

# Vliv ozařování na hořlavost vybraných typů polymeru

Bc. Marek Švesták

---

Diplomová práce  
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

**Fakulta technologická**

**Ústav výrobního inženýrství**

**akademický rok: 2011/2012**

# **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

**(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)**

**Jméno a příjmení: Bc. Marek ŠVESTÁK**

**Osobní číslo: T10388**

**Studijní program: N 3909 Procesní inženýrství**

**Studijní obor: Konstrukce technologických zařízení**

**Téma práce: Vliv ozařování na hořlavost vybraných typů polymeru**

**Zásady pro vypracování:**

- 1. Vypracujte literární rešerši na dané téma**
- 2. Provedte výběr vhodných typů polymerních materiálů**
- 3. Provedte zkoušku hořlavosti**
- 4. Vyhodnoťte naměřená data**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- Dle doporučení vedoucího diplomové práce:**
1. Davidson, Stephen: Exploring the Science, Technology and Applications of U.V. and E.B Curing. Londond UK, Sita Technology Limited, 1999. 289p.
  2. Makhlis, F.A.. Radiation Physics and Chemisty of Polymers. Israel, Keter Publishing House Jerusalem Ltd. , 1975. 287p.
  3. Woods, R., Pikaev, A.: Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing. 1. edition. New Jersey; A John Wiley & sons, inc. publ., 1994. 535p.
  4. Singh, A.,Silverman, J.: Radiation Processing of polymers. 1. edition. Munich; Hanser Publishers, 1992. 377p. ISBN 3-446-15784-0.
  5. Vlough, R.L., Shalaby, S.W.:Radiation Effects on Polymers. Washington DC; American Chemical Society. 1991. 633p.
  6. Betz, N.,Le Moel. A.,Pireaux, J.-J.: Ionizing Radiation & Polymers. Belgium; Elsevier. 2005. 634p.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Zdeněk Holík**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce:

**18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012

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



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

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- 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 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu 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 .....

.....

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

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

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

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

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

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

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

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). 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**

Hlavním cílem diplomové práce je porovnání hořlavosti vybraných typů polymerních materiálů modifikovaných radiačním síťováním. Materiály budou ozářeny širokou škálou dávek intenzity záření a následně bude provedena zkouška hořlavosti žhavou smyčkou. Vlastnosti ozářených materiálů budou porovnány s vlastnostmi materiálů neozářených. Dále bude provedena diskuze výsledků a závěrečné vyhodnocení.

Klíčová slova: ionizační záření, radiační síťování, hořlavost, žhavá smyčka

## **ABSTRACT**

The main aim of the thesis is to compare the flammability of selected types of polymeric materials modified by radiation cross-linking. Irradiated materials will be exposed with a wide range of radiation and consequently put through hot fire test loop. Properties of irradiated materials will be compared with those of non-irradiated materials. Further discussion will analyse the final results and evaluation.

Keywords: ionizing radiation, radiation cross-linking, flammability, hot wire

Rád bych poděkoval panu Ing. Zdeňku Holíkovi za odborné vedení, příjemnou spolupráci a cenné rady při tvorbě této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat také panu Ing. Michalu Daňkovi za ozáření zkušebních tělísek.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 POLYMERNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>12</b>
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ.....	12
1.2 VLASTNOSTI POLYMERŮ .....	15
1.2.1 Fázový stav.....	15
1.3 POLYAMIDY.....	17
1.3.1 Výroba, vlastnosti a aplikace polyamidů.....	17
<b>2 MODIFIKACE POLYMERŮ</b> .....	<b>20</b>
2.1.1 Fyzikální modifikace .....	20
2.1.2 Mechano-chemická modifikace .....	20
2.1.3 Chemická modifikace.....	21
2.2 MODIFIKACE POLYMERŮ SÍŤOVÁNÍM.....	21
2.3 VÝSTAVBA SÍTÍ.....	22
<b>3 IONIZAČNÍ ZÁŘENÍ</b> .....	<b>24</b>
3.1 CHARAKTERISTIKA IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ .....	24
3.2 VLIV IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ NA POLYAMIDY .....	24
<b>4 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ</b> .....	<b>26</b>
4.1 PRINCIP RADIAČNÍHO SÍŤOVÁNÍ .....	26
4.2 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ POLYAMIDŮ.....	27
4.3 ZMĚNA VLASTNOSTÍ POLYMERŮ V DŮSLEDKU OZÁŘENÍ .....	28
4.3.1 Zlepšení mechanických vlastností.....	28
4.3.2 Zlepšení tepelných vlastností .....	29
4.3.3 Zlepšení chemických vlastností.....	29
<b>5 HOŘLAVOST POLYMERŮ</b> .....	<b>30</b>
5.1 PROCES HOŘENÍ.....	31
5.2 FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÝ PROCES HOŘENÍ.....	32
5.2.1 Plynná fáze .....	33
5.2.2 Mesofáze .....	33
5.2.3 Fenomenologie hoření polymerů.....	34
5.3 PROCES SPALOVÁNÍ POLYMERŮ.....	35
5.3.1 Vliv teplotního zatížení na polyamidy .....	36
5.4 ZKOUŠKA HOŘLAVOSTI ŽHAVOU SMYČKOU.....	36
5.4.1 Simulace průběhu zkoušky žhavou smyčkou.....	37
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>38</b>
<b>6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>39</b>
<b>7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK</b> .....	<b>40</b>



7.1	ZVOLENÉ MATERIÁLY .....	41
7.1.1	Procesní podmínky při vstřikování jednotlivých materiálů.....	42
7.2	OZAŘOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK .....	43
<b>8</b>	<b>ZKOUŠKA HOŘLAVOSTI ŽHAVOU SMYČKOU.....</b>	<b>45</b>
8.1	POPIS JEDNOTLIVÝCH NOREM .....	45
8.1.1	Zkouška hořlavosti konečných výrobků žhavou smyčkou.....	45
8.1.2	Zkouška hořlavosti materiálů žhavou smyčkou .....	46
8.1.3	Zkouška zapalitelnosti materiálů žhavou smyčkou.....	47
8.2	POPIS ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO ZKOUŠKU ŽHAVOU SMYČKOU .....	48
8.2.1	Žhavá smyčka.....	48
8.2.2	System měření teploty .....	49
8.2.3	Specifikovaná podložka .....	50
8.2.4	Zkušební komora.....	50
8.3	POPIS PRÁCE NA PŘÍSTROJI A ZKUŠEBNÍ POSTUP.....	51
8.3.1	Ověřování hrotu žhavé smyčky .....	51
8.3.2	Ověřování systému měření teploty .....	52
8.3.3	Aklimatizace před zkouškou .....	52
8.3.4	Zkušební postup .....	52
8.3.5	Pozorování a měření.....	53
8.3.6	Vyhodnocení výsledků zkoušky.....	53
8.3.7	Popis práce .....	54
8.4	SAMOTNÁ ZKOUŠKA .....	55
8.5	VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY .....	56
8.6	DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	62
8.6.1	PBT .....	62
8.6.2	PA 6.....	63
8.6.3	PA 6.6.....	65
8.6.4	PA 6.6/6 COPO.....	67
8.6.5	LDPE.....	69
8.6.6	HDPE .....	71
8.6.7	Celková sumarizace.....	73
8.7	NÁVRH IDENTIFIKAČNÍHO PROTOKOLU .....	73
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>78</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>82</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>83</b>

## ÚVOD

Polymerní materiály hrají v dnešní době významnou roli na konstrukčním poli materiálů. Obecně se rozmáhá myšlenka nahrazování kovových a jiných materiálů právě plasty a to z důvodu jejich výhodných vlastností. Polymery jsou tedy čím dál více žádány a s rostoucí poptávkou vzrůstají i nároky na jejich užité vlastnosti. To má za následek také vzrůstající tlak na vývoj v tomto odvětví, který se ubírá dvěma směry. Těmi jsou vývoj nových druhů polymerů, nebo modifikace již známých druhů polymerních materiálů s požadavkem lepších mechanických, fyzikálních a chemických vlastností. V dnešní době převažuje druhá možnost, tedy modifikace již známých materiálů. Mezi jejich hlavní výhody patří nízká měrná hmotnost, výborné zpracovatelské vlastnosti, nízká elektrická vodivost nebo dobrá korozivzdornost, apod. Nevýhodami polymerů mohou být nízká odolnost vůči vysokým teplotám, nízké mechanické vlastnosti, jejich negativní vliv na životní prostředí apod. Stejně jako u ostatních materiálů, platí tedy i zde snaha a o vylepšování požadovaných vlastností eliminací vlastností negativních, tedy zvyšování kvality a zároveň zvyšování konkurenční schopnosti za účelem vyšší rentability.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

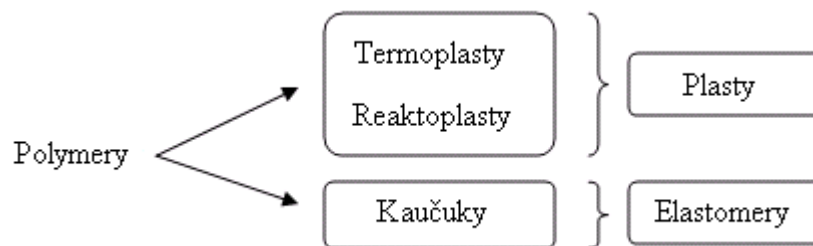
# 1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymery jsou makromolekulární látky, které vznikají spojením molekul nízkomolekulárních látek – monomerů. Tyto makromolekuly vznikají buď z cyklických molekul monomeru, nebo z molekul obsahujících alespoň jednu dvojnou vazbu. Polymery ve svých molekulách obsahují nejčastěji atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku, chloru a jiných prvků.

## 1.1 Základní rozdělení polymerů

Obecně se polymerní látky rozdělují do dvou základních skupin:

- Plasty
- Elastomery



Obr. 1. Rozdělení polymerů

Plast je látka, která se za běžné pokojové teploty vyznačuje vysokou tvrdostí a mnohdy také křehkostí. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvárnými. Plasty tedy dále rozdělujeme:

### a) Dle teplotního chování:

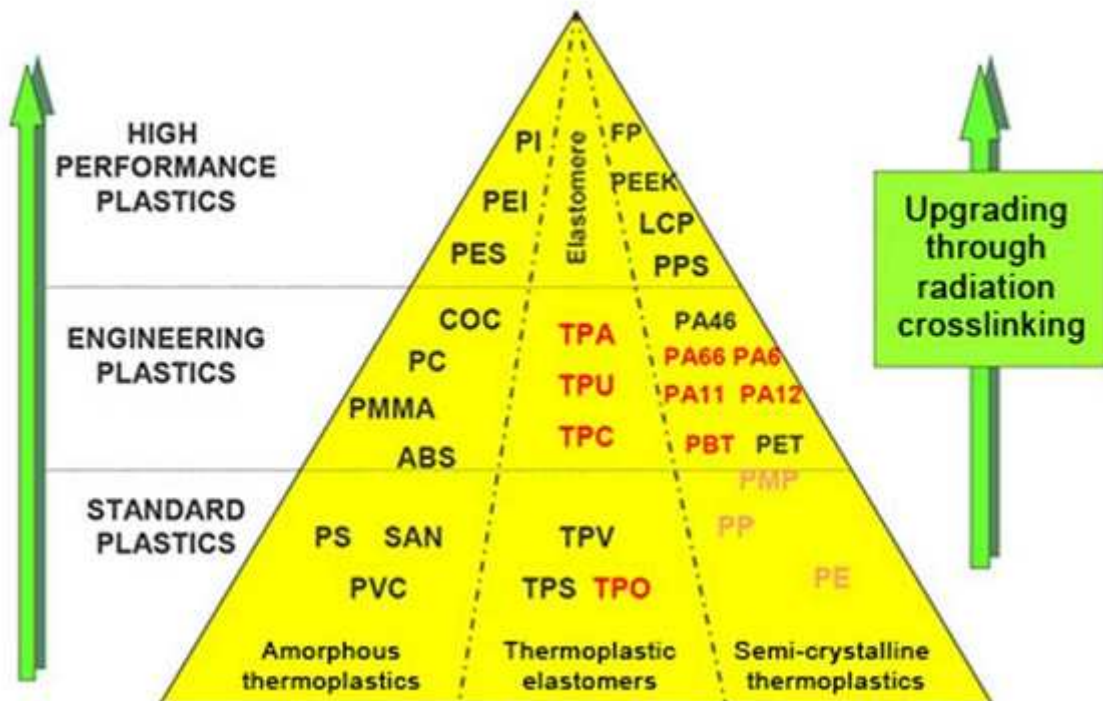
- **Termoplasty** je možné teplem vratně uvést do plastického stavu a poté ochlazením vrátit zpět do stavu tuhého. Jsou také poměrně křehké, houževnaté a dobře rozpustné v rozpouštědlech.
- **Reaktoplasty** nejsou na rozdíl od termoplastů opakovaně tavitelné, a tedy jsou teplem vytvrditelné. Mají také vysokou odolnost proti chemickému působení, jsou nerozpustné a nebotnají.

- Elastomery jsou polymery, které lze za běžných pokojových podmínek značně deformovat a to bez porušení, při čemž deformace je převážně vratná. Při zahřívání měknou, pokud je zahříváme dále, dochází k zesíťování struktury – vulkanizaci.

**b) Dle jejich aplikace:**

- **Standardní** (komoditní) polymery jsou výrobky, které používáme pro běžnou denní potřebu (kelímky, tácky, kelímky atd.) a jejich hlavní zástupci jsou například PP, PVC, PE, PS, atd.
- **Konstrukční** (technické) polymery, u kterých lze předpokládat zvýšené mechanické nebo tepelné zatížení (ozubená kola, součásti automobilů atd.) – PC, PA, SAN, PUR, PMMA, atd.
- **Speciální** (vysoce odolné) polymery, které slouží pro speciální účely ( nátěrové hmoty, oleje, vlákna, atd., do této skupiny spadají PPS, PAR, LCP, atd.

Na obr. 2, je znázorněno rozdělení polymerů dle jejich aplikace. Je nutné podotknout, že čím výše se polymer v pyramidě nachází, tím také stoupá jeho tržní cena.



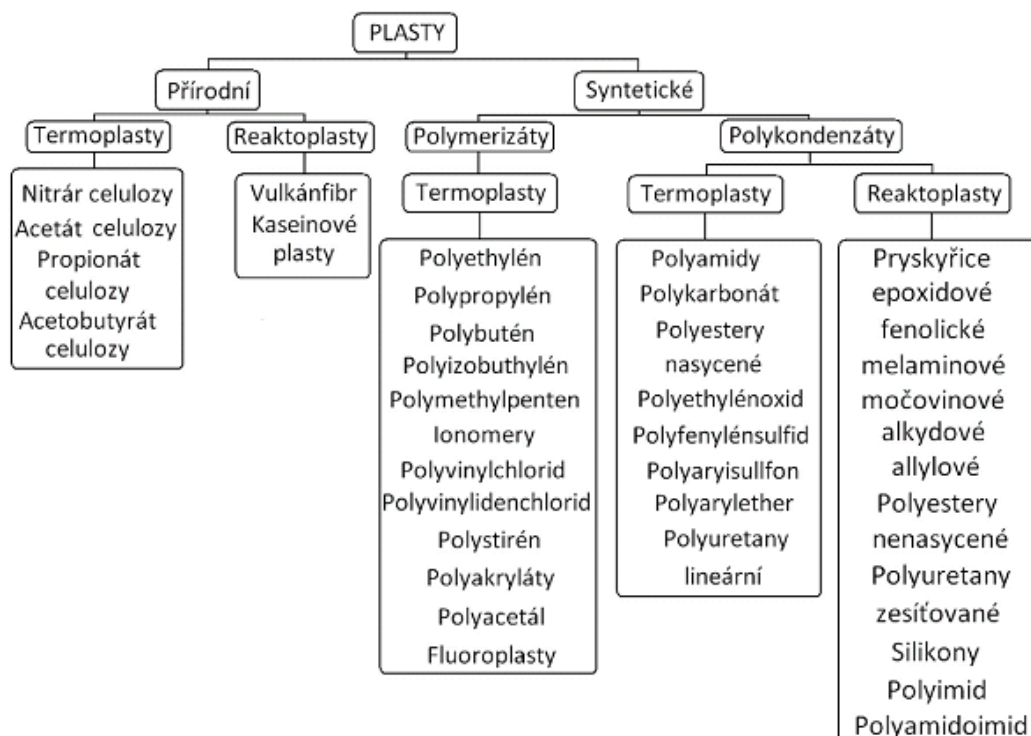
Obr. 2. Rozdělení polymerů dle aplikace [6]

## c) Dle strukturního uspořádání:

- **Amorfní** polymery – jejich makromolekulární řetězce mají zcela náhodnou orientaci a jejich specifické vlastnosti jsou: tvrdost, křehkost, průhlednost, vysoký modul pružnosti i vysoká pevnost a použitelnost pouze do teploty  $T_g$ .
- **Krystalické** (semikrystalické) polymery – vykazují určité procento uspořádanosti makromolekulárních řetězců, které může dosahovat až 90 %. Jejich specifickými vlastnostmi jsou: velká houževnatost, se stupněm krystalinity roste pevnost i houževnatost, neprůhlednost – mléčné zakalení (vyšší index lomu světla), procento uspořádanosti řetězců 40 – 90 %, použitelnost do teploty  $T_m$ .

## d) Dle původu:

- **Přírodní** polymery, které jsou často označovány jako biopolymery a jsou založeny na přírodních makromolekulárních látkách na bázi latexu, celulózy, kaseinu apod.
- **Syntetické** polymery, které jsou vyrobeny chemicky (polymerace, polykondenzace, polyadice).



Obr. 3. Rozdělení plastů dle původu [7], [11]

### e) Dle druhu přísad:

- **Neplněné** plasty – neplněné plasty jsou takové, u kterých množství přísad neovlivňuje vlastnosti polymerní matrice.
- **Plněné** plasty – plnivo má přímý vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti plastu.

## 1.2 Vlastnosti polymerů

Základní charakteristikou popisující vlastnosti a strukturu polymeru je makromolekulární řetězec. Tyto řetězce se skládají z makromolekul a vznikají pospojováním molekul nízkomolekulárních látek – monomerů – chemickými vazbami. Mohou být lineární, rozvětvené, plošně síťované nebo prostorově síťované.



Obr. 4. Makromolekulární řetězce – a) lineární, b) rozvětvený, c) plošně a d) prostorově síťovaný [7]

Makromolekulární řetězce nejsou tuhými útvary, ale následkem neustálého pohybu svých jednotlivých samostatně se projevujících úseků neboli segmentů nabývají různých geometrických uspořádání neboli různé konformace. Vlastnosti polymerů závisí na jejich fázovém stavu, molekulové hmotnosti a chemickém složení. [13]

### 1.2.1 Fázový stav

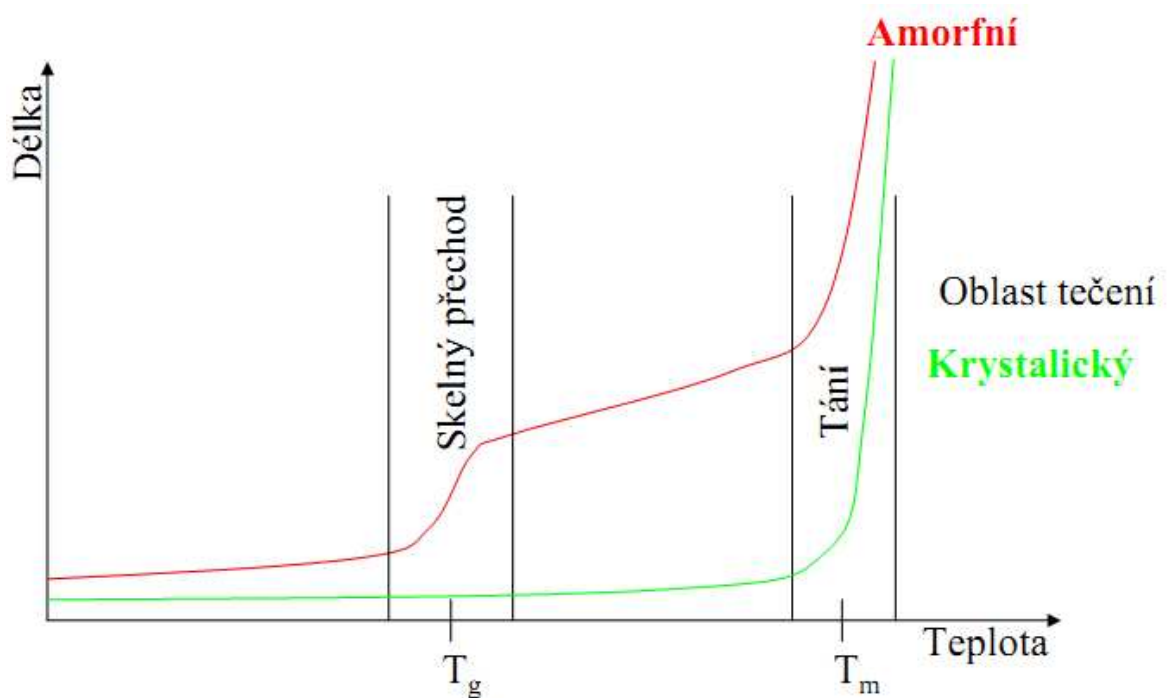
Polymerní látky se obecně vyskytují ve dvou fázích skupenství: kapalném nebo tuhém. Plynný stav u polymerů nenastává, neboť jejich bod varu je velmi vysoký a nachází se až za teplotou jejich rozkladu. Dle pravidelnosti geometrického uspořádání polymerních řetězců v tuhé fázi rozlišujeme vysoce uspořádaný stav krystalický a stav v podstatě neuspořádaný stav – amorfní. Amorfní polymery se mohou dále vyskytovat i v těchto dalších fázích: sklovitá, kaučukovitá a plastická.

- Sklovitý stav je charakteristický malou uspořádaností polymerních řetězců a je tedy podobný stavu kapalnému, ale schopnost řetězců se pohybovat je potlačena.

- Kaučukovitý stav je přechodovou fází mezi stavem sklovitým a kapalným. Polymer lze v tomto stavu poměrně malou silou do neobvyklé míry deformovat, při čemž deformace je poměrně vratná.
- Plasticky se materiál chová, pokud je při zatížení danou silou jeho deformace stálá a převážně nevratná.

Uspořádání makromolekulárních řetězců však není z daleka jediný rozdíl mezi amorfními a krystalickými materiály. Tyto jednotlivé druhy materiálů mají také tyto specifické vlastnosti:

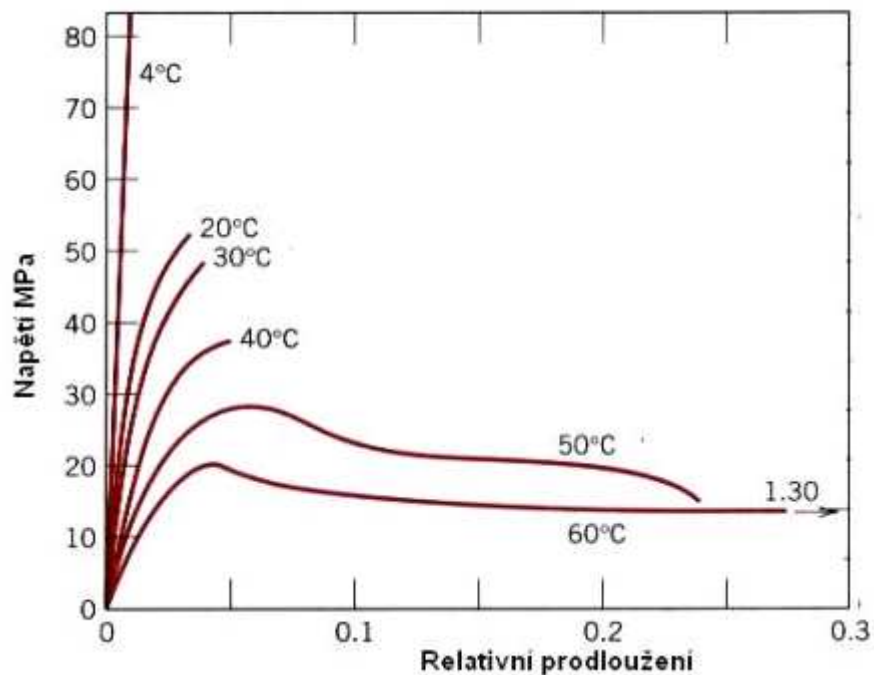
Na obrázku č. 5 jsou znázorněny oba druhy materiálu a jejich chování v závislosti na teplotě při daném zatížení.



Obr. 5. Průběh deformace amorfniho a krystalickyho polymeru v závislosti na teplotě

Mechanické vlastnosti polymerů jsou velmi rozdílné a silně závislé na teplotě, jak je znázorněno na obr. 6.

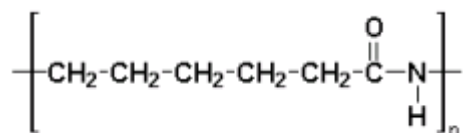




Obr. 6. Obecný graf teplotní závislosti mechanických vlastností polymerů

### 1.3 Polyamidy

Polyamidy jsou makromolekulární látky obsahující v řetězci amidové skupiny skupinu  $-\text{CONH}-$  a řadí se mezi semikrystalické termoplasty s krystalickým podílem 20 až 40 %.



Obr. 7. Chemická značka polyamidu

#### 1.3.1 Výroba, vlastnosti a aplikace polyamidů

Polyamidy jsou typické semikrystalické plasty, v přírodním stavu jsou mléčné a houževnaté, s dobrými kluznými vlastnostmi a odolné opotřebení. Na rozdíl od jiných termoplastických hmot mají velmi ostrý bod tání. [14]

Obecně lze polyamidy rozdělit do dvou skupin:

- Alifatické polyamidy – výroba polykondenzací nebo polymerací
  - polyamid 6 = Silon,

- polyamid 66 = Nylon,
  - polyamid 610,
  - polyamid 11,
  - polyamid 12.
- Aromatické polyamidy – výroba polymerací v roztoku nebo na rozhraní fází
    - poly (m – fenyleneisofthalamid) = Nonex,
    - poly (p – fenylentereftalamid) = Kewlar.

Polyamidy typů 6; 6,6; 6,10; 6,12; 11 a 12 jsou v tuhém stavu částečně krystalické. Střední velikost krystalů leží pod úrovní vlnové délky krystalitů, což ovlivňuje vzhled výrobku v tlustší vrstvě. Stupeň krystalizace ovlivňuje většinu užitkových vlastností výrobku včetně rozměrové stability.

Včetně užitkových vlastností ovlivňuje poměrně výrazně v negativním smyslu rozměrovou stabilitu u polyamidů navlhavost, která se u jednotlivých druhů PA značně liší. Mezi méně navlhavé druhy řadíme PA11 či PA12 a naopak mezi levnější více navlhavé polymery spadá PA6 a PA66.

Většina aplikací polyamidů vyžaduje vysokou tvrdost, tuhost, odolnost proti opotřebení i stárnutí, což jsou vlastnosti podmíněné vysokým stupněm krystalinity. V některých případech se vyznačuje větší pružností, rázová houževnatost a vysoký mechanický útlum. [14]

Polyamidy se vyznačují malým koeficientem tření, výbornou odolností proti oděru a nerozpouštějí se v běžných rozpouštědlech.

Polyamidy jsou díky svým užitným vlastnostem použitelné v mnoha odvětví výroby a hospodářství. Lze je použít jako:

- konstrukční materiál na ložiska, ozubená kola a ovládací elementy, vlákna, fólie, štětiny, žíně, antikorozi povlaky na kovy, tenisové rakety, kajaky, plachtovina, výztuhy do člunů, kol a letadel, atd.

Vysoké uplatnění našli také v textilním průmyslu, kde se používají polyamidová vlákna. Jsou to syntetická vlákna s vysokou odolností vůči trhání a odření, snadno tvarovatelné, známé pod obchodními názvy Nylon a Perlon. Jde o materiály velmi trvanlivé a snadno vypratelné. Díky jejich relativně nízkému bodu tání nejsou příliš odolné vůči vysokým tep-

lotám. Používají se například na výrobu jemných punčoch, dámského spodního prádla, korsetů, vestiček a plavek. Své využití našla také látka zvaná Kewlar, která se používá pro výrobu neprůstřelných vest.

## 2 MODIFIKACE POLYMERŮ

Modifikace polymerů je velmi široký pojem, který zahrnuje velký počet způsobů fyzikálních a chemických přeměn polymerů. Jedná se o záměrnou přeměnu polymerů prováděnou za účelem získání nového polymerního materiálu s odlišnými vlastnostmi. K získání modifikovaných polymerů se používá těchto základních způsobů:

- fyzikální modifikace mechanickým smíšením dvou nebo více polymerů,
- mechanochemické modifikace, při níž mechanickou cestou, např. intenzivním hnětením, za podmínek a přítomnosti látek usnadňujících destrukci, vzniknou reaktivní úseky polymerních řetězců, které se buď navzájem propojí, nebo zreagují s přítomným monomermem schopným polymerace,
- chemické modifikace na základě chemických reakcí účinných látek s reaktivními skupinami polymerních řetězců. [13], [7]

### 2.1.1 Fyzikální modifikace

Tento nejjednodušší způsob nabývá stále širšího uplatnění. Mechanickým smíšením dvou nebo více polymerů se mnohdy získají směsi s vynikajícími mechanickými vlastnostmi.

### 2.1.2 Mechano-chemická modifikace

K mechanochemické modifikaci polymerů dochází reakcí aktivních částic, které vznikají při mechanické destrukci makromolekulárních řetězců. Používá se při ní v podstatě dvou základních metod:

- mechanické degradace směsi polymerů
- mechanické degradace polymeru v přítomnosti monomeru. [13]

V prvním případě vznikají modifikované polymery kombinací makroradikálů, eventuálně reakcí makroradikálů s mechanicky aktivovanými polymerními řetězci. Ve druhém případě vznikající makroradikály iniciují polymeraci přítomného monomeru. V obou případech probíhá současně řada reakcí, které vedou mimo jiné ke vzniku roubovaných nebo blokových kopolymerů, lišících se strukturou a délkou bloků. Výsledný produkt není ze strukturního hlediska ani zdaleka jednotný a jednoznačně definovatelný. Obvykle je

pro tento druh kopolymeru, obsahujícího různé zastoupení uvedených struktur kopolymeru, obsahujícího různé zastoupení uvedených struktur spolu s homopolymery, používán název interpolymery. [13]

K mechanochemické modifikaci polymerů patří tzv. plastikace kaučuků, což je hnětení na dvouválcích, hnětacích strojích za přítomnosti tzv. plastikačních činidel a při zvýšené teplotě, nebo ve speciálních vytlačovacích strojích. Touto operací se příliš velké kaučukové makromolekuly štěpí na poněkud menší tím, že makroradikály vzniklé intenzivním hnětením se zakončí vzdušným kyslíkem nebo radikály vzniklými z plastikačních činidel. Tím klesne střední molekulová hmotnost kaučuku, čímž se uvede do snáze zpracovatelného stavu. [13]

### 2.1.3 Chemická modifikace

Chemickou modifikací polymerů rozumíme úmyslnou přeměnu chemické struktury působením účinných chemických látek nebo reakčních podmínek. Z hlediska délky makromolekulárních řetězců (střední molekulové hmotnosti) lze chemické reakce polymerů rozdělit na:

- reakce probíhající prakticky za zachování střední molekulové hmotnosti polymeru, které nazýváme polymer-analogické přeměny,
- reakce vedoucí ke změnám střední molekulové hmotnosti polymeru, ke kterým patří reakce probíhající při mechanochemické modifikaci a reakce probíhající při síťování polymerů. [13], [7]

## 2.2 Modifikace polymerů síťováním

Pod pojmem síťování polymerů rozumíme vzájemné spojování polymerních řetězců za vzniku prostorové sítě. U plastů je síťování chemický proces, kdy se mezi molekulami vytvářejí chemické vazby. Vzhledem k velké délce makromolekulárních řetězců stačí přidavek malého množství síťovacího činidla, aby molekulová hmotnost vzrostla nekonečně. Makromolekula polymeru nabývá rozměrů příslušného výrobku. Proces síťování může u některých typů polymerů nastat vlivem ionizačního záření, kdy nejsou již zapotřebí žádné další přísady. Další výhodou je, že proces probíhá až po zpracovatelském procesu.

Zesíťováním ztrácejí polymery rozpustnost (v rozpouštědlech pouze botnají, tj. zvětšují svůj objem), tavitelnost a termoplasticitu a naopak získávají tvarovou stálost za vysokých teplot a někdy i vyšší odolnost vůči chemikáliím. Čím hustěji je polymer zesíťován, tím obtížněji do něj vnikají nízkomolekulární látky a tím více klesá jeho botnavost a navlhavost. [13], [7]

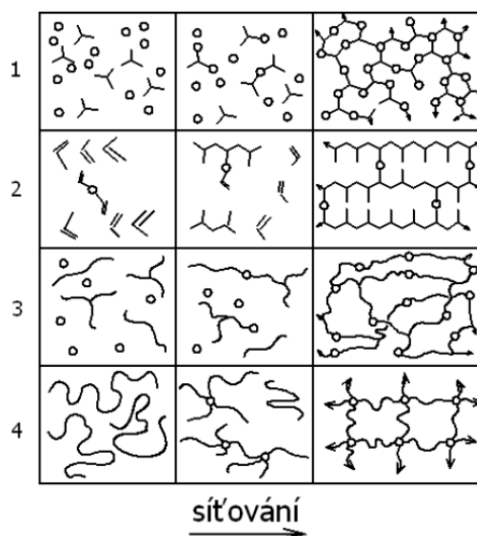
Ke vzniku prostorové sítě polymeru může dojít různými způsoby, zejména:

- polykondenzací nebo polyadící tří a vícefunkčních monomerů,
- kopolymerací monomerů, z nichž alespoň jeden má vyšší funkčnost než 2,
- zabudováním příčných vazeb mezi lineární nebo rozvětvené makromolekulární řetězce,
- vzájemnou reakcí makromolekulárních řetězců s vhodnými reaktivními skupinami.

Nejtypičtějším příkladem síťovací reakce je vulkanizace kaučuků, která taky představuje historicky nejstarší chemickou modifikaci polymerů. [13], [7]

### 2.3 Výstavba sítí

Chemickým spojováním dvoufunkčních jednotek vznikají lineární polymery. Je-li některá ze složek více jak dvoufunkční, dochází v průběhu reakce k větvení a později i ke vzniku nekonečné trojrozměrné struktury, prostorové sítě, gelu.



Obr. 8. Schéma vzniku sítě [12]

1. Polykondenzace nebo polyadice nízkomolekulárních látek. Vznik epoxidových či fenolových pryskyřic, dokončení jejich sítě ve vytvrzovacím kroku.
2. Síťující kopolymerace typu styrendivinybenzen. Výroba hmot použitelných pro měniče iontů či hydrofilní gely využívané v lékařství.
3. Spojování relativně konečných předpolymerů, zpravidla předpolymerační reakcí. Využití při výrobě kaučukovitých nebo tvrdých polyuretanů.
4. Zavedením příčných vazeb do vysokomolekulárních polymerů ( $M$  řádu  $10^5 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ). Vulkanizací kaučuků vzniká pryž, ozářením zesíťovaný polyetylen apod.

Při procesu síťování probíhají tyto děje:

- v první fázi vzrůstají rozměry molekul i polydisperzita systému
- při určitém stupni reakce dospěje systém do bodu gelace, ve kterém molární hmotnost vzroste nade všechny meze a v systému se objeví první stopy nekonečné struktury, gelu
- po překročení bodu gelace se systém skládá ze dvou částí – z nekonečné struktury, gelu, a molekul konečné velikosti, solu. Ten lze od gelu oddělit extrakcí. Gel je nerozpustný, v rozpouštědle pouze botná.
- v dalším průběhu reakce obsah solu klesá a jeho molární hmotnost i polydisperzita se zmenšují
- v gelu vznikají tzv. elasticky aktivní řetězce sítě, ty při deformaci nesou napětí a určují velikost modulu pružnosti gelu a jeho rovnovážný stupeň nabotnění. [12]

Nejpoužívanější druhy síťování:

- síťování kyslíkem,
- síťování pomocí peroxidů,
- síťování elastomerů na bázi 1,3 – dienu sírou,
- radiační síťování.

### 3 IONIZAČNÍ ZÁŘENÍ

Již od počátků užívání polymerů v obecné praxi, byly tyto materiály podrobovány podrobnému výzkumu a zkouškám, které měli za cíl zjistit, jak se dané materiály chovají při daném zatížení určitého druhu a jak tyto podmínky snášejí. Avšak výzkum degradace a odolnosti makromolekulárních látek při působení ozáření o vysoké energii nabral na intenzitě až koncem první poloviny dvacátého století v souvislosti s nezadržitelným rozvojem atomové energie.

Obecně rozeznáváme tři základní druhy záření – alfa, beta a gama.

#### 3.1 Charakteristika ionizujícího záření

Pod pojmem záření (radiace) obecně rozumíme procesy, při nichž dochází k přenosu energie prostorem “na dálku“, prostřednictvím fyzikálních polí nebo mikročástic. Kromě energie dochází při záření i k přenosu hmoty a informace.[12]

Ionizujícím zářením nazýváme takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat. Záření se může šířit ve vakuu, volné šíření vln a volný pohyb částic podle zákona setrvačnosti; nebo v látkovém prostředí, kde částice může projít původním směrem, avšak větší či menší část záření bývá rozptýlena či absorbována. [12]

Obecně rozeznáváme tři základní druhy ionizačního záření:

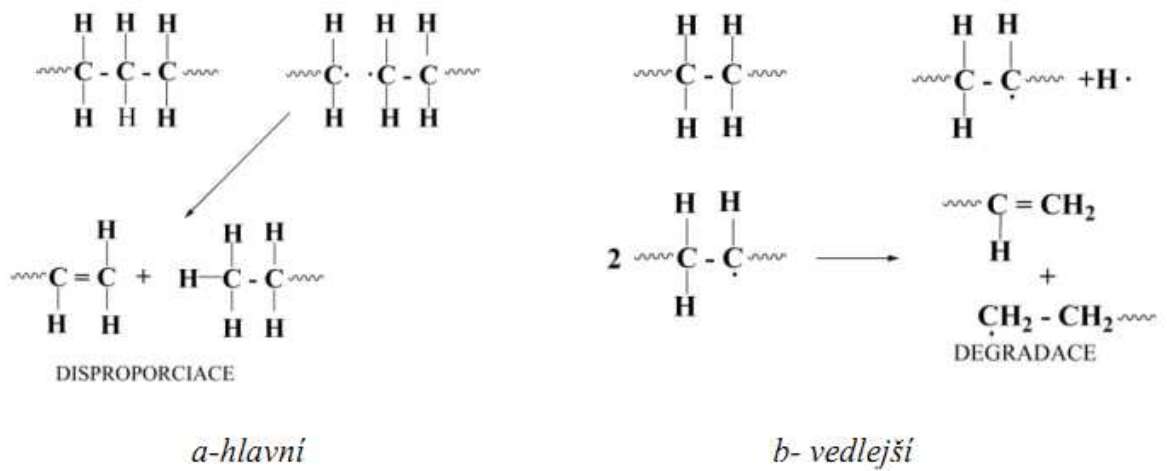
- alfa záření,
- beta záření,
- gama záření.

#### 3.2 Vliv ionizujícího záření na polyamidy

U některých druhů polyamidu bylo zjištěno, že s rostoucí dávkou záření dochází ke snižování krystalinity. Toto snižování krystalinity je způsobeno růstem hustoty síťových vazeb. Růst síťové hustoty není vždy úměrný dávce záření, neboť současně se síťováním dochází i k degradaci, zejména při ozařování polyamidu v přítomnosti kyslíku. Při působení ionizačního záření se z polyamidu odštěpují plynné produkty. S rostoucí dávkou záření



se u polyamidů zvyšuje modul pružnosti a klesá tažnost i rázová houževnatost. Pevnost v tahu se nejprve zvyšuje a při větších dávkách opět klesá.



Obr. 9. Hlavní a vedlejší štěpení-degradace polymeru [14]

## 4 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ

Radiační síťování je poměrně nová rozvíjející se technologie zlepšování mechanických, chemických a teplotních vlastností plastů za použití beta nebo gama záření. To umožňuje v některých případech použití levnějších masových nebo konstrukčních plastů, které tímto zesíťováním dosahují vlastností drahých konstrukčních a speciálních termoplastů. [11]

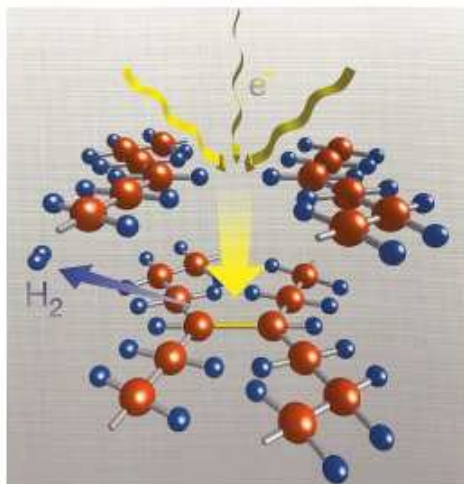
### 4.1 Princip radiačního síťování

Zesíťování je dosaženo bombardováním molekul proudem vysoce energetických elektronů nebo paprsky gama. Tato energie je absorbována materiálem, dochází ke vzniku radikálů (rozpad vazeb C-H), které postupně vzájemně reagují a vytvářejí požadované spojení. Síť tak vzniká postupným spojením dvou volných radikálů mezi sousedními řetězci za vzniku vazby C-C. [11]

Radiační síťování má pozitivní efekt v oblastech, kde je potřeba výdrže materiálu na dlouhodobě vysokých provozních teplotách, zlepšují se creepové vlastnosti, odolnost proti otěru a tvarová paměť. Tímto ozářením termoplastů mohou vznikat materiály, které mají za určitých teplotních podmínek vlastnosti eleastomerů. Nejdůležitějšími vlastnostmi síťovaného systému je tažnost a pružnost. Proces ozařování probíhá až po zpracovatelském procesu (vstřikování, vytlačování,...) bez dodatečného namáhání výrobku, při pokojové teplotě, obvykle bez potřeby dalších přísad. U některých receptur se však používají pomocná síťovací činidla. U komerčních směsí pro radiační síťování jsou v současné době používány síťovací činidla zvláště ke zlepšení výsledných vlastností materiálu, k redukci dávek záření, ke snížení hořlavosti, apod. Parametry ozařování lze regulovat dle požadavku zákazníka a docílit tak pomocí stínících prvků ozářením například jen části materiálu. Použitím záření o energii menší než 10 MeV nepřichází v úvahu nebezpečí vzniku radioaktivity v ozařovacím zařízení ani v ozařovaném produktu. Hlavním předpokladem pro ozářením materiálu je přítomnost tří a více-funkčních monomerů. [11]

Využití radiačního síťování nalézáme především pro izolace kabelů, trubkové profily a hadice, systémy podlahových topení, tvarované a vstřikované díly, kompozity, polymerní granuláty, kde cíleně měníme reologické vlastnosti. Z celkového množství použití radiač-

ního ozařování připadá 90% na síťování a zbylých 10% na sterilizaci produktů v medicíně a potravinářství. [11]



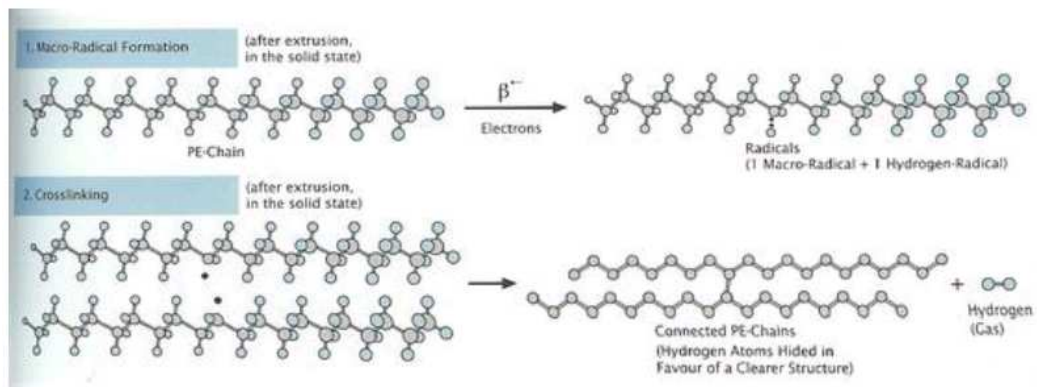
Obr. 10. Schéma radičního síťování [11]

## 4.2 Radiční síťování polyamidů

Polyamidy podléhají působení ionizujícího záření síťování. U polyamidu 66 bylo zjištěno, že s rostoucí dávkou záření dochází ke snižování krystalinity. Toto snižování krystalinity je způsobeno růstem hustoty síťových vazeb. Růst síťové hustoty není vždy úměrný dávce záření, neboť současně se síťováním dochází i k degradaci, zejména při ozařování polyamidu v přítomnosti kyslíku. Při působení ionizačního záření se z polyamidu odštěpují plynné produkty.

Všechny typy polyamidů jsou radičně zesíťovatelné. Největší zastoupení, co se týče síťování je u polyamidu PA 6, PA 6.6, PA11 a PA 12. Vlákna vyztužená polyamidy a polyamidy obsahující retardéry hoření lze rovněž radičně síťovat. Pokud jsou do polyamidů přidávána aditiva, mohou být přidávána buď přímo před samotným procesem, nebo jsou do materiálu přidávána výrobcem. S rostoucí dávkou záření se u polyamidů zvyšuje modul pružnosti, klesá tažnost a rázová houževnatost. Pevnost v tahu se nejprve zvyšuje a při větších dávkách opět klesá.

Po zesíťování může předchozí termoplastický produkt odolávat podstatně vyšším teplotám. Deformační odolnost po teplotním namáhání rovněž významně narůstá. Radičně ozařené polyamidy tak mohou nahradit termosety a vysoce výkonné plasty, jako jsou PPS, PES, LCP a jiné, v mnoha rozdílných aplikacích. [12]

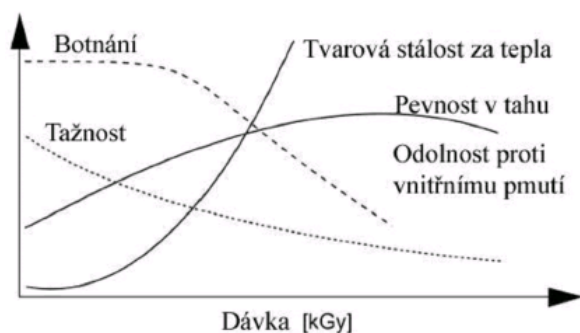


Obr. 11. Síťování PE elektronovým zářením

Na rozdíl od síťování, štěpení (degradace), má za následek zmenšení molekulární hmotnosti a polymerní řetězce jsou zde roztrženy zářením. Způsobující záření může být i relativně malé. Ačkoliv degradace není vždy nežádoucí: například u PTFE (teflon) je tento efekt žádoucí.[14]

### 4.3 Změna vlastností polymerů v důsledku ozáření

V důsledku ozařování dochází nejčastěji ke změnám mechanických, teplotních a chemických vlastností materiálu. Ozařování polymerů tedy výrazně zvyšuje oblast využití polymerních materiálů v konstrukční praxi.



Obr. 12. Obecný graf vlastností polymerů v závislosti na dávce ozáření [7]

#### 4.3.1 Zlepšení mechanických vlastností

Radiační síťování mění následující mechanické vlastnosti plastů:

- nárůst modulu,
- zvýšení pevnosti (zejména z dlouhodobého hlediska),
- pokles poměrného prodloužení při přetržení (tažnosti),

- redukce studeného tečení – (creepu),
- nárůst tvrdosti (Shore),
- zlepšení meze únavy (při střídavém ohybu),
- zlepšení povrchové pevnosti vůči otiskům a nespojitosti vstříkovaných dílů,
- zlepšení odolnosti proti vnitřnímu pnutí a redukce přenosu a růstu,
- zlepšení zotavení materiálu „memory effect“,
- zlepšení oteřuvzdornosti (podmíněně),
- zlepšení chování při dlouhodobém zatížení vnitřním tlakem. [11]

#### 4.3.2 Zlepšení tepelných vlastností

- zlepšení tvarové stálosti za tepla,
- cílenému nastavení teplotní roztažnosti,
- zlepšení trvalé deformace při zatížení tlakem (tahem),
- zvýšení tepelné odolnosti
- zvýšení odolnosti proti působení žhavou smyčkou
- vyšší odolnost proti stárnutí [11]

#### 4.3.3 Zlepšení chemických vlastností

- výrazné zvýšení odolnosti proti působení chemických látek
- snížení rozpustnosti
- zlepšení odolnosti proti botnání
- zvýšení odolnosti proti vzniku trhlin způsobených pnutím
- zlepšení odolnosti vůči hydrolýze
- zvýšení olejuvzdornosti

## 5 HOŘLAVOST POLYMERŮ

Většina plastů jsou na uhlíku založené materiály, které mají schopnost hořet a uvolňovat plyny a kouře při vystavení ohni. Plasty jsou vynikající paliva, ale jsou obecně považovány za obyčejné hořlaviny a spadají do stejné kategorie jako dřevo, kůže a mnoho dalších běžných materiálů. Všechny tyto materiály se budou rozkládat při velmi vysokých teplotách do nestálých, plynných zplodin. [7]

Zvýšení teploty se může u polymerů projevit dvojitým způsobem:

- polymer měkne, popř. se po přijetí tepelné energie zvýší kinetická energie makromolekulárního řetězce do takové míry, že překoná přitažlivé síly a polymer se začne chovat jako kapalina,
- dochází ke změně struktury polymeru. Některé makromolekulární látky se štěpí na nízkomolekulární produkty, eventuálně až na monomery, aniž se změní jejich chemické složení – depolymerují. Jiné odštěpují nízkomolekulární zplodiny, přičemž dochází ke změně chemického složení – destrukují. Destrukce se může projevit, zejména v závěrečné fázi procesu, vznikem příčných vazeb mezi řetězci – takové polymery sítují

Ve všech případech mluvíme o degradaci polymeru.

Schopnost materiálů zapálit se při zahřívání za zvýšených teplot. Je vyjádřena teplotou vzplanutí a teplotou vznícení.

Teplota vzplanutí – nejnižší teplota vzduchu proudícího kolem vzorku, při které dojde působením vnějšího zápalného zdroje k zapálení směsi plynných produktů rozkladu.[9]

Teplota vznícení – nejnižší teplota vzduchu proudícího kolem vzorku, při které dojde k samovolnému zapálení vzorku nebo produktů rozkladu bez přítomnosti vnějšího zápalného zdroje. [9]

Teplota hoření – nejnižší teplota, při které se látka zapálí a dále hoří po stanovenou dobu po přiložení malého plamene k jeho povrchu za normalizovaných zkušebních podmínek. [9]

## 5.1 Proces hoření

Oheň je fyzikální a chemický fenomén, který je od přírody silně interaktivní. Interakce mezi plamenem, palivem a okolím může být silně nelineární a kvantitativní odhad účastnících se procesů je často velmi složitý. Proces hoření a zúčastněné procesy uzavřeného ohně zahrnují hlavní toky hmoty a tepelné toky do a od paliva a okolí. [7]

Zkratka	Stupeň hořlavosti <sup>(1)</sup>
	1 až 4
ABS	2
Celulosa	4
PA	2
PC	1 až 2
PE	2 až 3
PET	3
PMMA	3
POM	3
PP	3
PS	3
PUR	2
PVC	1 až 2
SAN	2 až 3

*Obr. 13. Stupeň hořlavosti vybraných polymerů [9]*

0 – nehořlavé

1 – samozhášivé

2 – velmi pomalu hořlavé

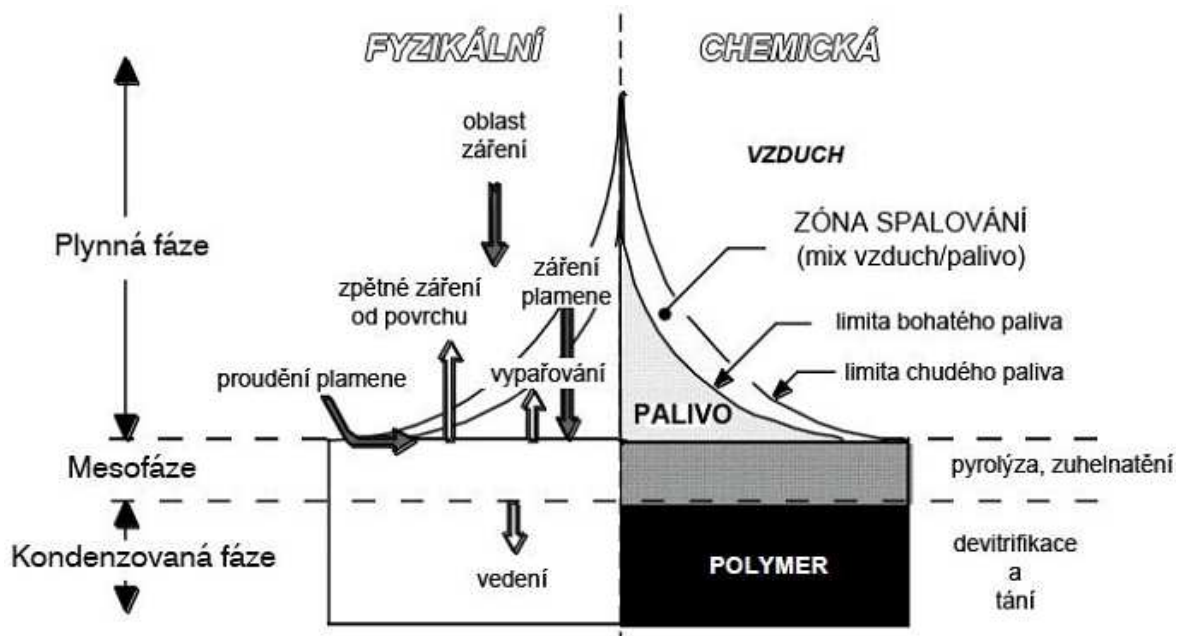
3 – pomalu hořlavé

4 – rychle hořlavé

## 5.2 Fyzikální a chemický proces hoření

Plyny a těkavé kapaliny jsou malé molekuly, které jsou drženy pohromadě slabými ( $<1$  kJ/kg) až středními chemickými vazbami. Tyto těkavé sloučeniny spontánně tvoří hořlavé směsi, které se se vzduchem vznítí a snadno hoří vysokou rychlostí. Polymery jsou velmi velké (makro) molekuly se stejným intermolekulární (mezimolekulární) a intramolekulární (uvnitř molekuly) silami jako nízkomolekulární látky. Avšak jejich teplota varu je v podstatě nekonečná, protože je to zapříčiněno jejich vysokou molekulovou hmotností. [7]

V důsledku toho musí obě mezimolekulární a intramolekulární (páteřní) chemické vazby polymerů rozdělit k vytvoření nestálého „druhu paliva“. Tento proces vyžaduje velké (cca 2 MJ/kg) a nepřetržité dodávky tepelné energie pro vzplanutí a trvalé hoření. [7]



Obr. 14. Fyzikální a chemický proces při hoření polymerů [7]

Proces hoření může být ostře rozdělen do fyzikálních a chemických procesů probíhajících v každé ze tří fází: plynná, mesofáze a kondenzovaná (kapalná/pevná) fáze. Mesofáze je rozhraní mezi plynem a kondenzovanou fází, během hoření. Obr. 10. ukazuje schéma horizontální desky z polymeru, která je spalována s difúzním plamenem. Fyzikální procesy jsou zobrazeny na levé straně obrázku, které zahrnují pro přepravu energie sáláním a prouděním mezi plynnou fází (plamen) a mesofází a energetické ztráty z mesofáze o přenos hmoty (odpařování z pyrolýzy plynů), a vedením do pevné. Na typické rychlosti hoření polymerů, povrch (mesofáze) ustupuje v rychlosti asi  $10^{-6}$  m/s. Zachování hybnosti na hra-



nici mesofáze - plynná fáze ukazuje, že topné plyny se vyvíjejí na relativně nízké rychlostí (cca  $10^{-3}$  m/s) ve srovnání s rychlostí hoření těchto plynů ve směsi se vzduchem (cca 1 m/s). [7]

### 5.2.1 Plynná fáze

Kondenzovaná fáze (pevná a tekutá) hořlavých látek bude hořet pouze v případě, že lze vytvářet nestálé směsi paliva a vzduchu, a proto se jevy, které vedou k zapalování a uvolňování tepla týkají a probíhají v plynné fázi. Tento proces obnáší stovky nebo tisíce chemických reakcí probíhající v plameni, které přeměňují kyslík a palivo na stabilní spalinu. Kinetické modelování a experimentální údaje ukázaly, že rychlost hoření je nejvíce citlivá na reakce zahrnující aktivní radikály paliva (R), hydroxyly (OH), vodíku (H) a kyslíku (O), halogenu nebo fosforu (X). Jsou to tyto chemické reakce:

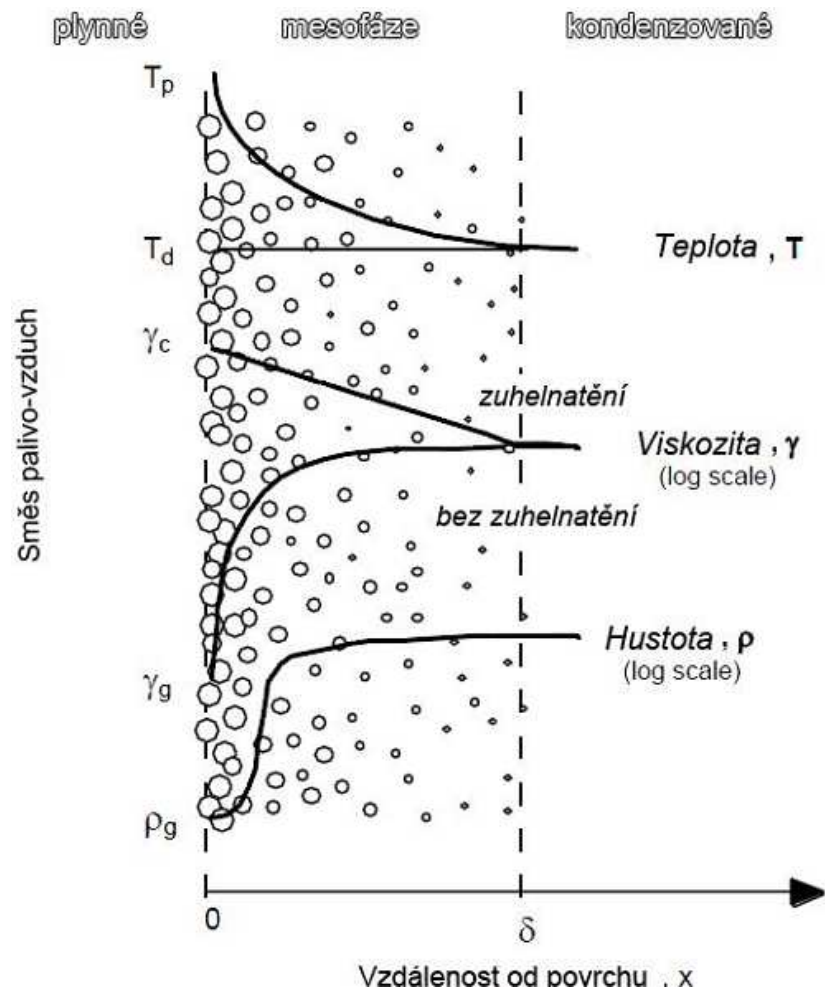
- Iniclace
- Inhibice
- Větvení
- Propagace
- Terminace

### 5.2.2 Mesofáze

Mesofáze je rozhraní mezi plynem a kondenzovanou fází při procesu hoření. Všechny tepelné a chemické degradace, které vedou k nestálosti paliva, se vyskytují v mesofázi (také známé jako zóna pyrolýzy).

Rozložení teploty na povrchu při hoření je především důsledkem převládající energetické bilance, ale viskozita, hustota a fyzikální rozměr mesofáze jsou určeny teplotním polem a tepelnou a chemickou degradací. Mesofáze se skládá z tepelného rozkladu produktů v různých fázích, včetně plynné, kapalné, a pevné fáze.

U kondenzované fáze je zásadní rychlost, při které je teplo přepravováno a skladováno v kondenzované fázi. Zásadní význam spočívá v tom, že tyto procesy určují čas vznícení a hoření polymerů.

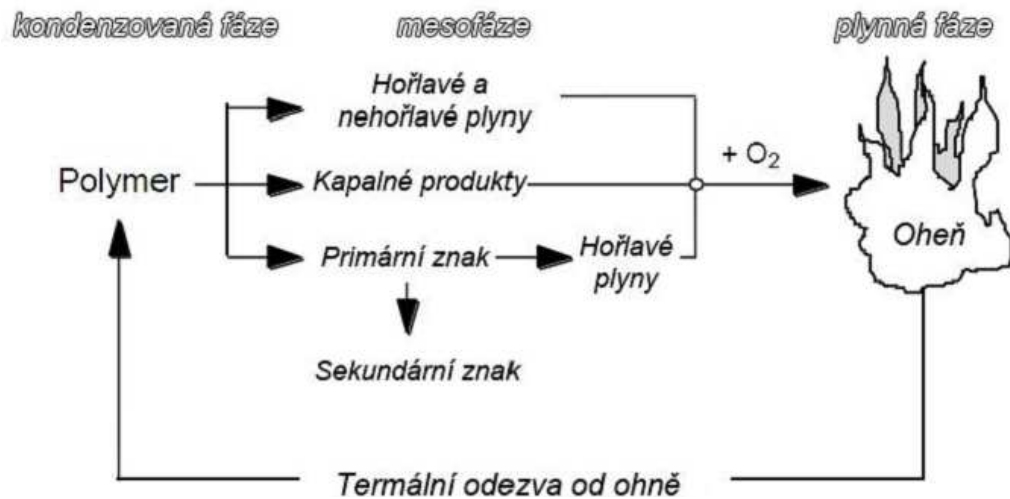


Obr. 15. Profil viskozity, teploty a hustoty hoření [7]

### 5.2.3 Fenomenologie hoření polymerů

Fenomenologie hoření polymeru nám popisuje a charakterizuje vázanou povahu hoření kondenzovaných fází. Sled událostí pro samoudržující proces hoření zahrnuje použití tepla dostačujícího pro tepelnou degradaci (pyrolýzu).

Míchání těkavého produktu tepelného rozkladu s atmosférickým kyslíkem, zapálení tohoto paliva a výsledky směsi vzduchu při hoření. Hořením vzniká tepelná energie v poměru k tepelnému spalování těkavých látek tepelného rozkladu produktů a v míře, která je řízena měrou paliv. Většina energie z plamene je ztracena vzhledem k životnímu prostředí, ale pouze zlomek se vrací do povrchu polymeru konvekcí a zářením. Pokud je zpětná vazba tepelné energie z plamene na povrch polymeru dostatečně velká k vytvoření palivových výparů, bude pokračovat i po hoření při odstranění zdroje vznícení, čímž bude proces hoření samoudržující. [7]



Obr. 16. Fenomenologie hoření polymerů [7]

### 5.3 Proces spalování polymerů

Reakce plastů ve spalovacím procesu se značně odvíjí od typu plastu. Termoplasty mají tendenci měknout a při vysokých teplotách téct. Reaktoplasty nejsou měkčené a teplem se vytvrzují, podstupují lokální povrchové připálení (někdy hořící) a spálené zbytky mohou zhasnout, nebo zůstat na místě tvořící izolační vrstvu.

Proces spalování polymeru lze shrnout do několika základních samostatných etap:

**Primární technická etapa** – zdroj vznícení, nárůst teploty, která závisí na produktu a zdroji zapálení

**Primární chemická etapa** – vyhřívání plast se začíná deformovat vlivem zdroje vznícení. Nabízí se určitá podobnost s konvenční tepelnou degradací plastů. Primární chemická metoda je však obecně rychlejší, neboť obsahuje vyšší energetické vstupy vlivem zdroje vznícení.

**Rozklad polymeru** – plast se začíná velkou rychlostí rozkládat do řady s nižší molekulovou hmotností produktů rozkladu. Typickým produktem v této fázi je u hořlavých plynů, kapalin a pevných látek kouř.

**Zapalování** – hořlavé plyny, v přítomnosti dostatečného množství kyslíku a zdroje vznícení. [7]

**Spalování** – hořící plyny se spalují nad povrchem sypkých plastů a tento proces se může stát sebeudržujícím, pokud vyprodukuje dostatečné množství energie. [7]

**Šíření plamene** – v závislosti na plastu, stupni spalování, produkci plamenů (které se mohou šířit) či ohořelé povrchové vrstvy. Velmi často je doprovázeno emisí kouře a toxických plynů.

### 5.3.1 Vliv teplotního zatížení na polyamidy

Polyamidy podléhají při vystavení zvýšenému teplotnímu namáhání destrukci, jejímž důsledkem je změna jejich chemického složení a fyzikálně mechanických vlastností. Při tepelné degradaci polyamidů dochází současně i k sítování. Polymerní řetězec se štěpí v místě mezi dusíkem amidové skupiny a sousedním uhlíkem.

Při dlouhodobém teplotním zatížení nad hranicí 70°C v přítomnosti kyslíku, dochází ke změně barvy zkoušeného vzorku včetně změny mechanických vlastností materiálu. To se projevuje také zvýšením křehkosti, poklesem tažnosti, rázové houževnatosti i pevnosti v tahu.

## 5.4 Zkouška hořlavosti žhavou smyčkou

Stejně jako u všech testů, jsou testy hořlavosti určené pro laboratorní zkoušky a kontrolu kvality. V reálném požáru se plasty mohou chovat výrazně jinak a výsledky laboratorních testů nelze předpovídat skutečnou výkonnost konkrétního plastu nebo výrobku. [7]

Nejlepší metodou zkoušení elektrotechnických výrobků s ohledem na požární nebezpečí je přesně reprodukovat podmínky vyskytující se v praxi. Většinou to však není možné. Z praktických důvodů je proto nejlepší při zkoušení elektrotechnických výrobků s ohledem na požární nebezpečí skutečné vlivy vyskytující se v praxi co nejvíce napodobit . [7]

Test žhavou (horkou) smyčkou se zabývá hořlavostí a šířením plamene. Bezpečnost s ohledem na riziko požáru je důležitým aspektem při navrhování elektrických výrobků.

Nejlepší metoda pro testování elektrických výrobků s ohledem na nebezpečí vzniku požáru se simuluje co nejbližší skutečným účinkům vyskytujících se v praxi. Za účelem posouzení nebezpečnosti požáru ČSN EN 60695-2 je určen test žhavou smyčkou a jednoduchý postup testování simulovaných účinků tepelného namáhání, které mohou být vyráběny tepelnými zdroji, jako jsou žhavé prvky nebo přetížené rezistory na krátkou dobu.

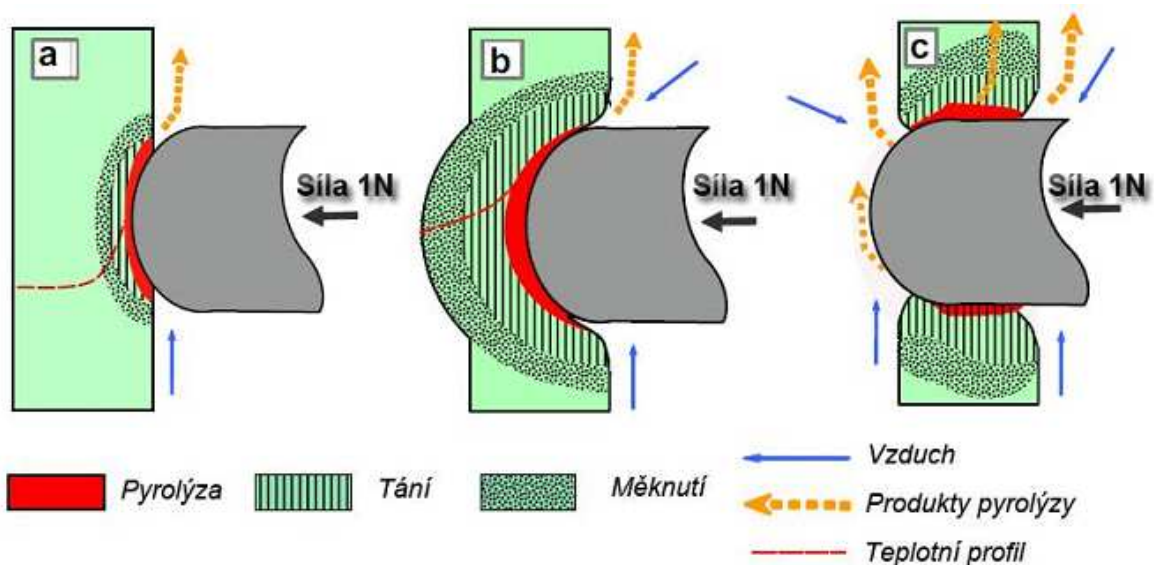
Zkušební tělísko se upevní do držáku na vozíku. Žhavá smyčka je smyčka z odolného drátu, který je elektricky vyhříván na určitou teplotu od 550 °C do 960 °C. [7]

Zkušební tělísko se přivede do kontaktu se špičkou smyčky na dobu 30 sekund. Zároveň se používá k tažení vozíku směrem ke žhavé smyčce za použití přítlačné síly. Rozsah pozorování a měření se provádí na určení nebezpečí požáru. Pozorování a měření se hodnotí podle ČSN EN 60695-2-10:2000. [7]

Tělísko v testu obstálo, když splnilo tyto podmínky:

- tělísko nehoří, ani není žhavé,
- pokud se plameny či hořící těleso uhasí do 30 s po přerušení kontaktu s žhavou smyčkou.

#### 5.4.1 Simulace průběhu zkoušky žhavou smyčkou



Obr. 17. Simulace průběhu zkoušky žhavou smyčkou [7]

Během zkoušky žhavou smyčkou se vlivem kontaktu smyčky a zkušebního tělíska vytváří v povrchu tělíska 3 specifické zóny:

1. Zóna pyrolýzy – při teplotě nad hranicí rozkladu.
2. Zóna tání – degradace je pomalejší, materiál se pouze taví.
3. Zóna měknutí – nastává teplota nad hranicí tepelné deformace, materiál tělíska může být poměrně snadno neformovatelný a teplota je již dostatečně vysoká aby roztažila vzorek.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce je porovnání hořlavosti vybraných typů polymerních materiálů modifikovaných radiačním sít'ováním.

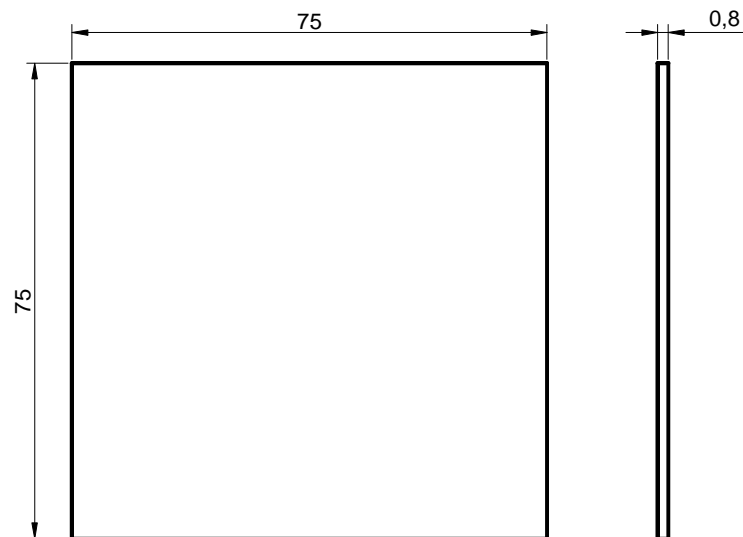
Pro experiment byla použita zkušební tělíska z PA 6, PA 6.6, PA 6.6/6 COPO, PBT, LDPE a HDPE, která byla vyrobeny vstřikováním, a poté ozářena energií 10 MeV Beta zářením o dávkách 33 kGy, 66 kGy, 99 kGy, 132 kGy, 165 kGy a 198 kGy v BGS Beta-Gamma Service GmbH & Co. KG, Deutschland, abychom zjistili vliv radiačního sít'ování na hořlavost. Tento test popisují normy ČSN EN 60695-2-10, ČSN EN 60695-2-11:2000, ČSN EN 60695-2-12:2000 a ČSN EN 60695-2-13:2000.

Dalším cílem je zjištění indexu hořlavosti (GWFI) a indexu zapalitelnosti (GWIT). Důležité jsou také další doprovodné jevy probíhající při zkoušce, jež byly zaznamenány do příslušných tabulek.

Dalším z cílů je také navrhnout identifikační protokol, zaznamenávající průběh zkoušky, jenž by mohl být užitečný při pozdější sumarizaci výsledků měření.

## 7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK

Zkušební tělesa byla navržena o rozměrech 75x75x0,8 mm a vyrobená vstříkáním na vstříkovacím stroji ARBURG 420C Allrounder Advanced. Vstříkovalo se do jednonásobné formy o rozměrech dutiny v přesnosti  $\pm 0,2$  mm.



*Obr. 18. Rozměry zkušebního tělíska*

Vstříkovacím strojem ARBURG 420C Allrounder Advanced je vybaven řídicím systémem SELOGICA s 32-bitovým multiprocessorovým systémem řízení.



*Obr. 19. Vstříkovací stroj ARBURG 420C Allrounder Advanced*



Tab. 1. Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C

Uzavírací jednotka	Hodnota	Jednotka
Uzavírací síla	1000	max. kN
Otevírací síla / zvýšená otevírací síla	35 / 250	max. kN
Otevření	500	max. mm
Vzdálenost mezi vodícími sloupy	420 x 420	mm
Velikost upínací desky (šířka x výška)	570 x 570	mm
Vyhazovací síla	40	max. kN
Zdvih vyhazovače	175	max. mm
<b>Hydraulika, pohon</b>		
Výkon čerpadla	15	kW
Celkový příkon stroje	23,9	kW
<b>Vstřikovací jednotka</b>		
Průměr šneku	40	mm
Poměr šneku	20	L / D
Zdvih šneku	145	max. mm
Objem dávky	182	max. cm <sup>3</sup>
Vstřikovací tlak	2120	max. bar
Vstřikovací rychlost (objemová)	168	max. cm <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
Zpětný tlak pozitivní / negativní	350 / 160	max. bar
Krouticí moment šneku	700	max. Nm
Přítlačná síla trysky	70	max. kN
Objem násypky	50	l
<b>Olejová náplň a hmotnost</b>		
Množství oleje	235	l
Hmotnost stroje, bez oleje	3700	kg

## 7.1 Zvolené materiály

Pro měření hořlavosti žhavou smyčkou byla vybrána široká škála materiálů, z nichž jsou všechny uvedeny v tabulce č. 2.

Tab. 2. Materiály zvolené pro vstřikování

Obchodní název	Typ	Barva
V-PTS-CREATEC-B3HG7ZC *M800/25 natur	PBT 35% GF, H-Stabi.+ schlag.	blau (modrá)
V-PTS-CREAMID-A3H2G5FR *01G4225 grau	PA6.6 25% GF V0 frei v.HAL.&Phos. - plněný	grau (šedá)
V-PTS-CREAMID-B3H2 *M800/14 natur	PA6 nucleiert, wärmestabi.	lichtgrau (světle šedá)
V-PTS-CREAMID-C3H2G5FRS *9200 e – schwarz	PA6.6/6 Copo. – plněný 25% GF	e-schwarz (černá)
DOW LDPE 780 E weiss	LDPE	weiss (bílá)
DOE HDPE 25055 E weiss	HDPE	weiss (bílá)

### 7.1.1 Procesní podmínky při vstřikování jednotlivých materiálů

Tab. 3. Procesní podmínky jednotlivých materiálů při vstřikování

Parametry	Typ materiálu					
	PA 6.6	PA 6.6/6	PA 6	HDPE	LDPE	PBT
Vstřikovací tlak [Bar]	60	70	70	80	65	60
Dotlak [MPa]	50	40	50	50	45	50
Dráha dávkování [mm]	40	40	40	40	40	40
Doba chlazení [s]	20	28	20	35	15	30
Teplota formy [°C]	80	80	80	40	40	60
Teplota taveniny [°C]	280	280	280	190	190	270
Teplota pod násypkou [°C]	70	70	70	40	40	70
Teplotní pásmo 1 [°C]	225	225	225	150	150	220
Teplotní pásmo 2 [°C]	255	255	255	160	160	235
Teplotní pásmo 3 [°C]	265	265	265	170	170	250
Teplotní pásmo 4 [°C]	275	275	275	185	185	265
Teplota trysky [°C]	280	280	280	190	190	270

## 7.2 Ozařování zkušebních tělísek

Připravená zkušební tělíska byla ozářena  $\beta$  zářením, energií 10 MeV, dávkou 33, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy ve firmě BGS Beta-Gamma Service GmbH & Co. KG, Industriestraße 9, Saal am Donau, Deutschland. Při jednom průjezdu palety se zkušebními tělísky ozařovacím zařízením, byly zkušební tělíska ozářeny dávkou intenzity záření 33 kGy. Pro dosažení požadované dávky, projížděly palety se zkušebními tělísky ozařovacím zařízením tolikrát, než bylo dosaženo požadované hodnoty ozáření.

Před každým průjezdem byl na paletu s tělesy umístěn dozimetr pro zjištění skutečné hodnoty ozáření. Dále byl na paletu umístěn identifikátor (značka nalepená na papíru s označením potřebné dávky), který po průjezdu ozařovacím zařízením zčervenal a signalizoval tím, že došlo k ozáření materiálu. Pro nejvyšší dávku ozáření 198 kGy tedy bylo na paletu umístěno šest identifikátorů. [7]



Obr. 20. Linka pro ozařování ve firmě BGS



Obr. 21. Příprava zkušebních tělísek pro ozáření



Obr. 22. Zkušební tělíska přichystaná k hromadnému ozáření

## 8 ZKOUŠKA HOŘLAVOSTI ŽHAVOU SMYČKOU

### 8.1 Popis jednotlivých norem

#### 8.1.1 Zkouška hořlavosti konečných výrobků žhavou smyčkou

Tato zkouška se řídí dle normy ČSN EN 60695-2-11:2000.

Pokud je to možné, má být vzorkem kompletní konečný výrobek. Vzorek se musí zvolit tak, aby se podmínky zkoušky příliš nelišily od podmínek vyskytujících se při normálním používání (pokud jde o tvar, větrání, vliv tepelného namáhání, popř. vliv plamenů vyskytujících se ve vzorku nebo vliv hořících či žhnoucích částic odpadávajících v jeho blízkosti). [16]

Zkouškou se zjišťuje, zda za definovaných podmínek žhavá smyčka nezpůsobí zapálení součástí nebo zda zapálená část má jen omezenou dobu hoření a nešíří oheň plameny ani hořícími nebo žhnoucími částicemi odpadávajícími ze vzorku. [16]

Jestliže vzorek během působení žhavé smyčky začne hořet plamenem, může tím způsobené požární nebezpečí vyvolat nutnost dalších zkoušek používajících jiné zdroje zapálení, např. plamen jehlového hořáku působící na ty části, které budou zasaženy vzniklými plameny. [16]

Pro vyhodnocení možnosti šíření ohně (např. hořícími nebo žhnoucími částicemi odpadávajícími ze vzorku) se pod vzorek umístí specifikovaná podložka popsaná v 5.3 IEC60695-2-10 nebo materiál součástky, které se obvykle vyskytují v okolí vzorku nebo pod ním. Vzdálenosti mezi vzorkem a specifikovanou podložkou reprezentující okolní materiál nebo součástky musí být stejné jako při upevnění vzorku v elektrotechnickém výrobku. [16]

#### Pozorování a měření

Vzorek, okolní části a specifikovaná podložka se pozorují po dobu působení žhavé smyčky L a poté ještě po dobu 30 s a zaznamená se:

a) doba  $t_i$ , která uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do zapálení vzorku nebo specifikované podložky;

- b) doba  $t_e$ , která uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do okamžiku, kdy plameny během doby působení nebo po jejím uplynutí uhasnou;
- c) maximální výška plamenů (zaokrouhlená na nejbližších 5 mm); nebere se však v úvahu počátek zapálení, kdy může na dobu asi 1 s vzniknout vysoký plamen;
- d) jestliže vzorek při zkoušce vyhoví proto, že většina plamenně hořícího materiálu se odstraní při oddálení žhavé smyčky, musí se to zaznamenat do protokolu o zkoušce;
- e) jakékoli zapálení specifikované podložky umístěné pod vzorkem. [16]

#### Vyhodnocení výsledku zkoušky

Pokud není v příslušné specifikaci stanoveno něco jiného, považuje se vzorek za vyhovující při zkoušce žhavou smyčkou, jestliže nedošlo k plamennému hoření, ani ke žhnutí nebo jestliže nastal jeden z těchto dvou případů:

- a) plamenné hoření nebo žhnutí vzorku uhaslo do 30 s po oddálení žhavé smyčky, tzn.  
 $t_e \leq t_a + 30 \text{ s}$
- b) v případě použití specifikované podložky z hedvábného balicího papíru nedošlo k jejímu zapálení. [16]

#### **8.1.2 Zkouška hořlavosti materiálů žhavou smyčkou**

Tato zkouška se řídí dle normy ČSN EN 60695-2-12:2000 a lze z ní vyčíst tuto definici:

**Index hořlavosti žhavou smyčkou (GWFI)** (glow-wire flammability index (GWFI)): nejvyšší zkušební teplota při které během tří po sobě následujících zkoušek vzorku dané tloušťky je splněna jedna z těchto podmínek:

- a) plameny nebo žhnutí vzorku uhasnou během 30 s po oddálení žhavé smyčky, aniž dojde k zapálení hedvábného balicího papíru umístěného pod vzorkem;
- b) vzorek se nezapálí. [17]

**Teplota zapálení žhavou smyčkou (GWIT)** (glow-wire ignition temperature (GWIT)): teplota o 25K (mezi 900 °C a 960 °C o 30 K) vyšší než maximální teplota hrotu žhavé smyčky, která během tří po sobě následujících zkoušek nezpůsobí zapálení vzorku o dané tloušťce. [17]

### Pozorování a měření

Vzorek a hedvábný balicí papír umístěný pod ním se pozorují po dobu působení žhavé smyčky a poté ještě po dobu 30 s. Zaznamenají se tyto hodnoty:

- a) doba  $t_i$ , která uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do zapálení vzorku nebo hedvábného balicího papíru umístěného pod ním;
- b) doba  $t_e$ , která uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do okamžiku, kdy plameny během doby působení nebo po jejím uplynutí uhasnou. [17]

### Vyhodnocení výsledku zkoušky

Vzorek při zkoušce úspěšně odolal, pokud se buď nezapálil, nebo jsou splněny obě tyto podmínky:

- a) plameny nebo žhnutí vzorku uhasly do 30 s po oddálení žhavé smyčky a
- b) nedošlo k zapálení hedvábného balicího papíru. [17]

Pokud je splněna pouze jedna, nebo není splněna žádná z těchto podmínek, zkouška se opakuje s novým vzorkem při nižší zkušební teplotě.

Při nejvyšší zkušební teplotě, při které vzorek splnil podmínky a) i b) se zkouška ještě dvakrát opakuje

GWFI se stanoví jako nejvyšší zkušební teplota, při které jsou ve třech po sobě následujících zkouškách splněny podmínky a) i b).

Jestliže se zkoušený materiál během stanovení GWIT (viz IEC 60695-2-13) při nejvyšší teplotě vybrané z tabulky nezapálí, není zapotřebí provádět zkoušku GWFI. Hodnota GWFI pro tento materiál při jeho dané tloušťce bude 960 °C. [17]

### **8.1.3 Zkouška zapalitelnosti materiálů žhavou smyčkou**

Tato zkouška se řídí dle normy ČSN EN 60695-2-13:2000

**Teplota zapálení žhavou smyčkou** (GWIT) (glow-wire ignition temperature (GWIT)): teplota o 25K (mezi 900°C a 960 °C o 30 K) vyšší než maximální teplota hrotu žhavé smyčky, která během tří po sobě následujících zkoušek nezpůsobí zapálení vzorku o dané tloušťce.

**Zapálení** (ignition): přetrvávání plamene po dobu delší než 5 s. [18]

Zapalitelnost obvykle bude záviset na tloušťce zkoušeného materiálu. Přednostně doporučené hodnoty jsou  $0,75 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ,  $1,5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  nebo  $3,0 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ . [18]

### Stupně přesnosti

Tab. 4. Stupně přesnosti zkoušky [18]

Zkušební teplota [°C]	Tolerance [K]
500	$\pm 10$
550	$\pm 10$
600	$\pm 10$
650	$\pm 10$
700	$\pm 10$
750	$\pm 10$
800	$\pm 10$
850	$\pm 10$
900	$\pm 10$
960	$\pm 10$

## 8.2 Popis zkušebního zařízení pro zkoušku žhavou smyčkou

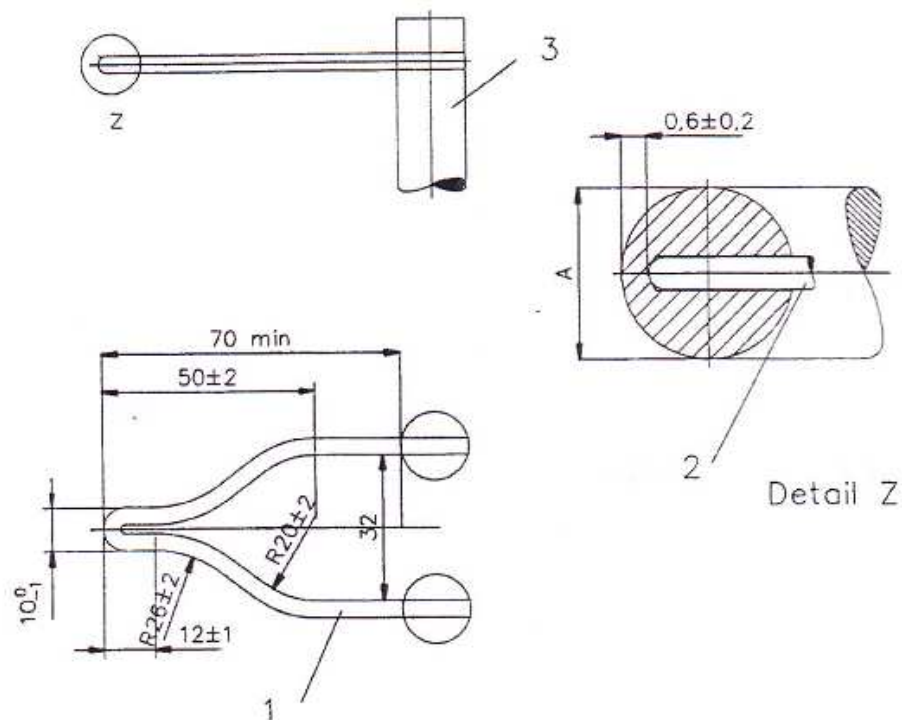
### 8.2.1 Žhavá smyčka

Žhavá smyčka je zhotovena z nikl-chromového drátu (80/20) o vnějším jmenovitém průměru 4 mm. Z drátu se podle obrázku 1 vytvoří smyčka. Žhavá smyčka se zahřívá pomocí jednoduchého elektrického obvodu, jak je znázorněno na obrázku 2. K udržování teploty se nesmí použít žádný zpětnovazební mechanismus ani obvod. [15]

Zkušební zařízení musí být navrženo tak, aby se žhavá smyčka udržovala ve vodorovné rovině a aby během působení na vzorek na něj vyvíjela sílu  $1,0 \text{ N} \pm 0,2 \text{ N}$ . Na této hodnotě, se síla udržuje i při vzájemném vodorovném pohybu žhavé smyčky nebo vzorku. Proniknutí hrotu žhavé smyčky do vzorku musí být omezeno na  $7 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ . [15]

Zkušební zařízení musí být navrženo tak, aby hořící či žhnoucí částičky odpadávající ze vzorku mohly zapálit danou podložku.





Obr. 23. Schéma žhavé smyčky [15]

1 – žhavá smyčka, 2 – termočlánek, 3 – držák

### 8.2.2 Systém měření teploty

Teplota hrotu žhavé smyčky se měří termočlánkem třídy 1 (viz IEC 60584-2) z jemného drátu v kovovém plášti s minerální izolací a s izolovaným spojem. Termočlánek musí mít vnější jmenovitý průměr 1,0 mm nebo 0,5 mm a dráty např. z NiCr a NiAl (typ K), (viz IEC 60584-1) vhodné pro nepřetržitý provoz při teplotách do 960 °C, s horkým koncem umístěným uvnitř pláště co nejbližší hrotu. Plášť je tvořen kovem, který odolává dlouhodobému působení teploty nejméně 1050 °C. V případě sporu se použije termočlánek s drátem o průměru 0,5 mm. [15]

Termočlánek je těsně umístěn v šachtice vyvrtané za koncem žhavé smyčky, jak je znázorněno v detailu na obrázku 21, mezi hrotem termočlánu a koncem šachtičky se musí udržovat tepelný kontakt. Je zapotřebí věnovat pozornost tomu, aby se termočlánek mohl pohybovat podle změn rozměrů hrotu žhavé smyčky vyvolaných zahřátím. [15]

Teplota je regulována pomocí Regulátoru teploty E-therm 2404.



Obr. 24. Regulátor teploty E-therm 2404 [7]

### 8.2.3 Specifikovaná podložka

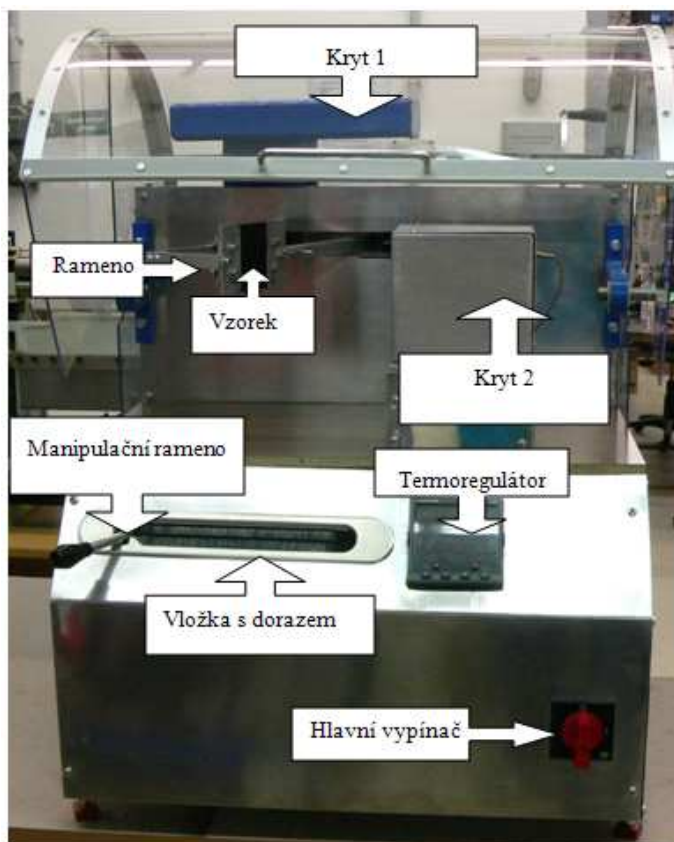
Pro vyhodnocení možného šíření ohně (např. hořícími či žhnoucími částicemi odpařujícími se ze vzorku) se pod vzorek umístí specifikovaná podložka. Pokud není v příslušné specifikaci stanoveno něco jiného, použije se jedna vrstva hedvábného balicího papíru položená těsně na horní povrch rovné hladké desky ze dřeva o tloušťce nejméně 10 mm. [15]

Podložka se umístí do vzdálenosti  $200 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  pod místo, kde žhavá smyčka působí na vzorek. Hedvábný balicí papír je podle 6.86 ISO 4046 měkký a pevný lehký balicí papír, jehož plošná hustota je mezi  $12 \text{ g/m}^2$  a  $30 \text{ g/m}^2$ . Hedvábný balicí papír lze nahradit jinými podobnými materiály, pokud bylo ověřeno, že jsou pro tento účel stejně vhodné. [15]

### 8.2.4 Zkušební komora

Zařízení musí být umístěno v prostředí s omezeným prouděním vzduchu. Toho lze dosáhnout použitím komory o objemu nejméně  $0,5 \text{ m}^3$ , která umožňuje pozorování vzorku. Objem komory musí být takový, aby úbytek kyslíku během zkoušky neměl významný vliv na výsledky zkoušky. Vzorek musí být upevněn nejméně 100 mm od nejbližšího povrchu komory. Komora se po každé zkoušce musí vyvětrat, aby se odstranil vzduch obsahující zplodiny degradace. Osvětlenost vzorku dopadajícím okolním světlem (bez započtení vlivu žhavé smyčky) nesmí převýšit 20 lx a pozadí musí být tmavé. Komora se považuje za dostatečně tmavou, jestliže luxmetr umístěný na místě vzorku a namířený do zadní části komory ukáže méně než 20 lx. [15]

Kompletně sestavené zařízení pro zkoušku žhavou smyčkou je znázorněno na obrázku 22.



Obr. 25. Zařízení pro zkoušku žhavou smyčkou [7]

### 8.3 Popis práce na přístroji a zkušební postup

Před započítím zkoušky je třeba ještě ověřit zkušební hrot a systém měření teploty žhavé smyčky a dodržet také aklimatizaci před zkouškou.

#### 8.3.1 Ověřování hrotu žhavé smyčky

Hrot žhavé smyčky se musí před zahájením každé řady zkoušek zkontrolovat tak, že se změří a zaznamená rozměr „A“, znázorněný na obrázku 21 (detail Z). Výsledek se porovná s hodnotou získanou při následujících měřeních a pokud tento rozměr poklesne na 90 % původní hodnoty, musí se žhavá smyčka vyměnit. [15]

Po dokončení každé zkoušky se hrot žhavé smyčky musí, pokud je to nutné, očistit od všech zbytků dříve zkoušeného materiálu (např. drátěným kartáčem) a pak se musí zkontrolovat, zda v hrotu žhavé smyčky nejsou trhlinky. [15]

### 8.3.2 Ověřování systému měření teploty

Ověřování teploty žhavé smyčky v jednom bodě lze provést pomocí fólie ze stříbra o čistotě nejméně 99,8 %, o ploše přibližně  $2\text{mm}^2$  a tloušťce 0,06 mm umístěné na vrchní část hrotu žhavé smyčky. [15]

Žhavá smyčka se vhodnou pomalou rychlostí ohřevu zahřeje a ve chvíli, kdy se fólie začne tavit, musí teploměr ukázat  $960\text{ }^\circ\text{C} \pm 15\text{ }^\circ\text{C}$ . Po ukončení postupu ověřování se žhavá smyčka (stále za horka) očistí od všech stop stříbra, aby se snížila pravděpodobnost vytvoření slitiny. V případě sporu se musí použít tento způsob ověření pomocí stříbrné fólie. [15]

### 8.3.3 Aklimatizace před zkouškou

Vzorky se aklimatizují po dobu 48 h při teplotě  $23\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti mezi 45 % a 55 %. Vzorky se zkouší v laboratorní atmosféře o teplotě mezi  $15\text{ }^\circ\text{C}$  a  $35\text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti mezi 45 % a 75 %. [18]

Dřevěná deska a hedvábný papír se před zkouškou uloží na 24h v prostředí o teplotě  $15\text{ }^\circ\text{C}$  a  $35\text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti mezi 45 % a 75 %. [15]

### 8.3.4 Zkušební postup

Vzorek se upevní nebo upne tak, aby:

- a) ztráty tepla způsobené podpěrami nebo upevňovacími přípravky byly zanedbatelné,
- b) rovinná část povrchu byl svislá,
- c) hrot žhavé smyčky působil na střed rovinné části povrchu. [15]

Žhavá smyčka se elektricky zahřeje na specifikovanou teplotu, která se měří kalibrovaným systémem měření teploty. Před tím, než se hrot žhavé smyčky dotkne vzorku, se věnuje pozornost tomu, aby:

- a) se tato teplota po dobu nejméně 60 s neměnila o více než 5 K,
- b) tepelné záření během této doby neovlivňovalo vzorek, což se zajistí dostatečnou vzdáleností smyčky od vzorku (tj. nejméně 5,0 cm) nebo vhodným zastíněním,
- c) do ukončení zkoušky se již žhavicí proud ani napětí znovu nenastavoval. [15]

Hrot žhavé smyčky se pak pomalu přivede do kontaktu se vzorkem na dobu  $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ . Bylo zjištěno, že vyhovující je rychlost přibližování a oddalování přibližně  $10 \text{ mm/s}$  až  $25 \text{ mm/s}$ . Rychlost přibližování se však před dotykem musí snížit téměř na nulu, aby síla působící při dotyku nepřekročila  $1,0 \text{ N} \pm 0,2 \text{ N}$ . [15]

Jestliže se materiál odtaví od žhavé smyčky, nemusí být žhavá smyčka udržována v dotyku se vzorkem. Po uplynutí doby působení se žhavá smyčka a vzorek pomalu od sebe oddělí, přičemž se zabránuje dalšímu zahřívání vzorku a pohybu vzduchu, který by mohl ovlivnit výsledek zkoušky. Proniknutí hrotu žhavé smyčky do vzorku musí být omezeno na  $7 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ . [15]

### 8.3.5 Pozorování a měření

Vzorek, okolní části a specifikovaná podložka se pozorují po dobu působení žhavé smyčky  $t_a$  a poté ještě po dobu  $30 \text{ s}$  a zaznamená se:

- a) doba  $t_i$ , která uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do zapálení vzorku nebo specifikované podložky,
- b) doba  $t_e$ , která uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do okamžiku, kdy plameny během doby působení nebo po jejím uplynutí uhasnou,
- c) maximální výška plamenů (zaokrouhlená na nejbližších  $5 \text{ mm}$ ); nebere se však v úvahu počátek zapálení, kdy může na dobu asi  $1 \text{ s}$  vzniknout vysoký plamen,
- d) jestliže vzorek při zkoušce vyhoví proto, že většina plamenně hořícího materiálu se odstraní při oddálení žhavé smyčky, musí se to zaznamenat do protokolu o zkoušce,
- e) jakékoli zapálení specifikované podložky umístěné pod vzorkem. [16]

Výška plamene je svislá vzdálenost mezi horní hranou žhavé smyčky při jejím působení na vzorek a viditelnou špičkou plamene při pozorování v tlumeném světle.

Zapálením se rozumí, že plamen je viditelný déle než  $5 \text{ s}$ .

### 8.3.6 Vyhodnocení výsledků zkoušky

Vzorek při zkoušce úspěšně odolal, pokud se buď nezapálil, nebo jsou splněny obě tyto podmínky:

- a) plameny nebo žhnutí vzorku uhasly do  $30 \text{ s}$  po oddálení žhavé smyčky a:

b) nedošlo k zapálení hedvábného balicího papíru.[17]

Pokud je splněna pouze jedna nebo není splněna žádná z těchto podmínek, zkouška se opakuje s novým vzorkem při nižší zkušební teplotě uvedené v tabulce 4. Pokud jsou splněny obě tyto podmínky, zkouška se opakuje s novým vzorkem při vyšší zkušební teplotě uvedené v tabulce 4. Při nejvyšší zkušební teplotě, při které vzorek splnil podmínky a) i b), se zkouška ještě dvakrát opakuje. [17]

GWFI se stanoví jako nejvyšší zkušební teplota, při které jsou ve třech po sobě následujících zkouškách splněny podmínky a) i b). Jestliže se zkoušený materiál během stanovení GWIT (viz IEC 60695-2-13) při nejvyšší teplotě vybrané z tabulky 4 nezapálí, není zapotřebí provádět zkoušku GWFI. Hodnota GWFI pro tento materiál při jeho dané tloušťce bude 960 °C. [17]

### 8.3.7 Popis práce

- 1.) Vizuální kontrola přístroje. Hlavní vypínač v poloze vypnuto.
- 2.) Zapojení přívodní šňůry do elektrické zásuvky na 230 V.
- 3.) Přemístění ramene, ve kterém se upevňuje tělísko, do krajní polohy za „zobáček“.
- 4.) Otevření bezpečnostního krytu a opatrné vložení testovacího tělíška (destičky) do systému upevnění na rameni. Pozor na nebezpečí poranění o odtah zplodin!
- 5.) Vložení specifikované podložky pod místo styku hrotu s tělískem (200 mm  $\pm$  5 mm pod tímto místem).
- 6.) Uzavření krytu. Hlavní vypínač do polohy zapnuto. Nastavení požadované teploty hrotu smyčky na termoregulátoru E-therm 2404. Vyčkání než se nažhaví smyčka.
- 7.) Opatrný příjezd tělíška k hrotu smyčky, rychlostí 10 mm/s až 25 mm/s pohybem ramene. Při doteku jemně pouštíme a necháme působit tíhu závaží, sílu 1 N  $\pm$  0,2 N.
- 8.) Měříme časy a pozorujeme příslušné chování dle ČSN EN 60695 a podle typu zkoušky. Zaznamenáváme do protokolu.
- 9.) Po ukončení testu tělíška zapínáme externí odtah zplodin, je-li to nezbytně nutné. Počkáme na uhasnutí plamenů, jestli ovšem vznikly. Umístíme rameno do krajní polohy (za zobáček), otevřeme kryt, vyjmeme destičku (pozor na odtah zplodin,

který může být rozžhavený a proto hrozí nebezpečí popálení). Vyměníme specifikovanou podložku, jestliže se vznítla.

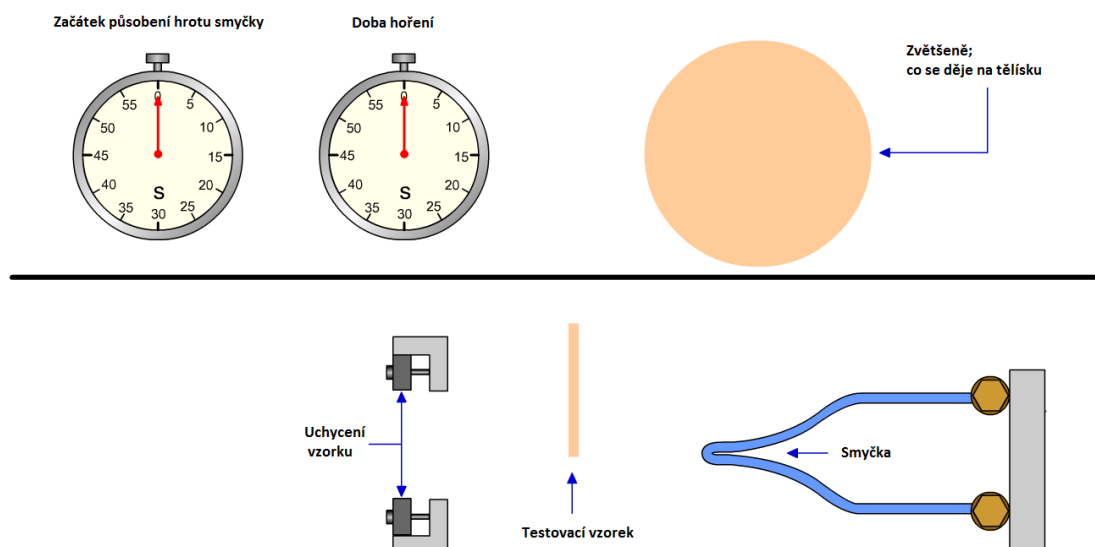
10.) Opakujeme postup od bodu číslo 4.). [7]

## 8.4 Samotná zkouška

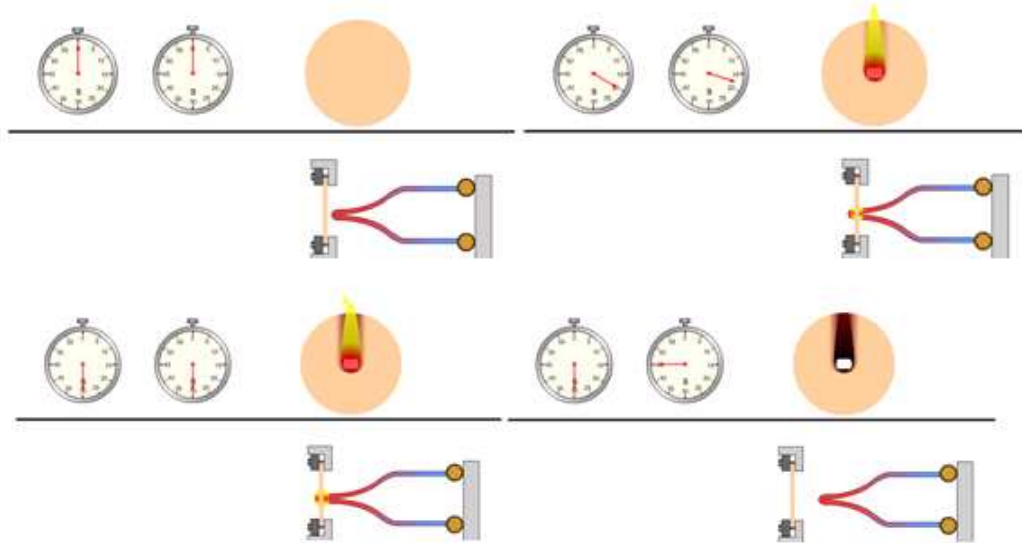
Zkouška probíhala dle norem ČSN EN 60695-2-10:2000, ČSN EN 60695-2-11:2000, ČSN EN 60695-2-12:2000 a ČSN EN 60695-2-13:2000. Z každého zkoušeného materiálu byly tedy vyhotoveny tři zkušební protokoly. Teploty, při nichž měření probíhalo, jsou uvedeny v tabulce 4.

Materiály, které byly testovány:

- PA 6
- PA 6.6
- PA 6.6/6 COPO
- HDPE
- LDPE
- PBT



Obr. 26. Schéma principu zkoušky žhavou smyčkou [7]



Obr. 27. Schematický průběh zkoušky žhavou smyčkou [7]

## 8.5 Vyhodnocení zkoušky

Zkouška byla provedena dle ČSN EN 60695-2-10:2000, ČSN EN 60695-2-11:2000, ČSN EN 60695-2-12:2000 a ČSN EN 60695-2-13:2000. Z každého zkoušeného materiálu byly zhotoveny 3 zkušební protokoly. Teploty, při nichž probíhalo měření, jsou uvedeny v tabulce 4.

Norma ČSN EN 60695-2-11:2000 se zaměřuje na výšku plamene, a zda uhasne po 30 s od oddálení tělíska. ČSN EN 60695-2-12:2000 se zabývá zjištěním indexu hořlavosti žhavou smyčkou (GWFI) a norma ČSN EN 60695-2-13:2000 zkoumá index zapalitelnosti (GWIT).



Tab. 5. Vyhodnocení zkoušky pro materiál č. 1., norma ČSN EN 60695-2-11:2000.

Norma:	ČSN EN 60695-2-11:2000			Datum zkoušky:	26.4.2012			
Obchodní název:	V-PTS-CREATEC-B3HG7ZC *M800/25 natur			Typ:	Příprava:		Výrobce:	
				PBT	Vstříkování		PTS	
Aklimatizace před zkouškou:	Dřevěná podložka:		Balící papír:		Tělíška:			
	ANO		ANO		ANO			
Kalibrace měření teploty:	Datum provedení kalibrace:				Vyhovuje			
	26.4.2012							
Tělíška:	Rozměry:				Tloušťka tělísek:			
	75x75 mm				0,8 mm			
Rozměr hrotu A:	9,95 mm		> 90%		Vyhovuje			
Číslo materiálu:	1.		Barva:	Plněný / neplněný		Sít'ovací činidlo:		Vyhodnocení:
			Běžová	35% GF		ANO	Betalink	
Ozáření dávkou [kGy]	Teplota smyčky [°C]	Tělíška [ks]	Časy [s]		Uhasnutí do 30 s po oddálení	Zapálení:		Max. výška plamenů [mm]
			t <sub>i</sub>	t <sub>e</sub>		tělíško	podložka	
0	550	1	-	-	ANO	NE	NE	-
0	600	1	-	-	ANO	NE	NE	-
0	650	1	-	-	ANO	NE	NE	-
0	700	1	3,1	>60	NE	ANO	ANO	70
0	650	2	-	-	ANO	NE	NE	-
0	650	3	-	-	ANO	NE	NE	-
33	960	1	0,1	>60	NE	ANO	ANO	>100
33	900	1	0,1	>60	NE	ANO	ANO	>100
33	850	1	0,1	>60	NE	ANO	ANO	>100
33	800	1	0,1	>60	NE	ANO	ANO	>100
33	750	1	1,7	>60	NE	ANO	NE	>100
33	700	1	4,3	>60	NE	ANO	NE	45
33	650	1	-	-	ANO	NE	NE	-
33	650	2	-	-	ANO	NE	NE	-
33	650	3	-	-	ANO	NE	NE	-
66	960	1	0,1	>60	NE	ANO	ANO	>100
66	900	1	0,1	>60	NE	ANO	ANO	>100
66	850	1	0,1	>60	NE	ANO	ANO	>100
66	800	1	1,4	>60	NE	ANO	NE	>100
66	750	1	2,7	>60	NE	ANO	ANO	>100
66	700	1	-	-	ANO	NE	NE	-
66	700	2	-	-	ANO	NE	NE	-
66	700	3	-	-	ANO	NE	NE	-





Tab. 7. Vyhodnocení zkoušky pro materiál č. 1., norma ČSN EN 60695-2-13:2000.

Norma:	ČSN EN 60695-2-13:2000			Datum zkoušky:	26.4.2012				
Obchodní název:	V-PTS-CREATEC-B3HG7ZC *M800/25 natur			Typ:	Příprava:	Výrobce:			
				PBT	Vstříkování	PTS			
Aklimatizace před zkouškou:	Dřevěná podložka:		Balící papír:		Tělíška:				
	ANO		ANO		ANO				
Kalibrace měření teploty:	Datum provedení kalibrace:					Vyhovuje			
	26.4.2012								
Tělíška:	Rozměry:					Tloušťka tělíšek:			
	75x75 mm					0,8 mm			
Rozměr hrotu A:	9,95 mm		> 90%		Vyhovuje				
Číslo materiálu:	1.		Barva:	Plněný / neplněný	Sít'ovací činidlo:			Vyhodnocení:	
			Béžová		35% GF	ANO	Batalink		
Ozáření dávkou [kGy]	Teplota smyčky [°C]	Tělíška [ks]	Časy [s]		Plamen > 5s (s)	Zapálení:		GWIT	
			t <sub>i</sub>	t <sub>e</sub>		tělíško	podložka		
0	550	1	-	-	NE	NE	NE	ANO	
0	600	1	-	-	NE	NE	NE	ANO	
0	650	1	-	-	NE	NE	NE	ANO	
0	700	1	3,1	>60	ANO	ANO	ANO	NE	
0	650	2	-	-	NE	NE	NE	ANO	
0	650	3	-	-	NE	NE	NE	675/0,8	
33	960	1	0,1	>60	ANO	ANO	ANO	NE	
33	900	1	0,1	>60	ANO	ANO	ANO	NE	
33	850	1	0,1	>60	ANO	ANO	ANO	NE	
33	800	1	0,1	>60	ANO	ANO	ANO	NE	
33	750	1	1,7	>60	ANO	ANO	NE	NE	
33	700	1	4,3	>60	ANO	ANO	NE	NE	
33	650	1	-	-	NE	NE	NE	ANO	
33	650	2	-	-	NE	NE	NE	ANO	
33	650	3	-	-	NE	NE	NE	675/0,8	
66	960	1	0,1	>60	ANO	ANO	ANO	NE	
66	900	1	0,1	>60	ANO	ANO	ANO	NE	
66	850	1	0,1	>60	ANO	ANO	ANO	NE	
66	800	1	1,4	>60	ANO	ANO	NE	NE	
66	750	1	2,7	>60	ANO	ANO	ANO	NE	
66	700	1	-	-	NE	NE	NE	ANO	
66	700	2	-	-	NE	NE	NE	ANO	
66	700	3	-	-	NE	NE	NE	725/0,8	

99	960	1	0,1	>60	ANO	ANO	ANO	NE
99	900	1	0,1	>60	ANO	ANO	NE	NE
99	850	1	2,2	>60	ANO	ANO	NE	NE
99	800	1	2,9	>60	ANO	ANO	ANO	NE
99	750	1	4,1	>60	ANO	ANO	ANO	NE
99	700	1	-	-	NE	NE	NE	ANO
99	700	2	-	-	NE	NE	NE	ANO
99	700	3	-	-	NE	NE	NE	725/0,8
132	960	1	0,1	>60	ANO	ANO	NE	NE
132	900	1	0,1	>60	ANO	ANO	NE	NE
132	850	1	2,2	>60	ANO	ANO	ANO	NE
132	800	1	3	>60	ANO	ANO	NE	NE
132	750	1	5	>60	ANO	ANO	NE	NE
132	700	1	-	-	NE	NE	NE	ANO
132	700	2	-	-	NE	NE	NE	ANO
132	700	3	-	-	NE	NE	NE	725/0,8
165	960	1	0,1	>60	ANO	ANO	ANO	NE
165	900	1	0,1	>60	ANO	ANO	ANO	NE
165	850	1	0,1	>60	ANO	ANO	NE	NE
165	800	1	3,3	>60	ANO	ANO	ANO	NE
165	750	1	7,5	>60	ANO	ANO	NE	NE
165	700	1	-	-	NE	NE	NE	ANO
165	700	2	-	-	NE	NE	NE	ANO
165	700	3	-	-	NE	NE	NE	725/0,8
198	960	1	0,1	>60	ANO	ANO	NE	NE
198	900	1	0,1	>60	ANO	ANO	NE	NE
198	850	1	0,1	>60	ANO	ANO	NE	NE
198	800	1	5,4	>60	ANO	ANO	ANO	NE
198	750	1	6,6	>60	ANO	ANO	ANO	NE
198	700	1	-	-	NE	NE	NE	ANO
198	700	2	-	-	NE	NE	NE	ANO
198	700	3	-	-	NE	NE	NE	725/0,8

Tímto způsobem bylo zaznamenáno měření všech zkoušených materiálů a dané protokoly o zkoušce byly zahrnuty do seznamu příloh.

## 8.6 Diskuze výsledků

Po otestování správné funkce přístroje podle výše zmiňovaných norem byla provedena zkouška pro materiál PBT, PA 6, PA 6.6, PA 6.6/6, LDPE, HDPE. Tyto materiály byly ve dvou formách – neozářené a dále ozářené dávkami intenzity záření 33 kGy, 66 kGy, 99 kGy, 132 kGy, 165 kGy a 198 kGy. Měřenými veličinami byly index hořlavosti žhavou smyčkou (GWFI) a index zapalitelnosti žhavou smyčkou (GWIT). Z průběhu zkoušek byly vyhotoveny vždy tři zkušební protokoly (viz. Tab. 5., Tab. 6. a Tab. 7.).

### 8.6.1 PBT

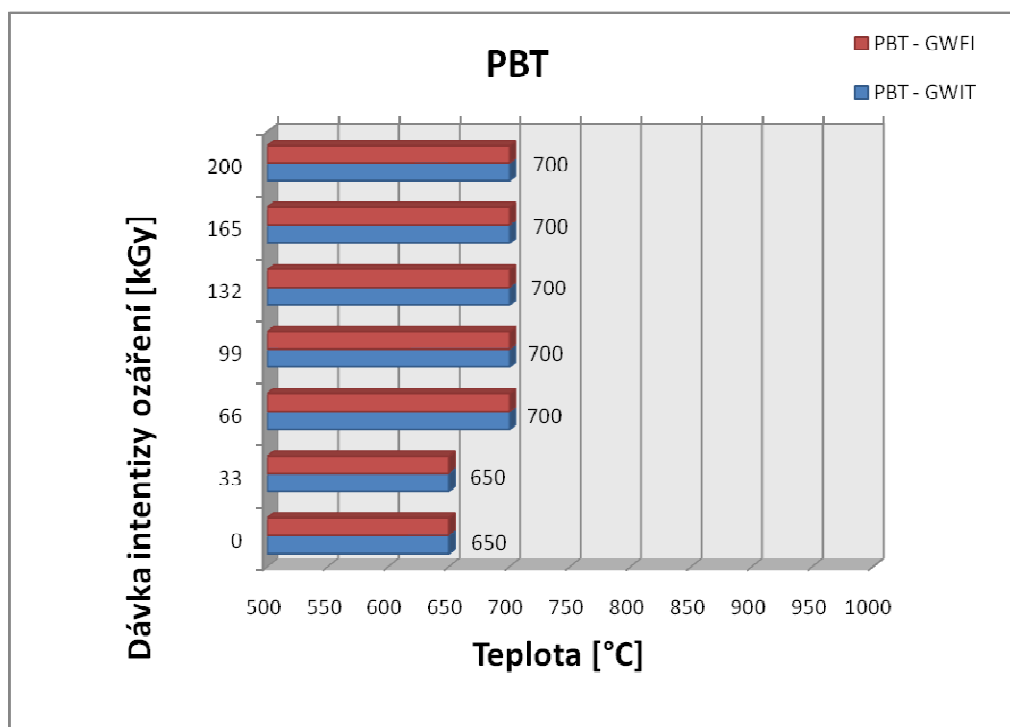
U sledovaného neozářeného materiálu č. 1. PBT., docházelo u vyšších teplot při kontaktu se žhavou smyčkou k zapálení a po rozhoření také k odkapávání roztaveného materiálu. Po oddálení tělíška od hrotu smyčky plameny neuhaslý do stanoveného limitu (viz. protokol z měření Tab. 5.). Při teplotě 650 °C byly splněny všechny potřebné kritéria (viz. norma ČSN EN 60695-2-12:2000) a byla zapsána hodnota indexu hořlavosti **GWFI: 650/0,8**. Podmínky pro splnění indexu zapalitelnosti (viz. norma ČSN EN 60695-2-13:2000) byly splněny při též teplotě a tedy naměřený index (teplota) zapalitelnosti tohoto materiálu byl zjištěn - **GWIT: 675/0,8**.

Při testování ozářených zkušebních tělísek vykazovali vzorky spolu s vyšší dávkou intenzity záření stále nižší tendenci vytvářet plamen a materiál se spíše postupně odtavoval. Hodnota času  $t_i$  (čas, který uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do zapálení destičky nebo specifikované podložky) postupně stoupala, až při teplotě 700 °C nevzplanul vzorek vůbec.

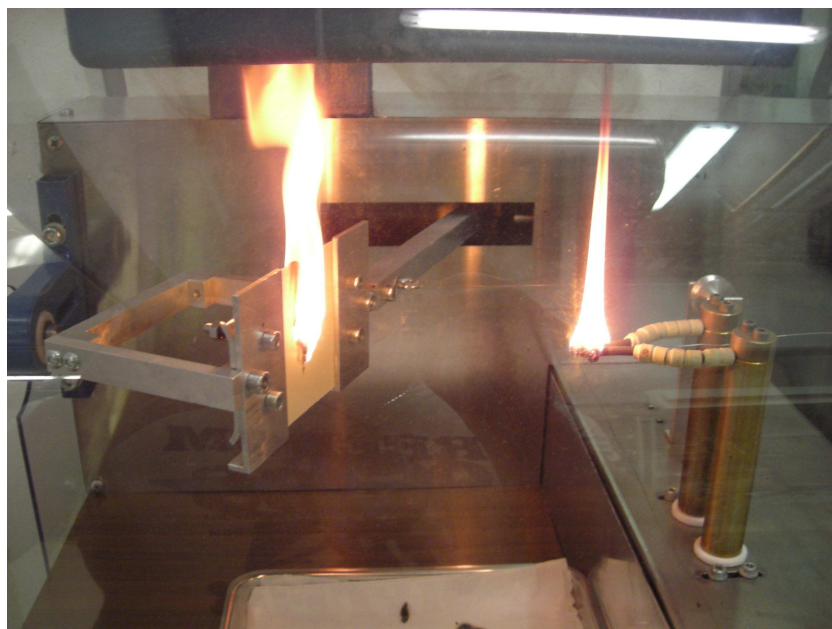
Včetně nižší tendence vzplanutí, vykazoval vzorky také čím dál nižší schopnost téci a zapalovat specifikovanou podložku z hedvábného balicího papíru umístěnou pod vzorkem.

Spolu se zvyšující se dávkou intenzity záření, vydržel materiál vyšší teplotní namáhání, až se indexy hořlavosti a zapalitelnosti ustálily na hodnotách **GWFI: 700/0,8** a **GWIT: 675/0,8**.

Výška plamene dosahovala při zapálení vzorku v 90 % případů více než 100 mm a nijak nekorespondovala s měnícími se dávkami intenzity záření zkušebních tělísek.



Obr. 28. Výsledný graf PBT pro zkoušku GWFI a GWIT

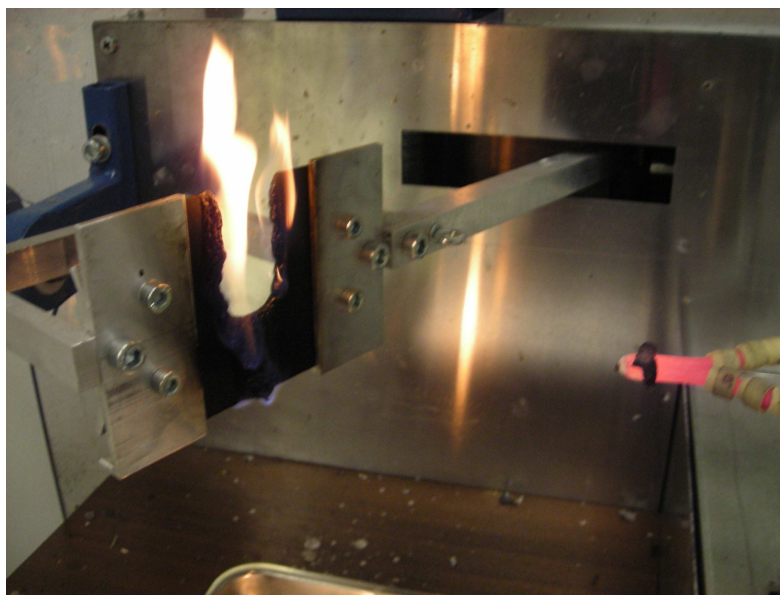


Obr. 29. Hoření neozářeného tělíška z PBT při 900 °C

### 8.6.2 PA 6

U sledovaného neozářeného materiálu č. 2. PA 6., docházelo u vyšších teplot při kontaktu se žhavou smyčkou k zapálení a po rozhoření (stejně jako u materiálu č. 1.)

také k odkapávání roztaveného materiálu. Po oddálení tělíška od hrotu smyčky plameny neuhasly do stanoveného limitu. Při teplotě 650 °C byly splněny všechny potřebné kritéria (viz. norma ČSN EN 60695-2-12:2000) a byla zapsána hodnota indexu hořlavosti **GWFI: 650/0,8**. Podmínky pro splnění indexu zapalitelnosti (viz. norma ČSN EN 60695-2-13:2000) byly splněny při též teplotě a tedy naměřený index (teplota) zapalitelnosti tohoto materiálu byl zjištěn - **GWIT: 675/0,8**.



*Obr. 30. Hoření neozářeného tělíška z PA 6 při 900 °C*

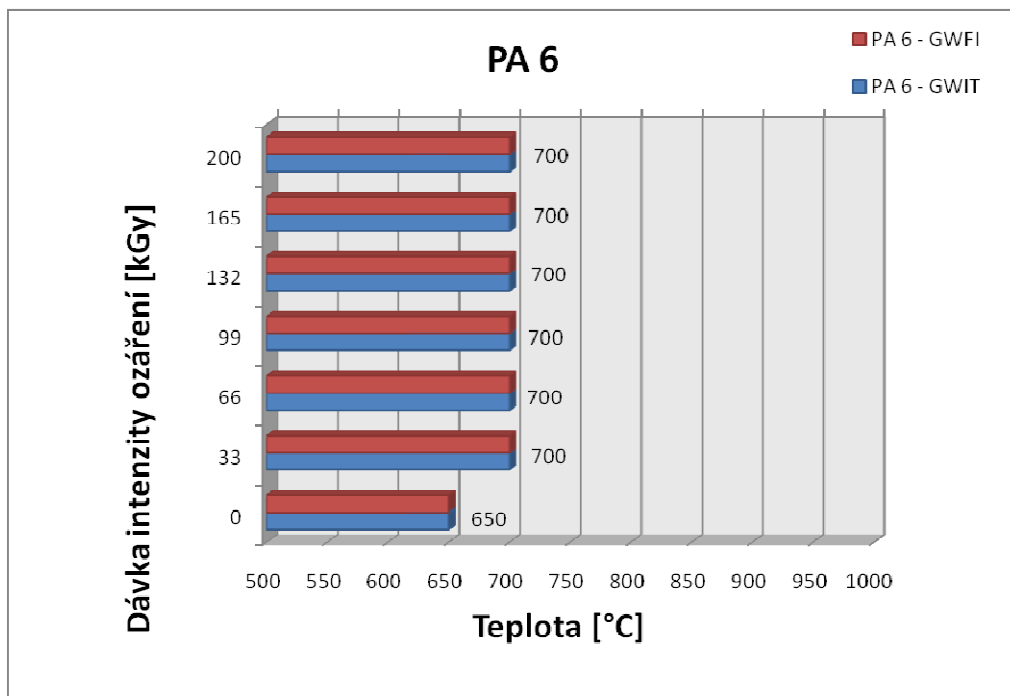
Při testování ozářených zkušebních tělíšek vykazovali vzorky spolu s vyšší dávkou intenzity záření stále nižší tendenci vytvářet plamen a materiál se spíše postupně odtavoval. Hodnota času  $t_i$  (čas, který uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do zapálení destičky nebo specifikované podložky) postupně stoupala, až při teplotě 700 °C nevzplanul vzorek vůbec.

Včetně nižší tendence vzplanutí se u vzorků, které byly ozářeny (a to již při dávce ozáření 33 kGy) nevyskytovalo odkapávání hořícího materiálu a podložka z hedvábného balicího papíru umístěná pod vzorkem již nebyla ohrožena možným vzplanutím.

Zatím co u PBT se při vyšších dávkách intenzity záření odkapávání ohořelého zbytku pouze (leč výrazně) snížilo, PA 6 vykazuje známky naprostého potlačení odkapávání ohořelého zbytku, a to již při 33 kGy.



Výška plamene dosahovala při první zkušební teplotě (850 °C) hodnot vyšších než 100 mm. Při postupném snižování teploty klesala výška plamene vždy o 10 až 15 mm při jednom snížení.

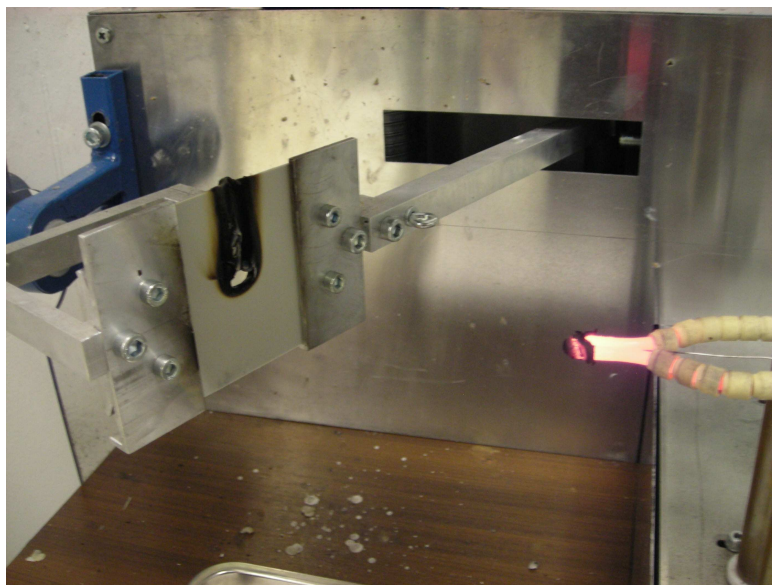


Obr. 31. Výsledný graf PA6 pro zkoušku GWFI a GWIT

### 8.6.3 PA 6.6

U sledovaného neozářeného materiálu č. 3. PA 6.6, docházelo u vyšších teplot při kontaktu se žhavou smyčkou k zapálení, avšak po rozhoření již nedocházelo k odkapávání roztaveného materiálu. Při oddálení tělíska od hrotu smyčky uhasly plameny ve stanoveném limitu. Při první zkušební teplotě (960 °C) byly tedy splněny všechny potřebné kritéria (viz. norma ČSN EN 60695-2-12:2000) a byla zapsána hodnota indexu hořlavosti **GWFI: 960/0,8**. Podmínky pro splnění indexu zapalitelnosti (viz. norma ČSN EN 60695-2-13:2000) byly však splněny až při teplotě 700 °C a tedy naměřený index (teplota) zapalitelnosti tohoto materiálu byl zjištěn - **GWIT: 725/0,8**.

Spolu se zvyšující se dávkou intenzity záření se hodnota času  $t_e$  (doba, která uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do okamžiku, kdy plameny během doby působení nebo po jejím uplynutí uhasnou) stále navyšovala a plamen vykazoval stále nižší schopnost po oddálení uhasínat.



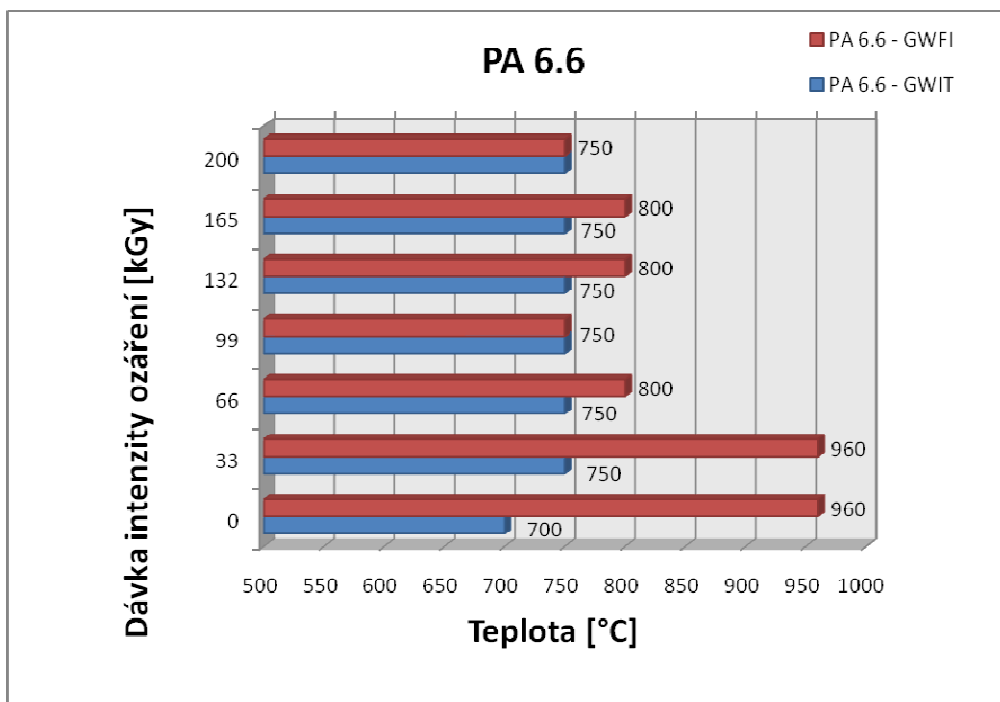
*Obr. 32. Ohořelý zbytek tělíška z PA 6.6 při 900 °C ozářen  
132 kGy*

Při testování ozářených zkušebních tělísek vykazovali vzorky spolu s vyšší dávkou intenzity záření stále nižší tendenci vytvářet plamen a materiál se spíše postupně odtavoval. Hodnota času  $t_i$  (čas, který uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do zapálení destičky nebo specifikované podložky) postupně stoupala, až při teplotě 750 °C nevzplanul vzorek vůbec.

Tento materiál vykazoval v každém z měření nulové známky odkapávání nebo tečení ohořelého materiálu.

Výška plamene dosahovala při první zkušební teplotě (960 °C) hodnot vyšších než 100 mm. Při postupném snižování teploty klesala výška plamene skokově a nelineárně. Avšak ve srovnání s materiály 1 a 2, kdy výška plamene neklesla pod 70 mm, u tohoto materiálu se výška plamene při poslední teplotě, kdy materiál ještě vzplanul a nevyhověl tedy GWIT pohybovala v rozmezí 35 až 70 mm.

Ze všech těchto charakteristik lze tedy vyčíst, že materiál vykazuje nižší schopnost hoření.



Obr. 33. Výsledný graf PA 6.6 pro zkoušku GWFI a GWIT

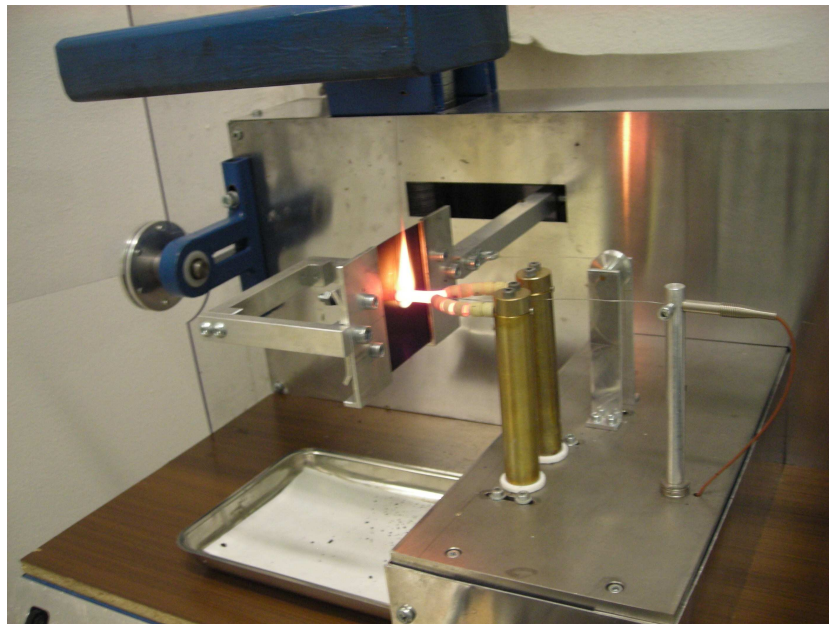
#### 8.6.4 PA 6.6/6 COPO

U sledovaného neozářeného materiálu č. 4. PA 6.6/6 COPO, docházelo u vyšších teplot při kontaktu se žhavou smyčkou k zapálení, avšak po rozhoření nedocházelo k odkapávání roztaveného materiálu. Při oddálení tělíška od hrotu smyčky uhasly plameny vždy ve stanoveném limitu. Při první zkušební teplotě (960 °C) byly tedy splněny všechny potřebné kritéria (viz. norma ČSN EN 60695-2-12:2000) a byla zapsána hodnota indexu hořlavosti **GWFI: 960/0,8**. Podmínky pro splnění indexu zapalitelnosti (viz. norma ČSN EN 60695-2-13:2000) byly však splněny až při teplotě 700 °C a tedy naměřený index (teplota) zapalitelnosti tohoto materiálu byl zjištěn - **GWIT: 725/0,8**.

Hodnota indexu GWFI ve všech případech (nezávisle na dávce ozáření) stanula na první nejvyšší zkušební teplotě 960 °C.

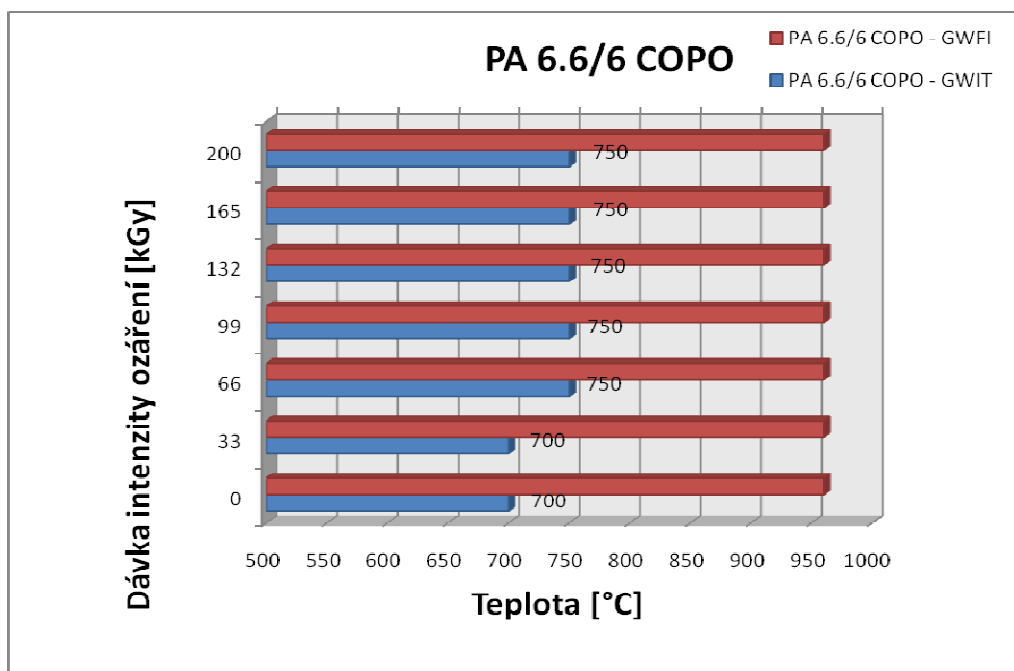
Při testování ozářených zkušebních tělíšek vykazovali vzorky spolu s vyšší dávkou intenzity záření stále nižší tendenci vytvářet plamen a materiál se spíše postupně odtavoval. Hodnota času  $t_i$  (čas, který uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do zapálení destičky nebo specifikované podložky) postupně stoupala, až při teplotě 750 °C nevzplanul vzorek vůbec. Na rozdíl od materiálu č. 3., materiál č. 4. snáší vyšší dávky tepelného na-

máhání podstatně lépe a má sníženou tendenci hořet. Tento materiál vykazoval v každém z měření nulové známky odkapávání nebo tečení ohořelého materiálu.

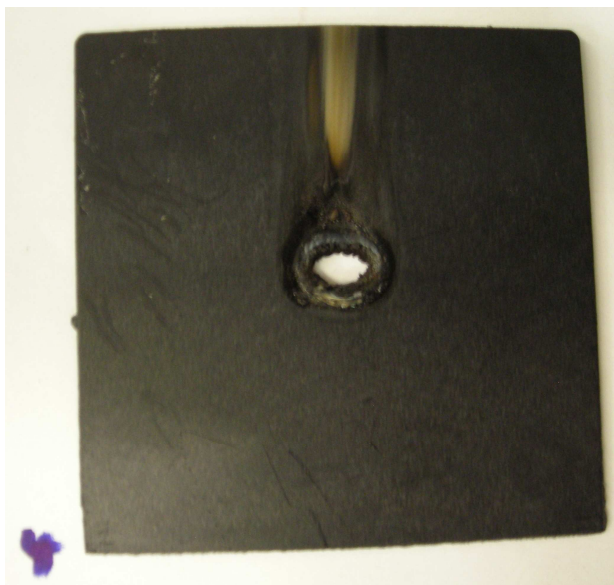


Obr. 34. Hoření ozářeného tělíška z PA 6 při 900 °C, 198 kGy

Výška plamene dosahovala při první zkušební teplotě (960 °C) maximální hodnoty 85 mm. Při postupném snižování teploty klesala výška plamene vždy o 5 až 20 mm a to až na 30 mm. Po sumarizaci všech faktů lze tedy tvrdit, že ve srovnání s předchozími typy materiálů, se PA 6.6/6 COPO vykazuje nejnižší hořlavostí.



Obr. 35. Výsledný graf PA 6.6/6 COPO pro zkoušku GWFI a GWIT



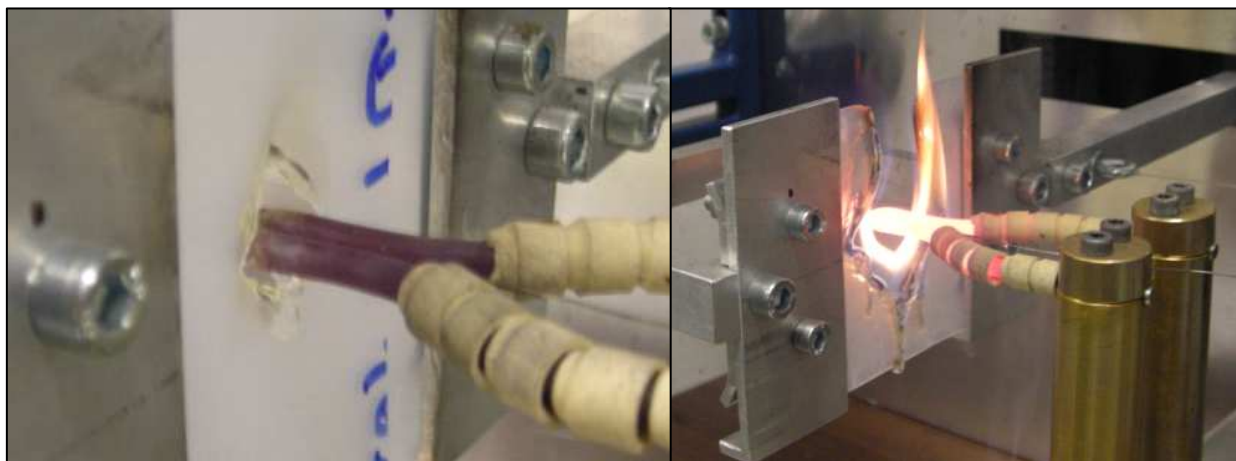
Obr. 36. Vzorek PA 6.6/6 COPO, který vyhověl  
GWIT, 750°C, 198 kGy

### 8.6.5 LDPE

U sledovaného neozářeného (ale také ozářeného) materiálu č. 5. LDPE, docházelo u vyšších teplot při kontaktu se žhavou smyčkou ke krátkodobému vzplanutí, poté plamen uhasnul a až po určité době plamen opět znovu vzplanul. Poté došlo také k odkapávání roztaveného materiálu. Po oddálení tělíska od hrotu smyčky plameny neuhaslý do stanoveného limitu. Při teplotě 750 °C byly splněny všechny potřebné kritéria (viz. norma ČSN EN 60695-2-12:2000) a byla zapsána hodnota indexu hořlavosti **GWFI: 750/0,8**. Podmínky pro splnění indexu zapalitelnosti (viz. norma ČSN EN 60695-2-13:2000) byly splněny při též teplotě a tedy naměřený index (teplota) zapalitelnosti tohoto materiálu byl zjištěn - **GWIT: 775/0,8**.

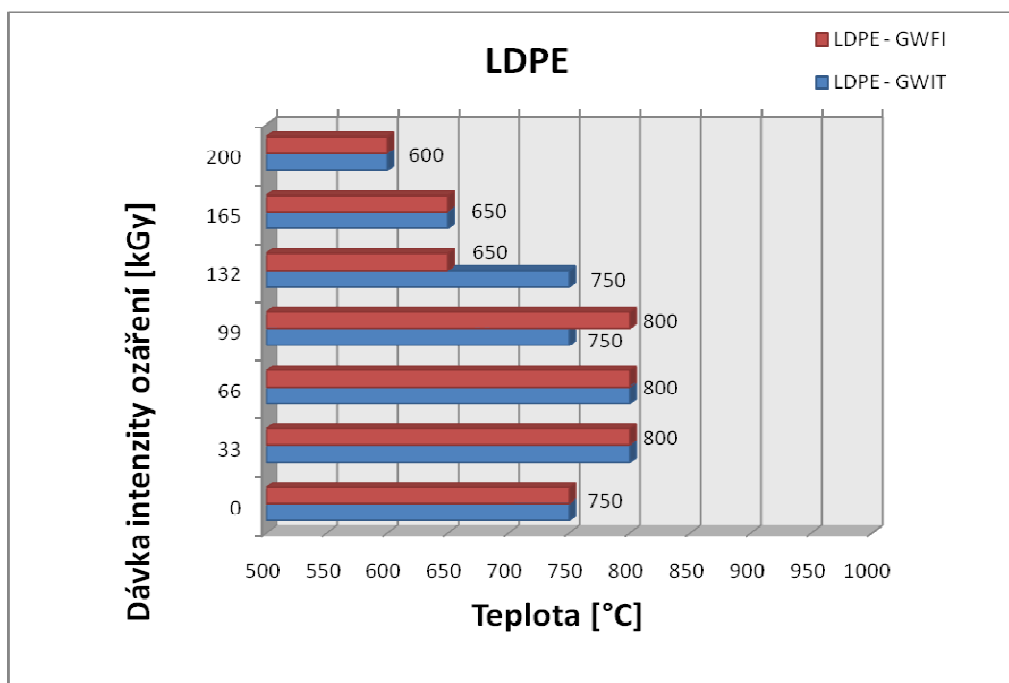
Při testování ozářených zkušebních tělísek vykazovali vzorky spolu s vyšší dávkou záření z počátku stále nižší tendenci vytvářet plamen a materiál se spíše postupně odtavoval. Hodnota času  $t_i$  (čas, který uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do zapálení destičky nebo specifikované podložky) postupně stoupala až na hodnotu 800 °C při dávce intenzity záření 66 kGy.

Se zvyšující se dávkou intenzity záření však začal materiál hůře snášet tepelné namáhání a u vzorků ozářených 198 kGy bylo zaznamenáno **GWFI 600/0,8** a **GWIT 625/0,8**.



Obr. 37. Vzorek – 198 kGy, 600°C, který vyhověl GWIT a vzorek – 198 kGy, 900 °C, který nevyhověl GWIT

Tento jev lze přisoudit příliš vysoké dávce intenzity záření. Do 66 kGy materiál vykazoval vyšší schopnost odolávat tepelnému zatížení. Po překročení této hodnoty intenzity záření projevil materiál nižší tendenci odtavení materiálu v oblasti kontaktu žhavé smyčky a zkušební vzorku, což se projevilo vyšším nashromážděním tepelné energie v této oblasti a tedy i vyšší hořlavostí. Včetně odkapávání ohořelého zbytku se materiál vykazoval také tvorbou vlákn.



Obr. 38. Výsledný graf LDPE pro zkoušku GWFI a GWIT

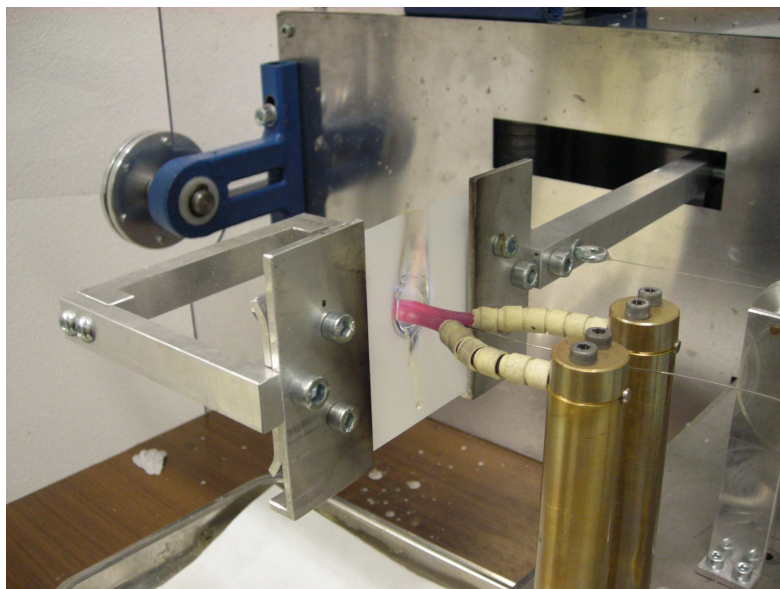
Maximální výška plamenu se pohybovala (při vyšších teplotách) od více než 100 mm až po 30 mm (u minimálních teplot) a to zcela nelineárně a nepravidelně.

Celkově by se dalo tvrdit, že při dávce intenzity záření od 33 do 66 kGy vykazuje LDPE nejnižší hořlavost ze všech šesti použitých materiálů.

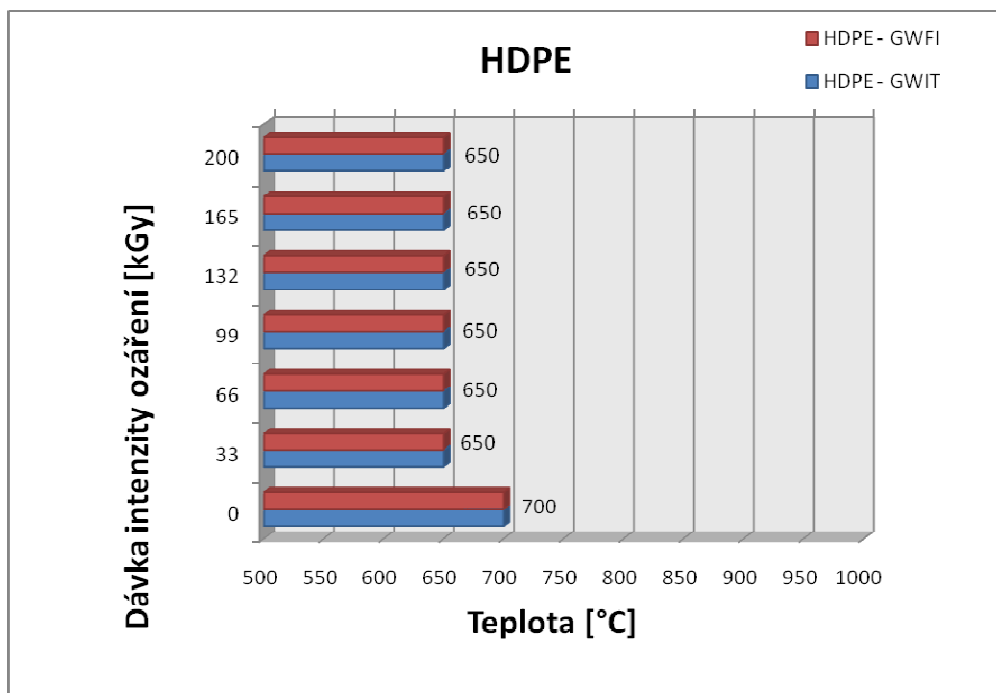
### 8.6.6 HDPE

U sledovaného neozářeného (ale také ozářeného) materiálu č. 5. LDPE, docházelo u vyšších teplot při kontaktu se žhavou smyčkou ke krátkodobému vzplanutí, poté plamen uhasnul a až po určité době plamen opět znovu vzplanul. Poté došlo také k odkapávání roztaveného materiálu, včetně tvorby vlákna. Po oddálení tělíska od hrotu smyčky plameny neuhaslý do stanoveného limitu. Při teplotě 700 °C byly splněny všechny potřebné kritéria (viz. norma ČSN EN 60695-2-12:2000) a byla zapsána hodnota indexu hořlavosti **GWFI: 700/0,8**. Podmínky pro splnění indexu zapalitelnosti (viz. norma ČSN EN 60695-2-13:2000) byly splněny při též teplotě a naměřený index (teplota) zapalitelnosti tohoto materiálu byl tedy zjištěn - **GWIT: 725/0,8**.

Při testování ozářených zkušebních tělísek vykazovali všechny vzorky nižší schopnost odolávat tepelnému zatížení v porovnání s tělísky neozářenými. Hodnota indexů GWFI i GWIT se ustálila na hodnotách **GWFI: 650/0,8** a **GWIT: 650/0,8**.



Obr. 39. Hoření neozářeného tělíska z HDPE při 850 °C, 132 kGy



Obr. 40. Výsledný graf HDPE pro zkoušku GWFI a GWIT

V tomto případě tedy není ozařování materiálu v rámci zvýšení tepelné odolnosti žádoucí. Na rozdíl od materiálu č. 5. LDPE, který vykazuje při nižších hodnotách intenzity záření nižší hořlavost.

Neozářený materiál vykazoval vyšší schopnost odolávat tepelnému zatížení. U ozářených zkušebních tělísek byla zaznamenána nižší tendence odtavení materiálu v oblasti kontaktu žhavé smyčky a zkušebního vzorku, což se projevilo vyšším nashromážděním tepelné energie v této oblasti a tedy i vyšší hořlavostí.

Hodnota času  $t_i$  (čas, který uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do zapálení destičky nebo specifikované podložky) postupně stoupala, až při teplotě 650 °C ne-  
vzplanul zkušební vzorek vůbec.

Maximální výška plamenu se pohybovala (při vyšších teplotách) od více než 80 mm až po 50 mm (u minimálních teplot) nezávisle na dávce intenzity záření.



### 8.6.7 Celková sumarizace

Diskuze výsledků je zaznamenána vždy u každého ze zkoušených materiálů. Celkově je možné konstatovat, že v porovnání ozářený – neozářený vyšel nejlépe ve zkoušce hořlavosti materiál LDPE.

Tento materiál vykazuje již při dávce intenzity záření 33 kGy nejvyšší tepelnou odolnost ze všech zkoušených materiálů. Nevýhodou tohoto materiálu pokud vzplane, je však tvorba vlákna a odkapávání ohořelého zbytku, jenž může mít za následek vznik požáru.

Velmi uspokojivě působí materiál PA 6.6/6 COPO, který splnil kritéria pro index hořlavosti na 960 °C, a to u neozářeného materiálu i u zkušebních vzorků, jež byly ozářeny všemi dávkami intenzity záření. Index zapalitelnosti je sice o 50 °C nižší než u HDPE, ale na rozdíl od tohoto materiálu, PA 6.6/6 COPO při zapálení netvoří vlákno a neodkapává z něj ohořelý zbytek, jež by mohl způsobit požár.

Na druhé straně, zcela nevhodný z hlediska snížení hořlavosti vlivem působení ionizačního záření, působí materiál č. 6 HDPE. Neozářený zkušební vzorek vykazuje při zkoušce hořlavosti žhavou smyčkou nižší hořlavost, než jakýkoliv zkušební vzorek ozářený dávkou intenzity záření na stupnici 33 až 198 kGy. V tomto případě tedy není ozařování materiálu v rámci zvýšení tepelné odolnosti žádoucí.


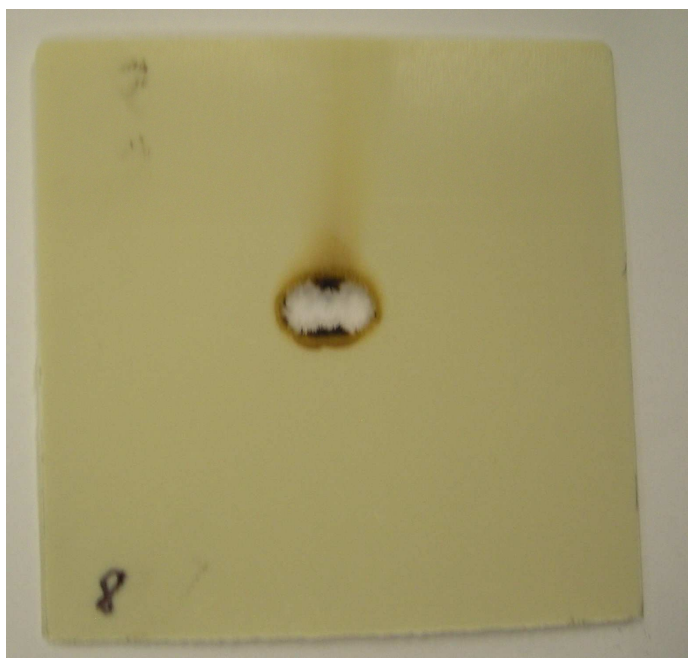
Obecně výsledky zkoušky umožňují provést relativní porovnání různých materiálů podle jejich schopnosti uhasit plameny po oddálení elektricky zahřáté žhavé smyčky a podle jejich schopnosti netvořit plamenně hořící nebo žhnoucí částičky schopné rozšířit oheň na specifikovanou podložku z hedvábného balicího papíru umístěnou pod vzorkem. Zkušební metoda neplatí pro stanovení hořlavosti kompletních zařízení, protože hořlavost použitých materiálů je silně ovlivněna rozměry izolačních systémů nebo hořlavých částí, konstrukcí a přenosem tepla na sousední kovové nebo nekovové části atd. [7]

## 8.7 Návrh identifikačního protokolu

Pro zefektivnění a zvýšení kvality měření byl navržen pomocný identifikační protokol, do něhož lze zaznamenat zajímavé průvodní jevy vzniklé během zkoušky, jako například zabarvení plamene, vliv žáru na vzorek, zdali materiál teče, čadí, vytváří zase apod. Protože se jedná o vizuální zkoušku, je také možné do protokolu vložit snímek zkušebního

vzorku, který nejlépe poslouží pro získání představy o průběhu zkoušky a vlivu plamene na vzorek.

Tab. 8. Návrh doplňkového identifikačního protokolu

Identifikační protokol							
Charakteristické rysy zkoušeného materiálu	Rozsah teplot pro praktické využití bez ozáření: -30 až 165 °C,						
	modul pružnosti E = 2300 MPa, mez pevnosti 60 MPa,						
	zpracování: zejména vstřikování, vlákna i fólie.						
Poznámky či důležité poznatky zjištěné při měření	Barva kouře při kontaktu žhavé smyčky s tělískem bílá, při prohoření černá.						
	Ozářená zkušební tělíska vykazují nižší hořlavost a s narůstající dávkou intenzity záření se zvyšuje hodnota času $t_i$						
Snímky zkušebních těles							
Materiál	Ozáření [kGy]	Teplota smyčky [°C]	Materiál	Ozáření [kGy]	Teplota smyčky [°C]		
PBT	0	700	PBT	198	700		
							
Sekundární informace							
Vliv záru na vzorek (mimo plamen)			Zabarvení				
Čadí		Zhasíná	Materiál teče		Jádro plamene	Základna plamene	
Ozáření [kGz]		Ozáření [kGz]	Ozáření [kGz]		jasně oranžové	modrá	
0	198	0	198	0			198
Ano	Ano	NE	NE	ANO			NE
Vytváří saze		Vytváří vlákno		Zápach dýmu	Ohořelý zbytek		
ANO		NE		-	zuhelnatělý, křehký		

## ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo porovnání hořlavosti vybraných typů polymerních materiálů modifikovaných radiačním sít'ováním.

Teoretická část diplomové práce obecně charakterizovala polymerní materiály a jejich modifikace. Dále pojednávala o ionizačním záření a následném radiačním sít'ování, při čemž také vysvětlila základy hořlavosti polymerů.

Praktická část diplomové práce byla zaměřena na porovnání hořlavosti několika druhů ozářených polymerů s polymery neozářenými.

Jednalo se o zkoušku hořlavosti žhavou smyčkou a měření probíhalo dle norem ČSN EN 60695-2-10:2000, ČSN EN 60695-2-11:2000, ČSN EN 60695-2-12:2000 a ČSN EN 60695-2-13:2000.

Zkušební vzorky byly navrženy z těchto materiálů: PBT, PA 6, PA 6.6, PA 6.6/6 COPO, LDPE a HDPE. Zhotoveny byly vstřikováním na vstřikovacím stroji ARBURG 420C Allrounder Advanced a poté ozářeny  $\beta$  zářením, energií 10 MeV, dávkou 33, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy ve firmě BGS Beta-Gamma Service GmbH & Co. KG, Industriestraße 9, Saal am Donau, Deutschland.

Poté probíhalo samotné měření hořlavosti pomocí žhavé smyčky, ve kterém nás nejvíce zajímalo zjištění indexu hořlavosti (GWFI) a indexu zapalitelnosti (GWIT). Všechny naměřené hodnoty byly zaznamenány do daných protokolů. Poté proběhl rozbor a diskuze výsledků a naměřených veličin.

Pro optimalizaci celkové sumarizace výsledků by bylo vhodné otestovat ozářená zkušební tělíska na stupeň zesítnění a penetraci. Z časových důvodů však nebylo možné testy provést.

Posledním z cílů bylo navrhnout identifikační protokol, zaznamenávající průběh zkoušky, jenž by mohl být užitečný při pozdější sumarizaci výsledků měření.

Protokol byl navržen v rámci zefektivnění a lepší vizualizace průběhu celé zkoušky hořlavosti žhavou smyčkou a to včetně možnosti vkládání snímků a popisu celého průběhu měření.

Rozbor a diskuze výsledků jsou diskutovány v celkové sumarizaci.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] STEPHEN DAVIDSON. *Exploring the Science: Technology and Applications of U.V. and E.B Curing*. Londond UK: Sita Technology Limited, 1999, 289 s.
- [2] F. A. MAKHLIS. *Radiation Physics and Chemisty of Polymers*. Israel: Keter Publishing House Jerusalem Ltd., 1975, 287 s.
- [3] WOODS, R. a A. PIKAEV. *Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing*. New Jersey: A John Wiley & sons, 1994, 535 s.
- [4] VLOUGH, R.L. a S.W. SHALABY. *Radiation Effects on Polymers*. Washington DC: American Chemical Society, 1991, 633 s.
- [5] BETZ, N., A. LE MOEL a J.-J. PIREAUX. *Ionizing Radiation & Polymers*. Belgium: Elsevier, 2005, 634 s.
- [6] CLELAND, M, A SINGH a Joseph SILVERMAN. *Radiation processing of polymers*. New York: Distributed in the U.S.A. and in Canada by Oxford University Press, 1992, 377 s. ISBN 34-461-5784-0.
- [7] HAVRAN, Lukáš. *Vliv radiačního síťování na hořlavost vybraných typů polymerů*. Zlín, 2011. 90 s. Diplomová práce. UTB Zlín.
- [8] LYON, Richard E. ; JANSSENS, Marc L. . *Polymers Flammability : Final report*. In . Office of Aviation Research Washington, D.C. Washington, D.C. : [s.n.], 2005. 82 s.
- [9] MÜNSTER, Lukáš. *Modifikace hořlavosti polymerních materiálů a hodnocení efektivity těchto modifikací*. Zlín, 2011. 57 s. Bakalářská práce. UTB Zlín.
- [10] VÁLEK, Roman. *Recyklace radiačně síťovaných polyolefinů*. Zlín, 2011. 82 s. Diplomová práce. UTB Zlín.
- [11] LAMBOROVÁ, Romana. *Recyklace ozářených polymerů*. Zlín, 2009. 95 s. Diplomová práce. UTB Zlín.
- [12] MIZERA, Aleš. *Teplotní odolnost vybraných polymerů*. Zlín, 2011. 171 s. Diplomová práce. UTB Zlín
- [13] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-708-0617-6.

- [14] PŘIKRYL, Martin. *Vliv ozařování na vlastnosti polyamidů*. Zlín, 2008. 142 s. Diplomová práce. UTB Zlín
- [15] ČSN EN 60695-2-10. *Zkoušky Žhovou/horkou smyčkou : Zařízení pro zkoušky Žhovou smyčkou a společný zkušební postup*. [s.l.] : [s.n.], Listopad 2001. 16 s.
- [16] ČSN EN 60695-2-11. *Zkoušky Žhovou/horkou smyčkou : Zkouška hořlavosti konečných výrobků žhovou smyčkou*. [s.l.] : [s.n.], Listopad 2001. 11 s.
- [17] ČSN EN 60695-2-12. *Zkoušky Žhovou/horkou smyčkou : Zkouška hořlavosti materiálů žhovou smyčkou*. [s.l.] : [s.n.], Listopad 2001. 9 s.
- [18] ČSN EN 60695-2-13. *Zkoušky Žhovou/horkou smyčkou : Zkouška zapalitelnosti materiálů žhovou smyčkou*. [s.l.] : [s.n.], Listopad 2001. 9 s.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PE	Polyetylen
PP	Polypropylen
PA	Polyamid
PVC	Polyvinylchlorid
PS	Polystyren
POM	Polyoxymetylen
PBT	Polybutylentereftalát
HDPE	Vysokohustotní polyetylen
LDPE	Nízkohustotní polyetylen
SAN	Kopolymer styren-akrylonitril
PUR	Polyuretan
PMMA	Polymethylmetakrylát
PTFE	Polytetrafluoretylen
PES	Polyfenylsulfid
LCP	Liquid crystals
$T_g$	Teplota skelného přechodu [°C]
$T_m$	Teplota tání [°C]
$\alpha$	Alfa záření
$\beta$	Beta záření
$\gamma$	Gama záření
C	Uhlík
H	Vodík
$G_y$	Grey – jednotka intenzity ozáření
K	Kelvin – jednotka tepla

---

°C	Celsius – jednotka tepla
s	Sekunda – jednotka času
mm	Milimetr – jednotka míry
eV	Elektronvolt – dříve používaná jednotka energie
GF	Skelné vlákno – plnivo
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní norma

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Rozdělení polymerů .....</i>	12
<i>Obr. 2. Rozdělení polymerů dle aplikace [6] .....</i>	13
<i>Obr. 3. Rozdělení plastů dle původu [7], [11] .....</i>	14
<i>Obr. 4. Makromolekulární řetězce – a) lineární, b) rozvětvený, c) plošně a d) prostorově síťovaný [7] .....</i>	15
<i>Obr. 5. Průběh deformace amorfního a krystalického polymeru v závislosti na teplotě.....</i>	16
<i>Obr. 6. Obecný graf teplotní závislosti mechanických vlastností polymerů .....</i>	17
<i>Obr. 7. Chemická značka polyamidu .....</i>	17
<i>Obr. 8. Schéma vzniku sítě [12].....</i>	22
<i>Obr. 9. Hlavní a vedlejší štěpení-degradace polymeru [14] .....</i>	25
<i>Obr. 10. Schéma radiačního síťování [11].....</i>	27
<i>Obr. 11. Síťování PE elektronovým zářením .....</i>	28
<i>Obr. 12. Obecný graf vlastností polymerů v závislosti na dávce ozáření [7] .....</i>	28
<i>Obr. 13. Stupeň hořlavosti vybraných polymerů [9] .....</i>	31
<i>Obr. 14. Fyzikální a chemický proces při hoření polymerů [7] .....</i>	32
<i>Obr. 15. Profil viskozity, teploty a hustoty hoření [7].....</i>	34
<i>Obr. 16. Fenomenologie hoření polymerů [7] .....</i>	35
<i>Obr. 17. Simulace průběhu zkoušky žhavou smyčkou [7] .....</i>	37
<i>Obr. 18. Rozměry zkušebního tělíska.....</i>	40
<i>Obr. 19. Vstřikovací stroj ARBURG 420C Allrounder Advanced.....</i>	40
<i>Obr. 20. Linka pro ozářování ve firmě BGS.....</i>	43
<i>Obr. 21. Příprava zkušebních tělísek pro ozáření .....</i>	44
<i>Obr. 22. Zkušební tělíska přichystaná k hromadnému ozáření .....</i>	44
<i>Obr. 23. Schéma žhavé smyčky [15].....</i>	49
<i>Obr. 24. Regulátor teploty E-therm 2404 [7].....</i>	50
<i>Obr. 25. Zařízení pro zkoušku žhavou smyčkou [7] .....</i>	51
<i>Obr. 26. Schéma principu zkoušky žhavou smyčkou [7] .....</i>	55
<i>Obr. 27. Schematický průběh zkoušky žhavou smyčkou [7] .....</i>	56
<i>Obr. 28. Výsledný graf PBT pro zkoušku GWFI a GWIT.....</i>	63
<i>Obr. 29. Hoření neozářeného tělíska z PBT při 900 °C .....</i>	63
<i>Obr. 30. Hoření neozářeného tělíska z PA 6 při 900 °C .....</i>	64



---

<i>Obr. 31. Výsledný graf PA6 pro zkoušku GWFI a GWIT .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 32. Ohořelý zbytek tělíska z PA 6.6 při 900 °C ozářen 132 kGy.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 33. Výsledný graf PA 6.6 pro zkoušku GWFI a GWIT .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 34. Hoření ozářeného tělíska z PA 6 při 900 °C, 198 kGy.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 35. Výsledný graf PA 6.6/6 COPO pro zkoušku GWFI a GWIT .....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 36. Vzorek PA 6.6/6 COPO, který vyhověl GWIT, 750°C, 198 kGy.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 37. Vzorek – 198 kGy, 600°C, který vyhověl GWIT a vzorek – 198 kGy, 900 °C, který nevyhověl GWIT .....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 38. Výsledný graf LDPE pro zkoušku GWFI a GWIT .....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 39. Hoření neozářeného tělíska z HDPE při 850 °C, 132 kGy .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 40. Výsledný graf HDPE pro zkoušku GWFI a GWIT.....</i>	<i>72</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C .....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 2. Materiály zvolené pro vstřikování .....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 3. Procesní podmínky jednotlivých materiálů při vstřikování .....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 4. Stupně přesnosti zkoušky [18] .....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 5. Vyhodnocení zkoušky pro materiál č. 1., norma ČSN EN 60695-2-11:2000. ....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 6. Vyhodnocení zkoušky pro materiál č. 1., norma ČSN EN 60695-2-12:2000. ....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 7. Vyhodnocení zkoušky pro materiál č. 1., norma ČSN EN 60695-2-13:2000. ....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 8. Návrh doplňkového identifikačního protokolu .....</i>	<i>74</i>

**SEZNAM PŘÍLOH**

PŘÍLOHA I	CERTIFIKÁT OZÁŘENÍ BGS
PŘÍLOHA II	IDENTIFIKAČNÍ PROTOKOL
PŘÍLOHA III	PROTOKOLY POPISUJÍCÍ PRŮBĚH JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK (přiloženo pouze na CD)
PŘÍLOHA IV	MATERIÁLOVÉ LISTY PTS (přiloženo pouze na CD)
PŘÍLOHA V	SNÍMKY ZKOUŠEBNÍCH TĚLÍSEK (přiloženo pouze na CD)

# PŘÍLOHA I: CERTIFIKÁT OZÁŘENÍ BGS

## Zertifikat

## BGS

IDEEN PLUS ENERGIE

BGS John-Deere-Str. 3 76646 Bruchsal  
BGS  
Beta-Gamma-Service GmbH  
John-Deere-Str. 3  
76646 Bruchsal

Kunden-Nr. : 200409  
Datum : 25.04.2012  
Seite : 1 von 2

### Zertifikats-Nr.: 32201790

BGS-Auftrags-Nr.: 322.01394.01  
Ihre Best.: Uni Zlin vom 24.04.2012  
Artikel: Zugstäbe  
Charge: Zugstäbe  
Strahlenart: ELEKTRONEN  
Energie [MeV]: 10,00  
Geforderte Minimaldosis [kGy]: 33,00  
Bestrahlt am: 24.04.2012  
gemessene Oberflächendosis [kGy]: 38,7

1 x

BGS-Auftrags-Nr.: 322.01394.02  
Ihre Best.: Uni Zlin vom 24.04.2012  
Charge: Zugstäbe  
Artikel: Zugstäbe  
Strahlenart: ELEKTRONEN  
Energie [MeV]: 10,00  
Geforderte Minimaldosis [kGy]: 66,00  
Bestrahlt am: 24.04.2012

1 x

BGS-Auftrags-Nr.: 322.01394.03  
Ihre Best.: Uni Zlin vom 24.04.2012  
Charge: Zugstäbe  
Artikel: Zugstäbe  
Strahlenart: ELEKTRONEN  
Energie [MeV]: 10,00  
Geforderte Minimaldosis [kGy]: 99,00  
Bestrahlt am: 24.04.2012

1 x

BGS-Auftrags-Nr.: 322.01394.04  
Ihre Best.: Uni Zlin vom 24.04.2012  
Charge: Zugstäbe  
Artikel: Zugstäbe  
Strahlenart: ELEKTRONEN  
Energie [MeV]: 10,00  
Geforderte Minimaldosis [kGy]: 132,00  
Bestrahlt am: 24.04.2012

1 x

Bestrahlungszertifikat - Certificate of irradiation - Certificat d'irradiation  
BGS IDEEN PLUS ENERGIE BGS IDEEN PLUS ENERGIE BGS IDEEN PLUS ENERGIE



# Zertifikat

# BGS

IDEEN PLUS ENERGIE

Zertifikats-Nr.: 32201790  
Seite : 2 von 2

**BGS-Auftrags-Nr.:** 322.01394.05  
**Ihre Best.:** Uni Zlin vom 24.04.2012

Charge: Zugstäbe  
Artikel: Zugstäbe

1 x

Strahlenart: ELEKTRONEN  
Energie [MeV]: 10,00  
Geforderte Minimaldosis [kGy]: 165,00  
Bestrahlt am: 24.04.2012

**BGS-Auftrags-Nr.:** 322.01394.06  
**Ihre Best.:** Uni Zlin vom 24.04.2012

Charge: Zugstäbe  
Artikel: Zugstäbe

1 x

Strahlenart: ELEKTRONEN  
Energie [MeV]: 10,00  
Geforderte Minimaldosis [kGy]: 198,00  
Bestrahlt am: 24.04.2012

Unterschrift: Weymar, Gerda  
Qualitätssicherung

Dieses Dokument ist ohne Unterschrift gültig, da es mit einem System erzeugt wurde, das entsprechend des FDA-Guide 21 CFR Part 11 validiert wurde.

Bestrahlungszertifikat - Certificate of irradiation - Certificat d'irradiation  
BGS IDEEN PLUS ENERGIE BGS IDEEN PLUS ENERGIE BGS IDEEN PLUS ENERGIE



## PŘÍLOHA II: IDENTIFIKAČNÍ PROTOKOL

Identifikační protokol					
<b>Charakteristické rysy zkoušeného materiálu</b>					
<b>Poznámky či důležité poznatky zjištěné při mě- ření</b>					
Snímky zkušebních těles					
Materiál	Ozářen [kGy]	Teplota smyčky [°C]	Materiál	Ozářen [kGy]	Teplota smyčky [°C]
Sekundární informace					
Vliv záru na vzorek (mimo plamen)			Zabarvení		
Čadí	Zhasíná	Materiál teče	Jádro plamene	Základna plamene	
Ozářen [kGz]	Ozářen [kGz]	Ozářen [kGz]			
Vytváří saze		Vytváří vlákno		Zápach dýmu	Ohořelý zbytek