin, kde je lze snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání T_m (semikrystalické plasty), resp. teplotu viskózního toku T_f (amorfní plasty). Protože při zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury, lze proces měknutí a následného tuhnutí opakovat teoreticky bez omezení. Jedná se pouze o fyzikální proces. K termoplastům patří většina zpracovávaných

hmot, jako je polyetylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA), atd. [1]

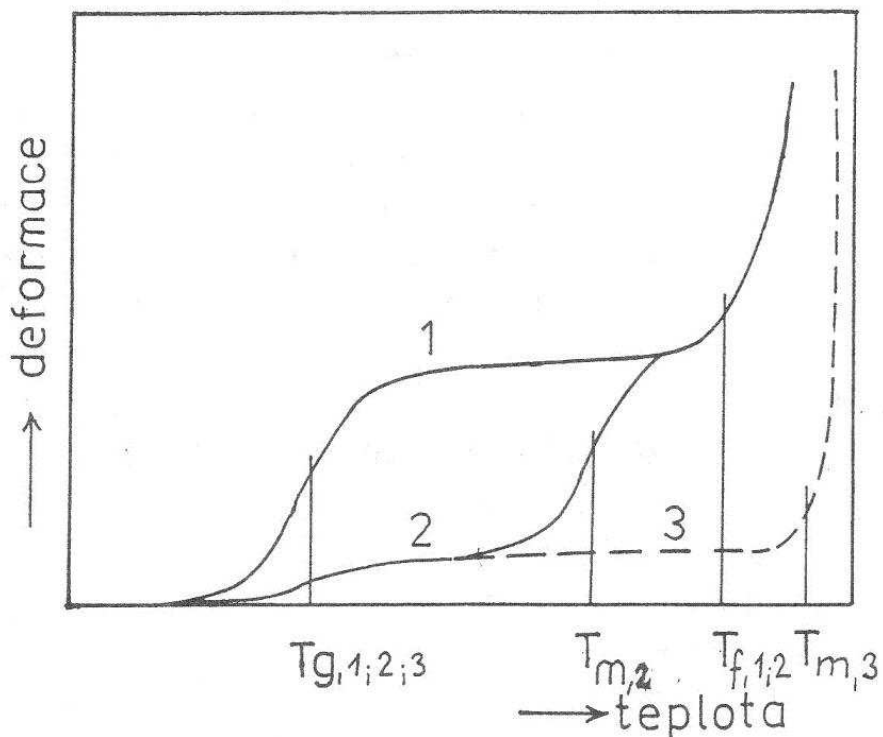
- **reaktoplasty** – jedná se o polymerní materiály, dříve nazývané termosety, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury, k tzv. vytvrzování. Výrobek je možno považovat za jednu velkou makromolekulu. Ochlazování reaktoplastů probíhá mimo nástroj, neboť zajištění rychlého ohřevu formy pro vytvrzení a následné rychlé ochlazení materiálu by bylo obtížné. Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit, dalším zahříváním dojde k rozkladu hmoty (degradaci). Patří sem fenolformaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty, apod. [1]
- **kaučuky, pryže a elastomery** – jedná se o polymerní materiály, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury, probíhá tzv. vulkanizace. U elastomerů na bázi termoplastů nedochází ke změnám chemické struktury, proces měknutí a následného tuhnutí lze opakovat teoreticky bez omezení, probíhá zde pouze fyzikální děj. [1]

1.1.3 Dle nadmolekulární struktury

- **amorfní plasty** – jejich makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici. Jsou charakteristické tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností a modulem pružnosti. Vzhledem k nízkému indexu lomu (1,4 až 1,6) jsou průhledné, resp. dle propustnosti světla čiré (92 % propustnosti světla), transparentní anebo průhledné (60 % propustnosti světla). Použitelnost amorfních polymerů je do teploty zesíťování T_g . Patří sem např. PS, PMMA, PC, aj. [1]
- **krystalické (semikrystalické) plasty** – vykazují určitý stupeň uspořádanosti. Ten se označuje jako stupeň krystalinity (pohybuje se od 30 do 90 %). Jsou mléčně zakalené, index lomu světla je větší, a jsou charakterizovány houževnatostí materiálu. Jejich pevnost a modul pružnosti roste se stupněm krystalinity. Použitelnost semikrystalických plastů je do teploty tání T_m . Patří sem PE, PP, PA, PTFE, POM, aj. [1]



Obr. 2: Nadmolekulární struktura polymerů [1]



Obr. 3: Termomechanická křivka amorfního (1) a dvou různých semi-krystalických (2,3) polymerů, T_g – teplota zesklnění, T_m – teplota tání, T_f – teplota toku [3]

Teplota T_m ohraničuje oblast krystalického stavu, teplota T_g oblast sklovitého (amorfního), rozmezí teplot T_g a T_f odpovídá kaučukovité oblasti, ve které se deformace s teplotou velmi

málo mění a je převážně vratná. Teprve v oblasti teploty toku vede zahřívání k poměrně náhlému a značnému růstu deformace, neboť se začne projevovat viskózní tok vyznačující se nevratnou deformací. Nad touto teplotou se polymer nachází v plastickém stavu. [3]

Z toho plyne, že u amorfních polymerů se vyskytují teploty T_g , T_f a u polymerů semikrystalických teploty T_g , T_f , T_m .

1.1.4 Dle druhu přísad (plněné a neplněné plasty)

- **neplněné plasty** – neplněný plast je takový plast, u kterého množství přísad neovlivňuje vlastnosti polymerní matrice.
- **Plněné plasty** – plnivo ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti plastu. Makromolekulární látka plní funkci pojiva a určuje základní fyzikální a mechanické vlastnosti hmoty. Přísadou mohou být plniva, stabilizátory, maziva, barviva, změkčovadla, iniciátory, nadouvadla, tvrdidla, retardéry hoření, apod. [1]

1.1.5 Dle polarity

- **polární plasty** – mají trvalý dipól a mezi polární plasty patří PA, některé pryskyřice, apod.
- **nepolární plasty** – nemají trvalý dipól a patří sem PE, PP, PS, apod. [1]

1.1.6 Dle chemické struktury

Dle chemické struktury plastů se odvodily chemické názvy, plasty proto můžeme dělit na skupiny (polyolefiny, polydieny, polystyrenové plasty, polyamidy aj.) [1]

1.1.7 Dle původu

Dle původu se polymery dělí na (zastaralé dělení, neboť nepostihuje plasty výstižným způsobem):

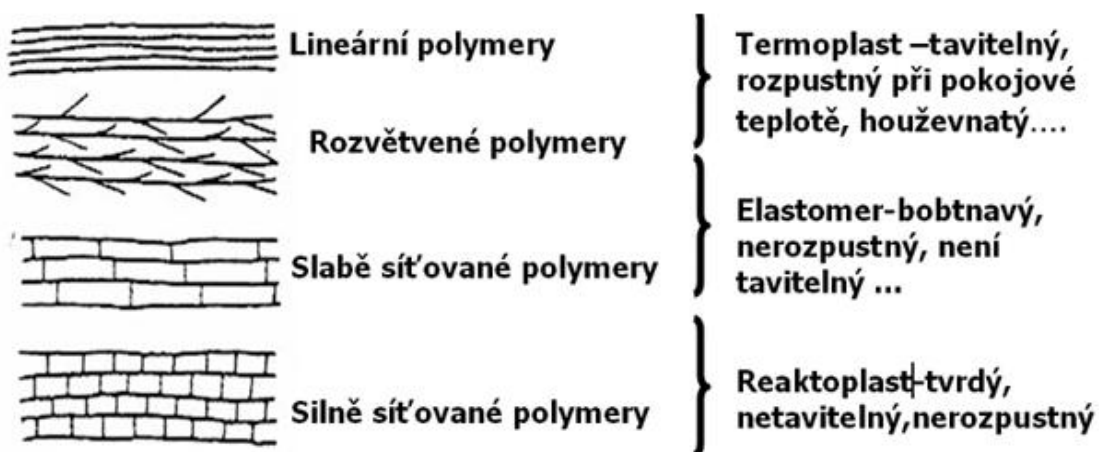
- **přírodní** – jsou založeny na přírodních makromolekulárních látkách, např. na bázi celulózy, latexu, kaseinu, atd.
- **syntetické** – k výrobě je použita chemická cesta. [1]

1.1.8 Dle druhu polymerních makromolekul

- **lineární makromolekuly** – vznikají tak, že se monomerní molekuly řadí jedna vedle druhé „jako korálky na šňůře perel“. Lineární makromolekuly se mohou z prostorových důvodů více přiblížit jedna ke druhé a vyplnit tak kompaktnější

prostor. Polymery potom mají vyšší hustotu. Plasty s lineárními makromolekulami jsou obvykle dobře rozpustné a tavitelné (dobrá pohyblivost makromolekul), v tuhém stavu se vyznačují houževnatostí a ve formě tavenin dobrou zpracovatelností. [1]

- **rozvětvené makromolekuly** – se vyznačují tím, že mají na základním řetězci boční větve („přívěsek na šňůře perel“). Rozvětvené makromolekuly se na rozdíl od lineárních makromolekul nemohou v důsledku bočních větví jedna ke druhé dostatečně přiblížit. Proto se vyznačují nižší hodnotou hustoty. Rozvětvení zhoršuje i pohyblivost makromolekul a tedy i tekutost v roztaveném stavu. Boční řetězce, které způsobují oddálení sousedních makromolekul, mají za následek pokles mezimolekulárních sil a tím zhoršení většiny mechanických vlastností. [1]
- **zesíťované makromolekuly** - v tomto případě je několik přímých nebo rozvětvených makromolekulárních řetězců mezi sebou propojeno vazbami, takže vytvářejí jednu takřka nekonečnou makromolekulu - prostorovou síť. Takováto síť vede ke ztrátě tavitelnosti a rozpustnosti polymeru. Polymery vykazují vysokou tvrdost, tuhost a odolnost proti zvýšené teplotě, avšak nízkou odolnost proti rázovému namáhání. Sítě mohou být řídké (charakteristické pro elastomerní kaučukovité polymery) nebo husté (reaktoplasty). [1]



Obr. 4: Tvary makromolekul pro různé typy plastů [1]

2 PŘÍSAKY DO POLYMERŮ

Požadavky kladené na výrobky z polymerů jsou tak různorodé, že prakticky nepřichází v úvahu používání samotných, čistých polymerů, ale jen upravených dalšími látkami - přísadami, které spolu s polymery tvoří polymerní směsi. Koncentrace přísad v polymerní směsi se obvykle vyjadřuje ve hmotnostních dílech přísady připadajících na 100 hmotnostních dílů polymeru a označuje se dsp (díů na sto polymerů), v případě kaučukových směsí dsk (díů na sto kaučuků). V anglosaské literatuře se se používá ekvivalent českého dsk, tj. phr. (parts per hundred of rubber). [3]

2.1 Zpracovatelské přísady

Jedná se o přísady, které usnadňují, nebo i umožňují přípravu a zpracování polymerních směsí. Každá přísada buď více či méně ovlivňuje jak vlastnost polymerních směsí, tak produktu, který je výsledkem jejího zpracování. [3]

2.1.1 Plastikační činidla

Plastikační činidla usnadňují první operaci zpracování kaučuku, tzv. plastikaci. (úprava kaučuku intenzivním hnětením), zvětšují účinnost a rychlost plastikace, protože usnadňují štěpení makromolekul. Jako příklady lze uvést Peptazin BAFD nebo Peptazin BFT. [3]

2.1.2 Maziva

Maziva usnadňují zpracování obtížněji zpracovatelných plastů (PVC, PS, PTFE, aj.), ale také zlepšují mnohé vlastnosti výrobků, např. vzhled povrchu, tepelnou a světelnou stabilitu, odolnost vůči povětrnosti. Dle chemického složení maziva dělíme na uhlovodíky, mastné kyseliny, vosky, těžké alkoholy a vícesytné alkoholy. [3]

2.1.3 Separační činidla

Separační činidla se používají k usnadnění vyjímání výrobků z forem, přispívají tak ke zvýšení produktivity tvářecího zařízení (lis, vstřikovací stroj). Jako příklad lze uvést silikonové oleje, polytetrafluorethylenové disperze ve formě nátěrů nebo nástřiků tvářecích ploch a separační fólie z celofánu nebo polyvinylalkoholu (lépe potisknutelné a lépe vyjímatelné z forem). [3]

2.1.4 Pomocné zpracovatelské prostředky

Pomocné zpracovatelské prostředky nachází využití zejména ke snížení viskozity kaučkové směsi, bez negativního ovlivnění vlastností pryžového výrobku. Dělíme na mastné kyseliny a jejich deriváty a pryskyřičné produkty. [3]

2.1.5 Změkčovadla

Změkčovadla jsou málo těkavé organické látky, které poskytují polymerům ohebnost, tvárnost, vláčnost a snižují teplotu jejich zesklnění a viskozitu jejich taveniny. Pro nepolární kaučuky se užívají olejové produkty rafinace ropy, nebo vedlejší produkty zpracování uhelných dehtů. Pro polární kaučuky to jsou syntetická změkčovadla, nejčastěji estery dikarboxilových kyselin. Do termoplastů (hlavně polárních) se užívají změkčovadla jako ftaláty, adipáty, sebakáty. [3]

2.1.6 Tepelné stabilizátory

Tepelné stabilizátory umožňují tvarování za tepla a tváření polymerů, jejichž teploty měknutí a rozkladu leží v úzkém rozmezí. Na tepelný stabilizátor jsou kladeny následující požadavky:

- zamezit odštěpování
- zabraňovat vzniku nežádoucích barevných struktur
- být snášitelný s polymerem

Dělí se na stabilizátory založené na solích anorganických i organických kyselin (organocítní stabilizátory, aj.) a stabilizátory organické (epoxidové sloučeniny, fosfidy, aj.) [3]

2.2 Antidegradanty

Jako antidegradanty označujeme skupinu přísad, které dlouhodobě chrání výrobky před vnějšími vlivy během jejich používání. K těmto vlivům patří především účinek slunečního světla, atmosférického kyslíku, ozonu a tepelné energie. [3]

2.2.1 Světelné stabilizátory

Jejich hlavní funkcí je absorpce ultrafialového záření (UF - elektromagnetické záření o délce od 300 nm do 400 nm), nesmějí jej propouštět. UF záření přeměňují na záření

pro polymery neškodné – dlouhověké. Dle chemické struktury lze světelné stabilizátory rozdělit:

- deriváty benzofenonu
- deriváty kyseliny salicylové
- deriváty benzotriazolu
- sférické (tzn. porstorově) stíněné aminy

Světelně stabilizační účinek vykazují také některé pigmenty (hlavně oxid titaničitý a zinečnatý). Největší účinek mají ovšem aktivní saze. Zejména v případě polyetyleny jsou nejstarším a dosud nejúčinnějším ochranným prostředkem proti povětrnostním vlivům. [3]

2.2.2 Antioxidanty

Vzdušný kyslík způsobuje degradaci polymerů. Toto oxidační stárnutí se za běžné teploty projeví až po dlouhé době. Ovšem za zvýšené teploty se významně urychluje, a proto mluvíme o tzv. tepelně-oxidačním stárnutí. Dělí se do dvou skupin, dle účinku:

- látky, které přerušují řetězovou autooxidační reakci (deriváty aminů a fenolů)
- látky, které zabraňují vzniku (iniciaci) řetězové autooxidační reakce (estery kyseliny fosforité, thioly a sulfidy)

Další dělení je dle barvitelnosti – nebarvící, barvící, zbarvující [3]

2.2.3 Antiozonanty

Antiozonanty jsou přísady, které brání praskání pryže (vyrobené z nenasyčených kaučuků) ozonem. Dělí se stejně jako antioxidanty dle barvitelnosti na zbarvující (disubstitované deriváty 1,-4fenylendiaminu) a nezbarvující (tributylthiomocovina). [3]

2.3 Síťovací prostředky

Síťovací prostředky jsou látky, které se účastní síťovacích reakcí, tj. spojování lineárních nebo rozvětvených makromolekulárních řetězců příčnými vazbami do struktury prostorové sítě. [3]

2.3.1 Síťovací činidla

Síťovací činidla jsou nejdůležitějším prostředkem samotného síťování polymerů, bez nich by to nebylo možné. U síťování kaučuků mluvíme o vulkanizaci, u síťování reaktoplastů o vytvrzování, u termoplastů zatím nemáme zvláštní označení. [3]

Nejdůležitějšími průmyslově používanými prostředky k síťování termoplastů jsou organické peroxidy (slouží také k vulkanizaci kaučuků), záření o vysoké energii (zejména záření γ), svazky urychlených elektronů a pro fóliové materiály ultrafialové světlo.

- vulkanizační činidla – nejpoužívanější je přírodní mletá síra, dále selen, telur, oxidy kovů, aj.
- vytvrzovací činidla – kyseliny, hexamethylentetramin, organické peroxidy [3]

2.3.2 Aktivátory síťování

Aktivátory aktivují síťovací reakci, tj. zmenšují její aktivační energii. To se projevuje menší závislostí rychlosti síťování na teplotě. Druhou významnou vlastností aktivátorů síťování je jejich vliv na výsledek síťovací reakce, jejíž účinnost v podstatě zvětšují. V jejich přítomnosti vznikne tudíž více příčných vazeb, než v jejich nepřítomnosti. Lze je rozdělit dle prostředku, který síťování způsobuje na aktivátory:

- vulkanizace sírou a donory síry
- síťování peroxidy
- radiační síťování (senzibilizátory) [3]

2.3.3 Urychlovače síťování

V některých případech reakce síťovacího činidla s polymerem probíhá velmi pomalu, což je z ekonomického hlediska nevýhodné. Proto se síťovací reakce urychlují tzv. urychlovači síťování. [3]

- urychlovače sirné vulkanizace – pomalé (guanidiny), rychlé (thiazoly, sulfonamidy), velmi rychlé (thiuramsulfidy), ultra-rychlé (dithiokarbamáty, xantáty)
- urychlovače vytvrzovací – soli kovů organických kyselin, aminy, zásady připravené pomocí reakcí fenolů, formaldehydu a dimethylaminu aj. [3]

2.4 Přísady ovlivňující další fyzikální vlastnosti

2.4.1 Plniva

Obecně je možno říci, že plnivy lze zlepšovat mechanické vlastnosti polymerních materiálů (např. zvyšovat pevnost, odolnost vůči oděru, houževnatost, tuhost), jejich odolnost vůči teple, ohni, korozi, stárnutí, ovlivňovat vzhled výrobku, ale i jeho cenu. [3]

Polymerní materiály s plnivou se nazývají kompozitními materiály. Kompozitní materiál je definován, jako materiálová struktura, která vznikne spojením dvou nebo více materiálů odlišných vlastností. Jako plniv se používají plniva: [8]

- Částicová – tato plniva obecně zvyšují viskozitu taveniny (zhoršují její tekutost), zvyšují tvrdost, tuhost a tepelnou odolnost. Specifické typy částicových plniv (např. grafit, MoS_2) zlepšují kluzné vlastnosti, další snižují povrchový a vnitřně izolační odpor, zvyšují tepelnou vodivost (grafit, uhlíková vlákna, kovová vlákna, aj.) Dále mezi částicová plniva řadíme například – skleněné mikrokuličky (balotina), talek (mastek), kaolin, mikromletý křemen, vápenec a další minerály, koks, saze, aerosol, slídu, kysličníky kovů, sírany, sírníky, práškové kovy a jejich slitiny, polymerní prášky, dřevo atd. [8]
- Vytuzující – tato plniva zvyšují v kompozitu jeho pevnost, tuhost, tvarovou stálost, odolnost k toku za studena a naopak snižují jeho ohebnost, tažnost, smrštění a kluzné vlastnosti s výjimkou uhlíkových vláken. Největší uplatnění mají skleněná vlákna, dále se používají uhlíková vlákna, vlákna z nerezových ocelí, vláknité monokrystaly kovů, kysličníky kovů a karbidů, vlákna z titanitu alkalických kovů, vlákna aromatických polyamidů, minerální vlna a další. Kompozity s dlouhými vlákny mají oproti těm s krátkými vlákny vyšší mechanické vlastnosti, vyšší vrtbovou houževnatost, méně tečou za studena, mají sníženou průtažnost a jsou velmi stálé za vyšších teplot i ve vlhkém a teplém klimatu. [8]
- Nanoplňniva – díky své velikosti (v nanometrech ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)) se řádově blíží velikosti molekuly termoplastické matrice. To umožňuje velmi blízké spojení matrice a plniva, přičemž interakce mezi částicí a molekulou vytváří na povrchu částice spojenou oblast, která znemožní pohyb příslušné polymerní matrice. Nanočástice tedy zlepšují mechanické vlastnosti polymerní matrice, mohou redukovat obsah přísad nutných k dosažení požadovaných výhod kompozitních materiálů a tím je-

jich použití vede i k redukci hmotnosti konkrétního výrobku v porovnání s tradičními plněnými plasty. Mohou plně nahradit částicová minerální i vláknitá plniva i retardéry hoření. Jejich další výhody jsou nepropustnost, odolnost vůči chemikáliím a navlhavost, zvýšení jakosti povrchu a zvýšení lesku. [8]

2.4.2 Nadouvadla

Nadouvadla jsou přísady, které se při teplotě tváření polymerní směsí rozkládají za vzniku plyných produktů, a dávají tak možnost vzniknout polymeru, jako lehčené hmotě. Ve výrobku vytvoří uzavřené nebo otevřené póry. Plynou složkou je nejčastěji dusík nebo oxid uhličitý. [3]

2.4.3 Pigmenty

Pigmenty jsou barevné prášky nerozpustné v polymerech, kterým jako přísada propůjčují příslušný barevný odstín a kryvost. Rozdělují se dle původu:

- anorganické – křída, sádrovec, grafit, litopon, titanová běloba, citronová žluť, červen H, ultramarín, saze, stabilní chaláty kovů.
- organické
- bronzy (práškové kovy). [3]

2.4.4 Opticky zjasňující látky

Do této skupiny patří látky, které absorbují část ultrafialového světla (od 340nm, do 400 nm). Pohlcené světlo poté vyzařují během osvětlování ve formě tzv. fluorescence, tj. záření o větších vlnových délkách (od 430nm do 460 nm). Vytvářejí v lidském oku dojem, že předmět je jasnější. Použití opticky zjasňujících látek může být problematické v polymerních směsích, které obsahují světelné stabilizátory nebo pigmenty pohlcující UF záření. Jako příklad lze uvést deriváty stilbenu. [3]

2.5 Zvláštní přísady

V této kapitole jsou uvedeny přísady, které se přidávají jen do některých směsí. Propůjčují výslednému polymeru speciální vlastnosti. [3]

Uvádím zde pouze krátký souhrn jejich členění:

- antistatické prostředky – přidávají se do polymerních směsí za účelem zvýšení jejich vodivosti z důvodu opatření proti elektrostatickému nabíjení polymerních materiálů
- faktisy – jedná se o látky, které zlepšují hladkost povrchu a zlepšují dodržování tvaru např. při vytlačování kaučukových směsí
- adhezivní prostředky – jedná se o látky, které řeší problémy adheze (soudržnosti) polymerů k plnivům a vyztužovačům, např. k vláknům, textilu a kovům. V oblasti plastů je to především u vrstvených hmot (laminátů), v oblasti kaučuků hlavně konfekčně vyráběného zboží, jako jsou pneumatiky
- prostředky snižující hořlavost – neboli retardéry hoření nebo zhašedla. Používají se nejčastěji k výrobě nehořlavých nátěrových hmot, lehčených polymerních materiálů určených k aplikacím ve stavebnictví a obalové technice a také některých pryžových výrobků (např. dopravní pásy pro černouhelné doly)
- brusné prostředky [3]

2.6 Ozařování plastů

Vlastnosti polymerů se v dnešní době dají kromě přidavku plniv měnit i tzv. ozařováním plastů. Ve své podstatě jde o to, že místo drahého konstrukčního plastu použijeme běžné polymery. Aby vydržely větší zatížení, přimějeme molekuly ke vzájemnému chemickému propojení a propůjčíme jim mechanické, tepelné a chemické vlastnosti vysoce odolných konstrukčních termoplastů.

Tento postup (síťování) lze precizně řídit beta nebo gama zářením. Energie ze záření je materiálem absorbována a vznikají radikály, které spolu reagují a při následné chemické reakci vytvářejí očekávanou vazbu. [11]

3 SPECIFIKACE STANDARDNÍCH POLYMERŮ

3.1 Polyolefiny

Polyolefiny jsou největší skupinou synteticky vyráběných (standardních) polymerů. Největší podíl na celosvětové produkci mají polyetylen a polypropylen. Mezi hlavní důvody proč jsou tolik využívány, patří – levné petrochemické suroviny (zemní plyn a ropa), specifické užité vlastnosti polyolefinů a jejich snadná zpracovatelnost různými technologickými postupy. [1][4]

3.1.1 Polyetylen (PE)

Polyetylen tvoří širokou paletu produktů s různými zpracovatelskými i užitnými vlastnostmi. Rozmanitost vlastností je výsledkem rozdílu v míře krátkého větvení polymerních řetězců a tím i v obsahu krystalické fáze, a rovněž rozdílu v molekulové hmotnosti jednotlivých typů PE. Produkty s různým stupněm krystalinity se liší hustotou, a právě hustota polymeru, spolu s charakterizací tvaru řetězce, se stala základem pro třídění polyetylenů. Polyetylen patří do skupiny semi-krystalických plastů. [4]

Tab. 1: Třídění PE podle hustoty [4]

Typ	Zkratka	Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$
PE s velmi nízkou hustotou	ULDPE (Ultra - Low density)	0,888-0,915
PE s nízkou hustotou	LDPE (Low Density)	0,910-0,955
Lineární PE nízkou hustotou	LLDPE (Linear Low Density)	0,918-0,955
PE se střední hustotou	MDPE (Medium Density)	0,925-0,940
PE s vysokou hustotou	HDPE (High Density)	0,941-0,954
PE s vysokou molekulovou hmotností	HMW-HDPE (High Molecular Weight HDPE)	0,944-0,954 MH = 200000-500000
PE s ultravysokou molekulovou hmotností	UHMW-HDPE (Ultra-High Molecular Weight HDPE)	0,955-0,957 MH=3000000-6000000

Mezi výhodné charakteristiky PE patří:

- nízká cena a snadná zpracovatelnost
- výborné elektroizolační vlastnosti
- velmi dobrá chemická odolnost

- tuhost i vláčnost při nízkých teplotách
- průhlednost tenkých fólií
- nízká permeabilita vodních par
- zdravotní nezávadnost [4]

Použitelnost PE je omezena z těchto důvodů:

- nízký bod měknutí
- sklonem nízemolekulárních typů k prasknutí pod napětím
- sklonem k oxidaci
- zákalem materiálu v tlustších vrstvách
- voskovitým vzhledem a nízkou odolností proti poškrábání
- nízkou pevností v tahu
- vysokou permeabilitou plynů a hořlavostí [4]

Tab. 2: Vlastnosti PS [4] [9]

Vlastnost	HDPE	LDPE
Typ polymeru	semi-krystalický	semi-krystalický
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	0,941 - 0,967	0,915 - 0,935
Pevnost v tahu [MPa]	18 - 30	7 - 17
Prodloužení při přetržení [%]	100 - 1000	100 - 700
Modul pružnosti [MPa]	689 - 1654	415 - 795
Tvrдость, Shore D	60 - 70	45 - 60
Maximální teplota použitelnosti [°C]	70 - 80	60 - 75
Smrštění [%]	1,1 - 1,4	1,1 - 1,4
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	- 65	- 65
Teplota tání T_m [°C]	125 - 135	100 - 110
Teplota taveniny [°C]	200 - 280	180 - 270
Teplota formy [°C]	10 - 60	10 - 60
Teplota sušení [°C]	65	65
Doba sušení [h]	3	3

Polyetylen nachází uplatnění především při výrobě fólií, na izolaci drátů, a rozmanité spektrum výrobků zhotovených technologiemi vstřikování, vyfukování a vytlačování. [4]

3.1.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen je polymer s mnohostranným využitím. A to hlavně díky možnosti jeho upravení. Dle struktury, lze polypropylen rozlišit na izotaktický PP (všechny metylové skupiny na jedné straně), syndiotaktický PP (metylové skupiny jsou střídavě nad rovinou a pod ní) a ataktický (má statistickou distribuci konfigurací). [4]

Tab. 3: Rozdělení PP dle struktury [4]

Vlastnost	izotaktický	Syndiotaktický	Ataktický
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	0,92 - 0,94	0,8 - 0,91	0,85 - 0,9
Bod tání [°C]	165	135	-
Rozpustnost v uhlovodíku při 20°C	nerozpouští se	střední	vysoká
Pevnost	vysoká	střední	velmi vysoká

Polypropylen patří do skupiny semi-krystalických plastů, a vyniká svými výbornými elektroizolačními vlastnostmi a chemickou odolností. [4]

Polypropylen je svými vlastnostmi velmi podobný HDPE, ale v některých vlastnostech se liší, a to zejména:

- nižší hustota a vyšší bod měknutí,
- dobrá odolnost vůči vroucí vodě (krátkodobá použitelnost do 135°C, dlouhodobá do 100°C)
- vyšší pevnost v tahu a tlaku
- vyšší tvrdost a vyšší odolnost proti oděru
- křehkost při teplotách pod 0°C
- menší propustnost pro plyny
- menší životnost, zejména na povětrnosti (citlivý na oxidaci) [4]

Tab. 4: Vlastnosti neplněného homopolymeru PP [9]

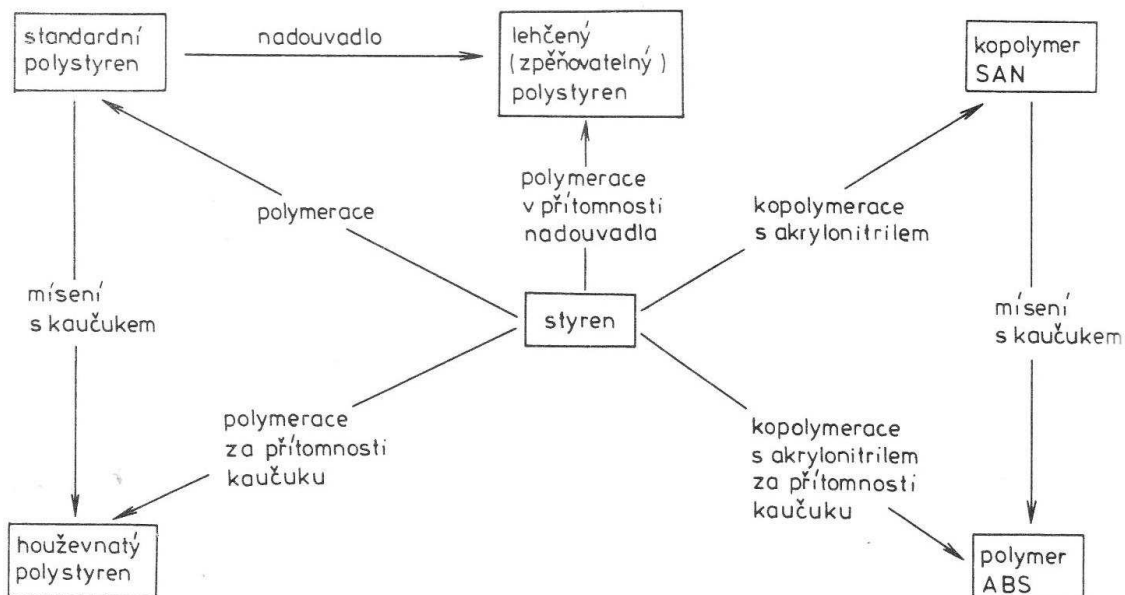
Vlastnost	PP
Typ polymeru	semi-krystalický
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	0,9
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	27,5
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	1172
Maximální teplota použitelnosti [°C]	100
Smrštění [%]	0,5 - 2
Teplota tání T_m [°C]	165 - 170
Teplota taveniny [°C]	200 - 275
Teplota formy [°C]	30 - 80
Teplota sušení [°C]	80
Doba sušení [h]	2 - 3

Polypropylen je vhodný polymer pro výrobky, u nichž je žádána tuhost, mechanická pevnost, a dobré elektroizolační vlastnosti. Jako konkrétní příklady lze uvést např. přístrojové desky automobilů, součásti domácích spotřebičů, hraček, kufrů aj. PP je odolný vůči sterilizačním teplotám – vhodný pro výrobu injekčních stříkaček. Trubky zhotovené z polypropyleny jsou vhodné svojí chemickou odolností na odpady v chemickém průmyslu. Fólie jsou vhodné pro balení potravin. Další velké využití polypropyleny je k výrobě textilních vláken. [4]

3.2 Styrenové polymery

Skupina styrenových polymerů patří na třetí místo v celosvětové produkci výroby polymerů za polyolefiny a polyvinylchloridem. Jedná se o amorfní termoplasty, mezi které zahrnujeme plasty standardní (tj. homopolymery styrenu – lesklé průzračné, ale křehké), dále zpěňovatelné plasty s obsahem nadouvadla (výroba lehčených produktů s výbornými tepelně izolačními vlastnostmi), houževnaté plasty se sníženou křehkostí, (neprůhledné a s nižším leskem). Patří sem také kopolymery styrenu s akrylonitrilem (určené pro aplikace s náročností na odolnost tepelnou, proti rozpouštědlům a mechanickému namáhání) a polymery ABS. [4]

Do skupiny styrenových polymerů patří tedy PS, PS-HI (houževnatý polystyren), SAN, ABS, ABS/SV, ABS – MABS, NAS, ASA a slitiny (směsi) ABS/PA, ABS/PC, ASA/PC. [8]



Obr. 5: Schematická příprava základních skupin polyesterových plastů [4]

3.2.1 Polystyren (PS)

Surovinou pro výrobu polystyrenu jsou etylen a benzen, které reagují ve formě etylbenzenu, a které se dále zpracovávají do monomeru styrenu. [9]

Amorfní polystyren se obvykle zpracovává na další typy polymerů semi-krystalických, jsou to například kaučukem modifikované houževnaté polystyreny MIPS a HIPS, nebo lehčený (expandovaný) polymer EPS. [9]

Samotný polystyren je typický pro svoji jasnost, vysoký lesk, výborné elektroizolační vlastnosti a vhodností pro mnoho aplikací. Za běžných podmínek je polystyren odolný proti tepelné degradaci i oxidaci. Aplikace polystyrenu nejsou do vysokých teplot (použitelnost pouze do 75°C). Není vhodný na venkovní použití, a to z důvodu jeho žloutnutí a křehnutí. Použití na mechanicky namáhané výrobky, které přicházejí do styku s povrchově aktivními látkami (uhlovodíky, freony, alkoholy, tuky) je nevhodné, z důvodu vzniku trhlin koroze při napětí. [4]

Lehčený polystyren (EPS) má velmi dobré tepelně izolační vlastnosti a relativně dobrou pevnost, odolává vibracím. Mezi nevýhody patří vysoká hořlavost a špatná odolnost proti rozpouštědlům. [4]

Vlastnosti houževnatého polystyrenu (HIPS) závisí na obsahu gelovité fáze, na způsobu přípravy i zpracování. Obecně platí, že při zvyšujícím se množství obsaženého kaučuku stoupá rázová houževnatost, ale klesá tvrdost, tepelná odolnost a bod měknutí. [4]

Tab. 5: Vlastnosti PS pro všeobecné použití [9]

Vlastnost	PS
Typ polymeru	amorfní
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,05
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	41,5
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	3102
Maximální teplota použitelnosti [°C]	70 (krátce) - 50 (dlouze)
Smrštění [%]	0,05 - 0,8
Teplota tání T_m [°C]	100
Teplota taveniny [°C]	200 - 250
Teplota formy [°C]	10 - 80
Teplota sušení [°C]	70 - 95
Doba sušení [h]	2 - 3

PS nachází využití převážně v průmyslu spotřebním, obalovém, potravinářském a hračkářském. [4]

EPS nachází uplatnění především ve stavebnictví na izolační vrstvy a v obalovém transportním průmyslu. [4]

HIPS se zpracovává všemi zpracovatelskými technikami, a využití nachází v obalové technice, u hraček, potřeb pro domácnost, elektrotechnice, nábytku aj. [4]

3.2.2 Kopolymer styren-akrylonitril (SAN)

Amorfní kopolymer SAN má ve srovnání se standardním PS o 30 – 40% vyšší rázovou houževnatost, vyšší tvrdost v tahu a v ohybu, a i vyšší tvarovou stálost za tepla. SAN nachází uplatnění především v technické oblasti, a to z důvodu relativně dobré transparence ve spojení s odolností proti nepolárním rozpouštědlům (benzin, olej aj.), odolnosti proti poškrábání, vyšší houževnatosti, nižší sklon ke vzniku trhlin pod napětím a již zmíněné vyšší tvrdosti. Oproti PS má ale vyšší nasákavost (0,3%), horší elektroizolační vlastnosti

a sklon ke žloutnutí – závisí na obsahu akrylonitrilu (čím vyšší obsah, tím klesá odolnost proti žloutnutí, zhoršují se také vlastnosti a schopnost propouštět plyny). [4]

SAN patří do skupiny amorfních plastů, bývá často vyztužen skelnými vlákny a uplatnění nachází v automobilovém průmyslu, ve stavebnictví. [9]

Tab. 6: Vlastnosti neplněného SAN [9]

Vlastnost	SAN
Typ polymeru	amorfní
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,06 - 1,08
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	62 - 82
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	2760 - 3860
Maximální teplota použitelnosti [°C]	85 (krátce) - 80 (dlouze)
Smrštění [%]	0,3 - 0,5
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	100 - 120
Teplota taveniny [°C]	185 - 285
Teplota formy [°C]	0 - 80
Teplota sušení [°C]	70 - 90
Doba sušení [h]	2 - 4

3.2.3 Kopolymer akrylonitril-butadien-styren (ABS)

Kopolymer ABS je kaučukem modifikovaný kopolymer SAN a má podobnou strukturu jako houževnatý polystyren. ABS se vyznačuje malou odolností vůči povětrnosti a světelnému stárnutí, proto se při výrobě používá větší množství světelných stabilizátorů, absorberů UV – záření a vyšší množství černého pigmentu pro stálosti proti foto-oxidačním činidlům. [4]

Charakteristické znaky ABS jsou dobrá houževnatost, dobré mechanické vlastnosti, snadná zpracovatelnost, malý elektrostatický náboj, chemická odolnost, tvrdý a lesklý povrch – je vždy neprůhledný, dobře zpracovatelný všemi technologiemi (vstřikování, válcování, vyfukování, tvarování za tepla, lisování). Mechanickou pevnost lze zvýšit přidáním 20% až 40% skleněné výztuže. [4]

Oproti polystyrenu má výrazně lepší chemickou odolnost, a houževnatost a to při zachování dostatečné tuhosti. [4]

V současnosti nachází velké uplatnění galvanické pokovování součástí z ABS. Jejich vzhled je plně srovnatelný s kovy. Pokovováním se zvyšuje pevnost materiálu, odolnost proti rozpouštědlům i povětrnosti a tvarová stálost za tepla. Pokovené plastové části jsou odolnější proti korozi než galvanicky pokovené ocelové součásti. [4]

Tab. 7: Vlastnosti kopolymeru ABS [9]

Vlastnost	ABS
Typ polymeru	amorfní
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,05
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	34,5
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	2068
Maximální teplota použitelnosti [°C]	75 - 85
Smrštění [%]	0,4 - 0,7
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	85 - 115
Teplota taveniny [°C]	210 - 270
Teplota formy [°C]	50 - 80
Teplota sušení [°C]	80 - 85
Doba sušení [h]	2 - 4

ABS nachází využití především pro náročné technické aplikace, jsou-li na budoucí výrobky kladeny jak požadavky na houževnatost, tak i na chemickou odolnost. Největší uplatnění mají na výrobu dílů motorových vozidel (přístrojové desky, mřížky masek na automobilech), spotřebiče pro domácnost (pračky, ledničky, vysavače aj.), zavazadla, telekomunikační a elektrostatické přístroje, nábytek (skořepiny křesel a sedaček), optické přístroje, kancelářské stroje, aj. [4]

3.2.4 Kopolymer akrylonitril-styren-akrylát (ASA)

Připravuje se stejně jako ABS, ale místo butadienového kaučuku se použije akrylátový kaučuk (odolný proti povětrnosti). ASA má velmi podobné vlastnosti jako ABS, ale jeho výhodou je, že má podstatně vyšší odolnost proti ultrafialovému záření a proti vlivu povětrnosti (ta se ještě zvyšuje světelnými stabilizátory). Ve srovnání s ABS má také vyšší tepelnou stálost a chemickou odolnost. [4]

ASA se používá pro svoji odolnosti proti žloutnutí pro výrobky vystavené povětrnosti (kryty přístrojů, dopravní signální svítidla, zahradní nábytek, schránky na dopisy aj.) [4]

3.3 Polymetylmetakrylát (PMMA)

Pro amorfni PMMA je nejtypičtější vlastností jeho čírost a naprostá bezbarvost i v tlustých vrstvách. To umožňuje nejen jeho dokonalou průhlednost, ale i snadné probarvení. PMMA se pohybuje na hranici mezi plasty běžnými a konstrukčními. [4]

Výhody PMMA:

- svojí odolností proti povětrnosti předčí všechny běžné termoplasty
- má vynikající tvarovou paměť
- propustnost světla je u PMMA asi 92% v celém rozsahu spektra (zasahuje až do UV oblasti)
- dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti
- odolnost vůči vodě, zředěným alkáliím a kyselinám
- dobrá mechanická obrobiteľnosť
- tepelná odolnosť bez zatížení je okolo 80°C [4]

Nevýhody PMMA:

- neodolává koncentrovanějším kyselinám a hydroxidům
- nízká povrchová tvrdost [4]

PMMA nachází uplatnění při zasklívání oken dopravních prostředků, při výrobě přístrojů, kancelářských potřeb, hodinových sklíček apod. Velké využití má PMMA v zubní proteti-ce, tzv. Dentakryl. [4]

Tab. 8: Vlastnosti neplněného PMMA [9]

Vlastnost	PMMA
Typ polymeru	amorfní
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,17
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	51,7
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	2620
Maximální teplota použitelnosti [°C]	85 (krátce) - 65 (dlouze)
Smrštění [%]	0,3 - 0,6
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	110
Index toku taveniny $\left[\frac{g}{10min}\right]$	0,8 - 2
Teplota taveniny [°C]	210 - 300
Teplota formy [°C]	60 – 90
Teplota sušení [°C]	75
Doba sušení [h]	2 – 4

3.3.1 Kopolymery esterů kyseliny metakrylové

Velký význam mají **kopolymery metylmetakrylátu se styrenem**. Je čirý a stálý na světle. Styren v kopolymeru zlepšuje odolnost proti středně silným kyselinám a alkoholu. Má dobrou zpracovatelnost, pevnost, tuhost. [4]

Další známý **kopolymer metylmetakrylátu s akrylonitrilem** vyniká svojí rázovou houževnatostí, tvrdostí, pevností v tahu a ohybu, vyšší tepelnou odolností a odolností vůči rozpouštědlům, čímž značně převyšuje vlastnosti polymethylmetakrylátového organického skla, a je proto vhodný jako bezpečnostní organické sklo. Slouží k zasklívání dopravních prostředků, letadel, pro výrobu přístrojových krytů, namáhaných okenních tabulí. [4]

Dalším oblíbeným kopolymerem jsou tzv. **hydrogely**, tyto kopolymery byly navrženy jako protetické materiály pro lékařství, velmi dobře je totiž snáší živá tkáň. Vzhledem k jejich transparentci a tvarové stálosti se používají k výrobě kontaktních čoček. Polymerní hydrogely mají velmi nízký modul pružnosti, způsobují minimální mechanické dráždění a v organismu jsou chemicky stálé. [4]

4 SPECIFIKACE KONSTRUKČNÍCH POLYMERŮ

4.1 Polyamidy (nylon)

Polyamidy jsou lineární polymery obsahující v řetězci amidové skupiny $-\text{CONH}-$. Vlastnosti polyamidů jsou závislé na výchozích monomerech. Klasický polyamid je v tuhém stavu z 30% až 50% krystalický a neprůhledný. Řetězové můstky jsou propojeny vodíkovými můstky mezi amidovými skupinami. Jejich množství ovlivňuje krystalickou strukturu, bod tání, teplotu skelného přechodu a většinu dalších vlastností. [4]

Obecně polyamidy (plasty i vlákna) mají vysokou houževnatost, tvrdost, odolnost proti oděru a dobré elektroizolační vlastnosti. Mechanické vlastnosti polyamidů jsou závislé na typu polyamidu, na jeho molekulové hmotnosti a množství obsažené vody. Nasákavost je dána koncentrací amidových skupin. Čím vyšší je poměr skupin $-\text{CONH}-$ a $-\text{CH}_2-$, tím vyšší je nasákavost. [4]

Díky svému polárnímu charakteru a vysoké nasákavosti u polyamidů nedochází ke vzniku elektrostatického náboje a k přitahování prachových částic. Polarita zapříčiňuje to, že polyamid velmi dobře snáší řadu plniv, např. křídou, talek, skleněná vlákna, azbest aj. Všechny polyamidy jsou také odolné vůči olejům, pohonným látkám a velké řadě technických rozpouštědel. [4]

Nejvýznamnější technologie zpracování je vstřikování a vytlačování. Dále lze polyamidy i svařovat, lepit, potiskovat i pokovovat. [4]

Tab. 9: Vliv poměru skupin $-\text{CONH}-$ a $-\text{CH}_2-$ na vlastnosti polyamidů [4]

Typ	Poměr $-\text{CONH}-$ / $-\text{CH}_2-$	Bod tání [°C]	Tg [°C]		Nasákavost [%]		Rozpustnost v HCOOH [%]
			zasucha	zamokra	při 23°C	po uložení ve vodě	
PA 6	1:5	220	70	20	3	10	70
PA 66	1:5	264	80	35	2,8	9	80
PA 610	1:7	125	70	40	1,4	3,3	90
PA 612	1:8	210	60	40	1,2	3	90
PA 11	1:10	190	55	-	0,8	1,8	nerozpustný
PA 12	1:11	180	55	-	0,7	1,5	nerozpustný

4.1.1 Polyamid 6 (PA6)

PA6 je tvrdý, světle žlutý plast rohovitého vzhledu. Není rozpustný v běžných rozpouštědlech, rozpouští se ve fenolech, kyselině mravenčí a bezvodé kyselině octové. Má dobré mechanické vlastnosti, nízký koeficient tření, mimořádnou odolnost vůči otěru, dobrou rázovou houževnatost, dobré elektroizolační vlastnosti, ovšem velkou navlhavost. Není odolný vůči anorganickým kyselinám a oxidačním činidlům. [4]

PA6 se zvláknuje protlačováním taveniny přes trysku. Vlákno je nutné dloužit a praním zbavit monomeru. Vlákna mají velkou pevnost v tahu, výbornou odolnost proti otěru, i proti mikroorganismům a potu. Jsou málo odolná na povětrnosti a špatně odolávají vyššímu teplu. [4]

Tab. 10: Vlastnosti PA 6 (33% skelná vlákna, 50% relativní vlhkost) [9]

Vlastnost	PA 6 (SV 33%)
Typ polymeru	semi-krytalický
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,3
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	89,6
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	5515
Maximální teplota použitelnosti [°C]	150 (krátce) - 90 (dlouze)
Smrštění [%]	0,2 - 0,6
Absorpce vody za 24 hodin při 23°C [%]	1,1
Teplota tání T_m [°C]	210
Teplota taveniny [°C]	225 - 285
Teplota formy [°C]	60 - 90
Teplota sušení [°C]	80
Doba sušení [h]	2 - 20

PA6 nachází uplatnění jako konstrukční materiál pro výrobu ložisek, ozubených kol, vaček, cívek, ovládacích elementů aj. [4]

Vlákna z PA6 se používají jako hedvábná vlákna, stříž, kordy do pneumatik, kobercová vlákna, žíně, vlasce, síta aj. [4]

4.1.2 Polyamid 66 (PA66)

Výhodou PA66 oproti PA6 je vyšší bod tání, vyšší pevnosti a o něco menší navlhavosti. Další výhodou oproti PA6 je, že neobsahuje volný monomer – odpadá jeho odstraňování (praní). [4]

Tab. 11: Vlastnosti PA 66 (33% skelná vlákna, 50% relativní vlhkost) [9]

Vlastnost	PA 66 (SV 33%)
Typ polymeru	semi-krytalický
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,38
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	124
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	6205
Maximální teplota použitelnosti [°C]	200 (krátce)-130 (dlouze)
Smrštění [%]	0,2 - 0,6
Absorpce vody za 24 hodin při 23°C [%]	0,7
Teplota tání T_m [°C]	255
Teplota taveniny [°C]	275 - 305
Teplota formy [°C]	25 - 95
Teplota sušení [°C]	80
Doba sušení [h]	1 - 16

PA66 slouží v širokém měřítku jako plast i jako materiál pro výrobu vláken a fólií. [4]

4.1.3 Polyamid 612 (PA612)

PA6 a PA 6 jsou nejvíce používané polyamidy. PA612 je jeden z mnoha dalších produktů, který má vylepšené vlastnosti oproti základním dvěma polyamidům. PA612 vykazuje ještě vyšší pevnost v tahu a daleko menší nasákavost. [4]

Tab. 12: Vlastnosti PA 612 (33% skelná vlákna, 50% relativní vlhkost) [9]

Vlastnost	PA 612 (SV 33%)
Typ polymeru	semi-krystalický
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,32
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	138
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	6205
Maximální teplota použitelnosti [°C]	150 (krátce) - 95 (dlouze)
Smrštění [%]	0,2 - 0,6
Absorpce vody za 24 hodin při 23°C [%]	0,16
Teplota tání T_m [°C]	212
Teplota taveniny [°C]	230 - 285
Teplota formy [°C]	25 - 95
Teplota sušení [°C]	80
Doba sušení [h]	1 - 4

4.1.4 High temperature Nylon a jeho vlastnosti (HTN)

Tento polymer se nachází na rozhraní konstrukčním polymerů (PC, PA 66) a speciálních polymerů (PEI, PEEK, LCP a jiné). [9]

Mezi jeho výhody patří:

- nižší nasákavost než PA6 a PA66
- dobrá rozměrová stálost a vynikající mechanické vlastnosti
- nízké krípkové vlastnosti a vynikající chemická odolnost
- dobrá zpracovatelnost při vstřikování
- vysoká teplota skelného přechodu [9]

Mezi nevýhody řadíme:

- hlavní nevýhodou je nízká tažnost, problémy se sušením a pomalá krystalizace [9]

Tab. 13: Vlastnosti HTN (30% skelná vlákna, 50% relativní vlhkost) [9][16]

Vlastnost	HTN (SV 30%)
Typ polymeru	semi-krystalický nebo amorfní
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,44
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	220,5
Maximální teplota použitelnosti [°C]	225 (krátce) - 155 (dlouze)
Smrštění [%]	0,2 - 0,6
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	125
Teplota tání T_m [°C]	300
Teplota taveniny [°C]	305 - 325
Teplota formy [°C]	125 - 150
Teplota sušení [°C]	80
Doba sušení [h]	2 - 16

Použití nachází v prvcích bezpečnosti automobilů – senzory airbagů, ABS senzory, rychlostní a teplotní senzory. Dále jako konektory objímek, v automobilovém motoru, u ložisek převodovky, u přítlačných kotoučů, ozubených kol, těsnění aj. [9]

4.1.5 Polyarilamidy (aromatické polyamidy)

Z těchto materiálů lze připravovat vlákna s výbornou odolností vůči teple a ohni, ve středních až ultravysokých pevnostech a modulech pružnosti. Vlákna, u nichž je nejméně 85% amidových skupin navázáno na dvě aromatická jádra, jsou označována jako aramidová vlákna – tato vlákna netají, mají T_g od 250 °C do 400 °C, vysokou elektrickou pevnost a velmi dobrou chemickou odolnost. [4]

4.1.6 Poly (m – fenyleneftalamid) (Nomex)

Polymer se užívá na netavící vlákna. Až při teplotě 370°C se rychle rozkládá. Nelze jej tudíž zpracovávat vstřikováním ani vytlačováním, ale pouze lisováním. Jeho teplotní odolnost se trvale pohybuje kolem 200 °C až 250 °C. Modul pružnosti je čtyřnásobně vyšší než u PA66.

Využívá se jako tepelně i hydrolyticky odolný filtrační materiál, pro nehořlavé oděvy a zejména pro výrobu speciálního elektroizolačního papíru natíraného polyamidovým la-

kem, který se používá pro izolace při teplotách 180°C a vyšší. Vyrábí ho firma DuPont v USA (obchodní název *Nomex*) [4]

4.1.7 Poly(p-fenylentereftalamid) (Kevlar)

Vysoce krystalický polymer, je samozhášivý, netaje, za vysokých teplot uhelnatí. Má značně vyšší modul pružnosti než *Nomex*. Modul pružnosti vláken je konkurenceschopný vůči oceli a sklu E. [4]

Bezazbestové a *Kevlarem* zesílené spojkové obložení pro automobily používají přední světoví výrobci automobilů. Kevlarová vlákna při 260°C mají stejnou pevnost v tahu jako běžná textilní vlákna při pokojové teplotě. Tato vlákna se používají také na vyztužování pneumatik, hadic, dopravních pásů, kabelů a řemenů, tkané textilie pro letectví, kosmonautiku, neprůstřelné vesty. [4]

4.2 Polykarbonát (PC)

Polykarbonát je transparentní polymer s propustností světla 85% s vysokým indexem lomu. Je dobře rozpustný v chlorovaných uhlovodících, naopak těžce rozpustný v esterech, ketonech a aromatických uhlovodících. [4]

Výhodné vlastnosti PC jsou jeho vysoká rázová houževnatost i za velmi nízkých teplot, rozměrová stabilita až do 140°C, dobré elektroizolační vlastnosti, vysoká mechanická pevnost (zvláště v tahu), nízká absorpce vody, odolnost proti UV – záření, velká stálost proti oxidaci až do 120°C a dobrá odolnost vůči hydrolýze. Odolává roztokům zředěných kyselin, uhličitanu sodného a mýdel, alifatickým uhlovodíkům a alkoholům.

Špatná je jeho odolnost vůči dlouhodobému působení vroucí vody a páry, amoniaku a amoniaků. Degradaci způsobuje také dlouhodobé působení metanolu. [4]

Tab. 14: Vlastnosti PC (30% skelná vlákna) [9]

Vlastnost	PC (SV 30%)
Typ polymeru	amorfní
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,4
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	131
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	8618
Maximální teplota použitelnosti [°C]	105 - 130
Smrštění [%]	0,15 - 0,6
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	145 - 150
Teplota tání T_m [°C]	130 - 255
Teplota taveniny [°C]	220 - 325
Teplota formy [°C]	80 - 120
Teplota sušení [°C]	120 - 125
Doba sušení [h]	2 - 4

Uplatnění PC nachází především v technologii vstřikování, kterou se vyrábějí hlavně technické dílce určené pro použití do vyššího tepelného a mechanického namáhání. Vytlačováním se z PC zhotovují trubky, tyče, profily a tlusté fólie. [4]

Z PC se vyrábí i hodně slitin (blendů), např. PC/ASA, PC/PBT, PC/PET, PC/PEI, PC/ABS. Právě PC/ABS nachází velké uplatnění jako vnitřní součásti automobilů, v elektrotechnice, mezi výhodné vlastnosti této slitiny patří kombinace těchto materiálů a jejich vlastností (tvarová stálost za tepla, vrubová houževnatost, odolnost proti UV – záření). [4] [8]

4.3 Polyoxymetylen – polyacetal – polyformaldehyd (POM)

Polyoxymetylen je semi-krystalický termoplastický polymer, který se vyznačuje vysokou tvrdostí, pevností a rázovou houževnatostí až do -40°C. Proto nachází uplatnění tam, kde budoucí výrobek musí odolávat náhlým nárazům (např. ozubená kola). Z něj vyrobené polotovary mají malý součinitel tření, hodí se pro výrobu ložisek s malým mazáním nebo bez mazání. Mezi termoplasty má jednu z nejvyšších odolností proti oděru, a také odolnost

proti organickým rozpouštědlům (díky vysokému stupni krystalinity). Má dobré elektroizolační vlastnosti. [4]

Tab. 15: Vlastnosti POM – homopolymeru [9][16]

Vlastnost	POM - homopolymer
Typ polymeru	semi-krystalický
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,42
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	69
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	2800
Maximální teplota použitelnosti [°C]	110 (krátce) - 90 (dlouze)
Smrštění [%]	1,9 - 2,3
Index toku taveniny [g/10min]	1 - 17
Teplota tání T_m [°C]	175
Teplota taveniny [°C]	190 - 230
Teplota formy [°C]	60 - 90

Tab. 16: Vlastnosti POM – kopolymeru [9][16]

Vlastnost	POM - kopolymer
Typ polymeru	semi-krystalický
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,42
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	58,5
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	3200
Maximální teplota použitelnosti [°C]	95 (krátce) - 80 (dlouze)
Smrštění [%]	2 - 2,5
Index toku taveniny [g/10min]	1 - 10
Teplota tání T_m [°C]	165
Teplota taveniny [°C]	170 - 215
Teplota formy [°C]	50 - 85

POM se zpracovává převážně vstřikováním, možné jsou ale i další zpracovatelské operace, jako vytlačování, či vyfukování. Těmito technologiemi jsou nejčastěji vyráběny součásti strojů, ozubených kol, ventilů, čerpadel, trubek, kloubových čepů aj. [4]

Slitiny často tvoří POM/PTFE, POM/PUR, POM/PE. [8]

4.4 Polyetylentereftalát (PET)

Tento nejvýznamnější lineární polyester nachází velké uplatnění pro výrobu vláken, na výrobu folií a lahví. [4]

Na vlákna se zpracovává z taveniny, kdy se zrněný polyester taví na vyhřívaném roštu a tavenina je čerpadlem podávána do zvláknovací hubice s tryskami. [4]

Polyesterové vlákno je méně mačkové než vlna, málo navlhavé, a schne rychleji než vlákno polyamidové. Oproti polyamidu má také lepší stálost na světle. Je velmi stálé při dlouhodobém zahřívání na vzduchu (stálejší než ostatní vlákna). [4]

Fólie z PET se obvykle vyrábějí vytlačováním a následující orientací za tepla v obou směrech. Charakteristickou vlastností pro PET fólie je mechanická pevnost i při malé tloušťce a rozměrová stálost. Mechanickou pevnost má fólie PET vyšší, než jakékoliv jiné fólie z termoplastů. Mají výbornou tepelnou odolnost (od -60 °C do 130 °C), odolnost vůči olejům, a dobré elektroizolační vlastnosti. [4]

Fólie jsou čiré a uplatnění nachází v elektrotechnickém průmyslu, jako filmové podložky, obalové, potiskované a metalizované fólie. [4]

PET s krystalizací 30 – 40% při použití na vstřikované výrobky se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi, tvrdostí, odolností proti oděru, dobrou rozměrovou stálostí, nízkým koeficientem tření a malou navlhavostí. Tvarová stálost za tepla, pevnost a tvrdost se dají zvýšit vyztužením skelnými vlákny (10 – 50%). [4]

PET nachází uplatnění ve strojírenství, kde se požadují vysoké pevnosti, rozměrová stálost a výhodné kluzné vlastnosti. [4]

Tab. 17: Vlastnosti PET (30% skelná vlákna) [9][16]

Vlastnost	PET (SV 30%)
Typ polymeru	semi-krytalický
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,67
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	151,5
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	1150
Maximální teplota použitelnosti [°C]	200
Smrštění [%]	0,2 - 0,9
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	70
Teplota tání T_m [°C]	250 - 255
Teplota taveniny [°C]	265 - 295
Teplota formy [°C]	65 - 120
Teplota sušení [°C]	120 - 135
Doba sušení [h]	2 - 4

4.5 Polybutylentereftalát (PBT)

Tento polymer je výhodný zejména pro svoji dobrou zpracovatelnost. Nejčastěji se zpracovává vstřikováním a vytlačováním. Protože má nižší mechanické vlastnosti a nižší teplotu skelného přechodu, jeho technické využití není pro prostředí s vysokými teplotami. PBT je odolný vůči oděru a řadě chemikálií, má velkou rázovou houževnatost, rozměrovou stabilitu a malou absorpci vody. V technice nachází využití především díky dobrým kluzným vlastnostem a rozměrové stabilitě ve spojení s výhodným zpracováním. [4]

Ze slitin lze uvést PBT/PC, z kterého se vyrábějí vstřikováním automobilové nárazníky. [4]

Tab. 18: Vlastnosti PBT (30% skelná vlákna) [9]

Vlastnost	PBT (SV 30%)
Typ polymeru	semi-krytalický
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,53
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	120,5
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	9308
Maximální teplota použitelnosti [°C]	95 - 120
Smrštění [%]	0,3 - 2,3
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	45 - 60
Teplota tání T_m [°C]	225
Teplota taveniny [°C]	245 - 275
Teplota formy [°C]	45 - 95
Teplota sušení [°C]	120 - 150
Doba sušení [h]	2,5 - 5,5

4.6 Polyvinylchlorid (PVC)

PVC je jedním z nejvíce používaných termoplastů, má řadu dobrých vlastností a relativně nízkou cenu. Jednou z jeho předností je široké spektrum jeho použití. Dělí se především na dva druhy, a to měkkčené a neměkkčené PVC, také se upravuje do lehčené formy a na houževnaté PVC. [4]

Neměkkčené PVC má takové vlastnosti, které se těžko docilují u jiných plastů v této cenové relaci, jsou to převážně:

- vynikající odolnost vůči vodě, kyselinám, alkáliím i organickým chemikáliím
- nízká permeabilita vodní páry, kyslíku a mnohých těkavých organických sloučenin
- vysoká tvrdost, odolnost proti oděru a mechanická pevnost
- dobré elektroizolační vlastnosti
- vysoký lesk a čirost
- samozhášivost daná obsahem chloru [4]

PVC je rozpustné v tetrahydrofuranu, cyklohexanonu a chlorbenzenu. Mezi jeho další nevýhody patří jeho obtížná zpracovatelnost (ve srovnání s běžnými plasty jako jsou PE, PP, PS), je to spojeno s jeho nízkou tepelnou stabilitou a nevýhodnými tokovými vlastnostmi termoplastické taveniny, je proto nutné používat při zpracování maziva, změkčovadla i stabilizátory. [4]

Tab. 19: Vlastnosti neměkčeného PVC [9]

Vlastnost	Neměkčené PVC
Typ polymeru	amorfní
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,38
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	41,5
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	2413
Maximální teplota použitelnosti [°C]	105 (krátce) - 60 (dlouze)
Smrštění [%]	0,1 - 2,5
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	kolem 80°C
Teplota tání T_m [°C]	182 - 198
Teplota taveniny [°C]	185 - 205
Teplota formy [°C]	30 - 60
Teplota sušení [°C]	71 - 82
Doba sušení [h]	2 - 3

Neměkčené PVC se používá pro výrobu folií a desek k obkládání fasád, trubek a armatur na pitnou a odpadní vodu, profilů ve stavebnictví a nábytkářství, technických dílců, ventilů, kohoutů, samonosných svařovacích nádob, kádí ventilů, zásobníků, dutých výrobků (láhví na kosmetiku). [4]

Měkčené PVC (směs PVC se změkčovadly, stabilizátory, popřípadě pigmenty) se zahřívá na teplotu 160 – 180 °C, kdy dochází k želatinaci. Použití nachází ve výrobě desek, folií (ubrusy), profilů, různých drobných předmětů, izolace elektrických vodičů, podlahoviny, koženky na sedadla, tapety. Z polotovaru ve formě pasty se dají vyrábět máčené, odlévané výrobky, jako jsou ochranné rukavice, hračky, míče. [4]

Lehčený měkký PVC, nejčastěji zhotovený vytlačováním nebo vstřikováním, se používá ve stavebnictví a v nábytkářství, slouží k výrobě těsnění, polštářování, obkládání aj. [4]

Houževnatý PVC se používá tam, kde nestačí rázová houževnatost neměkčeného PVC, který je při teplotách pod 20°C křehký. Rázová houževnatost se zvyšuje kopolymerací nebo přísadou modifikujících polymerů s dostatečně nízkou teplotou skelného přechodu. (vznikají tzv. slitiny - polyblends) [4]

4.7 Polyester alkyd (PAK)

Tento termoset patří do skupiny konstrukčních plastů. Díky svému relativně vysokému průtoku taveniny formou, je vhodný pro velké a složité dílce. [9]

Mezi jeho výhody patří vynikající elektrické vlastnosti, rozměrová stabilita a poměrně nízká cena, proto je vhodný pro širokou škálu aplikací v automobilovém a elektrickém průmyslu. Z dalších lze jmenovat dobrou odolnost vůči tepelnému stárnutí, velmi konstantní smrštění a rychlé vstřikovací cykly. Velmi často se vyztužuje skelnými vlákny, která zlepšují jeho vlastnosti a odolnost proti nárazu. [9]

Nevýhodami jsou nízká chemická odolnost a nízká odolnost proti rozpouštědlům.

Tab. 20: Vlastnosti PAK [9]

Vlastnost	PAK
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	2,4
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	20,5 - 69
Modul pružnosti pro 23°C [Pa]	13100 - 13789
Maximální teplota použitelnosti [°C]	150 (krátce) - 120 (dlouze)
Smrštění [%]	0,1 - 1
Nasákavost za 24 h [%]	0,1 - 0,5
Teplota taveniny [°C]	143 - 177

Další použití nachází v konstrukci lodních trupů, v nátěrových hmotách a v laminaci kompozitů.

4.8 Polyfenylén oxid (PPO)

Konstrukční plast PPO je amorfní, pevný, tuhý a rozměrově tepelně velmi stálý polymer. Často tvoří sloučeniny (blends) s jinými polymery a má potom následující výhodné vlastnosti: vysoká pevnost v tahu, vysoká tepelná odolnost, nízké absorpční vlastnosti, nízký

kríp při pokojové teplotě, nízký koeficient tepelné roztažnosti, dobrá tepelná odolnost, výborné elektrické vlastnosti, dobrou rozměrovou stabilitu. [9]

Mezi nevýhody PPO patří malá odolnost vůči uhlovodíkům a aromatickým látkám, např. estery, oleje, alkoholy, které mohou způsobovat trhliny v PPO směsích. Není vhodný pro aplikace, kde by musel odolávat UV záření. Jeho zpracování je obtížné, a to hlavně z důvodu vysoké teploty tání. [9]

Tab. 21: Vlastnosti PPO (skelná vlákna 30%) [9]

Vlastnost	PPO (SV 30%)
Typ polymeru	amorfní
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,25
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	100
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	7584
Maximální teplota použitelnosti [°C]	93 - 115
Smrštění [%]	0,2 - 0,6
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	150
Teplota taveniny [°C]	270 - 315
Teplota formy [°C]	70 - 105
Teplota sušení [°C]	93 - 120
Doba sušení [h]	2 - 4

Typické využití PPO má ve vyfukovaných výrobcích (kancelářský nábytek, dvířka aj.), v automobilovém průmyslu (stěrače, pojistkové skříně), a výrobky, jako jsou čerpadla, sprchové baterie, filtrační komponenty, počítačové skříně. [9]

4.9 Polymery s tekutými krystaly (LCP)

Jsou to plně aromatické polymery, kam patří LCP (Liquid crystal polymer). Dělíme ho do tří skupin:

- univerzální třída, kde vykazuje výjimečně snadné zpracování, rozměrovou stálost, chemickou odolnost, nehořlavost, tuhost a pevnost

- druhá třída je více tepelně odolná, ale není tak jednoduše zpracovatelná, má dobrou rozměrovou stabilitu, dobrou mechanickou odolnost, vynikající odolnost proti ohni, a velmi dobrou pevnost a tuhost
- třetí třída je charakteristická nižší teplotní odolností, je levnější a hůře zpracovatelná, ale má dobrou rozměrovou stabilitu, s dobrou pevností a tuhostí, menší chemickou odolnost. [9]

Výhody LCP:

- nízké smrštění, přesné tolerance zhotovených výrobků, rychlý průběh zpracovatelského cyklu, opakovatelné zpracování
- malé rozměrové změny při vysokém teplotním zatížení
- nízký koeficient tepelné roztažnosti, srovnatelný se sklem, keramikou nebo kovy
- vynikající chemická odolnost, výjimečná pevnost, tuhost a houževnatost [9]

Tab. 22: Vlastnosti LCP (30% skelná vlákna) [9]

Vlastnost	LCP (SV 30%)
Typ polymeru	amorfní nebo krystalický
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,62
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	159
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	15513
Maximální teplota použitelnosti [°C]	205 - 240
Smrštění [%]	0,2 - 0,5
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	120 - 180
Teplota tání T_m [°C]	330
Teplota taveniny [°C]	350 - 360
Teplota formy [°C]	65 - 110
Teplota sušení [°C]	120 - 150
Doba sušení [h]	1 - 4

LCP nachází uplatnění ve výrobě elektrických a elektronických komponentů. Jako zásuvky, relé, kondenzátorové skříně, infračervené konektory, polovodičové součástky aj. [9]

5 SPECIFIKACE SPECIÁLNÍCH POLYMERŮ

5.1 Polyimidy (PI)

Jsou to aromatické materiály s vynikající tepelnou stabilitou, které zaujímají špičkové postavení mezi vysoce tepelně odolnými plasty. [4]

Polyimidy mají velmi dobré mechanické, elektrické a chemické vlastnosti. Netají, k určitému slinování dochází při 800 °C. Mají mimořádně dobré elektroizolační vlastnosti při zvýšené teplotě, jednu z nejlepších ze všech organických materiálů. Izolace zhotovené z polyamidů umožňují práci elektrickým motorům při 220°C i vyšších teplotách. Mají odolnost i vůči silnému záření, jsou samozhášivé, a v ohni jen koksovatejší, ale netají. Vyztužují se skleněným textilem, grafitovými vlákny. Nejsou rozpustné v žádném organickém rozpouštědle, neodolávají však hydrolyze vroucí vodou, silnými alkáliemi a koncentrovanými anorganickými kyselinami. [4]

Mezi hlavní nevýhody patří obtížná zpracovatelnost, ekonomická náročnost, a hnědé zabarvení výrobků. [4] [9]

Tab. 23: Vlastnosti PI [16]

Vlastnost	PI
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,43
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	1000
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	3000
Maximální teplota použitelnosti [°C]	480 (krátce) - 315 (dlouze)
Prodloužení při přetržení [%]	3
Teplota zpracování [°C]	365

Z polyimidů se vyrábí pryskyřice, laky, fólie, výlisky, vlákna i lepidla. Mají rozsáhlé využití, ale vždy jen ve speciálních a náročných případech (při stavbě letadel, využití v kosmu proti slunečnímu záření nebo izolace obleků pro kosmonauty). Užití nachází při výrobě neprůstřelného oblečení a průmyslových rukavic. Dále jako vyztužující vlákna pro automobilové pneumatiky. Jako vlákna kompozitních laminátů jsou vhodná pro výrobu závodních rychlostních lodí, závodní auta, surfvací prkna. Slouží i pro výrobu komponentů

do strojů pro zpracovatelský průmysl, např. pístní kroužky pro převodovky, ventily, přítlačné kroužky, ložiska. [4] [9]

Lehčené polyimidy slouží k vysokoteplotním izolacím včetně aplikací v jaderném průmyslu. [4]

5.2 Polyéterimidy (PEI)

PEI je amorfní termoplast. Jeho charakteristickými vlastnostmi jsou vysoká pevnost a tuhost při pokojové i zvýšené teplotě, dlouhodobá vysoká tepelná odolnost, velmi dobrá rozměrová stabilita, elektrické vlastnosti a vysoká chemická odolnost. [9]

PEI lze využít v neplněné formě, anebo vyztužené skelnými vlákny 10, 20, 30, 40%. [9]

Výhody PEI:

- vynikající chemická odolnost vůči většině uhlovodíků, nearomatickým alkoholům, vůči všem halogenovým rozpouštědlům
- odolnost vůči minerálním kyselinám
- nízká nasákavost
- odolnost vůči ultrafialovému záření, proti gamma záření
- dobré elektrické vlastností – vysoce citlivé elektrické součástky [9]

Nevýhody PEI:

- je nutné ho sušit na vlhkost menší než 0,05%
- vysoká zpracovatelská teplota (teplota taveniny)
- ekonomická náročnost [9]

Tab. 24 - vlastnosti PEI (30% skelná vlákna) [9]

Vlastnost	PEI (SV 30%)
Typ polymeru	amorfní
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,5
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	169
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	8963
Maximální teplota použitelnosti [°C]	200 (krátce) - 180 (dlouze)
Smrštění [%]	0,2 - 0,7
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	215
Teplota taveniny [°C]	335 - 425
Teplota formy [°C]	65 - 175
Teplota sušení [°C]	120 - 150
Doba sušení [h]	2 - 6

PEI nachází využití v automobilovém průmyslu (teplotní a benzinové senzory, klimatizace, metalizované reflektory), elektrickém a elektronickém průmyslu (konektory, nosiče integrovaných obvodů, flexibilní obvody, cívky), obalovém průmyslu, leteckém průmyslu a v medicíně. [9]

5.3 Polytetrafluoretylen (PTFE)

PTFE je z velké části krystalický (93 – 97%), a jeho zbarvení je bílé až šedavé. Je nerozpustný ve všech známých rozpouštědlech, je nehořlavý a zdravotně nezávadný. Polymer má vysokou rázovou houževnatost, pevnost v tahu je podobná jako u polyetyleny (zvyšuje se orientací za studena). PTFE vzhledem ke své nepolární struktuře je jeden z nejlepších dielektrických materiálů. (dielektrické vlastnosti v podstatě nezávisí na frekvenci a teplotě). [4]

Svojí chemickou odolností převyšuje všechny ostatní polymery. V rozpouštědlech nebobtná, ani se nerozpouští, je odolný vůči alkáliím, halogenům, vroucí kyselině dusičné, lučavce královské a fluorovodíku. Pouze při teplotě nad 200°C je napadán roztavenými alkalickými kovy a fluorem. Excelentní je i jeho tepelná odolnost (měkne při teplotě 327°C, kdy přechází ze stavu krystalického do amorfního). Další z jeho výhodných vlastností jsou

mrazuvzdornost (fólie z něj vyrobené jsou ohebné i při -150°C), extrémní odolnost na povětrnosti (30 let beze změny), nízký koeficient tření. [4]

Mezi jeho nevýhody patří slabá adhezivní vlastnost, nesnášenlivost vůči všem změkčovadlům, není odolný proti vysokoenergetickému záření (depolymeruje). Problematické je i jeho zpracování, z důvodu jeho vysokého bodu tání a vysoké viskozity taveniny. Nezpracovává se proto běžnými technologiemi. [4]

Tab. 25: Vlastnosti PTFE [9]

Vlastnost	PTFE
Hustota $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$	2,13 - 2,2
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	24 - 31
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	408
koeficient součinitele tření pro 23°C	0,02
Maximální teplota použitelnosti [$^{\circ}\text{C}$]	260
Nasákavost [%]	menší než 0,01
Teplota skelného přechodu T_g [$^{\circ}\text{C}$]	125 - 130
Teplota tání T_m [$^{\circ}\text{C}$]	342
Teplota při zpracování [$^{\circ}\text{C}$]	365 - 376

PTFE nachází využití zejména k výrobě armatur pro silně korozivní nebo tepelně náročná prostředí, k výrobě trubek, pístních kroužků, membrán, samomazných ložisek (PTFE plněné grafitem), izolací pro dráty a kabely vystavené vysoké teplotě. [4]

Polytetrafluorethylenové disperze se používají k impregnaci izolací ze skleněného textilu a k lakování kovových vodičů. [4]

Jeho časté obchodní označení je název *Teflon*.

5.4 Polyéteréterketon (PEEK)

PEEK je šedý krystalický polymer, s mimořádnou odolností proti rozpouštědlům, výbornou hydrolytickou stabilitou a tepelnou stálostí. Mezi další jeho výhodné vlastnosti patří nízká hořlavost, nízká emise dýmů při hoření, tvarová stálost za tepla (neplněný materiál 165°C , vyztužený 30% skelných vláken 282°C), dobré elektrické vlastnosti. [4]

Jeho nevýhodou je vysoká ekonomická náročnost, a to nejen na nákup suroviny, ale i na zpracovatelské stroje, které musí být konstruovány na jeho vysokou teplotu zpracování. Jeho nevýhodou může být i vysoká teplota tepelné degradace. [9]

Zpracovává se nejvíce ve formě tablet pro vstřikování, anebo ve formě prášků pro zhotovování nátěrů. [4]

Tab. 26: Vlastnosti základního typu PEEK [9]

Vlastnost	PEEK
Typ polymeru	semi-krytalický
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,3 - 1,6
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	90 - 269
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	10000
Maximální teplota použitelnosti [°C]	250
Smrštění [%]	1 - 1,8
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	143
Teplota tání T_m [°C]	340
Teplotní degradace [°C]	429
Teplota taveniny [°C]	348 - 420
Teplota formy [°C]	120 - 220
Teplota sušení [°C]	150 - 177
Doba sušení [h]	3

Typickým využitím pro PEEK jsou výrobky vystavené vysoké teplotě, radiaci nebo agresivním chemikáliím, zvláště ve vojenské a letecké technice. Další použití je možné v elektronice (vedení a kabely), chemickém průmyslu (součásti čerpadel a olejových těsnění), nebo jako povrchy různých výrobků (ložiska aj). [4] [9]

5.5 Polyfenylén sulfid (PPS)

Tento speciální polymer kombinuje několik excelentních vlastností, a to především, teplotní stabilitu, neobvyklou nerozpustnost, chemickou odolnost a nehořlavost. Mezi jeho další výhody patří zejména použití ve vysokých teplotách, odolnost proti záření, rozpouštědlům, vynikající rozměrová stabilita a malá nasákavost. [9]

Mezi jeho nevýhody patří obtížná zpracovatelnost (vysoký bod tání), poměrně vysoká ekonomická náročnost, neodolává chlorovaným uhlovodíkům. [9]

Tab. 27: Vlastnosti PPS (30% skelná vlákna) [9]

Vlastnost	PPS (SV 30%)
Typ polymeru	semi-krystalický
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,38
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	151,5
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	11721
Maximální teplota použitelnosti [°C]	232 (krátce) - 199 (dlouze)
Smrštění [%]	0,6 - 3,5
Teplota tání T_m [°C]	282
Teplota taveniny [°C]	315 - 380
Teplota formy [°C]	135 - 160
Teplota sušení [°C]	149
Doba sušení [h]	3 - 6

Typické použití nachází v elektrickém a elektronickém odvětví (konektory, spínače, relé komponenty aj.), mechanickém a chemickém průmyslu (čerpadla, ventily, tepelné štíty, průtokoměry aj.), mezi spotřebiči (rukojeti, komponenty v mikrovlnné troubě, počítačové disky aj.) a v automobilovém průmyslu (systém kontroly emisí, senzory paliva, zařízení, zapalování, klimatizační komponenty, aj.). [9]

5.6 Polysulfon (PSU)

Tento amorfní termoplast vyniká svojí mimořádně vysokou teplotní odolností (dlouhodobě až 350°C), vysokou tuhostí a rozměrovou stabilitou. Mezi jeho další výhody patří odolnost proti hoření i bez přídavku přísad zpomalující hoření, vysoká teplotní stabilita, excelentní odolnost vůči teplotní degradaci, dobrá chemická odolnost. Má vysokou odolnost vůči alkáliím, solným roztokům a vodným minerálním kyselinám. [9]

Jako nevýhodu lze uvést jeho vysokou cenu, nízkou odolnost vůči povětrnostním vlivům se sklonem k praskání. Je rozpustný v methylen chloridu, chloroformu a trichlorethylenu a částečně rozpustný v esterech a ketonech. Viskozita PSU je velmi závislá na teplotě, na-

sákavost je 0,85%, a jeho zpracování vstřikováním je velmi náročné skrz vysoké teploty. [9]

Tab. 28: Vlastnosti PSU (30% skelná vlákna) [9]

Vlastnost	PSU (SV 30%)
Typ polymeru	amorfní
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,46
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa]	100
Modul pružnosti pro 23°C [MPa]	9308
Maximální teplota použitelnosti [°C]	190 (krátce) - 175 (dlouze)
Smrštění [%]	0,5 - 0,8
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	190
Teplota taveniny [°C]	315 - 380
Teplota formy [°C]	93 - 180
Teplota sušení [°C]	93 - 160
Doba sušení [h]	3 - 4

Použití PSU nachází v konstrukci budov (pozlacené vodovodní instalace a izolátory), v konstrukci velkých a malých spotřebičů (komponenty mikrovlnné trouby), v medicíně (nemocniční zařízení, elektronické součástky, laboratorní vybavení, které vyžaduje sterilizaci). [9]

5.7 Termoplastické elastomery (TPE)

Termoplastické elastomery jsou kaučukovité materiály, v kterých se kombinují vlastnosti termoplastů a pryží. [9]

TPE se zpracovávají stejnými operacemi jako běžné plasty, a to vytlačováním, vstřikováním, vyfukováním aj. [9]

Termoplastické elastomery mají řadu výhod oproti běžným pryžím, patří mezi ně:

- oproti běžným pryžím mají TPE jednoduché zpracování podobné termoplastům, což umožňuje nižší náklady na výrobu

- náklady na výrobu se snižují i díky rychlosti výrobního cyklu, u běžné pryže je nutná vulkanizace lisováním, která trvá několik minut, u TPE trvá výrobní cyklus několik sekund
- u běžných pryží se většinou přetoky = odpad, u TPE je možné opětovné zpracování (až do 25%) bez změny vlastností výrobku
- nižší spotřeba energie při výrobě
- TPE je výhodnější i z důvodů lepší kontroly kvality a přesnějších tolerancí při výrobě vstřikováním [9]

Termoplastické elastomery mají i nevýhody oproti pryžím, a jsou to:

- vysoké náklady na výrobní zařízení, pokud se inovuje zařízení, které bylo přizpůsobeno na výrobu pryží
- nutnost začlenění sušáren do procesu zpracování TPE, u zpracování pryží to není nutné
- zatím se vyrábí omezený počet TPE s nízkou tvrdostí (35 Shore A), většina TPE má Shore 65 A.
- TPE vyžaduje pro své zpracování vstřikováním vysoké teploty a tlaky, oproti pryži, která vyžaduje nižší tlaky a nižší teploty[9]

5.7.1 Termoplastický polyuretanový elastomer (TPU)

Výhody: dobré fyzikální vlastnosti, dobrá tepelně oxidační stabilita, dobrá odolnost vůči olejům, tukům a benzínu, mírná teplotní odolnost, dobrá hydrolytická stabilita, odolnost vůči mikrobům, odolnost proti roztržení. [9]

Nevýhody: vysoká cena, nízká odolnost vůči alifatickým a aromatickým uhlovodíkům, neodolává většině rozpouštědel, při použití pro venkovní aplikace vyžaduje UV stabilizátory, má špatné elektrické vlastnosti a vyžaduje sušení před zpracováním na vlhkost pod 0,07%. [9]

Tab. 29: Vlastnosti TPU – měkký a tvrdý typ [9]

Vlastnost	TPU
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,12 - 1,21
Pevnost v tahu do roztržení (měkký) [MPa]	10 - 52
Pevnost v tahu do roztržení (tvrdý) [MPa]	34 - 78
Poměrné prodloužení při přetržení (měkký) [%]	450 - 600
Poměrné prodloužení při přetržení (tvrdý) [%]	160 - 450
Maximální teplota použitelnosti (tvrdý) [°C]	110 (krátce) - 80 (dlouze)
Tvrdost Shore (měkký)	70A - 98A
Tvrdost Shore (tvrdý)	40D - 75D
Smrštění (měkký) [%]	1,3 - 1,5
Smrštění (tvrdý) [%]	0,6 - 0,85
Teplota skelného přechodu T_g [°C]	120 (měkký) - 160 (tvrdý)
Teplota taveniny (měkký) [°C]	193 - 220
Teplota taveniny (tvrdý) [°C]	199 - 232
Teplota formy [°C]	10 (měkký) - 65 (tvrdý)
Teplota sušení [°C]	93 - 110
Doba sušení [h]	2 - 4

Použití TPU nachází například v automobilovém průmyslu (pouzdra, těsnění, palubní desky, části nárazníků, řadicí páky aj.), ve výrobě hadic a trubek (zahradní, požární, benzinové aj.), kabelů, koleček pro vozíky (do nákupních center, do nemocnic, na kolečkové brusle), pro všeobecné použití (vodní postele, balóny, vložky do bot a jiné). [9]

5.7.2 Styrenový blokový kopolymer (SBS)

Výhody: dobré mechanické vlastnosti, vysoké poměrné prodloužení již při pokojové teplotě, nízká cena, možnost využití vstřikování, recyklovatelnost, [9]

Nevýhody: nízké možnosti modifikace, špatná odolnost vůči rozpouštědlům, nízká teplotní odolnost, úzké využití [9]

Tab. 30: Vlastnosti SBS [9]

Vlastnost	SBS
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	0,9 - 1,28
Pevnost v tahu do roztržení (měkký) [MPa]	3,86
Pevnost v tahu do roztržení (tvrdý) [MPa]	24,1
Poměrné prodloužení při přetržení (měkký) [%]	820
Poměrné prodloužení při přetržení (tvrdý) [%]	250
Maximální teplota použitelnosti (tvrdý) [°C]	60 (krátce) - 43 (dlouze)
Tvrdost Shore (měkký)	36A - 95A
Tvrdost Shore (tvrdý)	36D - 60D
Smrštění [%]	0,3 - 0,6
Bod tání [°C]	165
Teplota taveniny (měkký) [°C]	176
Teplota taveniny (tvrdý) [°C]	226
Teplota formy [°C]	24 (měkký) - 32 (tvrdý)
Teplota sušení [°C]	71
Doba sušení [h]	2 - 3

SBS se používá jako náhrada pryže, k vytlačování desek, trubek a drátu, pro výrobu lepidel, tmelů a nátěrových hmot, vstřikují se obaly na potraviny, madla, hračky, obuv. [9]

5.7.3 Termoplastický polyolefinový elastomer (TPO)

Výhody: vynikající izolační vlastnosti, možnost smíchání s PA – zvýší se použitelnost do vyšší teploty, vynikající odolnost proti nárazu a proti únavě, odolnost proti nasákavosti, není náchylný na degradaci ozonem, k růstu plísní a je odolný vůči UV záření [9]

Nevýhody: nízká odolnost proti kyselinám a zásadám, v uhlíkových rozpouštědlech bobtná a měkne (hlavně měkký typ), je obtížně lepitelný s jinými materiály [9]

Tab. 31: Vlastnosti TPO [9]

Vlastnost	TPO
Hustota $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	0,88 - 0,98
Pevnost v tahu do roztržení (měkký) [MPa]	6,5
Pevnost v tahu do roztržení (tvrdý) [MPa]	27,5
Poměrné prodloužení při přetržení (měkký) [%]	600
Poměrné prodloužení při přetržení (tvrdý) [%]	20
Maximální teplota použitelnosti (tvrdý) [°C]	100 (krátce) - 82 (dlouze)
Tvrdost Shore (měkký)	40D
Tvrdost Shore (tvrdý)	70D
Smrštění [%]	0,7 - 2,1
Bod tání [°C]	142 (měkký) - 165 (tvrdý)
Teplota taveniny (měkký) [°C]	182
Teplota taveniny (tvrdý) [°C]	260
Teplota formy [°C]	10 (měkký) - 65 (tvrdý)
Teplota sušení [°C]	65 - 107
Doba sušení [h]	3 - 6

TPO se používá hojně v automobilovém průmyslu (masky aut, karosérie aut, nárazníky, panely, interiéry auta, prahové lišty, audio systémy, ochranná pouzdra), na kabely a vedení, těsnění, elektrické zástrčky, přidává se do HDPE aby zlepšil odolnost proti praskání. [9]

6 STATICKÉ MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Dle účelu a způsobu zkoušení lze mechanické vlastnosti rozdělit takto:

- a) Mechanické vlastnosti zjišťované *krátkodobým působením statické síly nebo statického napětí*. Zjišťuje se chování materiálu za konkrétních podmínek napětí, deformace, teploty a času. Jednotlivé podmínky se mohou měnit v širokém rozmezí podle účelu zkoušky, s výjimkou doby trvání zkoušky, která se buď nemění vůbec, nebo jen v mezích, které nemají vliv na hodnotu zjišťované vlastnosti. Krátkodobých zkoušek se používá hlavně pro rychlou kontrolu jakosti. Hlavním požadavkem je dobrá reprodukovatelnost výsledku bez zřetele na možnost jejich širšího využití v praxi. [13]
- b) Mechanické vlastnosti zjišťované *dlouhodobým působením statické síly nebo statického napětí*. Zjišťuje se chování materiálu za konkrétních zkušebních podmínek v podstatně delším časovém úseku, než je tomu u zkoušek krátkodobých. Zjišťují se závislosti hodnot zkoušených vlastností na čase. Podmínky zkoušky (napětí, teplota, eventuálně vlhkost) se mohou měnit v širokém rozmezí podle účelu zkoušky. Dlouhodobé zkoušky slouží ke zjišťování inženýrských vlastností, jejichž znalost podmiňuje správnou aplikaci plastických hmot. [13]
- c) Mechanické vlastnosti zjišťované *cyklicky nebo acyklicky měnícím se napětím*. Zkouší se únava materiálu za určitých podmínek časově proměnného namáhání, konstantní teploty eventuálně vlhkosti. Doba trvání zkoušky je buď předepsána, nebo závisí na odolnosti materiálu proti únavě (zkouška do porušení). [13]

6.1 Tahová zkouška

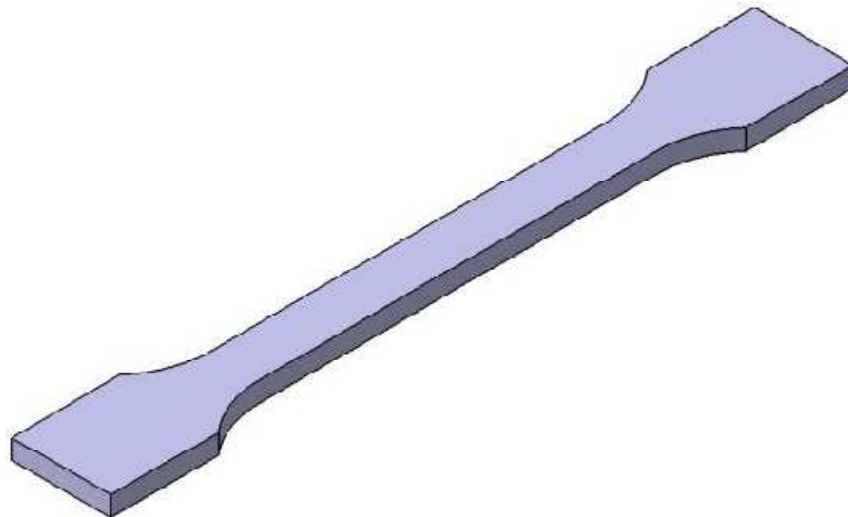
Tahová zkouška je jednou ze základních a nejvíce používaných zkoušek v technické praxi, jak u kovových, tak i polymerních materiálů. Princip zkoušky spočívá ve statickém jednoosém zatěžování zkušebního tělesa, které je pevně upnuto ve zkoušecím zařízení.

Za předpokladu, že zkoušený materiál je izotropní, tak by napětí v tahu bylo rozloženo po celém průřezu tělesa rovnoměrně. Tento ideální stav však v praxi neexistuje, a to v důsledku anizotropie. Vlastnosti plastů se v různých místech liší a při takovém namáhání je napětí v tahu rozloženo po průřezu nerovnoměrně. [13]

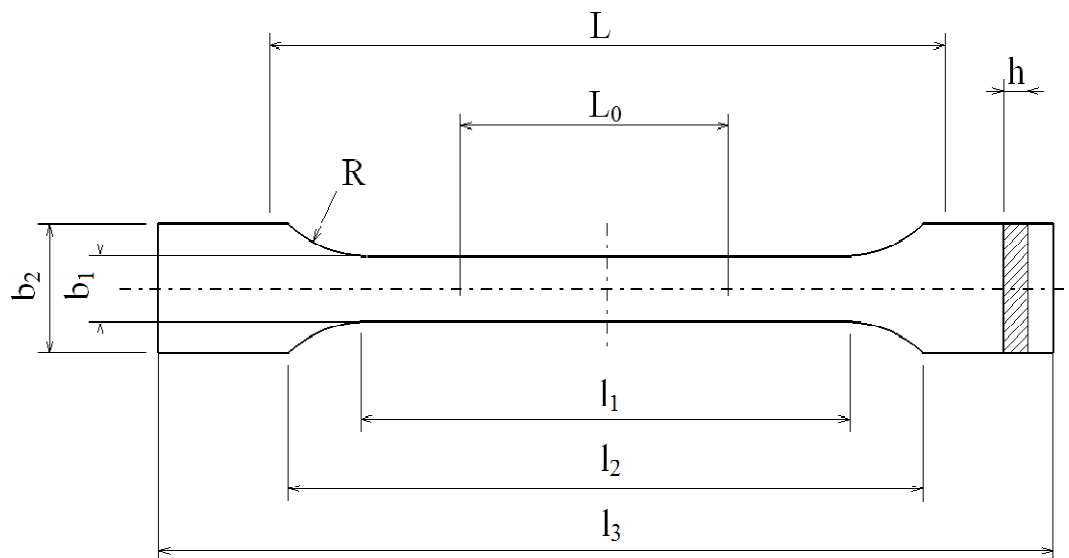
Výsledkem takové zkoušky jsou pracovní diagramy, které jsou popsány níže.

6.1.1 Zkušební tělesa

Tvar a velikost zkušebního tělesa určuje norma ČSN EN ISO 527. Rozlišujeme několik druhů, tvarů a velikostí zkušebních těles pro tahovou zkoušku. Zároveň rozlišujeme i způsob výroby, např. vstřikováním, tvářením, mechanickým opracováním aj. [13]



Obr. 6: Ilustrativní zobrazení zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku plastů [12]



Obr. 7: Normalizované rozměry pro zkušební těleso pro tahovou zkoušku plastů [12]

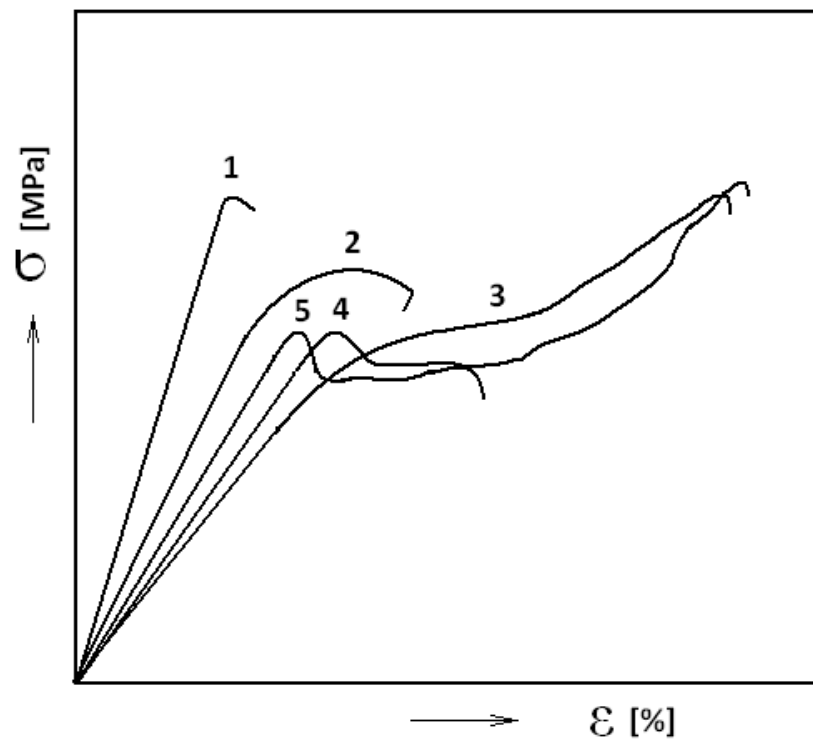
Tab. 32: Rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku plastů [12]

Rozměry [mm]			
	Druh rozměru	Typ 1A	Typ 1B
b₁	Šířka pracovní části	10 ± 0,2	
b₂	Šířka upínací části	20 ± 0,2	
l₁	Délka pracovní části	80 ± 2	60 ± 0,5
l₂	Vzdálenost mezi širokými částmi	104 až 113	106 až 120
l₃	Celková vzdálenost	≥ 150	
L₀	Počáteční měřená délka	50 ± 0,5	
L	Vzdálenost čelistí na počátku	115 ± 1	$l_2 \begin{smallmatrix} +5 \\ 0 \end{smallmatrix}$
h	Tloušťka tělíska	4 ± 0,2	
R	Poloměr	20 až 25	≥ 60

6.1.2 Pracovní diagram tahové zkoušky

Grafické znázornění závislosti napětí σ na poměrném prodloužení měřené části zkušebního tělesa $\Delta l = l - l_0$ představuje u každého polymerního materiálu jiný pracovní diagram. [10]

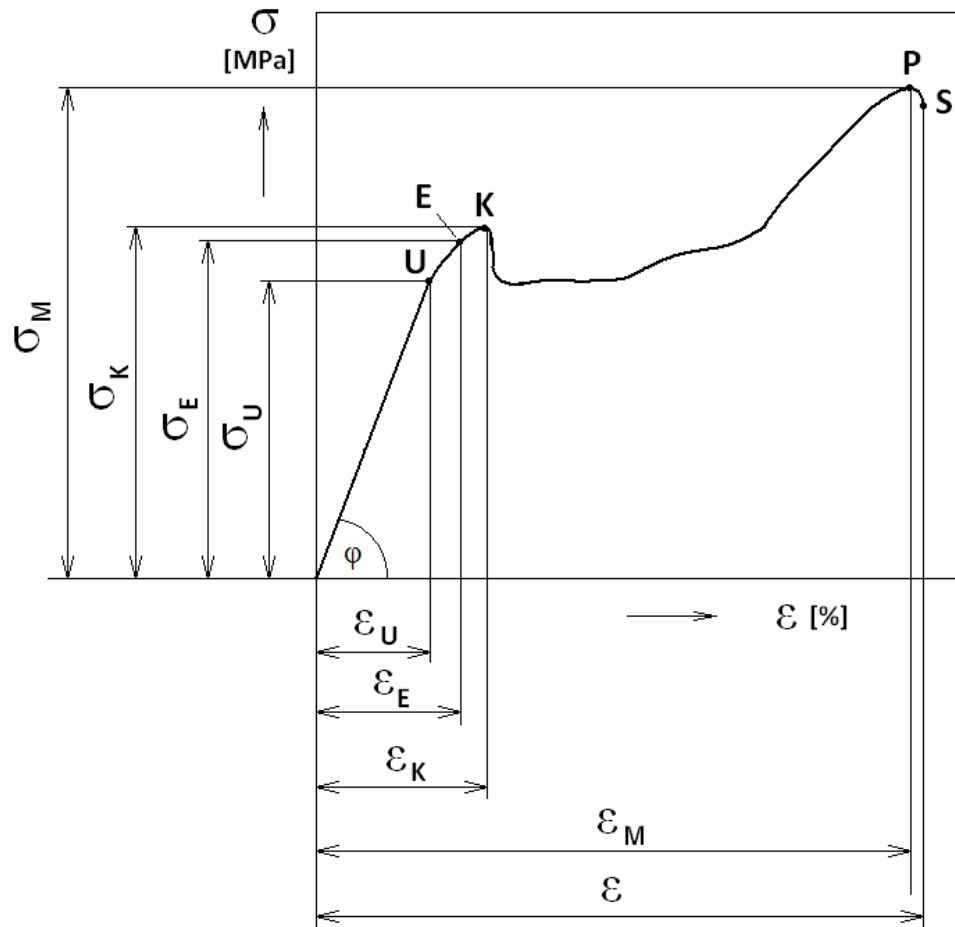
Na Obr. 8 lze vidět různé pracovní diagramy polymerních materiálů. Pracovní diagram č. 1 zahrnuje polymery s malou průtažností (reaktoplasty, polystyren, PMMA apod.). Diagram č. 2 charakterizuje houževnatější polymerní materiály (těleso se přetrhne, jakmile napětí překročí mez úměrnosti). Diagram č. 3 se vyznačuje velkým prodloužením (měkké PVC). Diagram č. 4 se vyznačuje horní a dolní mezí kluzu (PE, PP aj.) Diagram č. 5 ukazuje materiály, jejichž mechanické vlastnosti se prodloužením zlepšují (polyamid). [13]



Obr. 8: Typy pracovních diagramů polymerních materiálů [13]

Na křivce pracovního diagramu (Obr. 9) lze vyznačit několik důležitých bodů:

- E – mez pružnosti σ_E
- U – mez úměrnosti σ_U
- K – mez kluzu (dříve průtažnosti) σ_K
- P – mez pevnosti neboli pevnost v tahu σ_{Pt} (R_m)
- S – napětí při přetržení
- Bodům odpovídají hodnoty tažnosti ϵ_E , ϵ_U , ϵ_K , ϵ_P .



Obr. 9: Pracovní diagram tahové zkoušky [13]

6.1.2.1 Mez úměrnosti R_U (σ_U)

Je to mezní napětí v tahu, pro které platí úměrnost mezi napětím a celkovou deformací.

Pro mez úměrnosti platí Hookův zákon: [13]

$$\varepsilon = kR(\sigma) \quad (1)$$

Kde ε je poměrné prodloužení $\Delta l/l_0$, k – je součinitel úměrnosti, a $R(\sigma)$ je napětí v tahu.

Modul pružnosti (Youngův model): [13]

$$E = \frac{R(\sigma)}{\varepsilon} \quad [MPa] \quad (2)$$

Hodnota modul E však není konstantou materiálu, nýbrž je závislá na podmínkách měření, hlavně na čase a teplotě. Obecně platí, že se stoupající teplotou modul E klesá. [13]

$$R_U = \frac{F_U}{S_o} \quad [MPa] \quad (3)$$

6.1.2.2 Mez pružnosti R_e (σ_E)

Po překročení meze úměrnosti vzrůstá deformace zkušební tělesa rychleji než příslušné napětí. Přestane-li v určitém okamžiku napětí působit, deformace okamžitě zcela nevymizí. Po okamžitém vymizení ideálně elastické deformace zůstává ještě deformace viskoelastická neboli zpožděně elastická, jejíž vymizení je časově závislé. Působí-li napětí ještě delší dobu, dochází k částečné plastické deformaci, dokonale nevratné. [13]

Mez pružnosti je největší napětí, při jehož odstranění prakticky úplně mizí deformace měřené části zkušební tělesa, označuje se R_E :

$$R_E = \frac{F_E}{S_o} \quad [MPa] \quad (4)$$

6.1.2.3 Mez kluzu R_K (σ_K)

Pokud se napětí zvětšuje nad mez úměrnosti, tak hodnota modulu pružnosti (Youngova modulu) stále klesá. Zatímco napětí stoupá pomalu (nebo se zastaví), prodloužení se stále zvětšuje. Mez kluzu R_K je nejmenší napětí, při němž nastávají podstatné trvalé deformace. Lze ji vyjádřit vztahem: [13]

$$R_K = \frac{F_K}{S_o} \quad [MPa] \quad (5)$$

6.1.2.4 Mez pevnosti v tahu

Zvětšuje-li se napětí nad mez kluzu, zkušební těleso se přetrhne. Průběh pracovních křivek, které se mohou vyskytnout, je na Obr. 8. Diagram č. 1 patří polymerním materiálům, u nichž po překročení meze kluzu dochází rychle ke ztrátě pevnosti a k přetržení. Mez kluzu je zde současně i pevností v tahu. U takových polymerních materiálů nedojde v místě přetržení k zúžení průřezu (vytvoření krčku). Zkušební těleso se prudce přetrhne, a lom je zpravidla rovinný. U diagramu č. 2 se zkušební těleso přetrhne brzy po překročení meze kluzu, která je největším napětím dosaženým při zkoušce a je současně i pevností v tahu. Přetržení zkušební tělesa předchází vznik krátkého krčku. Charakteristická je

při tom změna barvy krčku (zbělení). Diagram č. 3 se nevyznačuje mezí kluzu. U takových materiálů se stanoví zpravidla smluvní mez kluzu, která se pak považuje z konstrukčního hlediska za pevnost v tahu. Diagram č. 4 se vyznačuje horní a dolní mezí kluzu. Zkušební těleso se přetrhne brzy po překročení meze kluzu, kdy hmota ztrácí mechanickou pevnost. Diagram č. 5 se počátečním průběhem podobá předcházejícím. Liší se však chováním za dolní mezí kluzu. U těch polymerních materiálů dochází k orientaci molekul. [13]

Mez pevnosti v tahu je definována jako napětí potřebné k přetržení zkušební tělesa vztažené na původní průřez:

$$R_M = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [MPa]$$

(6)

6.2 Zkoušky tvrdosti

Principem měření tvrdosti materiálu je vtlačení zkušební tělíska s hrotem různého tvaru definovanou silou do zkoušeného materiálu. Měří se hloubka vniknutí tělíska do materiálu. [14]

U kovů může být měřen důsledek vniknutí až po ukončení zatížení, protože podíl elastické deformace zde nehraje roli. U elastomerů musí být naopak celkové vniknutí zkušební tělíska měřeno po definované době a při zatížení, protože v materiálu při odlehčení nelze deformaci změřit. Pro termoplasty a reaktoplasty, u kterých musí být uvažován jak podíl trvalé, tak plastické deformace, byly vyvinuty metody, při kterých se vniknutí měří především při zátěži. [14]

Obecně se používá pro měření polymerních materiálů pěti otiskovacích metod, jsou to: zkouška podle Brinella, podle Vickerse, podle Rockwella, podle Shorea a zkouška IRHD. [14]

6.2.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Princip metody je založen na vtlačování kuličky do zkoušeného materiálu. Tvrdost je vyjádřena vztahem mezi silou, kterou je vtlačena ocelová kulička do zkoušeného tělesa a velikostí důlku (hloubkou nebo průměrem), který tím po určité době působení na zkušebním tělese vznikne. [15]

6.2.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Princip této zkoušky je založen ve vtlačování diamantového jehlanu do zkušební vzorku určitým zkušebním zatížením F po stanovenou dobu a změří se úhlopříčka vtisku (zjistíme aritmetický průměr délek obou naměřených úhlopříček d_1 a d_2), která zůstane po odlehčení zatížení. [15]

6.2.3 Zkouška tvrdost podle Rockwella

Princip spočívá v postupném vtlačování vnikajícího tělesa do povrchu zkušební tělesa a změření trvalé hloubky vtisku h . Vnikajícím tělesem je ocelová kulička o definovaném průměru. Celkové zkušební zatížení F se skládá z předběžného zatížení F_0 a přídavného zatížení F_1 . [15]

6.2.4 Metoda Shore

Princip metody dle Shoreho spočívá v měření hloubky specifikovaného hrotu vtlačeného do vzorku materiálu za stanovených podmínek. Metoda umožňuje měřit tvrdost na začátku vtlačování hrotu anebo po uplynutí stanovené doby, nebo oboje. Používá se, pokud již není vhodná stupnice R u metody dle Rockwella. [15]

6.2.5 Metoda IRHD

Tato metoda tvrdosti nám slouží k rychlému změření tuhosti pryže. Spočívá v měření rozdílu mezi hloubkou vtlačení kuličky do pryže při malé, kontaktní síle a velké (vtlačovací) síle. Tato zkouška se dělí na standardní metody měření tvrdosti a měření zdánlivé tvrdosti. [15]

6.3 Rázová zkouška (Charpyho kladivo)

Charpyho metodou zjišťujeme rázovou energii pomocí kyvadlového kladiva, znázorněném na obr. 10. Otočně zavěšené kladivo má ve své horní poloze potenciální energii: [13]

$$E_p = mgh = Gh \quad [J] \quad (7)$$

kde G je hmotnost kladiva

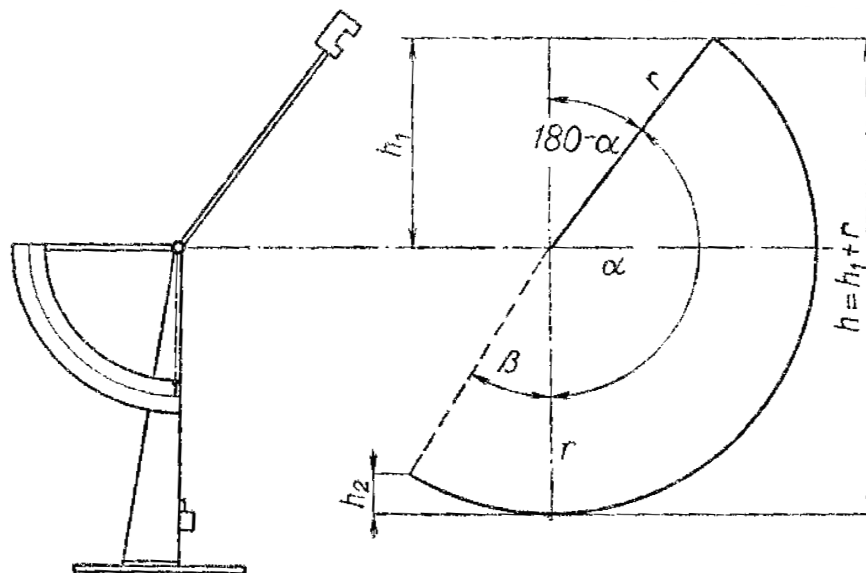
Při uvolnění kladiv padá, při čemž projde bodem maximální kinetické energie, pro který platí:

$$E_p = E_k \quad (8)$$

V tomto bodě je umístěn střed zkušební tělesa. Na zkušební těleso tedy působí největší kinetická energie, jejíž hodnota je dána energií polohy v zavěšení. Energie polohy se při pádu kladiva přemění v energii kinetickou, jejíž část se spotřebuje na přeražení a odmrštění zkušební tělesa a tření. [13]

Spotřebovaná energie:

$$E = Gr(\cos\beta - \cos\alpha) \quad (9)$$



Obr. 10: Schéma Charpyho kladiva [13]

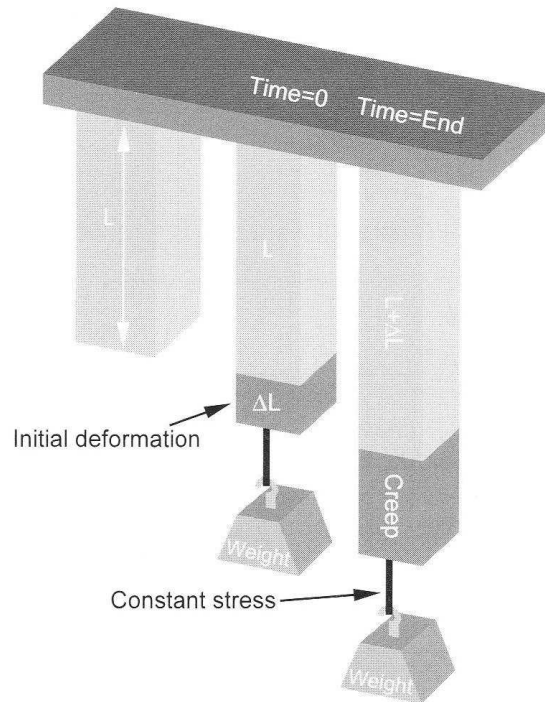
6.4 Kríp u plastů

Plastové díly vykazují dvě hlavní vlastnosti s ohledem na dlouhodobé zatížení, a to je tzv. kríp (z anglického slova creep) – tečení a relaxace napětí.

Tečení je závislé na konstantním zatížení, které je aplikováno na plastové části a vyvolává vnitřní pnutí. Postupně se plast s ohledem na čas začíná deformovat.

Obrázek 6 znázorňuje krípový experiment, kdy je zkušební těleso upnuto pevně na jednom ze svých konců. První zkušební těleso (zleva) o délce L je znázorněno bez zatížení.

Na prostředním zkušebním tělese je znázorněno okamžité zatížení v čase $t = 0$ s, z toho plyne prodloužení ΔL (počáteční deformace). Na pravém zkušebním tělese je znázorněno, tzv. tečení, kdy vlivem konstantního napětí, např. po dobu 1 roku se daný zkušební vzorek dále prodlužoval v závislosti na čase, bez změny zatížení. [10]



Obr. 11: Znázornění kríповého chování [10]

Krípový modul je modul materiálu za daného napětí a teploty během určitého časového úseku, a je vyjádřen tímto vztahem: [10]

$$E_c = \frac{\text{napětí}}{\text{celková deformace v čase}}$$

(10)

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH SKUPIN POLYMERŮ SE ZÁKLADNÍMI KOVOVÝMI MATERIÁLY

V této bakalářské práci nejprve srovnávám důležité parametry jednotlivých skupin polymerních materiálů, jež byly převzaty z knih E. A. Campa – *Industrials Polymers* (v literatuře pod číslem [9]) a H. Domininghause – *Plastics for Engineers* (v literatuře pod číslem [16]) s parametry, které nám poskytují základní kovové materiály, jako jsou hliník, titan, ocel třídy 11373 a ocel třídy 11500. Hodnoty kovových materiálů byly převzaty ze strojnických tabulek – Jan Leinveber.

V tabulkách jsem se zaměřil na porovnání hustoty materiálu ρ , pevnosti v tahu R_m , modul pružnosti E a především na tzv. specifickou pevnost v tahu R_{ms} , která je porovnávána i graficky. U polymerů se běžně pevnost v tahu označuje jako σ . Z důvodu smíšených údajů polymerů a kovů v tabulkách jsem se rozhodl pro jednotné označení pevnosti v tahu R_m .

Samotná hustota, pevnost v tahu a modul pružnosti jsou u plastů daleko nižší, než u kovových materiálů. Právě specifická pevnost v tahu zohledňuje kromě samotné pevnosti v tahu i danou hustotu materiálu. Tuto specifickou pevnost vypočítáme podílem známé pevnosti v tahu R_m a hustoty daného materiálu. V jednotlivých níže uvedených tabulkách a grafech jsem použil hliník jako etalon - jeho bezrozměrnou hodnotu jsem stanovil na 1. Ostatní hodnoty pevnosti v tahu budou děleny pevností hliníku, a tak dostaneme různé poměrné hodnoty, které budou znázorňovat, jak se liší bezrozměrná specifická pevnost v tahu daného polymeru v porovnání se specifickou pevností v tahu hliníku.

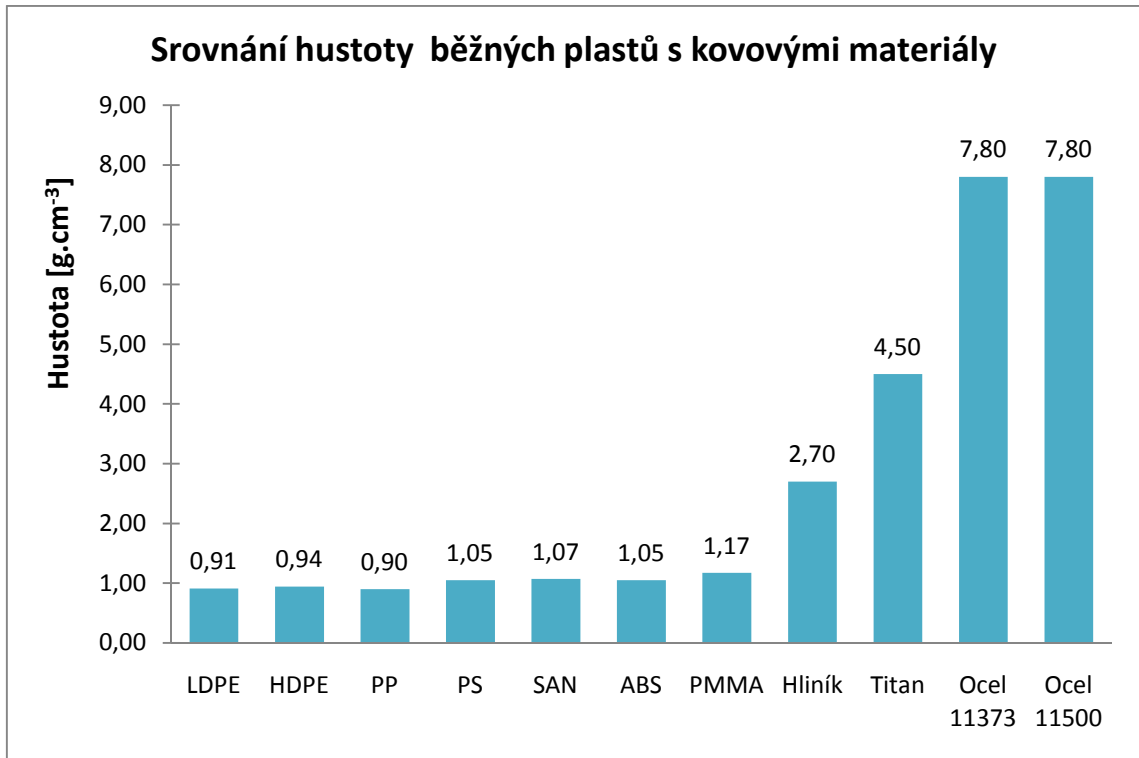
V následujících podkapitolách je provedeno srovnání standardních, konstrukčních a speciálních plastů právě s vlastnostmi kovových materiálů, kdy jsem nejdříve provedl demonstrační srovnání rozdílů hustoty a pevností v tahu srovnávaných materiálů, a následně porovnání specifické pevnosti v tahu R_{ms} . U některých z polymerů jsou uvedeny jejich vlastnosti po vyztužení skelnými vlákny (většinou 30 %) a to z toho důvodu, že jejich použití jako neplněných materiálů je méně časté.

7.1 Srovnání hustoty a R_m standardních plastů s kovovými materiály

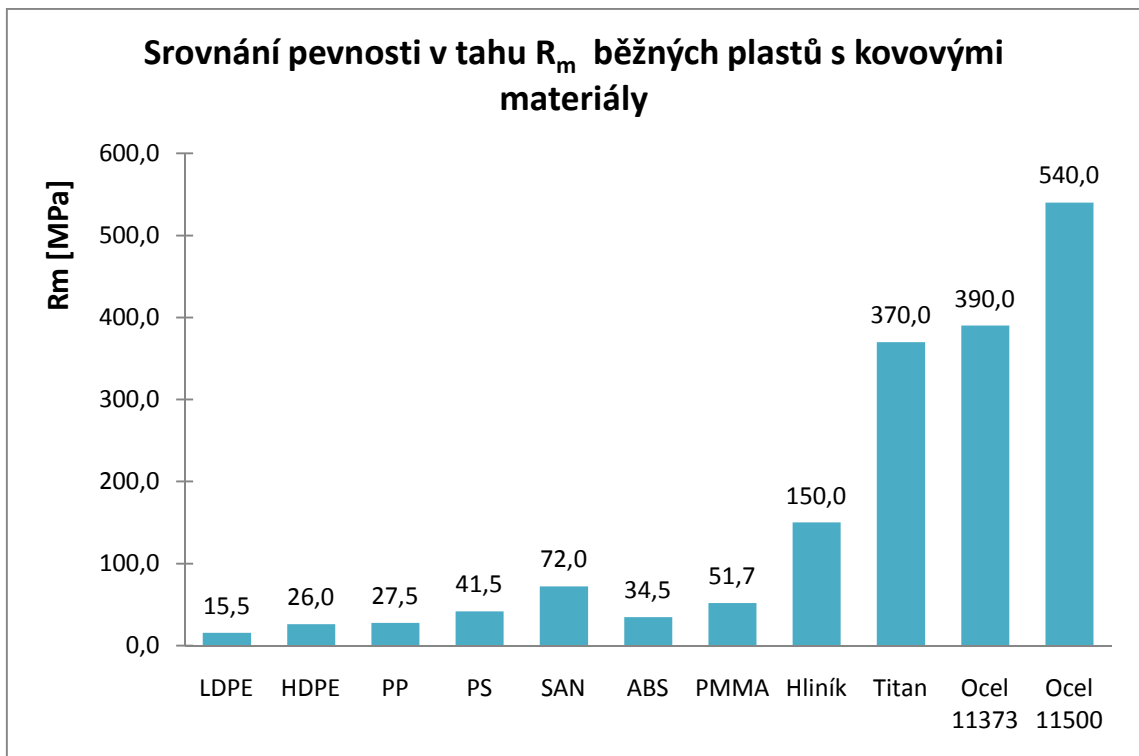
Tab. 33: Porovnání hustoty a pevnosti v tahu standardních polymerů s kovovými materiály

Druh	Materiál	Hustota $\rho \left[\frac{g}{cm^3} \right]$	R_m [MPa]
Semi-krytalické běžné plasty	LDPE	0,91	15,5
	HDPE	0,94	26,0
	PP	0,90	27,5
Amorfní běžné plasty	PS	1,05	41,5
	SAN	1,07	72,0
	ABS	1,05	34,5
	PMMA	1,17	51,7
Kovové materiály	Hliník	2,70	150,0
	Titan	4,50	370,0
	Ocel 11373	7,80	390,0
	Ocel 11500	7,80	540,0

Jak lze vypořádat z Tab. 33 a následného Obr. 12, běžné polymery mají daleko nižší hodnoty hustoty, oproti kovovým materiálům. Hustoty polymerů jsou téměř třikrát nižší než hustota hliníku, čtyřikrát nižší než hustota titanu a osmkrát nižší než hustota ocelí. Nejvyšší hustotu z porovnávaných standardních polymerů má PMMA, naopak nejnižší hustotu má polypropylen. Dále na Obr. 13 je demonstrativně znázorněn rozdíl v pevnosti v tahu R_m mezi běžnými polymery a kovovými materiály. Hodnoty u polymerů jsou zde výrazně nižší.



Obr. 12: Srovnání hustoty standardních plastů s kovovými materiály



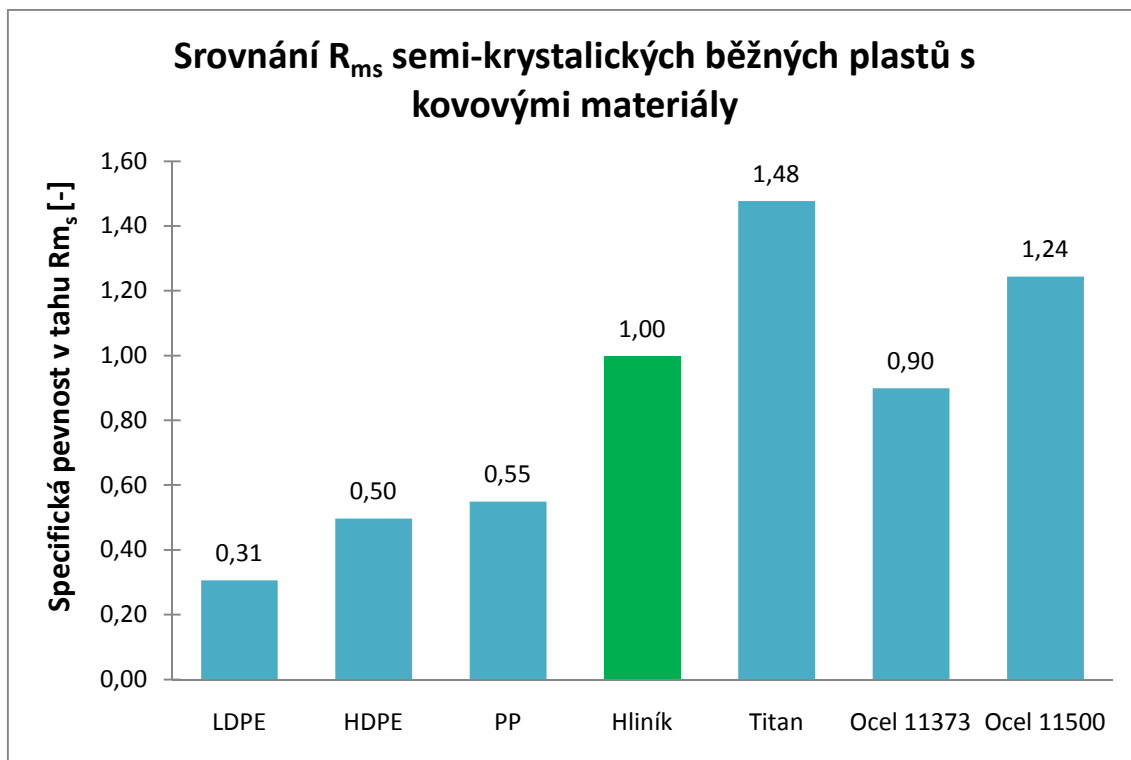
Obr. 13: Srovnání pevnosti v tahu standardních plastů s kovovými materiály

7.1.1 Specifická pevnost v tahu R_{ms} u semi-krystalických standardních plastů

Tab. 34: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti tahu semi-krystalických standardních polymerů s kovovými materiály

Druh	Materiál	Hustota [$\frac{g}{cm^3}$]	R_m [MPa]	E[MPa]	R_{ms} [-]
Semi-krystalické běžné plasty	LDPE	0,91	15,5	345	0,31
	HDPE	0,94	26,0	1379	0,50
	PP	0,90	27,5	1172	0,55
Kovové materiály	Hliník	2,70	150,0	70000	1,00
	Titan	4,50	370,0	120000	1,48
	Ocel 11373	7,80	390,0	200000	0,90
	Ocel 11500	7,80	540,0	200000	1,24

Z předcházející Tab. 34 a následného grafu Obr. 14 lze dovést, že semi-krystalické standardní plasty nedosahují, ani při zohlednění jejich hustoty, vlastností kovových materiálů. To se odráží i na jejich nízké ceně. Protože patří mezi nejlevnější plasty, jsou tudíž nejvíce používány ve výrobě, kde nejsou požadovány vysoké mechanické vlastnosti. LDPE má nejnižší hodnotu specifické pevnosti v tahu 0,31, u HDPE je hodnota 0,50 a nejlepší vlastností z polyolefinů má PP s hodnotou $R_{ms} = 0,55$.



Obr. 14: Srovnání R_{ms} semi-krystalických standardních plastů s kovovými materiály

7.1.2 Specifická pevnost v tahu R_{ms} u amorfních standardních plastů

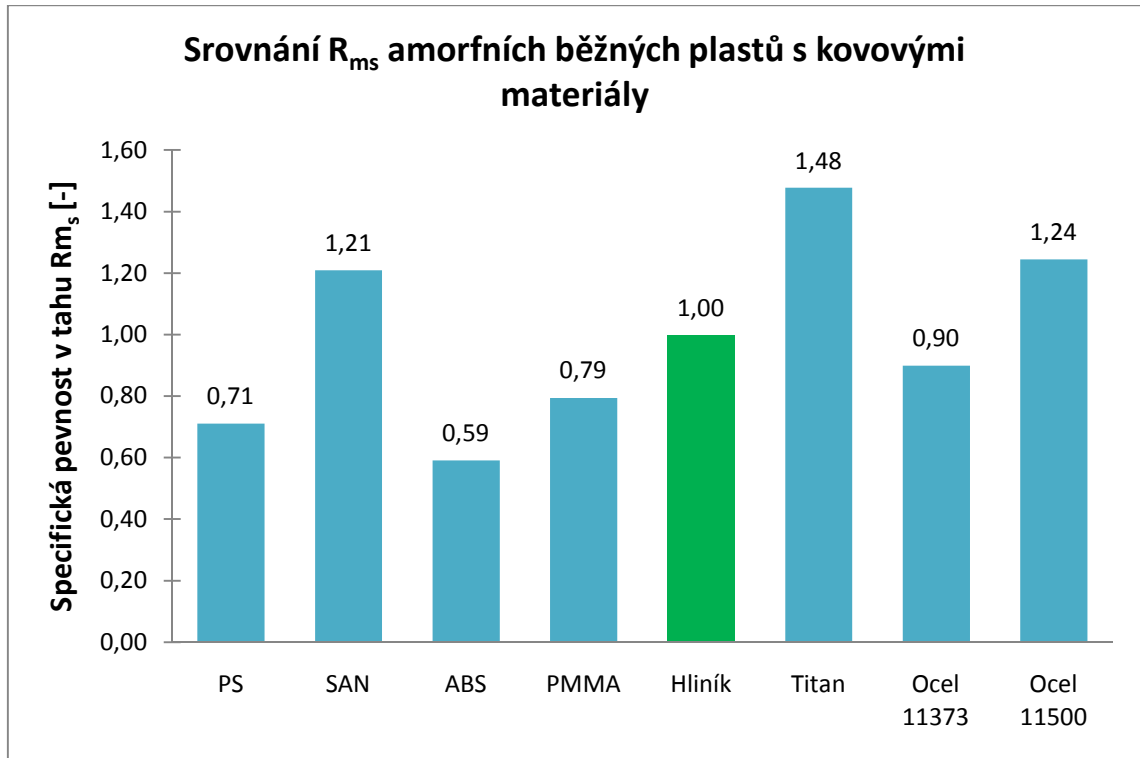
Tab. 35: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti tahu amorfních standardních polymerů s kovovými materiály

Druh	Materiál	Hustota [$\frac{g}{cm^3}$]	Rm [MPa]	E [MPa]	R_{ms} [-]
Amorfní běžné plasty	PS	1,05	41,5	3102	0,71
	SAN	1,07	72,0	3310	1,21
	ABS	1,05	34,5	2068	0,59
	PMMA	1,17	51,7	2620	0,79
Kovové materiály	Hliník	2,70	150,0	70000	1,00
	Titan	4,50	370,0	120000	1,48
	Ocel 11373	7,80	390,0	200000	0,90
	Ocel 11500	7,80	540,0	200000	1,24

Ve srovnání amorfních standardních plastů (v Tab. 35 a na Obr. 15 níže) s kovovými materiály již lze vidět plasty, které vzhledem ke své nízké hustotě mohou konkurovat kovovým materiálům. Velmi dobrých vlastností dosahuje PMMA, který se svojí specifickou pevností v tahu ($R_{ms} = 0,79$) již přibližuje vlastnostem hliníku ($R_{ms} = 1,00$) a oceli třídy 11373

($R_{ms} = 0,90$). Nejhuře ve srovnání R_{ms} s kovovými materiály dopadl polymer ABS s hodnotou 0,59.

Zatímco PS mezi srovnávanými plasty mírně zaostává, tak jeho kopolymer SAN má jednoznačně nejlepší specifickou pevnost v tahu ($R_{ms} = 1,21$) mezi běžnými plasty. Téměř zcela se vyrovná materiálům, jako jsou titan ($R_{ms} = 1,48$) a ocel třídy 11500 ($R_{ms} = 1,24$). Proto nachází široké uplatnění v automobilovém průmyslu a stavebnictví.



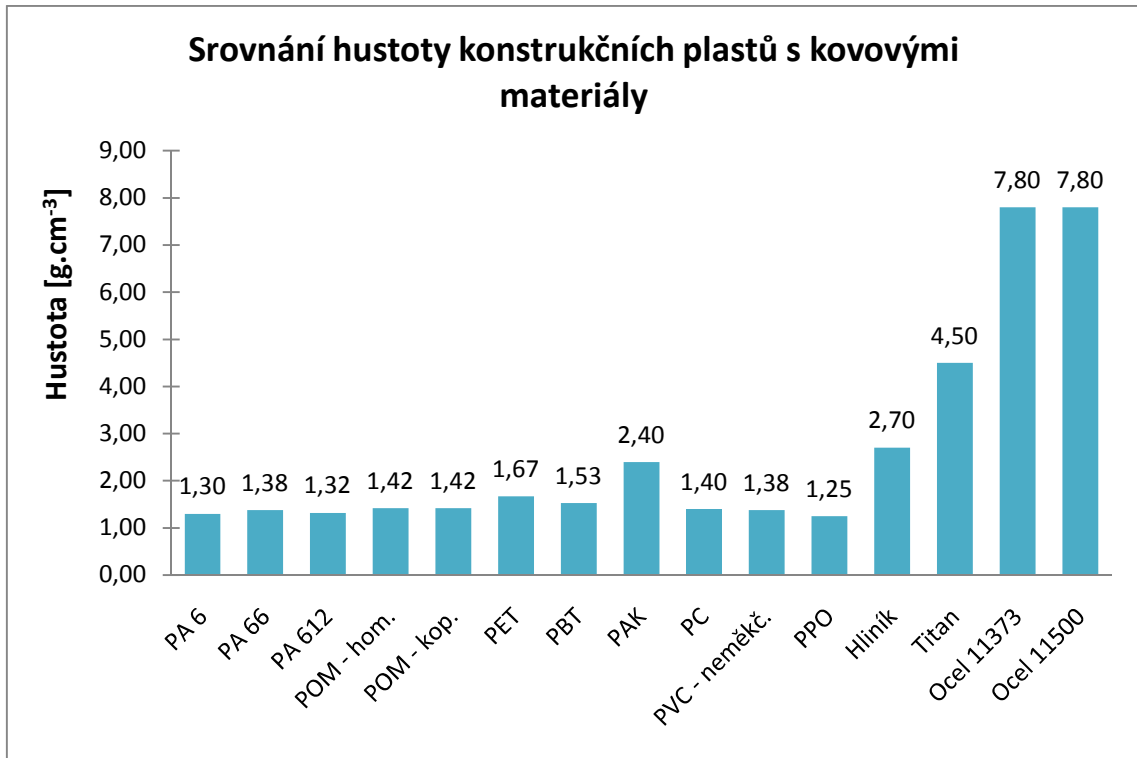
Obr. 15: Srovnání R_{ms} amorfních standardních plastů s kovovými materiály

7.2 Srovnání hustoty a R_m konstrukčních plastů s kovovými materiály

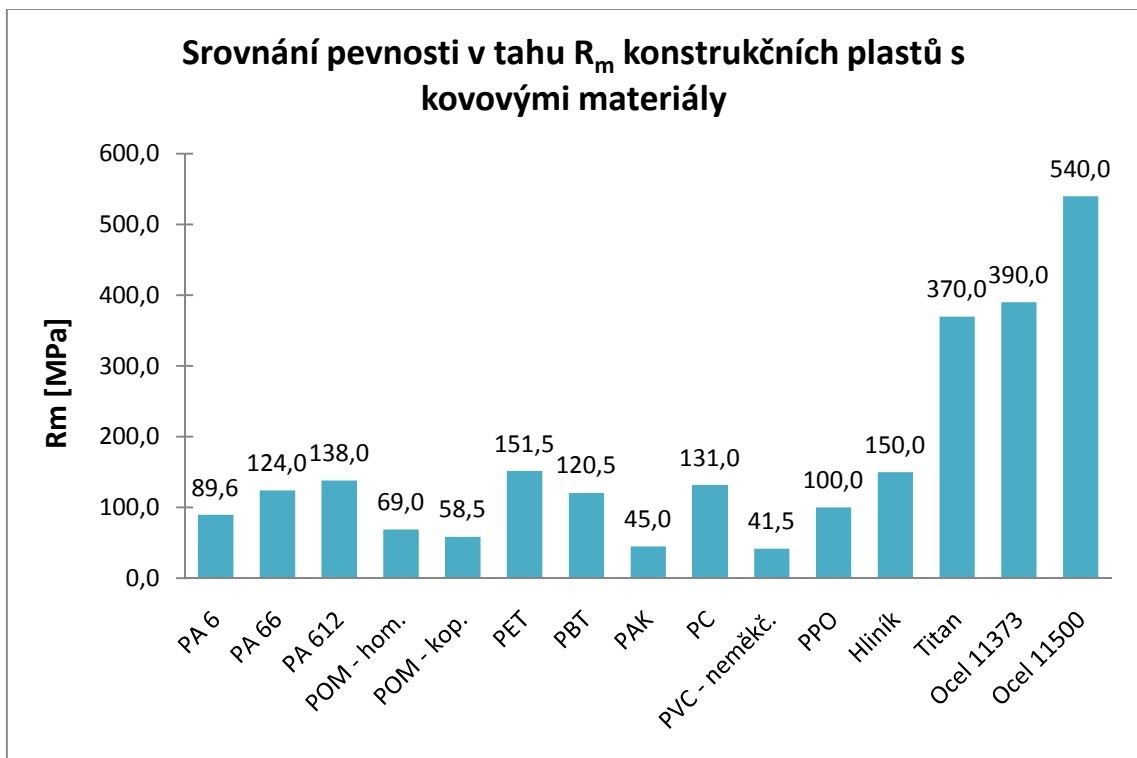
Tab. 36: Porovnání hustoty a pevnosti v tahu konstrukčních polymerů s kovovými materiály

Druh	Materiál	Hustota [$\frac{g}{cm^3}$]	R_m [MPa]
Semi-krystalické konstrukční plasty	PA 6 (33 % SV)	1,30	89,6
	PA 66 (33 % SV)	1,38	124,0
	PA 612 (33 % SV)	1,32	138,0
	POM - homopolymer	1,42	69,0
	POM - kopolymer	1,42	58,5
	PET (30 % SV)	1,67	151,5
	PBT (30 % SV)	1,53	120,5
	PAK	2,40	45,0
Amorfní konstrukční plasty	PC (30 % SV)	1,40	131,0
	PVC - neměkčené	1,38	41,5
	PPO (30 % SV)	1,25	100,0
Kovové materiály	Hliník	2,70	150,0
	Titan	4,50	370,0
	Ocel 11373	7,80	390,0
	Ocel 11500	7,80	540,0

Z Tab. 36 lze zjistit, že semi-krystalické konstrukční plasty mají vyšší hodnoty hustoty, než mají plasty standardní, ale i přesto jsou tyto hodnoty nízké ve srovnání s kovovými materiály. Pouze polymer polyester alkyd (PAK) se svojí hustotou přibližuje hustotě hliníku. (Obr. 16) Pevností v tahu se již některé konstrukční polymery přibližují nebo zcela vyrovnají vlastnostem hliníku (Obr. 17). Patří mezi ně polymer PET s hodnotou $R_m = 151,5$ [MPa], PA 612 s hodnotou $R_m = 138$ [MPa], PC s hodnotou $R_m = 131$ [MPa], PA 66 $R_m = 124$ [MPa], a PBT s hodnotou $R_m = 120,5$ [MPa]. Je nutné ovšem zmínit, že velká většina konstrukčních plastů, které jsou používány v náročných aplikacích a je u nich požadována vysoká pevnost, se již nepoužívají v neplněném stavu. Proto u většiny srovnávaných plastů jsou uvedeny vlastnosti po naplnění skelnými vlákny.



Obr. 16: Srovnání hustoty konstrukčních plastů s kovovými materiály



Obr. 17: Srovnání pevnosti v tahu konstrukčních plastů s kovovými materiály

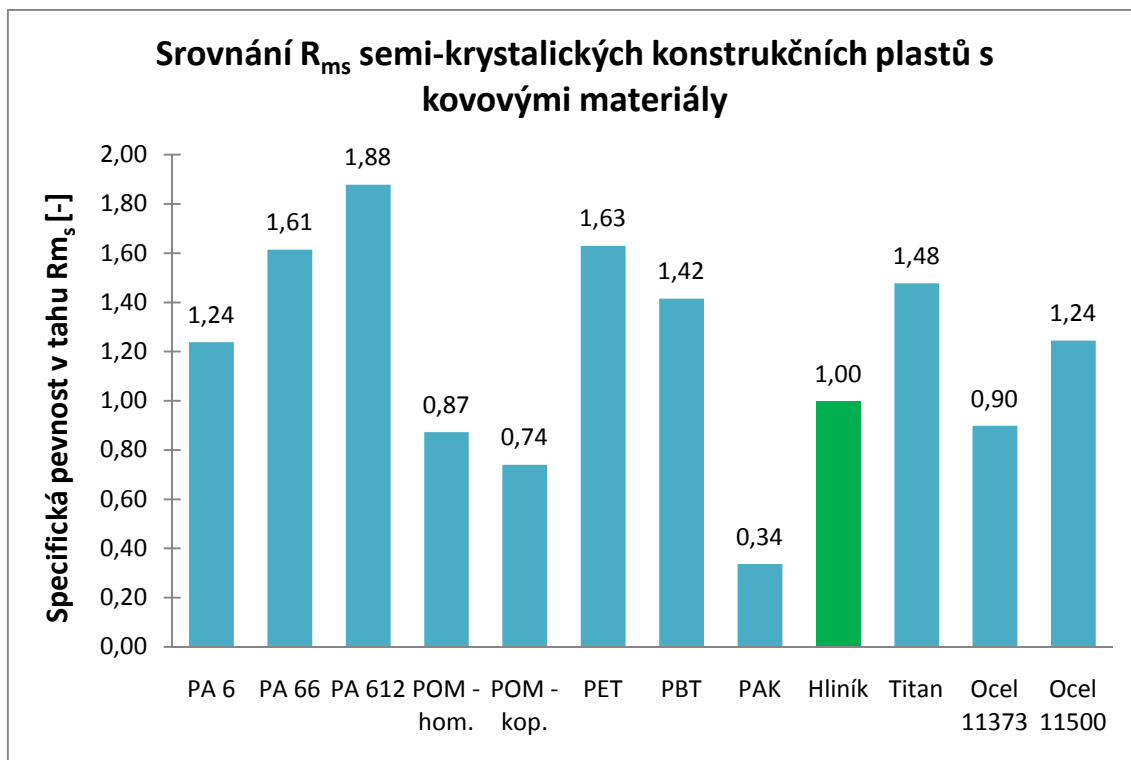
7.2.1 Specifická pevnost v tahu R_{ms} u semi-krystalických konstrukčních plastů

Tab. 37: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti tahu semi-krystalických konstrukčních polymerů s kovovými materiály

Druh	Materiál	Hustota [$\frac{g}{cm^3}$]	R_m [MPa]	E [MPa]	R_{ms} [-]
Semi-krystalické konstrukční plasty	PA 6 (33 % SV)	1,30	89,6	5515	1,24
	PA 66 (33 % SV)	1,38	124,0	6205	1,61
	PA 612 (33 % SV)	1,32	138,0	6205	1,88
	POM - homopolymer	1,42	69,0	2800	0,87
	POM - kopolymer	1,42	58,5	3200	0,74
	PET (30 % SV)	1,67	151,5	1150	1,63
	PBT (30 % SV)	1,53	120,5	9308	1,42
	PAK	2,40	45,0	13445	0,34
Kovové materiály	Hliník	2,70	150,0	70000	1,00
	Titan	4,50	370,0	120000	1,48
	Ocel 11373	7,80	390,0	200000	0,90
	Ocel 11500	7,80	540,0	200000	1,24

Tab. 37 a následný Obr. 18 ukazují, že semi-krystalické konstrukční plasty mají velmi výhodné mechanické vlastnosti - vysokou pevnost v tahu vzhledem ke své nízké hustotě. Velmi vysokou hodnotu specifické pevnosti v tahu mají PA612 ($R_{ms} = 1,88$), PET ($R_{ms} = 1,63$), PA66 ($R_{ms} = 1,61$), PBT ($R_{ms} = 1,42$), které zcela převyšují hodnoty R_{ms} kovových materiálů. I PA 6 ($R_{ms} = 1,24$) se zcela vyrovná vlastnostem kovových materiálů.

Hůře ve srovnání dopadly polymery POM, které se i přesto hodnotou R_{ms} (POM – hom. = 0,87 a POM – kop. = 0,74) velmi blíží hliníku. Pouze polymer polyester alkyd PAK se nemůže srovnávat v této kategorii s hodnotami kovových materiálů, a to zejména proto, že jeho hustota se blíží hustotě hliníku.



Obr. 18: Srovnání R_{ms} semi-krytalických konstrukčních plastů s kovovými materiály

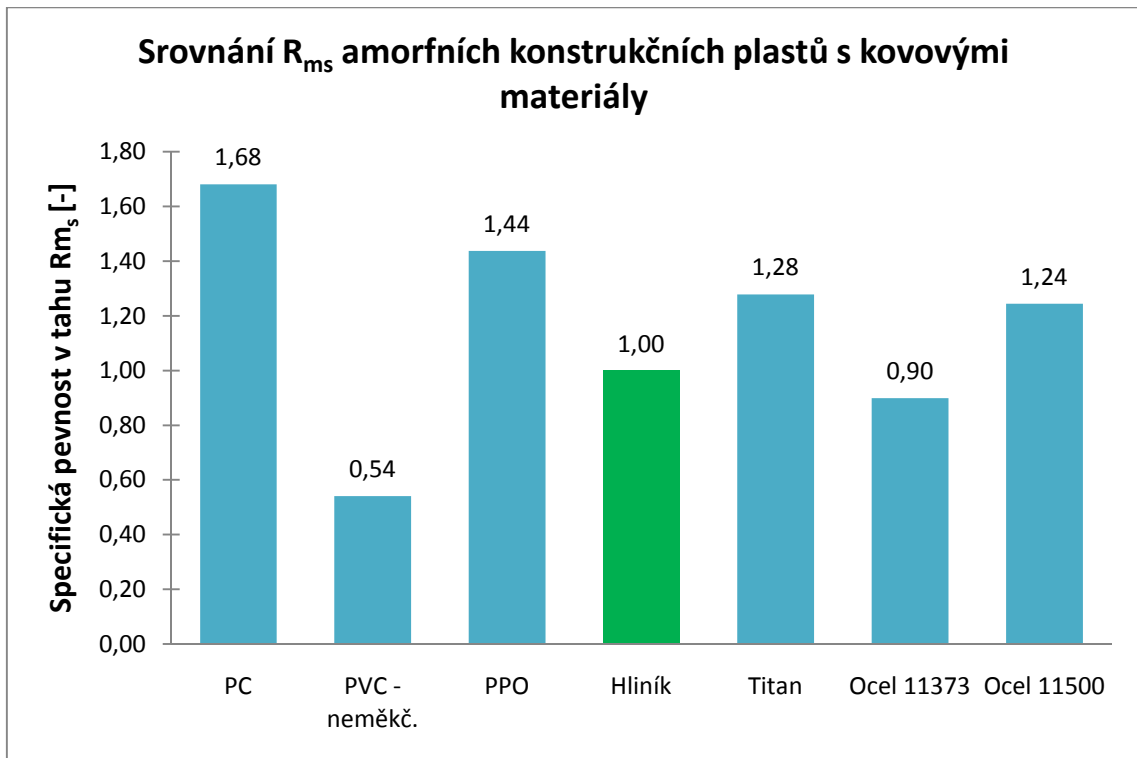
7.2.2 Specifická pevnost v tahu R_{ms} u amorfních konstrukčních plastů

Tab. 38: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti tahu amorfních konstrukčních polymerů s kovovými materiály

Druh	Materiál	Hustota [$\frac{g}{cm^3}$]	R_m [MPa]	E [MPa]	R_{ms} [-]
Amorfní konstrukční plasty	PC (30 % SV)	1,40	131,0	8618	1,68
	PVC - neměkčené	1,38	41,5	2413	0,54
	PPO (30 % SV)	1,25	100,0	7584	1,44
Kovové materiály	Hliník	2,70	150,0	70000	1,00
	Titan	4,50	370,0	120000	1,48
	Ocel 11373	7,80	390,0	200000	0,90
	Ocel 11500	7,80	540,0	200000	1,24

Stejně jako u srovnávaných semi-krytalických konstrukčních polymerů, tak i amorfní konstrukční polymery mají vyšší pevnost v tahu s ohledem na jejich nižší hustotu. Index specifické pevnosti v tahu pro PC činí 1,68 a u PPO činí 1,44, což jsou vyšší hodnoty, než u srovnávaných kovových materiálů.

Pouze neměkčené PVC má výsledné $R_{ms} = 0,54$.



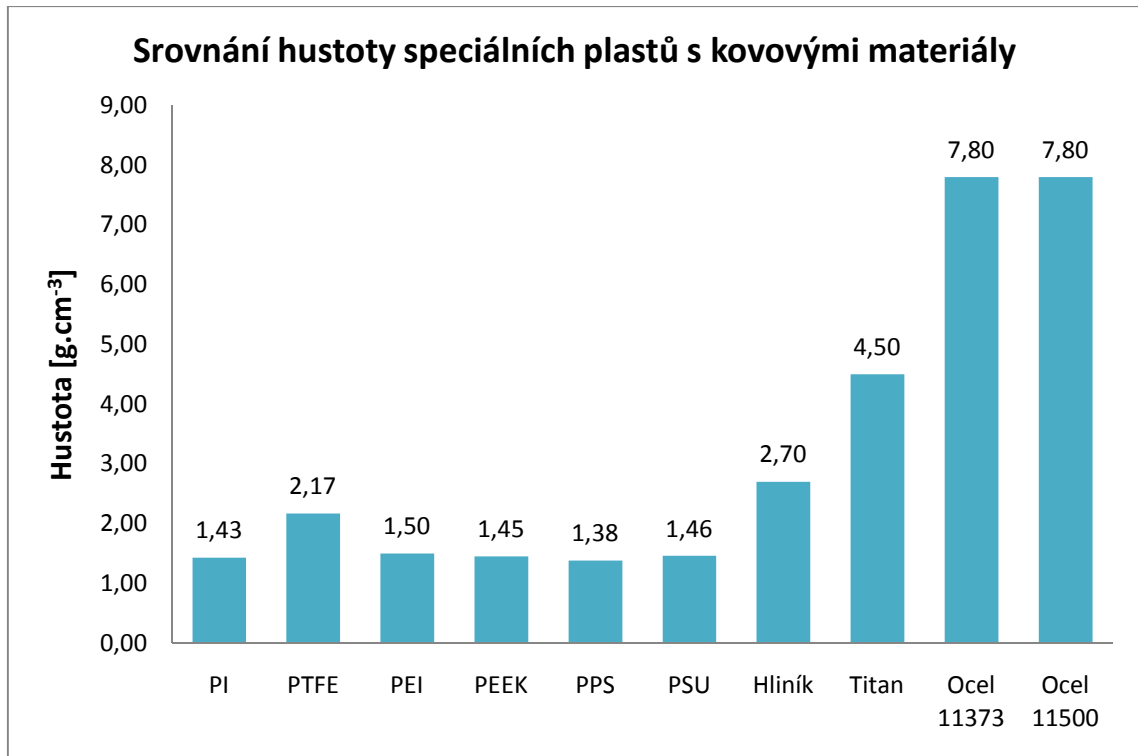
Obr. 19: Srovnání R_{ms} amorfních konstrukčních plastů s kovovými materiály

7.3 Srovnání hustoty a R_m speciálních plastů s kovovými materiály

Tab. 39: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, speciálních polymerů s kovovými materiály

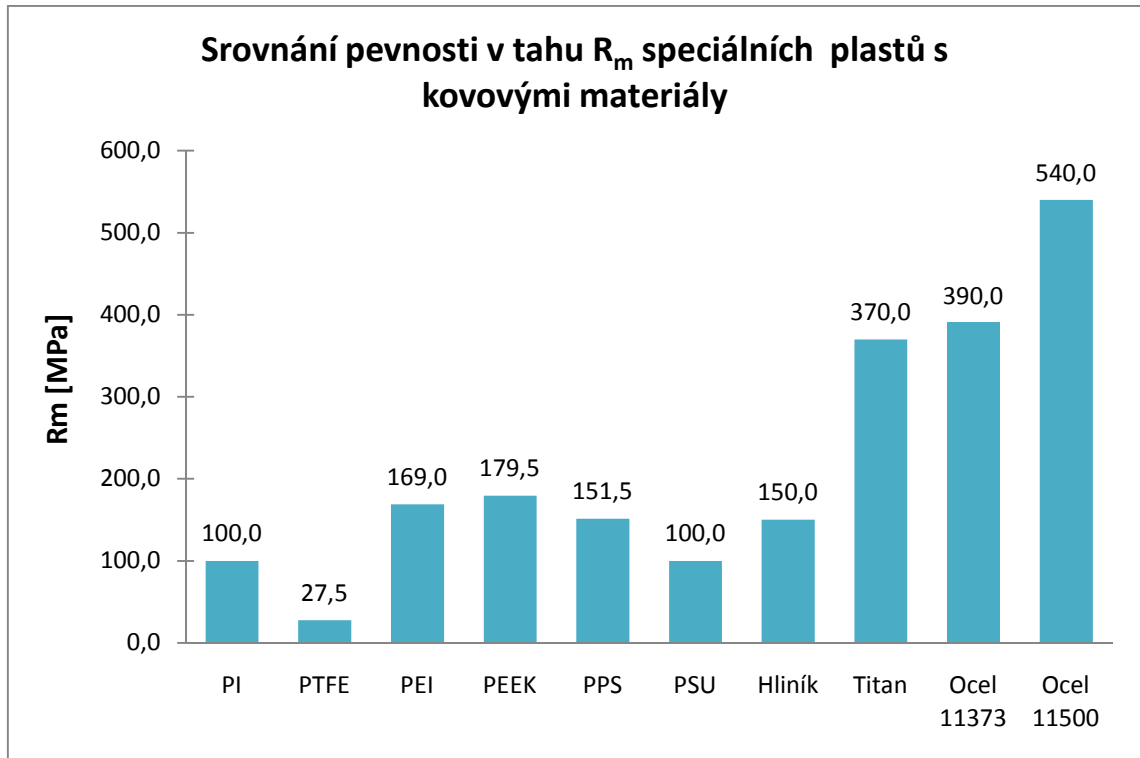
Druh	Materiál	Hustota [$\frac{g}{cm^3}$]	R_m [MPa]
Semi-krytalické high - tech plasty	PI	1,43	100
	PTFE	2,17	27,5
	PEI (30 % SV)	1,50	169,0
	PEEK	1,45	179,5
Amorfni high - tech plasty	PPS (30 % SV)	1,38	151,5
	PSU (30 % SV)	1,46	100,0
Kovové materiály	Hliník	2,70	150,0
	Titan	4,50	370,0
	Ocel 11373	7,80	390,0
	Ocel 11500	7,80	540,0

Stejně jako předchozí srovnání u konstrukčních polymerů, tak i u speciálních plastů je zřejmé, že hodnoty hustoty jednotlivých polymerů jsou výrazně nižší, než hustoty kovových materiálů. Pouze PTFE má tuto hodnotu vyšší než 2, přesně hodnotu $\rho = 2,17 \frac{g}{cm^3}$.



Obr. 20: Srovnání hustoty speciálních plastů s kovovými materiály

Ve srovnání pevnosti v tahu R_m jsou tři polymery z šesti srovnávaných nad hodnotou hliníku a tři jsou pod její hodnotou ($R_m = 150$ [MPa]). Vyšší pevnost v tahu vykazují semi-krytalické PEI ($R_m = 169$ [MPa]) a PEEK ($R_m = 179,5$ [MPa]) a amorfní PPS ($R_m = 151,5$ [MPa]). Nižší pevnost v tahu vykazují semi-krytalické PI ($R_m = 100$ [MPa]), a PTFE ($R_m = 27,5$ [MPa]), a amorfní PSU ($R_m = 100$ [MPa]). Opět nutno podotknout, že některé srovnávané polymery se užívají pouze v plněné formě, a tak jsou zde uvedeny jejich vlastnosti po plnění skelnými vlákny. (viz Tab. 39).



Obr. 21: Srovnání pevnosti v tahu speciálních plastů s kovovými materiály

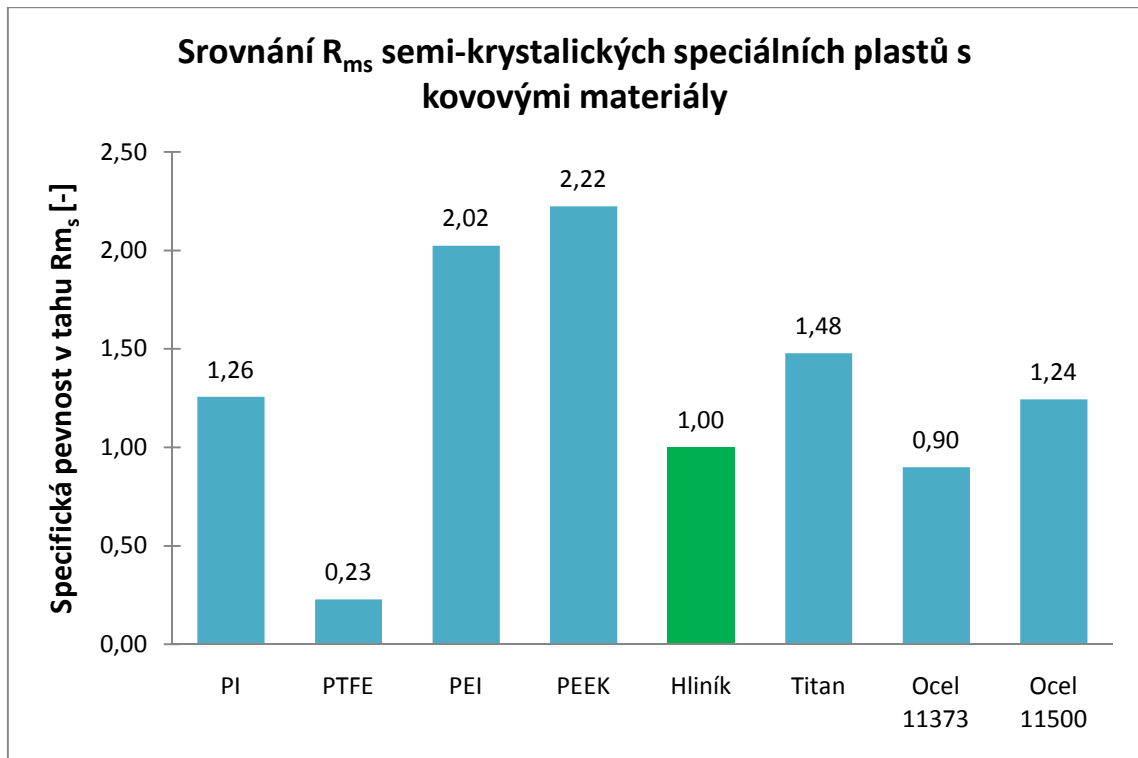
7.3.1 Specifická pevnost v tahu R_{ms} u semi-krytalických speciálních plastů

Tab. 40: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti tahu semi-krytalických speciálních polymerů s kovovými materiály

Druh	Materiál	Hustota [$\frac{g}{cm^3}$]	R_m [MPa]	E [MPa]	R_{ms} [-]
Semi-krytalické high - tech plasty	PI	1,43	100,0	3000	1,26
	PTFE	2,17	27,5	408	0,23
	PEI (30 % SV)	1,50	169,0	8963	2,02
	PEEK	1,45	179,5	10000	2,22
Kovové materiály	Hliník	2,70	150,0	70000	1,00
	Titan	4,50	370,0	120000	1,48
	Ocel 11373	7,80	390,0	200000	0,90
	Ocel 11500	7,80	540,0	200000	1,24

Speciální plasty, označované jako *High – Tech* patří k nejdražším plastům na trhu, a proto by i jejich vlastnosti měly patřit k excelentním. To také potvrzuje Tab. 40 a následný Obr. 22, který názorně ukazuje, že hodnoty specifické pevnosti v tahu jsou u dvou semi-

krystalických polymerů více než dvojnásobně vyšší než tyto hodnoty u hliníku. Konkrétně PEEK dosahuje excelentních mechanických vlastností s $R_{ms} = 2,22$, a společně s PEI s $R_{ms} = 2,02$, výrazně převyšují vlastnosti R_{ms} všech srovnávaných kovových materiálů. Polymer PI s $R_{ms} = 1,26$ je také naprosto srovnatelný s kovovými materiály. PTFE má hodnotu specifické pevnosti v tahu nízkou ($R_{ms} = 0,23$), ale jeho použití nevyžaduje vysokou mechanickou odolnost.



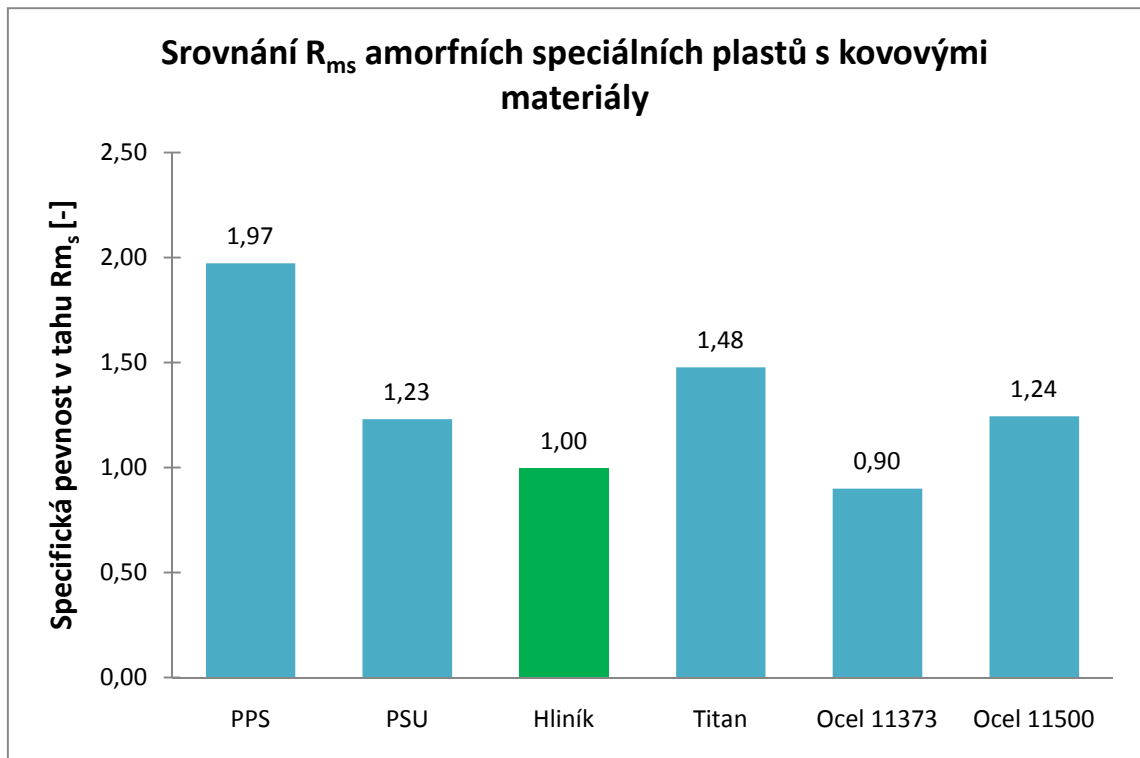
Obr. 22 Srovnání R_{ms} semi-krystalických speciálních plastů s kovovými materiály

7.3.2 Specifická pevnost v tahu R_{ms} u amorfních speciálních plastů

Tab. 41: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti tahu amorfních speciálních polymerů s kovovými materiály

Druh	Materiál	Hustota [$\frac{g}{cm^3}$]	R_m [MPa]	E [MPa]	R_{ms} [-]
Amorfní high - tech plasty	PPS (30 % SV)	1,38	151,5	11721	1,97
	PSU (30 % SV)	1,46	100,0	9308	1,23
Kovové materiály	Hliník	2,70	150,0	70000	1,00
	Titan	4,50	370,0	120000	1,48
	Ocel 11373	7,80	390,0	200000	0,90
	Ocel 11500	7,80	540,0	200000	1,24

Stejně jako semi-krystalické high – tech polymery, tak i dva srovnávané amorfnní polymery vykazují perfektní specifickou pevnost v tahu. PPS se hodnotou R_{ms} blíží hodnotě 2 ($R_{ms} = 1,97$), což je výrazně vyšší hodnota než u srovnávaných kovových materiálů. I PSU ($R_{ms} = 1,23$) je zcela srovnatelný polymer s kovovými materiály, což dokazuje následující Obr. 23.



Obr. 23: Srovnání R_{ms} amorfnních speciálních plastů s kovovými materiály

8 TAHOVÁ ZKOUŠKA

Tahová zkouška byla provedena na stroji ZWICK ROELL 1456 (Obr. 24) při teplotě 23°C. Jako zkušební těleso byl zvolen polymer Duramid PA (vlastnosti uvedeny v Tab. 42), který je plněn z 60 % skelnými vlákny.

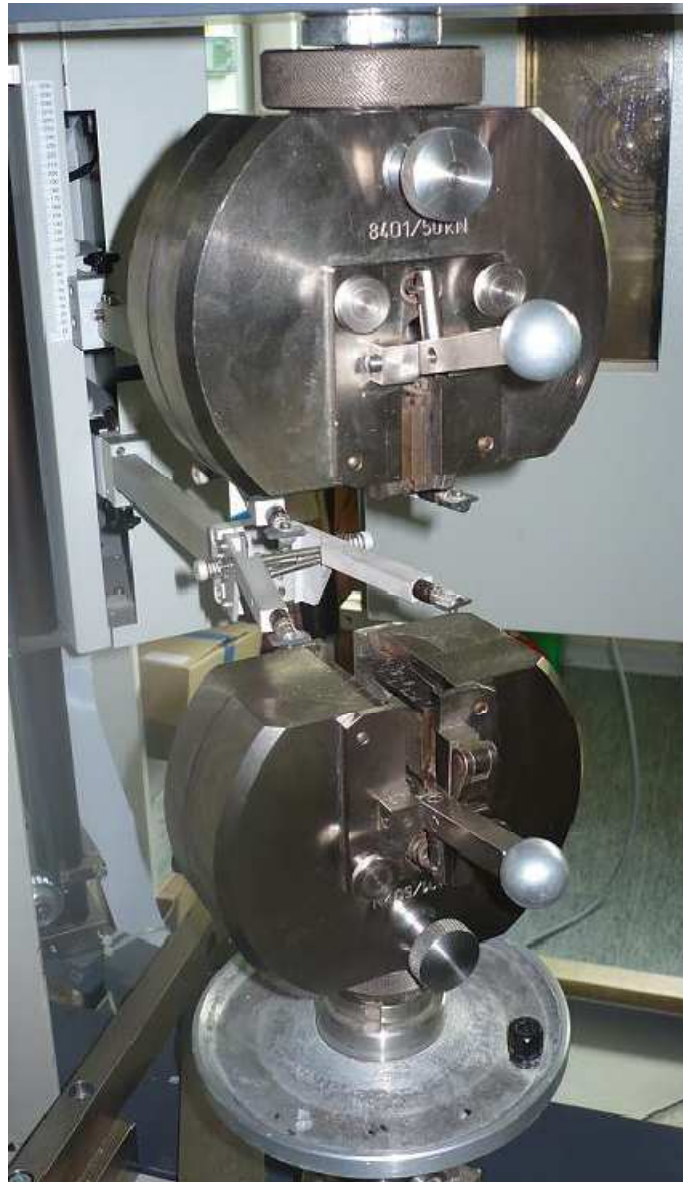
Tento vysoce výkonný aromatický termoplast vyniká svojí vysokou mechanickou pevností, rozměrovou stabilitou a vrubovou houževnatostí. Je velmi odolný vůči tepelnému namáhání a UV záření.

Zkušební tělesa byla namáhána jednoosým tahem, se zvolenou rychlostí posuvu 10 mm.min⁻¹. V dávce pro testování bylo zahrnuto 10 zkušebních těles polyamidu Duramid.

Naměřená data byla automaticky ukládána pomocí osobního počítače, který je součástí stroje.

Tab. 42: Vlastnosti testovaného polyamidu Duramid (60 % SV) udávané výrobcem

Vlastnost	Duramid PA (60% SV)
Typ polymeru	Semi-krystalický
Hustota [g.cm ⁻³]	1,72
Pevnost v tahu pro 23°C [MPa] (50 mm.min ⁻¹)	250
Pevnost v ohybu pro 23°C [MPa]	350
Modul pružnosti pro 23°C [MPa] (1 mm.min ⁻¹)	25000
Teplota tání T _m [°C]	270
Teplota taveniny [°C]	280 - 300
Teplota formy [°C]	80 - 120
Teplota sušení [°C]	80
Doba sušení [h]	2 - 5
Prodloužení při přetržení [%]	1,50
Nasákavost [%]	2



Obr. 24: Čelisti zkušebního stroje ZWICK ROELL 1456

8.1 Vztahy pro vyhodnocení výsledků

Výsledky naměřené při tahové zkoušce byly zpracovány pomocí následujících vztahů:

1. Aritmetický průměr – je statistická veličina, která v jistém smyslu vyjadřuje typickou hodnotu popisující soubor mnoha hodnot. Je to součet všech hodnot vydělený jejich počtem.: [17]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

(11)

2. Směrodatná odchylka – jedná se o kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru. Vypovídá o tom, jak moc se od sebe navzájem liší typické případy v souboru zkoumaných čísel.: [17]

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

(12)

3. Rozptyl – je definován jako střední hodnota kvadrátů odchylek od střední hodnoty.: [17]

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

(13)

4. Střední kvadratická chyba aritmetického průměru (nejistota měření typu A) – má využití pro hodnocení přesnosti měření. Vychází ze směrodatné odchylky „s“ podělené druhou odmocninou z počtu měření „n“.: [17]

$$\sigma = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

(14)

5. Medián – je hodnota, jež dělí řadu podle velikosti seřazených výsledků na dvě stejně početné poloviny. Platí, že nejméně 50 % hodnot je menších nebo rovných a nejméně 50 % hodnot je větších nebo rovných mediánu. Pro nalezení mediánu daného souboru stačí hodnoty seřadit podle velikosti a vzít hodnotu, která se nalézá uprostřed seznamu. Medián je tzv. robustní míra (tj. odolná proti vychýlené hodnotě). [17]

6. Variační rozpětí – Je to rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou kvantitativního znaku, neboli: [17]

$$R = x_{MAX} - x_{MIN}$$

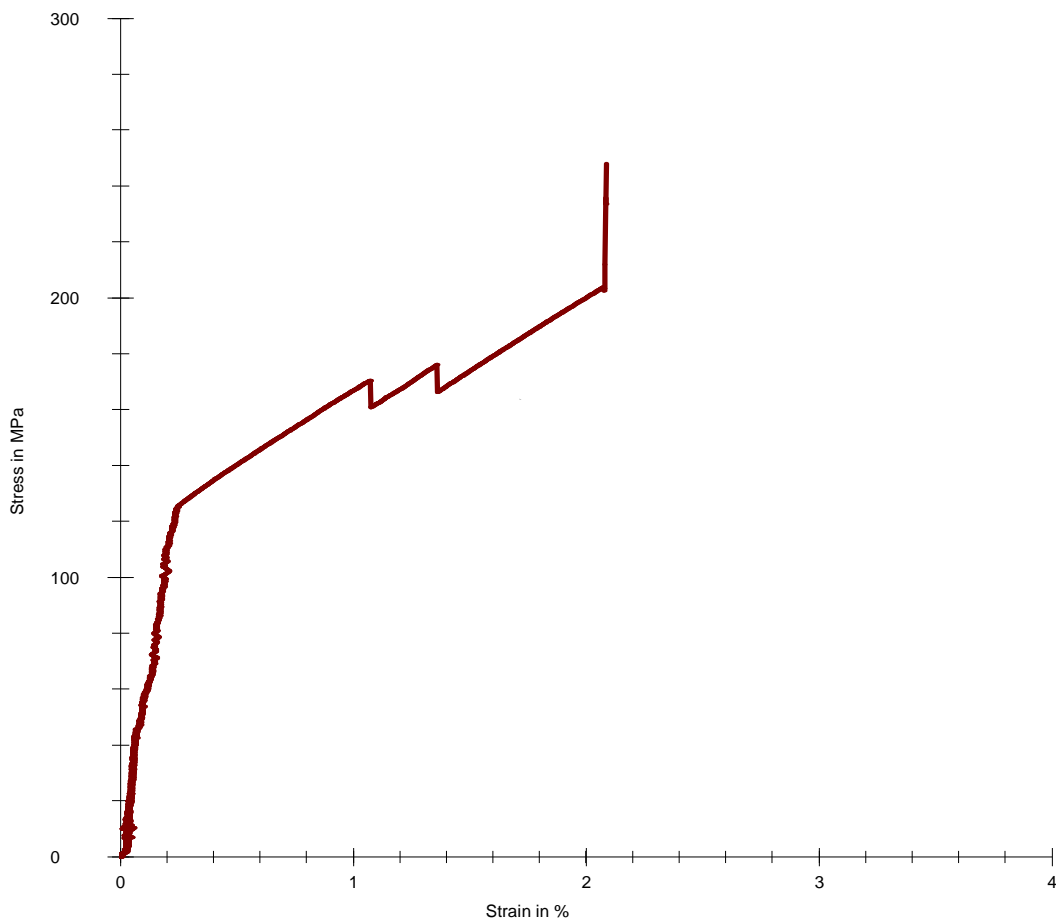
(15)

8.2 Naměřená data

Naměřené hodnoty z 10 zkušebních vzorků (pevnosti v tahu, modulu pružnosti, poměrné deformaci při maximálním napětí a deformaci při maximální síle) jsou uvedeny v Tab. 43, a v dalších podkapitolách vyhodnoceny pomocí programu Minitab.

Tab. 43: Duramid PA (60% SV) – tahová zkouška

měřená veličina / číslo vzorku	σ_M [MPa]	E [MPa]	ϵ_M [%]	ϵ_{FM} [mm]
1	258,28	20682,0	1,98	0,40
2	259,65	17761,5	4,38	0,87
3	260,90	20923,6	4,25	0,85
4	262,45	20586,3	4,34	0,87
5	258,65	22318,4	3,89	0,78
6	259,89	22222,2	4,15	0,83
7	255,93	22415,0	3,97	0,79
8	255,58	23805,5	3,95	0,79
9	260,75	23298,6	4,19	0,83
10	261,68	22930,0	4,22	0,84



Obr. 25: Smluvní diagram tahové zkoušky pro Duramid PA (60% SV) při teplotě 23°C

8.2.1 Pevnost v tahu σ_M

U sledované veličiny pevnosti v tahu bylo zjištěno měřením deseti zkušebních těles, že průměrná pevnost je 259,38 MPa, což je téměř o 10 MPa vyšší hodnota, než udává výrobce polymeru. (viz Tab. 42). Tato odchylka může být způsobena jednak rozdílnou rychlostí tahové zkoušky, kdy výrobce použil rychlost posuvu $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, zatímco v našem případě byla testovací rychlost nastavena na $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, a také tím, že zkušební vzorky nebyly kondicionovány při předepisované teplotě $23 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ a relativní vlhkosti $50\% \pm 5\%$.

Obecné principy zkoušky a metodika stanovení mechanických charakteristik ze zkoušky tahem jsou uvedeny v normách ČSN EN ISO 527-1 a ČSN EN ISO 527-2.

Z výběrového souboru byla nejnižší naměřená hodnota 255,58 MPa, a nejvyšší naměřená hodnota 262,45 MPa. Jelikož medián (na Obr. 26 označen modrým \otimes) se velmi přibližuje

hodnotě aritmetického průměru (na Obr. 26 označen modrým +), tak bylo do statistiky zahrnuto všech deset zkušebních těles, tudíž nebyla nalezena žádná vychýlená hodnota.

Tab. 44: Výsledky pevnosti v tahu [MPa] zpracované programem Minitab

Mean	SE Mean	StDev	Variance	Minimum	Median	Maximum	Range
259,380	0,725	2,290	5,260	255,580	259,770	262,450	6,870

Kde Mean = aritmetický průměr (průměrná hodnota vzorku)

SE Mean = nejistota měření typu A

StDev = odhad směrodatné odchylky

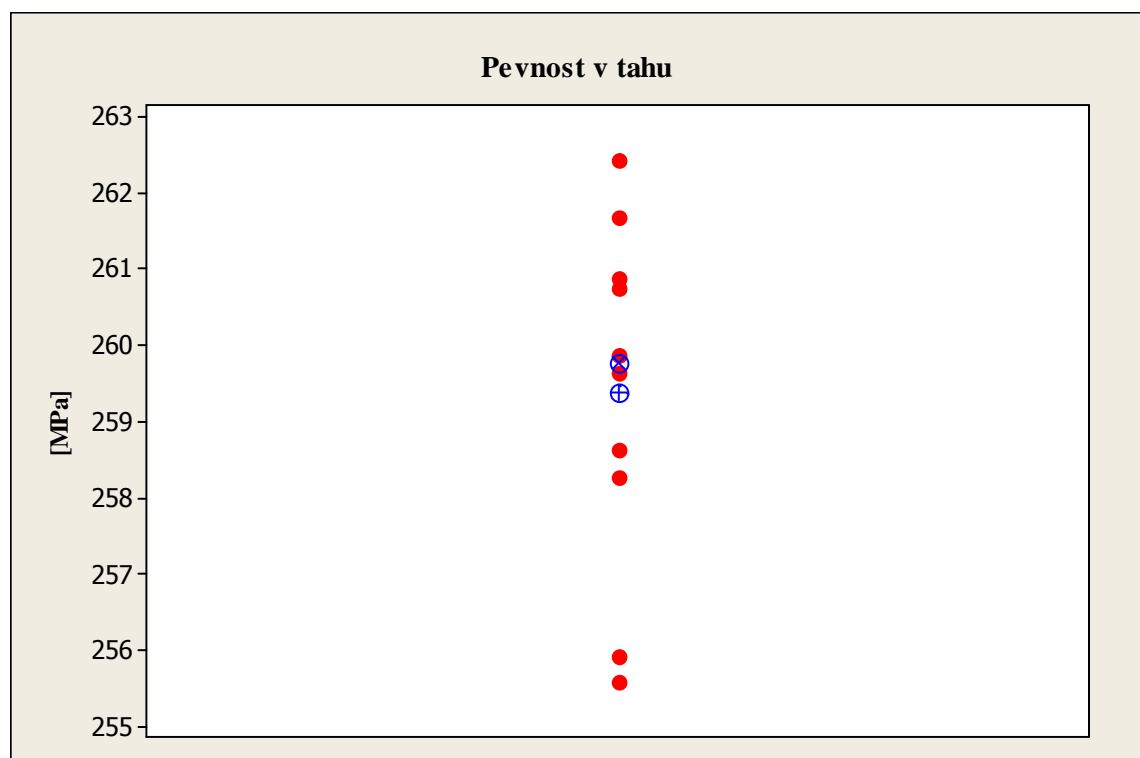
Variance = rozptyl

Minimum = nejnižší hodnota z výběrového souboru

Median = medián

Maximum = nejvyšší hodnota z výběrového souboru

Range = variační rozpětí



Obr. 26: Grafické znázornění 10 zkušebních vzorků pro pevnost v tahu

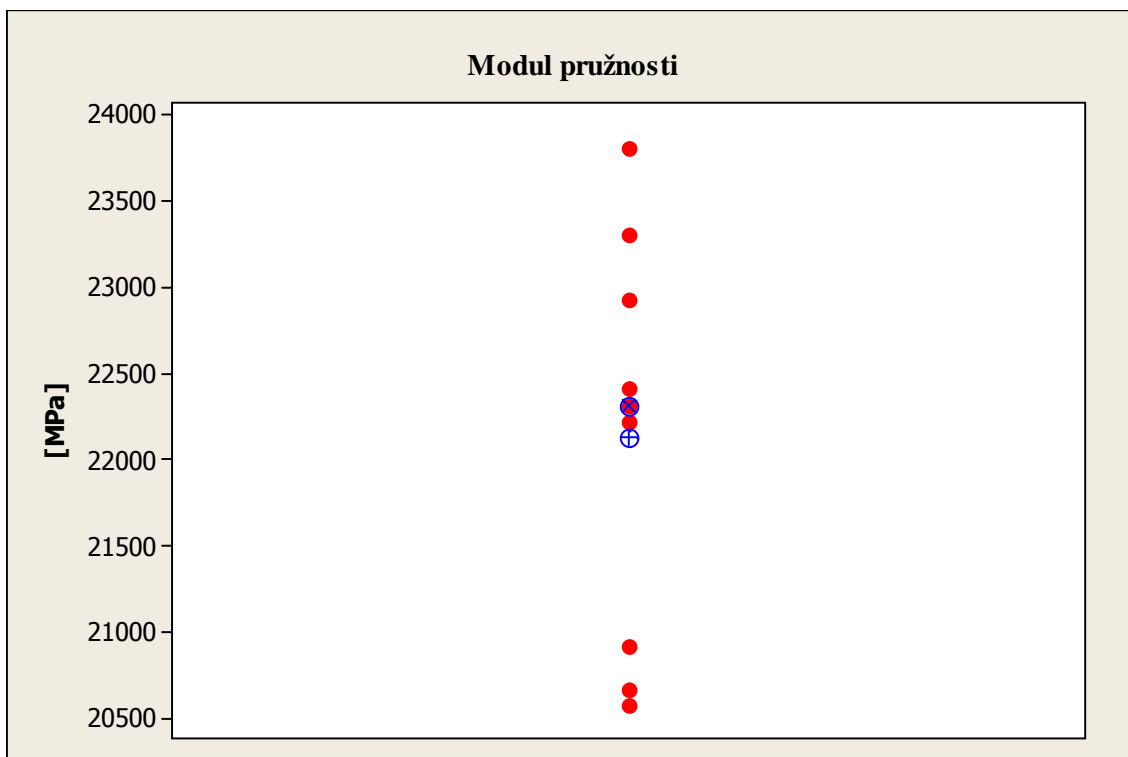
8.2.2 Modul pružnosti E

Průměrný modul pružnosti byl při tahové zkoušce naměřen 22131 MPa, tato hodnota neodpovídá zcela hodnotě, kterou udává výrobce (25000 MPa). Rozdíl je opět pravděpodobně způsoben rozdílnou rychlostí testování zkušebních vzorků a tím, že vzorky nebyly kondicionovány, jak předepisuje norma.

Průměrný modul pružnosti byl již statisticky zjišťován pouze z 9 zkušebních vzorků, a to z důvodu přítomnosti vychýlené hodnoty, která výrazně oddalovala aritmetický průměr (měl by se co nejvíce podobat mediánu) od mediánu. Vychýlená hodnota, která výrazně ovlivňovala aritmetický průměr, byla naměřena 17761,5 MPa. Po odebrání vychýlené hodnoty se výrazně zmenšila směrodatná odchylka (1166 MPa) a variační rozpětí (3219 MPa).

Tab. 45: Výsledky modulu pružnosti [MPa] zpracované programem Minitab

Mean	SE Mean	StDev	Variance	Minimum	Median	Maximum	Range
22131	389	1166	1359184	20586	22318	23806	3219



Obr. 27: Grafické znázornění 9 zkušebních vzorků pro modul pružnosti

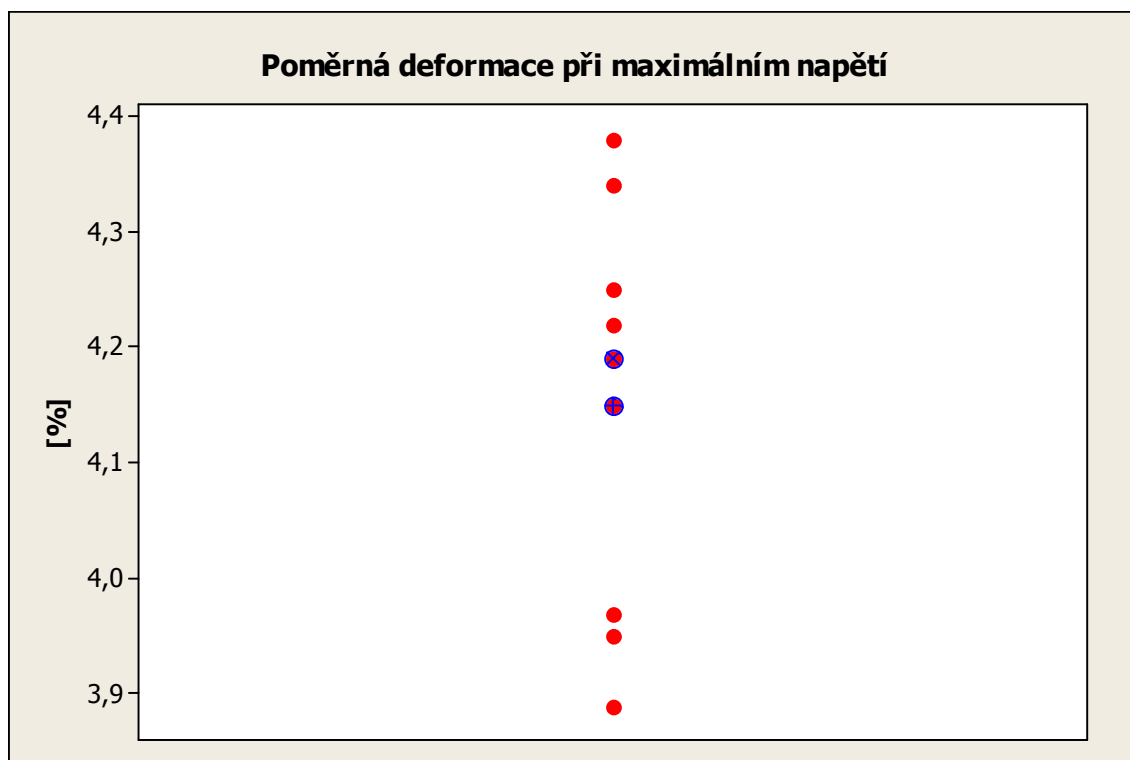
8.2.3 Poměrná deformace při maximálním napětí ϵ_M

U poměrné deformace při maximálním napětí jsem statisticky došel k průměru 4,1489 % s minimální směrodatnou odchylkou 0,06 %. Minimální poměrná deformace byla naměřena 3,89 % a maximální byla 4,38 %. Aritmetický průměr se od robustní hodnoty medián liší pouze přibližně o 0,04 %.

I v tomto případě bylo nutno vyřadit jednu vychýlenou hodnotu, která výrazně ovlivňovala výsledný aritmetický průměr. Vyřazená hodnota byla 1,98 %.

Tab. 46: Výsledky poměrné deformace při maximálním napětí [%] zpracované programem Minitab

Mean	SE Mean	StDev	Variance	Minimum	Median	Maximum	Range
4,1489	0,0584	0,1752	0,0307	3,8900	4,1900	4,3800	0,4800



Obr. 28: Grafické znázornění 9 zkušebních vzorků pro poměrnou deformaci při maximálním napětí

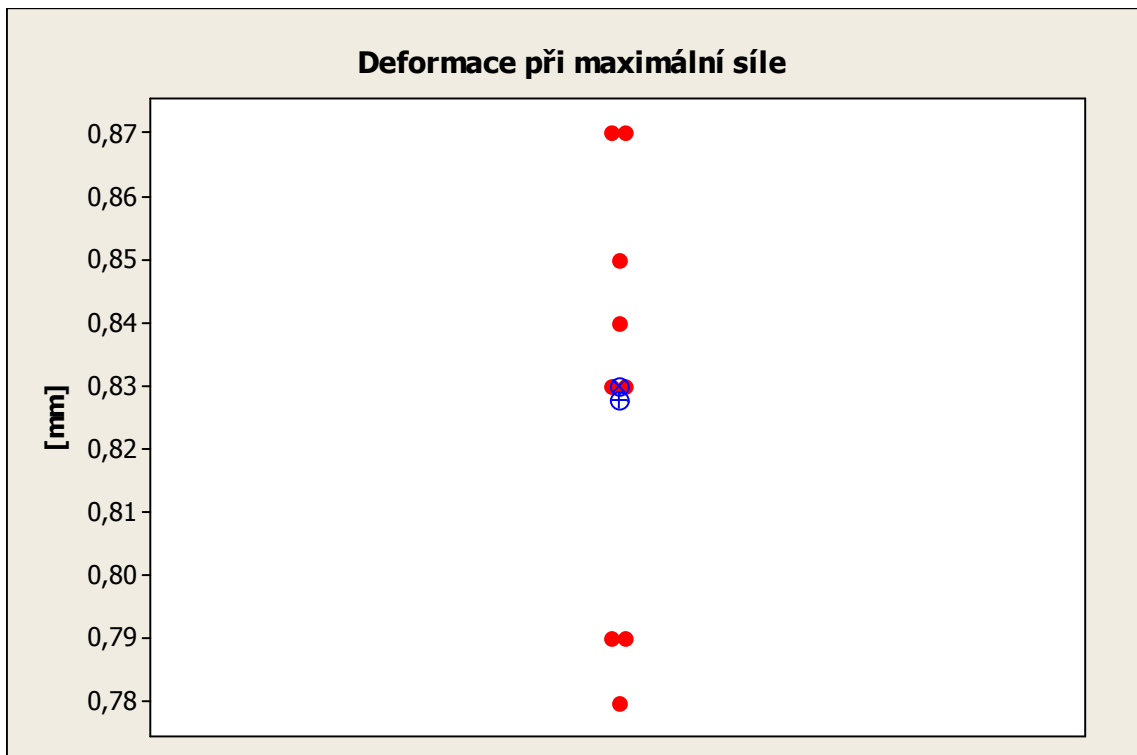
8.2.4 Deformace při maximální síle ϵ_{FM}

Deformace při maximální síle vyšla dle aritmetického průměru 0,828 mm, což se od mediánu liší pouze o 0,02 mm. Variační rozpětí bylo naměřeno 0,09 mm.

Deformace při maximální síle je závislá na poměrné deformaci při maximálním napětí a počáteční délce zkušebního tělesa. Z tohoto důvodu byla vyřazena jedna vychýlená hodnota, která byla počítána z vychýlené hodnoty poměrné deformace při maximálním napětí (1,98), a to hodnota 0,4 mm.

Tab. 47: Výsledky deformace při maximální síle [mm] zpracované programem Minitab

Mean	SE Mean	StDev	Variance	Minimum	Median	Maximum	Range
0,8278	0,0114	0,0342	0,0012	0,7800	0,8300	0,8700	0,0900



Obr. 29: Grafické znázornění 9 zkušebních vzorků pro deformaci při maximální síle

8.3 Srovnání Duramidu PA (60% SV) s kovovými materiály

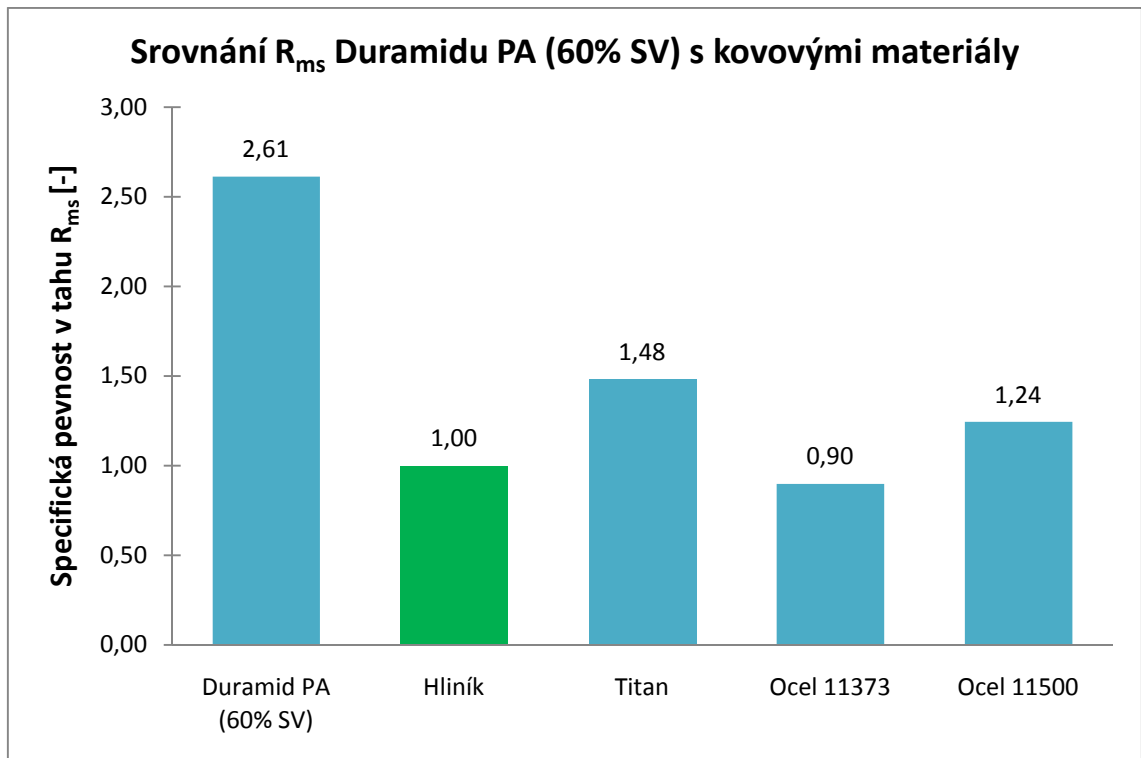
Tab. 48: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti v tahu semi-krystalického Duramidu PA (60% SV) s kovovými materiály

Druh	Materiál	Hustota [$\frac{g}{cm^3}$]	R_m [MPa]	E [MPa]	R_{ms} [-]
Semi-krystalický hi-tech plast	Duramid PA (60% SV)	1,72	250,0	25000	2,61
Kovové materiály	Hliník	2,70	150,0	70000	1,00
	Titan	4,50	370,0	120000	1,48
	Ocel 11373	7,80	390,0	200000	0,90
	Ocel 11500	7,80	540,0	200000	1,24

Tento vysoce výkonný aromatický termoplast, který je plněn z 60% skelnými vlákny dosahuje vynikajících pevnostních vlastností.

Hustota Duramidu PA je $1,72 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, což je výrazně nižší hodnota, než u srovnávaných kovů. Naopak vykazuje vysokou pevnost v tahu i bez zohlednění jeho hustoty. Hodnota R_m je 250 MPa, což je výrazně vyšší pevnost než u hliníku.

Pevnostní vlastnosti Duramidu PA výrazně vyniknou při zohlednění jeho hustoty. Specifickou pevností v tahu se dostává na hodnotu $R_{ms} = 2,61$, což ho řadí mezi špičkové materiály. Tato hodnota je téměř třikrát vyšší než hodnoty hliníku a oceli třídy 11373, a dvojnásobně vyšší, než u oceli třídy 11500. Ani titan nedosahuje vysokých hodnot Duramidu PA. Graficky znázorněno na Obr. 30.



Obr. 30: Srovnání R_{ms} semi-krystalického Duramidu PA (60 % SV) s kovovými materiály

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zjistit a porovnat vlastnosti nejznámějších polymerů s kovovými materiály, a prokázat nebo vyvrátit jejich vysokou pevnost. Byly vybrány vzorky ze všech skupin, a to polymerů standardních, konstrukčních i speciálních, pro teoretické porovnání specifické pevnosti v tahu (dále též R_{ms}). Prakticky byl tahovou zkouškou otestován speciální polymer Duramid PA.

Hodnoty mechanických vlastností polymerů, zejména hustota, pevnost v tahu a modul pružnosti dosahují u polymerů daleko nižších hodnot než u kovových materiálů. Z toho důvodu jsem zvolil pro jejich porovnání tzv. specifickou pevnost v tahu. Jedná se o běžnou metodu, pomocí které se v dnešní době srovnávají polymerní materiály právě s kovy, např. u automobilových firem. Tato metoda zohledňuje kromě samotné pevnosti v tahu i hustotu daného materiálu. V praktické části bakalářské práce byl použit hliník, jako etalon - jeho bezrozměrnou hodnotu jsem stanovil na 1, a pomocí výpočtů, tabulek a grafů byly porovnány hodnoty všech skupin polymerů s kovovými materiály, které zastupovaly hliník, titan, ocel třídy 11373 a ocel třídy 11500.

Shrnuji nejdůležitější poznatky praktické části:

Standardní termoplasty:

Jako vzorky byly vybrány neplněné amorfní LDPE, HDPE, PP a neplněné semikrystalické PS, SAN, ABS, PMMA a PVC – neměkčené. Termoplasty SAN, ABS, PMMA a PP se nachází na rozhraní standardních a běžných polymerů.

Výsledky porovnání R_{ms} ukazují, že neplněné amorfní polymery LDPE, HDPE, PVC a PP nedosahují pevností kovových materiálů. Nejlépe z těchto polymerů dopadl ve srovnání s kovy polymer PP s hodnotou 0,55. Výrazně lepších hodnot mechanických vlastností by bylo dosaženo u plněného PP.

Semikrystalické neplněné polymery dosahují již vyšších hodnot R_{ms} . Konkrétně ABS vykazuje hodnotu 0,59, PS 0,71, PMMA 0,79. Polymer SAN má hodnotu R_{ms} 1,21, což ho řadí na úroveň oceli třídy 11500 ($R_{ms} = 1,24$), tedy výrazně výš, než hodnoty hliníku ($R_{ms} = 1,00$) a oceli třídy 11373 ($R_{ms} = 0,90$).

Konstrukční termoplasty:

Jako amorfní vzorky byly zvoleny plněné PC (30% SV) a PPO (30% SV). U semikrystalických polymerů byly porovnávány plněné PA6 (33% SV), PA66 (33% SV), PA612 (33%

SV), PET (30% SV), PBT (30% SV) a neplněné PAK (termoset) a POM – homopolymer a kopolymer.

U všech porovnávaných plněných vzorků byla určena hodnota R_{ms} vyšší než 1,00. Nejlepší pevnostní vlastnosti vykazovaly semikrystalický PA 612 s hodnotou 1,88 a amorfní PC s hodnotou 1,68, které výrazně převyšují i titan ($R_{ms} = 1,48$). Ostatní výsledky jsou uvedeny na stranách 81 – 83.

Naopak neplněné vzorky (POM, PAK) nepřesáhly hranici specifické pevnosti hliníku.

Speciální termoplasty:

Do této skupiny byly vybrány vzorky amorfních polymerů PPS (30% SV) a PSU (30% SV). Jako semikrystalické byly zvoleny neplněné PI, PTFE a PEEK, a jako plněný PEI (30% SV).

Až na PTFE všechny speciální polymery vykazují velmi vysoké R_{ms} v porovnání s kovovými materiály. Nejvyšší hodnoty měly semikrystalické PEEK s R_{ms} 2,22, PEI (30% SV) s R_{ms} 2,02 a amorfní PPS (30% SV) R_{ms} 1,97. Zbylé výsledky jsou uvedeny na stranách 85 – 87.

Tahová zkouška Duramidu PA (60% SV):

Při tahové zkoušce byly potvrzeny vlastnosti vysoce výkonného termoplastu Duramid PA, plněného z 60% skelnými vlákny, které udával výrobce.

Jeho průměrná pevnost v tahu zjištěná při tahové zkoušce byla 259,38 MPa, a modul pružnosti 22 131 MPa. Tyto hodnoty se mírně lišily od údajů, které udává výrobce. Odchylka byla patrně způsobena zejména rozdílnou rychlostí posuvu čelistí při tahové zkoušce. Výrobce použil při testování rychlost posuvu $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro měření pevnosti v tahu a $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro měření modulu pružnosti, zatímco v našem případě byla jednotná testovací rychlost stanovena na $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Nastavení rozdílné rychlosti posuvu bylo zjištěno, po provedení měření a vzhledem k omezenému množství testovaného materiálu nebyla zkouška opakována. Zkušební vzorky rovněž nebyly kondicionovány při předepisované teplotě $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $50\% \pm 5\%$. I přes rozdílné podmínky při testování lze hodnotit výsledky zkoušek jako velmi uspokojivé, neboť odchylky od údajů udávaných výrobcem jsou relativně nízké. Lze konstatovat, že testy potvrdily vlastnosti termoplastu Duramid PA, které uvádí výrobce. Obecné principy zkoušky a metodika stanovení mecha-

nických charakteristik ze zkoušky tahem jsou uvedeny v normách ČSN EN ISO 527-1 a ČSN EN ISO 527-2.

Ve srovnání specifické pevnosti v tahu Duramidu PA (60% SV) s kovovými materiály bylo zřejmé, že polymer výrazně převyšuje R_{ms} všech kovů. Tato hodnota je 2,61, zatímco nejlepší z kovů titan disponuje hodnotou 1,48.

Z předložené bakalářské práce plynou zejména tyto důležité závěry:

Z výsledků srovnání všech vybraných polymerů s kovovými materiály je zřejmé, že vzhledem ke své nízké hustotě a poměrně velkým pevnostem v tahu jsou v některých konstrukčních aplikacích schopny nahradit kovy.

Již běžné polymery, jako jsou SAN a částečně i PMMA, lze označit jako konstrukční materiál, protože hodnota R_{ms} se blíží R_{ms} kovů. Z konstrukčních polymerů vykazují lepší specifickou pevnost v tahu především polyamidy, PET, PBT, PC a PPO. Nejvýraznější rozdíly lze vidět u polymerů speciálních - PEEK, PEI, PPS, PSU i PI, které svojí specifickou pevností zcela převyšují kovy, ale zároveň je nutno konstatovat, že jejich využití v praxi je finančně velmi nákladné.

Druhým důležitým závěrem je úroveň plnění polymerů skelnými vlákny, popřípadě jinými vyztužujícími plnivými. Je zřejmé, že vyšší procentuální množství vyztužujícího plniva má výrazně zlepšující vliv na výsledné pevnostní vlastnosti polymeru. Optimální plnění polymeru je vždy závislé na typu použitého polymeru, jeho aplikaci a na ekonomických limitech.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LENFELD, P. *Technologie II: Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit. 2010-11-11]. Dostupný z WWW:
<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm>
- [2] ČERMÁK, R. *Konstrukční polymery I* [online]. [cit. 2010-11-11] Dostupný z WWW:
<http://procesniinzenyrstvi.wz.cz/2_rocnik/polymery/KP_P_2009.pdf>
- [3] DUCHÁČEK, V. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005.s.354. ISBN 80-7080-241-3
- [4] MLEZIVA, J., ŠŇUPÁREK, J. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti, a použití*. 2. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 544 s. ISBN 80-85920-72-7
- [5] *Vlastnosti a inženýrské aplikace plastů: Technická univerzita v Liberci* [online]. [cit. 2010-11-18]. Dostupný z WWW:
<<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/vip.htm>>
- [6] *Fyzikální praktikum: Měření modulu pružnosti. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích*. [online]. [cit. 2010-11-22]. Dostupný z WWW:
<http://mvt.ic.cz/jedna/zfm-mt/zfm-mt-05.pdf>
- [7] DROZD, Z. *Křivky plastické deformace – technická praxe: Matematicko - fyzikální fakulta UK v Praze* [online]. [cit. 2010-11-22]. Dostupný z WWW:
http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/rozsirene/Drozd/krivky_techn_praxe.html
- [8] ZEMAN, L. *Vstřikování plastů*. 1.vyd. Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3
- [9] ALFREDO CAMPO, E. *Industrials Polymers*. Carl Hanser Verlag, Munich 2008, Germany. ISBN 978-3-446-41119-7
- [10] A. TRES, P. *Designing Plastic Parts for Assembly*. 3. Vyd. Ohio, USA: Hanser Gardner Publications, 2003. 272 s. ISBN 1-56990-350-6.
- [11] Vliv radiačního síťování na vlastnosti. *Technický týdeník* [online]. 2006, 25/2006, [cit. 2011-03-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.techtydenik.cz/>>.
- [12] VACULÍK, J. *Vlastnosti radiačně síťovaných polymerů* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. 126 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve

Zlíně, Technologická fakulta. Dostupné z WWW:

<http://dspace.knihovna.utb.cz/handle/10563/14081>

- [13] RYBNÍKÁŘ, F., et al. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 420 s.
- [14] *Metody a způsoby měření tvrdosti nekovových materiálů. MM : Průmyslové spektrum* [online]. 2002, č. 6, [cit. 2011-03-31]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/metody-a-zpusoby-mereni-tvrdosti-nekovovych-materialu>>.
- [15] MARTINEK, M. *Měření tvrdosti polymerů* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. 98 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Technologická fakulta. Dostupné z WWW: <<http://dspace.knihovna.utb.cz/handle/10563/11092>>.
- [16] DOMININGHAUS, H. *Plastic for Engineers: Materials, Properties, Applications*. Munich: Hanser Publishers, 1993. 785 s. ISBN 3-446-15723-9.
- [17] *Wikipedia: Otevřená encyklopedie* [online]. 2002 [cit. 2011-05-03]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

T	Teplota [°C]
p	Tlak [Pa]
SV	Skelná vlákna
PE	Polyetylén
PP	Polypropylén
PS	Polystyrén
PVC	Polyvinylchlorid
PF	Fenolformaldehydové pryskyřice
UF	Močovinoformaldehydové pryskyřice
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
POM	Polyoxymetylén
PMMA	Polymethylmetakrylát
ABS	Akrylobutadienstyren
PET	Polyetylentereftalát
PBT	Polybutylentereftalát
SAN	Styren-akrylonitril
ASA	Akrylonitril-styren akrylát
PPO	Polyfenylénoxid
PU	Polyuretan
EP	Epoxidové pryskyřice
UP	Polyesterové pryskyřice
PSU	Polysulfon
PPS	Polyfenylénsulfid

PTFE	Polytetrafluoretylén
PI	Polyimid
T_m	Teplota tání [°C]
T_f	Teplota viskózního toku [°C]
T_g	Teplota zesklenní [°C]
dsp	Koncentrace přísad v polymerní směsi
ρ	Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
EPS	Lehčený polystyren
HIPS	Houževnatý polystyren
HTN	High temperature nylon
PEI	Polyéterimidy
PEEK	Polyétereterketon
LCP	Polymer s tekutými krystaly
PAK	Polyester alkyd
TPE	Termoplastický elastomer
TPU	Termoplastický polyuretanový elastomer
SBS	Styrenový blokový kopolymer
TPO	Termoplastický polyolefinový elastomer
b_1	Šířka pracovní části [mm]
b_2	Šířka upínací části [mm]
l_1	Délka pracovní části [mm]
l_2	Vzdálenost mezi širokými částmi [mm]
l_3	Celková vzdálenost [mm]
L_0	Počáteční měřená délka [mm]
L	Vzdálenost čelistí na počátku [mm]
h	Tloušťka tělíska [mm]

E	Mez pružnosti σ_E , Youngův modul [MPa]
U	Mez úměrnosti σ_U [MPa]
K	Mez kluzu σ_K [MPa]
P	Pevnost v tahu σ_{Pt} [MPa]
S	Napětí při přetržení [MPa]
ε	Poměrné prodloužení [%]
σ_M, R_m	Pevnost v tahu [MPa]
F	Síla [N]
S_o	Průřez původního vzorku [mm ²]
E_p	Potencionální energie [J]
E_k	Kinetická energie [J]
m	Hmotnost [g]
g	Gravitační zrychlení [m.s ⁻²]
h	Výška [mm]
R_{ms}	Specifická pevnost v tahu [-]
x	Aritmetický průměr
s	Směrodatná odchylka
s ²	Rozptyl
σ	Nejistota měření typu A
R	Variační rozpětí, Poloměr [mm]
ε_M	Poměrná deformace při maximální síle [%]
ε_{FM}	Deformace při maximální síle [mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Rozdělení polymerů dle aplikace a nadmolekulární struktury [5]	14
Obr. 2: Nadmolekulární struktura polymerů [1]	16
Obr. 3: Termomechanická křivka amorfního (1) a dvou různých semikrystalických (2,3) polymerů, T_g – teplota zesklenní, T_m – teplota tání, T_f – teplota toku [3]	16
Obr. 4: Tvary makromolekul pro různé typy plastů [1]	18
Obr. 5: Schematická příprava základních skupin polyesterových plastů [4]	30
Obr. 6: Ilustrativní zobrazení zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku plastů [12]	63
Obr. 7: Normalizované rozměry pro zkušební těleso pro tahovou zkoušku plastů [12]	63
Obr. 8: Typy pracovních diagramů polymerních materiálů [13]	65
Obr. 9: Pracovní diagram tahové zkoušky [13]	66
Obr. 10: Schéma Charpyho kladiva [13]	70
Obr. 11: Znázornění krípkového chování [10]	71
Obr. 12: Srovnání hustoty standardních plastů s kovovými materiály	75
Obr. 13: Srovnání pevnosti v tahu standardních plastů s kovovými materiály	75
Obr. 14: Srovnání R_{ms} semi-krystalických standardních plastů s kovovými materiály	77
Obr. 15: Srovnání R_{ms} amorfních standardních plastů s kovovými materiály	78
Obr. 16: Srovnání hustoty konstrukčních plastů s kovovými materiály	80
Obr. 17: Srovnání pevnosti v tahu konstrukčních plastů s kovovými materiály	80
Obr. 18: Srovnání R_{ms} semi-krystalických konstrukčních plastů s kovovými materiály	82
Obr. 19: Srovnání R_{ms} amorfních konstrukčních plastů s kovovými materiály	83
Obr. 20: Srovnání hustoty speciálních plastů s kovovými materiály	84
Obr. 21: Srovnání pevnosti v tahu speciálních plastů s kovovými materiály	85
Obr. 22 Srovnání R_{ms} semi-krystalických speciálních plastů s kovovými materiály	86
Obr. 23: Srovnání R_{ms} amorfních speciálních plastů s kovovými materiály	87
Obr. 24: Čelisti zkušebního stroje ZWICK ROELL 1456	89
Obr. 25: Smluvní diagram tahové zkoušky pro Duramid PA (60% SV) při teplotě 23°C	92
Obr. 26: Grafické znázornění 10 zkušebních vzorků pro pevnost v tahu	93
Obr. 27: Grafické znázornění 9 zkušebních vzorků pro modul pružnosti	94
Obr. 28: Grafické znázornění 9 zkušebních vzorků pro poměrnou deformaci při maximálním napětí	95

Obr. 29: Grafické znázornění 9 zkušebních vzorků pro deformaci při maximálním síle	96
Obr. 30: Srovnání R_{ms} semi-krystalického Duramidu PA (60 % SV) s kovovými materiály	98

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Třídění PE podle hustoty [4]	26
Tab. 2: Vlastnosti PS [4] [9]	27
Tab. 3: Rozdělení PP dle struktury [4]	28
Tab. 4: Vlastnosti neplněného homopolymeru PP [9].....	29
Tab. 5: Vlastnosti PS pro všeobecné použití [9].....	31
Tab. 6: Vlastnosti neplněného SAN [9].....	32
Tab. 7: Vlastnosti kopolymeru ABS [9]	33
Tab. 8: Vlastnosti neplněného PMMA [9].....	35
Tab. 9: Vliv poměru skupin -CONH- a -CH ₂ - na vlastnosti polyamidů [4].....	36
Tab. 10: Vlastnosti PA 6 (33% skelná vlákna, 50% relativní vlhkost) [9].....	37
Tab. 11: Vlastnosti PA 66 (33% skelná vlákna, 50% relativní vlhkost) [9].....	38
Tab. 12: Vlastnosti PA 612 (33% skelná vlákna, 50% relativní vlhkost) [9].....	39
Tab. 13: Vlastnosti HTN (30% skelná vlákna, 50% relativní vlhkost) [9][16]	40
Tab. 14: Vlastnosti PC (30% skelná vlákna) [9]	42
Tab. 15: Vlastnosti POM – homopolymeru [9][16]	43
Tab. 16: Vlastnosti POM – kopolymeru [9][16].....	43
Tab. 17: Vlastnosti PET (30% skelná vlákna) [9][16].....	45
Tab. 18: Vlastnosti PBT (30% skelná vlákna) [9]	46
Tab. 19: Vlastnosti neměkčeného PVC [9]	47
Tab. 20: Vlastnosti PAK [9]	48
Tab. 21: Vlastnosti PPO (skelná vlákna 30%) [9]	49
Tab. 22: Vlastnosti LCP (30% skelná vlákna) [9].....	50
Tab. 23: Vlastností PI [16].....	51
Tab. 24 - vlastnosti PEI (30% skelná vlákna) [9].....	53
Tab. 25: Vlastnosti PTFE [9].....	54
Tab. 26: Vlastnosti základního typu PEEK [9].....	55
Tab. 27: Vlastnosti PPS (30% skelná vlákna) [9].....	56
Tab. 28: Vlastnosti PSU (30% skelná vlákna) [9]	57
Tab. 29: Vlastnosti TPU – měkký a tvrdý typ [9]	59
Tab. 30: Vlastnosti SBS [9]	60
Tab. 31: Vlastnosti TPO [9].....	61
Tab. 32: Rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku plastů [12]	64

Tab. 33: Porovnání hustoty a pevnosti v tahu standardních polymerů s kovovými materiály	74
Tab. 34: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti tahu semi-krytalických standardních polymerů s kovovými materiály	76
Tab. 35: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti tahu amorfních standardních polymerů s kovovými materiály	77
Tab. 36: Porovnání hustoty a pevnosti v tahu konstrukčních polymerů s kovovými materiály	79
Tab. 37: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti tahu semi-krytalických konstrukčních polymerů s kovovými materiály	81
Tab. 38: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti tahu amorfních konstrukčních polymerů s kovovými materiály	82
Tab. 39: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, speciálních polymerů s kovovými materiály	83
Tab. 40: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti tahu semi-krytalických speciálních polymerů s kovovými materiály	85
Tab. 41: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti tahu amorfních speciálních polymerů s kovovými materiály	86
Tab. 42: Vlastnosti testovaného polyamidu Duramid (60 % SV) udávané výrobcem	88
Tab. 43: Duramid PA (60% SV) – tahová zkouška	91
Tab. 44: Výsledky pevnosti v tahu [MPa] zpracované programem Minitab	93
Tab. 45: Výsledky modulu pružnosti [MPa] zpracované programem Minitab	94
Tab. 46: Výsledky poměrné deformace při maximálním napětí [%] zpracované programem Minitab	95
Tab. 47: Výsledky deformace při maximální síle [mm] zpracované programem Minitab	96
Tab. 48: Porovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a specifické pevnosti v tahu semi-krytalického Duramidu PA (60% SV) s kovovými materiály	97

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Materiálový list Duramid PA (60 % SV) 1/2
- P II Materiálový list Duramid PA (60 % SV) 2/2

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST DURAMID PA (60 % SV) 1/2



PTS-MARKETING

TECHNISCHE INFORMATION

>DURAMID-TH7G12.2S * 9207 e-schwarz
PA teilaromatisch,60%GF,HI,UV

23.01.2009

AESTHETIC DURAMID-TH7G12.2S*9207

Dieser Hochleistungsthermoplast mit 60 % Glasfaser ist ein teil-aromatisches Spezialpolyamid mit sehr geringem Verzug, hoher Schlag- und Kerbschlagzähigkeit, hervorragender Oberfläche und ULTRAFLOW-Eigenschaften.

Auch im konditionierten Zustand zeigt dieses Produkt hohe mechanische Festigkeit und ausgezeichnete Dimensionsstabilität.

Der Werkstoff ist Wärme- und UV-stabilisiert.

Wenn noch höhere Kerbschlagzähigkeit gebraucht wird, verwenden Sie >DURAMID-TH7G12.0S*9207

Verarbeitungshinweise:

Schmelztemperatur : 270°C
Verarbeitungstemperatur: 280°C - 300°C
Werkzeugtemperatur : 80°C - 120°C

Vortrocknung:

Das in feuchtigkeitsdichten Mehrschichtpapiertüten mit Aluminiumeinlage angelieferte Granulat kann ohne besondere Vorbehandlung verarbeitet werden.

Offene Gebinde oder feucht gewordenes Material bitte vortrocknen im Trockenlufttrockner bei 80°C / 2-5h.

Maximaler Feuchtigkeitsgehalt bei der Verarbeitung: 0,12%.

Fließspiralttest:

Spirale: 5mm x 1,5mm
Massetemperatur 290°C, Werkzeugtemperatur 100°C, Einspritzzeit 1 sec. (ohne Nachdruck)

Spritzdruck/bar	400	600	800	1000	1200
-----	-----	-----	-----	-----	-----
Länge / mm			287	332	375

Die PTS-Information stützt sich auf sorgfältige Untersuchungen und darf als zuverlässig gelten. Dennoch soll sie nur unverbindlich beraten.

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST DURAMID PA (60 % SV) 2/2



Plastic Technologie Service
Marketing- & Vertriebs-GmbH
Hautschenmühle 3
D-91587 Adelshofen
Fon +49-(0)9865-821
Fax +49-(0)9865-720
info@pts-marketing.de
www.pts-marketing.de

PTS-MARKETING

TECHNISCHE INFORMATION

>DURAMID-TH7G12.2S * 9207 e-schwarz
PA teilaromatisch,60%GF,HI,UV

23.01.2009

Eigenschaften		Einheit	Norm	Werte
PHYSIKALISCH				
Dichte		g/cm ³	ISO 1183	1,72
Verarbeitungsschwindigkeit (Platte 61*61*2) [l/q]		%	ISO 294-4	0,15/0,35
Wasseraufnahme (24 h)		%	ISO 62	0,25
Wasseraufnahme (Sättigung)		%	ISO 62	2,0
MECHANISCH				
Izod-Kerbschlagzähigkeit	+23/-30°C	kJ/m ²	ISO 180/A	18 (18)
Charpy-Kerbschlagzähigkeit	+23/-30°C	kJ/m ²	ISO 179-1/1eA	15 (15)
Charpy-Schlagzähigkeit	+23/-30°C	kJ/m ²	ISO 179-1/1eU	63 (70)
Strackspannung (50mm/min)		MPa	ISO 527-1/-2	250 (240)
Zug-Modul (1mm/min)		MPa	ISO 527-1/-2	25000 (22000)
Reißdehnung		%	ISO 527-1/-2	1,5 (2,0)
Biegefestigkeit		MPa	ISO 178	350 (310)
Biege-Modul +23 °C		MPa	ISO 178	18500 (1650)
Biege-Modul +90 °C		MPa	ISO 178	
THERMISCH				
Vicat-Erweichungstemperatur (VST)	50°C/h 9,8 N	°C	ISO 306	250
Vicat-Erweichungstemperatur (VST)	50°C/h 49 N	°C	ISO 306	230
Wärmeformbeständigkeitstemperatur (HDT)	0,45 MPa	°C	ISO 75-1/-2	255
Wärmeformbeständigkeitstemperatur (HDT)	1,81 MPa	°C	ISO 75-1/-2	245
Kugeldruckprüfung	125 °C		DIN EN 60695-10-2	
Kugeldruckprüfung	165 °C		DIN EN 60695-10-2	
Alterungstemp.	nach 20 000 h	°C	IEC 60216	
ELEKTRISCH				
Kriechstromfestigkeit	Lösung A/B	V	IEC 60112	
Durchschlagfestigkeit	(2 mm)	kV/mm	ASTM D149	
BRANDVERHALTEN				
UL94	(0,8/1,6/3,2)mm	Klasse	UL 94	
Glühdrahtprüfung 2mm	(550/650/750/850/960 °C)		DIN EN 60695-2-13	
Sauerstoffindex LOI		%	ISO 4589	

Werte: trocken: Probekörper "as molded" versiegelt 24h, 23°C

Werte(): kond.: ISO 291 / ISO 1110 oder: bei V-PTS-CREAMID/CREAMON vor der Strahlenvernetzung

Druckdatum: 03.03.2010

Die PTS-Information stützt sich auf sorgfältige Untersuchungen und darf als zuverlässig gelten. Dennoch soll sie nur unverbindlich beraten.