

Vysokoteplotně odolné plasty: Současné limity polymerních materiálů

Lukáš Hotařík

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav inženýrství polymerů
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš Hotařík**
Osobní číslo: **T11442**
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Polymerní materiály a technologie**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vysokoteplotně odolné plasty: Současné limity
polymerních materiálů**

Zásady pro vypracování:

Vypracujte literární řešení na téma vysokoteplotně odolných plastů. Stručně porovnejte teplotní odolnost plastů a kovů, výhody a nevýhody obou materiálů. Hlavní část práce pak koncipujte jako přehled současných polymerů, případně i jejich kompozitů, které se využívají v podmínkách s vysokou tepelnou zátěží. Zmiňte také metody zpracování těchto speciálních materiálů.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití.

Praha: Sobotáles, 2000, 537 s.

**MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti
polymerních materiálů. Praha: SNTL, 1987, 306 s.**

HARPER, Charles A. Modern Plastics Handbook. New York: McGraw-Hill, 2000.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Miroslav Janíček

Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce:

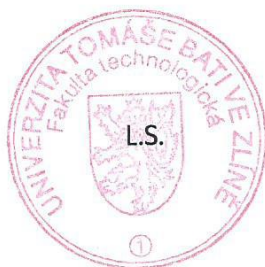
10. ledna 2014

Termín odevzdání bakalářské práce:

28. května 2014

Ve Zlíně dne 7. února 2014


doc. Ing. Román Čermák, Ph.D.
děkan




Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Hotařík Lukáš

Obor: Polymerní materiály a technologie

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 15.5.2014

Hotařík Lukáš

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). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o vysokoteplotně odolných polymerech. Okrajově se zabývá srovnáním vlastností mezi těmito polymery a jinými materiály, kterými jsou kovy, keramika a sklo. Dále je v práci podán přehled nejpoužívanějších polymerů s vyšší teplotní odolností. U vybraných zástupců jsou uvedeny typické vlastnosti, jejich využití a zpracování. Dále jsou zmíněny kompozity vysokoteplotně odolných polymerů.

Klíčová slova: polymer, vysokoteplotně odolný, vysoká teplota

ABSTRACT

Present bachelor thesis deals with high-temperature resistant polymers. Beside this main topic, their comparison with non-polymeric materials (metals, ceramics and glasses) is given. A review of the most used high-temperature resistant polymers is provided within the main part of the text. Typical characteristics of selected commercial materials are mentioned together with their typical processing and utilization. Moreover, composites with enhanced temperature resistance are described within the thesis.

Keywords: polymer, high-temperature resistance, high temperature

Mé poděkování patří především mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Miroslavu Janíčkoví za jeho cenné rady a konstruktivní kritiku, které přispěly k dokončení mé práce.

Dále mé poděkování patří rodičům, kteří mě po celou dobu studia psychicky a finančně podporovali, bez nich by to nešlo.

Motto:

„Musíš se mnoho učit, abys poznal, že málo víš.“

Michel De Montaigne

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

OBSAH

ÚVOD	9
1 POLYMERY	10
1.1 SROVNÁNÍ S KOVY	11
1.2 SROVNÁNÍ S KERAMIKOU	12
1.3 SROVNÁNÍ SE SKLEM	13
2 VYSOKO TEPLONTNÍ POLYMERY	15
2.1 CHARAKTERISTIKA.....	15
2.2 ZÁSTUPCI VYSOKOTEPLONĚ ODOLNÝCH POLYMERŮ	16
2.2.1 Fluoroplasty.....	16
2.2.1.1 Polytetrafluoretylen	16
2.2.1.2 Etylen-tetrafluoretylen	18
2.2.1.3 Tetrafluoretylen-perfluoralkylvinyleter	19
2.2.1.4 Polychlorotrifluoretylen.....	20
2.2.1.5 Polyvinylidenfluorid	21
2.2.2 Aromatické polyamidy.....	23
2.2.2.1 Poly(p-fenylentereftalamid).....	23
2.2.2.2 Poly(m-fenylenisoftalamid).....	24
2.2.3 Polyimidy	25
2.2.4 Polyfenylensulfid	26
2.2.5 Polymer s tekutými krystaly.....	27
2.2.6 Polyetheretherketon.....	28
2.2.7 Polyetherketon.....	29
2.2.8 Polykarbonát – Vysokoteplotní.....	30
2.2.9 Polysulfon	31
2.2.10 Polyfenylsulfon	33
2.2.11 Polyeterimid	34
2.2.12 Polyethersulfon	36
2.2.13 Polyamidimid	38
2.2.14 Polybenzimidazol.....	40
ZÁVĚR	42
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	48
SEZNAM OBRÁZKŮ	50

ÚVOD

Dnešní moderní doba, která by se také dala nazvat dobou „polymerní“, přináší velké množství polymerů pro všelijaké využití. Tyto látky často nahrazují materiály, které byly využívány od dávných dob – zejména dřevo, sklo a kovy. Oproti těmto materiálům mají syntetické polymerní látky řadu výhod, především co se týká užitných vlastností, mají výbornou odolnost proti korozi a stárnutí, dobrou pevnost a většinou jde o materiály s nižší hmotností. Mají také ale nevýhody, které brání jejich použití v některých aplikacích, jedná se např. o komplikovanou recyklaci. Především, ale většina těchto materiálů, má velmi nízkou tepelnou stálost (zejména skupina tzv. komoditních plastů, které mají typické užité vlastnosti zachovány do 150 °C). Z tohoto důvodu byla vyvinuta skupina speciálních polymerů, které vykazují vylepšenou stálost za vysokých teplot. V této práci je uveden jejich přehled včetně typických vlastností jednotlivých komerčně dostupných zástupců.

1 POLYMERY

Toto slovo lze rozdělit na dvě části: poly – mnoho a mer – část, jedná se o slova, která byla převzata z řečtiny. Polymery jsou látky, tvořeny makromolekulami. Tyto makromolekuly vznikají slučováním mnoha monomerů. Samotné monomery se získávají hlavně z ropy nebo zemního plynu. Spojením velkého množství těchto opakujících se částí do řetězce, vzniká výsledný polymer. Mohou se skládat z několika stovek až miliónů merů. Vyskytují se v lineární, rozvětvené nebo síťové struktuře. Polymery jsou organické látky, tudíž jejich základem je uhlík, který má čtyři valenční elektrony, může tedy vytvořit až čtyři kovalentní vazby k dalším uhlíkům nebo jiným atomům. V řetězci se mohou vyskytovat i jiné prvky jako kyslík, dusík, chlór, fluor atd. Řetězce se obvykle vyskytují sbalené ve statistických klubkách – to znamená, že jsou navzájem různě propletené. Velmi důležitou vlastností polymerů je jejich popis pomocí molekulových hmotností. Ta má velký vliv na výsledné vlastnosti materiálu. Vlastní polymery vznikají různými reakcemi. Buď polymerací nebo polykondenzací či polyadicí. [1]

Polymerace je řetězová reakce, kdy dochází k reakci na nenасыceném monomeru. Štěpí se dvojná vazba z monomeru a dalším přidáváním monomeru do reakce, vzniká velký polymer. Reakce musí být iniciována, toho se dosahuje přidáním iniciátoru (látka, která je schopna tvořit radikály a rozštěpovat vazbu, nebo jde o látku, která tvoří kationt nebo aniont). Iniciece může být způsobena pro určité monomery jen pomocí tepla nebo světla.

Polykondenzace je chemická reakce, kdy reagují dva stejné nebo různé monomery. Tyto monomery musí mít dvě či více reaktivních funkčních skupin, pomocí nichž jsou při reakci spojeny. Při polykondenzaci, nevzniká jen samotný polymer, ale i nízkomolekulární produkt (např. voda).

Polyadice je proces, kdy dochází k reakci sloučenin obsahující dvojně vazby nebo cyklické řetězce s molekulami obsahující vhodné funkční skupiny. Dochází zde k mnohonásobné adici těchto látek a vzniká samotný polymer, obdobně jako u polykondenzace, ale nevzniká zde vedlejší nízkomolekulární produkt. [2]

Polymery se mohou nacházet v různých strukturních stavech:

- a) Amorfní – objevují se zde různé konformace řetězců, dle podmínek se svinují do různých neuspořádaných tvarů. Tvary jsou ovlivněny teplotou, přítomností nízkomolekulárních látek, působení vnější síly apod. Při zvýšených teplotách, kdy se polymer nachází v tavenině, je jeho tvar ovlivňován působením mechanického napětí

a dochází zde k rozplétání klubka. Tyto polymery se charakterizují pomocí teploty skelného přechodu (T_g). Pod touto teplotou dochází k pohybu pouze vibrací a rotací atomů, polymer se chová jako sklo. Jedná se o jednu z nejdůležitějších veličin amorfních polymerů, v okolí T_g se zásadně mění fyzikální vlastnosti polymeru. Mezi T_g a teplotou tečení (T_f) dochází k pohybu segmentů, polymer se chová jako kaučuk. Nad T_f dochází díky velkému pohybu segmentů k překonání mezimolekulárních sil, polymer přechází do taveniny. Za určitých podmínek lze i semikrystalické polymery připravit v čistě amorfním stavu. A to tak, že polymerní taveninu velmi rychle ochladíme, tudíž se nestihne zformovat do krystalického uspořádání.

- b) Krystalický – řetězce jsou v pravidelném uspořádání. Čistě krystalický polymer ovšem neexistuje, vždy se v něm vyskytne určitá amorfní část. Při velkém obsahu amorfní části dochází ke shlukování krystalických částí, které se pohybují v obklopeném amorfním prostředí. Shluky jsou v řádech 10 nm. Při nízkém obsahu amorfní fáze vytváří krystalická fáze plošné útvary, které se nazývají lamely. Mezi jednotlivými lamelami je prostor vyplněn amorfní fází. Shlukováním několika lamel může docházet k vytváření sférolitů, které lze vidět pod světelným mikroskopem, neboť jejich rozměry dosahují 1 – 1 000 μm . Tyto sférolity narůstají z určitého zárodku, skládá se z mnoha krystalických zrn a části amorfní. Tyto polymery se charakterizují pomocí teploty tání (T_m). Vlivem vyšších mezimolekulárních sil, drží při sobě déle, než amorfní polymery, nevykazují žádnou T_g . Pohyb celých segmentů je blokován až do T_m , kde dojde k rozpadu celého uspořádání a polymer přejde do taveniny. [3]

1.1 Srovnání s kovy

Kovy jsou pevné a krystalické materiály. Většinou se získávají zpracováním rud, ve kterých se vyskytují ve formě oxidů. Existuje mnoho kovů s odlišnými vlastnostmi, a proto zde budou uvedeny jejich obecné vlastnosti v porovnání s polymery.

Vyskytuje se v nich kovová vazba, která způsobuje pravidelné uspořádání atomů do krystalové mřížky, jenž zapříčiňuje jejich kovový lesk. Jedná se o materiály, které jsou velmi dobrými vodiči elektrického proudu a tepla a tím se liší od polymerů, jenž jsou přesným opakem. Kovové materiály nepropouštějí světlo. Se zvyšující se teplotou jejich vodivost klesá. Tyto materiály vykazují dobrou tvárnost a jsou kujné. Kovy mají vysoké teploty

tání i varu. Oproti polymerům jsou několika násobně těžší a to čtyřikrát až stokrát (mají vyšší hustoty). Zpravidla podléhají silné degradaci (korozi) za povětrnostních podmínek. Teplotní odolnosti kovy přesahují vysoko teplotní polymery, většinu kovů lze využít do teplot okolo 800 °C, aniž by se roztavily. Tyto materiály mají velké průmyslové využití v mnoha odvětvích. Jedná se o použití ve stavebnictví, jako konstrukčního materiálu, až po uměleckou sféru. [4–5]. Jedna z možných aplikací kovů pro práci s vysokou teplotou viz *Obrázek 1*



Obrázek 1: Žihací kelímky [6]

1.2 Srovnání s keramikou

Keramika – jedná se o anorganický, nekovový materiál, získávaný zpracováním suspenze, což jsou jíly rozptýlené ve vodě. Po vytvarování této suspenze se nechá vysušit a poté dochází ke slinování při teplotách vyšších jak 700 °C. Vzniká tak celistvý materiál, který nazýváme keramika. Po tomto vypálení je nerozpustná ve vodě. Nachází se v ní jak krystalická, tak amorfnní fáze. Dělí se na několik typů, podle toho, jaké jsou v ní obsaženy oxidy.

Jedná se o materiál s vysokou tvrdostí, které polymery nedosahují. Má dobrou otěruvzdornost a zároveň jde o žáruvzdorný materiál, s výbornou chemickou odolností, kterou předčí polymery. Keramika je dobrým elektrickým izolantem s nízkou tepelnou vodivostí. Hlavní nevýhodou je její křehkost a obtížné tvarování složitějších výrobků, ve srovnání s polymery. Oproti polymerům je těžší a její hustota se pohybuje v rozmezí 2–3 g·cm⁻³. Keramika je asi 2x těžší než polymery, což v některých případech může být také jedna z nevýhod tohoto materiálu. Žáruvzdorná keramika je založena na oxidech: SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO atd., je odolná vůči teplotám asi 1 500 °C. Některé typy odolávají i vyšším teplotám, což až 10x překračuje teplotní limity polymerů. Tento materiál se proto využívá v oblasti výskytu vysokých teplot, jako jsou: vyzdívky průmyslových pecí, palivové kaze-

ty, keramické spalovací trysky, tepelné štíty raketoplánů apod. [7]. Jedna aplikace uvedena (viz *Obrázek 2*).



Obrázek 2: Keramická vyzdívka pece [8]

1.3 Srovnání se sklem

Sklo je anorganická, amorfní látka, která vznikla tavením vhodných materiálů a to zejména SiO_2 a jiných sklotvorných oxidů, jako jsou Al_2O_3 , B_2O_3 aj. Do pevného stavu bylo převedeno z taveniny pomocí řízeného chlazení. Sklo se nachází v tzv. skelném stavu, což znamená, že se materiál chová jako tuhý roztok.

Vlastnosti skel jsou závislé na přidaných příměsích. Sklo má velmi vysokou propustnost pro světlo z viditelné oblasti záření, tímto předčí velkou část polymerů. Je velmi stálé za povětrnostních podmínek a proto i touto vlastností je ve srovnání s polymery lepší. Odolává dobře chemickým vlivům, kromě kyseliny fluorovodíkové, která ho leptá. Sklo se také označuje jako dobrý tepelný a elektrický izolant, což je i většina polymerů. Velkou nevýhodou skla je vysoká křehkost, která se u mnoha polymerů neprojevuje. Jeho hustota se pohybuje v rozmezí $2,4$ až $2,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, podobných hustot dosahují i speciální polymery. Má velmi dobrou odolnost vůči teplotním rázům a rozměrovou stálost, což se o polymezech říci nedá. Jedná se o materiál s vysokým bodem tání, který je u různých typů v určitém intervalu. Nejběžněji se používá do $1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ a touto vlastností, vysoce převyšuje doposud známé polymery. Jeho využití je mnohostranné, ať už jako obaly (láhve), až po speciální aplikace. Jedná se také o hojně využívaný materiál ve formě vláken – jakožto plniva do jiných materiálů či kompozitů. [9–11] Jedna z možných aplikací skla do zvýšených teplot vyobrazena viz *Obrázek 3*.



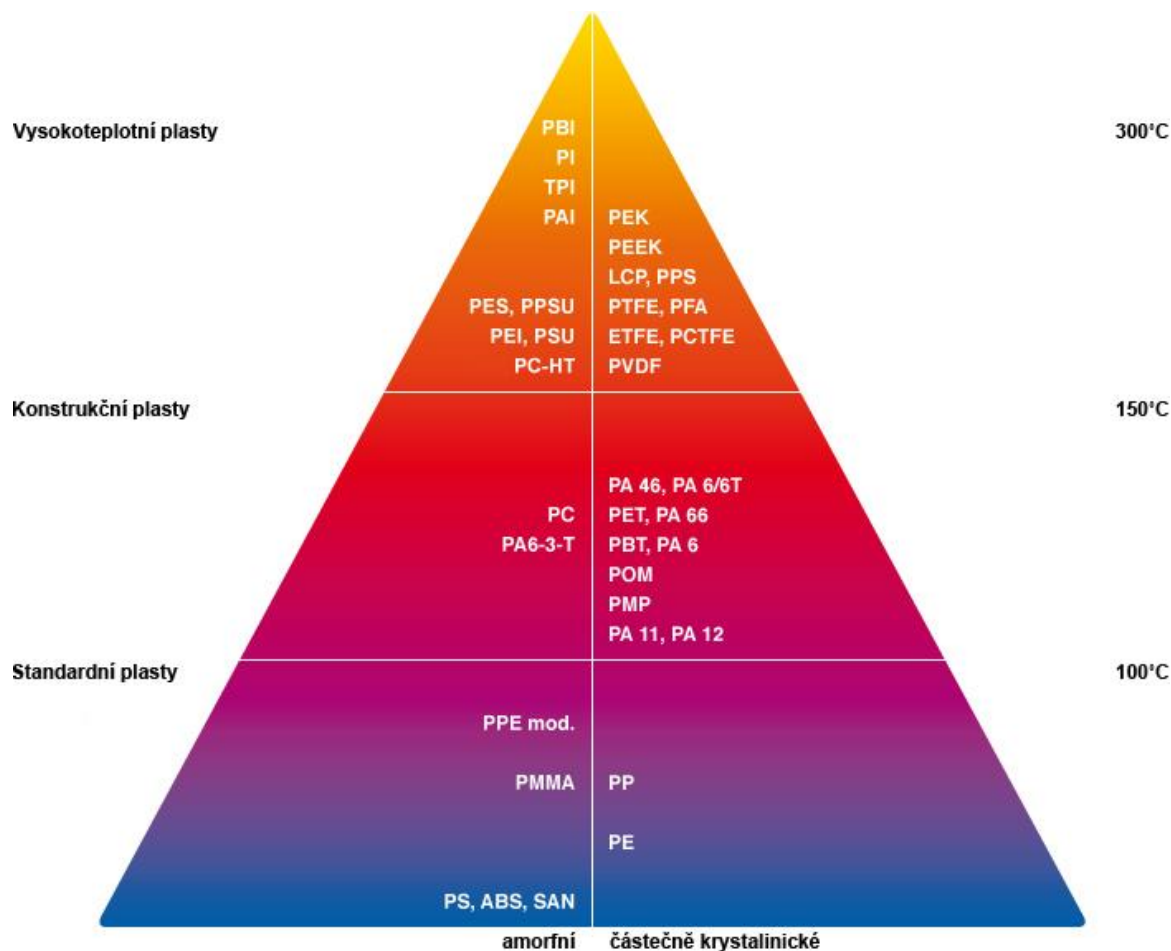
Obrázek 3: Aplikace skla do vysokých teplot [12]

2 VYSOKO TEPLONTNÍ POLYMERY

2.1 Charakteristika

Jedná se o speciální typy polymerů, které svými vlastnostmi mohou v určitém ohledu konkurovat kovům, skleněným nebo keramickým materiálům. Ovšem jejich vlastnosti je omezují jen pro úzké průmyslové využití a jejich cena je zpravidla několika násobně vyšší, než jiných polymerů, které se řadí mezi standardní (komoditní) a konstrukční plasty. Využívají se v průmyslových oblastech, kde je potřeba zkombinovat vlastnosti typické pro polymerní materiály, jako jsou nízká hmotnost, nevodivost elektrického proudu, dobrá pevnost aj. Vysokoteplotní polymery se nejvíce používají v odvětvích průmyslu leteckého, metalurgického, vojenského, automobilového, jaderného a astronomického. Tyto polymery si zachovávají tvarovou stálost i za zvýšených teplot, při kterých by standardní plasty roztály nebo nadměrně degradovaly. Jedná se zpravidla o teploty vyšší jak 150 °C, což je jedna z hranic, o které se dá říct, že se jedná o teplotně odolné polymery. [13] Výčet těchto polymerů v závislosti na teplotě odolnosti viz *Obrázek 4*. Charakterizují se pomocí krátkodobé nebo dlouhodobé teploty použitelnosti.

- a) Krátkodobá teplotní použitelnost – jedná se o teplotu, ve které polymer vydrží několik minut, maximálně pár hodin, bez jeho jakéhokoliv poškození.
- b) Dlouhodobá teplotní použitelnost – je to maximální hodnota teploty, ve které polymer neztratí více jak 50 % hodnot, jeho charakteristických vlastností, po dobu zatížení 10 000 až 20 000 hodin. [14]



Obrázek 4: Uspořádání plastů v závislosti teplotní odolnosti [13]

2.2 Zástupci vysokoteplotně odolných polymerů

2.2.1 Fluoroplasty

V této kapitole budou popisováni zástupci vysokoteplotních polymerů, které ve svém řetězci obsahují fluor.

2.2.1.1 Polytetrafluoretylen

Monomerem je plynný tetrafluoretylen, je to velmi reaktivní látka (obzvláště v přítomnosti kyslíku), která je nejedovatá. Tento monomer vzniká pyrolýzou freonů, podle následující reakce: $2\text{CCl}_2\text{F}_2 \xrightarrow{-2\text{Cl}_2} \text{CF}_2 = \text{CF}_2$ jeho bod varu je $-76,3^\circ\text{C}$.

Polytetrafluoretylen (PTFE) $-\text{[F}_2\text{C}-\text{CF}_2\text{]}-$ je polymer s lineárním řetězcem a velkou krystalinitou. Známy také pod obchodním názvem společnosti DuPont jako „Teflon“. Jed-

ná se o bílý až mírně šedý prášek, jeho hustota se pohybuje mezi $2,14 - 2,20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Střední molární hmotnost tohoto polymeru pro technické použití se pohybuje okolo $5\cdot 10^5$. Polymer snadno podléhá posunu šroubovic. Jde o nepolární látku s vysokou rázovou houževnatostí. Co se týká dielektrických vlastností, patří mezi nejlepší zástupce. Chemicky je velmi stabilní, odolává vroucí kyselině dusičné, lučavce královské aj. Jeho tepelná stabilita je taktéž velmi dobrá, začíná měknout až při teplotě $327 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota tání tohoto polymeru je asi $345 \text{ }^\circ\text{C}$, jeho rozkládání nastává při teplotách vyšších jak $400 \text{ }^\circ\text{C}$. PTFE může být trvale využíván při teplotě $260 \text{ }^\circ\text{C}$. Také má velmi dobrou mrazuvzdornost, jelikož zůstává ohebný i při teplotách okolo $-150 \text{ }^\circ\text{C}$, bez porušení vlastností odolá i teplotám okolo $-200 \text{ }^\circ\text{C}$. Má velmi malý koeficient tření. Dalšími kladnými vlastnostmi jsou antiadhezivita a voskovitý povrch. Jedna z mála nevýhod tohoto materiálu je, že neodolá vysokoenergetickému záření. Při vystavení tomuto záření dochází k jeho depolymeraci.

PTFE se díky blízkosti teploty tání a teploty degradace nedá zpracovávat běžnými technikami, a proto se musí zpracovávat odlišnou technologií, než ostatní plasty. Prášek PTFE se za normální teploty lisuje při tlacích 15 až 40 MPa. Tyto předlisky se poté slinují v pecích za teplot $360\text{--}380 \text{ }^\circ\text{C}$. Doba, která je potřebná ke slinutí, je dána tloušťkou daného předlisku. Následně dochází ke zchlazení tohoto výrobku. Výsledné vlastnosti výrobku jsou silně ovlivněny rychlostí, kterou se toto chlazení provádí. PTFE se dá také zpracovávat vytlačováním prášku nebo pasty, která se vytvoří pomocí přídavku 20–25 % parafínu (esterů, perfluoralkanů), tyto látky se musí následně odstranit pomocí tepla nebo vyextrahováním rozpouštědlem. Poté dochází ke slinování při teplotách v rozmezí od 350 do $370 \text{ }^\circ\text{C}$. Touto cestou vznikají výrobky, jako jsou trubky nebo různé profily. Fólie se získávají válcováním, pomocí nerezových kalandrů při jejich teplotě $400 \text{ }^\circ\text{C}$, nebo se vyrobí odřezáním z bloků, kdy dochází k dloužení tohoto odřezku.

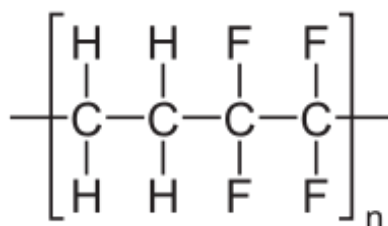
Tento polymer se především využívá na antiadhezní vrstvy (pokryv pánviček). Dále je vhodný k výrobě trubek, armatur, těsnění, ložisek nebo izolace drátů a kabelů v prostředích vysokých teplot. Jeho disperze se využívají k impregnaci sklotextilu nebo jako laky na kovové vodiče. [15–16] Aplikace viz *Obrázek 5*, jako použití těsnění pro aparaturu pracující za vysoké teploty.



Obrázek 5: Ukázka těsnící PTFE pásky [17]

2.2.1.2 Etylen-tetrafluoretylen

Etylen-tetrafluoretylen (ETFE) je kopolymer tetrafluoretylenu s etylenem. Vyrábí se kopolymerací etylenu [$\text{H}_2\text{C} = \text{CH}_2$] a tetrafluoretylenu [$\text{F}_2\text{C} = \text{CF}_2$] reakce se provádí v molárním poměru monomerů 1:1. Sktruktura viz Obrázek 6:

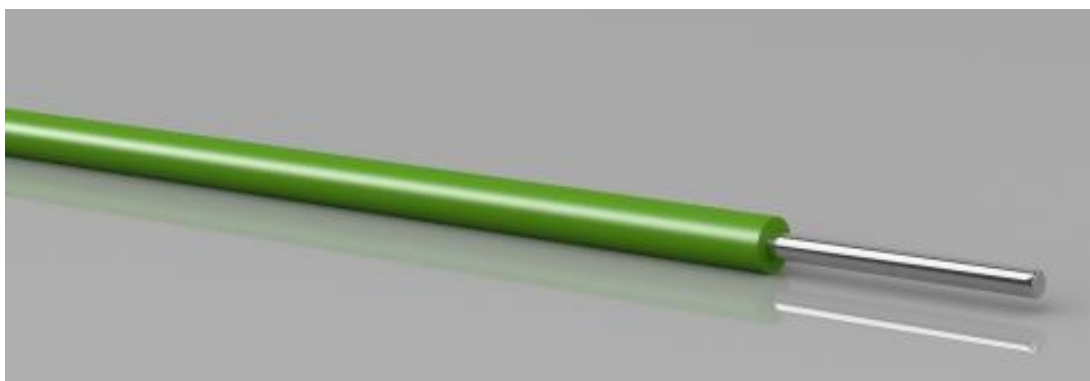


Obrázek 6: Strukturní vzorec ETFE [18]

Výsledný ETFE obchodním označením firmy DuPont jako „Tefzel“. Je alternujícím kopolymerem, tudíž v něm dochází k pravidelnému střídání výchozích monomerních jednotek. Jedná se o částečně krystalický polymer, který vykazuje vysokou transparentnost a za dobrých reakčních podmínek dosahuje hodnoty až 97 %, a tím je velmi podobný sklu. Zároveň má dobré mechanické vlastnosti. Jeho hustota se pohybuje mezi $1,65\text{--}1,70 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Jedná se o elektroizolační materiál, dielektrická konstanta pro Tefzel je $2,5\text{--}2,6$ při frekvenci 10 MHz. Vykazuje velmi malou hořlavost, při hoření neodkapává, ale pouze dochází k jeho smrštění. Tefzel má teplotu tání v rozmezí teplot od 255 do $280 \text{ }^\circ\text{C}$. Je dobře chemicky odolný, ovšem neodolává účinkům kyseliny chlorsulfonové a kyseliny trichloroctové, avšak lučavce královské neodolá jen při vyšších teplotách, jak $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Tento kopolymer, na rozdíl od velmi podobného PTFE, odolává radioaktivnímu a UV záření. Dlouhodobě je tepelně odolný a to v teplotách -190 až $+200 \text{ }^\circ\text{C}$. Společnost DuPont pro jejich komerční produkt Tefzel uvádí dlouhodobou teplotu použitelnosti na $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Krát-

kodobé zahřátí může být něco přes 200 °C. Má velmi malou schopnost adsorbovat vodu, pro Tefzel uvedena hodnota 0,03 %. Zpracování ETFE probíhá z taveniny při teplotách vyšších jako 320 °C v nekorodujícím provedení zpracovatelského stroje a za dobrého odsávání vznikajících par. Lze jej zpracovávat běžnými technologiemi, především vstřikováním a válcováním. [15, 19]

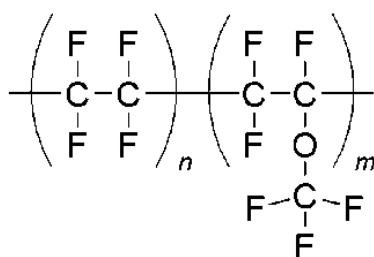
Tento materiál se převážně používá ve formě fólií, které slouží k zastřešování nebo obalování staveb, jako jsou skleníky, sportovní centra, bazény apod. Tímto využitím nahrazují plošné skla, která by v této aplikaci nemohla být využita kvůli jeho velké hmotnosti a zároveň nepropustnosti pro UV záření. Dále ho lze použít jako izolační materiál pro elektrotechnické aplikace, DuPont pro Tefzel uvádí použití na cívky, zásuvky a zapouzdřené součástky, dále pak pro použití ventilů v chemickém průmyslu a do zvýšených teplot, nebo jako ochranné vrstvy kabelů (např. v jaderném průmyslu, automobilech). [13, 20, 21] Ukázka možného využití pro izolaci kabelu viz *Obrázek 7*.



Obrázek 7: Využití ETFE jako izolace kabelu[22]

2.2.1.3 Tetrafluoetylen-perfluoralkylvinyleter

Tetrafluoetylen-perfluoralkylvinyleter, jiným názvem také perfluor-alkoxyalkan, (PFA), je termoplastický kopolymer monomeru tetrafluoretylenu s perfluoralkylvinyletherem, který je zde v malém množství (do pěti molárních procent). [15] Strukturální vzorec viz *Obrázek 8*:



Obrázek 8: Strukturální vzorec PFA [18]

Jedná se kopolymer, který se připravuje emulzní polymerací v autoklávech. Jako iniciátor se používají peroxidisírany. Výsledný PFA se zpracovává z taveniny při teplotách 370 až 420 °C.

U firmy Daikin Industries má obchodní název „Neoflon PFA“. Vlastnosti PFA odpovídají tomu, jako by to byl homopolymer. Jeho vlastnosti jsou velmi podobné s PTFE, odlišují se hlavně zpracováním, které je podstatně jednodušší pro PFA. Jeho hustota dosahuje hodnoty 2,15 g·cm⁻³. Jde o velmi čistý polymer, který je transparentní, zdravotně nezávadný a velmi odolný vůči chemikáliím. Jde o samozhášivý materiál, který vykazuje i dobré elektroizolační a mechanické vlastnosti, především vysokou odolnost proti tvorbě trhlin při napětí. Lze ho snadno svařovat. Jeho teplotní odolnost je pro krátkodobé zatížení do 280 °C. Dlouhodobé zatížení vydrží teploty až od -190 do +260 °C.

Používá se převážně ve formě fólií nebo trubek. Jde ho také využít jako tavného lepidla, převážně pro lepení PTFE. Používá se jako výložka chemických aparatur, pracujících při zvýšených teplotách, dále pro výrobu trubek a hadic do chemického průmyslu. Lze ho také využít na povlakování kovů a pro elektroizolace. [15, 23, 24] Ventil z PFA pro chemickou aparaturu viz *Obrázek 9*.

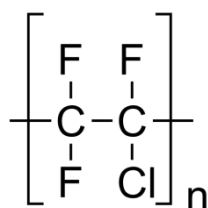


Obrázek 9: Ventil z PFA [25]

2.2.1.4 Polychlortrifluoretylen

Pro výrobu polychlortrifluoretylenu (PCTFE) se využívá monomeru, kterým je chlortrifluoretylen. Jeho bod varu je -28,4 °C a jedná se tedy o plynný monomer. PCTFE se vyrábí převážně polymerací, která se provádí emulzním způsobem. Za zvýšeného tlaku, přítomnosti redoxních systémů (např. peroxidisíran-hydrogensířičitan) a za teplot mezi 25 a 50 °C. Jako iniciátor reakce slouží dusičitan stříbrný. Výsledný polymer se ve svém mo-

nomeru nerozpouští. Jeho vzorec viz *Obrázek 10*. Obchodním označením společností Daikin Industries je „Neoflon PCTFE“.



Obrázek 10: Vzorec PCTFE [18]

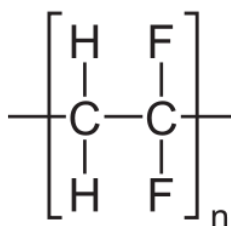
PCTFE je lineárním polymerem, který má relativní molekulovou hmotnost $(1-5) \cdot 10^5$. Jedná se o částečně krystalický polymer, je mírně mléčně zakalený. Jeho hustota se pohybuje v rozmezí 2,09 až 2,16 g·cm⁻³. Má vysoký sklon ke křehnutí. Této vlastnosti se předchází přísady modifikátorů, které zamezují křehnutí. Vykazuje malou nasákavost. Teplotu tání má okolo hodnoty 210 °C. Nad teplotou 315 °C dochází k jeho rozkládání na jedovaté zplodiny, kterými jsou fluorovodík a chlorovodík. Má téměř srovnatelné antiadhezní vlastnosti jako PTFE. Vykazuje výborné elektroizolační vlastnosti. Chemicky je vysoce odolný – odolává koncentrovaným kyselinám a hydroxidům. Trvale ho lze zatěžovat teplotami od -200 °C až do +180 °C. PCTFE má vyšší tvrdost a pevnost, než jemu podobný PTFE. Mechanické vlastnosti jsou silně ovlivňovány rychlostí ochlazení při jeho zpracování. Lze jej zpracovávat běžnými technologiemi pro termoplasty. Obvyklé zpracování PCTFE se provádí při teplotách 280 – 350 °C. Jedná se o polymer, který je odolný vůči působení vysokoenergetickému záření.

Své uplatnění našel především v chemickém průmyslu, převážně jako těsnící prvky pro aparatury pracující při zvýšených teplotách. Slouží jako výložky, armatury nebo na ochranu průtokových měřičů. Využívají se i jeho disperze na vytváření ochranných povlaků kovových materiálů a slouží tak jako antiadhezní nebo elektroizolační povlaky. Společnost Daikin Industries uvádí jako jeho hlavní uplatnění ve farmaceutickém průmyslu pro výrobu zásobníků na léky. [15, 19, 24]

2.2.1.5 Polyvinylidenfluorid

Polyvinylidenfluorid (PVDF) se získává z monomeru, kterým je vinylidenfluorid CH₂ = CF₂. Jeho teplota varu je asi -80 °C. PVDF se získává polymerační reakcí monomeru při zvýšených teplotách (50–150 °C) a vyšších tlaků (2,5–6,0 MPa). Jako iniciátory po-

lymerace jsou používány organické peroxidy. Polymerace se provádí emulzním nebo suspenzním způsobem. Výsledný polymer viz *Obrázek 11*.



Obrázek 11: Vzorec PVDF [18]

PVDF se obchodním označením společnosti Arkema nazývá Kynar. Výsledný polymer je lineární a velmi krystalický. Jedná se o jeden z nejvyužívanějších fluorovaných termoplastů. Teplotu tání má okolo 170 °C. Jeho hustota se pohybuje od 1,75 do 1,80 g·cm⁻³. U obchodních typů Kynar je to obvykle 1,77 g·cm⁻³. Trvale ho lze použít v teplotním rozmezí -30 až +150 °C. Krátkodobou expozici snese i v +160 °C. Vykazuje velmi malou nasákavost, pro Kynar udává prodejce hodnotu 0,01–0,03 %. Zároveň má velmi dobré mechanické vlastnosti, modul pružnosti v tahu Kynaru je 2 000 MPa. Má velkou chemickou odolnost, botná jen v polárních rozpouštědlech a neodolává působení acetonu. Jedná se o polymer se zdravotní nezávadností. Má velmi vysokou odolnost proti stárnutí za povětrnostních podmínek. Vykazuje dobré antiadhezní vlastnosti. Je vysoce odolný vůči působení vysokoenergetickému záření, více než PTFE či PCTFE. Může se zpracovávat běžnými technologiemi termoplastů (tj. vytlačování, vstřikování, obrábění, lisování), jeho zpracovatelské teploty se pohybují v intervalu 220–240 °C. Vlastnosti se mohou odlišovat podle způsobu zpracování a především ochlazování. [15, 26]

Díky jeho vlastnostem našel široké uplatnění. Využívá se v chemické a farmaceutickém průmyslu pro vyložení aparatur, ve kterých se objevují velmi čisté chemikálie či čistá voda, také pro míchací nebo filtrační zařízení, ukázka viz *Obrázek 12*. Vstříkované díly komerčního produktu jsou využívány v jaderném a automobilovém průmyslu. Dále ho lze využívat pro vnější použití jako součásti potrubí, tělesa ventilů, nebo ve formě povlaků, či nátěrů pro ochranu betonových nebo kovových nádrží. [15, 23, 27]



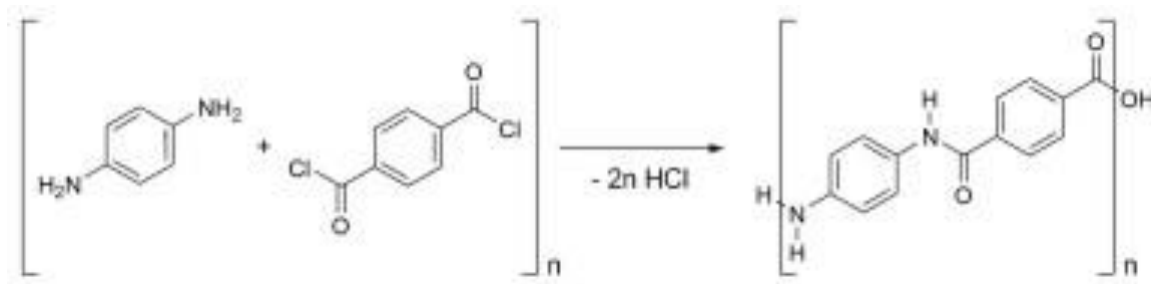
Obrázek 12: Filtrační zařízení s membránou PVDF [28]

2.2.2 Aromatické polyamidy

Aromatickým polyamidům se zkráceně říká aramidy, toto slovo vzniklo spojením slov aromatické polyamidy. Jejich vlastnosti ovlivňuje, jak jejich aromatická struktura, tak i přítomné amidové vazby. Ty působí jako tuhé části makromolekulárního řetězce, které mezi sebou reagují prostřednictvím vodíkových vazeb. [29] V této kapitole jsou popsáni pouze dva nejznámější zástupci těchto aromatických polyamidů.

2.2.2.1 Poly(*p*-fenylentereftalamid)

Poly(*p*-fenylentereftalamid) je známější pod obchodním názvem Kevlar (fa. DuPont). Jedná se o para-aramid. Vyrábí se reakcí monomerů *p*-fenylendiamidu a dichloridu kyseliny tereftalové podle reakce viz *Obrázek 13*.



Obrázek 13: Schéma syntézy kevlaru[30]

Reakce je polykondenzace, která se provádí v roztoku *N*-methylpyrrolidonu, z něhož se technologií mokrého zvlákňování získává pevné vlákno, které se přímo navíjí.

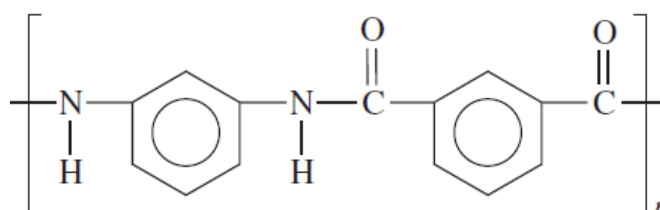
Kevlar je krystalický polymer. Jeho hustota se pohybuje mezi 1,44 až 1,47 g·cm⁻³. Je velmi mechanicky odolný. Trvale se dá používat okolo teplot 260 °C. Jeho zvláštností je, že nemá teplotu tání, pouze nad 400 °C dochází k jeho sublimaci. Jedná se o nehořlavý, samozhášivý materiál. Má vysoký modul pružnosti, který může dokonce konkurovat oceli.

Chemicky odolává organickým rozpouštědlům. Dobře odolává ionizačnímu záření. Nevýhodou kevlaru je jeho malá stabilita proti UV záření a jeho nasákavost.

Díky těmto vlastnostem má specifické využití, především ve vojenské technice, jako neprůstřelné vesty, helmy, ochranné oděvy. Dále se využívá pro výrobu ohnivzdorných obleků, výztuže pneumatik nebo spojkové obložení automobilů. Také ho lze použít pro zpevnění trupu a křídel u letadel nebo raketoplánů. [15, 30]

2.2.2.2 Poly(*m*-fenylenisoftalamid)

U Poly(*m*-fenylenisoftalamid) se jedná o meta-aramid, který nese obchodní název Nomex (fa. DuPont). Jeho vzorec viz *Obrázek 14*.



*Obrázek 14: Vzorec poly(*m*-fenylenisoftalamidu) [18]*

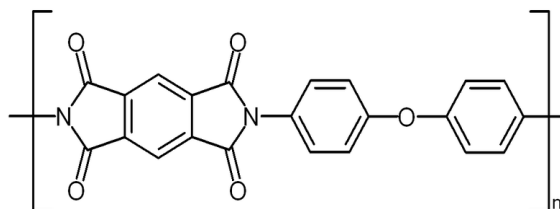
Připraví se reakcí monomerů, kterými jsou *m*-fenyldiamin v roztoku Na_2CO_3 a roztok tvořený dichloridem kyseliny isoftalové a tetrahydrofuranem. Tyto monomery spolu reagují při teplotě -10°C ve společném rozpouštědle, kterým je dimethylacetamid. Jedná se o polykondenzační reakci v roztoku. Výhodou této reakce je, že se získává polymerní roztok, který se může ihned zvláknovat. [15]

Nomex je pevný materiál, jenž je dobře otěruvzdorný. Jedná se o velmi chemicky odolný materiál. Nedá se zpracovávat běžnými metodami (vytlačování, vstřikování), jelikož netaje. Nad teplotou přesahující 370°C dochází k jeho rychlému rozkladu. Dá se tak zpracovávat pouze lisováním, nebo se zpracovává přímo z roztoku na vlákna. Má vysoký modul pružnosti. Teplotně je odolný v rozmezí teplot $200\text{--}250^\circ\text{C}$, krátkodobě snáší tepelnou zátěž až 300°C . Jedná se o nehořlavý materiál, odolávající ionizačnímu záření.

Využívají se především jeho vlákna, pro tkaní nehořlavých obleků, závodních kombinéz, ochranných rukavic nebo jako odolný filtrační materiál, pro aplikace zvýšených teplot. Nomex lze využít pro výrobu elektroizolačního papíru, který se využívá k izolaci za teplot vyšších jak 180°C . Využití také našel v leteckém průmyslu pro ochranu a výztuž trupu či křídel. [15, 31]

2.2.3 Polyimidy

Polyimidy (PI) zahrnují skupinu látek vyrobených polykondenzací z aromatických dianhydridů a aromatických primárních diaminů ve dvou stupních. V jejich řetězci se vyskytuje charakteristická imidová skupina $-\text{C}=\text{O}-\text{N}-\text{C}=\text{O}-$. Struktura PI viz *Obrázek 15*.



Obrázek 15: Strukturní vzorec polyimidu [18]

Komerční výrobek se označuje Kapton HN od firmy DuPont. Hustota tohoto komerčního produktu je $1,42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. PI mají velmi dobré elektroizolační vlastnosti při zvýšených teplotách, dielektrická konstanta je firmou DuPont uvedena na 3,5 při 10 000 Hz. Vykazují dobré mechanické vlastnosti, modul pružnosti v tahu Kaptonu při $200 \text{ }^\circ\text{C}$ je $2\,000 \text{ MPa}$. Své vlastnosti si dokáží udržet za velmi nízkých teplot asi do $-200 \text{ }^\circ\text{C}$, pro Kapton uvedena teplota $-269 \text{ }^\circ\text{C}$. V kladných teplotách jsou dlouhodobě odolné až do $300 \text{ }^\circ\text{C}$, u Kaptonu HN je to teplota až $400 \text{ }^\circ\text{C}$, krátkodobě snášejí zatížení teplotami i $500 \text{ }^\circ\text{C}$. U těchto materiálů není zjištěna teplota tání. Firma DuPont pro jejich komerční výrobky uvádí teplotu skelného přechodu mezi 360 a $410 \text{ }^\circ\text{C}$, mění se v závislosti na způsobu výroby. Jedná se o polymery s velmi dobrou stabilitou proti UV záření. Nerozpouštějí se v žádném organickém rozpouštědle. Jedná se o materiály, které vykazují samozhášivost. Těmito vlastnostmi v mnoha aplikacích nahrazují kovy nebo skla, ale bohužel se hůře zpracovávají. Dají se zpracovat pomocí slinování při teplotě asi $800 \text{ }^\circ\text{C}$ a vysokém tlaku.

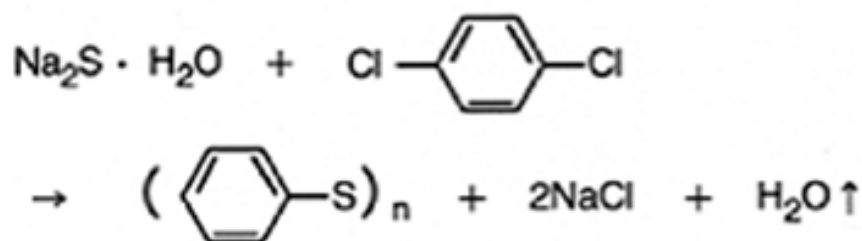
Tyto materiály se využívají při stavbě letadel, především těch co dosahují velkých rychlostí (až 3 Machy). Slouží jako chránicí prvek vesmírných lodí a také jako izolace obleků pro astronauty. Komerční Kapton je využíván na elektronické součástky, pro kabely na optická vlákna, v automobilovém průmyslu na membrány, čidla a potrubí. Dále se může využívat jako izolační pásy, povlaky na kabely a dráty pro vysoké teploty – viz *Obrázek 16*. [32–34]



Obrázek 16: Izolace z PI pro kabel [35]

2.2.4 Polyfenylsulfid

Polyfenylsulfid (PPS) se vyrábí z látek, kterými jsou para-dichlorbenzen a sulfid sodný. Tato reakce se provádí v prostředí N-methyl-2-pyrrolidonu. Reakce viz Obrázek 17.



Obrázek 17: Schéma syntézy PPS [36]

Jedná se o polykondenzační reakci, která se provádí při zvýšených teplotách a tlacích. Většinou je prováděna v polárních rozpouštědlech. Následně se pomocí hydrogenační reakce, která je exotermická, odstraňuje chlorid sodný.

Firmou Aetna plastics uveden pod obchodním názvem Ryton. Výsledný PPS je polymerem, jenž je částečně krystalický. Řadí se mezi termoplastické materiály. Jde o bílý (mírně zakalený) prášek. Hustota Rytonu je v rozmezí 1,35–1,75 g·cm⁻³. Jeho teplota skelného přechodu je asi +150 °C, pro komerční Ryton je uvedena teplota 90 °C. Teplotu tání mají komerční výrobky 282 °C. Výhodou tohoto materiálu je velká chemická odolnost, jelikož se nerozpouští v žádném rozpouštědle a to i za zvýšených teplot. Rozpustný je pouze v aromatických chlorovaných uhlovodících při teplotách vyšších než 175 °C. Vykazuje vynikající elektroizolační vlastnosti, dielektrická konstanta pro Ryton má hodnotu 3,0 při frekvenci 1 MHz. PPS má velmi nízkou nasákavost, hodnota pro Ryton 0,015 %. PPS má dobré mechanické vlastnosti, modul pružnosti v tahu Rytonu 2 200–5 500 MPa, výbornou

odolnost proti oděru a nízký sklon ke creepu. Zvláštností tohoto materiálu je, že při dopadu vyvolá kovový zvuk. Vykazuje také dobrou tepelnou stálost, při dlouhodobém zatížení vydrží v teplotách až +240 °C, komerční výrobky mají tuto odolnost do 218 °C. Lze jej krátkodobě zatížit teplotou okolo 260 °C. Za jeho velkou nevýhodu lze považovat malou odolnost proti povětrnostním podmínkám a UV záření. Tento polymer se dá zpracovávat běžnými technologiemi používanými pro zpracování termoplastů (vstřikování, vytlačování a lisování).

PPS se používá převážně v elektrotechnických aplikacích pro výrobu pouzder součástek. Hojně se využívají i jeho povlaky, jako chránicí prvek čerpadel z oceli či hliníku. Své uplatnění také našel v automobilovém průmyslu, kde je využíván na součástky do motorů. Lze jej použít jako kompozitu, který je naplněný skelnými vlákny [13, 15, 36, 37]

2.2.5 Polymer s tekutými krystaly

Polymery s tekutými krystaly (liquid crystal polymer) LCP, jde o polymery na bázi kyseliny p-hydroxybenzoové a souvisejících monomerů. Strukturně se jedná o aromatické polyestery, které jsou částečně krystalické. Vyrábí se polymerační reakcí výchozích látek za zvýšených teplot a při atmosférickém tlaku. LCP jsou materiály, jenž tvoří oblasti krystalické fáze, i když se nachází jako kapalina. Stupeň uspořádanosti je ovšem nižší než v běžné pevné fázi. Existuje více typů těchto polymerů. V této práci bude uveden jeden z nich, který nese obchodní název Vectra (fa. Ticona)

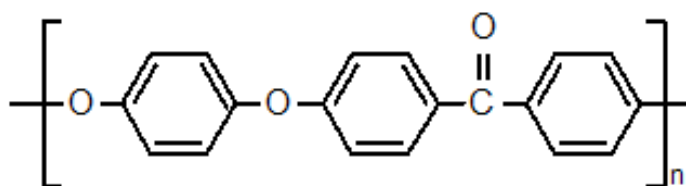
Vlastnosti LCP Vectra jsou silně ovlivňovány strukturou kapalných krystalů, podle toho jakým způsobem byly vyrobeny. Vykazují odlišné vlastnosti v závislosti na směrové orientaci krystalů, které se liší typem výroby. Tento materiál lze zpracovávat běžnými technologiemi pro zpracování termoplastů (vstřikování, vytlačování, tvarování). LCP z řady Vectra mají vynikající odolnost proti tečení i při dlouhodobém zatížení. Zvláštností je, že při tahové zkoušce nevykazují žádnou mez kluzu. Jejich hustota se pohybuje od 1,40 do 1,80 g·cm⁻³. Mají nízké koeficienty třetí. Ve srovnání s ostatními termoplasty vykazují poněkud nižší tepelnou roztažnost, téměř jako sklo nebo keramika. Jedná se o velkou výhodu tohoto materiálu. LCP mají samozhášivé vlastnosti a samy působí jako zpomalovače hoření. Vykazují dobré elektrické vlastnosti. Vykazují výbornou chemickou odolnost i za zvýšených teplot. Neodolávají koncentrovaným minerálním kyselinám či zásadám. Vectra materiály svými bariérovými vlastnostmi předčí běžné bariérové fólie. Velmi dobře odolávají vysokofrekvenčnímu záření. Teploty skelného přechodu těchto polymerů se pohybují

od 120 do 155 °C. Jejich teplota tání se nachází u +330 °C. Použitelné jsou pro dlouhodobé zatížení teplotami okolo +240 °C. Krátkodobě snášejí teploty až okolo +300 °C. Jejich velkou nevýhodou je velmi vysoká cena, řadí se mezi jedny z nejdražších dosud známých polymerů.

Tyto materiály našly své využití v automobilovém průmyslu, kde se používají pro palivové články. Díky svým elektrickým vlastnostem se využívají pro vytváření elektrických součástí, kterými jsou hlavně kabely a konektory na optická vlákna. Vlákna se používají do obleků, jež se využívají v chemickém průmyslu. V mnohých aplikacích nahrazují kovy, zejména kvůli jejich obtížnému a nákladnému obrábění, které by vyšlo draž, než když jsou vyrobeny z LCP. Využití našly také ve farmaceutickém průmyslu, pro výrobu trubek a hadiček. Jedná se o velmi využívaný materiál do různých kompozitů. [38]

2.2.6 Polyetheretherketon

Polyetheretherketon se vyrábí reakcí 4,4-difluordifenylketonu a draselnou nebo sodnou solí hydrochinonu. Výsledný polyetheretherketon (PEEK) viz *Obrázek 18*.



Obrázek 18: Vzorec PEEK [18]

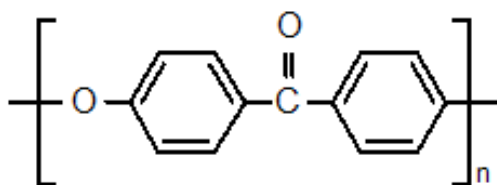
PEEK je částečně krystalickým termoplastickým polymerem. Nese obchodní označení KetaSpire u společnosti Solvay. Jeho hustota je $1,30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Vykazuje malou adsorpci vlhkosti, u KetaSpire je to 0,10 %. Ve srovnání s jinými termoplastickými polymery vykazuje mnohem vyšší mechanickou pevnost, má ji ze všech speciálních polymerů nejvyšší, modul pružnosti v tahu KetaSpiru 3 830 MPa při teplotě 200 °C. Má velmi výbornou odolnost vůči působení chemikálií a to i při zvýšených teplotách. Za jeho výhodu lze považovat, že jde opakovaně sterilizovat za použití páry, bez jakýchkoliv změn. Ze všech termoplastů má nejvyšší tvarovou stálost při působení tepla. Vykazuje zdravotní nezávadnost. Velmi dobře odolává působení vysokoenergetického záření, má dobrou odolnost proti tečení. PEEK je také odolný proti oděru. Má velmi vysokou povrchovou tvrdost. Tento polymer má nízkou tepelnou vodivost, komerční KetaSpire ji má $0,24 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Teplotu skelného přechodu má asi 185 °C, pro komerční výrobky je uvedena teplota na 150 °C.

KetaSpire vykazuje teplotu tání na teplotě 340 °C. Trvale odolává teplotám 250 °C. Při krátkodobém zatížení odolá i teplotám 300 °C. Při působení mrazu je odolný do teplot asi -60 °C. Jeho nevýhodou je jeho velmi vysoká cena, jedná se o jeden z nejdražších polymerů. PEEK lze zpracovávat běžnými technologiemi pro zpracování termoplastů. Obvykle se zpracovává z taveniny při teplotách v intervalu 340–400 °C. Nejvíce využívanou technologií pro jeho zpracování je vstřikování nebo natírání.

PEEK našel své uplatnění v lékařství pro nástroje a přístroje, které lze sterilizovat párou. Využívá se také pro konstrukční díly, které jsou namáhány jak teplem, tak mechanicky. Používá se pro výrobu kluzných ložisek, pouzder. Velké uplatnění našel ve vojenské a astronautické technice – povlaky letounů. [13, 15, 23, 39]

2.2.7 Polyetherketon

Polyetherketon (PEK) se vyrábí z monomerů, kterými jsou 4,4-difluorobezofenon a 4,4-dihydroxybenzofenonu za přítomnosti uhličitanu draselného. Jako rozpouštědlo je používán difenylsulfon. Tato reakce probíhá za laboratorních teplot. Výsledný polymer viz *Obrázek 19*.



Obrázek 19: Struktura PEK [18]

Jedná se o semi-krystalický termoplastický polymer. U firmy Ensiger obchodním názvem TECAPEEK HT. Jeho hustota se nachází mezi hodnotami 1,26 až 1,43 g·cm⁻³, u komerčního Tecapeeku HT je hustota 1,31 g·cm⁻³. Má výbornou chemickou odolnost. Jeho mechanické vlastnosti jsou velmi dobré, vyznačuje se vysokou pevností v tahu, komerční produkt má pevnost v tahu 4 600 MPa. PEK má nízký sklon k adsorpci vody, u Tecapeeku HT se jedná o hodnotu 0,02 %. Jde o samozhášivý materiál, při hoření uvolňuje velmi málo zplodin. Jedná se o zdravotně nezávadný polymer. Tento materiál má dobrou odolnost za povětrnostních podmínek. Jeho teplota pro skelný přechod je asi 153 °C, obchodní Tecapeek HT má T_g ve 160 °C. Teplota tání tohoto polymeru je kolem 350 °C, Tecapeek HT vykazuje teplotu tání při 375 °C. Dlouhodobě odolává teplotám +260 °C. Krátkodobě ho lze zatížit teplotami +300 °C. Je odolný vůči vysokoenergetické-

mu záření a proti creepu. Vykazuje dobrou rozměrovou stálost při zahřívání. Jde o dobrý elektrický izolant. Jedna z nevýhod tohoto polymeru je velmi vysoká cena. Běžné zpracování se provádí při teplotách 385 – 425 °C technologiemi na zpracovávání termoplastů. Převážně se využívá vytlačování, vstřikování či přetlačování.

Využívá se v leteckém, vojenském a farmaceutickém průmyslu. Lze jej použít pro palivové články jaderného průmyslu, nádrže automobilů v motorech, povlaky na letadla a kosmické lodě. Využívá se také jako trubky a hadičky v průmyslech pracujících se zvýšenými teplotami a chemikáliemi. V některých aplikacích nahrazuje kovy, které by se obtížně vyráběly, a jejich výroba by byla dražší. Velmi se využívá do kompozitů, kdy se vyztužuje převážně skelnými vlákny, získá se tím vyšší tepelná odolnost. [13, 40, 41]

2.2.8 Polykarbonát – Vysokoteplotní

Polykarbonát – High Temperature (PC-HT) obchodním názvem Apec (fa. Bayer). Jedná se kopolymer, který je vyráběn polykondenzační reakcí výchozích látek bisfenolu A (2,2-bis(4-hydroxyfenyl)propan), zkráceně BPA, s bisfenolem TMC (1,1-bis(4-hydroxyfenyl)-3,3,5-trimethylcyclohexan), zkratka BPTMC. Výsledné vlastnosti jsou silně ovlivněny poměrem těchto výchozích látek.

PC-HT je amorfni lineární termoplastický polymer. Výsledný produkt Apec má hustotu $1,18 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Tento materiál je vysoce transparentní, téměř jako sklo. PC-HT má samozhášivý charakter, má dobré mechanické vlastnosti, modul pružnosti v tahu Apecu je 2 400 MPa. Ve srovnání s ostatními vysokoteplotními polymery má vyšší sklon k absorpci vody, komerčně využívaný Apec dosahuje hodnoty 0,30 %. Vykazuje dobré dielektrické vlastnosti, hodnota dielektrické konstanty při 1 MHz je 2,9. Má dobrou rozměrovou stabilitu, hodnota koeficientu tepelné roztažnosti $6,5\cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Chemickou odolnost má velmi podobnou jako standardní polykarbonát - odolává účinkům alkoholů, nasyceným alifatickým uhlovodíkům a zředěným minerálními kyselinám, neodolává působení aromatických uhlovodíků, aminů a amoniaku. Trvale ho lze využívat v teplotách od -30 do 200 °C, výrobce Bayer uvádí maximální hodnotu 203 °C. Krátkodobým zatížením vydrží i kolem 215 °C. Teplota tání je kolem 260 °C. PC-HT má dobrou rázovou houževnatost ve velkém rozsahu teplot. Nevýhodou tohoto materiálu je absorpce UV záření, při vystavení tomuto záření dochází ke změně zbarvení (žloutnutí). Tento polymer má také výhodu, jelikož ho lze snadno pokovovat. Lze jej snadno zpracovávat běžnými technologiemi pro zpracování

termoplastů, jedná se především o technologie – vytlačování, vstřikování, výtlačné vyfukování, výrobce Bayer uvádí zpracovatelské teploty v intervalu 320–340 °C.

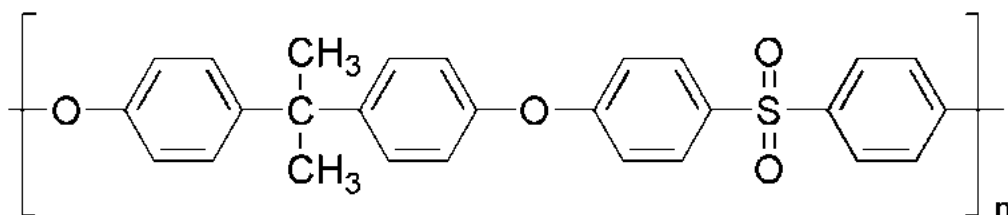
Tento speciální polykarbonát našel uplatnění pro automobilový průmysl, kde se používá na rámy a kryty veškerého osvětlení. V elektrotechnice se uplatňuje na kryty pojistek, panely elektrických sporáků, kryty osvětlení pro spotřebiče (např. odsavač par) atd. Lze ho použít ve zdravotnictví, kde se uplatňuje pro lékařské nádoby, bezpečnostní ventily u respiračních pomůcek, které lze opakovaně sterilizovat pomocí horké páry, a dále na výrobu injekčních stříkaček. Hojně používaným materiálem se stal v osvětlovací technice – kryty pro halogenové žárovky, průmyslové lampy a reflektory a na stomatologické lampy. Ve styku se zvýšenou teplotou se nejvíce uplatňuje pro výrobu hledí u hasičských přileb a dále pro výrobu skel plynových masek – viz *Obrázek 20*. [40, 42]



Obrázek 20: příklad použití PC-HT jako průhledu ochranné masky [43]

2.2.9 Polysulfon

Polysulfon (PSU) se vyrábí z monomerů, které tvoří bisfenol A a 4,4'-dichlordifenylnsulfon, jenž je v nepatrném přebytku. Reakce probíhá za zvýšené teploty (asi 150 °C) a v prostředí dimethylsulfoxidu. Tento polymer je znám pod obchodním názvem Udel od společnosti Solvay. Jeho vzorec viz *Obrázek 21*.

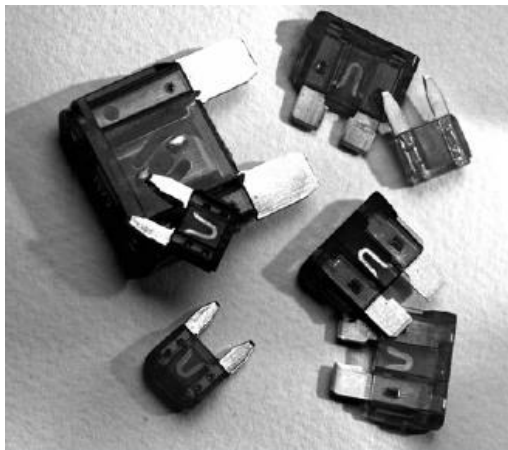


Obrázek 21: Struktura PSU [18]

PSU je amorfním termoplastickým polymerem. Jeho hustota se nachází u hodnoty 1,25 g·cm⁻³, firma Solvay u svého produktu uvádí 1,24 g·cm⁻³. Vykazuje dobré mechanické

vlastnosti, jeho modul pružnosti se pohybuje v rozmezí od 2 480 do 2 600 MPa, pro komerční produkt uvádí prodejce přesnou hodnotu 2 480 MPa. PSU má taktéž velmi dobré elektroizolační vlastnosti, produkt společnosti Solvay má svou dielektrickou konstantu 3,02 při 1 MHz. Obecně mají polysulfony vyšší nasákavost, hodnoty se udávají mezi 0,22 až 0,30 %, Udel má tuto hodnotu uvedenu na 0,30 %, čímž se víceméně neliší od ostatních polymerů. Jde o materiál, který má dobrou rozměrovou stálost za tepla, tepelná vodivost Udelu je $0,26 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Jedná se o polymer, jenž je dobře chemicky odolný, zvláště proti působení kyselin, zásad, alkoholů a alifatických uhlovodíků. Neodolává působení éterů, ketonů a halogenovaným uhlovodíkům, dobře se dá rozpustit v dimethylformamidu a dimethylsulfoxidu. PSU má teplotu skelného přechodu okolo $190 \text{ }^\circ\text{C}$, firma Solvay pro svůj produkt uvádí hodnotu $185 \text{ }^\circ\text{C}$. Polysulfony mají dobrou tepelnou odolnost, stabilně se dají využívat v teplotách $140\text{--}160 \text{ }^\circ\text{C}$, Udel je trvale využitelný v teplotách $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Jde o materiály, které vykazují malou hořlavost a při hoření uvolňují velmi málo zplodin. Zároveň jsou odolné proti působení radičního záření, ovšem špatně odolávají povětrnostním podmínkám a UV záření. Tento polymer lze zpracovávat běžnými technologiemi (lisování, vytlačování, výtlačné vyfukování a elektrospining), při teplotách $350\text{--}390 \text{ }^\circ\text{C}$, pro Udel jsou udány zpracovatelské teploty $315\text{--}370 \text{ }^\circ\text{C}$.

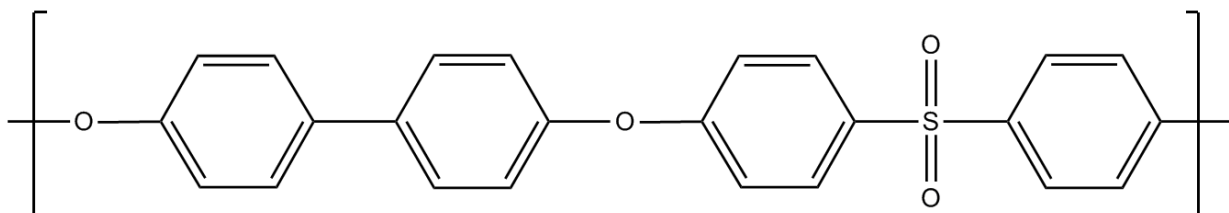
PSU se využívá v elektrotechnických, konstrukčních a medicínských aplikacích. V elektrotechnice je používán pro výrobu součástek do přístrojů, především do vnitřní části letadel. Komerční Udel se v této sféře využívá pro výrobu nosičů pojistek v motorech automobilů (viz *Obrázek 22*) a jako ochranné kontejnery průmyslových baterií. V medicíně je používán na výrobu nástrojů a přístrojů, které lze sterilizovat pomocí horké páry. Jde o hojně využívaný materiál pro výrobu potrubí a jeho součástí, které je ve styku s horkou vodou. Upec se dále využívá na membrány pro separaci plynů, při úpravě vody a hemodialýzy. [15, 40, 44]



Obrázek 22: Využití Udelu pro pojistky do automobilu [44]

2.2.10 Polyfenylsulfon

Polyfenylsulfon (PPSU) se vyrábí reakcí p,p'-bifenolu s 4,4'-dichlordifenylnisulfonem nebo ho lze připravit z PPS oxidací s peroxidem vodíku. Strukturální vzorec viz Obrázek 23.



Obrázek 23: Vzorec PPSU [18]

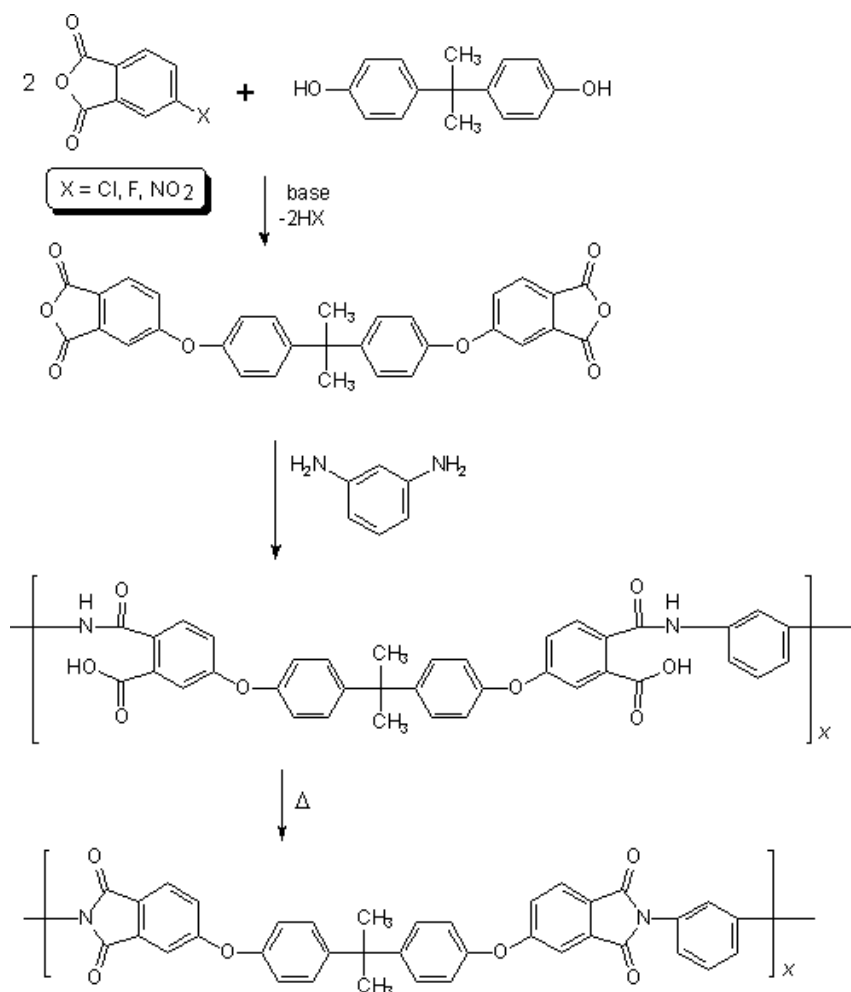
PPSU se prodává pod komerčním názvem Radel (fa Solvay). Jedná se o amorfní termoplastický polymer, jenž si je velmi blízký s předchozím zástupcem (PSU). Hustota komerčního Radelu je udána na hodnotu $1,29 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Tento polymer má dobré elektroizolační vlastnosti, dielektrická konstanta je firmou Solvay uvedena při 1 MHz na 3,45, je dobře odolný vůči působení vysokoenergetického záření. Vykazuje také dobré vlastnosti v mechanické oblasti, jeho modul pružnosti je mezi 2 270 a 2 340 MPa, u komerčního produktu je uváděna hodnota 2 340 MPa a má velmi vysokou odolnost proti nárazům. Jeho sklon k absorpci vody je malý, hodnota nasákavosti pro Radel je 0,40 %. Jedná se o transparentní polymer, který lze snadno barvit. Jeho teplota skelného přechodu se nachází u $220 \text{ }^\circ\text{C}$, tato teplota je uvedena i pro produkt Radel. Má vyšší chemickou odolnost než PSU, nedolává působení halogenovaných uhlovodíků. PPSU má nízkou hořlavost a při hoření uvolňuje velmi malé množství kouře. Trvale ho lze použít pro teploty do $180 \text{ }^\circ\text{C}$, krátkodobě ho lze zatížit teplotami asi o $20 \text{ }^\circ\text{C}$ vyššími. Má dobrou rozměrovou stálost,

malou tepelnou vodivost, hodnota tepelné vodivosti pro Radel je $0,30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, což je oproti jiným speciálním polymerům až o 20 % více. Tento polymer se zpracovává za teplot 350–390 °C technologiemi zpracování termoplastů (především vstřikování), výrobce pro produkt Radel uvádí teploty 365–393 °C (vstřikování) a 343–400 °C (vytlačování).

PPSU se používá v leteckém průmyslu, pro použití u letadel na interiérové prvky a pro konstrukce jídelních vozíků. Ve zdravotnictví se dá využít pro výrobu hlavně chirurgických a zubních nástrojů. Dále ho lze používat na výrobky, které se mohou opakovaně sterilizovat horkou párou. PPSU se může také využívat pro potrubí, i teplovodní, a jeho příslušenství. [13, 40, 45]

2.2.11 Polyeterimid

Polyeterimid (PEI) se vyrábí polymerací monomerů 2,2-bis(4-hydroxyfenyl)propan-bis(ftalanhydrid) a 1,3-diaminobenzen. Tato reakce se provádí ve vodném prostředí při teplotě 180 °C. Reakce je schematicky uvedena – viz *Obrázek 24*. Jedná se o dvoustupňovou reakci, kdy dochází k reakci bisfenolu A s halogenovaným anhydridem, tento produkt se čistí a izoluje. Poté tento produkt reaguje s 1,3-diaminobenzenem a touto reakcí vzniká výsledný PEI.



Obrázek 24: Výroba PEI [46]

PEI je amorfní termoplastický polymer, který se komerčně označuje jako Ultem 1000 firmou Sabic. Hustota se pohybuje od $1,27$ do $1,31 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, pro komerční účely uvádí Sabic $1,27 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Tento polymer má dobré mechanické vlastnosti, jeho modul pružnosti v tahu je v intervalu $3\,420\text{--}3\,700 \text{ MPa}$, Ultem 1000 ho má $3\,580 \text{ MPa}$. Vykazuje výbornou tvarovou stálost při působení tepla a je velmi dobře odolný vůči creepu. Absorpce vody je pro tyto materiály o něco větší, udává se hodnota asi $0,65 \%$, pro vyráběný produkt Ultem 1000 udává firma Sabic absorpci vody na $0,25 \%$. PEI vykazují také dobré elektroizolační vlastnosti, dielektrická konstanta tohoto materiálu je při 1 MHz $3,15$. Jedná se o nehořlavé materiály, které mají samozhášivé účinky a při hoření vyvíjí velmi málo zplodin, které jsou téměř netoxické. PEI jsou velmi stabilní vůči chemikáliím, velmi dobře odolávají působení koncentrovaným kyselinám a zásadám, halogenovaným uhlovodíkům, olejům, ale jsou rozpustné v dichlormethanu a N-methylpyrrolidinu. Je odolný vůči vysokoenergetickému záření. Tento polymer má teplotu skelného přechodu v intervalu $209\text{--}249 \text{ }^\circ\text{C}$, komerční produkt má tuto teplotu $217 \text{ }^\circ\text{C}$. Je trvale odolný do teplot $170 \text{ }^\circ\text{C}$,

lze ho krátkodobě zatížit i teplotami o 20–30 °C vyššími, výrobce Sabic uvádí teplotní odolnost pro produkty až na 220 °C. Jde o velmi drahý typ polymeru. Typickými zpracovatelskými technologiemi jsou vytlačování a vstřikování, provádí se za teplot 340–425 °C. Pro komerční Udel 1000 jsou teploty pro vytlačování uvedeny na 320–355 °C a pro vstřikování 350–400 °C.

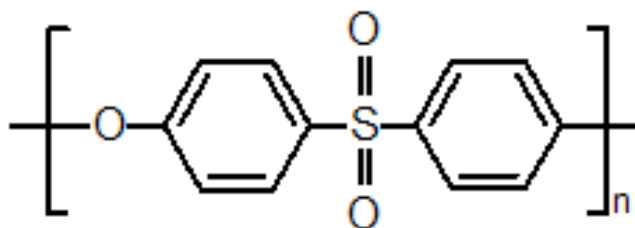
PEI se používá převážně v průmyslech jako automobilový, letecký, farmaceutický a v elektrotechnice. Lze ho použít na výrobu kompozitů, které jsou vyztuženy skleněnými vlákny (obvykle 10–30 %). V letadlech našel využití v interiéru na výrobu panelů pro cestující a okenních rámců, v automobilech se nejvíce využívá v motorech na různé senzory, rozvody a dále reflektory pohledové díly (viz *Obrázek 25*). V elektrotechnických aplikacích na konektory a povlakování měděných kabelů, které slouží pro rozvody. V medicínských aplikacích pro výrobu nástrojů, které je možno sterilizovat horkou párou. Navíc v domácnosti se používá na nádobí do mikrovlnné trouby. [13, 15, 40, 47]



Obrázek 25: Reflektory světlometů z pokoveného PEI [48]

2.2.12 Polyethersulfon

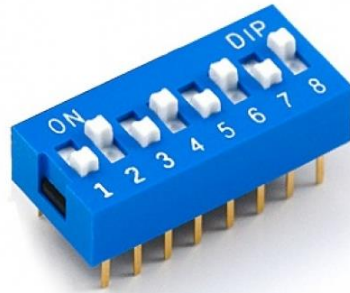
Polyethersulfon (PES nebo PESU) se komerčně označuje Ultrason E (fa BASF), vyrábí se reakcí bisfenolu A a 4,4'-dichlordifenylsulfonu za přítomnosti Na_2CO_3 . Strukturální vzorec polymeru viz *Obrázek 26*.



Obrázek 26: Vzorec PES [18]

PES je amorfním termoplastem, jehož hustota se pohybuje od 1,23 do 1,43 g·cm⁻³, pro Ultrason E uvedena hodnota 1,37 g·cm⁻³. Má dobré mechanické vlastnosti, jeho modul pružnosti v tahu se pohybuje okolo 2 650 MPa, stejnou hodnotu uvádí i výrobce a má vysokou tvarovou stálost za zvýšených teplot, dále také dobrou odolnost proti creepu. Vykazuje velmi dobré dielektrické vlastnosti, jeho dielektrická konstanta je 3,8 při 1 MHz, tato hodnota se shoduje s komerčním výrobkem. Jedná se o samozhášivý polymer, který má nízký sklon k hoření. Jeho nasákavost vody je poměrně vyšší oproti jiným speciálním polymerům, udávané hodnoty jsou 2,2 %. Chemicky dobře odolává působení zředěnými kyselinami a zásadami, alkoholů a aromatickým uhlovodík. Špatně odolá působení silnými kyselinami, étery a ketony a je rozpustný v dimethylformamidu. Teplota skelného přechodu se pohybuje v rozmezí 220–238 °C, hodnota udaná pro Ultrason E je 222 °C, a teplota rozkladu je v intervalu 400–584 °C, tyto hodnoty závisí na výrobním postupu a čistotě výchozích látek. Maximální zatížení na krátkou dobu může být teplotou asi 215 °C, výrobce BASF pro produkt uvádí teplotu 220 °C, dlouhodobá zátěž může být teplotou 200 °C, hodnota uvedená pro Ultrason E je 180 °C po dobu 20 000 hod. PES se zpracovává technologiemi, vhodnými pro zpracování termoplastů, jedná se především o vstřikování a vytlačování, zpracovatelské teploty jsou v rozmezí 340–390 °C.

PES je hojně využíván na výrobu pojistek a mlhových světel pro automobily a v motorech na olejové pumpy. V elektrotechnice se používá na povlaky drátů, konektory optických vláken, DIP spínače (ukázka viz *Obrázek 27*) a pro desky s plošnými spoji. Je využitelný na výrobu interiérů letadel. V lékařství se využívá pro membrány, nástroje aj., které lze sterilizovat. Díky jeho zdravotní nezávadnosti se může využít pro výrobu kojeneckých lahví, uvedeno firmou BASF, (viz *Obrázek 28*), které lze vyvařovat. Dále ho lze použít na průhledy (přilby, lampy atd.). [40, 49]



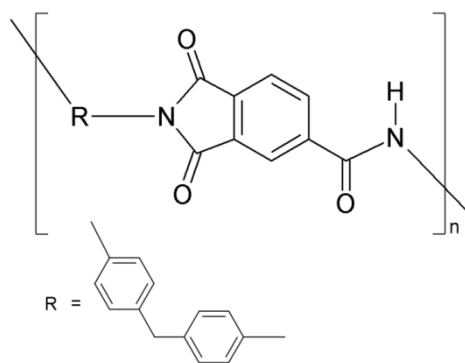
Obrázek 27: Přepínač DIP [50]



Obrázek 28: Kojenecká láhev z PES [51]

2.2.13 Polyamidimid

Polyamidimid (PAI) se vyrábí z monomerů, kterými jsou anhydrid kyseliny trimellitové a aromatický diamin, jde o roztokovou polykondenzaci vzniklý polymer má strukturu (viz Obrázek 29).



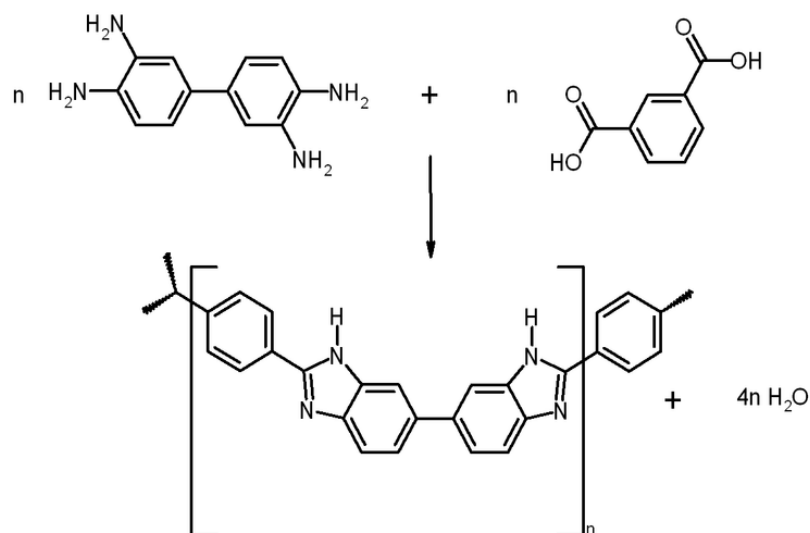
Obrázek 29: Strukturní vzorec PAI [18]

PAI nese obchodní název Torlon a vyrábí ho firma Solvay. PAI je spojka mezi aromatickými polyamidy a polyimidy. Jedná se o amorfní termoplastický materiál. Jeho hustota se pohybuje 1,38–1,42 g·cm⁻³, firma Solvay uvádí 1,42 g·cm⁻³. Má dobré dielektrické vlastnosti, jeho konstanta je 3,9 při 1 MHz (stejně i pro komerční produkt). Vykazuje velmi dobré mechanické vlastnosti, jeho modul pružnosti v tahu 4 480 až 4 900 MPa, pro Torlon je uvedeno 4 500 MPa, což jsou hodnoty srovnatelné s kovy. Je velmi odolný proti tečení za zvýšených teplot – jeho teplená vodivost je 0,26 W·K⁻¹·m⁻¹. Velmi dobře odolává působení vysokoenergetickým zářením a zároveň je odolný vůči povětrnostním podmínkám. Nasákavost se pohybuje okolo 0,33 %, hodnota shodná i pro Torlon. Dobře odolává působení chemikáliím, především aromatickým, alifatickým a halogenovaným uhlovodíkům, esterům a ketonům, špatně odolný je vůči působení silných kyselin, zásad a alkoholů. Jedná se o málo hořlavý polymer, který při hoření uvolňuje velmi málo zplodin. PAI má velmi dobrou tepelnou odolnost, jeho teploty skelného přechodu jsou v rozmezí 206–326 °C u Torlonu se uvádí hodnota na 277 °C. PAI je dlouhodobě použitelný v teplotách od -150 do +260 °C, pro komerční produkt jsou uváděny teploty až 275 °C a krátkodobě ho lze zatížit i +400 °C. Tento polymer se zpracovává technologiemi, použitelnými pro normální termoplasty. Nejvíce se využívá vstřikování a vytlačování, zpracování probíhá při teplotách 304 až 370 °C

PAI je nejvíce využíváný v leteckém a automobilovém průmyslu. Používá se na konstrukční a upevňovací díly letadel a raketoplánů, letecké kompresory, těsnící prvky a dále jako elektrické součásti automobilového motoru a v elektrotechnice na výrobu obalů na dráty a ložiska a výrobu dutých vláken. Lze jej také dobře využít ve formě kompozitů, kdy je plněn skelnými vlákny (až 30 %). [15, 40, 52]

2.2.14 Polybenzimidazol

Polybenzimidazol (PBI) se vyrábí reakcí látek 3,3'-diaminobenzidin a difenylisofthalát, tyto látky jsou v molárním poměru 1:1,5. Jde o polykondenzační reakci, provedenou za teplot 100–290 °C a normálních tlaků. Reakční schéma s výslednou strukturou polymeru (viz *Obrázek 30*).



Obrázek 30: Syntéza PBI [18]

PBI vyrábí firma Professional Plastics pod obchodním názvem Celazole. Jedná se o amorfní termoplast. Jeho hustota se pohybuje mezi 1,30–1,42 g·cm⁻³, pro Celazole se uvádí hodnota 1,30 g·cm⁻³. Tento polymer má nejlepší mechanické vlastnosti ze všech konstrukčních polymerů, jeho modul pružnosti v tahu se pohybuje okolo 5 900 MPa, přesná hodnota pro komerční výrobek je 5 860 MPa. PBI vykazuje dobré dielektrické vlastnosti, jeho dielektrická konstanta je při 1 MHz 3,2 - stejnou hodnotu uvádí i výrobce. Je velmi stabilní za povětrnostních podmínek, má nízký sklon k absorpci vody 0,40 %, odolává energetickému záření. Díky jeho nízké tepelné vodivosti (pro Celazole 0,40 W·K⁻¹·m⁻¹) se jedná o dobrý tepelný izolátor, má dobrou stálost při působení tepla. PBI dobře odolává působení etherům, ketonům a uhlovodíkům, špatně odolný je vůči kyselinám a zásadám, k jeho rozpouštění se využívá 96% H₂SO₄. Vykazuje malou hořlavost a při hoření uvolňuje velmi málo kouře. Jedná se o nejvíce stabilní polymer ve vysokých teplotách, teplota skelného přechodu se uvádí mezi hodnotami 420 a 510 °C, pro Celazole je uvedena tato teplota na 399 °C. PBI dlouhodobě snáší teplotu 260–315 °C, výrobce pro komerční produkt uvádí teplotu 343 °C, krátkodobé zatížení může být teplotou až 500 °C, pro komerční produkt se

uvádí hodnota 538 °C. Jeho velmi dobré vlastnosti z něj ovšem činí jeden z nejdražších materiálů. Pro jeho zpracování se využívají méně obvyklé technologie pro zpracování termoplastů, jedná se především o lisování a zvlákňování.

PBI se nejvíce využívá pro výrobu nehořlavých kombinéz a brzdících padáků pro kosmické kabiny (viz *Obrázek 31*). U vstřikovacích strojů ho lze využít jako izolační pouzdra u vtokových kanálek. V leteckém průmyslu se z něj vyrábí komponenty do motorů letadel a pro ventily u sedadel. Dále se využívá pro palivové membrány, elektrické konektory a upínací kroužky. [15, 40, 53]



Obrázek 31: Brzdny padák raketoplánu [54]

ZÁVĚR

Dnešní doba přináší velký pokrok v rozvoji speciálních polymerů, jedná se o velmi perspektivní oblast výzkumu. Tyto polymery díky svým vlastnostem mnohdy v různých aplikacích nahrazují kovy, sklo a keramiku.

Vysokoteplotní polymery se blíží tepelnou odolností kovům, proto je lze využít v průmyslech, kde se pracuje s vysokými teplotami, nejvyšší tepelnou odolnost vykazují polyimidy a polybenzimidazoly, odolávají teplotám vyšším jak 500 °C. Většina těchto polymerů vykazuje velmi dobré vlastnosti v mechanické oblasti a jsou často lehčí, než dříve využívané materiály. Nejlepšími mechanickými vlastnostmi se vyznačují materiály polybenzimidazoly a polyamidimidy. Většina těchto speciálních polymerů odolává také radiačnímu záření, což umožňuje využití pro jaderný či kosmický průmysl. Jejich vynikající vlastnosti se bohužel odráží na jejich ceně, která je v řádech tisíců za kilogram. Ve srovnání s jinými konstrukčními materiály (kovy a sklo) je většina výrobku levnějších, především díky snadnějšímu zpracování polymerních materiálů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Polymer Structure* [online]. 2012 [cit. 2014-03-02]. Dostupné z:
<http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/polymer.htm>
- [2] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2011. ISBN 978-807-0807-880
- [3] BRUST, Gregory. *The macrogalleria. How They Work* [online]. 2005 [cit. 2014-03-06]. Dostupné z: <http://pslc.ws/mactest/level3.htm>
- [4] JURŠÍK, František. *Anorganická chemie kovů*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2002. ISBN 80-708-0504-8.
- [5] SPŠ STROJNICKÁ OLOMOUC. *Důležité nepřechodné kovy*. [online]. Olomouc, 2013 [cit. 2014-02-02]. Dostupné z:
http://www.spssol.cz/DUMy/Chemie/2.sada/11_Dulezite_neprechodne_kovy.pdf
- [6] FIALA, Miroslav, et al. *Laboratorní technika. Žíhací kelímek* [online]. Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity, 2008 [cit. 2014-03-12]. Dostupné z:
http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/labtech/pages/odparovaci_miska.html
- [7] KRATOCHVÍL, Bohumil, et al. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, s. 191. ISBN 80-7080-568-4.
- [8] MACEK, Tomáš. *ARTkeramika. Vyzdívka pece* [online]. 2009 [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.artkeramika.cz/eshop/clanek-814-vymena-spiral-v-poklopove-keramicke-peci.html>
- [9] VONDRUŠKA, Vlastimil. *Sklářství*. Vyd. 1. Praha: Grada, 2002. ISBN 80-247-0261-4.
- [10] SVOBODA, Luboš, et al. *Stavební hmoty* [online]. Vyd. 3. Praha, 2013 [cit. 2014-03-02]. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z:
<http://people.fsv.cvut.cz/~svobodah/sh/SH3v1.pdf>
- [11] SHAW, Milton Clayton. *Engineering Problem Solving - A Classical Perspective* [online]. Norwich, NY: Noyes Publications, 2001 [cit. 2014-03-02], s. 207–209. Chap. 9, Engineering Materials. ISBN 0-8155-1447-6. Dostupné z:
<http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEPSACP02/engineering-problem-solving>

- [12] KŘIBÍK, Jakub. Levné krby. *Krbová kamna* [online]. 2009 [cit. 2014-03-12].
Dostupné z: <http://www.levne-krby.eu/katalog/krbova-kamna-1/euro-kom-litina-1237/krbova-kamna-richard-antique-bronze-2799>
- [13] ENSINGER. *High temperature plastics* [online]. 2013 [cit. 2014-02-02]. Dostupné z:
<http://www.ensinger-online.com/en/materials/high-temperature-plastics/>
- [14] Technická univerzita Liberec. *Tepelné vlastnosti plastů* [online]. Liberec, 2010
[cit. 2014-03-02]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/odolnost.pdf
- [15] MLEZIVA, Josef. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Vyd. 2. přeprac.
Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7
- [16] DuPont. *Teflon* [online]. 2014 [cit. 2014-03-06]. Dostupné z:
http://www2.dupont.com/Teflon_Industrial/en_US/products/product_by_type/coatings/index.html
- [17] TEMAX TECH s.r.o. Produkty. *Teflonové vlákno* [online]. 2010 [cit. 2014-03-18].
Dostupné z: <http://www.temax.cz/produkty-teflonove-vlakno-mini-val.html>
- [18] Wikipedia [online]. 2014 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/>
- [19] Docstoc. MIKESANYE. *Fluoropolymers* [online]. 2011 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z:
<http://www.docstoc.com/docs/78502906/Fluoropolymers>
- [20] DuPont. *Tefzel* [online]. 2014 [cit. 2014-04-06]. Dostupné z:
http://www2.dupont.com/Teflon_Industrial/en_US/assets/downloads/h96518.pdf
- [21] HIRNŠAL, Zdeněk a Vladimír JANATA. Era21. *Effe fólie v domácí praxi*
[online]. 2009, č. 2, s. 86-92 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z:
http://www.era21.cz/index.asp?PAGE_ID=197
- [22] KABELTRONIC. Teplotně odolný obal kabelu. *ETFE Tefzel* [online]. 2013
[cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.kabeltronik.de/elektronik-industrie/waermebestaendige-kabel/wire-wrap-draht-7y-etfe-tefzel/?print=true#>
- [23] FERONATHYSSEN. *Leták produktu* [online]. Bratislava, 2007 [cit. 2014-04-03].
Dostupné z: <http://www.feronathysen.sk/rubriky/k-stiahnutiu/>
- [24] DAIKIN INDUSTRIES. Daikin Fluorochemical Products. *Daikin Fluorochemical Products Product Overview* [online]. 2014 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z:
<http://www.daikin.com/chm/catalog/index.html>

- [25] FLUIDTECHNIK. Membránové ventily. *Ventily CleanStar PFA* [online]. 2006 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: http://www.fluidbohemia.cz/index.php?&desktop_back=clanky&action_back=view&id_back=244&desktop=foto&action=img_detail&id=224&db=clanky
- [26] LPM s.r.o. Polyvinylidenfluorid. In: *Vlastnosti polyvinylidenfluoridu* [online]. 2008 [cit. 2014-04-03]. Dostupné z: <http://www.lpm.cz/cgi-bin/riweta.cgi?nr=1651&lng=1>
- [27] RESINEX. Polymerové typy. *PVDF* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pvdf.html>
- [28] INFOCHROMA. HPLC filtry. *Membrána PVDF* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://infochroma.ch/eng/filter/pvdf.html>
- [29] GARCÍA, José M. et al. High-performance aromatic polyamides. *Progress in Polymer Science*. 2010, roč. 35, č. 5, s. 623–686. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670009000847>
- [30] Odetka a.s. *Specifikace materiálu : Kevlar* [online]. ČR, 2008 [cit. 2014-04-06]. Dostupné z: http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_kevlar.aspx
- [31] DuPont. *Nomex* [online]. 2014 [cit. 2014-04-06]. Dostupné z: <http://www.dupont.co.uk/products-and-services/personal-protective-equipment/thermal-protective-apparel-accessories/brands/nomex.view-all.hlm-usesapplication.html>
- [32] BRUST, Gregory. The macrogalleria. *Polyimides* [online]. 2005 [cit. 2014-04-06]. Dostupné z: <http://pslc.ws/macrog/imide.htm>
- [33] ČVUT PRAHA. Ústav materiálového inženýrství - Fakulta strojní. *Nekovové materiály* [online]. 2012 [cit. 2014-04-06]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/files/5_nekovove-metrialy.pdf
- [34] DuPont. *Kapton HN* [online]. 2011 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: http://www2.dupont.com/Kapton/en_US/assets/downloads/pdf/HN_datasheet.pdf
- [35] COVEME. Electrical Insulation. *Kapton03* [online]. 2012 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.coveme.com/kapton-polyimide-based-film>
- [36] PlasticsEurope. *Polyphenylene sulfide* [online]. 2014 [cit. 2014-04-06]. Dostupné z: <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/types-of-plastics-11148/engineering-plastics/pps.aspx>

- [37] AETNA PLASTICS. *Ryton* [online]. 1996 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.aetnaplastics.com/site_media/media/attachments/aetna_product_aetnaproduct/53/Ryton.pdf
- [38] TICONA. Liquid crystal polymer. *Vectra* [online]. 2001 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://www.hipolymers.com.ar/pdfs/vectra/disen/Vectra%20brochure.pdf>
- [39] SOLVAY PLASTICS. Specialty polymers. *KetaSpire* [online]. 2013 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: http://www.solvayplastics.com/sites/solvayplastics/EN/specialty_polymers/Spire_Ultra_Polymers/Pages/KetaSpire.aspx
- [40] WYPYCH, George. *Handbook of polymers* [online]. Toronto: ChemTec Pub, 2012 [cit. 2014-04-29]. ISBN 978-161-3449-882. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHP000032/viewerType:toc/root_slug:handbook-of-polymers
- [41] ENSINGER. High temperature plastics. *TECAPEEK HT* [online]. 2013 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.ensinger-online.com/modules/public/datapdf/index.php?s1=0&s2=PEK&s3=SN2&s4=0&s5=0&L=0>
- [42] BAYER. Products *Apec* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.plastics.bayer.com/Products/Apec.aspx>
- [43] TBG. Atemschutzmasken. *Vollmaske MSA* [online]. 2009 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: <http://www.thueringer-brandschutz-shop.com/Atemschutz/Atemschutzmasken/Vollmaske-MSA-AUER-3-S-H-EN-136-Klasse-3::2694.html>
- [44] SOLVAY PLASTICS. Specialty polymers. *Udel* [online]. 2013 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: http://www.solvayplastics.com/sites/solvayplastics/EN/Solvay%20Plastics%20Literature/DPG_Udel_Design_Guide_EN.pdf
- [45] SOLVAY PLASTICS. Specialty polymers. *Radel* [online]. 2013 [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: http://www.solvayplastics.com/sites/solvayplastics/EN/Solvay%20Plastics%20Literature/DPG_Radel_Veradel_Acudel_Design_Guide_EN.pdf

- [46] Chem424. *Polyetherimide* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://chem.chem.rochester.edu/~chem424/ultem.htm>
- [47] SABIC. Datasheet. *Ultem 1000* [online]. 2014 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.sabic-ip.com/gepapp/eng/weather/weatherhtml?sltUnit=SI&sltRegionList=1002002000&sltPrd=1002003018&sltGrd=1002011252&sltModule=DATASHEETS&sltType=Online&sltVersion=Internet&sltLDAP=0>
- [48] ZLÍN PRECISION s.r.o. Výrobky. *Kryty světlometů* [online]. 2008 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://www.zlin-precision.cz/cs/vyrobky/>
- [49] BASF. PlasticPortal. *Ultrason E* [online]. 2014 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://iwww.plasticsportal.com/products/datasheet.html?type=iso¶m=Ultrason+E+1010>
- [50] YE OLDE TRANSISTOR. C25k machine. *DIP switch* [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://yeoldetransistor.tumblr.com/post/59681449317/c25kmachine>
- [51] BASF. PlasticPortal. News Releases [online]. 2014 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: http://www.plasticsportalasia.net/wa/plasticsAP~en_GB/portal/show/content/plasticsportal_news/2009/09_1124a
- [52] SOLVAY PLASTICS. Specialty polymers. *Torlon* [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: http://www.solvayplastics.com/sites/solvayplastics/EN/specialty_polymers/Spire_Ultra_Polymers/Pages/Torlon.aspx
- [53] PROFESSIONAL PLASTICS. Datasheet. *Celazole* [online]. 2014 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.professionalplastics.com/CELAZOLE-PBI>
- [54] DUCHARME, Pierre. CBSNEWS. *Braking Parachute* [online]. 2008 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.cbsnews.com/news/shuttle-atlantis-streaks-back-to-earth/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ETFE	Etylen-tetrafluoretylen
LCP	Liquid crystal polymer – polymer s tekutými krystaly
PA	Polyamid
PAI	Polyamidimid
PBI	Polybenzimidazol
PBT	Polybutylentereftalát
PC	Polykarbonát
PC-HT	Polykarbonát – vysokoteplotní
PCTFE	Polychlortrifluoretylen
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyeterimid
PEK	Polyetherketon
PES	Polyetersulfon
PET	Polyethylentereftalát
PFA	Perfluor-alkoxyalkan
PI	Polyimidy
PMMA	Polymethylmetakrylát
PMP	Polymethylpenten
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PPE	Polyfenylether
PPS	Polyfenylsulfid
PPSU	Polyfenylsulfon

PS	Polystyren
PSU	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluoretylen
PVDF	Polyvinylidenfluorid
SAN	Styrenakrylonitril
T_f	Teplota tečení
T_g	Teplota skelného přechodu
T_m	Teplota tání

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Žihací kelímky [6]</i>	12
<i>Obrázek 2: Keramická vyzdívka pece [8]</i>	13
<i>Obrázek 3: Aplikace skla do vysokých teplot [12]</i>	14
<i>Obrázek 4: Uspořádání plastů v závislosti teplotní odolnosti [13]</i>	16
<i>Obrázek 5: Ukázka těsnící PTFE pásky [17]</i>	18
<i>Obrázek 6: Strukturní vzorec ETFE [18]</i>	18
<i>Obrázek 7: Využití ETFE jako izolace kabelu[22]</i>	19
<i>Obrázek 8: Strukturní vzorec PFA [18]</i>	19
<i>Obrázek 9: Ventil z PFA [25]</i>	20
<i>Obrázek 10: Vzorec PCTFE [18]</i>	21
<i>Obrázek 11: Vzorec PVDF [18]</i>	22
<i>Obrázek 12: Filtrační zařízení s membránou PVDF [28]</i>	23
<i>Obrázek 13: Schéma syntézy kevlaru[30]</i>	23
<i>Obrázek 14: Vzorec poly(m-fenyleneisofthalamidu) [18]</i>	24
<i>Obrázek 15: Strukturní vzorec polyimidu [18]</i>	25
<i>Obrázek 16: Izolace z PI pro kabel [35]</i>	26
<i>Obrázek 17: Schéma syntézy PPS [36]</i>	26
<i>Obrázek 18: Vzorec PEEK [18]</i>	28
<i>Obrázek 19: Struktura PEK [18]</i>	29
<i>Obrázek 20: příklad použití PC-HT jako průhledu ochranné masky [43]</i>	31
<i>Obrázek 21: Struktura PSU [18]</i>	31
<i>Obrázek 22: Využití Udelu pro pojistky do automobilu [44]</i>	33
<i>Obrázek 23: Vzorec PPSU [18]</i>	33
<i>Obrázek 24: Výroba PEI [46]</i>	35
<i>Obrázek 25: Reflektory světlometů z pokoveného PEI [48]</i>	36
<i>Obrázek 26: Vzorec PES [18]</i>	37
<i>Obrázek 27: Přepínač DIP [50]</i>	38
<i>Obrázek 28: Kojenecká láhev z PES [51]</i>	38
<i>Obrázek 29: Strukturní vzorec PAI [18]</i>	39
<i>Obrázek 30: Syntéza PBI [18]</i>	40
<i>Obrázek 31: Brzdový padák raketoplánu [54]</i>	41