

Vliv radiačního síťování na hořlavost vybraných typů polymerů

Bc. Havran Lukáš

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš HAVRAN**

Osobní číslo: **T09685**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Vliv radiačního síťování na hořlavost vybraných typů polymerů**

Zásady pro vypracování:

- 1.) Vypracujte rešerši na dané téma
- 2.) Složení přístroje pro zkoušku žhavou smyčkou dle normy
- 3.) Ověření funkce, provedení experimentu
- 4.) Vyhodnocení výsledků měření

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zdeněk Holík

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

14. února 2011

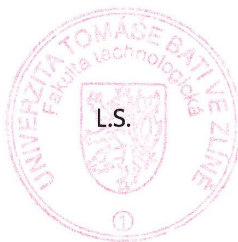
Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2011

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně, 13. 5. 2011



.....

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

(1) Vysoká škola nevýdělečně 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 nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

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

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

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

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

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

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

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

ABSTRAKT

Cílem práce je složení přístroje pro zkoušku hořlavosti žhavou smyčkou dle normy ČSN EN 60695-2-10 z dostupných dílů. Návrh konstrukce přístroje byla tématem předcházející diplomové práce. Následuje doladění přístroje a jeho zaběhnutí do provozu a samotný experiment, při kterém budeme provádět zkoušku hořlavosti na zkušebních tělíscích, které si předem připravíme a necháme ozářit (aplikovat vliv radiačního síťování). Nakonec provedeme diskuzi výsledků se závěrečným vyhodnocením.

Klíčová slova: Polyetylen (PE), polypropylen (PP), polyamid (PA), záření, síťování, hořlavost, žhavá smyčka, horká smyčka, spalovací proces, GWIT, GWFI.

ABSTRACT

The aim of this work is composed of flammability test apparatus for the glow-wire test according to standard CSN EN 60695-2-10 from the available parts. The design of the unit was the topic of diploma work last year. The following tuning device and its running-in operation and the actual experiment when we conduct a glow-wire test on specimens, which they will prepare and allow to irradiate (effects of irradiation cross-linking). Then evaluate the results.

Keywords: Polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyamide (PA), irradiation cross-linking, flammability, hot-wire, glow-wire, combustion process, GWIT, GWFI.

Poděkování patří panu Ing. Zdeňku Holíkovi za odbornou konzultaci k dané problematice a vedení při jednotlivých měření. Dále bych poděkoval Ing. Michalu Daňkovi z BGS Beta-Gamma-Service za umožnění ozáření experimentálních tělísek a také za odbornou konzultaci, co se týče vlivu radiačního síťování. Následuje Ing. Šálek, Ing. Černý a jejich odborná a manuální pomoc při doladování testovacího přístroje.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně



.....
Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 CHARAKTERIZACE POLYMERŮ	12
1.1 ROZDĚLENÍ PLASTŮ	13
1.2 MODIFIKACE POLYMERŮ	17
1.2.1 Fyzikální modifikace	17
1.2.2 Mechanochemická modifikace	18
1.2.3 Chemická modifikace	18
1.2.4 Modifikace síťováním	19
2 SÍŤOVÁNÍ	20
2.1 VÝSTAVBA SÍTĚ A JEJÍ ZPŮSOBY	20
2.2 NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ DRUHY SÍŤOVÁNÍ.....	22
2.3 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ	22
2.3.1 Měrné jednotky ozařovací techniky	24
2.3.2 Materiály pro radiační síťování.....	24
3 VLIV RADIAČNÍHO SÍŤOVÁNÍ NA VLASTNOSTI POLYMERŮ	26
3.1 SÍŤOVÁNÍ IONIZAČNÍM ZÁŘENÍM.....	26
3.1.1 Beta záření.....	27
3.1.2 Případy využití ionizačního záření.....	28
3.1.3 Zlepšení vlastností polymeru v důsledku ozáření.....	28
3.1.4 Ozářením může dojít ke změnám vlastností	29
4 HOŘLAVOST POLYMERŮ	30
4.1 PROCES HOŘENÍ	30
4.2 FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÝ PROCES HOŘENÍ	30
4.2.1 Plynná fáze.....	31
4.2.2 Mesofáze	32
4.2.3 Kondenzovaná fáze	34
4.3 SPALOVACÍ PROCES HOŘENÍ POLYMERŮ.....	35
5 ZKOUŠKA HOŘLAVOSTI ŽHAVOU SMYČKOU	37
5.1 TEST ŽHAVOU SMYČKOU	37
5.1.1 Simulace průběhu zkoušky žhavou smyčkou	38
5.2 POPIS TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ	39
5.2.1 Žhavá smyčka	39
5.2.2 Teplotní měřicí systém	40
5.2.3 Specifikovaná podložka	40
5.2.4 Zkušební komora	40
5.2.5 Aklimatizace před zkouškou	40
5.2.6 Zkušební postup.....	41
5.2.7 Vyhodnocení výsledků zkoušky.....	42

II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	43
6	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	44
7	POPIS PŘÍPRAVY A MĚŘENÍ TĚLÍSEK.....	45
7.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK.....	45
7.1.1	Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C.....	46
7.2	ZVOLENÉ MATERIÁLY.....	47
7.3	TESTOVACÍ TĚLÍSKA.....	47
7.3.1	Síťování zkušebních tělísek.....	49
7.4	OTESTOVÁNÍ TĚLÍSEK NA STUPEŇ ZESÍTĚNÍ A PENETRACI.....	52
7.4.1	Popis gelové analýzy.....	52
7.4.2	Popis penetračního testu (Soldering iron test).....	53
7.4.3	Naměřená data.....	53
8	ÚPRAVA ZAŘÍZENÍ PRO TEST ŽHAVOU SMYČKOU.....	60
9	SAMOTNÁ ZKOUŠKA ŽHAVOU SMYČKOU.....	67
9.1	ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK PODLE NORMY.....	67
9.1.1	Zkouška hořlavosti konečných výrobků.....	67
9.1.2	Zkouška hořlavosti materiálů.....	68
9.1.3	Zkouška zapalitelnosti.....	69
9.2	POPIS PRÁCE NA PŘÍSTROJI, BEZPEČNOSTNÍ POKYNY.....	70
9.2.1	Popis práce na přístroji pro zkoušku žhavou smyčkou.....	70
9.3	SAMOTNÁ ZKOUŠKA.....	71
9.3.1	Schéma průběhu působení žhavé smyčky na tělísko.....	73
9.4	VYHODNOCENÍ VIZUÁLNÍ ZKOUŠKY.....	74
9.4.1	Diskuze výsledků.....	76
	ZÁVĚR.....	79
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	81
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	83
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	84
	SEZNAM TABULEK.....	86
	SEZNAM PŘÍLOH.....	87

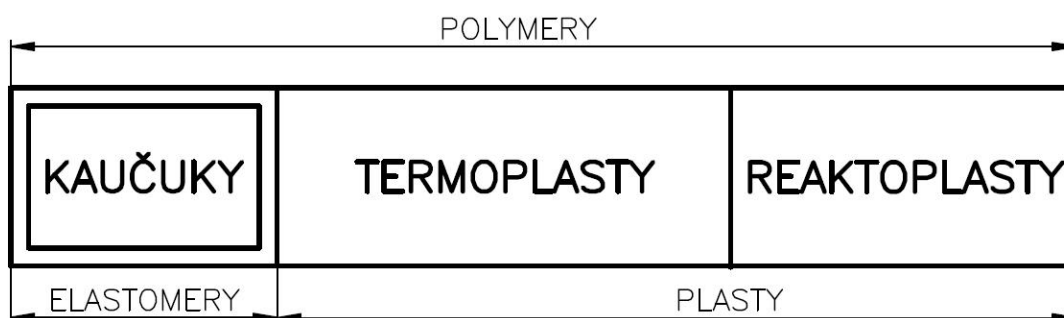
ÚVOD

Plasty tvoří samostatnou kapitolu, vyznačující se zcela specifickými vlastnostmi. Podle svého složení podléhají v různé míře znehodnocení, přičemž jejich odolnost proti působení vnějšího prostředí závisí na chemickém složení polymeru, na jeho struktuře, na množství a složení plniv, příměsí a nečistot. Dále závisí na podmínkách a způsobu zpracování, na chemickém složení prostředí a na podmínkách jeho působení. Odolnost proti znehodnocování vlivem vnějšího prostředí je jednou z nejdůležitějších vlastností polymerních materiálů, jež podstatně ovlivňuje životnost výrobků z nich zhotovených. Polymerní materiály mají celou řadu výhod, jako je náhrada jiných materiálů, ekonomická náhrada drahých materiálů, snadné zpracování na finální tvar, malá měrná hmotnost, dobré izolační vlastnosti, odolnost proti korozi, velká variabilita vlastností. V dnešní době je stále více používáno polymerních materiálů. Hlavním důvodem je ekonomicko-technologický aspekt použití těchto materiálů, u nichž je cílem, aby výrobek nebo materiál, splnil co možná nejlépe kladené nároky. Mezi produkty téhož druhu si musí zachovat svou kvalitu a hlavně cenovou konkurenceschopnost. [4]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 CHARAKTERIZACE POLYMERŮ

Polymery jsou látky velice široké škály vlastností, obsahující ve svých molekulách většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, pak také dusíku, chloru a jiných prvků. Dělíme je na elastomery a plasty.

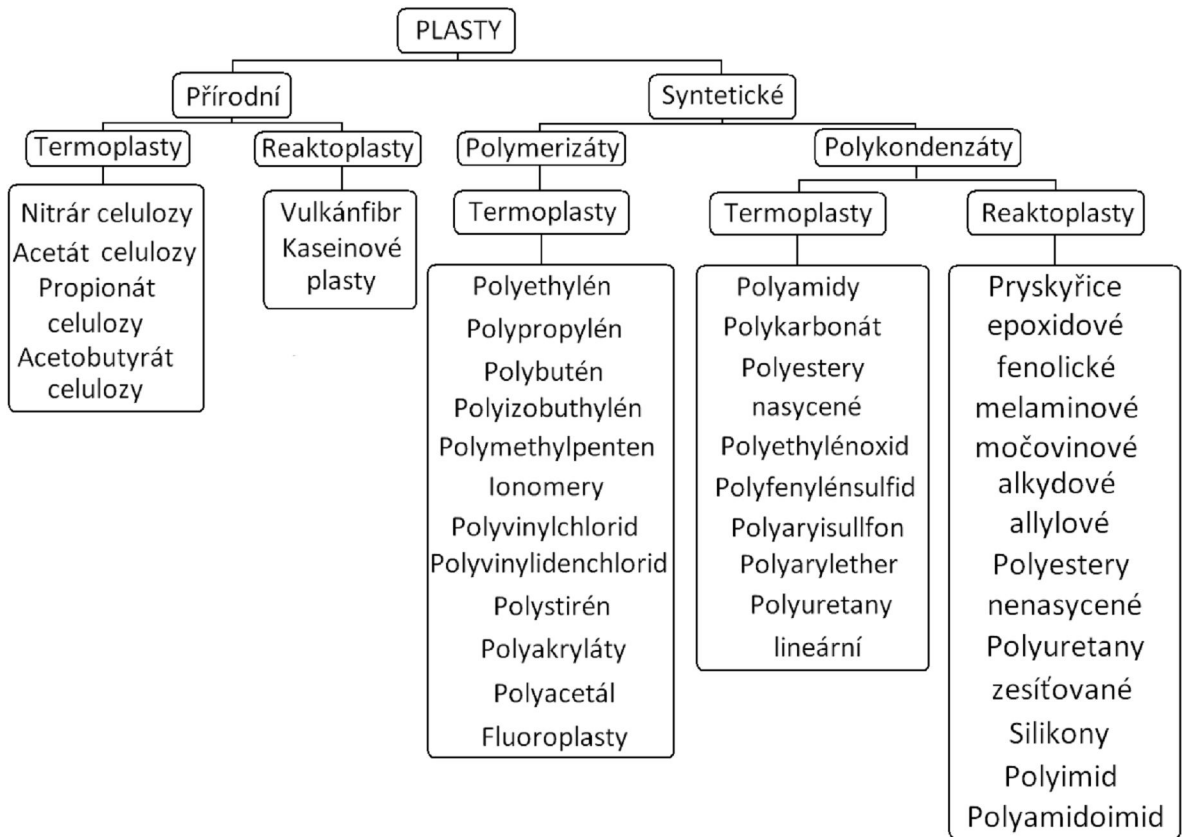


Obr. 1. Základní klasifikace polymerů [5]

Elastomer je vysoce elastický polymer, který můžeme za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení, přičemž deformace je převážně vratná. Do této skupiny patří kaučuky, z nichž se vyrábí pryž. [1]

Plasty jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvarovatelnými. Pokud je změna z plastického do tuhého stavu vratná, nazýváme je termoplasty. Pokud jde o změnu nevratnou, hovoříme o reaktoplastech, u nichž proběhla chemická reakce. [1]

1.1 Rozdělení plastů

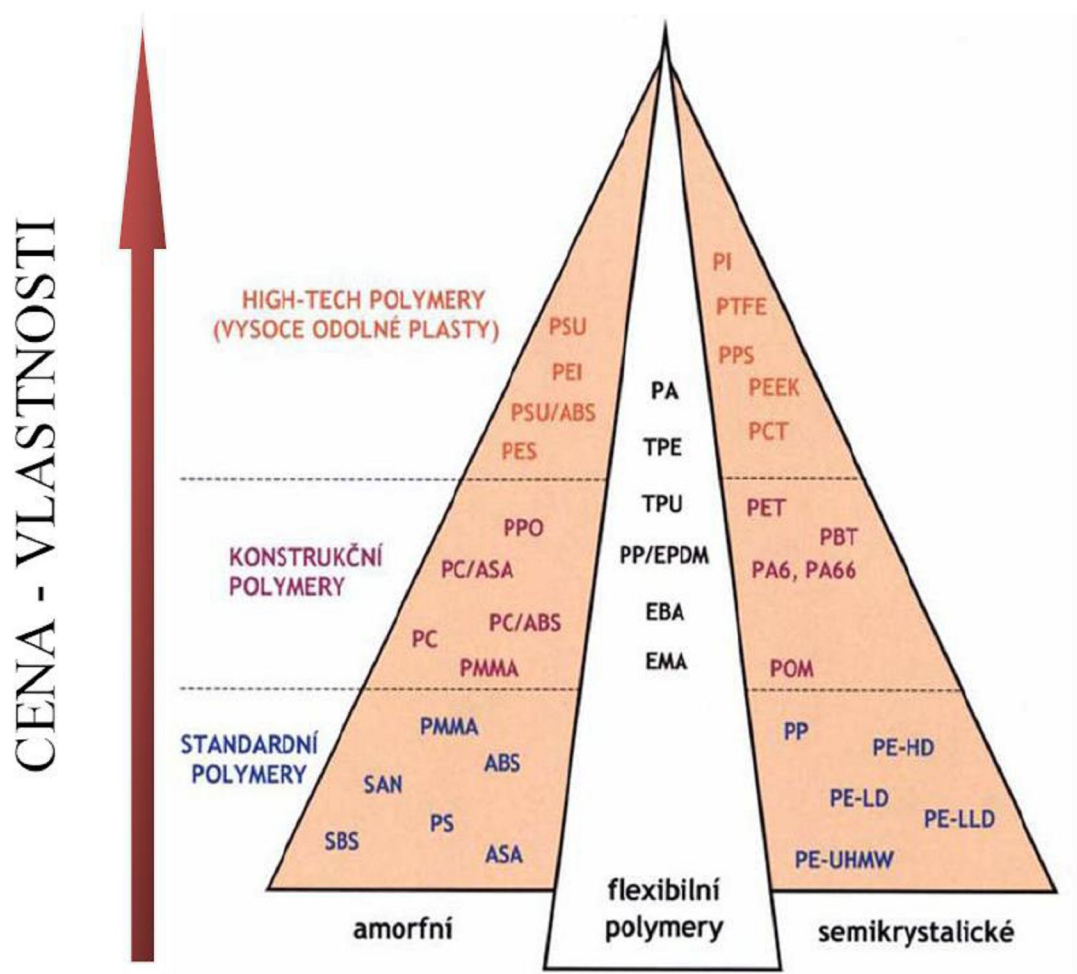


Obr. 2. Rozdělení přírodních a syntetických polymerů [8]

Plasty můžeme rozdělit podle různých hledisek:

1. Podle aplikace:

- **plasty pro široké použití** = polyolefiny (PE, PP), polystyrénové hmoty (PS), polyvinylchlorid (PVC), fenolformaldehydové (PF) a močovinoformaldehydové hmoty (UF),
- **plasty pro inženýrské aplikace** = polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyoximethylén (POM), polymethylmetakrylát (PMMA), tepolymer ABS, polyfenylénoxid (PPO), polyuretan (PU), epoxidové (EP) a polyesterové (UP) pryskyřice,
- **plasty pro speciální aplikace** = polysulfon (PSU), polyfenylénsulfid (PPS), tetrafluoretylén (PTFE), polyimidy (PI) a další. [10]



Obr. 3. Rozdělení polymerů dle jejich aplikace a ceny [8]

2. Podle chování za zvýšené teploty:

- **termoplasty** = polymerní materiály, které působením tepla přecházejí do plastického stavu, kde je lze snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Ochlazením pod teplotu tání T_m (semikrystalické plasty) resp. teplotu viskózního toku T_f (amorfní plasty) přecházejí do tuhého stavu. Jelikož při zahřívání nedochází ke změnám struktury, lze proces opakovat teoreticky bez omezení. Mezi termoplasty patří většina zpracovatelských hmot, např. polyetylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA) atd. [10]
- **reaktoplasty** = dříve nazývané termosety, v první fázi zahřívání též měknou, poté dochází k chemické reakci - prostorovému zesíťování struktury (vytvrzování). Tento děj je nevratný, vytvrzené plasty nelze roztavit, dalším zahříváním dochází k degradaci. Patří sem fenolformaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty, atd. [10]
- **kaučuky, pryže a elastomery** = polymerní materiály, které podobně jako reaktoplasty v první fázi zahřívání měknou, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury (VULKANIZACE). Elastomery na bázi termoplastů lze je opakovaně přivádět do plastického stavu, nedochází ke změnám struktury, probíhá zde pouze fyzikální děj. [10]

3. Podle stupně uspořádanosti:

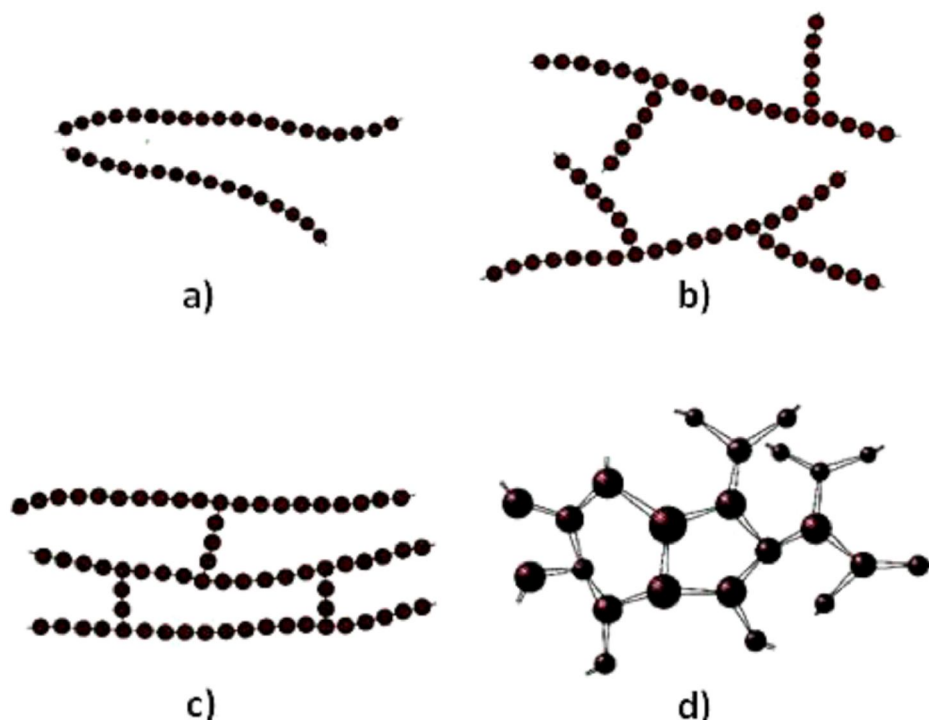
- **amorfní plasty** = makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici. Charakteristické vlastnosti jsou tvrdost, křehkost, vysoká pevnost, vysoký modul pružnosti a průhlednost. Použitelnost amorfních polymerů je do teploty zesíťování T_g . Patří sem např. PS, PMMA, PC. [10]
- **krystalické (semikrystalické) plasty** = vykazují určitý stupeň uspořádanosti (stupeň krystalinity). Ten se pohybuje od 40 do 90 %. Mají větší index lomu světla, proto jsou mléčně zakalené. Charakteristické jsou velkou houževnatostí materiálu, se stupněm krystalinity roste pevnost a modul pružnosti. Jejich použitelnost je do teploty tání T_m . Patří sem např. PE, PP, PA, PTFE, POM, atd. [10]

4. Podle původu:

- **přírodní** = označovány jako biopolymery, založeny na přírodních makromolekulárních látkách na bázi celulózy, kaseinu, latexu, atd.
- **syntetické** = výroba chemickou cestou (polymerace, polykondenzace, polyadice) [10]

5. Podle tvaru molekul:

- lineární
- rozvětvené
- zesíťované
- prostorově zesíťované [10]



Obr. 4. Tvary molekul [9]

a) lineární polymer; b) rozvětvený polymer; c) zesíťovaný polymer; d) prostorově zesíťovaný polymer (trojrozměrná síť)

1.2 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 [1]

1.2.1 Fyzikální modifikace

Tento nejjednodušší způsob nabývá stále širšího uplatnění. Mechanickým smíšením dvou nebo více polymerů se mnohdy získají směsi s vynikajícími mechanickými vlastnostmi. Tak je tomu např. u houževnatého polyvinylchloridu připraveného smíšením polyvinylchloridu s butadienakrylonitrilovým kaučukem nebo kaučukovitým chlorovaným polyetylenem. V případě houževnatého polystyrenu se velmi často jako modifikující složky používá butadienstyrenového kaučuku. Přídavkem polyvinylchloridu k butadienakrylonitrilovému kaučuku se zvýší odolnost pryže vyrobené z této směsi vůči ozonu. Přídavek polyvinylchloridu k chloroprenovému kaučuku zase zlevní výslednou pryž při zachování její odolnosti. [1]

1.2.2 Mechanochemická 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. [1]

V prvním případě vznikají modifikované polymery kombinací makroradikálů, eventuelně 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 homopolymerem, používán název interpolymery. [1]

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. [1]

1.2.3 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, kníž patří reakce probíhající při mechanochemické modifikaci a reakce probíhající při síťování polymerů [1]

1.2.4 Modifikace síťováním

Příkladem chemických přeměn polystyrenu jsme se dostali k síťování polymerů. Pod tímto pojmem rozumíme vzájemné spojování polymerních řetězců za vzniku prostorové sítě. Vzhledem k ohromné délce makromolekulárních řetězců stačí přídavek zcela malého množství síťovacího činidla, aby molekulová hmotnost polymeru vzrostla nekonečně; makromolekula zesíťovaného polymeru má, jak již bylo uvedeno, rozměry příslušného předmětu (výrobku). [1]

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

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

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

Nejtypičtějším příkladem síťovací reakce je vulkanizace kaučuků, která také představuje historicky nejstarší chemickou modifikaci polymeru. [1]

2 SÍŤOVÁNÍ

Pojmem síťování označujeme vzájemné spojování polymerních řetězců za vzniku prostorové sítě. Přidáním potřebného množství síťovacího činidla nekonečně vzroste molekulová hmotnost polymeru a makromolekula bude mít rozměry příslušného výrobku. U mnohých plastů dochází k zesíťování vlivem ozáření. U tohoto typu síťování není často zapotřebí žádné další přísady. Další výhodou je, že proces je proveden až na samotném výrobku po zpracovatelském procesu.

Tím můžeme přetvořit např. termoplasty na materiály vykazující v určitých teplotních oblastech vlastnosti elastomerů.

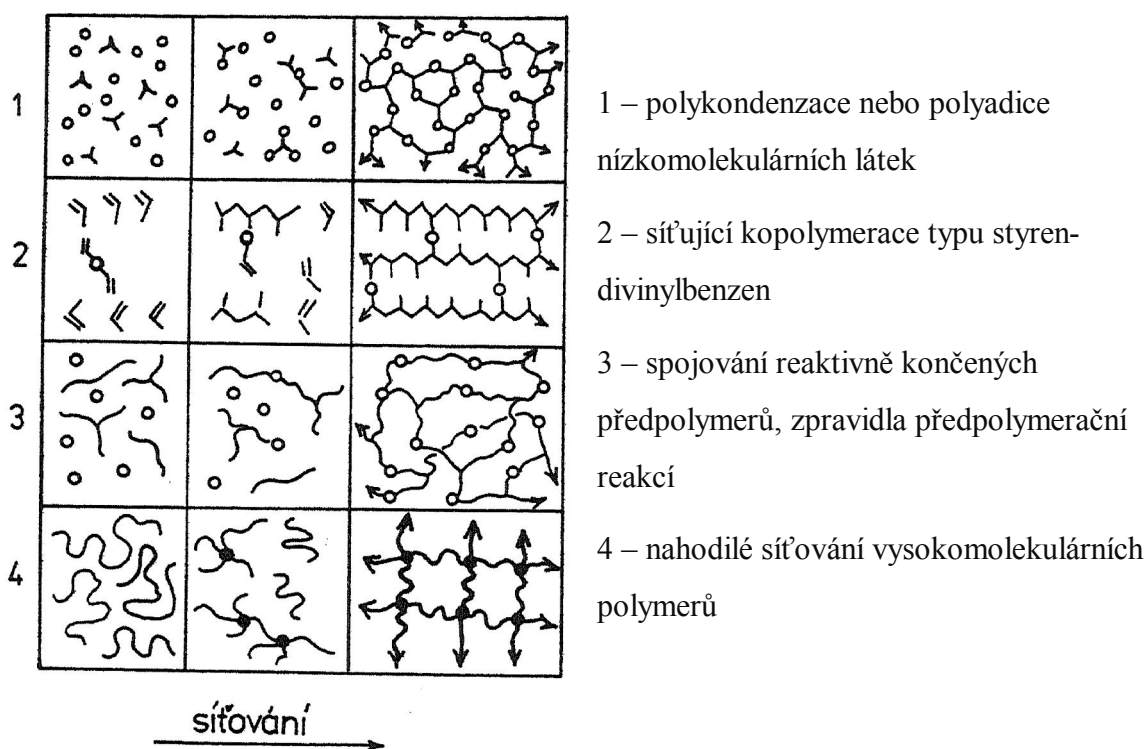
Zesíťováním ztrácejí polymery rozpustnost (v rozpouštědlech pouze bobtnají, tj. zvětšují svůj objem), tavitelnost a termoplasticitu a naopak získávají tvarovou stálost za zvýšených teplot, někdy i vyšší odolnost vůči chemikáliím. [3]

Prostorově zesíťované struktury vznikají různými způsoby, zejména:

- polykondenzací nebo polyadící tří a více funkčních 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 [8]

2.1 Výstavba sítě a její způsoby

Chemickým spojováním dvoufunkčních jednotek vznikají lineární polymery. Je-li některá se složek více než dvoufunkční, dochází v průběhu reakce k větvení a později i ke vzniku nekonečné trojrozměrné struktury, prostorové sítě, gelu. Zesíťované polymery mohou vznikat těmito procesy, které znázorňuje **Obr. 5.** [22]



Obr. 5. Schéma vzniku sítě [22]

1. Postupnými reakcemi nízkomolekulárních látek (M řádu 10^2 g.mol⁻¹) vznikají např. epoxidové a fenolové pryskyřice. Jejich síť se dokončuje ve vytvrzovacím kroku.
2. Polymerační řetězovou reakcí, síťovací polymerací vznikají hmoty použitelné pro měniče iontů, hydrofilní gely používané v lékařství.
3. Spojováním reaktivních konců nízkomolekulárních polymerů (M řádu 10^3 g.mol⁻¹), formálně podobný jako v případě 1., např. polyuretany – kaučukovité nebo tvrdé.
4. Zavedením příčných vazeb do vysokomolekulárních polymerů (M řádu 10^5 g.mol⁻¹). Vulkanizací kaučuků vzniká pryž, ozářením zesíťovaný polyetylen apod.

Ve všech čtyřech případech probíhají při síťování tyto děje:

- v první fázi vzrůstají rozměry molekul i polydisperzita systému
- při určitém stupni reakce dospěje systém do *bodu gelace* (bod gelace je charakterizován vznikem nekonečně velké makromolekuly), ve kterém vzroste molární hmotnost nad všechny meze a v systému se objeví první stopy nekonečné struktury, gelu

- po překročení bodu gelace se systém skládá ze dvou částí: z *gelu* a z molekul konečné velikosti, *solu*, který lze od gelu oddělit extrakcí (gel je nerozpustný, 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, které při deformaci nesou napětí a určují velikost modulu pružnosti gelu a jeho rovnovážný stupeň nabotnění

Obsah gelu jeho synonymem je stupeň zesítnění, s kterým se budeme setkávat v praktické části diplomové práce.

Kvantitativním popisem tvorby sítí se zabývá teorie síťování, její základy položili pánové Flory a Stockmayer, nověji pak Gordonova teorie větvičích se procesů a tvorby síťovaných polymerů. [22]

2.2 Nejpoužívanější druhy síťování

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

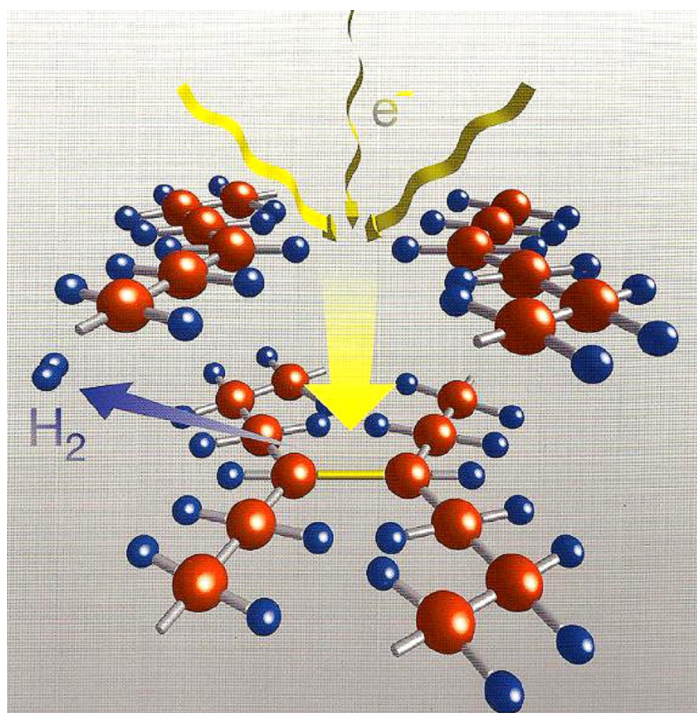
V našem případě, tématu práce, se zabývám radiačním síťováním a jeho vlivy na vlastnosti ozářeného tělíska.

2.3 Radiační síťování

Radiační síťování probíhá při pokojové teplotě bez dodatečného namáhání výrobku. Jeho hlavní výhoda spočívá v tom, že je provedeno až po zpracovatelském procesu (po vstřikování, vytlačování nebo vyfukování). Variací ozařovacích parametrů lze měnit stupeň zesítnění, čímž ovlivníme vlastnosti materiálu tak, jak je požadováno.

Základním předpokladem je, aby materiál po dobu ionizačního záření síťoval, a ne degradoval. U některých polymerů je poté nutné přidávku pomocného síťovacího činidla.

Interakcí záření s polymerem vznikají polymerní radikály (rozpad vazeb C-H), ty pomocí rekombinace vytvoří v řetězci síť a to spojením dvou volných radikálů mezi sousedními řetězci za vzniku vazby C-C. [12]



Obr. 6. Schéma radiačního síťování elektronovým zářením [12]

Pro radiační síťování se používá záření beta a gama, která na základě svých energií iniciují chemické procesy. V ozářených produktech přitom nevzniká žádná radioaktivita.

Radiační síťování umožňuje vysokou flexibilitu ve volbě surovin, zlepšuje vlastnosti a má i výrobně-technické a ekonomické výhody.

Díky tomu, že je radiační síťování oddělený technologický krok od zpracovatelského procesu, zůstávají odpady po zpracování nezesíťované a mohou být znovu použity při výrobě nového výrobku. [12]

2.3.1 Měrné jednotky ozařovací techniky

Požadované změny vlastností u radiačního síťování určuje v první řadě dávka ozáření, tím se rozumí množství energie absorbované zářením na měrnou jednotku hmoty.

$$\text{Dávka intenzity záření (dosis)} = \text{absorbovaná energie záření/hmotnost}$$

Jednotka intenzity záření je Gray (Gy), dříve používaná jednotka byla radián (rad).

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg} = 100 \text{ rad}$$

Energie záření absorbovaná výrobkem za časovou jednotku a vztažená ke hmotnosti = dávková intenzita záření.

$$1 \text{ Gy/s} = 1 \text{ Watt/kg} = 0,36 \text{ Mrad/h}$$

Penetrace (hloubka pronikání) vysoce energetických elektronů popř. gama záření je závislá na jejich energii. Měrná jednotka energie je joule (J), dříve označovaná elektronvolt (eV).

$$1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Výkon zdroje radioaktivního záření je charakterizován jeho aktivitou. Jednotka je Becquerell (Bq).

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ rozpad/sek.}$$

2.3.2 Materiály pro radiační síťování

Pro výběr vhodného materiálu jsou rozhodující požadované užité vlastnosti výrobků. Využitím technologie radiačního síťování mohou být realizovány výrobky s mimořádnými technickými výhodami a efektem ekonomického zisku. V **Tab. 1.** vidíme některé materiály vhodné k zesíťování.

Tab. 1. Materiály vhodné k zesíťování

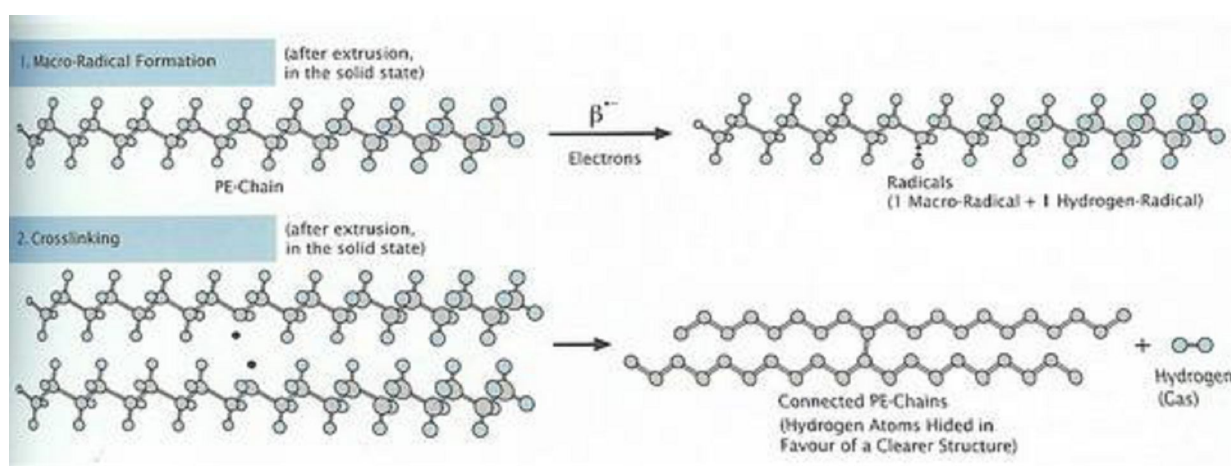
Termoplasty	Polyolefiny	CSM, chlorsulfonovaný polyetylen EEA, kopolymer etylenu s akrylátem EPDM, etylenpropylendienový kaučuk EVA, kopolymer etylenu s vinylacetátem PE, polyetylen (LDPE, HDPE, LLDPE, ...) CM, chlorovaný polyetylen PP, polypropylen
	Polyestery	PBT, polybutylentereftalát UP, nenasycená polyesterová pryskyřice
	Halogenové polymery	CSM, chlorsulfonovaný polyetylen ETFE, kopolymer etylenu s tetrafluoretylenem FPM, fluor kaučuk PVC, polyvinylchlorid PVDF, polyvinylidenchlorid
	Další polymery	PA, polyamid 6, 66, 11, 12 PVAL, polyvinylalkohol
Elastomery		ACM, polyakrylátový kaučuk BR, polybutadienový kaučuk CR, polychloroprenový kaučuk FPM, fluor kaučuk IR, polyizoprenový kaučuk NBR, butadien akrylonitrilový kaučuk NR, přírodní kaučuk SBR, butadien styrenový kaučuk SBS, styren-butadien-styrenový kopolymer SI, silikon
Termoplastické elastomery		FPM, fluor kaučuk TPE-E, polystyrenový termoplastický elastomer TPE-O, polyolefinický termoplastický elastomer TPE-S, polystyrenový termoplastický elastomer TPE-U, polyuretanový termoplastický elastomer TPE-V, zesíťovaný polyolefinický termoplastický elastomer

3 VLIV RADIČNÍHO SÍŤOVÁNÍ NA VLASTNOSTI POLYMERŮ

Stále náročnější požadavky různých odvětví průmyslu na lepší vlastnosti plastových dílů nemusí nutně vést k aplikaci drahých vysoce odolných konstrukčních termoplastů. Aby levnější masové nebo konstrukční plasty vydržely větší zatížení, přivedeme molekuly ke vzájemnému chemickému propojení a propůjčíme jim mechanické, tepelné a chemické vlastnosti vysoce odolných konstrukčních termoplastů. Tento postup, toto síťování, můžeme precizně řídit beta nebo gama zářením. Energie ze záření je materiálem absorbována a vznikají radikály, které spolu reagují a při následné chemické reakci vytváří očekávanou vazbu. [12]

3.1 Síťování ionizačním zářením

U tohoto síťování je základní předpoklad, že materiál při působení ionizačního záření převážně síťuje a ne degraduje. Jedná se o fyzikální metodu a není většinou potřeba používat chemické přísady (například u PP se používá síťovací činidlo TAIC). Hlavním předpokladem je přítomnost tří a více funkčních monomerů. Interakcí záření s polymerem vznikají polymerní radikály (rozpad vazeb C-H), ty pomocí rekombinace v řetězci vytvoří síť a to spojením dvou volných radikálů mezi sousedními řetězci za vzniku vazby C-C. Síťování provádíme nejčastěji beta (**Obr. 7.**) nebo gama zářením. [12]

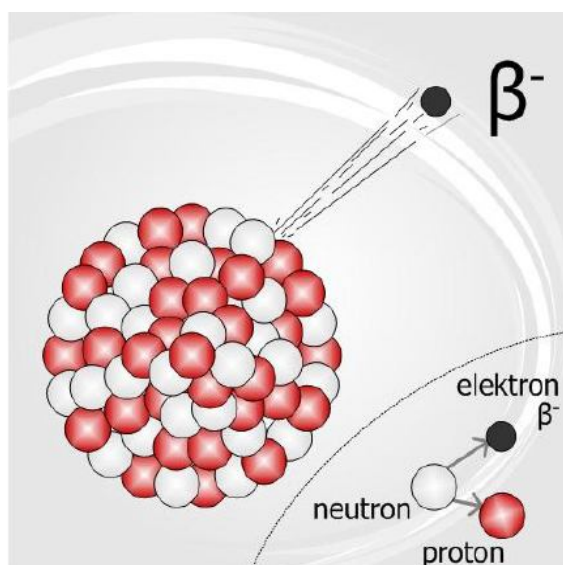


Obr. 7. Síťování PE elektronovým zářením [12]

Pomocí ozáření se termoplasty přetransformávají v materiály, které mají v určitých teplotních oblastech vlastnosti elastomerů. U elastomerů, nebo částečně zesíťovaných systémů, mají dostatečný počet síťovaných míst v důsledku ozáření. Při radičním síťování není potřebná zvýšená teplota při procesu. Síťování se vždy provádí až po procesu zpracování.

3.1.1 Beta záření

Záření beta jsou částice (elektrony nebo pozitrony), které jsou vysílány radioaktivními jádry prvků při beta rozpadu. Pohybují se velmi rychle, nesou kladný nebo záporný elektrický náboj a jejich pohyb může být tedy ovlivňován elektrickým polem. Jejich pronikavost je větší než u alfa částic, mohou pronikat materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou, k jejich zastavení stačí vrstva vzduchu silná 1 m nebo kovu o šířce 1 mm. [21]



Obr. 8. Záření β [21]

Záření beta minus (β^-) je proud elektronů e^- , které vyletují z jádra atomu. Malá hmotnost částic se projevuje výrazným zakřivením trajektorie částic jak v magnetickém, tak v elektrickém poli, avšak na opačnou stranu než záření alfa. Energie elektronů záření dosahuje 10 MeV a jejich rychlost se blíží rychlosti světla. Elektrony v jádře vznikají přeměnou z neutronu, za vzniku protonu a antineutrína. [21]

Záření beta plus (β^+) je proud pozitronů e^+ vyzařovaných některými radionuklidy při jaderných přeměnách. Toto záření je však v praxi velmi vzácné a v drtivé většině případů se setkáme s prvním typem záření. [21]

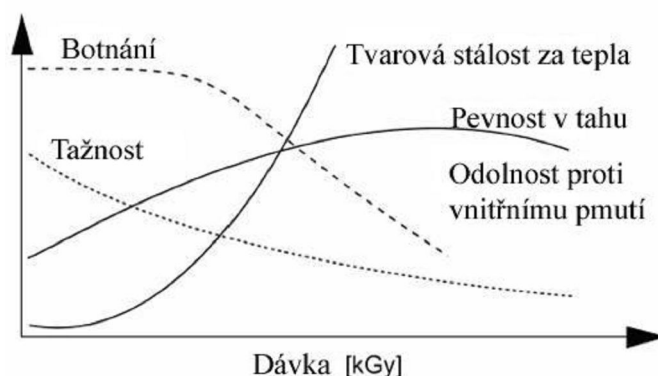
3.1.2 Případy využití ionizačního záření

Tab. 2. Vybrané, komerčně využitelné aplikace

Produkt	Využití	Zlepšení/ výhody	Proces	Druh ozařování
PE pěna	Automobilové vnitřní díly	Omezení creepu, ovládání velikostí buněk	Sítování	β
Léčiva	Nemocnice	Vyloučení zbytkových toxických látek	Sterilizace	γ
Lepidla	Citlivé lepicí pásky na tlak	Pevnost vazby, energetické úspory	Polymerizace	β
Izolace kabelů	Vysokonapěťový kabel	Rezistence proti žáru a rozpouštědlům	Sítování	β, γ
Stahovací páska	Izolace	Teplotní odolnost, zpomaluje hoření	Sítování	β
Guma	Automobilové pneumatiky	Snížování nákladů	Částečná vulkanizace	β
Nátěry	Dřevotřísková deska	Povrchová úprava, odolnost proti okolí	Polymerizace	β
Degradovaný Teflon	Sprejová maziva	Ekonomická recyklace odpadů teflonu	Štěpení	β
Skleněné láhve	Nápoje	Obarvení	Polymerace	γ

3.1.3 Zlepšení vlastností polymeru v důsledku ozáření

Na **Obr. 9.** jsou uvedeny změny charakteristických vlastností v důsledku ozáření. [12]



Obr. 9. Charakteristika vlastností v závislosti na dávce ozáření [12]

3.1.4 Ozářením může dojít ke změnám vlastností

Mechanické vlastností u termoplastů:

- nárůst modulu
- zvýšení pevnosti (zejména z dlouhodobého hlediska)
- pokles poměrného prodloužení při přetržení (tažnosti)
- redukce studeného tečení – (creepu)
- nárůst tvrdosti (Shore)
- zlepšení odolnosti proti otěru
- zlepšení pevnosti v tahu
- zlepšení povrchové pevnosti vůči otiskům a nespojitosti vstřikovaných dílů
- zlepšení odolnosti proti vnitřnímu pnutí a redukce přenosu a růstu
- zlepšení zotavení materiálu „memory effect“ [12]

Tepelných vlastností:

- zvýšení tvarové stálosti za tepla
- zlepšení odolnosti proti hoření [12]

Chemické vlastností:

- výrazné zlepšení odolnosti proti chemikáliím
- redukce rozpustnosti
- zlepšení odolnosti proti botnání [12]

4 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. [14]

4.1 Proces hoření

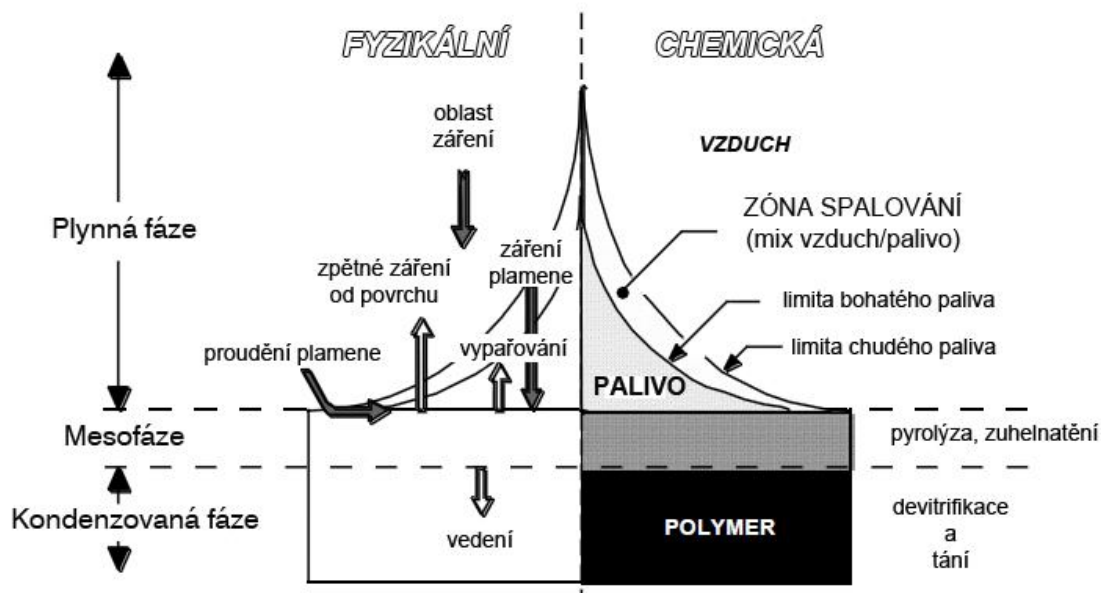
Oheň je fyzikální a chemický fenomén, který je od přírody silně interaktivní. Interakce mezi plamenem, palivem a okolím může být silně nelineární a kvantitativní odhad účastníků se procesů je často velmi složitý. Proces hoření a zúčastněné procesy uzavřeného ohně zahrnují hlavní toky hmoty a tepelné toky do a od paliva a okolí. [13]

4.2 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. 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. [15]

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 hranici 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). [15]



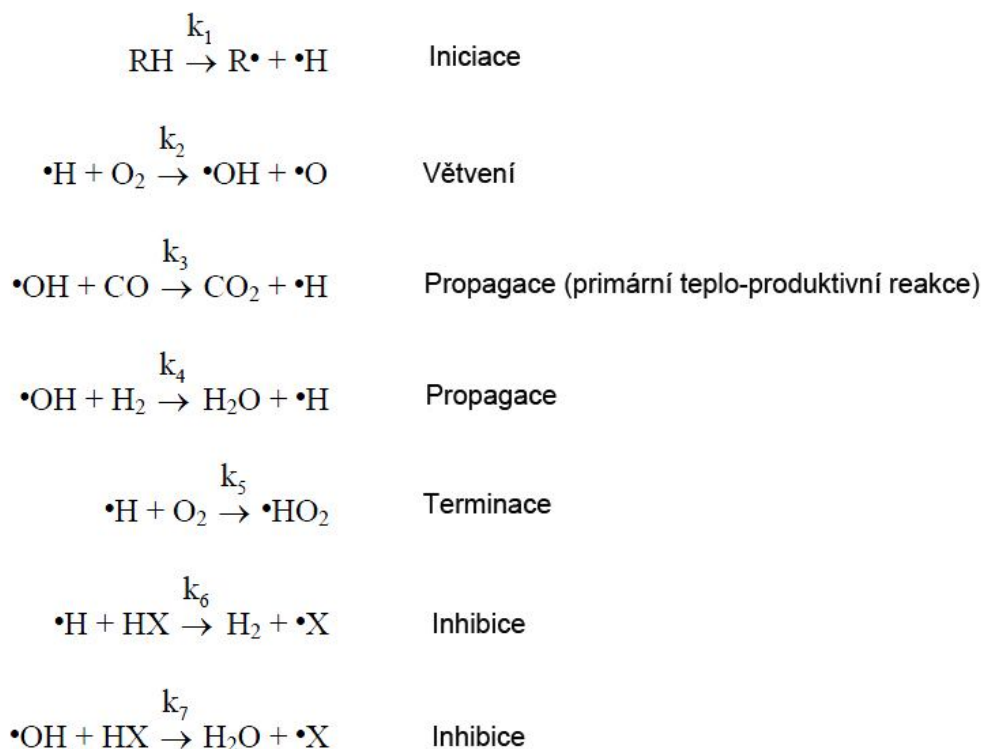
Obr. 10. Fyzikální a chemický proces při hoření polymerů [15]

Poznámka:

Devitrifikace - typ skelné koroze; je "odskelnění" sopečného skla, láv nebo pyroklastických hornin, devitrifikaci lze dospět k úplné rekrystalizaci skla

4.2.1 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 vedly k zapalování a uvolnění tepla plynnou fází. Ačkoli obnášejí 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 tyto reakce zahrnující aktivní radikály (označeny \bullet), paliva (R), hydroxyly (OH), vodíku (H) a kyslíku (O), halogenu nebo fosforu (X). Jsou to tyto chemické reakce viz. **Obr. 11**.

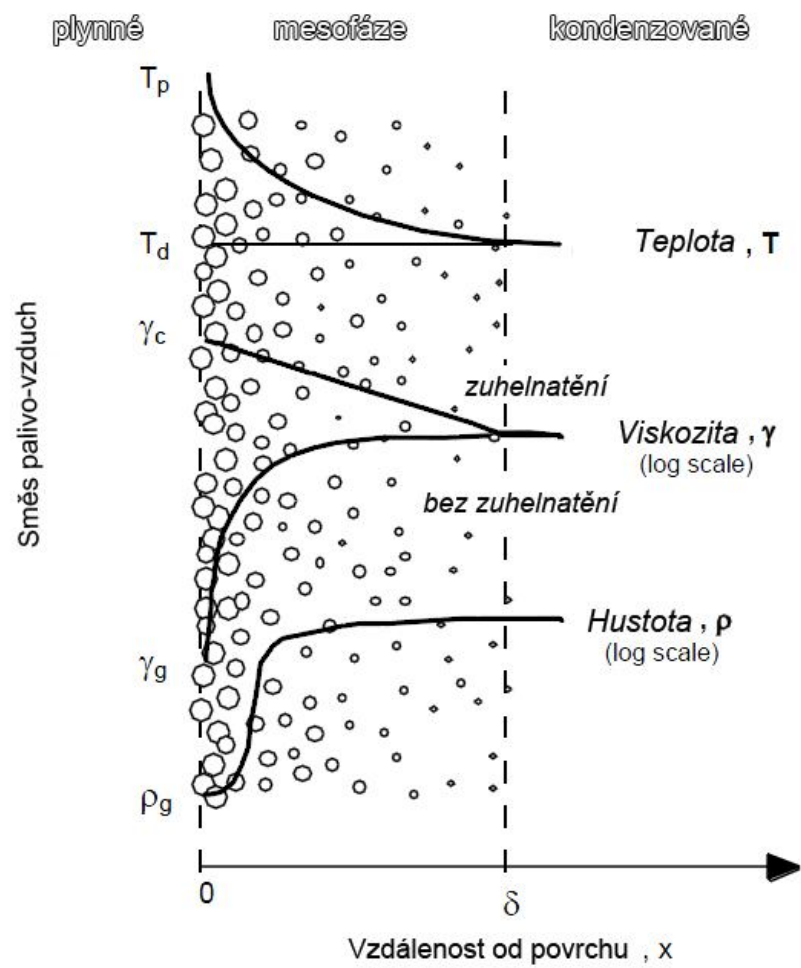


Obr. 11. Radikální reakce hoření polymerů [15]

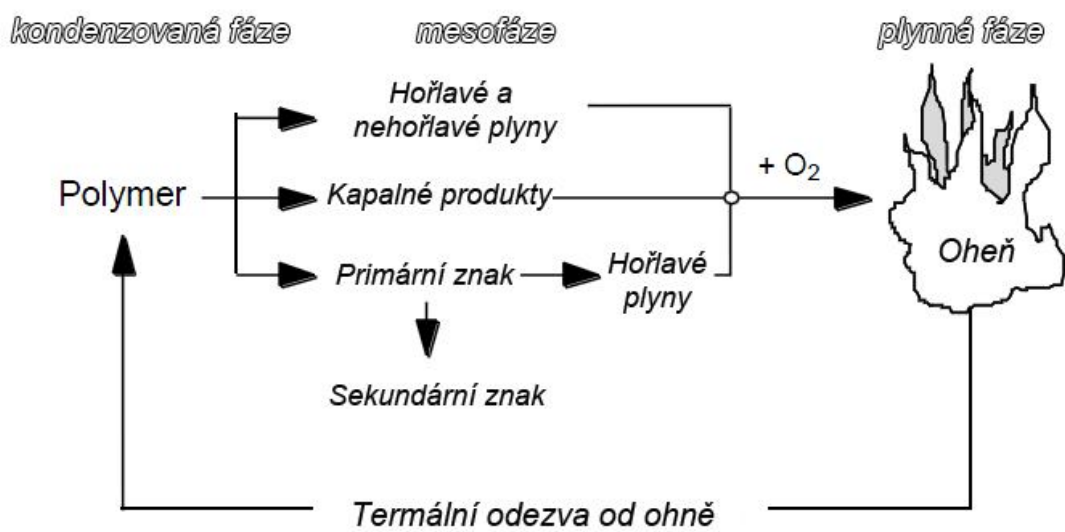
Soubor sedmi radikálních reakcí na účtech rovnice 1. (rovnice iniciace) pro klíčové procesy o zahájení řízení, větvení, propagace, a ukončení typických uhlovodíkových paliv, stejně jako reakce inhibice, které jsou důležité pro polymery obsahující halogeny nebo fosfor v nízké oxidační formě. [15]

4.2.2 Mesofáze

Mesofáze je rozhraní mezi plynem a kondenzovanou fází při hoření. Všechny tepelné chemické degradace, které vedou k nestálosti paliva, se vyskytují v mesofázi (také známé jako zóna pyrolýzy). Kvalitativní schéma vlastností mesofáze je znázorněn na obrázku. 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 chemickou degradací. Mesofáze se skládá z tepelného rozkladu produktů v různých fázích, včetně plynné, kapalně, a pevné fáze, jak je uvedeno na **Obr. 12**.



Obr. 12. Profily teploty, viskozity a hustoty pro hoření [15]



Obr. 13. Fenomenologie hoření polymerů [15]

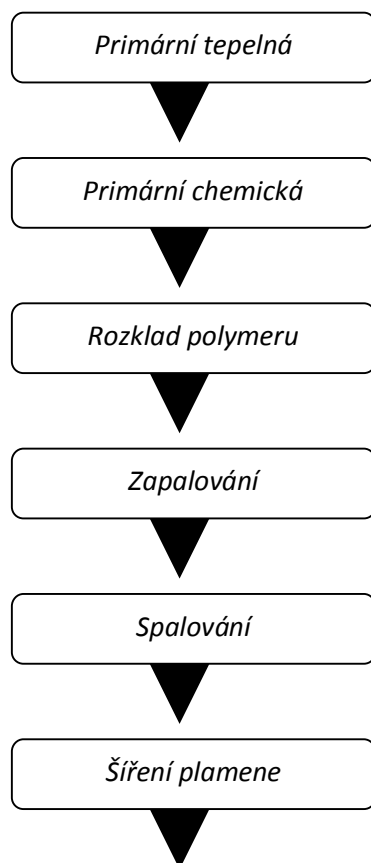
Obr. 13. ukazuje fenomenologii hoření polymeru a ilustruje vázanou povahu hoření kondenzovaných fází. Sled událostí pro samoudržující proces hoření zahrnuje použití tepla dostačujícího pro tepelnou degradaci (pyrolýzu). Míchání těkavého produktu tepelného rozkladu s atmosférickým kyslíkem, zapálení tohoto 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 (viz. **Obr. 10.**). 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. [15]

4.2.3 Kondenzovaná fáze

Rychlost, při které je teplo přepravováno a skladováno v kondenzované fázi má zásadní význam, protože tyto procesy určují čas vznícení a hoření polymerů.

4.3 Spalovací proces hoření polymerů

Samotný proces spalování je velmi složitý děj, ale v zásadě dodržuje 6 samostatných energetických etap:



Obr. 14. Spalovací proces

Primární tepelná :

- zdroj vznícení - nárůst teploty, která závisí na produktu a zdroji zapálení (energetický výkon).

Primární chemické :

- vyhřívaný plast se začne „kazit“, obecně přes tvorbu volných radikálů, pod vlivem zdroje vznícení. Podobnost jako konvenční tepelná degradace plastů, ale je obecně rychlejší, protože obsahuje vyšší energetické vstupy od zdroje vznícení.

Rozklad polymeru :

- plast se začne rychle 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.

Spalování :

- hořící plyny se spalují nad povrchem sypkých plastů a tento proces se může stát sebeudržujícím, pokud vyprodukuje dostatečné množství energie.

Šíření plamene :

- v závislosti na plastu, stupni spalování, produkci plamenů (které se mohou šířit), ohořelé povrchové vrstvy, toto může být doprovázeno emisí kouře a toxických plynů.

Reakce plastů ve spalovacím procesu závisí také na typu plastu. Termoplasty mají tendenci změkknout a průtok při vysokých teplotách, vzhledem k tomu se často koná před zapálením, termosetové materiály (reaktoplasty) nejsou změkčené, ale podstupují lokální povrchové připálení (někdy hořící) a spálené zbytky můžou buď zhasnout, nebo zůstat na místě tvořící izolační vrstvu. [14]

5 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. [14]

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. [16]

5.1 Test žhavou smyčkou

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

Tělísko v testu obstálo, když splnilo tyto podmínky:

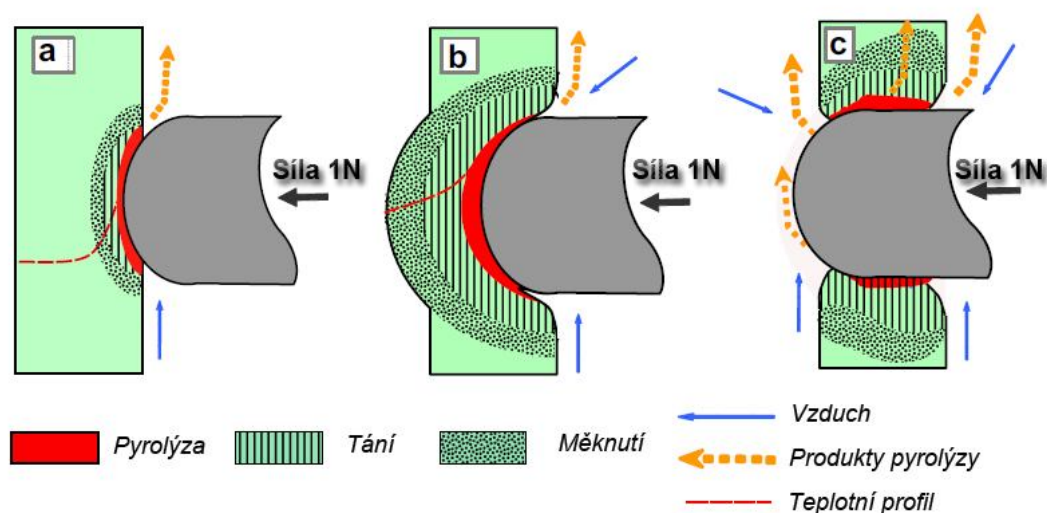
- tělísko nehoří nebo není žhavé
- když se plameny nebo hořící tělísko uhasí do 30 s po oddálení žhavé smyčky

Výška plamene během zkoušky by měla být zaznačována. [13]

5.1.1 Simulace průběhu zkoušky žhavou smyčkou

Obr. 15. nám simuluje chování při zkoušce žhavým drátem. V části tělíska, ve kterém dochází ke styku s drátem, mohou nastat 3 specifické zóny:

- první zóna, při teplotě nad teplotou rozkladu (a - *zóna pyrolýzy*)
- druhá zóna, kde se materiál pouze taví, a degradace je pomalejší (b - *zóna tání*)
- třetí zóna, kde je teplota dostatečně vysoká, aby roztavila polymer, ale i přes to může být materiál deformovaný, jelikož se nacházíme v oblasti nad teplotou tepelné deformace (c - *zóna měknutí*)

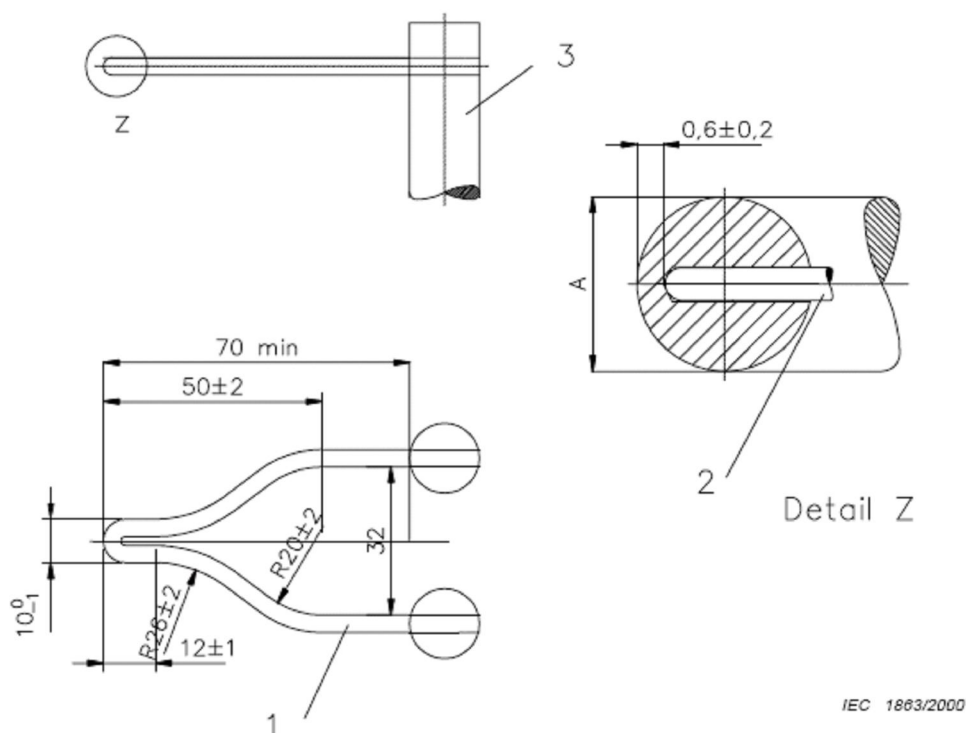


Obr. 15. Simulace zkoušky žhavou smyčkou [20]

5.2 Popis testovacího zařízení

5.2.1 Žhavá smyčka

Žhavá smyčka je vyrobena z chrom-niklového (20/80) drátu, s celkovým jmenovitým průměrem 4 mm. Drát se zformuje do smyčky viz. **Obr. 16**.



Obr. 16. Náčres žhavé smyčky [16]

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

Žhavým drátem prochází elektrický proud, který ho zahřívá a musí si udržet stálou teplotu. Zkušební zařízení musí být navrženo tak, aby horký drát byl v horizontální poloze a aby během působení na testovací tělísko vyvíjel sílu $1,0 \text{ N} \pm 0,2 \text{ N}$. Síla musí být udržována při této hodnotě, když se přesune horký drát nebo zkušební tělísko. Průnik drátu do zkoušeného materiálu je $7 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Přístroj musí být navrženo tak, aby horké nebo žhavé částice padající z testovaného tělíska mohly zapálit specifickou podložku.

5.2.2 Teplotní měřicí systém

Teplota hrotu žhavé smyčky se měří termočlánkem třídy 1 z jemného drátu v kovovém plášti s minerální izolací a s izolovaným spojem. Termočlánek musí mít vnější průměr 1,0 mm nebo 0,5 mm a dráty např. z NiAl a z NiCr, vhodné pro nepřetržitý provoz při teplotách do 960 °C. Plášť je tvořen kovem, který odolává dlouhodobému působení teploty nejméně 1050 °C. Termočlánek je umístěn těsně za koncem žhavé smyčky. Mezi hrotem termočlánu a horkou smyčkou musí udržovat tepelný kontakt. Zařízení na měření termoelektrických napětí může obsahovat libovolný běžný digitální teploměr s vestavěným referenčním spojem. [16]

5.2.3 Specifikovaná podložka

Pod žhavou smyčku se umísťuje specifikovaná podložka. Používá se jedna vrstva hedvábného balicího papíru položena těsně na horním povrchu rovné hladké desky z dřeva o tloušťce nejméně 10 mm. Podložka se umístí do vzdálenosti 200 mm \pm 5 mm pod místo, kde horká smyčka působí na testovací tělísko. Hedvábný balicí papír je měkký a pevný, lehký balicí papír, jehož hustota je mezi 12 g/m² a 30 g/m² (viz. ISO 4046). Hedvábný balicí papír lze nahradit jinými podobnými materiály, pokud bylo ověřeno, že jsou pro tento účel stejně vhodné. [16]

5.2.4 Zkušební komora

Zařízení musí být umístěno s omezením prouděním vzduchu. Objem komory má být minimálně o objemu 0,5 m³, aby úbytek kyslíku během zkoušky neměl významný vliv na výsledky zkoušky. Tělísko musí být umístěn nejméně 100 mm od nejbližšího povrchu komory. Osvětlenost tělíska nesmí přesáhnout 20 lx a pozadí musí být tmavé. [16]

5.2.5 Aklimatizace před zkouškou

Dřevěná deska a hedvábný papír se před zkouškou uloží na 24 h do prostředí o teplotě mezi 15 °C - 35 °C a relativní vlhkost mezi 45% - 75%. Tělísko se aklimatizuje po dobu 48 h při teplotě 23 °C \pm 2 °C a při relativní vlhkosti mezi 45% - 55%. Tělíska se testují o teplotě mezi 15 °C - 35 °C a relativní vlhkosti mezi 45% - 75%. [19]

5.2.6 Zkušební postup

Testovací tělísko se upevní nebo upne tak, aby:

- ztráty tepla způsobené podpěrami nebo upevňovacím přípravkem byly zanedbatelné
- rovinná část povrchu byla svislá
- hrot žhavé smyčky působí na střed rovinné části povrchu

Žhavá smyčka se zahřeje na určitou teplotu, která se měří kalibrovaným systémem měřené teploty. Předtím než se hrot horké smyčky dotkne tělíska, se věnuje pozornost tomu, aby:

- teplota se po dobu nejméně 60 s nemění o více než 5 K
- tepelné záření během této doby neovlivňovalo tělísko, což se zajistí dostatečnou vzdáleností smyčky od zkušební destičky
- do ukončení zkoušky se už horký proud ani napětí znovu nenastavuje

Hrot žhavé smyčky se pak pomalu přivede do kontaktu s destičkou na dobu $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$. Vyhovující je rychlost přibližování a oddalování přibližně $10 \text{ mm/s} - 25 \text{ mm/s}$. Rychlost přibližování se však před dotykem musí snížit téměř na nulu, aby síla působící při dotyku nepřekročila $1,0 \text{ N} \pm 0,2 \text{ N}$. Pokud se materiál odtaví od horké smyčky, nemusí být horká smyčka udržována v dotyku se tělískem. Po uplynutí doby působení se horká smyčka a destička pomalu od sebe oddělí, přičemž se zabraňuje dalšímu zahřívání tělíska a pohybu vzduchu, které by mohly ovlivnit výsledky zkoušky. Proniknutí hrotu je omezeno na $7 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. [16]

5.2.7 Vyhodnocení výsledků zkoušky

Jelikož se jedná o vizuální zkoušku, to znamená, že výsledek zkoušky je přímo určitelný podle daných kritérií.

Tělísko při zkoušce úspěšně odolalo, pokud se buď nezapálí, nebo jsou splněny obě tyto podmínky:

- plamenné hoření nebo žhnutí vzorku uhaslo do 30 s po oddálení horké smyčky, tzn.
 $t_e \leq t_a + 30 \text{ s}$
- nedošlo k zapálení hedvábného balicího papíru

Pokud je splněna jen jedna nebo není splněna žádná z těchto podmínek, zkouška se opakuje s novým tělískem při nižší zkušební teplotě uvedené v **Tab. 3.** [18]

Tab. 3. Stupně přísnosti zkoušky

Zkušební teplota [°C]	Tolerance [K]
550	± 10
600	± 10
650	± 10
700	± 10
750	± 10
800	± 15
850	± 15
900	± 15
960	± 15

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cílem této diplomové práce je montáž přístroje pro zkoušení požárního nebezpečí, zařízení pro zkoušku žhavou smyčkou, dle normy ČSN EN 60695-2-10:2000 z dostupných dílů podle návrhu loňské diplomové práce. Dodělení elektroniky, která obstará rozžhavení smyčky na požadované teploty (př.: na teplotu 960°C je zapotřebí 120 až 150 A). Tuto elektroniku jsme řešili ve spolupráci s firmou MITAS a.s., Zlín. Bylo potřeba následné doladění přístroje, z hlediska našich univerzitních požadavků, týkající se především komfortu práce a hlavně bezpečnosti. Bylo potřeba jistých úprav. Dodělení dvouzónového zakrytování, vyřešení bezpečné výměny testovacích tělísek a hladký průběh „propalování“ hrotem žhavé smyčky.

Vyhotovení podrobného popisu práce na přístroji krok po kroku s uvážením bezpečnostních pokynů. Sestavení protokolů pro jednotlivé zkoušky dle ČSN EN 60695.

Otestování funkce na tělískách z polyamidů, které si připravíme vstřikováním, a necháme ozářit. Ozáření energií 10 MeV Beta zářením v dávkách 33 kGy, 99 kGy a 198 kGy v BGS Beta-Gamma Service GmbH & Co. KG, Deutschland, abychom zjistili vliv radiačního sítování na hořlavost. Tento test popisuje norma ČSN EN 60695-2-12:2000 a ČSN EN 60695-2-13:2000. Přesněji se jedná o zjištění indexu hořlavosti (GWFI) a indexu zapalitelnosti (GWIT).

Jedná se o vizuální zkoušku, tedy zjištěné chování je charakteristické a možné rovnou vyhodnotit. Tímto pokusem zjistíme vliv dávek ozáření s porovnáním k neozářeným tělískům, které máme také k dispozici.

7 POPIS PŘÍPRAVY A MĚŘENÍ TĚLÍSEK

7.1 Příprava zkušebních tělísek

Zkušební tělíska ve tvaru destiček se zhotoví vstřikováním na vstřikovacím stroji ARBURG 420C Allrounder Advanced.



Obr. 17. Vstřikovací stroj ARBURG 420C Allrounder Advanced

Pro výrobu zkušebních tělísek byla použita čtyřnásobná forma. Forma má dutiny ve tvaru zkušební destičky a 3x obdélníkové tyčinky pro zkoušku hořlavosti UL. Rozměry dutiny ve formě jsou v přesnosti $\pm 0,02$ mm.

7.1.1 Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C

Tab. 4. Technická data stroje Allrounder 420C

Typ stroje	Allrounder 420C	
Uzavírací 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
Hydraulika, pohon		
Výkon čerpadla	15	kW
Celkový příkon stroje	23,9	kW
Vstřikovací jednotka		
Průměr šneku	40	mm
Poměr šneku	20	L / D
Zdvih šneku	145	max. mm
Objem dávky	182	max. cm ³
Vstřikovací tlak	2120	max. bar
Vstřikovací rychlost (objemová)	168	max. cm ³ .s ⁻¹
Zpětný tlak pozitivní / negativní	350 / 160	max. bar
Krouticí moment šneku	700	max. Nm
Přítlačná síla trysky	70	max. kN
Objem násypky	50	l
Olejová náplň a hmotnost		
Množství oleje	235	l
Hmotnost stroje, bez oleje	3700	kg

7.2 Zvolené materiály

Jako zvolené materiály pro test žhavou smyčkou byly vybrány PA (polyamidy), v různých modifikacích viz Tab. 5., ať už plněné 25% skelných vláken či jen 20%, s přísadami, retardanty a podobně. Tyto informace obsahují materiálové listy, které jsou přiložené v příloze. Všechny tyto materiály pocházejí z produkce společnosti PTS Plastic Technologie Service, Deutschland.

Tab. 5. Tabulka volených materiálů od společnosti PTS

Č. m.	Název	Typ	Barva	Prod.
1.	V-PTS-CREAMID-A3H2G5FR *01G4225	PA6.6 25%GF V0 frei v.HAL.&Phos. - plněný	grau (šedá)	PTS
2.	V-PTS-CREAMID-A3H2G5 *M0311A/13	PA66 25%GF+HS/UL94/E- 17399 - plněný	blau (modrá)	PTS
3.	V-PTS-CREAMID-C3H2G5FRS *9200	PA6.6/6 Copo. – plněný 20% GF	e-schwarz (černá)	PTS
4.	V-PTS-CREAMID- C3H2G4FRSE *7035	PA 6.66 – plněný 20% GF	lichtgrau (světle šedá)	PTS
5.	V-PTS-CREAMID-AG5FRPH1 *M0128A	PA6.6 25%GF V0/0,7mm selbstverl. - plněný	schwarz (černá)	PTS

7.3 Testovací tělíska

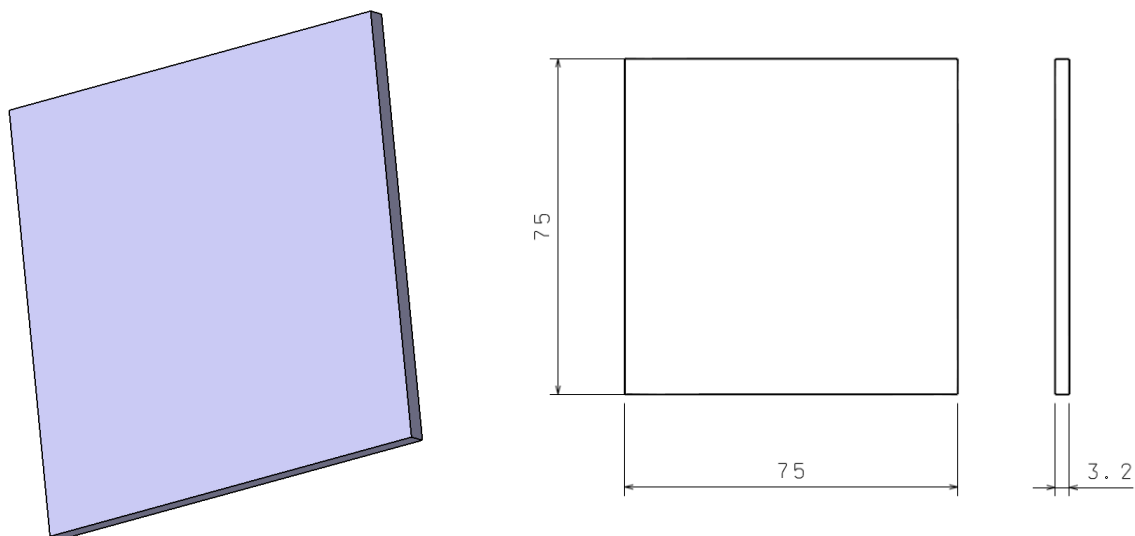
Zkouška se provádí na svisle umístěných zkušebních tělískách s dostatečně velkou rovinnou plochou.

Zkušební tělíska se zhotovují lisováním, vstřikováním, odléváním nebo odřezáváním z desek či z částí konečných výrobků s dostatečnou rovinnou plochou. Zkušební tělíska jsou o velikosti 75 x 75 mm o tloušťkách 0,8 mm, 1,6 mm a 3,2 mm. Pro náš případ byly

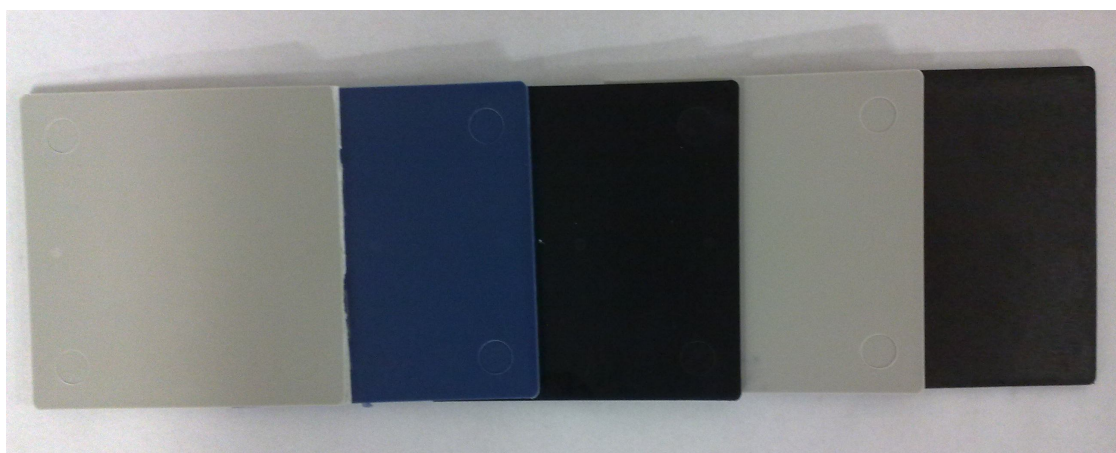
tělíska vstříkovány na výše uvedeném stroji v rozměru 75 x 75 mm a tloušťce 3,0 mm ± 0,2 mm.

Tab. 6. Parametry vstříkování zkušebních tělísek

Parametry	1.	2.	3.	4.	5.
	PA6.6 plněný	PA66 plněný	PA6.6/6 plněný	PA6.66 plněný	PA6.6 plněný
Vstříkovací tlak [MPa]	100	80	70	60	60
Dotlak [MPa]	70	60	40	50	50
Dráha dávkování [mm]	40	40	40	40	40
Doba chlazení [s]	20	20	28	20	20
Teplota formy [°C]	90	90	90	90	90
Teplota taveniny [°C]	290	290	290	290	290
Teploty pásem plastikační jednotky					
Teplota pod násypkou [°C]	70	70	70	70	70
Teplotní pásmo 1 [°C]	245	245	245	245	245
Teplotní pásmo 2 [°C]	265	265	260	260	265
Teplotní pásmo 3 [°C]	275	275	275	275	275
Teplotní pásmo 4 [°C]	285	285	285	285	285
Teplota trysky [°C]	290	290	290	290	290



Obr. 18. Model zkušebního tělíska



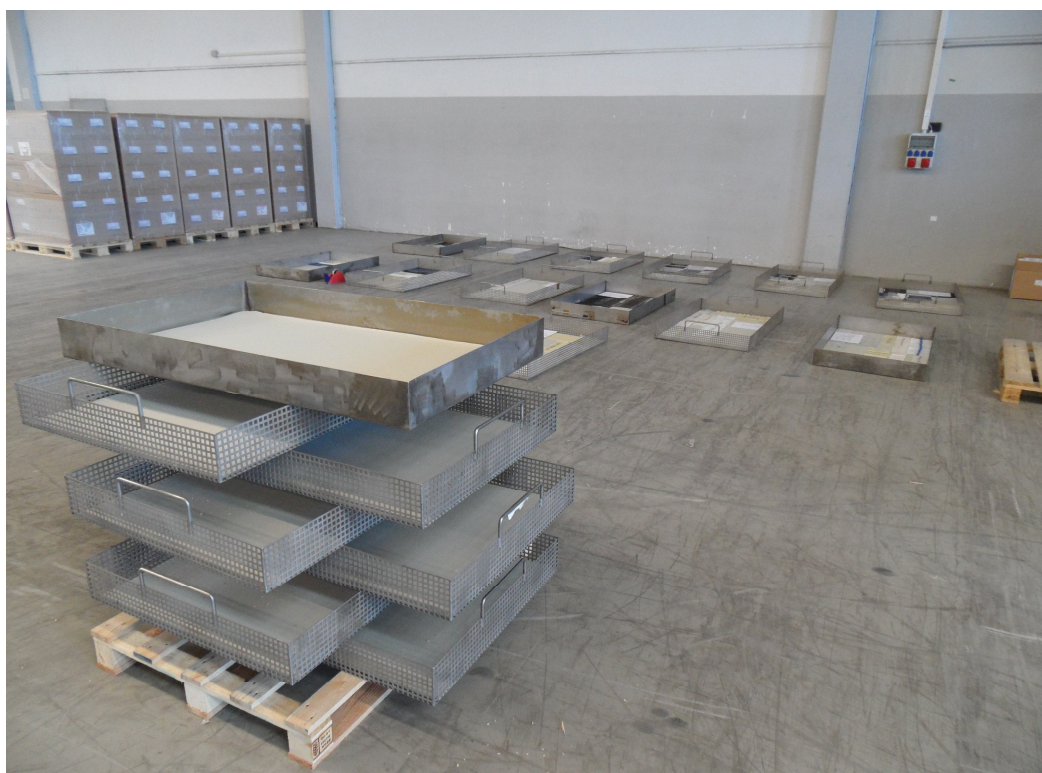
Obr. 19. Fotka vystříknutých reálných tělísek

7.3.1 Sítování zkušebních tělísek

Připravená zkušební tělíska byla ozářena β zářením, energií 10 MeV, dávkou 33, 99, 198 kGy ve firmě BGS Beta-Gamma Service GmbH & Co. KG, Industriestraße 9, Saal am Donau, Deutschland. Pro dosažení požadované dávky, projížděly palety se zkušebními tělisky ozařovacím zařízením tolikrát, než bylo dosaženo požadované hodnoty ozáření.



Obr. 20. Příprava tělísek pro ozáření



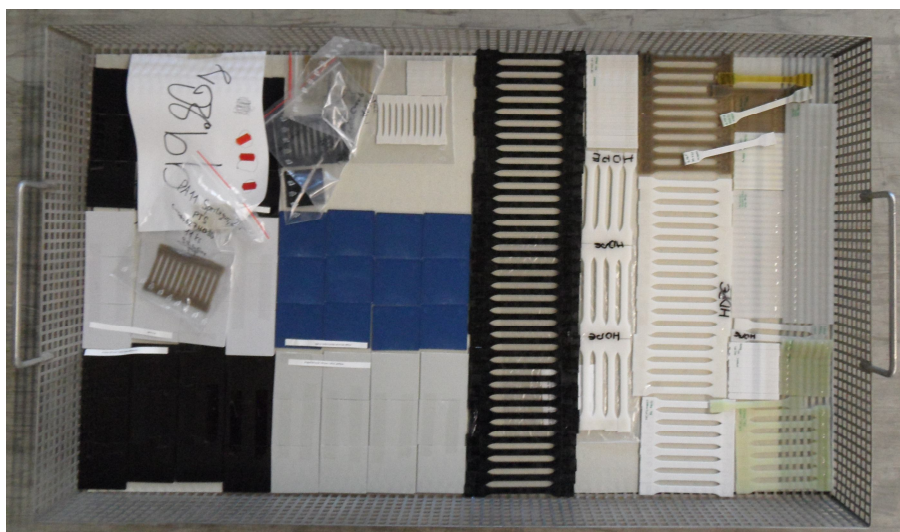
Obr. 21. Tělíska přichystané k hromadnému ozáření



Obr. 22. Linka pro ozáření ve firmě BGS

Beta-Gamma Service

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 ozářovacím zařízením zčervenal a signalizoval tím, že došlo k ozáření materiálu. Pro nejvyšší dávku ozáření 198 kGy tedy bylo na paletu umístěno šest identifikátorů.



Obr. 23. Tělíška po ozáření dávkou s identifikátory

7.4 Otestování tělísek na stupeň zesítnění a penetraci

Tyto testy se prováděly v laboratořích firmy BGS Beta-Gamma Service GmbH & Co. KG, Industriestraße 9, Saal am Donau, Deutschland. Byla provedena gelová analýza (tzn. gelová metoda zjištění stupně zesítnění) a penetrační test (*Soldering iron test*). Gelovou složku popisuje kapitola 2.2. Penetrace, tj. vnik pájkou za stanovených podmínek (v našem případě 350 °C / 1000 g / 5 s) a zaznamenávala se hloubka vniku v milimetrech.

7.4.1 Popis gelové analýzy

Dle normy ČSN EN 579 byla provedena navážka 1 g ozářeného materiálu ionizačním zářením, která se navážila s přesností na tři desetinná místa. Pro PA se používá jako rozpouštědlo kyselina mravenčí. Dojde k rozpuštění nezesíťované části polyamidu, zesíťovaná část se nerozpustí. Ochlazený zbytek se opět zváží na tři desetinná místa a porovná s původní hmotností navážky. Výsledek je uváděn v procentech jako stupeň zesítnění.

7.4.2 Popis penetračního testu (Soldering iron test)

Jedná se o test polymerů, který zjišťuje hloubku penetrace (hloubku vniku) při zvolených parametrech, penetrace se udává v milimetrech [mm]. K tomuto testu je zapotřebí specifický přístroj, pájka. V laboratořích BGS je k dispozici ERSA CPS 60.1 (viz. Obr. 24.).



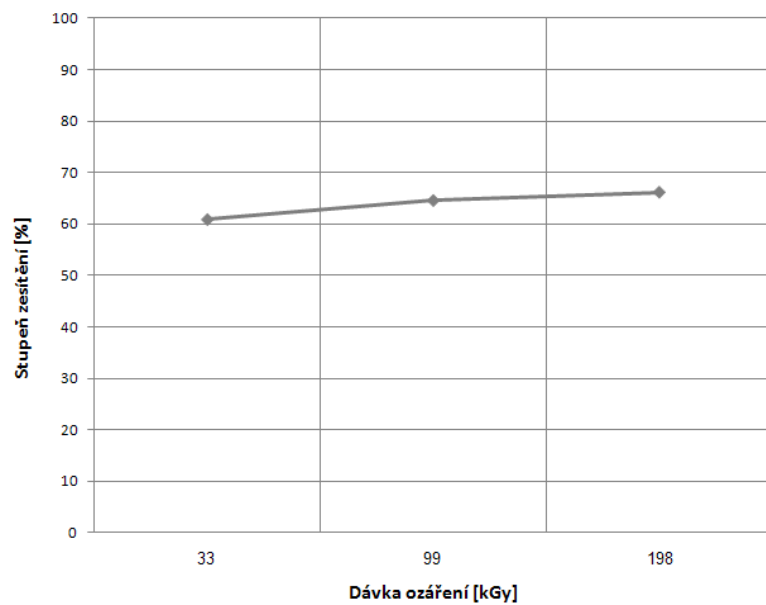
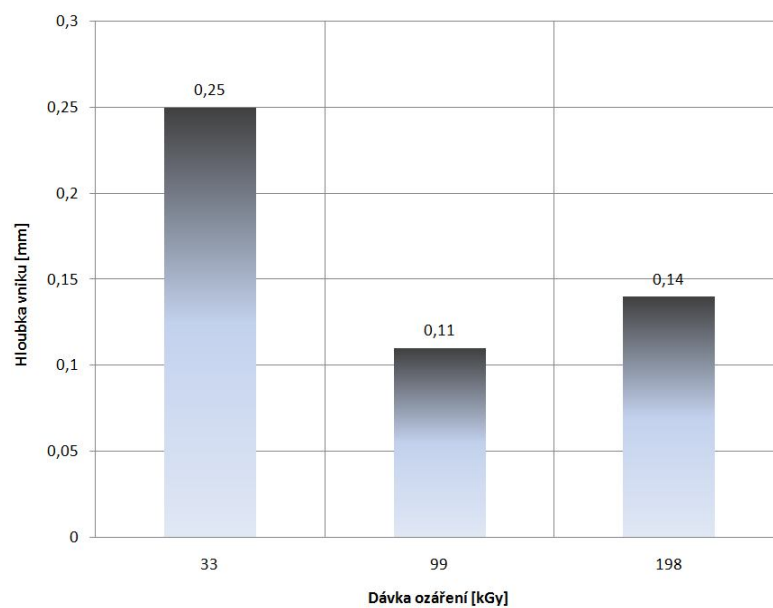
Obr. 24. Zařízení od ERSA na Soldering iron test

7.4.3 Naměřená data

Ve spolupráci s laboratoří BGS, v Saal am Donau, Deutschland.

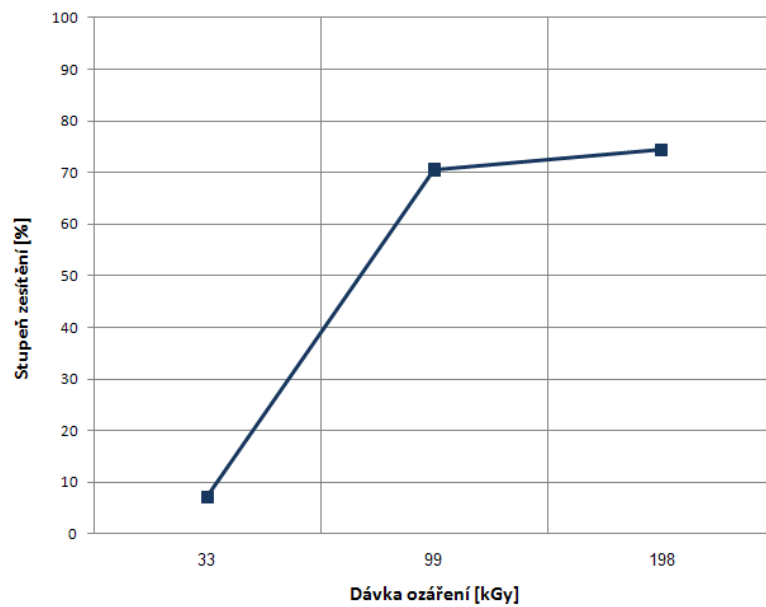
Tab. 7. Stupeň zesítnění v plněném materiálu PA6.6 25%GF V0 frei v.HAL.&Phos.

Materiál		33 kGy	99 kGy	198 kGy
		Stupeň zesítnění [%]		
1.	PA6.6 25%GF V0 frei v.HAL.&Phos.	60,9	64,6	66,2
		Penetrace při 350°C po dobu 5s [mm]		
		0,25	0,11	0,14

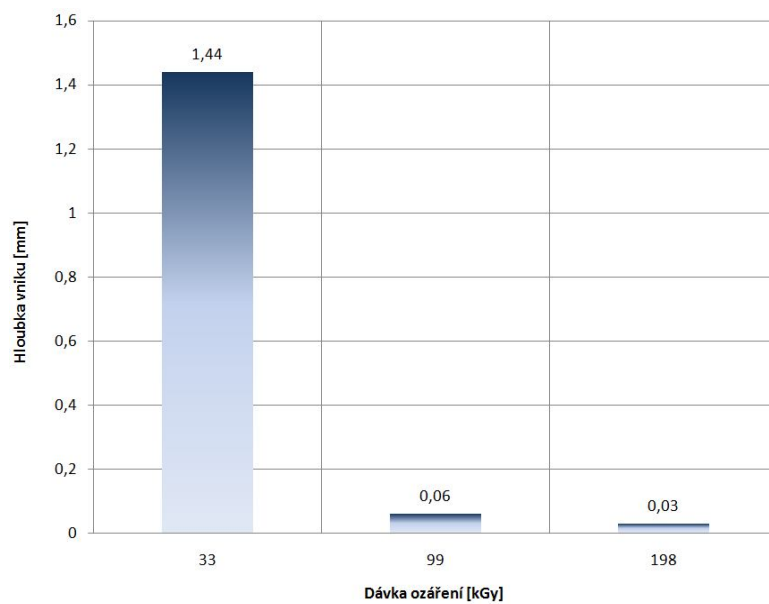
*Obr. 25. Graf znázorňující stupeň zesítnění materiálu č.1**Obr. 26. Graf znázorňující vnik do materiálu č.1*

Tab. 8. Stupeň zesítnění v plněném materiálu PA66 25%GF+HS/UL94/E-17399

Materiál		33 kGy	99 kGy	198 kGy
		Stupeň zesítnění [%]		
2.	PA66 25%GF+HS/UL94/E-17399	7,2	70,5	74,4
		Penetrace při 350°C po dobu 5s [mm]		
		1,44	0,06	0,03



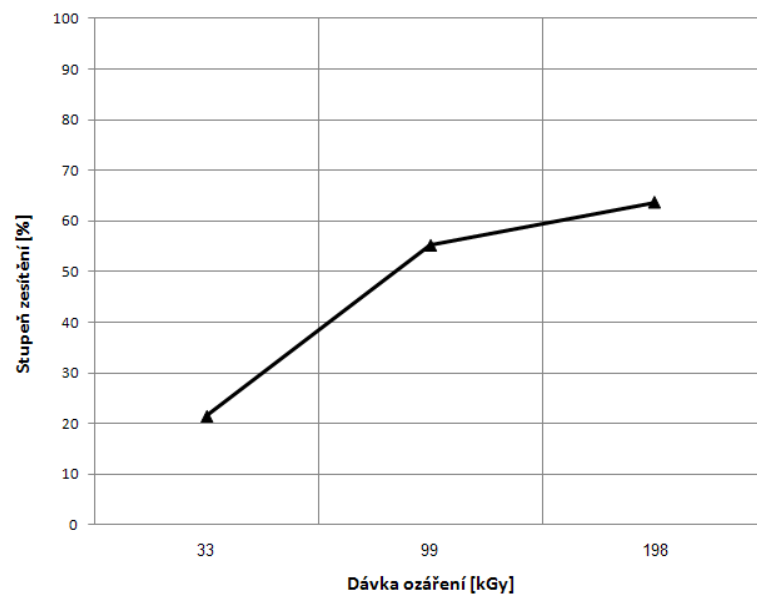
Obr. 27. Graf znázorňující stupeň zesítnění materiálu č.2



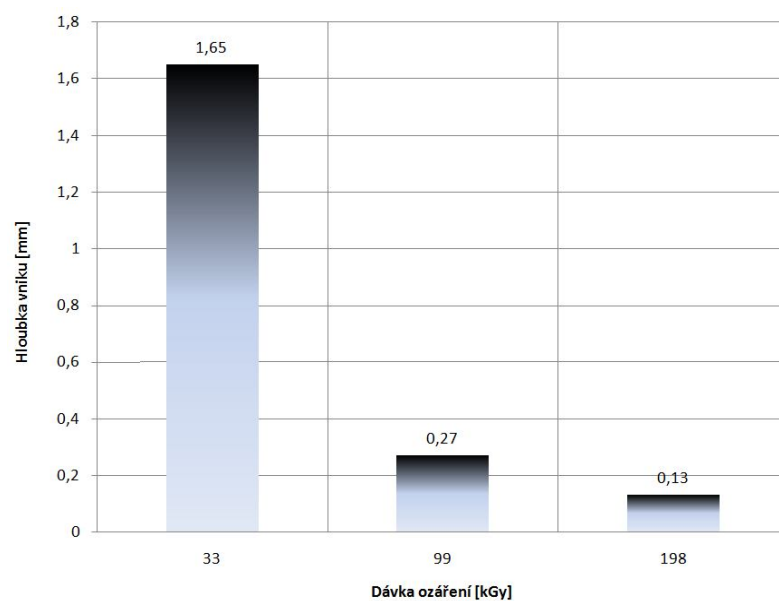
Obr. 28. Graf znázorňující vnik do materiálu č.2

Tab. 9. Stupeň zesítnění v plněném materiálu PA6.6/6 Copo.

Materiál		33 kGy	99 kGy	198 kGy
		Stupeň zesítnění [%]		
3.	PA6.6/6 Copo. 20%GF	21,5	55,2	63,7
		Penetrace při 350°C po dobu 5s [mm]		
		1,65	0,27	0,13



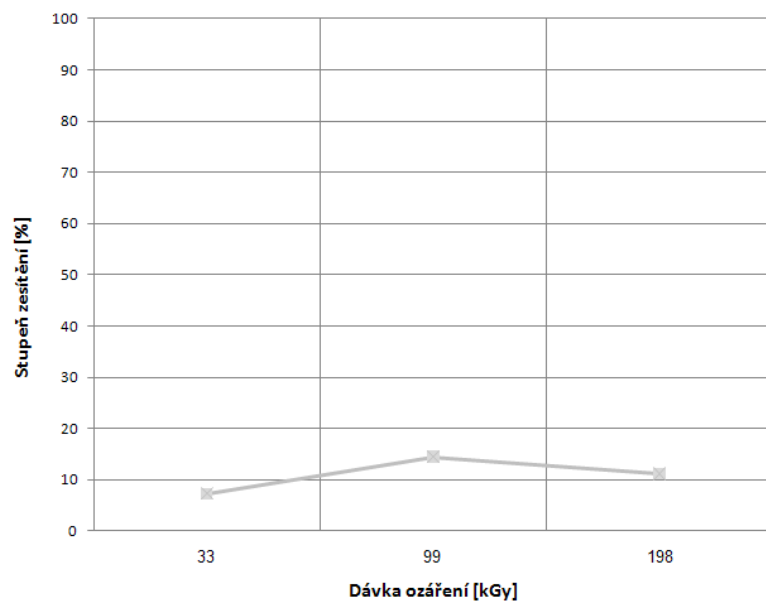
Obr. 29. Graf znázorňující stupeň zesítnění materiálu č.3



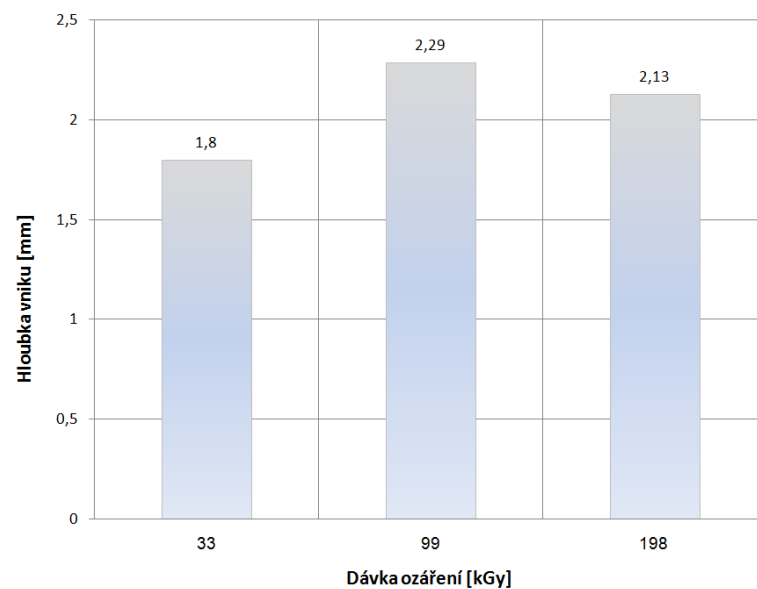
Obr. 30. Graf znázorňující vnik do materiálu č.3

Tab. 10. Stupeň zesítnění v plněném materiálu PA 6.66

Materiál		33 kGy	99 kGy	198 kGy
		Stupeň zesítnění [%]		
4.	PA 6.66 20%GF	7,3	14,5	11,2
		Penetrace při 350°C po dobu 5s [mm]		
		1,8	2,29	2,13



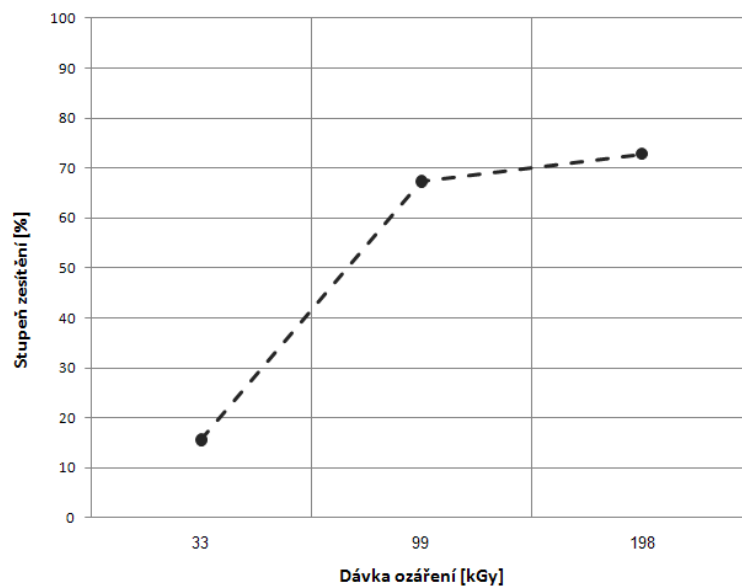
Obr. 31. Graf znázorňující stupeň zesítnění materiálu č.4



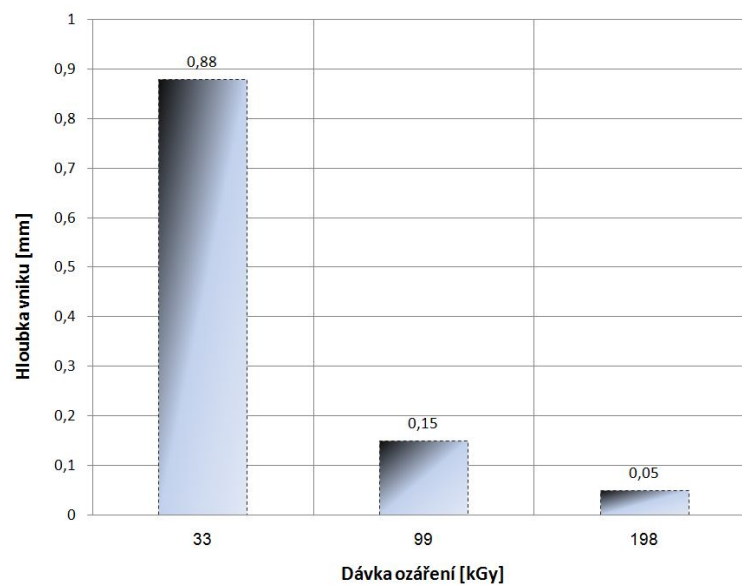
Obr. 32. Graf znázorňující vnik do materiálu č.4

Tab. 11. Stupeň zesítnění v plněném materiálu PA6.6 25%GF V0/0,7mm selbstverl.

Materiál		33 kGy	99 kGy	198 kGy
		Stupeň zesítnění [%]		
5.	PA6.6 25%GF V0/0,7mm selbstverl.	15,6	67,3	72,8
		Penetrace při 350°C po dobu 5s [mm]		
		0,88	0,15	0,05



Obr. 33. Graf znázorňující stupeň zesítnění materiálu č.5



Obr. 34. Graf znázorňující vnik do materiálu č.5

Byla zjištěna jistá abnormálie u materiálu č.4., tedy materiálu PA 6.66 (světle šedý) plněného 20% skelných vláken (viz. **Obr. 31.**). Stupeň zesítnění neodpovídá danému trendu, což je zapříčiněno tím, že tento materiál neobsahuje síťovací složku. Jako síťovací činidlo se u materiálu od spol. PTS používá BETALINK. Z toho vyplývá, že tento materiál bez síťovacího činidla má tendenci při ozařování spíše degradovat. Toto je znázorněno právě stupněm zesítnění, kde je u ozáření dávkou 198 kGy gel na menší procentuální hladině, než u nižších dávek. Znázorněno právě stupněm zesítnění. K tomu se vztahuje i Soldering iron test, při němž se u materiálu č.4 projeví tato skutečnost i na hloubce vniku.

Malá neshoda v trendu u penetrace materiálu č.1 (viz. **Obr. 26.**) je pouze zanedbatelná a neklademe na ni větší důraz.

Podle materiálových listů je doporučovaná dávka ozáření do 100 kGy, větší dávka ztrácí význam. Tato skutečnost je podle grafů viditelná a souhlasí s materiálovými listy.

8 ÚPRAVA ZAŘÍZENÍ PRO TEST ŽHAVOU SMYČKOU

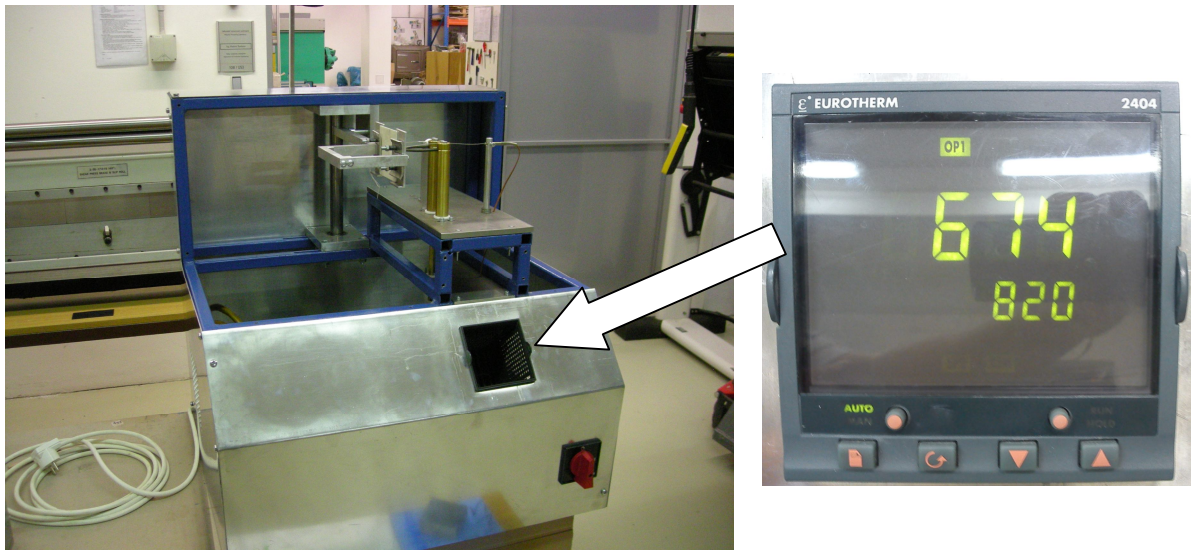
Některé prvky přístroje jako jsou rám a dostupné díly jeho nastavení byly zhotoveny podle výkresové dokumentace loňské diplomové práce. Ve spolupráci s firmou Mitas a.s. se dokončila elektroinstalace řízená termoregulátorem E-therm 2404. Na doporučení revizního technika byly nutné úpravy, které spočívaly v dodělání:

- dvouzónového zakrytování s případným rozpojením obvodu (aby nedošlo k úrazu el. proudem)
- systému výměny zkušebních tělísek (pomocné rameno)
- přitlaku tělíska na hrot smyčky (kladka se závažím)
- nezbytně nutného odtahu zplodin a kouře

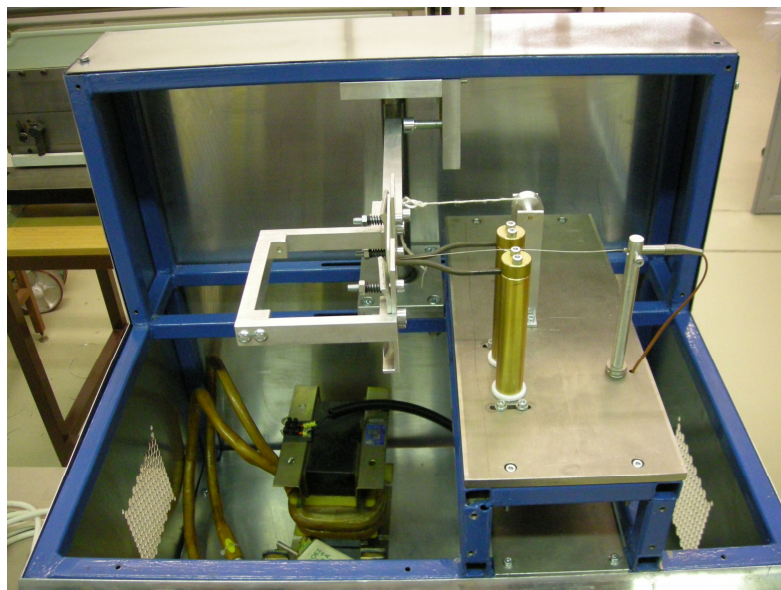
Jelikož se jedná o „prototyp“ přístroje v rámci použití v univerzitních podmínkách, malé detaily a nepřesnosti byly dodělávány během „dopasování“ na přístroj (broušení, vrtání, závity a pod.).



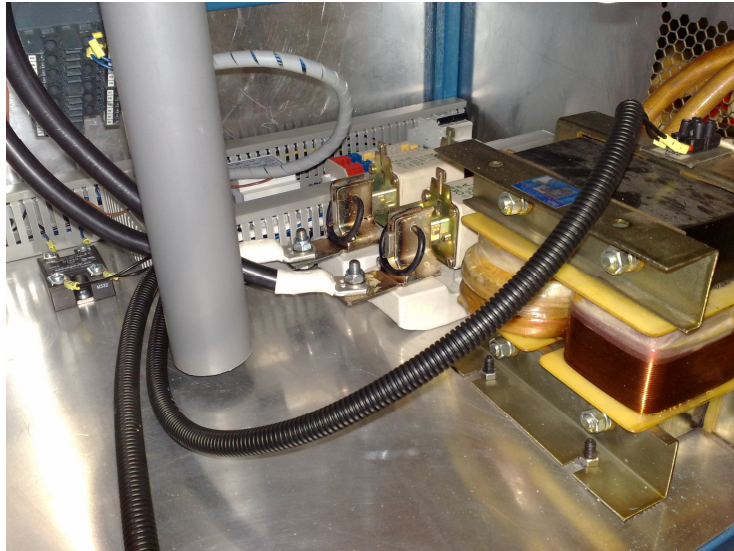
Obr. 35. Rám přístroje v základové barvě



Obr. 36. Částečně nastrojený přístroj a termoregulátor E-therm 2404

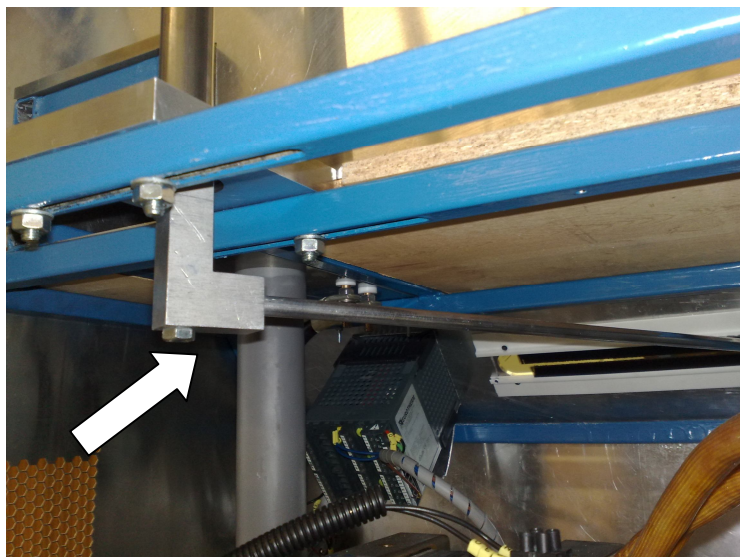


Obr. 37. Pohled na systém uchycení těliska a kladku



Obr. 38. Elektroinstalace uvnitř přístroje

Implementovaná plastová trubka \varnothing 50 mm na obrázku výše má za funkci vést závaží na kladce, zabránit kontaktu s kabeláží a chránit vedení tak, aby nedošlo k ovlivnění proudícím vzduchem z ventilátorů. Všechny tyto náležitosti jsou důležité pro správnou metodiku měření dle ČSN EN 60695-2-10, více kapitola 5.2.6.



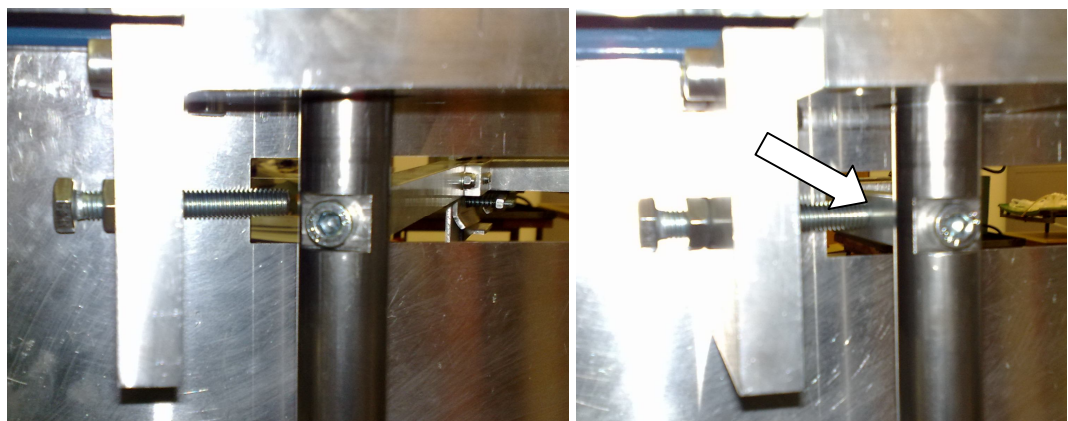
Obr. 39. Řešení otočného ramene uvnitř přístroje

System manipulace s tělískem a jeho výměnou byl jeden z úkolů, který se z hlediska bezpečné práce na zařízení řešil z důvodu možnosti styku s rozžhaveným hrotem smyčky. Pomocné rameno bylo složeno ze tří částí: díl ve tvaru L z duralu, který byl přišroubován k hřídeli (požadovaná kolmost řešena drážkou), duralovou tyč v potřebné délce (670 mm) pro manipulaci co nejdále od možnosti úrazu (žhavou smyčkou, případně el. proudem) a plastové zakončení.



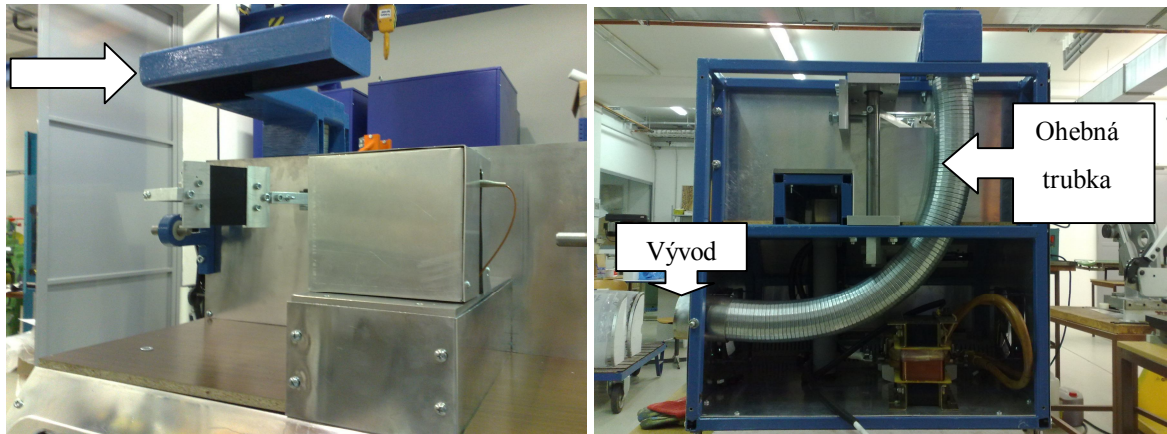
Obr. 40. Řešení ramene s vložkou

Pro zajištění krajní polohy ramene byl vyhotovený doraz na vložce. Proti zamezení vniku různých součástí vložkou do útroby přístroje, byla vložka opatřena lištovými kartáči. Je brán ohled na omezení v pohybu ramene, kde se dostává tělísko do styku s hrotem smyčky - kartáče jsou v tomto místě posunuty (**Obr. 40.**).



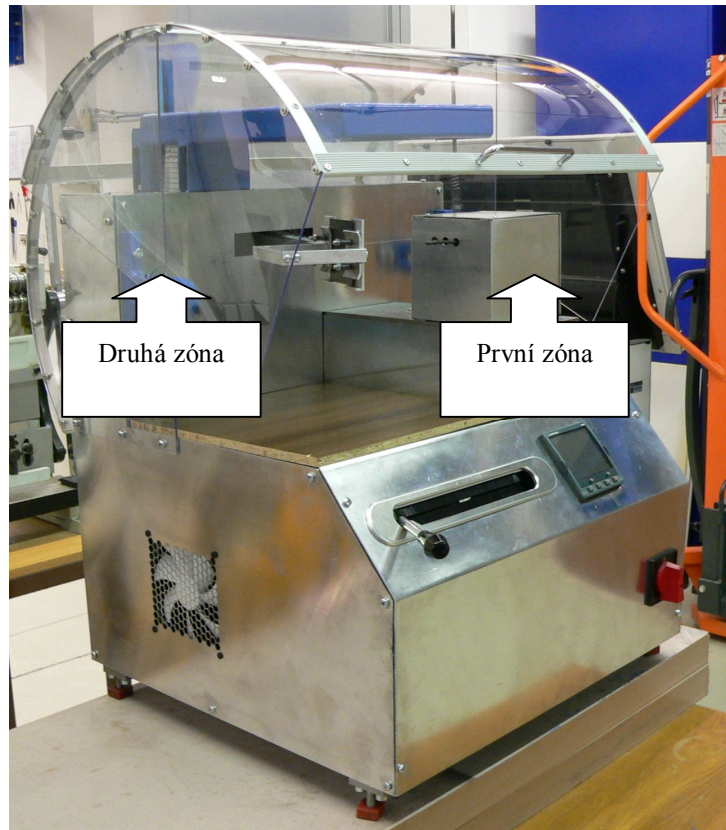
Obr. 41. Doraz šroubem pro maximální hloubku proniknutí hrotu smyčky

Proniknutí hrotu do zkušebního tělíska je omezeno na $7 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, určuje norma ČSN EN 60695-2-10. Proto byl jednoduše zkonstruován dorazový systém pomocí šroubu a matice, která zamezí povolení.

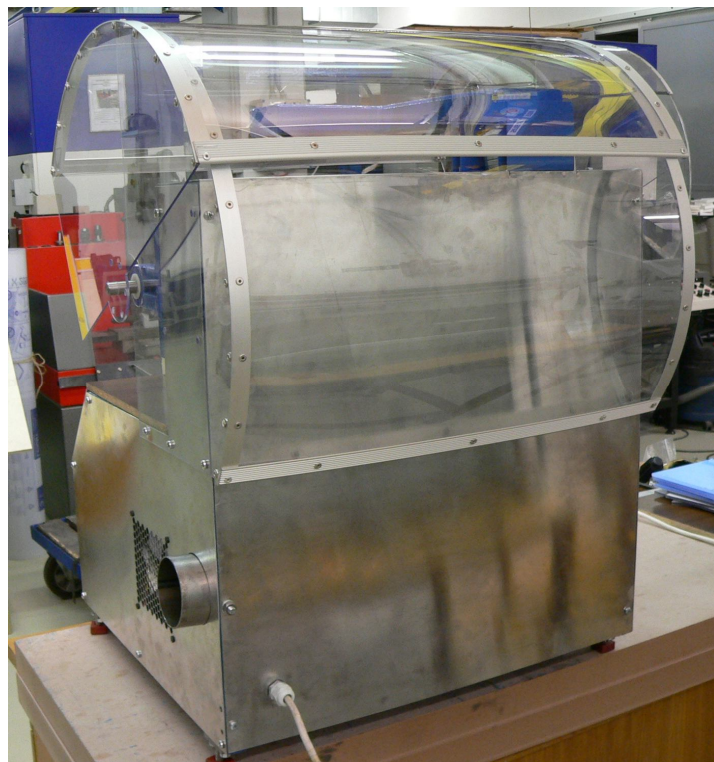


Obr. 42. Řešení odtahu zplodin

Odtah zplodin unikajících při hoření je vyroben svařením z jeklu $100 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, jak znázorňuje **Obr. 42**. Výška byla upravena tak, aby nedošlo při výměně tělíska k poranění o vedení odtahu. Na jeklový odtah byla integrována ohebná ocelová trubka, která prochází útroby přístroje až k bočnici tak, aby ničemu nevadila. Na vývod přišroubovaný k rámu přístroje se navleče hadice od integrovaného systému odtahu zplodin dostupného v laboratoři univerzity.



Obr. 43. Dvouzónové zakrytování přístroje

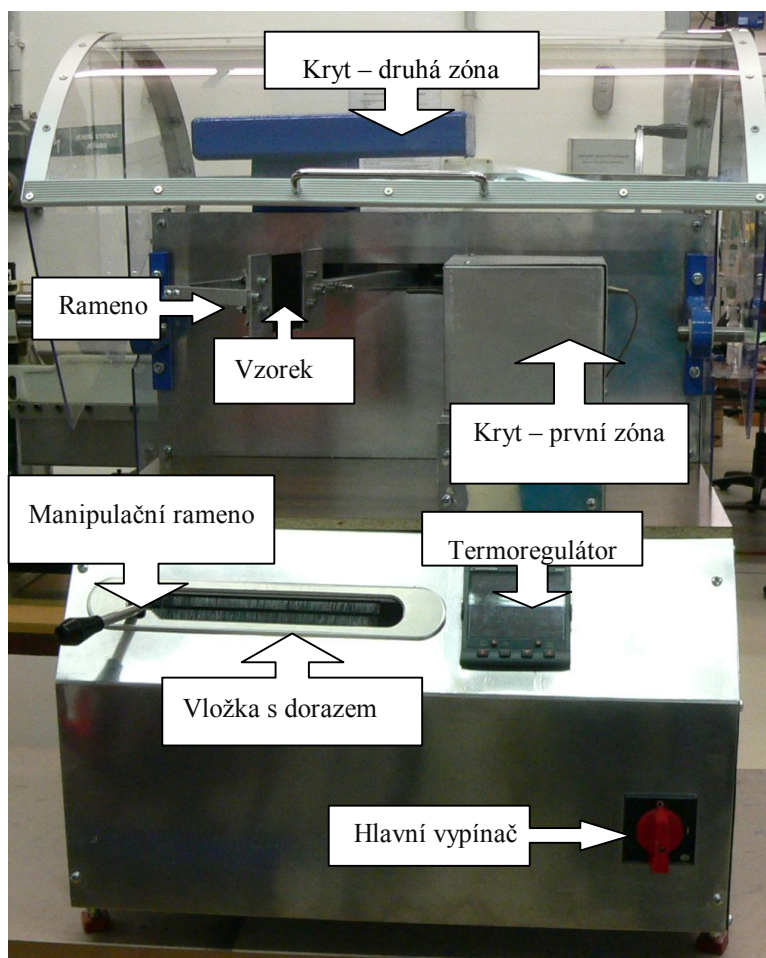


Obr. 44. Zakrytování přístroje – pohled zezadu

Na základě zajištění bezpečnosti práce při manipulaci s přístrojem, bylo vyhotoveno dvouzónové krytí.

Na první zónu byla použita plechová krabička z plechu tloušťky 1 mm, sešroubovaná ze dvou částí. Tato zóna slouží k ochraně před dotykem elektrod, aby nedošlo k úrazu el. proudem.

Druhá zóna byla řešena jako kompletní otočný horní kryt zařízení pro zkoušku žhavou smyčkou (viz. **Obr. 44.**). Celý kryt je složen z bočních krytů z PMMA (Makrolon) tloušťky 4 mm a horních krytů z PC (Lexan) tloušťky 1 mm. Kryty jsou snýtovány společně s upravenými hliníkovými lištami, abychom je mohli ohnout do požadovaného tvaru. Uchytení bylo vyřešeno pomocí přírub otáčejících se na čepu v silonových kroužcích. Silonové kroužky byly vloženy do svařených ramen přišroubovaných k rámu. Čep na obou koncích byl zajištěn pomocí pojistných kroužků Ø 16 mm (segerovek).



Obr. 45. Přístroj pro zkoušku žhavou smyčkou

9 SAMOTNÁ ZKOUŠKA ŽHAVOU SMYČKOU

9.1 Rozdělení zkoušek podle normy

9.1.1 Zkouška hořlavosti konečných výrobků

Zkouška hořlavosti konečných výrobků žhavou smyčkou podle normy ČSN EN 60695-2-11:2000.

Pokud je to možné, má být zkoušen konečný výrobek (tělísko). Místo 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, popřípadě vliv plamenů vyskytujících se v tělísku nebo vliv hořících či žhnoucích částecek odpadávajících v jeho blízkosti). [16]

Tělísko, okolní části a specifikovaná podložka se pozorují po dobu působení žhavé smyčky t_a a poté ještě po dobu 30 s a zaznamenává se:

- a) doba t_i , která uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do zapálení tělíska 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 1 s vzniknout vysoký plamen
- d) jestliže tělísko 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 tělískem

Tělísko se považuje za vyhovující, jestliže nedošlo k plamennému hoření ani ke žhnutí nebo jestliže nastal jeden z těchto dvou případů:

- 1.) plamenné hoření nebo žhnutí uhaslo do 30 s po oddálení žhavé smyčky, tzn. $t_e \leq t_a + 30$ s

- 2.) v případě použití specifikované podložky, z hedvábného balícího papíru, nedošlo k jejímu zapálení [17]

9.1.2 Zkouška hořlavosti materiálů

Podle normy ČSN EN 60695-2-12:2000. Pro účely této části ČSN EN 60695 se používají definice uvedené v ISO/IEC 13943 a tyto definice:

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

- a) plameny nebo žhnutí tělíska uhasnou během 30 s po oddálení žhavé smyčky, aniž dojde k zapálení hedvábného balícího papíru umístěného pod vzorkem
- b) tělísko se nezapálí

Index zapálení žhavou smyčkou (*GWIT* – *Glow-wire ignition temperature*), teplota o 25 K (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 tělíska o dané tloušťce. [18]

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

- a) doba t_i , která uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do zapálení tělíska 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

Tělísko při zkoušce úspěšně odolalo, pokud se buď nezapálil, nebo jsou splněny obě tyto podmínky:

- 1.) plameny nebo žhnutí uhasly do 30 s po oddálení žhavé smyčky
- 2.) nedošlo k zapálení hedvábného balícího papíru

Pokud je splněna pouze jedna nebo není splněna žádná z těchto podmínek, zkouška se opakuje s novým tělískem při nižší zkušební teplotě (viz. **Tab. 3.**). A pokud jsou splněny

obě tyto podmínky, zkouška se opakuje s novým tělískem při vyšší zkušební teplotě. Při nejvyšší zkušební teplotě, při které tělísko splnilo podmínky 1.) i 2.), se zkouška ještě dvakrát opakuje. [18]

GWFI se stanoví jako nejvyšší zkušební teplota, při které jsou ve třech po sobě jdoucích zkouškách splněny tyto podmínky uvedené výše. Jestliže se zkoušený materiál během stanovení GWIT (viz. ČSN 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. Značí se takto: *GWFI: 960/3,0* – tělísko o tloušťce 3 mm a zkušební teplotě 960 °C. [18]

9.1.3 Zkouška zapalitelnosti

Podle normy ČSN EN 60695-2-13:2000. Pro účely této části ČSN EN 60695 se používají definice uvedené v ISO/IEC 13943 a tyto definice:

Index zapálení žhavou smyčkou (*GWIT* – *Glow-wire ignition temperature*), teplota o 25 K (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 tělíska o dané tloušťce.

Zapálení (*ignition*) – přetrvání plamene po dobu delší než 5 s.

Zapalitelnost obvykle bude záviset na tloušťce zkoušeného materiálu. Přednostně doporučené hodnoty jsou 0,75 mm ± 0,1 mm, 1,5 mm ± 0,1 mm nebo 3,0 ± 0,2 mm. [19]

Tělíska se po dobu působení žhavé smyčky pozoruje. Zaznamenává se doba zapálení (t_i) jako doba, která uplyne od začátku působení hrotu smyčky, do zapálení tělíska (plamen musí být viditelný déle než 5 s).

Stanoví se, zda se tělísko zapálí. Zkušební teplota o 25 K (mezi 900 °C a 960 °C o 30 K) vyšší než maximální zkušební teplota, která během tří po sobě jdoucích zkoušek nezpůsobí zapálení, se označí jako teplota zapálení žhavou smyčkou (GWIT). Značí se takto: *GWIT: 850/3,0* – tělísko (destička) o tloušťce 3 mm a zkušební teplotě 825 °C. [19]

9.2 Popis práce na přístroji, bezpečnostní pokyny

Výstraha:

Je nutno přijmout bezpečnostní opatření k ochraně zdraví osob provádějících zkoušky před:

- nebezpečím výbuchu, hoření nebo požáru
- nebezpečím úrazu elektrickým proudem
- vdechováním kouře a/nebo toxických zplodin
- působení toxických zbytků [16]

9.2.1 Popis práce na přístroji pro zkoušku žhavou smyčkou

- 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 tělíska (destičky) do systému upevnění na rameni. Pozor na nebezpečí poranění o odtah zplodin!
- 5.) Vložení specifikované podložky pod místo styku hrotu s tělískem ($200 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ 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 tělíska k hrotu smyčky, rychlostí 10 mm/s až 25 mm/s pohybem ramene. Při doteku jemně pouštíme a necháme působit tíhu závaží, sílu $1 \text{ N} \pm 0,2 \text{ N}$.
- 8.) Měříme časy a pozorujeme příslušné chování dle ČSN EN 60695 a podle typu zkoušky. Zaznamenáváme do protokolu.
- 9.) Po ukončení testu tělíska 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.)

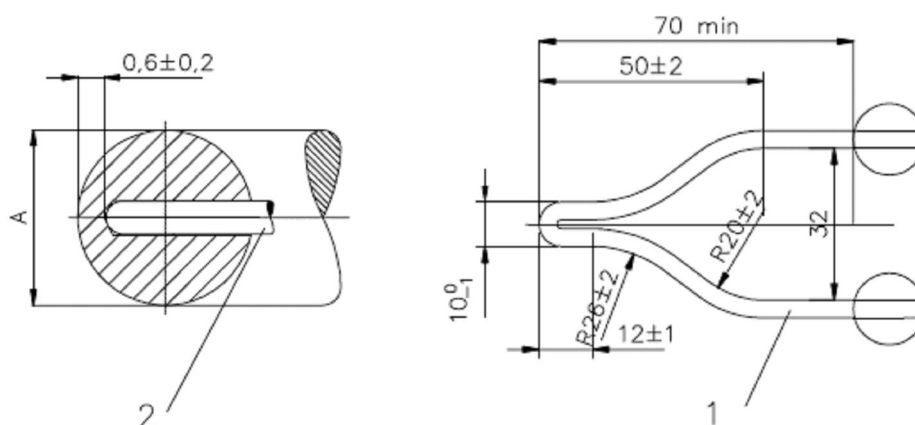
9.3 Samotná zkouška

Před zahájením zkoušky žhavou smyčkou podle normy ČSN EN 60695 je potřeba splnit následující požadavky, které určuje norma. Menší shrnutí teoretické části pro průběh zkoušky.

Aklimatizace – hedvábný papír, dřevěná deska 24 hodin před zkouškou a testovací tělíska po dobu 48 hodin (viz. kapitola 5.2.5)

Zkušební komora – zařízení musí být umístěno v prostředí s omezeným prouděním vzduchu.

Žhavá smyčka – před každým novým měřením, materiálem je potřeba změřit jmenovitý rozměr A, klesne-li hodnota tohoto rozměru na 90%, je potřeba vyměnit smyčku za novou. Případné očištění např. ocelovým kartáčem. Zahřátí na specifikovanou teplotu. Proniknutí do destičky omezeno na $7 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Působení síly $1 \text{ N} \pm 0,2 \text{ N}$ (**Obr. 47.**) v místě styku hrotu smyčky a testovacího tělíska.



Obr. 46. Jmenovitý rozměr A žhavé smyčky

1 – žhavá smyčka, 2 – termočlánek [16]



Obr. 47. Kontrola působení síly $1\text{ N} \pm 0,2\text{ N}$ pružinovým siloměrem

Upevnění tělíska – upnutí, upevnění tělíska tak, aby ztráty způsobené opěrami byly zanedbatelné, rovinná část povrchu byla svislá a hrotem působíme na střed.

Systém měření teploty – pro správnou funkci je třeba občas kalibrovat.

Tělíska – musejí se identifikovat a vizuálně prohlédnout, změřit a zaznamenat tloušťku.

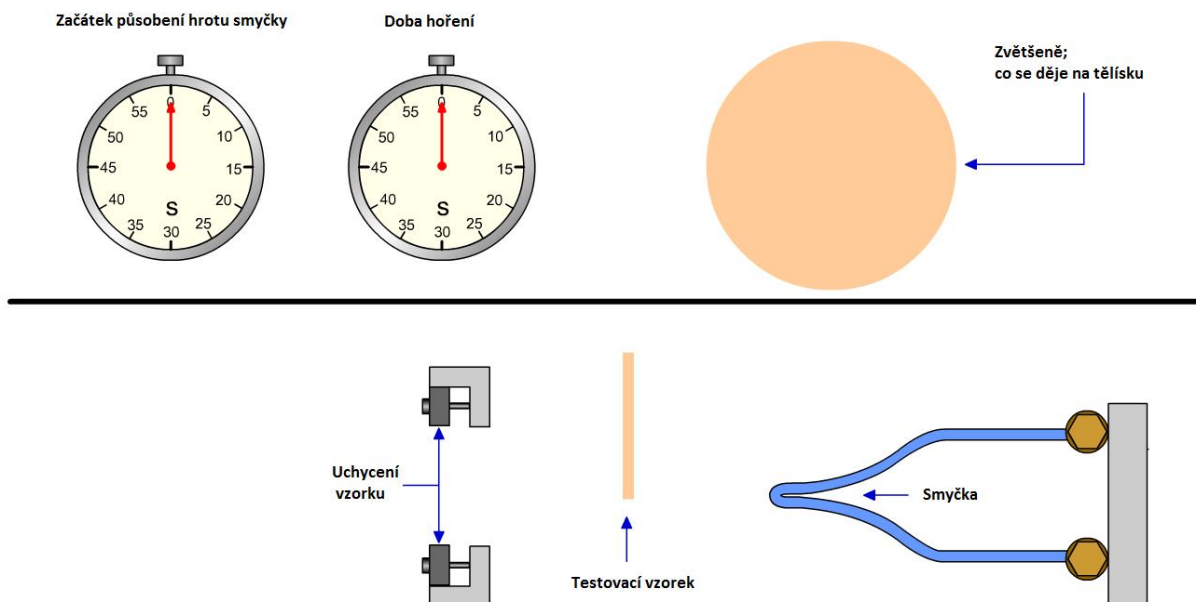
Zkušební teploty – norma udává stupně přesnosti, teploty pro žhavou smyčku (**Tab. 12.**)

Tab. 12. Stupně přesnosti zkoušky – zkušební teploty pro zkoušku [16]

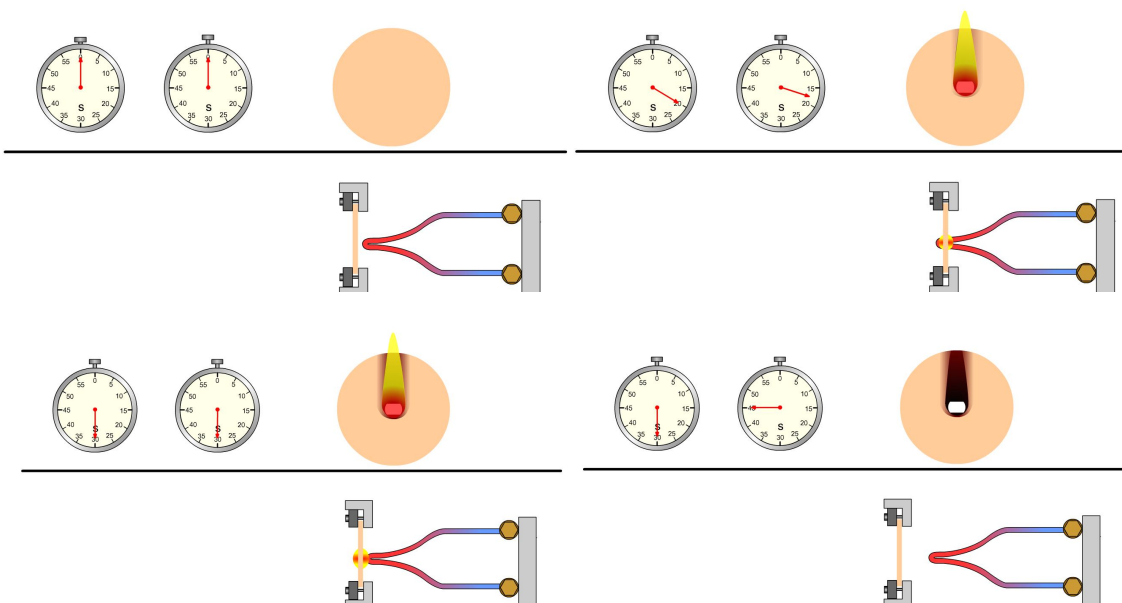
Zkušební teplota [°C]	Tolerance [K]
550	± 10
600	± 10
650	± 10
700	± 10
750	± 10
800	± 15
850	± 15
900	± 15
960	± 15

9.3.1 Schéma průběhu působení žhavé smyčky na tělísko

Obr. 48. a **Obr. 49.** názorně ukazují, co se děje s tělískem při pronikání, schéma je pouze ilustrativní. Posuv je řešen pomocí ramene, kterým přiblížíme tělísko k hrotu smyčky, přitlak silou $1\text{ N} \pm 0,2\text{ N}$ už zabezpečuje závaží.



Obr. 48. Schéma principu zkoušky žhavou smyčkou



Obr. 49. Schématické dění během zkoušky žhavou smyčkou

9.4 Vyhodnocení vizuální zkoušky

Pro otestování správné funkce přístroje budeme provádět metodiku měření podle ČSN EN 60695-2-12 a 60695-2-13. Tedy vyhotovení dvou protokolů pro jednotlivé zkoušky. Jako experimentální vzorek byl vybrán materiál č.3 - V-PTS-CREAMID-C3H2G5FRS *9200 (PA 6.6/6 Copo.).

Norma 12 se zabývá zjištěním indexu hořlavosti žhavou smyčkou (GWFI), norma 13 zase indexem zapalitelnosti (GWIT).

Tab. 13. Vyhodnocení zkoušky pro materiál č.3 norma ČSN EN 60695-2-12

Norma:	ČSN EN 60695-2-12				Datum zkoušky:	12.5.2011		
Obchodní název:	V-PTS-CREAMID-C3H2G5FRS *9200				Typ:	Příprava:		Výrobce:
					PA 6.6/6	vstřikováním		PTS
Aklimatizace před zkouškou:	Dřevěná podložka:				Balící papír:	Tělíska:		
	ANO				ANO	ANO		
Kalibrace měření teploty:	Datum provedení kalibrace:				Vyhovuje			
	12.5.2011							
Tělíska:	Rozměry:				Tloušťka tělísek:			
	75 mm x 75 mm				3 mm			
Rozměr hrotu A:	9,95 mm		> 90%		Vyhovuje			
Číslo materiálu:	Č.3. PA 6.6/6 Copo.				Barva:	Sít'ovací činidlo: <th rowspan="2">Vyhodnocení:</th>		Vyhodnocení:
					černý	Plněný	ANO Betalink	
Ozáření dávkou [kGy]	Teplota smyčky [°C]	Tělísko [ks]	Časy [s]		Uhasnutí do 30 s po oddálení	Zapálení:		GWFI
			t _i	t _e		tělísko	podložka	
0	960	1.	1	32	ANO	ANO	NE	ANO
		2.	1,5	33	ANO	ANO	NE	ANO
		3.	1	34	ANO	ANO	NE	960/3,0

Tab. 14. Vyhodnocení zkoušky pro materiál č.3 norma ČSN EN 60695-2-13

Norma:	ČSN EN 60695-2-13				Datum zkoušky:	12.5.2011			
Obchodní název:	V-PTS-CREAMID-C3H2G5FRS *9200				Typ:	Příprava:		Výrobce:	
					PA 6.6/6	vstřikováním		PTS	
Aklimatizace před zkouškou:	Dřevěná podložka:				Balící papír:	Tělíška:			
	ANO				ANO	ANO			
Kalibrace měření teploty:	Datum provedení kalibrace:					Vyhovuje			
	12.5.2011								
Tělíška:	Rozměry:					Tloušťka tělísek:			
	75 mm x 75 mm					3 mm			
Rozměr hrotu A:	9,95 mm		> 90%		Vyhovuje				
Číslo materiálu:					Barva:	Sít'ovací činidlo: <th rowspan="2">Vyhodnocení:</th>		Vyhodnocení:	
					černý	20% GF	ANO		Betalink
Ozáření dávkou [kGy]	Teplota smyčky [°C]	Tělíška [ks]	Časy [s]		Plamen > 5s (s)	Zapálení:		GWIT	
			t _i	t _e		tělíško	podložka		
0	960	1.	1,5	34	ANO	ANO	NE	-	
	900	1.	1	33	ANO	ANO	NE	-	
	850	1.	1	32	ANO	ANO	NE	-	
	800	1.	2	33	ANO	ANO	NE	-	
	750	1.	1,5	31,5	ANO	ANO	NE	-	
	700	1.	-	-	-	NE	NE	NE	ANO
		2.	-	-	-	NE	NE	NE	ANO
		3.	-	-	-	NE	NE	NE	725/3,0

9.4.1 Diskuze výsledků

Po otestování správné funkce přístroje podle výše zmiňovaných norem byla provedena zkouška pro materiál PA 6.6/6 (V-PTS-CREAMID-C3H2G5FRS *9200). Tento materiál byl ve dvou formách – neozářený a dále ozářený dávkami 33 kGy, 99 kGy a 198 kGy. Měřenými veličinami byly index hořlavosti žhavou smyčkou (GWFI) a index zapalitelnosti žhavou smyčkou (GWIT). Z průběhu zkoušek byly vyhotoveny dva protokoly (viz. **Tab. 13.** a **Tab. 14.**) pro každou metodiku zvlášť.

Pro GWFI:

Tělísko a hedvábný papír umístěný pod ním se pozorují po dobu působení žhavé smyčky a poté ještě po dobu 30 sekund, zaznamenávají se tyto hodnoty:

- a) doba t_i , která uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do zapálení destičky 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

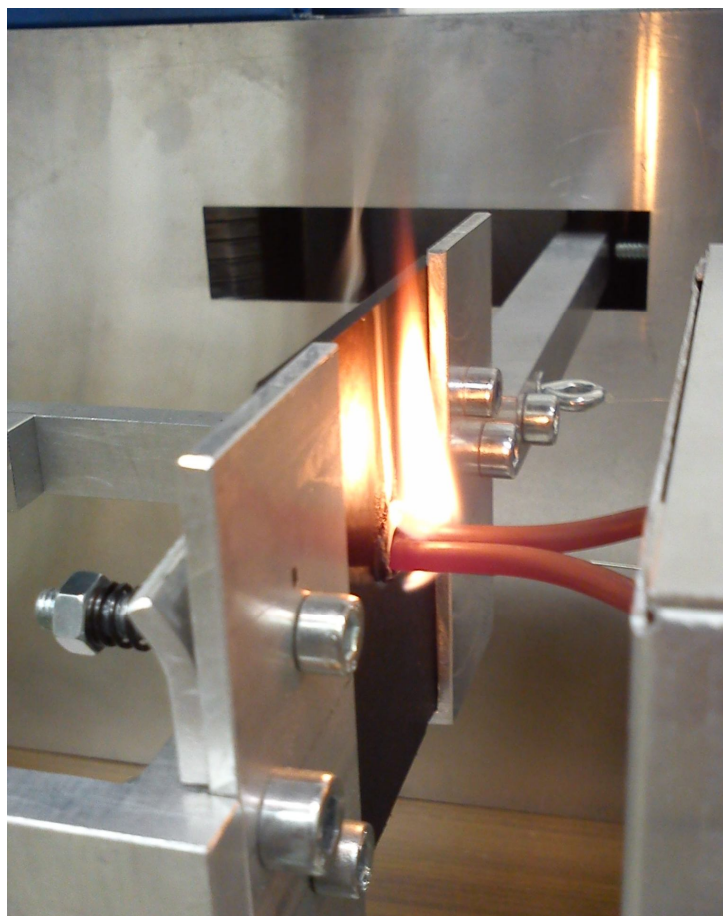
Destička při zkoušce úspěšně odolala, pokud se buď nezapálila, nebo jsou splněny obě tyto podmínky:

- 1.) plameny nebo žhnutí uhasly do 30 s po oddálení žhavé smyčky
- 2.) nedošlo k zapálení hedvábného balícího papíru

Pokud je splněna pouze jedna nebo není splněna žádná z těchto podmínek, zkouška se opakuje s novým tělískem při nižší zkušební teplotě (viz. **Tab. 3.**). A pokud jsou splněny obě tyto podmínky, zkouška se opakuje s novým tělískem při vyšší zkušební teplotě. Při nejvyšší zkušební teplotě, při které tělísko splnilo podmínky 1.) i 2.), se zkouška ještě dvakrát opakuje.

U sledovaného neozářeného materiálu č. 3 PA 6.6/6 Copo. došlo při kontaktu se žhavou smyčkou k zapálení (viz. **Obr. 50.**), nedocházelo však k odkapávání roztaveného materiálu. Po oddálení tělíska od hrotu smyčky plameny uhasly do stanoveného limitu (viz. protokol z měření **Tab. 13.**). Byla zjištěna hodnota indexu hořlavosti **GWFI: 960/3,0** – tzn. že sledovaný materiál splňuje všechny výše zmíněné podmínky 1.) i 2.).

Obečně 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.



Obr. 50. Vzplanutí testovacího tělíska při 750 °C

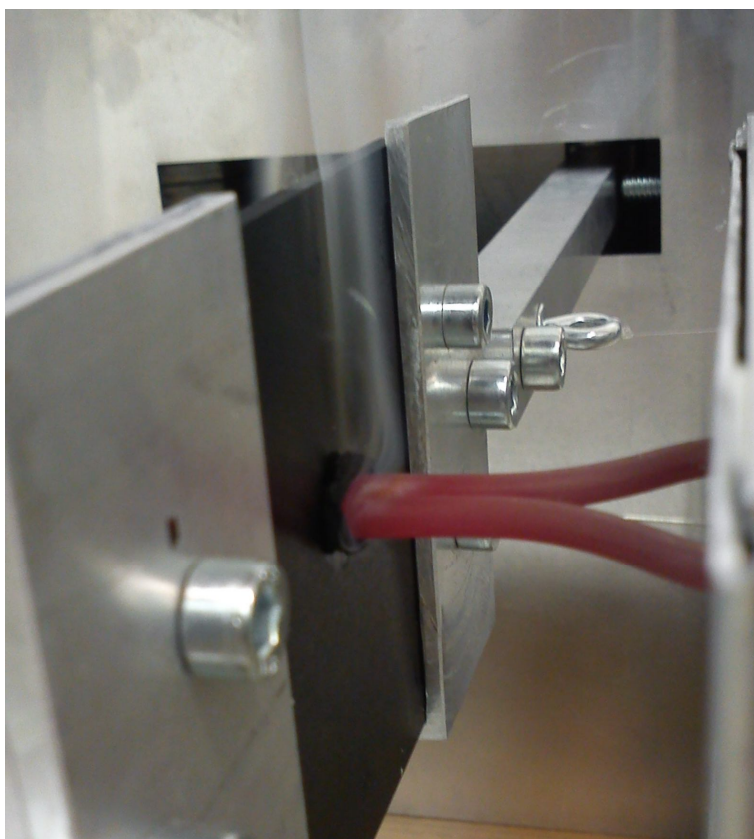
Pro GWIT:

Destička se po dobu působení žhavé smyčky pozoruje. Zaznamenává se doba zapálení (t_i) jako doba, která uplyne od začátku působení hrotu smyčky, do zapálení tělíska (plamen

musí být viditelný déle než 5 sekund). GWIT stanovuje nejvyšší teplotu, při které nedojde k zapálení zkušebního tělíska.

U sledovaného neozářeného materiálu č. 3 kopolymeru PA 6.6/6 docházelo k zapálení až do teploty 700 °C (viz. protokol z měření **Tab. 14.**) – destička se sice při kontaktu se žhavou smyčkou odtavovala, ale nevzplanula (viz. **Obr. 51.**). Naměřený index (teplota) zapalitelnosti tohoto materiálu byl zjištěn - **GWIT: 725/3,0.**

Obecně výsledky zkoušky umožňují provést relativní porovnání různých materiálů podle teploty, při které se vzorky zapálí při použití elektricky zahříváné žhavé smyčky jako zdroje zapálení. Zkušební metoda neplatí pro stanovení zapalitelnosti kompletních zařízení, protože zapalitelnost použitých materiálů je silně ovlivněna rozměry izolačních systémů nebo hořlavých částí, konstrukcí a přenosem tepla na sousední kovové nebo nekovové části atd.



Obr. 51. Odtavování tělíska při teplotě 700 °C

ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce byla montáž přístroje pro zkoušení požárního nebezpečí, zařízení pro zkoušku žhavou smyčkou, dle normy ČSN EN 60695-2-10:2000 z dostupných dílů a doděláné elektroniky řízené termoregulátorem ve spolupráci s Mitas a.s. a jeho otestování. Po konzultaci s revizním technikem bylo doporučeno doděláné bezpečnostních prvků jako **dvouzónové zakrytování**, vyřešení **bezpečné výměny testovacích tělísek** a hladký **průběh „propalování“ hrotem** žhavé smyčky. Vyhotovení stručného a jasného popisu práce na přístroji, sestavení protokolů pro vyhodnocení zkoušek. Experiment k ověření funkce byl proveden na tělískách, které jsme si připravili vstříkovaním za stanovených podmínek z polyamidů. Tělíska byly ozářeny energií 10 MeV dávkami 0 kGy (neozářeny), 33 kGy, 99 kGy a 198 kGy v BGS. (str. 60.)

Na zkušebních tělískách byla provedena ve společnosti BGS zkouška na zjištění stupně zesítní gelovou metodou a penetrační test (Soldering iron test), který popisuje hloubku vniku do tělíska pájkou – analogicky podobný průběh testu za výrazně nižších teplot, časů apod. Vyhodnocením těchto testů bylo ověřeno, že dostačující dávka záření je 99 (100) kGy, pro vyšší dávky intenzity záření - náklady na ozáření neodpovídají získaným vlastnostem. Také jsem ověřil, že *materiál č.4 (V-PTS-CREAMID-C3H2G4FRSE *7035, tedy PA 6.66 plněný 20% GF)* neobsahuje síťovací činidlo (Betalink), což se projevilo na stupni zesítní (**max. 14,5%**) i na penetračním testu (hloubka vniku **2,29 mm**). (str.59.)

Experiment, otestování přístroje, proběhl pro vybraný *materiál č.3 (V-PTS-CREAMID-C3H2G5FRS *9200, tedy kopolymer PA 6.6/6 plněný 20% GF)* ovšem pouze neozářený Beta zářením (0 kGy). Průběh propalování se vizuálně shoduje s popisem průběhu hoření polymerů popsanych v teoretické části (kondenzovaná fáze, mesofáze, plynná fáze). Pro testovaná tělíska z materiálu č.3 byly zjištěny (viz. **Tab. 13.** a **Tab. 14.**) hodnoty **GWFI: 960/3,0 a GWIT: 725/3,0**. Naměřené hodnoty byly porovnány s hodnotami z materiálových listů od PTS, kdy je hodnota GWFI 960/3,0 a GWIT 775/3,0 (ovšem tyto hodnoty jsou pro tělísko ozářené dávkou 66 kGy).

Naměření GWFI a GWIT u ozářených tělísek nedošlo z důvodu velké časové prodlevy při spolupráci s firmou Mitas a.s. na dokončení elektroinstalace. Ale pro ověření metodiky a funkce přístroje byly provedené zkoušky postačující.

Jako smysl využití přístroje pro zkoušku požárního nebezpečí, žhavé smyčky, shledávám účelným a především velmi dobrým doplňkem pro testy UL. Podává tak objektivnější pohled na požární nebezpečí např. při kontaktu polymerních součástí s elektrotechnickými prvky, které se v dnešní době velmi zahřívají a mohou tak zvýšit riziko vzniku požáru.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery : Výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha : VŠCHT, 1995. 354 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [2] PŘIKRYL, Martin. *Vliv ozařování na vlastnosti polyamidů*. [s.l.], 2008. 142 s. Diplomová práce. UTB Zlín.
- [3] VESELÝ, Karel. *Polymery : Struktura, syntézy, vlastnosti, zpracování*. Brno : ČSPCH, 1992. 178 s. ISBN 80-02-00951-7.
- [4] SOVA, M. – KREBS, J. a kolektiv: *Termoplasty v praxi: aktuální stav červenec 2003*, Verlag Dashöfer, 2003. ISBN 80-86229-15-7.
- [5] MIZERA, Aleš. *Teplotní odolnost vybraných polymerů*. Zlín, 2009. 95 s. Bakalářská práce. UTB Zlín.
- [6] DOLEŽEL, Břetislav. *Odolnost plastů a pryží*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1981. 710 s.
- [7] LPM s.r.o. : *Materiálové listy* [online]. 2010 [cit. 2010-11-07]. Dostupné z WWW: <www.lpm.cz>.
- [8] LAMBOROVÁ, Romana. *Recyklace ozářených polymerů*. Zlín, 2009. 95 s. Diplomová práce. UTB Zlín.
- [9] *FyzVlast3: Pedagogická fakulta* [online]. [cit. 2010-12-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/FMkomplet3.htm>>
- [10] LENFELD, P. *Technologie II : Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit. 2010-12-10]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm>
- [11] VÁLEK, Martin. *Vliv ozařování na mechanické a termomechanické vlastnosti polypropylenu*. Zlín, 2006. 133 s. Diplomová práce. UTB Zlín.
- [12] BGS – Beta gama service. [online]. [cit. 2010-12-22]. Dostupný z WWW: <<http://bgs.de>>

- [13] TROITZSCH, Jürgen . *Plastics Flammability Handbook : Principles, Regulations, Testing and Approval*. 3rd edition. Munich : Hanser Publishers, 2004. 748 s., ISBN 1-56990-356-5.
- [14] ZEUS : Flammability of Polymers. In *ZEUS : Flammability of Polymers*. [s.l.] : Zeus Industrial Products, Inc., 2005. s. 6.
- [15] LYON, Richard E. ; JANSSENS, Marc L. . *Polymers Flammability : Final report*. In . Office of Aviation Research Washington, D.C. Washington, D.C. : [s.n.], 2005. s. 82.
- [16] ČSN EN 60695-2-10. *Zkoušky Žhavou/horkou smyčkou : Zařízení pro zkoušky Žhavou smyčkou a společný zkušební postup*. [s.l.] : [s.n.], Listopad 2001. 16 s.
- [17] ČSN EN 60695-2-11. *Zkoušky Žhavou/horkou smyčkou : Zkouška hořlavosti konečných výrobků žhavou smyčkou*. [s.l.] : [s.n.], Listopad 2001. 11 s.
- [18] ČSN EN 60695-2-12. *Zkoušky Žhavou/horkou smyčkou : Zkouška hořlavosti materiálů žhavou smyčkou*. [s.l.] : [s.n.], Listopad 2001. 9 s.
- [19] ČSN EN 60695-2-13. *Zkoušky Žhavou/horkou smyčkou : Zkouška zapalitelnosti materiálů žhavou smyčkou*. [s.l.] : [s.n.], Listopad 2001. 9 s.
- [20] ACQUASANTA, Francesco, et al. *Polymer Degradation and Stability : Study of Glow Wire Ignition Temperature (GWIT) and Comparative Tracking Index (CTI) performances of engineering thermoplastics and correlation with material properties*. In [online]. Università di Bologna : Elsevier Ltd., 2011, 19 January 2011 [cit. 2011-04-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TXS-52079YX-5/2/417e3a4932fc90dee54d72f8ffd10d3f>>.
- [21] VACULÍK, Jan. *Vlastnosti radiačně síťovaných polymerů*. Zlín, 2010. 126 s. Diplomová práce. UTB Zlín.
- [22] MEISSNER, Bohumil ; ZILVAR, Václav . *Fyzika polymerů : Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. první. Praha : SNTL, 1987. 308 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PA	Polyamid
T_g	Teplota skelného přechodu [°C]
T_m	Teplota tání [°C]
M	Molekulová hmotnost [g/mol ⁻¹]
Gy	Grey – jednotka intenzity záření
eV	Elektronvolt – dříve používaná jednotka energie
Bq	Becquerell - jednotka výkonu zdroje (aktivita)
β	Beta záření
γ	Gama záření
N	Newton – jednotka síly

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Základní klasifikace polymerů [5].....	12
Obr. 2. Rozdělení přírodních a syntetických polymerů [8].....	13
Obr. 3. Rozdělení polymerů dle jejich aplikace a ceny [8]	14
Obr. 4. Tvary molekul [9]	16
Obr. 5. Schéma vzniku sítě [22]	21
Obr. 6. Schéma radiačního síťování elektronovým.....	23
Obr. 7. Síťování PE elektronovým zářením [12]	26
Obr. 8. Záření β [21].....	27
Obr. 9. Charakteristika vlastností v závislosti na dávce ozáření [12]	28
Obr. 10. Fyzikální a chemický proces při hoření polymerů [15].....	31
Obr. 11. Radikální reakce hoření polymerů [15]	32
Obr. 12. Profily teploty, viskozity a hustoty pro hoření [15]	33
Obr. 13. Fenomenologie hoření polymerů [15]	33
Obr. 14. Spalovací proces	35
Obr. 15. Simulace zkoušky žhavou smyčkou [20]	38
Obr. 16. Nákres žhavé smyčky [16].....	39
Obr. 17. Vstřikovací stroj ARBURG 420C Allrounder Advanced.....	45
Obr. 18. Model zkušebního tělíska	49
Obr. 19. Fotka vystříknutých reálných tělísek	49
Obr. 20. Příprava tělísek pro ozáření.....	50
Obr. 21. Tělíska přichystané k hromadnému ozáření.....	50
Obr. 22. Linka pro ozařování ve firmě BGS	51
Obr. 23. Tělíska po ozáření dávkou s identifikátory.....	51
Obr. 24. Zařízení od ERSa na Soldering iron test	53
Obr. 25. Graf znázorňující stupeň zesílení materiálu č.1.....	54
Obr. 26. Graf znázorňující vnik do materiálu č.1	54
Obr. 27. Graf znázorňující stupeň zesílení materiálu č.2.....	55
Obr. 28. Graf znázorňující vnik do materiálu č.2	55
Obr. 29. Graf znázorňující stupeň zesílení materiálu č.3.....	56
Obr. 30. Graf znázorňující vnik do materiálu č.3	56
Obr. 31. Graf znázorňující stupeň zesílení materiálu č.4.....	57

Obr. 32. Graf znázorňující vnik do materiálu č.4	57
Obr. 33. Graf znázorňující stupeň zesílení materiálu č.5.....	58
Obr. 34. Graf znázorňující vnik do materiálu č.5	58
Obr. 35. Rám přístroje v základové barvě.....	60
Obr. 36. Částečně nastrojený přístroj a termoregulátor E-therm 2404.....	61
Obr. 37. Pohled na systém uchycení tělíska a kladku	61
Obr. 38. Elektroinstalace uvnitř přístroje	62
Obr. 39. Řešení otočného ramene uvnitř přístroje.....	62
Obr. 40. Řešení ramene s vložkou	63
Obr. 41. Doraz šroubem pro maximální hloubku proniknutí hrotu smyčky.....	63
Obr. 42. Řešení odtahu zplodin	64
Obr. 43. Dvouzónové zakrytování přístroje.....	65
Obr. 44. Zakrytování přístroje – pohled zezadu	65
Obr. 45. Přístroj pro zkoušku žhavou smyčkou	66
Obr. 46. Jmenovitý rozměr A žhavé smyčky.....	71
Obr. 47. Kontrola působení síly $1\text{ N} \pm 0,2\text{ N}$ pružinovým siloměrem.....	72
Obr. 48. Schéma principu zkoušky žhavou smyčkou	73
Obr. 49. Schématické dění během zkoušky žhavou smyčkou	73
Obr. 50. Vzplanutí testovacího tělíska při $750\text{ }^{\circ}\text{C}$	77
Obr. 51. Odtavování tělíska při teplotě $700\text{ }^{\circ}\text{C}$	78

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Materiály vhodné k zesíťování.....	25
Tab. 2. Vybrané, komerčně využitelné aplikace	28
Tab. 3. Stupně přísnosti zkoušky.....	42
Tab. 4. Technická data stroje Allrounder 420C.....	46
Tab. 5. Tabulka volených materiálů od společnosti PTS	47
Tab. 6. Parametry vstřikování zkušebních tělísek.....	48
Tab. 7. Stupeň zesíťení v plněném materiálu PA6.6 25%GF V0 frei v.HAL.&Phos.....	54
Tab. 8. Stupeň zesíťení v plněném materiálu PA66 25%GF+HS/UL94/E-17399	55
Tab. 9. Stupeň zesíťení v plněném materiálu PA6.6/6 Copo.	56
Tab. 10. Stupeň zesíťení v plněném materiálu PA 6.66.....	57
Tab. 11. Stupeň zesíťení v plněném materiálu PA6.6 25%GF V0/0,7mm selbstverl.	58
Tab. 12. Stupně přísnosti zkoušky – zkušební teploty pro zkoušku [16]	72
Tab. 13. Vyhodnocení zkoušky pro materiál č.3 norma ČSN EN 60695-2-12.....	74
Tab. 14. Vyhodnocení zkoušky pro materiál č.3 norma ČSN EN 60695-2-13.....	75

SEZNAM PŘÍLOH

- PŘÍLOHA I CERTIFIKÁT OZÁŘENÍ BGS
- PŘÍLOHA II PRÁZDNÉ PROTOKOLY PRO JEDNOTLIVÉ ZKOUŠKY
- PŘÍLOHA III MATERIÁLOVÉ LISTY PTS (přiloženo pouze na CD)

PŘÍLOHA I: CERTIFIKÁT OZÁŘENÍ BGS 1/2

Zertifikat

BGS

IDEEN PLUS ENERGIE

BGS Industriestraße 9 93342 Saal
Tomas Bata University
Faculty of Technology
Assoc. Prof. Miroslav Manas
nam.T.G. Masaryka 275
762 72 Zlín
Tschechische Republik

Customer-no. : 330049
Date : 16.03.2011
Page : 1 of 2

Certificate-no.: 31300814

BGS-order-no.: 313.00636.01

Your order.: 15.03.2011...

Article: irradiation of samples

Batch: Prüfstäbe

1 Box(es)

Type of irradiation: Electrons
Energy [MeV]: 10
Min. dose [kGy]: 33,00
Irradiation date: 15.03.2011

measured surface dose [kGy]: 37,1

BGS-order-no.: 313.00636.02

Your order.: 15.03.2011...

Batch: Prüfstäbe

1 Box(es)

Article: irradiation of samples

Type of irradiation: Electrons
Energy [MeV]: 10
Min. dose [kGy]: 66,00
Irradiation date: 15.03.2011

measured surface dose [kGy]: 74,1

BGS-order-no.: 313.00636.03

Your order.: 15.03.2011...

Batch: Prüfstäbe

1 Box(es)

Article: irradiation of samples

Type of irradiation: Electrons
Energy [MeV]: 10
Min. dose [kGy]: 99,00
Irradiation date: 15.03.2011

measured surface dose [kGy]: 111,0

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



PŘÍLOHA I: CERTIFIKÁT OZÁŘENÍ BGS 2/2

Zertifikat

BGS

IDEEN PLUS ENERGIE

Certificate-no.: 31300814
Page : 2 of 2**BGS-order-no.:** 313.00636.04
Your order.: 15.03.2011...

Batch: Prüfstäbe

Article: irradiation of samples

Type of irradiation:

Electrons

Energy [MeV]:

10

Min. dose [kGy]:

132,00

Irradiation date:

15.03.2011

1 Box(es)

measured surface dose [kGy]: 148,7

BGS-order-no.: 313.00636.05**Your order.:** 15.03.2011...

Batch: Prüfstäbe

Article: irradiation of samples

Type of irradiation:

Electrons

Energy [MeV]:

10

Min. dose [kGy]:

165,00

Irradiation date:

15.03.2011

1 Box(es)

measured surface dose [kGy]: 185,7

BGS-order-no.: 313.00636.06**Your order.:** 15.03.2011...

Batch: Prüfstäbe

Article: irradiation of samples

Type of irradiation:

Electrons

Energy [MeV]:

10

Min. dose [kGy]:

198,00

Irradiation date:

15.03.2011

1 Box(es)

measured surface dose [kGy]: 224,3

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

