

Teplotní odolnost vybraných polymerů

Bc. Aleš Mizera

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. Aleš MIZERA**

Osobní číslo: **T09694**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Teplotní odolnost vybraných polymerů**

Zásady pro vypracování:

- 1.) Vypracujte řešení na dané téma
- 2.) Navrhněte zařízení pro porovnávání teplotní odolnosti vybraných polymerů
- 3.) Ověřte funkčnost a proveďte experiment
- 4.) Vyhodnoťte výsledky měření

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

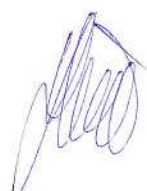
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.**

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 Mañas, 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 10.5.2011

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá studiem teplotní odolnosti vybraných polymerů (např. LDPE, HDPE, PP, PBT, PA) na základě termomechanické analýzy (TMA). Práce je složena ze dvou částí.

První část je literární rešerší a seznamuje čtenáře se základními informacemi o polymerech (výroba, vlastnosti a použití), ionizačním záření (vznik, zařízení a využití), síťování (čím, proč a využití) a zkoušení materiálů (TMA).

Praktická část, experimentální, popisuje použité materiály, udává parametry použitých zařízení, na kterých byly materiály zpracovány. Dále popisuje průběh jednotlivých experimentů a parametry zařízení, na nichž byl experiment prováděn. Poslední část je věnována diskusi a vyhodnocení výsledků.

Klíčová slova:

polymery, ozařování, síťování, teplotní odolnost, termomechanická analýza

ABSTRACT

Subject of this thesis is a study of temperature resistance of selected polymers (ex. LDPE, HDPE, PP, PBT, PA) based on thermomechanic analyse (TMA). This thesis contains two parts.

First part is summary description which acquaint readers with the basic information about polymers (production, characteristics and usage), ionizing radiation (creation, devices and usage), crosslinking, (wherewith, why and usage) and materials testing (TMA).

Practical part, the experimental, describes used materials, shows parameters of devices which were used for material processing. Furthermore, it describes course of particular experiments and parameters of devices which were used for those experiments. The last part is intended for discussion and evaluation of results.

Keywords:

Polymers, radiation, crosslinking, temperature resistance, thermomechanic analyse

Poděkování patří především vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Miroslavu Maňasovi, CSc. za odborné vedení diplomové práce a za pomoc při získávání informací potřebných k jejímu vypracování.

Dále zvláštní poděkování patří firmě BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG, ve které byly ozářeny zkušební tělesa a zejména Dipl.-Ing. Udovi Biedermannovi, který analyzoval termomechanické vlastnosti materiálů přístrojem Perkin Elmer DMA7e.

Dále bych poděkoval Ing. Vladimíru Šumberovi a Ing. Jiřímu Šálkovi za technickou podporu při zpracování materiálů a jednotlivých měření. Poděkování patří i Ing. Zdeňkovi Holíkovi, Ing. Michalu Daňkovi, doc. Ing. Zdeňkovi Dvořákovi, CSc. a doc. Ing. Davidovi Maňasovi, Ph.D. za informace k dané problematice.

V poslední řadě bych poděkoval za podporu a cenné připomínky mé rodině a mým nejbližším, kteří se jak přímo tak nepřímo přičinili k tvorbě této diplomové práce.

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

OBSAH

ÚVOD	12
I TEORETICKÁ ČÁST	13
1 PLASTY JAKO KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY	14
1.1 ZÁKLADNÍ MATERIÁL	14
1.2 VÝROBNÍ METODY POLYMERŮ	15
1.2.1 Polymerizace	16
1.2.2 Polykondenzace.....	17
1.2.3 Polyadice	18
1.3 DRUHY POLYMERŮ	18
2 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	21
2.1 DRUHY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ.....	23
2.1.1 Radioaktivita alfa (α)	23
2.1.1.1 Mechanismus rozpadu α	24
2.1.2 Radioaktivita beta (β).....	24
2.1.3 Radioaktivita gama (γ)	26
2.2 URYCHLOVAČE NABITÝCH ČÁSTIC	27
2.2.1 Lineární urychlovač	28
2.2.2 Betatron	29
2.3 MĚRNÉ JEDNOTKY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ.....	30
2.4 ROZDÍLY MEZI ZÁŘENÍM BETA A GAMA	31
3 SÍŤOVÁNÍ	33
3.1 ZPŮSOBY VÝSTAVBY SÍŤÍ	33
3.2 SÍŤOVÁNÍ POMOCÍ SILANŮ	35
3.3 SÍŤOVÁNÍ PEROXIDY	35
3.4 NAHODILÉ SÍŤOVÁNÍ LINEÁRNÍCH POLYMERŮ.....	35
3.4.1 Radiační síťování	36
3.4.1.1 Radiační síťování polypropylenu.....	36
3.4.1.2 Radiační síťování polyetylenu	37
3.4.1.3 Radiační síťování polyamidů.....	37
3.4.2 Radiačně síťovatelné polymery.....	38
3.5 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ V PRAXI.....	40
3.6 ZLEPŠENÍ VLASTNOSTÍ POLYMERŮ V DŮSLEDKU OZÁŘENÍ	40
3.6.1 Mechanické vlastnosti u radiačně síťovaných termoplastů:	41
3.6.2 Tepelné vlastností u radiačně síťovaných termoplastů:	41
3.6.3 Chemické vlastností u radiačně síťovaných termoplastů:.....	41

4	TERMOMECHANICKÁ ANALÝZA	42
4.1	KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ APARATURY TMA.....	42
4.2	VLIV PODMÍNEK MĚŘENÍ TMA.....	45
4.3	FYZIKÁLNÍ VELIČINY MĚŘENÉ TMA	46
4.3.1	Creep (tečení)	46
4.3.2	Relaxace napětí	47
4.3.3	Součinitel teplotní roztažnosti.....	47
4.3.4	Teplota skelného přechodu	48
4.3.5	Modul pružnosti v tahu a ve smyku	48
4.3.6	Napětí v ohybu	48
4.3.7	Bod měknutí podle Vicata.....	49
4.3.8	Čas želatinace.....	49
4.3.9	Stupeň bobtnání.....	49
4.3.10	Objem tvrdého jádra.....	49
II	PRAKTICKÁ ČÁST	50
5	STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	51
6	POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ	52
6.1	VSTŘIKOVACÍ STROJ ARBURG ALLROUNDER 420C.....	52
6.1.1	Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allronder 420C	53
6.2	SUŠÍCÍ JEDNOTKA ARBURG THERMOLIFT 100 – 2	55
6.2.1	Technické parametry sušící jednotky ARBURG THERMOLIFT 100 - 2.....	56
6.3	HORKOVZDUŠNÁ TROUBA MORA 4807	58
6.3.1	Technické parametry horkovzdušné trouby MORA 4807	59
6.4	PEC MIWY CALOR K MODEL V30	60
6.5	MĚŘICÍ PŘÍSTROJ MULTIMETR MY-64	61
6.5.1	Hlavní charakteristika	61
6.5.2	Specifikace	61
6.6	MĚŘICÍ PŘÍSTROJ PERKIN ELMER DMA 7E	62
6.6.1	Technické parametry měřicího přístroje Perkin Elmer TMA 7	62
6.7	FOTOAPARÁT SAMSUNG WB 600.....	63
7	POUŽITÉ MATERIÁLY	64
7.1	POLYOLEFINY.....	64
7.1.1	Polyetylen (PE)	64
7.1.1.1	Rozdělení polyetylenu	64
	HDXLPE (High Density Cross-Linked PE)	65
	LLDPE (Linear Low Density PE)	67
7.1.1.2	Vlastnosti polyetylenu	67
7.1.2	Polypropylen (PP)	68
7.1.2.1	Vnitřní struktura polypropylenových řetězců.....	68
7.1.2.2	Vlastnosti polypropylenu	70
7.2	POLYESTERY	70
7.2.1	Polybutylentereftalat	70
7.2.1.1	Vlastnosti polybutylentereftalatu	71

7.3	TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY	71
7.3.1	Struktura termoplastických elastomerů	72
7.3.2	Aplikace termoplastického elastomeru	73
7.3.3	Výhody a nevýhody termoplastických elastomerů	73
7.3.4	Polyesterový termoplastický elastomer TPE-E.....	74
7.3.4.1	Vlastnosti polyesterového termoplastického elastomeru.....	75
7.4	POLYAMIDY	75
7.4.1	Rozdělení polyamidů	75
7.4.1.1	Polyamidy na bázi ω -aminokyselin a jejich laktanů.....	76
7.4.1.2	Polyamidy na bázi dikarboxylových kyselin a diaminů	76
7.4.2	Vlastnosti polyamidů	77
8	POPIS PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	78
8.1	VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	78
8.1.1	Hodnoty vstřikování.....	79
8.2	SÍŤOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	79
9	NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO ZKOUŠKU TEPLOTNÍ ODOLNOSTI	82
9.1	POSTUP NÁVRHU A VÝROBY ZAŘÍZENÍ PRO TEPLOTNÍ ODOLNOST	82
9.2	POSTUP NÁVRHU A VÝROBY VESTAVBY DO PECE	83
10	MĚŘENÍ TEPLOTNÍ ODOLNOSTI.....	84
10.1	POLYOLEFINY.....	84
10.1.1	Postup měření.....	84
10.1.2	Nízkohustotní polyetylen (LDPE).....	85
10.1.2.1	Termomechanická analýza LDPE.....	85
10.1.2.2	Zkouška teplotní odolnosti LDPE.....	86
10.1.2.3	Zhodnocení teplotní odolnosti LDPE.....	90
10.1.3	Vysokohustotní polyetylen (HDPE)	90
10.1.3.1	Termomechanická analýza HDPE	90
10.1.3.2	Zkouška teplotní odolnosti HDPE	91
10.1.3.3	Zhodnocení teplotní odolnosti HDPE	96
10.1.4	Polypropylen (PP)	97
10.1.4.1	Termomechanická analýza PP	97
10.1.4.2	Zkouška teplotní odolnosti PP	98
10.1.4.3	Zhodnocení teplotní odolnosti PP	101
10.1.5	Plněný polypropylen skelným vláknem (PP GF).....	102
10.1.5.1	Termomechanická analýza PP 25% GF.....	102
10.1.5.2	Zkouška teplotní odolnosti PP GF	103
10.1.5.3	Zhodnocení teplotní odolnosti PP GF.....	107
10.2	POLYESTERY	108
10.2.1	Postup měření.....	108
10.2.2	Polybutylentereftalat (PBT)	108
10.2.2.1	Termomechanická analýza PBT	109
10.2.2.2	Zkouška teplotní odolnosti PBT.....	110
10.2.2.3	Zhodnocení teplotní odolnosti PBT	112
10.2.3	Plněný polybutylentereftalat (PBT 35% GF).....	112
10.2.3.1	Termomechanická analýza PBT 35% GF	112
10.2.3.2	Zkouška teplotní odolnosti PBT 35% GF	114
10.2.3.3	Zhodnocení teplotní odolnosti PBT 35% GF.....	115

10.3	TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY	116
10.3.1	Postup měření.....	116
10.3.2	Polyesterový termoplastický elastomer (TPE-E).....	116
10.3.2.1	Termomechanická analýza TPE-E.....	117
10.3.2.2	Zkouška teplotní odolnosti TPE-E.....	117
10.3.2.3	Zhodnocení teplotní odolnosti TPE-E.....	121
10.4	POLYAMIDY	121
10.4.1	Postup měření.....	121
10.4.2	Polyamid 11 (PA11).....	122
10.4.2.1	Termomechanická analýza PA11.....	122
10.4.2.2	Zkouška teplotní odolnosti PA11.....	123
10.4.2.3	Zhodnocení teplotní odolnosti PA11	129
10.4.3	Polyamid 12 (PA12).....	129
10.4.3.1	Termomechanická analýza PA12.....	130
10.4.3.2	Zkouška teplotní odolnosti PA12.....	130
10.4.3.3	Zhodnocení teplotní odolnosti PA12	134
10.4.4	Polyamid 9T (PA9T).....	135
10.4.4.1	Termomechanická analýza PA9T	135
10.4.4.2	Zkouška teplotní odolnosti PA9T	136
10.4.4.3	Zhodnocení teplotní odolnosti PA9T.....	139
10.4.5	Polyamid 6 (PA6).....	139
10.4.5.1	Termomechanická analýza PA6.....	139
10.4.5.2	Zkouška teplotní odolnosti PA6.....	140
10.4.5.3	Zhodnocení teplotní odolnosti PA6	143
10.4.6	Plněný polyamid 6 (PA6 30%GF)	143
10.4.6.1	Termomechanická analýza PA6 30%GF	143
10.4.6.2	Zkouška teplotní odolnosti PA6 30%GF	144
10.4.6.3	Zhodnocení teplotní odolnosti PA6 30%GF	147
10.4.7	Plněný polyamid 6.6 (PA6.6).....	147
10.4.7.1	Termomechanická analýza PA6.6.....	147
10.4.7.2	Zkouška teplotní odolnosti PA6.6.....	148
10.4.7.3	Zhodnocení teplotní odolnosti PA6.6	151
10.4.8	Plněný polyamid 6.6 (PA6.6 30%GF)	151
10.4.8.1	Termomechanická analýza PA6.6 30%GF	151
10.4.8.2	Zkouška teplotní odolnosti PA6.6 30%GF	152
10.4.8.3	Zhodnocení teplotní odolnosti PA6.6 30%GF	155
11	EKONOMICKO-TECHNICKÉ ASPEKTY POUŽITÍ RADIAČNÍHO	
	SÍŤOVÁNÍ	156
	ZÁVĚR	158
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	160
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	163
	SEZNAM OBRÁZKŮ	165
	SEZNAM TABULEK.....	171

ÚVOD

Podle historického vývoje, kdy se doba označovala podle využívaného materiálu např. doba kamenná, doba bronzová, doba železná, se momentálně nacházíme v tzv. době plastů. Plasty jsou všude kolem nás, nikdo si nedokáže představit, že by tu nebyly. Vytlačují přírodní materiály (kůže, sklo, keramiku, kovy atd.), díky svým výborným vlastnostem. Ovšem v některých aplikacích jsou přírodní materiály nenahraditelné. Plasty využíváme jak v běžných tak ve speciálních aplikacích.

Náročnost uspokojení trhu výrobků žene vývoj nových nebo modifikovaných polymerních materiálů rychle kupředu. Jednou z mnoha možností modifikace polymerních materiálů je radiační síťování termoplastických materiálů, jako je např. PE, PP, PBT, TPE, PA. Ionizačním ozařováním resp. radiačním síťováním se zabývá německá firma BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg, která zúročuje dlouhodobé zkušenosti v této problematice. Ionizačního záření se využívá jak pro síťování, tak pro sterilizaci či polymeraci.

Ionizační záření samo o sobě je životu nebezpečné, proto je potřeba dodržovat bezpečnostní předpisy, aby nedošlo k ozáření organických částí, které vlivem ionizačního záření degradují. Tento jev jsme na vlastní oči mohli vidět při 25. výročí největší jaderné katastrofy lidstva v části Ukrajiny, kde se nachází sarkofág vybuchlého reaktoru jaderné elektrárny v Černobylu. Materiál se ozařuje takovou dávkou, aby nevyzařoval. Takto modifikované materiály jsou naprosto bezpečné. Je to metoda rychlá, účinná, která se využívá až po konečném zpracování, v určitých případech není potřeba ani dalších přísad. Aplikace takto modifikovaných materiálů se musí pečlivě zvážit, jaké jsou výhody a nevýhody použití v konečné aplikaci, aby nedošlo k neštěstí.

Plasty ovšem mají jednu velkou nevýhodu a tou je relativně nízká teplotní odolnost. Diplomová práce se zabývá studiem teplotní odolnosti standardních a konstrukčních polymerních materiálů, které jsou ozářeny různými dávkami. Hodnocení vlastností je na základě termomechanické analýzy a fotodokumentace o chování vybraných termoplastů při různých teplotách.

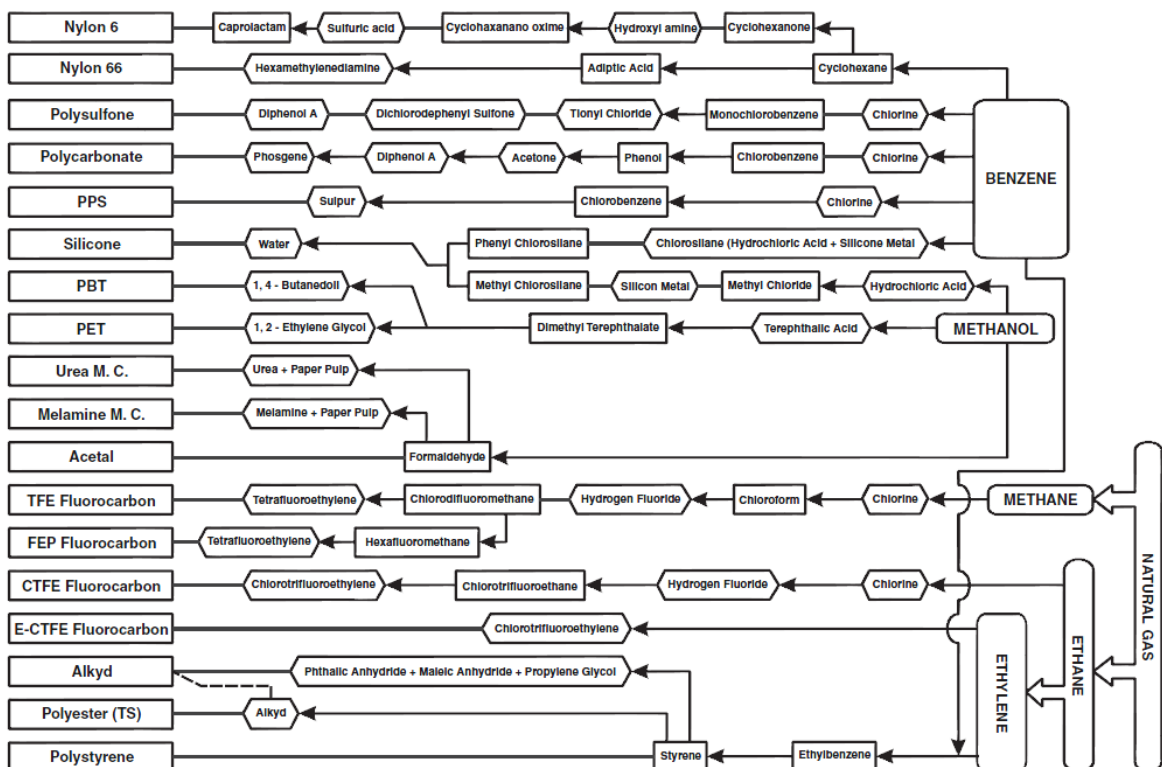
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PLASTY JAKO KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY

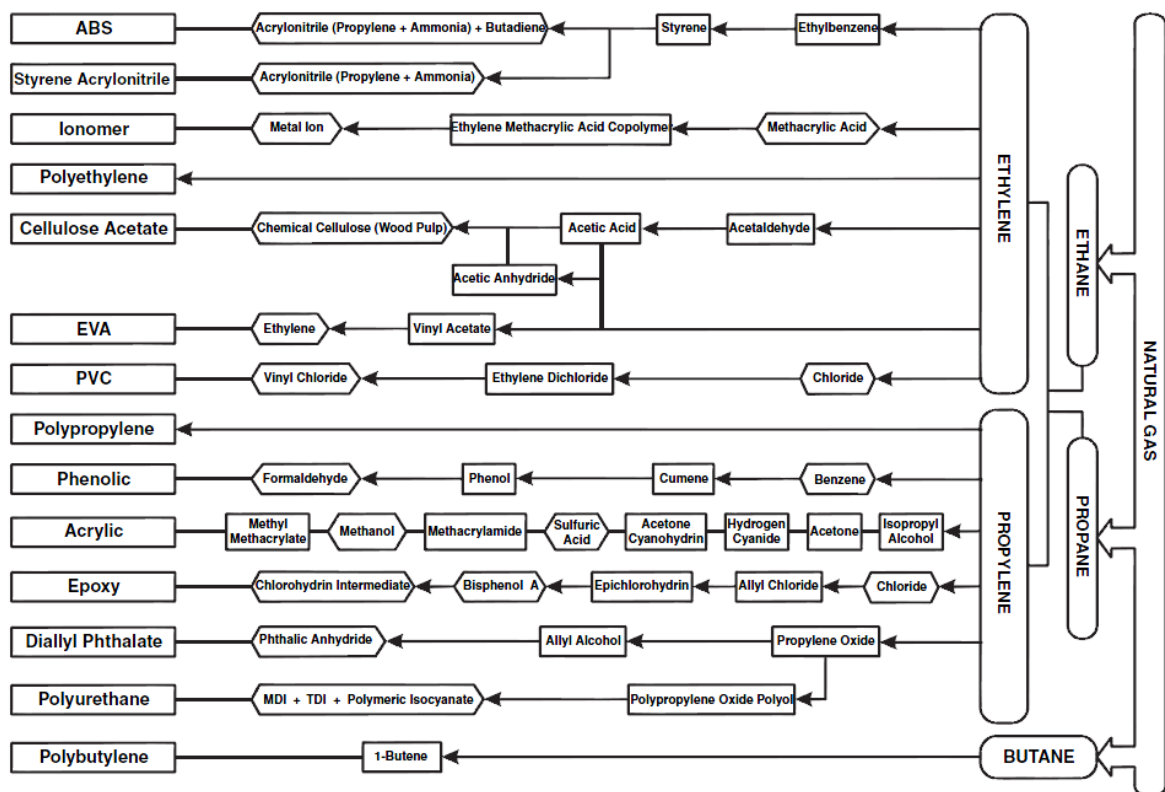
Plasty jsou makromolekulární organické materiály vyráběné modifikací přírodních nebo syntetických produktů. Základní součásti z plastových a elastomerních materiálů jsou polymery. Slovo polymer je odvozeno z řeckého termínu pro „mnoho částí“. Polymery jsou velké molekuly zahrnující mnoho opakujících se jednotek nazývané monomery, které se vážou chemicky do dlouhých řetězců. Od druhé světové války chemický průmysl vyvinul velké množství syntetických polymerů k tomu, aby uspokojil potřebu různorodosti trhu výrobků. [1], [2]

1.1 Základní materiál

V dnešní době nejdůležitější výchozí surovinou pro výrobu plastů jsou oleje, plyny a uhlí. Jsou taky používány suroviny rostlinného původu jako dřevo, bavlna a oleje (např. ricinový olej). Běžné plasty jsou hlavně složeny z uhlíku a vodíku, mohou obsahovat také jiné prvky např. kyslík, dusík, chlór, fluor atd. [2]



Obr. 1 Zjednodušené výrobní schéma výroby běžných polymerních materiálů (nepřetržitý) [3]

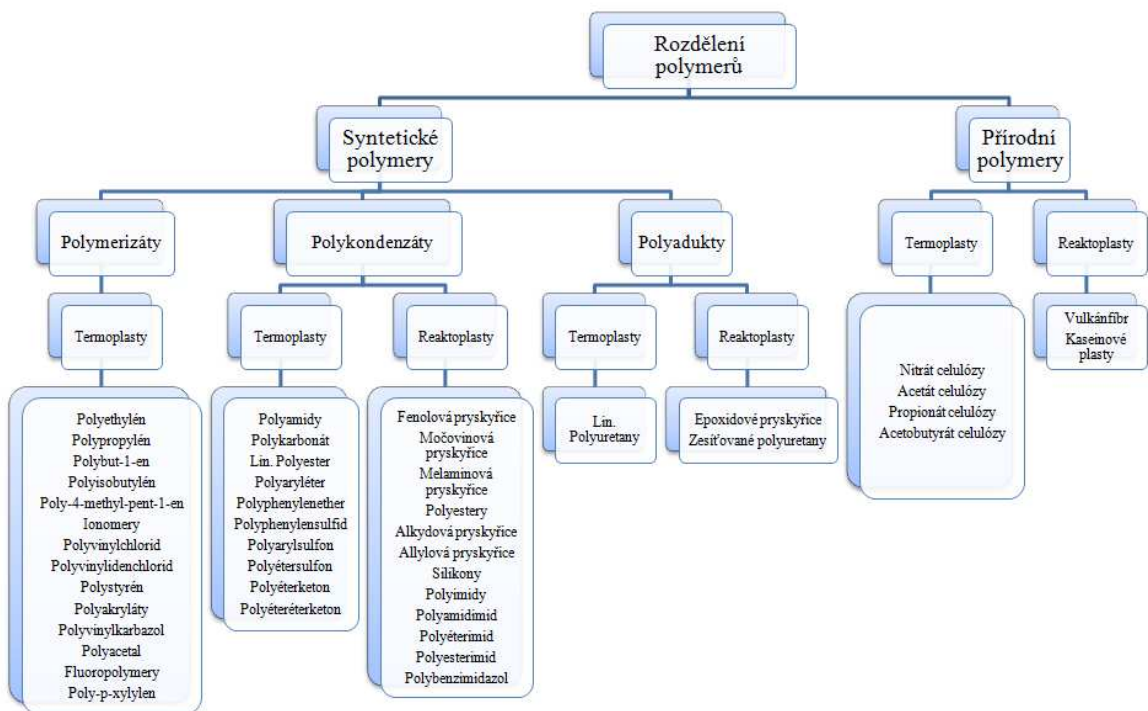


Obr. 2 Zjednodušené výrobní schéma výroby běžných polymerních materiálů (přetržité) [3]

1.2 Výrobní metody polymerů

Zpočátku plasty byly vyráběny z přírodních materiálů. Byla to nejkratší a nejlevnější cesta k dosažení požadovaných cílů. V této době byly známy jen deriváty celulózy a chemický průmysl spoléhal na přírodní procesy. Podstatná změna nastala, až bylo možné plasty vyrábět nejen rozkladem obrovské molekuly celulózy, ale také syntézou. Prvním významným produktem byla pryskyřice nazývaná Bakelit, která byla vyráběna z fenolu a formaldehydu. Tento materiál postrádal tuhost, proto bylo nutné přidávat plniva např. skelná, textilní vlákna, mletou slídu atd. Průmyslová výroba Bakelitu byla zahájena v roce 1909, jeho vynálezcem je Leo. H. Baekeland. [2]

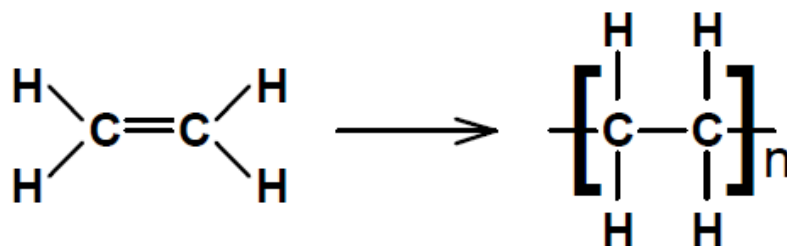
Ačkoli výroba plastů syntézou je obtížnější, než modifikace přírodních produktů, počet možných druhů produktů je obrovský a ještě ne zcela plně prozkoumaný (viz. Obr. 3). V reakcích hraje důležitou roli atom uhlíku, který je čtyřmocný. Uhlík může vázat čtyři různé atomy, které budou tvořit jednoduché vazby. [2]



Obr. 3 Schéma rozdělení polymerů [2]

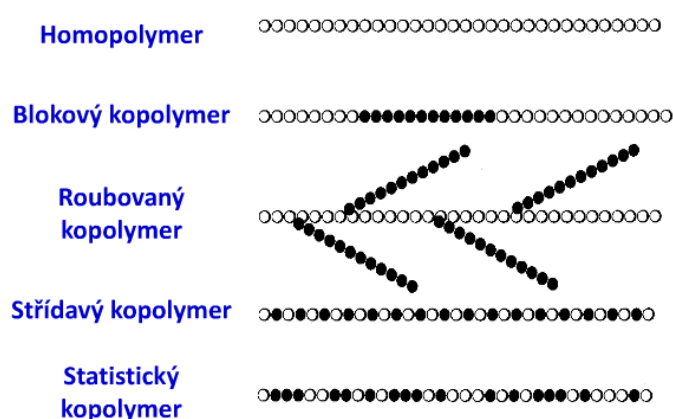
1.2.1 Polymerizace

Etylén má dvojnou vazbu mezi dvěma atomy uhlíku. Hovoříme o nenasycené vazbě. V případě etylénu rozrušení dvojných vazeb může být zahájeno teplem, vysokoenergetickým zářením nebo za přítomnosti iniciátorů nebo katalyzátorů. Spojováním monomeru etylénu se vytváří dlouhý řetězec – polymer nazývaný polyetylén. Index n (stupeň polymerace) ukazuje kolik jednotek monomeru je obsaženo ve výsledné makromolekule. Jednotlivé makromolekuly obsahují rozdílné množství základních jednotek. Proto distribuce molekulových hmotností může být úzká nebo široká v závislosti na podmínkách polymerace. „Obří molekula“ může obsahovat několik tisíc až stovek tisíc základních jednotek, můžeme pozorovat pomocí elektronového mikroskopu. [2]



Obr. 4 Polymerace polyetylenu z etylénu [4]

Stupeň polymerace, distribuce molekulových hmotností, počet postranních větví na hlavním řetězci určuje fyzikální vlastnosti a odolnost vůči působení napětí v materiálu. Polymerace dovoluje plasty vyrábět z jednoho typu monomeru (homopolymery) nebo reakcí dvou či více monomerů (kopolymery). Monomery jsou jen příležitostně souměrné; molekulové uspořádání je stejné bez ohledu, na který konec molekuly se díváme. Uspořádání monomerů v kopolymeru může být hlava-ocas, hlava-hlava, ocas-ocas. Rozdělujeme několik typů kopolymeru podle uspořádání monomerů: blokový, roubovaný, střídavý a statistický. [2]

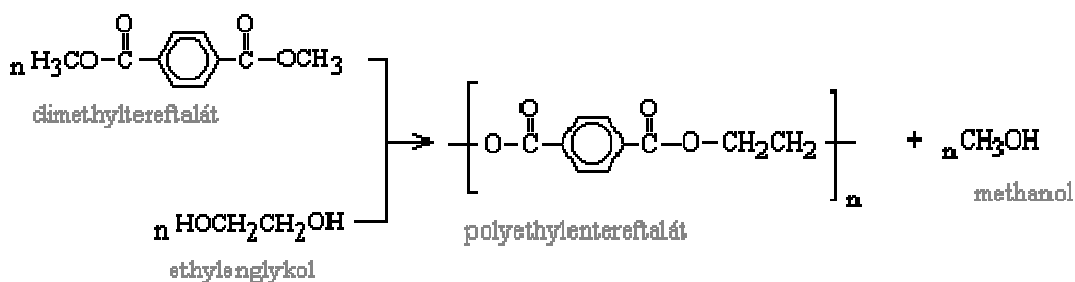


Obr. 5 Struktura kopolymerů

1.2.2 Polykondenzace

Polykondenzace je reakce při, které reagují dva stejné nebo různé monomery, které obsahují dvě nebo více reakčních funkčních skupin. V průběhu reakce nevzniká jenom polymer, ale i nízkomolekulární produkt (např. voda, methanol, amoniak). Tato reakce byla pro výrobu poprvé použita v roce 1909, kdy byl kondenzací fenolu s formaldehydem vyroben polymer, který dnes známe pod názvem Bakelit.

Významnými produkty polykondenzačních reakcí jsou polyamidy nebo polyestery. Jedním z nejvýznamnějších polyesterů je polyethyltereftalát. Tento polymer vzniká kondenzací dimethyltereftalátu s ethylenglykolem. Nízkomolekulárním produktem této reakce je methanol. U nás je známý pod obchodním názvem Tesil nebo terylén. Získává se podle následující rovnice. [5]



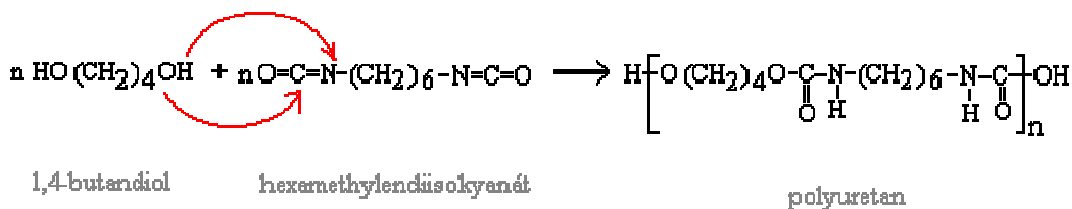
Obr. 6 Rovnice výroby PETP polykondenzací [5]

1.2.3 Polyadice

Sloučeniny, jejichž molekuly obsahují násobné vazby, nebo jsou tvořeny kruhy s malým počtem členů, mohou být mimo vzájemného spojování (řetězení) schopny adičních reakcí se sloučeninami, jejichž molekuly obsahují vhodné funkční skupiny. Mají-li tyto sloučeniny ve svých molekulách alespoň dvě funkční skupiny, může mnohonásobnou adicí vzniknout polymer; takové reakci potom říkáme polyadice. [6]

Polyadicí se vyrábí látky zvané polyuretany. Tyto látky se syntetizují z 1,4-butadienu a hexamethyldiisokyanátu. Polyuretany se používají na výrobu molitanu, umělých kůží (např.: barex), ale také jako textilní vlákna. [7]

Vznik polyuretanu:

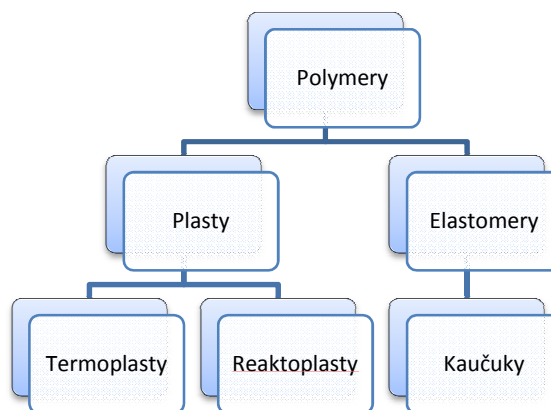


Obr. 7 Rovnice výroby polyuretanu polyadicí [7]

1.3 Druhy polymerů

Rozdíl mezi plasty vyrobenými polymerací, polykondenzací nebo polyadicí je obrovský, proto jednotlivé produkty charakterizujeme jejich vlastnostmi k daným aplikacím. Pro správné použití plastů je nutné znát způsob výroby polymeru, jeho chemické složení, fyzikální a reologické vlastnosti. [2]

Polymery jsou chemické látky neobvyklé šíře vlastností, obsahující ve svých obrovských molekulách většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často dusíku, chloru i jiných prvků. Dělíme je na elastomery a plasty, jak je znázorněno na obr.8. [6]

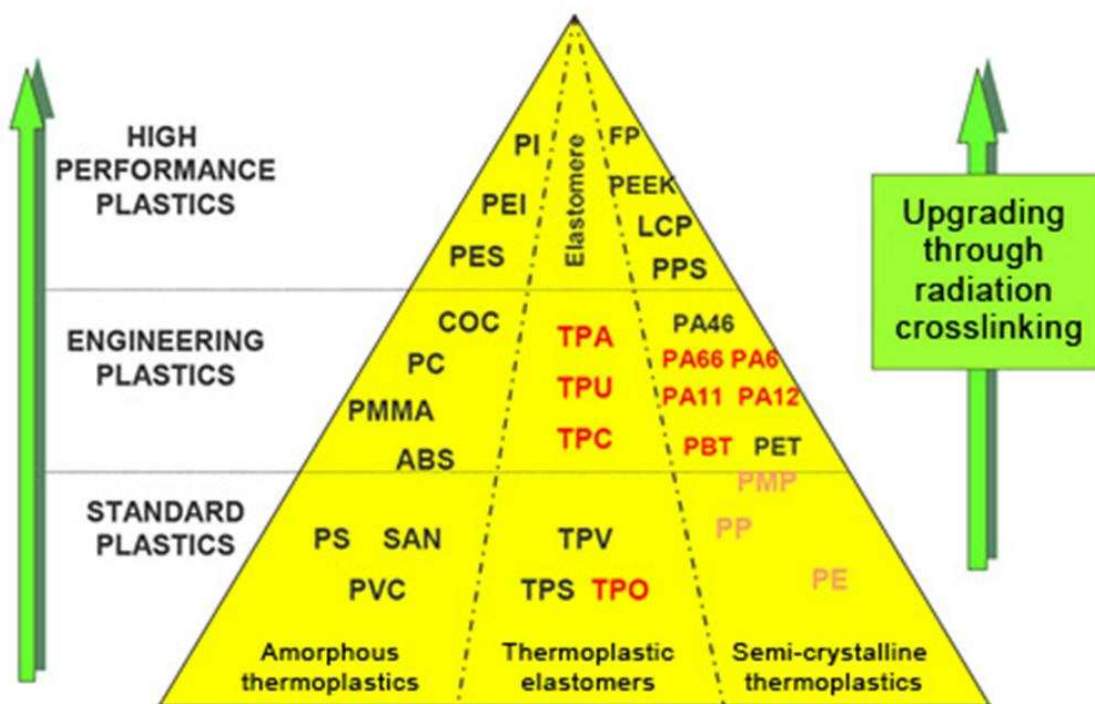


Obr. 8 Základní rozdělení polymerů [6]

Elastomer je vysoce elastický polymer, který můžeme za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení, přičemž deformace je převážně vratná. Do této skupiny převážně patří kaučuky, z nichž se vyrábí pryž. [6]

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. [6]

Podle nejvhodnějšího použití dělíme plasty používané na výrobu běžných spotřebních předmětů, které využíváme v běžném životě (kelímky, hrníčky, tácky, kartáčky atd.). Konstrukční polymery, které se využívají pro namáhané součásti jak teplem tak mechanicky (výrobky v automobilech, ozubené kola, atd.). Plasty pro speciální použití, které se využívají pro speciální účely (nátěrové hmoty, oleje, vlákna, atd.). Tyto plasty jsou lineární, zesíťované, semikrystalické, amorfní polymery, které podle jejich vlastností a použití se využívají jak v běžném životě, tak ve speciálních aplikacích. Rozhodujícím faktorem je cena výrobků, proto se v určitých případech levnější polymery s horšími vlastnostmi modifikují, což zlepšuje jejich vlastnosti. [8]



Obr. 9 Rozdělení polymerů dle jejich aplikace, struktury a ceny [9]

2 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Pod **zářením (radiací)** obecně rozumíme procesy, při nichž dochází k **přenosu energie prostorem** "na dálku" prostřednictvím fyzikálních polí nebo mikročástic. Kromě energie dochází při záření i k *přenosu hmoty a informace*. Tento přenos energie může být uskutečňován dvěma druhy mechanismů:

- **Časově proměnné pole**, které se šíří prostorem ve formě vln, jež se odpoutávají od zdroje a přenášejí do prostoru část energie z tohoto zdroje. Příkladem jsou elektromagnetické vlny či zatím hypotetické vlny gravitační. Hovoříme o záření **vlnovém**, kvanta tohoto záření **nemají** klidovou hmotnost, jsou to kvanta vlnění, pohybující se rychlostí světla; pokud je zabrzdíme, odevzdají veškerou svou energii a **zaniknou**. V jaderné fyzice do této skupiny patří pouze **elektromagnetické záření**, jehož kvanta jsou **fotony**, v obecné teorii relativity a kvantové gravitaci pak ještě *gravitační vlny* (o gravitačních vlnách pojednává např. §2.7 "Gravitační vlny" v knize "Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu"), jejichž kvanta jsou *gravitony*.
- **Pohybující se částice**, které jsou emitovány zdrojem, velkou rychlostí letí prostorem a přenášejí tak **kinetickou energii** (a též hybnost, popř. i elektrický náboj) ze zdroje do okolního prostoru. Příkladem je záření β (proud rychle letících elektronů) nebo α (proud héliových jader). Jedná se o záření **korpuskulární**, kvanta tohoto záření **mají nenulovou** klidovou hmotnost, jedná se o proud hmotných **částic** pohybujících se rychlostí menší než rychlost světla, které si zachovávají svou existenci i po zastavení pohybu. Patří sem záření α , β^- , β^+ , protonové záření p^+ , neutronové záření n^0 , neutrinové záření v a řada dalších druhů záření vznikajícího při vysokoenergetických srážkách elementárních částic (m-mezonové a p-mezonové záření, ...). [10]



Obr. 10 Mezinárodní výstražný symbol, označující zdroj ionizujícího záření a nový doplňkový výstražný symbol ionizujícího záření [11]

Ionizujícím zářením nazýváme takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat. [10]

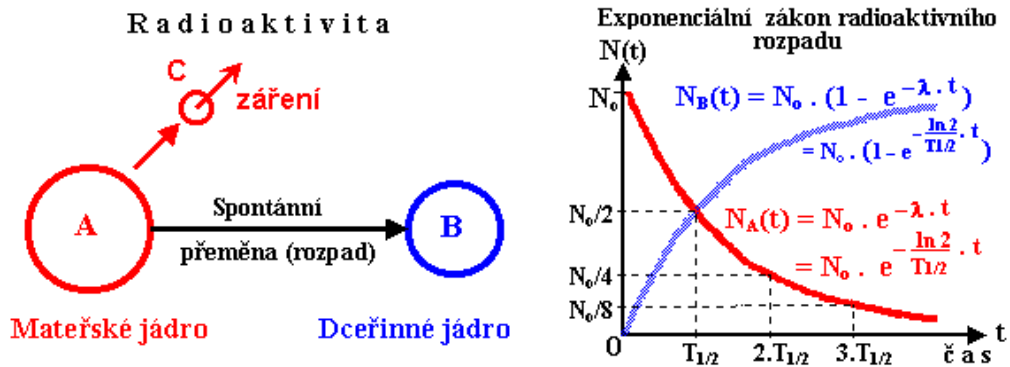
Záření se může šířit **ve vakuu**, volné šíření vln a volný pohyb částic podle zákona setrvačnosti; nebo **v látkovém prostředí**, kde část záření může **projít** původním směrem, avšak větší či menší část záření bývá **rozptýlena** a **absorbována** (s příp. následnou re-emisí části záření). Míra rozptylu a absorpce je většinou **energeticky závislá**, v důsledku čehož při průchodu záření látkou dochází nejen k zeslabení záření, ale často i ke **změně jeho spektrálního rozložení** a ke vzniku dalšího **sekundárního záření**. Z hlediska absorpce v látkách, či naopak schopnosti procházet látkami, se rozlišuje záření málo pronikavé (α, β), které má v látce dolet jen zlomky milimetru až milimetry, a **záření pronikavé** (X, γ , neutronové, mionové, neutrinové), schopné projít vrstvou o tloušťce mnoha centimetrů, metrů i více. [10]

Vedle druhu záření (druhu částic tvořících záření) rozhoduje o jeho vlastnostech šíření a interakce s látkou především **energie** kvant záření. Z tohoto hlediska rozlišujeme:

- "**Měkké**" **záření**, jehož kvanta mají nízkou energii (<cca 5keV) a nejsou schopna vyrážet elektrony z atomových obalů. Na látku vykazují především **mechanické** a **tepelné** účinky, v některých případech účinky *elektrické* (vnější a vnitřní fotoefekt, změny elektrické vodivosti) a na složitější nebo slabě vázané molekuly účinky *fotochemické* (klasická fotografie, fotosyntéza u rostlin).
- "**Tvrdé**" **záření**, jehož kvanta mají dostatečně vysokou energii (desítky keV a vyšší) a při průchodu látkou vyrážejí elektrony z atomů a látku **ionizují**. Ionizace pak vede nejen k účinkům elektrickým a fotochemickým, ale v případě sloučenin k řadě **chemických reakcí** rozkladu stávajících molekul a příp. vzniku sloučenin nových. Energie nesená tvrdým zářením, prostřednictvím **účinků záření na látku**, může být proto využívána v řadě tzv. *radiačních technologií*; v medicínské oblasti aplikace záření pomáhá **léčit** některá onemocnění, především nádorová. [10]

2.1 Druhy ionizujícího záření

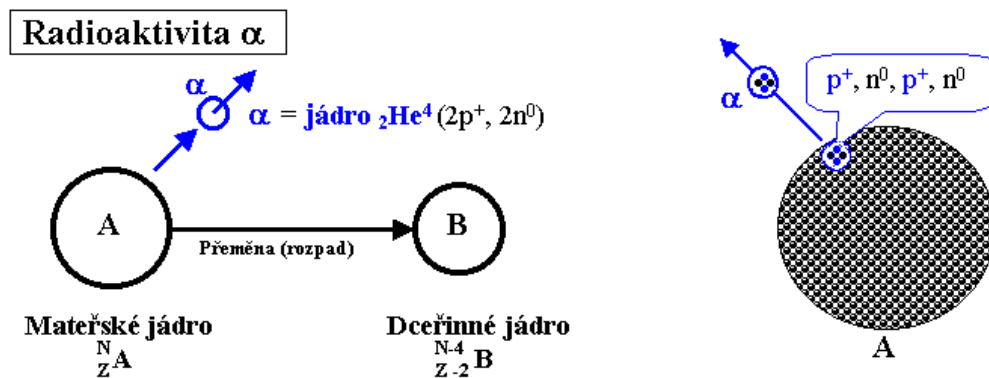
Radioaktivita se rozděluje a klasifikuje nikoli podle toho, jaká jsou mateřská a dceřiná jádra, nýbrž podle **druhu emitovaného záření** (částice C na obr.11). Tyto druhy radioaktivity se označují prvními třemi písmeny řecké abecedy – α , β , γ . [10]



Obr. 11 Základní obecné schéma radioaktivní přeměny a exponenciální zákon radioaktivní přeměny. [10]

2.1.1 Radioaktivita alfa (α)

Základní schéma radioaktivity α je znázorněno na obr.12. Při této jaderné přeměně se vyznačuje **částice α** , která je **jádrem hélia** ${}^4\text{He}_2$ - obsahuje tedy 2 protony p^+ a 2 neutrony n^0 . [10]



Obr. 12 Základní schéma radioaktivity α . [10]

Z mateřského jádra s N nukleony a Z protony částice α odnáší 2 protony a 2 neutrony, takže vzniklé dceřiné jádro bude mít $N-4$ nukleony a $Z-2$ protony - v Mendělejevově periodické tabulce prvků bude posunuto o **2 místa doleva** směrem k jednodušším prvkům. Aby k radioaktivitě α mohlo dojít, musí být splněna **hmotnostně-energetická** podmínka $m(Z-2, N-4) + m(\alpha) < m(Z, N)$, kde $m(Z, N)$ je hmotnost jádra s protonovým číslem Z a nukleonovým číslem N , $m(\alpha) \equiv m(2, 4)$ je klidová hmotnost částice α . [10]

2.1.1.1 Mechanismus rozpadu α

V pravé části obr.12 je ideově znázorněn mechanismus vyzáření částice α . Můžeme si to zjednodušeně představit tak, že těžké jádro s více než 210 nukleony je již tak velké, že celkové přitažlivé pole silných interakcí, díky svému krátkému dosahu, již nepůsobí dostatečně silně v periferních oblastech jádra. Nestačí dostatečně vyrovnat vzájemné odpuzování protonů, které má dlouhý dosah (klesá se čtvercem vzdálenosti). Toho využijí některé nukleony, které se "zkupují" tak, že 2 protony a 2 neutrony vytvoří lokální silněji vázanou "buňku", která pak tzv. *tunelovým efektem* překoná potenciálovou bariéru vazbové energie jádra a vyletí ven jakožto částice α . Analýzou průchodnosti této potenciálové bariéry tunelovým efektem lze odvodit zmíněnou Geigerovu-Nuttallovu závislost mezi energií a poločasem. [10]

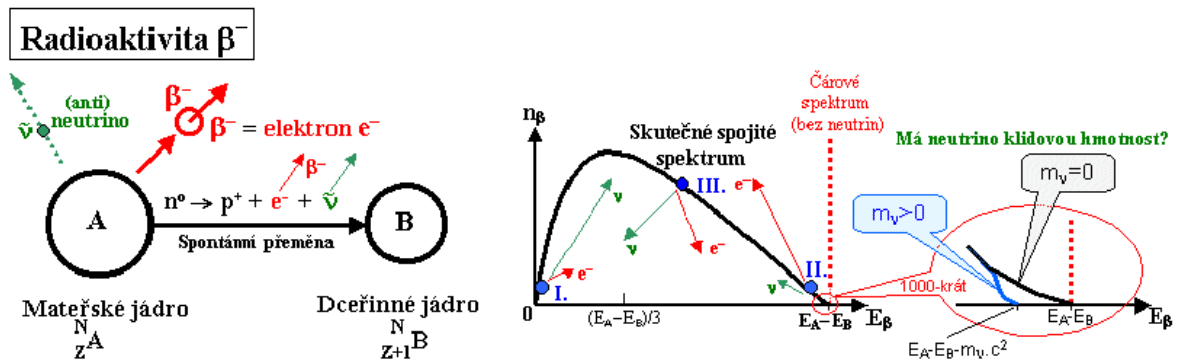
Navzdory tomu, že písmeno α je na prvním místě v řecké abecedě, je radioaktivita α **nejméně důležitá** ze všech druhů radioaktivity. Je to ze dvou důvodů:

- Radioaktivita α se vyskytuje pouze u **nejtěžších jader** ze samého konce Mendělejevovy tabulky v oblasti uranů a transuranů (lehká jádra prostě "nemají na to" aby vyzářila tak těžkou částici jakou je α).
- Záření α , díky svému dvojnásobnému kladnému náboji, při vniknutí do látky velmi účinně vytrhává elektrony z obalu atomů, čímž rychle ztrácí energii a **zabrzdí se** asi po 0,1mm v látkách hustoty vody nebo tkáně. Díky této své **malé pronikavosti** jej nelze využít k diagnostice ani k terapii. Využívá se jen sporadicky v některých detekčních přístrojích (např. detektory hustoty plynů, požární hlásiče) nebo v **neutronových generátorech** (smísíme-li α -zářič s vhodnou terčíkovou látkou jako je beryllium, částice α vnikají do jader terčíkové látky a reakcí (α, n) odtud vyrážejí neutrony, které se pak laboratorně používají např. pro neutronovou aktivační analýzu). [10]

2.1.2 Radioaktivita beta (β)

Nejčastějším a nejdůležitějším druhem radioaktivity je radioaktivita β . Existují tři druhy radioaktivity β . [10]

Základní schéma radioaktivity β^- je na obr.13. Při této jaderné přeměně je z mateřského jádra vysokou rychlostí emitována **částice β^-** , což není nic jiného než obyčejný **elektron e^-** – stejný jako je v atomovém obalu. [10]



Obr. 13 Radioaktivita beta. **Vlevo:** Základní schéma radioaktivity β^- . **Uprostřed:** Spojité energetické spektrum záření β^- . **Vpravo:** Zvětšený detail koncové části spektra pro nulovou a nenulovou klidovou hmotnost neutrin. [10]

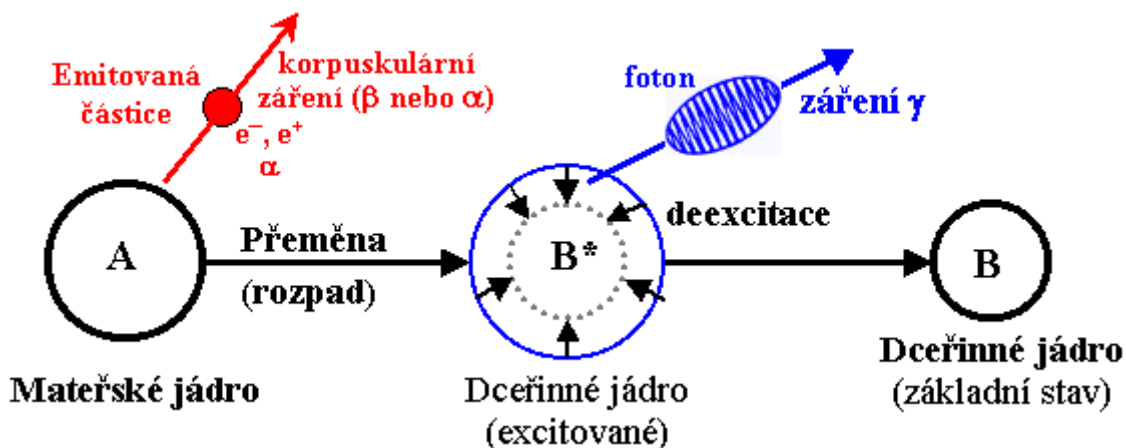
Zjistilo se, že radioaktivita β^- se vyskytuje u jader s **přebytkem neutronů**, našlo se vysvětlení vzniku záření β^- : Některému z "nadbytečných" neutronů se "zachce" stát vzácnějším protonem - udělá to **přeměnou**: $n^0 \rightarrow p^+ + e^- (+ \nu)$. Proton p^+ jakožto legitimní nukleon zůstává v jádře vázán silnou interakcí, zatímco elektron e^- vyletí velkou rychlostí ven jakožto záření β^- (odnáší rozdíl energií mezi jádry A a B). [10]

Při přeměně β^- se nukleonové číslo nemění, avšak jelikož se jeden neutron změnil na proton, **protonové číslo se zvýší o 1** - dceřiné jádro se posune o **jedno místo doprava** v Mendělejevově periodické tabulce. Tato pozoruhodná skutečnost, že při β^- -rozpadu vzniká "složitější" jádro než bylo původní, sehrála rozhodující úlohu při **kosmické nukleosyntéze** prvků těžších než železo během výbuchů supernov. [10]

Elektron β by měl odnášet rozdíl energií $\Delta E = E_A - E_B$ mezi mateřským A a dceřiným B jádrem, který je $\Delta E = [m(Z,N) - m(Z+1,N)].c^2$. Tento rozdíl je vždy **konstantní**, takže všechny elektrony β by měly vylétat se stejnou kinetickou energií $E_\beta = [m(Z,N) - m(Z+1,N) - m_e].c^2$ - spektrum by mělo být čárové, jak je červeně čárkovaně naznačeno na obr.13 uprostřed. Změříme-li však skutečné spektrum záření β , dostaneme jiný výsledek: spektrum bude **spojité** a u energie $E_A - E_B$ bude končit - tlustá černá křivka na obr.13 uprostřed. Naprostá většina elektronů β tedy vylétá s energií mnohem **menší**, než by odpovídalo zákonu zachování energie! [10]

2.1.3 Radioaktivita gama (γ)

Záření gama je vysokoenergetické elektromagnetické záření vznikající deexcitací vzbuzených hladin atomového jádra. U radioaktivity se jedná o deexcitaci vzbuzených hladin dceřiného jádra vzniklého po radioaktivní přeměně. [10]



Obr. 14 Typické schéma radioaktivní přeměny jádra A na excitované jádro B* a jeho následné deexcitace za vyzáření fotonu záření γ [10]

Po tak velké "události", jakou pro atomové jádro je radioaktivní přeměna, jen málokdy zůstává výsledné dceřiné jádro v nevybuzeném základním stavu. Po změnách v počtu nebo typu nukleonů v jádře se nukleony nemusejí vyskytovat v nejnižších energetických stavech. Uvolněná energie vede k tomu, že dceřiné jádro **B** po radioaktivní přeměně vzniká většinou v **energeticky excitovaném stavu B***; můžeme si představit, že jádro je "nafouknuté" - nukleony jsou od sebe více vzdálené. Takové "nafouknuté" jádro B* zpravidla velmi rychle "splaskne" - nastane **deexcitace**, při níž se příslušný energetický rozdíl **vyzáří** ve formě kvanta - **fotonu** - tvrdého elektromagnetického záření - **záření gama**. Vyzářením kvant γ se stabilizují energetické poměry v jádře. Dceřiné jádro **B** pak již zůstává v základním stavu. [10]

Energetické hladiny atomového jádra jsou **kvantovány**, tak že i všechny fotony γ emitované při daném druhu deexcitace budou mít **stejně energie** - spektrum záření γ je **čárové**. Pokud má jádro B* více excitovaných hladin, bude emitováno několik skupin **monoenergetických fotonů** γ , takže spektrum bude tvořeno několika **diskrétními čarami** (píky v měřeném spektru). [10]

Ze schématu na obr.14 plynou dvě důležité skutečnosti :

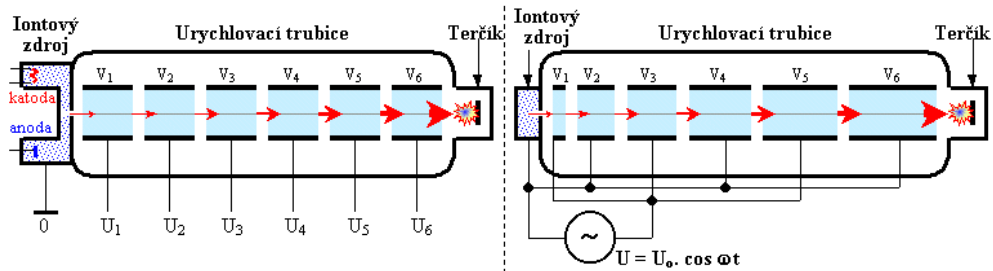
1. Záření γ je **časově následující** po emisi korpuskulárního záření při vlastní jaderné přeměně. [10]
2. Většina radionuklidů jsou **zářiče smíšené** - buď $\alpha+\gamma$ nebo $\beta+\gamma$. Jen některé zářiče jsou čisté α či čisté β - radioaktivní přeměna někdy nastává přímo na základní stav dceřiného jádra (tak je tomu např. u tritia ${}^3\text{H}$ nebo uhlíku ${}^{14}\text{C}$). Čisté zářiče γ však v přírodě neexistují! Přesto ale dokážeme **vyrobit čisté gama-zářiče uměle**. Umožňuje to pozoruhodná vlastnost některých jaderných excitovaných hladin: že nedeexcitují okamžitě, ale až po uplynutí poměrně dlouhého průměrného času - říkáme, že jsou **metastabilní**. Tento jev se též nazývá **jaderná izomerie**; říkáme, že jádra mohou existovat ve dvou izomerních stavech, označují se jako **izomery**. [10]

2.2 Urychlovače nabitých částic

Pro studium vlastností, struktury a interakcí elementárních částic, výrobu umělých radionuklidů, jakož i pro aplikace v různých oblastech vědy a techniky (včetně medicíny), je potřeba použít částic **urychlených na vysoké kinetické energie**. Jelikož přírodní radioaktivní látky poskytují omezenou intenzitu a hlavně energii emitovaných částic, je nutno se obrátit k *umělému* urychlování částic. Uměle urychlit dovedeme pouze stabilní **elektricky nabitě částice** - elektrony e^- , pozitrony e^+ , protony p^+ , deuterony d^+ , jádra hélia $\text{He}^{++}=\alpha$ -částice a jádra (ionty) těžších prvků. Vysokoenergetické částice bez náboje (jako jsou fotony γ , neutrony n^0 , neutrální piony, ...) a krátko žijící částice (π -mezony, hyperony, ...) lze pak získat **sekundárně** - interakcemi urychlených nabitých částic s dalšími částicemi ve vhodném terčíku. Přístroje, které působením silných elektrických a magnetických polí urychlují nabitě částice, se nazývají **urychlovače**. Vlastní **urychlování** nabitých částic způsobuje **elektrické pole** (elektrická složka elektromagnetického pole intenzity \mathbf{E}) svým silovým působením na náboj $\mathbf{F}_e = q \cdot \mathbf{E}$, **magnetické pole** se využívá ke **změně dráhy** nabitých částic. Popř. proměnné magnetické pole indukuje pole elektrické, které způsobuje urychlovací efekt. [10]

2.2.1 Lineární urychlovač

Lineární urychlovače urychlují nabité částice působením elektrického pole během jejich pohybu po lineární **přímkové dráze**. Lineární urychlovač se často zkráceně nazývá **Linac** (*Linear accelerator*). Můžeme je rozdělit na **elektrostatické** (vysokonapěťové) a **vysokofrekvenční**. [10]



Obr. 15 Zjednodušené schéma lineárního urychlovače elektrostatického (vlevo) a vysokofrekvenčního (vpravo). [10]

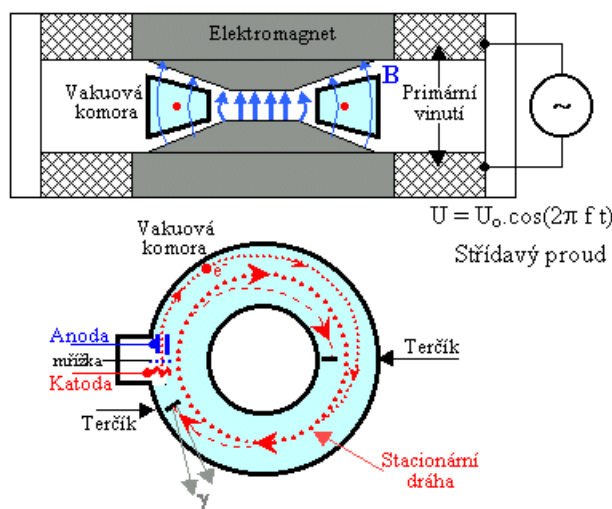
Základní schéma **elektrostatického** lineárního urychlovače je na obr.15 vlevo. Z iontového zdroje vstupují požadované částice (elektrony, protony, deuterony a pod.) do urychlovacího systému, tvořeného několika souosými kovovými válcovými elektrodami V_1, V_2, \dots, V_n , mezi nimiž je rozloženo postupně vzrůstající **vysoké napětí** $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$. Elektrostatickým polem jsou nabitě částice s nábojem q na lineární dráze urychlovány na energii $E = q \cdot (U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n)$ danou součtem napětí na jednotlivých elektrodách. Mezera mezi dvěma po sobě následujícími válcovými elektrodami působí na letící částice jako "elektrická čočka" (je to podobné jako v obrazovce), fokusující proud částic do úzkého svazku, který nakonec dopadá na terčik. Urychlovací elektrody jsou napájeny vysokým napětím buď z elektronického *kaskádního násobiče* (soustava vhodně zapojených diod a kondenzátorů), nebo z elektrostaticko-mechanického *Van de Graffova generátoru*. Používá se napětí od několika stovek kilovoltů až asi do 5MV (vyšších napětí je obtížné dosáhnout pro vznik korónových a jiskrových výbojů). [10]

Efektivnější způsob, jak na lineární dráze urychlit nabitě částice na značně vysokou energii bez použití extrémně vysokého napětí, je realizován ve **vysokofrekvenčním lineárním urychlovači**, jehož nejjednodušší schéma je na obr.15 vpravo. Nabitě částice z iontového zdroje \underline{Z} vstupují do urychlovacího systému válcových elektrod $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$, které jsou připojeny ke **střídavému elektrickému napětí** $U(t) = U_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) = U_0 \cdot \cos(2\pi f \cdot t)$ o amplitudě U_0 a frekvenci f . Liché válce jsou připojeny k jednomu pólu, sudé válce k druhému pólu vysokofrekvenčního zdroje vysokého elektrického napětí. Při-

jde-li kladná částice s nábojem q a hmotností m ze zdroje Z ve fázi, kdy první válcová elektroda $V1$ má záporný potenciál $-U_0$, pak získá energii $E_1 = q \cdot U_0$ a rychlost $v_1 = \sqrt{(2qU_0/m)}$, takže délku l_1 uvnitř válce $V1$ proletí za čas $t_1 = l_1/v_1$. Je-li frekvence f střídavého napětí volena tak, aby urychlená částice vstoupila do mezery mezi válci $V1$ a $V2$ v čase, kdy se polarita obrátí a válec $V1$ má kladný a $V2$ záporný potenciál, je částice znovu urychlena o energii $q \cdot U_0$, t.j. má již energii $2 \cdot q \cdot U_0$. Je-li **synchronizace** mezi frekvencí f , napětím U_0 a délkami elektrod l_k volena tak, aby se vždy během průchodu mezi jednotlivými válcovými elektrodami V_k obrátila polarita střídavého napětí, budou se tyto "synchronní" částice při průchodu každou elektrodou znovu a znovu urychlovat. [10]

2.2.2 Betatron

Kruhový indukční urychlovač elektronů se nazývá **betatron** (vyrábí totiž "umělé záření β^- ", což jsou rychlé elektrony, známé jinak z radioaktivity beta). Princip betatronu je schematicky znázorněn na obr.16. [10]



Obr. 16 Schematické znázornění betatronu. [10]

Urychlovací trubice betatronu má tvar prstence (toroidu) zhotoveného z elektricky nevodivého materiálu (sklo, porcelán) s vysokým vakuem uvnitř. Trubice je umístěna ("navléknuta") mezi pólovými nástavci elektromagnetu, napájeného **střídavým proudem**. Elektrony jsou ve vhodném okamžiku (vhodné fázi periody střídavého proudu) vstřikovány do urychlovací trubice **elektronovou tryskou**, tvořenou žhavenou **katodou**, mřížkou a urychlující a fokusující anodou - je to podobné "elektronové dělo" jako je u obrazovky. Časově proměnné magnetické pole **indukuje** v trubici **vířivé elektrické pole**, jehož **elek-**

tromotorická síla, směřující podél kruhové dráhy, tyto elektrony **urychluje**.

Z elektronického hlediska je betatron vlastně "transformátorem", jehož primární vinutí je napájeno střídavým proudem a jehož "sekundárním vinutím" (o jednom "závitu") je urychlovací trubice, v níž se ve vakuu (místo v drátech vinutí) pohybují elektrony urychlované indukovanou elektromotorickou silou. Na kruhové dráze jsou elektrony udržovány magnetickým polem. K urychlování elektronů dochází jen v **první čtvrtině** sinusového průběhu střídavého napětí v elektromagnetu. Ve vhodném okamžiku vzestupné části sinusovky jsou injektovány elektrony, které jsou urychlovány, magnetické pole narůstá, elektrony se po spirále stáčíjí dovnitř a po určitou dobu obíhají po stacionární dráze, na níž jsou neustále urychlovány. Po dosažení vrcholu čtvrtperrody slábne vířivé elektrické pole, obrací svůj směr a elektrony by posléze byly naopak brzděny. Zároveň však dochází k zeslabení magnetického pole a elektrony se začnou pohybovat po spirále k zevnímu okraji trubice, kde narazí na terčik nebo jsou vyvedeny k zevnímu použití. Některé typy betatronů mají radiální gradient magnetického pole a urychlovací fázi nastaveny tak, že pohyb elektronů na konci urychlovacího cyklu probíhá po spirále směrem dovnitř a terčik je umístěn při vnitřním okraji urychlovací trubice. [10]

2.3 Měrné jednotky ionizujícího záření

Požadované změny vlastností u radiačního sít'ování určuje v první řadě dávka ozáření, tzn. množství absorbované energie záření na měrnou jednotku hmoty. [12]

Dávka intenzity záření (dosis) = absorbovaná energie záření/hmotnost

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

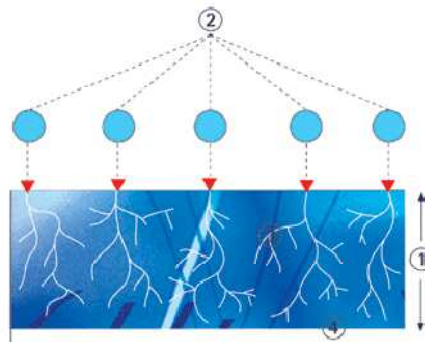
$$1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Výkon zdroje radioaktivního záření je charakterizován jeho aktivitou. Jednotka je Becquerell. [12]

$$1 \text{ Becquerell (Bq)} = 1 \text{ rozpad/s}$$

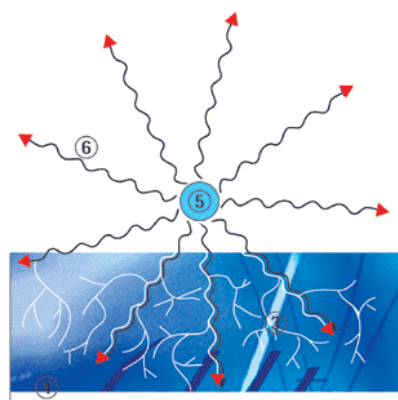
2.4 Rozdíly mezi zářením beta a gama

Hlavní rozdíl mezi zářením beta a gama je ve schopnosti pronikat materiálem a v intenzitě dávky záření. Záření beta má vysokou intenzitu, ale omezenou hloubku pronikání. Protože pro polymery je potřeba vysokých dávek záření, je využíváno pro síťování plastů. Další použití nalézá u kompozitních materiálů plněných částicovými plnivými, kde lze ovlivnit přílnavost matrice k vláknům. Soudržnost matrice s plnivem má velký vliv na přenos napětí z matrice na výztuž, a tedy i na výsledné mechanické vlastnosti. [8]

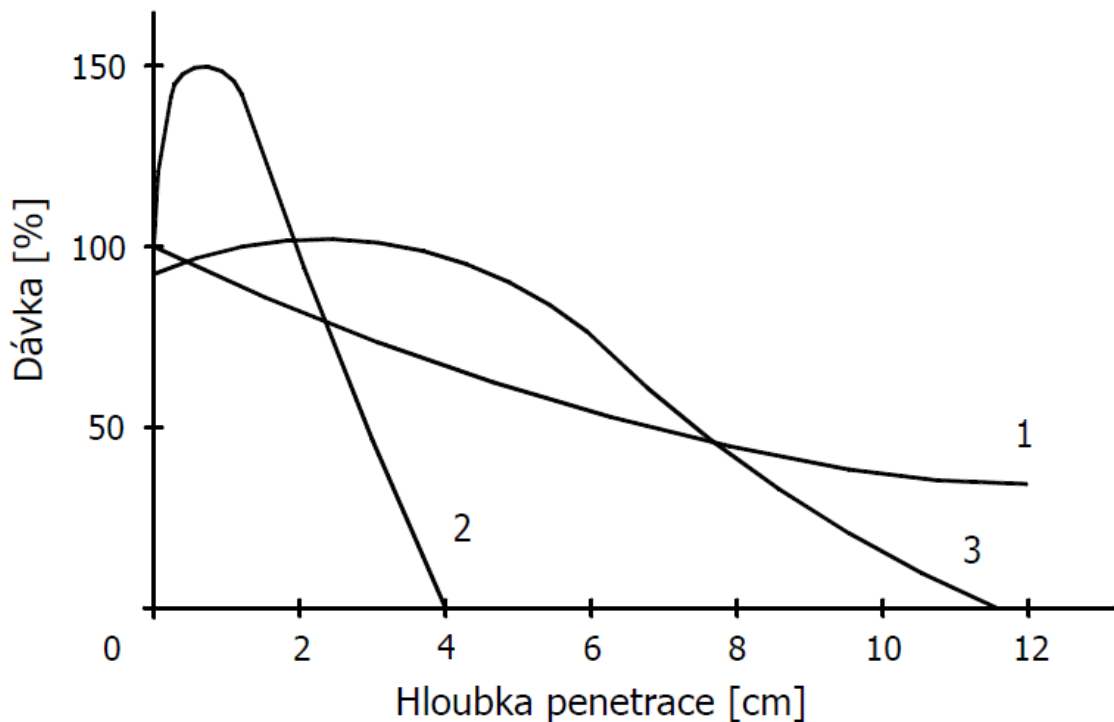


Obr. 17 Elektronové záření beta 1 – hloubka vniknutí elektronů; 2 – primární elektrony; 3 – sekundární elektrony; 4 – ozářený materiál [12]

Oproti tomu má záření gama vysokou schopnost průniku, ale nízkou intenzitu dávky ozáření. Je tedy využíváno pro ozařování větších objemů materiálu současně, k ozařování složitých objemných tvarových dílů z plastů a k radiační sterilizaci zdravotních produktů a potravin. [12]



Obr. 18 Záření gama 3 – sekundární elektrony; 4 – ozářený materiál; 5 – zapouzdřený zdroj záření Co^{60} ; 6 – g kvanta [12]



Obr. 19 Hloubka průniku beta a gama záření, 1 – gama záření ^{60}Co , 1MeV 2 – elektrony 4,5MeV 3 – elektrony 20MeV[12]

Srovnání charakteristik elektronových urychlovačů a gama zářičů ukazuje tab. 1. Důležitou složkou je rovněž ochrana lidského zdraví před ozáření. Smrtelná dávka ozáření se pohybuje mezi 4 až 5Gy pro lidský organismus. Proto musí být zdroje beta i gama záření odstíněny. Odstínění se provádí pomocí železobetonových stěn. Pro gama záření je tloušťka stěn až 6m. U elektronového záření je tloušťka stěn podstatně menší. Zdroj gama záření nelze zastavit, proto jej uchováváme ve vodní nádrži. [13]

Tab. 1 Charakteristické hodnoty beta a gama záření [12]

	Charakteristika				
	Výkon [kW]	Průchodnost [kGy-tun.h ⁻¹]	Energie [MeV]	Penetrace [cm]	Dávka
Elektronový urychlovač beta záření	150	30	4,5	4	100kGy.s ⁻¹
Gama záření	15-75	1,5	1,3	20	10kGy.h ⁻¹

3 SÍŤOVÁNÍ

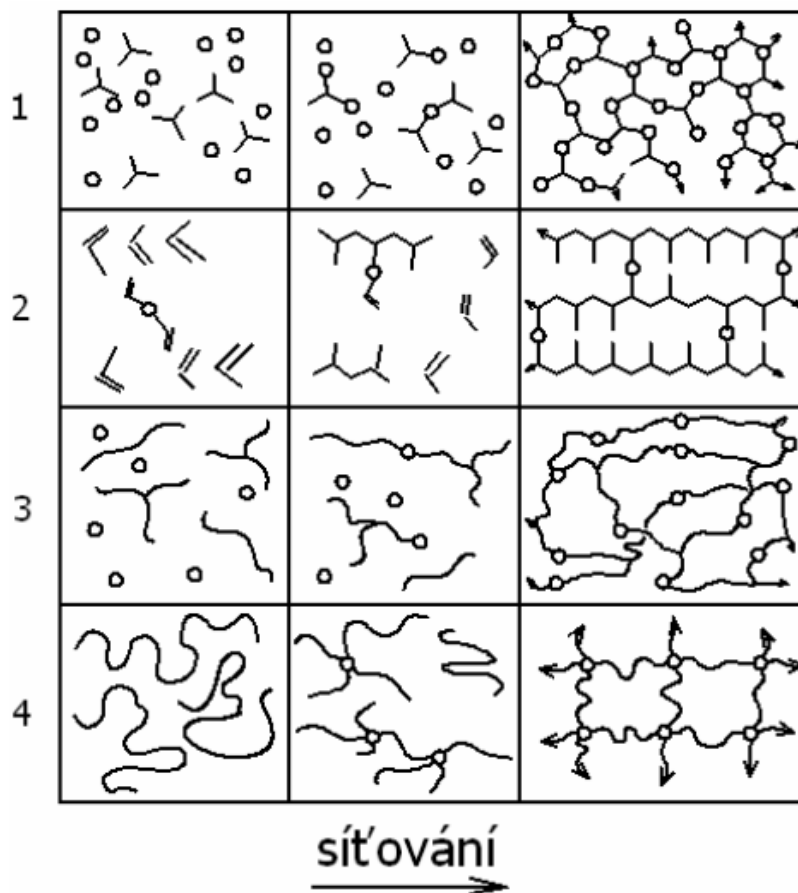
Z technického hlediska v důsledku síťování vzniká z kaučuku pryž, materiál s lepšími mechanickými vlastnostmi. U plastů je síťování chemický proces, kdy v průběhu jednotlivé molekuly plastu se navzájem chemicky spojují. Tento proces může být spuštěn právě ionizujícím zářením. Takto jsou přetvářeny např. termoplasty na materiály vykazující v určitých teplotních oblastech vlastnosti elastomerů. Důležitou vlastností takto síťovaných materiálů je zachování tažnosti a pružnosti, při přetrvávajícím dlouhodobým teplotním a mechanickým zatížením. [13]

Pro radiační síťování není často zapotřebí dalších přísad. Výhodou je, že proces probíhá až po zpracovatelském procesu (vstřikování, vyfukování, vytlačování, tvarování, atd.). [13]

3.1 Způsoby výstavby sítě

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

- Postupnými reakcemi nízkomolekulárních látek. Polyadičními či polykondenzačními reakcemi vznikají např. epoxidové či fenolové pryskyřice. Jejichž síť se dokončuje ve vytvrzovacím kroku.
- Polymerační řetězovou reakci, síťovací polymerací. Například kopolymerací styrenu s divinylbenzenem vznikají hmoty použitelné pro měniče iontů.
- Spojování reaktivních konců nízkomolekulárních polymerů o molární hmotnosti řádu $10^3 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Proces vzniku sítě je formálně stejný jako v prvním případě. Například ze směsi polyeterdiolu, polyetertriolu a diisokyanátu mohou vznikat polyuretanové materiály buď kaučukovité, nebo tvrdé.
- Nahodilým síťováním lineárních polymerů (zavedením příčných vazeb do vysokomolekulárních polymerů). Vulkanizací kaučuku vzniká pryž, ozářením sesíťovaný polyetylen apod. [14]



Obr. 20 Schéma vzniku sítě: 1 – postupnými reakcemi nízkomolekulárních látek, 2 – síťovací polymerací, 3 - spojováním reaktivních konců nízkomolekulárních polymerů, 4 – nahodilým síťováním lineárních polymerů [14]

Ve všech čtyřech případech probíhají při síťování tyto děje:

- první fází vzrůstají rozměry molekul i polydispersita systému
- při určitém stupni reakce dospěje systém do bodu gelace, ve kterém molární hmotnost vzroste nade všechny meze a v systému se objeví první stopy nekonečné struktury, gelu
- po překročení bodu gelace se systém skládá ze dvou částí – z nekonečné struktury, gelu, a molekul konečné velikosti, solu. Ten lze od gelu oddělit extrakcí. Gel je nerozpustný, v rozpouštědle pouze botná.
- v dalším průběhu reakce obsah solu klesá a jeho molární hmotnost i polydispersita se zmenšují
- v gelu vznikají tzv. elasticky aktivní řetězce sítě, ty při deformaci nesou napětí a určují velikost modulu pružnosti gelu a jeho rovnovážný stupeň naboťování. [14]

3.2 Síťování pomocí silanů

Peroxid je použit při síťování za pomoci silanů na vytvoření primárního radikálu. Molekuly silanu se poté naroubují na tyto primární radikály. Vytvoří se Si-O-Si můstky. Pro optimální rychlosti reakce se využívá zvýšené teploty (u PE 80°C až 90°C) a přítomnosti katalyzátoru. Výhoda síťování silany je ta, že proces výroby síťovaného materiálu se provádí na běžných strojích a navíc je zde přípustný širší rozsah teplot než u peroxidového. Problém je, že při reakci vznikají vedlejší produkty (metanol a voda). [15]

3.3 Síťování peroxidy

Při síťování pomocí peroxidů (dibenzonylperoxid, butyl-peroxid) se obvykle používají vyšších teplot (polymer se při nich taví). V prvním kroku se pomocí tepla rozloží peroxid (ROOR) na volné radikály RO; jenž dále reaguje polymerním řetězcem. Při této rekombinaci polymerních radikálů dochází ke spojení řetězce přes C-C vazbu. Nevýhodou síťování je jeho nízká účinnost (vedlejší reakce peroxidů a volných radikálů) a také nutnost použít velké množství poměrně drahých peroxidů. Další nevýhodou pak je míchání směsi polymeru s peroxidy a stabilizátory ve speciálním zařízení. [15]

3.4 Nahodilé síťování lineárních polymerů

Polymer, jež má být síťován příčnými vazbami, musí obsahovat v řetězci reaktivní místa, která by byla schopna zreagovat s reaktivními místy jiných řetězců (strukturními jednotkami) za vzniku spojek mezi řetězy – příčných vazeb. Reakce se účastní molekuly síťovacího činidla nebo jiné části, např. urychlené elektrony. U polydienu je takto definovaná jednotka totožná s monomerní jednotkou a reaktivním místem je dvojná vazba, resp. její bezprostřední okolí. Strukturní jednotky lze rozdělit na zesíťované, tj. ty, které už zreagovaly a nesou příčnou vazbu, a na nezešíťované, nezreagované. Příčná vazba je spojení nejčastěji dvou, obecně však několika strukturních jednotek různých řetězců v jednom místě. Zpravidla se toto spojení pokládá za bodové, i když je někdy zprostředkováno dosti velkými molekulami. [14]

3.4.1 Radiační síťování

Probíhá při pokojové teplotě bez dodatečného namáhání výrobků. Výhodou radiačního síťování je možnost variace ozařovacích parametrů, kterými lze měnit stupeň síťování v ozařovaném dílu a ovlivňovat tak vlastnosti ozařovaného materiálu přesně podle toho, jak je vyžadováno. Základním předpokladem je, aby materiál po dobu ionizačního záření síťoval a ne degradoval. U některých polymerů je poté potřeba přídavku pomocného síťovacího činidla. Pro dobré síťování je potřeba přítomnosti tři a více funkčních monomerů. 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. Radiační síťování se provádí nejčastěji beta nebo gama zářením. [12]

3.4.1.1 Radiační síťování polypropylenu

Až donedávna nebyl polypropylen vhodný pro radiační síťování. Do určité doby docházelo i při nízkých ozařovacích dávkách k opačnému efektu, molekulová hmotnost se snižovala díky degradaci řetězců. Dnes se do PP přidávají před vlastním zpracováním (vstřikováním, vyfukováním, vytlačováním, atd.) aditiva, která zabraňují či omezují degradaci řetězců. V současné době je radiační síťování na polypropylenu testováno v nejrůznějších projektech. [12]

Řada vlastností některých typů polypropylenů může být vylepšena pomocí radiačního síťování. Tak např. snižování časů vstřikovacích cyklů při vstřikování PP. Na počátku osmdesátých let bylo zjištěno možné zvýšení stupně krystalinity silnostěnných vstřikovaných výrobků přidáním malého množství síťovaného polypropylenového granulátu. To mělo za následek zvýšení rychlosti zatuhnutí polymeru a snížení času výrobního cyklu. [12]

Tímto očkovacím efektem získal materiál lepší semikrystalickou strukturu několika pozitivními výsledky. Tepelná odolnost, tuhost a rázová houževnatost se zvýšila, zároveň došlo ke snížení plastického tečení při zatížení. Zlepšila se přilnavost (adheze) barviv. Bylo znatelné, že adheze aplikovaných barviv je mnohem lepší po provedení radiačního zesíťování. [12]

3.4.1.2 *Radiační síťování polyetylenů*

Všechny typy polyetylenů (jako LDPE, HDPE, UHMWPE, atd.) jsou radiačně síťovatelné a to bez přísad aditiv. Lze síťovat jak plněné tak neplněné polyetyleny. Jako semikrystalická látka je polyetylen síťován zejména v amorfní oblasti. Po ozáření zůstává stupeň krystalizace a především hustota prakticky beze změn. Síťováním se rozšiřuje spektrum využití těchto plastů, umožňuje jejich využívání za vyšších teplot a vyhovuje mnohem přístupnějším mechanickým a chemickým požadavkům. [12]

Zesíťovaný polyetylen má asi pět uzlů na 1000 uhlíkových atomů. Zlepšuje se tím zejména jeho životnost, mrazuvzdornost i schopnost odolávat zvýšeným teplotám a také odolnost vůči korozi za napětí. Zesíťováním se stává polyetylen měkčím, ohebnějším a nelze jej roztavit, rozpustit, avšak ani svařovat. Zahříváním tedy netaje, pouze se stává měkkým až kaučukovitým. [16]

3.4.1.3 *Radiační síťování polyamidů*

Všechny typy polyamidů jsou radiačně zesíťovatelné. Největší zastoupení, co se týče síťování je u polyamidu PA 6, PA 6.6, PA11 a PA 12. Vlákniny vyztužené polyamidy a polyamidy obsahující retardéry hoření lze rovněž radiačně síťovat. Pokud jsou do polyamidů přidávána aditiva, mohou být přidávána buď přímo před samotným procesem, nebo jsou do materiálu přidávána výrobcem. Po zesíťování může předchozí termoplastický produkt odolávat podstatně vyšším teplotám. Deformační odolnost po teplotním namáhání rovněž významně narůstá. Radiačně ozářené polyamidy tak mohou nahradit termosety a vysoce výkonné plasty, jako jsou PPS, PES, LCP a jiné, v mnoha rozdílných aplikacích. [12]

3.4.2 Radiálně sítovatelné polymery

Pro výběr vhodného materiálu jsou rozhodující oblasti použití výrobků. Tab. 3 uvádí některé polymerní materiály vhodné pro radiální sítování. [17]

Tab. 2 Polymery převážně degradující při ozařování [17]

Polymery převážně degradující	
PAMS	poly(α -methyl styren)
PVDC	polyvinylidenchlorid
PTFE	polytetrafluoretylen
PCTFE	polychlorotrifluorethylen
PAN	polyakrylonitril
PVB	polyvinylbutyral
PMMA	polymethylmetakrylát
PMI	polymethacrylimid
POM	polyoxometylen
PPS	polypropylensulfid
CEL	celulóza
PAIa	polyalanin
PL	polylysin
PAN	polymetacrylonitrile
PMS	polymethylensulfid
DNA	deoxyribonukleová aminokyselina

Tab. 3 Polymery převážně sítující při ozařování [12]

Polymery převážně sítující			
Termoplasty	Polyolefiny	CSM	chlorsulfonovaný polyetylen
		EEA	kopolymer etylenu s akrylátem
		EPDM	etylenpropylendienový kaučuk
		EPM	etylenpropylenový kaučuk
		EVA	kopolymer etylenu s vinylacetátem
		PE	polyetylen (LDPE, HDPE, LLDPE, ...)
		CM	chlorovaný polyetylen
		PP	polypropylen*
	Polyestery	PBT	polybutylentereftalát*
		UP	nenasycená polyesterová pryskyřice
	Halogenované polymery	CSM	chlorsulfonovaný polyetylen
		ETFE	kopolymer etylenu s tetrafluoretylenem
		FPM	fluor kaučuk
		PVC	polyvinylchlorid*
		PVDF	polyvinylidenfluorid
	Další polymery	PA	polyamid 6, 6.6, 11, 12*
		PVAL	polyvinylalkohol
Elastomery		ACM	polyakrylátový kaučuk
		BR	polybutadienový kaučuk
		CR	polychloroprénový kaučuk
		CSM	chlorsulfonovaný polyetylen
		FPM	fluor kaučuk
		IR	polyizoprénový kaučuk
		NBR	butadien akrilonitrilový kaučuk
		NR	přírodní kaučuk
		SBR	butadien styrenový kaučuk
		SBS	styren-butadien-styrenový kopolymer*
		SI	silikon
Termoplastické elastomery		FPM	fluor kaučuk
		TPE-E	polyesterový termoplastický elastomer*
		TPE-O	polyolefinický termoplastický elastomer
		TPE-S	polystyrenový termoplastický elastomer
		TPE-U	polyuretanový termoplastický elastomer*
		TPE-V	zesíťovaný polyolefinický termoplastický elastomer

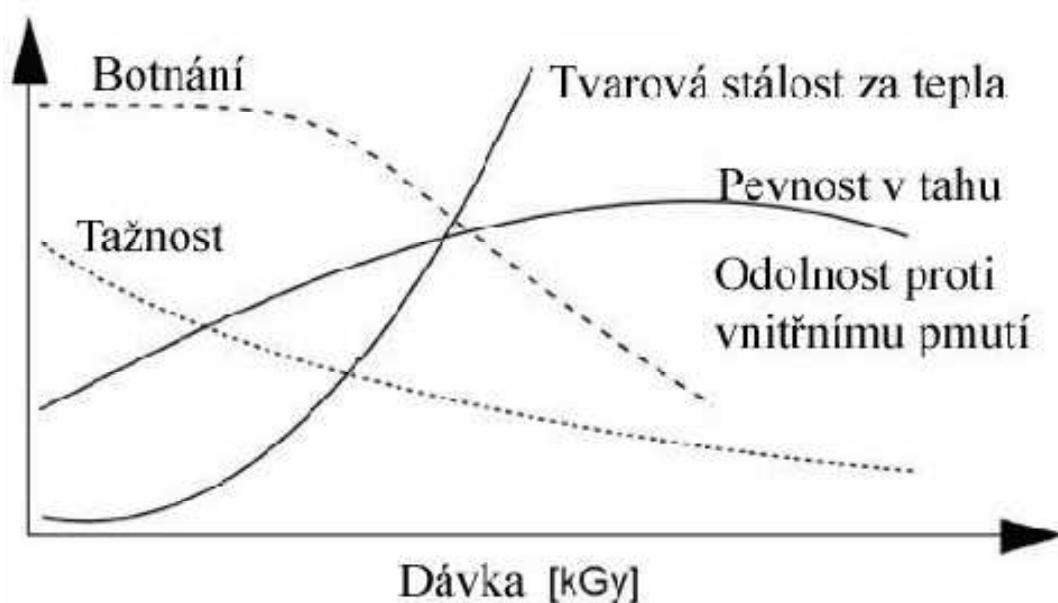
3.5 Radiční sít'ování v praxi

Tab. 4 Komerčně využitelné aplikace ionizačního záření [18]

Produkt	Využití	Zlepšení / výhody	Proces	Druh záření
Izolace kabelů	Vysokonapěťové kabely	Odolnost proti žáru a rozpouštědům	Sít'ování	β, γ
Stahovací páska	Izolace	Teplotní odolnost, zpomalení hoření	Sít'ování	β
Pryž	Automobilové pneumatiky	Snižování nákladů	Částečná vulkanizace	β
PE pěna	Automobilové vnitřní díly	Omezení creepu, ovládnání velikosti buněk	Sít'ování	β
Léčiva	Nemocnice	Vyloučení zbytkových toxických látek	Sterilizace	γ
Lepidla	Citlivé lepicí pásky na tlak	Pevnost vazby, energetické úspory	Polymerizace	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
Brambory, koření	Potravinářství	Vyloučení toxických látek, bakterií	Uchování	γ
Drahokamy	Klenotnictví	Barevná stálost	Sít'ování	β, γ

3.6 Zlepšení vlastností polymerů v důsledku ozáření

Na obr. 21 jsou uvedeny změny charakteristických vlastností v důsledku ozáření. [12]



Obr. 21 Charakteristika vlastností v závislosti na dávce ozáření [12]

3.6.1 Mechanické vlastnosti u radiačně síťovaných termoplastů:

- nárůst modulu
- zvýšení pevnosti (zejména z dlouhodobého hlediska)
- pokles poměrného prodloužení (tažnosti) při přetržení
- redukce studeného tečení – (creepu)
- nárůst tvrdosti (Shore)
- zlepšení odolnosti proti otěru
- zlepšení meze únavy při střídavém ohybu
- 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“
- zlepšení chování při dlouhodobém zatížení vnitřním přetlakem [13], [15]

3.6.2 Tepelné vlastností u radiačně síťovaných termoplastů:

- zlepšení tvarové stálosti za tepla
- zlepšení odolnosti proti hoření
- zlepšení trvalé deformace při zatížení tahem/tlakem
- dosažení vyšší teplotní odolnosti
- zvýšení odolnosti vůči vniknutí žhavé jehly
- vyšší odolnost vůči stárnutí [13], [15]

3.6.3 Chemické vlastností u radiačně síťovaných termoplastů:

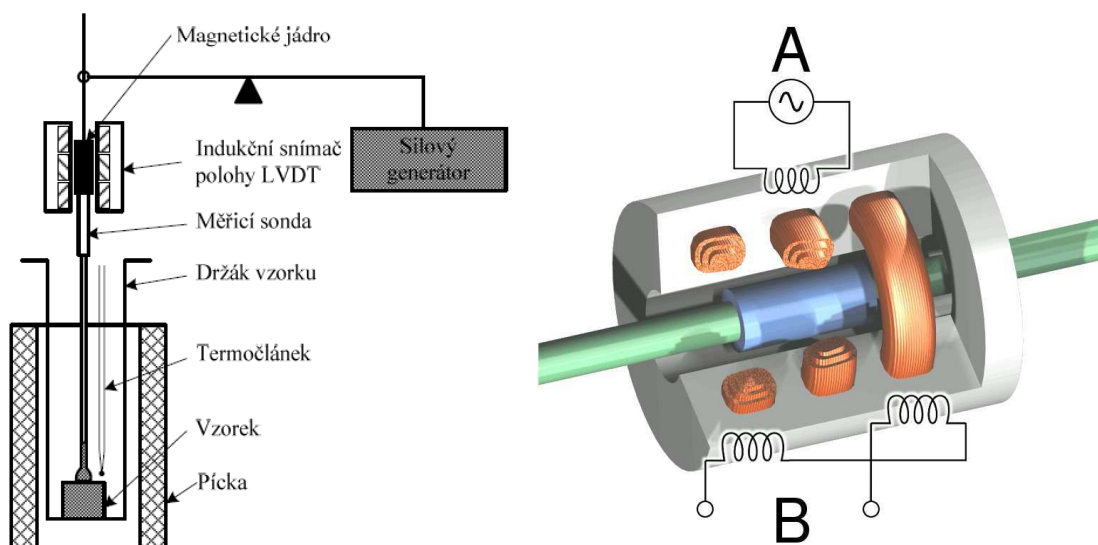
- výrazné zlepšení odolnosti proti chemikáliím
- snížení rozpustnosti
- zlepšení odolnosti proti bobtnání
- zvýšení odolnosti proti vzniku trhlin způsobeným pnutím
- zlepšení odolnosti vůči hydrolýze a zvýšená olejuvzdornost [13], [15]

4 TERMOMECHANICKÁ ANALÝZA

Termomechanická analýza měří změny délky nebo objemu v závislosti na teplotě nebo čase při zatížení za atmosférického tlaku. Zatížení je obvykle statické nebo proměnné. Tato technika se také nazývá termodilatometrie (TD), jestliže rozměry vzorku jsou měřeny při zanedbatelném zatížení. TMA je obzvláště užitečná metoda tepelné analýzy, protože měření probíhá na malém vzorku, který můžeme získat i z konečného výrobku. TMA probíhá obecně při statickém zatížení v různých módech, podle druhu sondy, v tlaku, v tahu a v ohybu. Nejdůležitějšími výsledky TMA jsou koeficient tepelné roztažnosti α a teplota skelného přechodu T_g . Použitím zvláštních módů a příslušenství lze měřit i jiné parametry. Toto zahrnuje relaxaci, kríp, tahové vlastnosti filmů a vláken, vlastnosti v ohybu, rozměrovou stálost (vratná a nevratná rozměrová změna), reometr deska - deska a objemovou dilatometrii. [19]

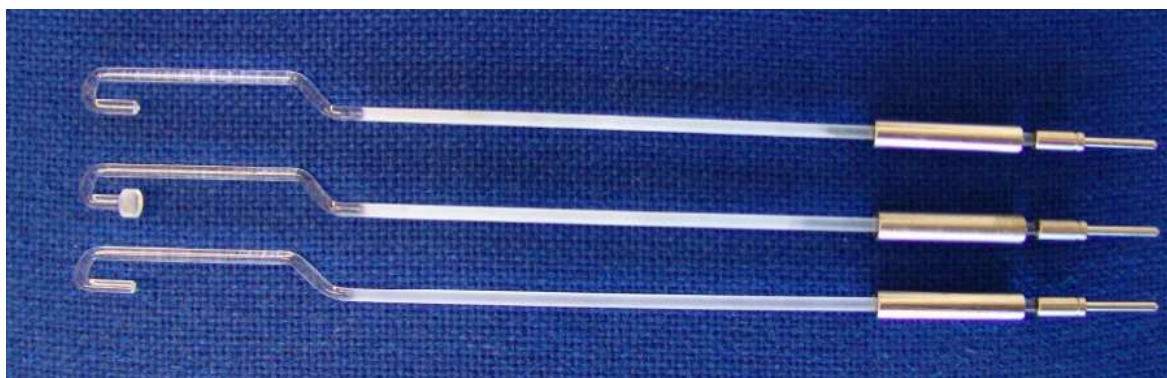
4.1 Konstrukční uspořádání aparatury TMA

Jádrem aparatury pro termomechanickou analýzu (obr. 22 vlevo) je indukční snímač polohy **LVDT** (*Linear Variable Differential Transformer*) - obr. 22 vpravo. Tento snímač je tvořen transformátorem, který obsahuje tři cívky ve tvaru toroidu. Primární vinutí (A) je navinuto na prostřední cívce, sekundární (B) je rozděleno mezi zbývající dvě cívky. Měřicí sonda je spojena s feromagnetickým jádrem transformátoru, které se volně pohybuje uprostřed všech tří cívek. Střídavý proud protékající primárním vinutím indukuje napětí v obou sekundárních cívkách, jehož velikost je úměrná jejich vzájemné indukci. Pohyb feromagnetického jádra uvnitř cívek způsobí změnu vzájemné indukčnosti. Pokud je jádro v centrální poloze, je výstupní sekundární napětí rovno nule (sekundární vinutí jsou zapojena v diferenciálním uspořádání). Pokud dojde k posunu jádra, zvyšuje se indukované napětí v jednom ze sekundárních vinutí, zatímco v druhém se napětí snižuje. Tento jev způsobí zvyšování výstupního napětí od nuly do maxima. Napětí je ve fázi s primárním napětím. Pokud se jádro posune v opačném směru, napětí se opět zvyšuje z nuly do maxima, ale je v opačné fázi s primárním napětím. Velikost napětí je tedy úměrná posunu feromagnetického jádra a fáze napětí indikuje směr tohoto posunu. [20]



Obr. 22 Konstrukční uspořádání aparatury TMA a indukčního snímače polohy LVDT [20]

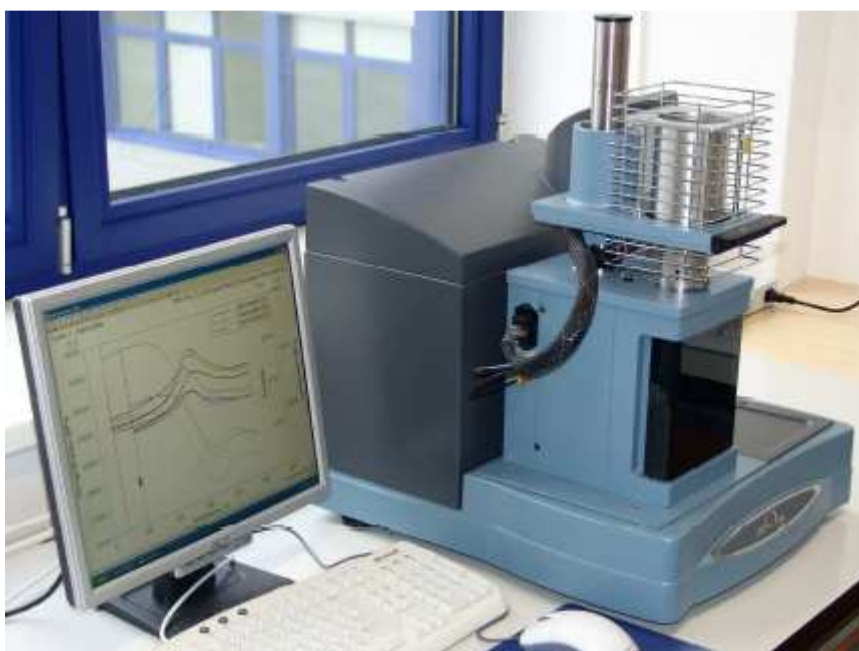
Na feromagnetické jádro LVDT může být jednoduše připojena jakákoli z měřících sond (obr. 23). Konec sondy dosedá na vzorek, který je umístěn na držáku vzorku (obr. 24). Měřící sondy a držák vzorku jsou nejčastěji vyrobeny z křemenného skla. V těsné blízkosti vzorku se také nachází termočlánek, který je možno spatřit také na obr. 24. V průběhu měření je vzorek (spolu s držákem a koncem sondy) umístěn uvnitř pece a jeho výška je kontinuálně vyhodnocována. Příklad aparatury TMA je uveden na obr. 25. [20]



Obr. 23 Měřící sondy (shora: penetrační, makroexpanzní, expanzní) [20]



*Obr. 24 Detail uspořádání sonda-vzorek
při měření tříbodového ohybu [20]*



Obr. 25 Aparatura TMA Q400 od firmy TA Instruments [20]

4.2 Vliv podmínek měření TMA

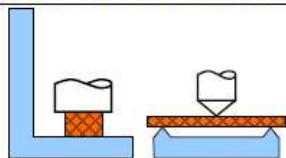
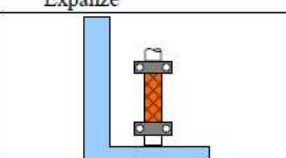
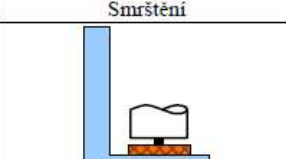
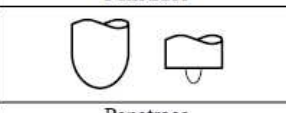
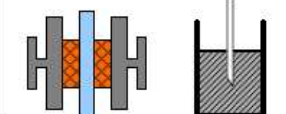
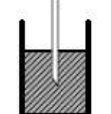
I v případě termomechanické analýzy mohou být výsledky měření ovlivněny mnoha faktory. Jak bylo řečeno dříve, termomechanická analýza je univerzální metodou a to vyžaduje velmi pečlivou přípravu měření. Optimalizace měřících podmínek by měla zahrnovat alespoň tyto základní kroky:

- výběr správné měřící sondy,
- optimalizaci přítlačné síly,
- optimalizaci teplotního rozsahu měření,
- optimalizaci rychlosti ohřevu, atd. [20]

Výběr sondy

Každá z měřících sond vyžaduje specifický postup měření, specifickou přípravu vzorků a je vhodná pro zjišťování různých vlastností. Přehled o aplikaci jednotlivých sond ukazuje tab. 5. [20]

Tab. 5 Přehled aplikace měřících sond pro TMA [20]

Charakter vzorku	Měřené parametry	Sonda a deformační mód
<i>Pevný polymer</i>	<i>Lineární koeficient tepelné roztažnosti Teplota skelného přechodu Teplota měknutí Teplota tavení Průhyb</i>	
		Komprese Expanze
<i>Tenký film, vlákno</i>	<i>Youngův modul Teplota skelného přechodu Teplota měknutí Vytvrzování Hustota zesítnění Tenké filmy</i>	
		Prodloužení Smrštění
	<i>Youngův modul Teplota skelného přechodu Penetrace Teplota měknutí Vytvrzování</i>	
		Penetrace
<i>Hustota zesítnění Tvrдость Jehlová penetrace</i>		Penetrace
<i>Viskózní kapalina, gel</i>	<i>Viskozita Gelace Přechod roztoku na gel Vytvrzování Elastický modul</i>	
		Střih
		
		Jehlová penetrace

Vliv přítláčné síly

Dalším důležitým faktorem je vliv přítláčné síly, který může být v mnoha případech rozhodující. Při měření penetrace (nebo tříbodového ohybu) je pronikání sondy vzorkem přímo vyžadováno, ale u expanze je naopak tento jev nepříznivý, poněvadž ovlivňuje koeficienty tepelné roztažnosti. [20]

Volba teplotního programu

Aparatury pro TMA jsou schopny měřit od extrémně nízkých teplot (cca -150 °C) až po teploty velmi vysoké (není výjimkou i více než 1000 °C) s různými rychlostmi ohřevu. Měření lze také provádět např. při konstantní teplotě a narůstající síle apod. [20].

Vliv rychlosti ohřevu

Vliv rychlosti ohřevu se u TMA projevuje podobně jako u většiny termických analýz, tj. čím vyšší je rychlost ohřevu, tím se efekty na křivkách posouvají směrem k vyšším teplotám. Termomechanická analýza vyžaduje obecně menší rychlosti ohřevu než jiné metody, např. při měření expanze se doporučuje volit rychlosti co nejnižší, určitým kompromisem mezi přesností a rychlostí může být ohřev rychlostí max. 5 °C/min. [20]

4.3 Fyzikální veličiny měřené TMA

4.3.1 Creep (tečení)

Creep (tečení) nebo také časově závislá složka nevratné plastické deformace je u konstrukčních materiálů vyvolána dlouhodobým působením napětí za normálních nebo zvýšených teplot. [21]

Creepové chování polymerních materiálů je reologicky popsáno pomocí Voigtova modelu

(paralelní zapojení pružiny a hydraulického válce), $\epsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 - \exp\left(-\frac{E \cdot t}{\eta}\right) \right]$, kde σ

[MPa], je působící napětí, E [MPa], je modul pružnosti materiálu, t [s] je doba zatížení, η [Pa.s], je viskozita materiálu. [22]

4.3.2 Relaxace napětí

Proces relaxace napětí v polymerním materiálu je reologicky popsán pomocí Maxwellova modelu (sériové zapojení pružiny a hydraulického válce), $\sigma_t = \sigma_i \exp\left(-\frac{E \cdot t}{\eta}\right)$, kde σ_t [MPa] je napětí v materiálu dosažené v čase t [s], σ_i [MPa] je původní zatížení, E [MPa] je modul pružnosti zvoleného materiálu, η [Pa.s] je viskozita materiálu při dané teplotě. [22]

Průběh napěťové odezvy (*relaxace napětí*) se nachází mezi dvěma mezními případy: relaxační křivkou ideálně elastické pevné látky a relaxační křivkou ideálně viskózní tekutiny.

Relaxační čas vyjadřuje poměr mezi viskózní a elastickou částí.

$$\text{V čase } t = 0: \sigma(0) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{\lambda}} = \gamma_0 \cdot G e^0 = \gamma_0 \cdot G = \sigma_{\max}$$

tj. maximálního napětí je dosaženo v okamžiku zatížení,

$$\text{v čase } t = \infty: \sigma(\infty) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{\lambda}} = \gamma_0 \cdot G \cdot 0 = 0$$

tedy za nekonečně dlouhou dobu po ukončení působení deformace systém dokonale zrelaxuje a hodnota napětí je rovna nule,

$$\text{v čase } t = \lambda: \sigma(\lambda) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{\lambda}} = \gamma_0 \cdot G e^{-1} = \gamma_0 \cdot G \cdot 0,368$$

tj. v čase, který je roven relaxačnímu času, materiál relaxuje na 36,8% maximálního napětí. [23]

4.3.3 Součinitel teplotní roztažnosti

Během přenosu tepla, energie, která je skladována v intermolekulárních poutech mezi změnami atomů. Když se vnitřní (tepelná) energie zvýší, zvýší se i vzdálenost molekul. (Amplituda tepelného pohybu částic je větší a středy těchto amplitud jsou tedy také vzdálenější.) Jako výsledek, pevné látky při ohřevu expandují a smršťují se při ochlazení; tato reakce na změnu teploty je vyjádřena jako jejich součinitel teplotní roztažnosti.

Součinitel teplotní roztažnosti je používán dvěma způsoby:

jako *objemový* koeficient teplotní roztažnosti

jako *lineární* koeficient teplotní roztažnosti

Tyto charakteristiky jsou blízko příbuzné. Koeficient objemové tepelné roztažnosti může být změřen pro všechny substance zhuštěné hmoty (kapaliny a pevné látky). Lineární tepelná roztažnost může být změřena pouze v pevném skupenství hmoty. Obvykle se využívá v inženýrských aplikacích. [24]

Lineární teplotní expanzivní koeficient souvisí se změnou v teplotě ke změně v materiálu, má lineární velikost. Je to změna délky materiálu, při změně teploty o jeden stupeň. [24]

4.3.4 Teplota skelného přechodu

Teplota skelného přechodu tvoří rozhraní mezi sklovitým a kaučukovitým stavem materiálu. S ohledem na již zmiňované změny mnoha vlastností je nezbytné, aby byl materiál provozován nejlépe pod touto teplotou. Zjištění a vyhodnocení teploty skelného přechodu T_g je proto velmi důležité. Teplotu skelného přechodu T_g nejvíce ovlivňuje ohebnost řetězce polymeru. Z tohoto hlediska dělíme polymerní materiály do dvou skupin: polymery s tuhými řetězci (např. polystyren) a polymery s ohebnými řetězci (např. polyetylen). První skupina má T_g nad pokojovou teplotou, materiály jsou tvrdé a při teplotách nad T_g změknou. Druhá skupina má T_g nižší, než je pokojová teplota, za normálních podmínek jsou tyto polymery měkké, při teplotách okolo T_g tvrdnou, až křehnou. [25]

4.3.5 Modul pružnosti v tahu a ve smyku

Modul pružnosti, konstanta o fyzikálním rozměru napětí (Pa), která charakterizuje pružné vlastnosti látek. Modul pružnosti v tahu (tlaku), Youngův modul E , konstanta úměrnosti mezi poměrným prodloužením (zkrácením) a působícím napětím při namáhání vzorku. Modul pružnosti ve smyku G je obdobně definován pro smykové namáhání. [26]

4.3.6 Napětí v ohybu

Zkouška pro ohyb dává důležité konstrukční podklady pro ty polymerní materiály, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, což je velmi častý případ. Jsou to nejen nosníky, ale např. samonosné střešní konstrukce z laminátů, obkladový materiál ve stavebnictví, který se prohýbá svou vlastní vahou, střešní krytiny, apod. Při ohybu je napětí v principu rozloženo tak, že v horních vrstvách je tahové a směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové. [27]

4.3.7 Bod měknutí podle Vicata

Stanovuje se teplota, při které se standardní jehla s plochým hrotem (o kruhovém průřezu o ploše 1 mm) vtlačí do povrchu zkušební tělesa z plastu (o rozměrech 10x10x3 až 6,5 mm nebo průměru 10 mm) do hloubky 1 mm. Jehla působí definovaným zatížením kolmo na zkušební těleso (umístěné v temperační lázni), které je současně zahříváno konstantní rychlostí. [28]

4.3.8 Čas želatinace

Čas, při kterém materiál teplem se stává vytvrzovatelným materiálem, dosažením bodu želatinace se stává s viskoelastické kapaliny sesíťovaný materiál. [19]

4.3.9 Stupeň bobtnání

Zvětšení tloušťky vzorku při absorpci rozpouštědla, měřeno expanzní sondou. [19]

4.3.10 Objem tvrdého jádra

Také známý jako nestlačitelný objem odpovídající extrémně vysokému tlaku nebo odpovídá nulové termodynamické teplotě. [19]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je zjistit, jaký vliv má ionizační ozařování na vlastnosti polymerních materiálů. Konkrétně jaký vliv má radiační síťování na teplotní odolnost polymerních materiálů. Resp. jak se polymerní materiály chovají za zvýšených a vysokých teplot.

Materiály, jež budou zpracovávány v této práci a následně pak zkoušeny a vyhodnocovány budou polyolefiny (LDPE, HDPE, PP, PP 25%GF), polyestery (PBT, PBT 35%GF), termoplastické elastomery (TPE-E) a polyamidy (PA11, PA12, PA9T 45%GF, PA6, PA6 30%GF, PA6.6, PA6.6 30%GF).

Výroba zkušebních tělísek (lopatičky a tyčinky obdélníkového průřezu) je zajištěna vstřikovacím strojem ARBURG Allrounder 420C. Zkušební tělíška jsou pak odeslána do firmy BGS, kde se nechají ozářit dávkami 33kGy, 66kGy, 99kGy, 132kGy, 165kGy a 198kGy.

Neozářené a různě ozářené vzorky podstoupí zkoušku teplotní odolnosti v horkovzdušné komoře MORA a peci MIWYcalor K model V30. Následně zjištěné výsledky budou srovnávány s termomechanickou analýzou.

6 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ

Pro realizaci této diplomové práce bylo využito několika strojů a zařízení. Pro výrobu zkušebních těles bylo využito vstřikovacího stroje ARGURG Allrounder 420C a sušící jednotky ARBURG THERMOLIFT 100-2. Pro jednotlivá měření byla využita horkovzdušná komora MORA, pec MIWYcalor K model V30, multimeter MY-64 pro měření aktuální teploty a přístroj pro měření termomechanických vlastností Perkin Elmer DMA 7e.

6.1 Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420C

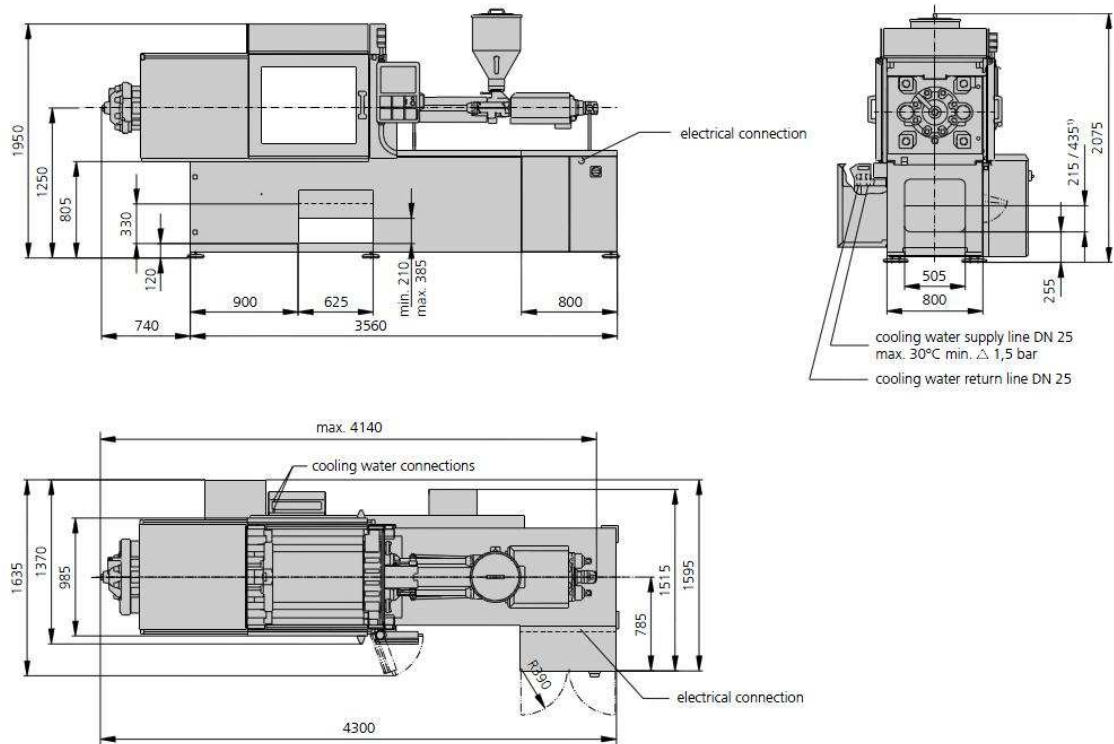
Vstřikovací stroj ALLROUNDER 420C GOLDEN EDITION od firmy ARBURG je hydraulický stroj s nepřekonatelným poměrem cena/výkon. Technicky vysoce kvalitní standardní vybavení tohoto stroje je založené na osvědčených součástech firmy ARBURG, proto je tento stroj prakticky bezúdržbový s vysokou garancí spolehlivosti a dlouhou životností. Tento stroj se hodí ke zpracování všech běžných termoplastů.

Vstřikovací stroj ALLROUNDER 420C GOLDEN EDITION od firmy ARBURG je vybaven řídicím systémem SELOGICA s 32bitovým multiprocesorem řídicího systému, umožňující přehledné, snadné a rychlé programování a tím i jednoduché a rychlé ovládání stroje. Na obrazovce výklopného terminálu jsou přehledně zobrazovány informace z klávesnice ve formě grafických symbolů. Díky tomuto řídicímu systému může uživatel jednoduše a rychle zvládnout široké spektrum úkolů v oblasti technologie vstřikování.

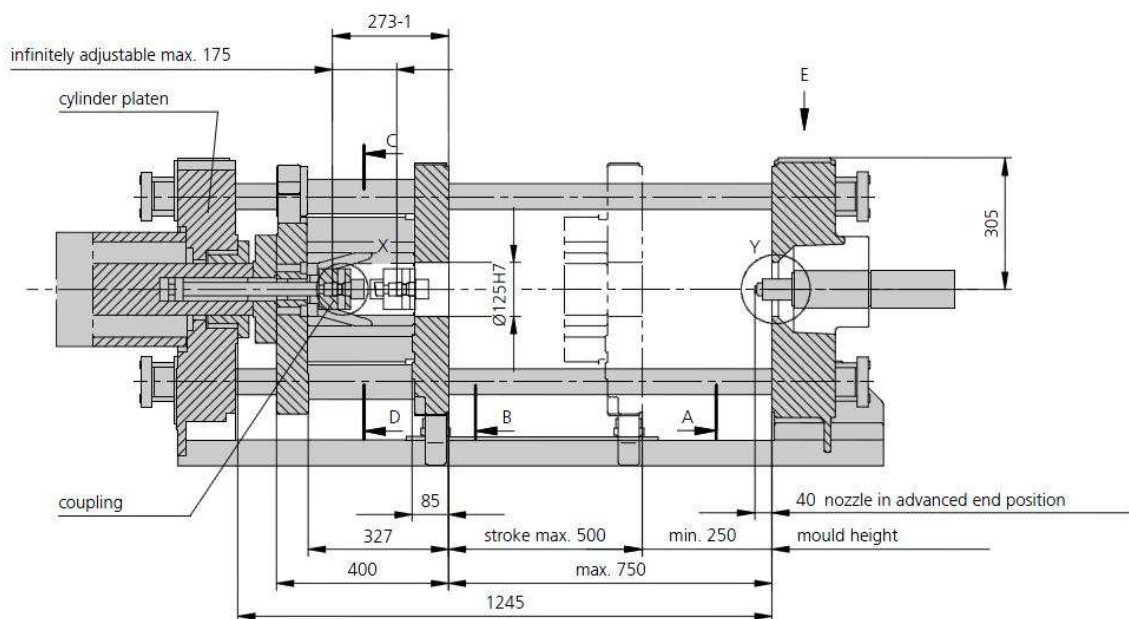


Obr. 26 Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420C

6.1.1 Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C



Obr. 27 Rozměry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C



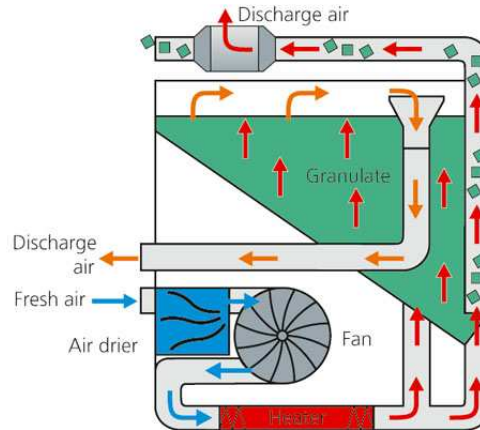
Obr. 28 Rozměry vnitřního prostoru vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C

Tab. 6 Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG 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
Přítláčná síla trysky	70	max. kN
Objem násypky	50	l
Olejová náplň a hmotnost		
Množství oleje	235	l
Hmotnost stroje, bez oleje	3700	kg

6.2 Sušící jednotka ARBURG THERMOLIFT 100 – 2

Zařízení sloužící k odstraňování vlhkosti z polymerních materiálů a k podtlakové dopravě materiálu do plastikační jednotky vstřikovacího stroje.



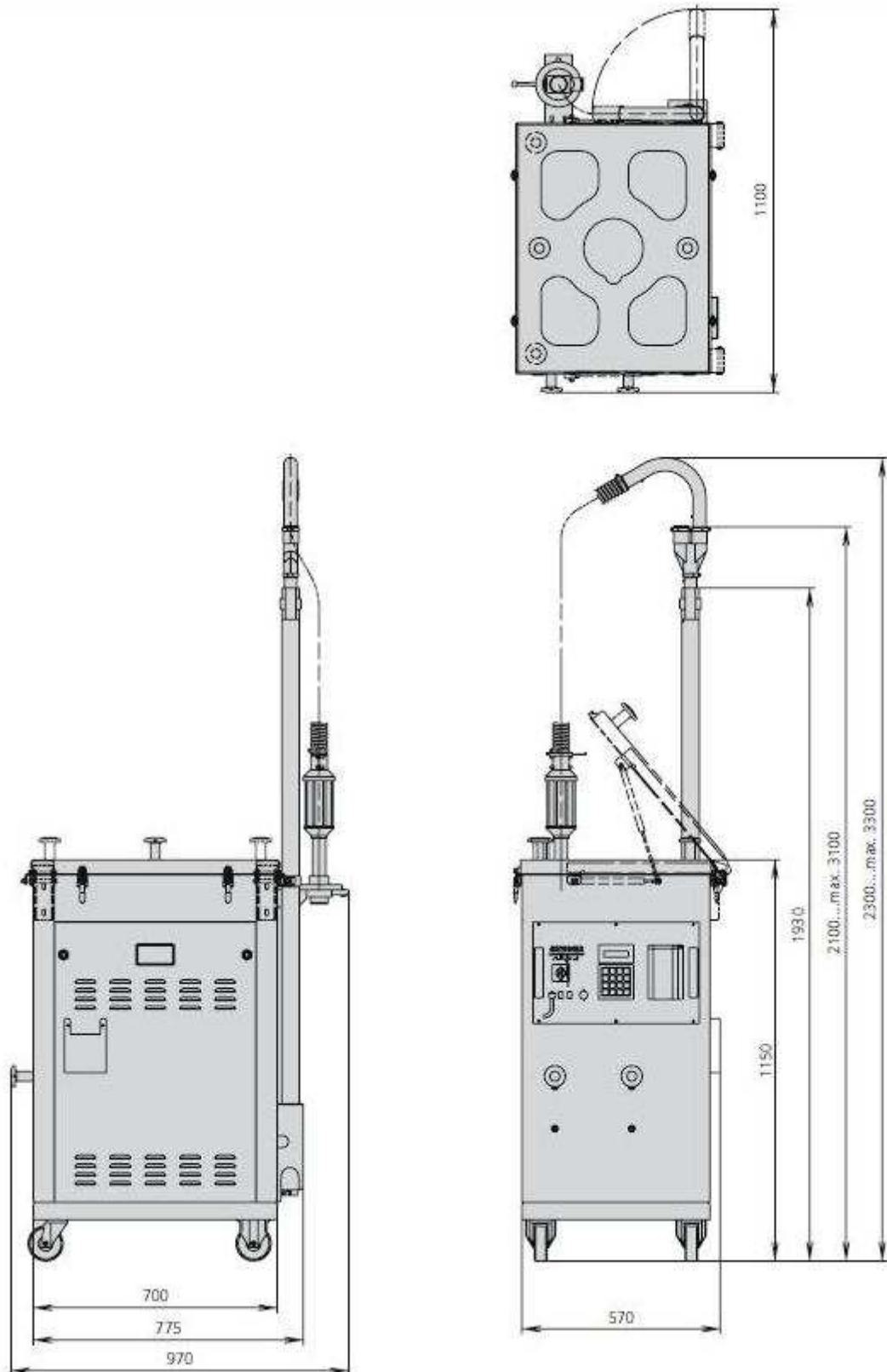
Obr. 29 Cirkulace vzduchu v sušící jednotce ARBURG Thermolift 100-2

Zařízení pracuje na základě proudění sušícího média, kterým je čerstvý vzduch nebo znovu obíhající suchý vzduch v uzavřeném okruhu dle vybraného módu. Ovládání je jednoduché a přehledné pomocí kontrolního panelu. Zařízení obsahuje tabulku s dobou sušení pro základní polymerní materiály. Zařízení je mobilní, proto ho můžeme využívat pro více vstřikovacích strojů, ale současně lze zásobovat maximálně dva vstřikovací stroje. V základní verzi zařízení pojme maximálně 100 litrů granulátu s nástavbou pak 200 litrů.



Obr. 30 Sušící jednotka ARBURG Thermolift 100-2

6.2.1 Technické parametry sušící jednotky ARBURG THERMOLIFT 100 - 2



Obr. 31 Rozměry sušící jednotky ARBURG Thermolift 100-2

Tab. 7 Technické parametry sušící jednotky ARBURG THERMOLIFT 100-2

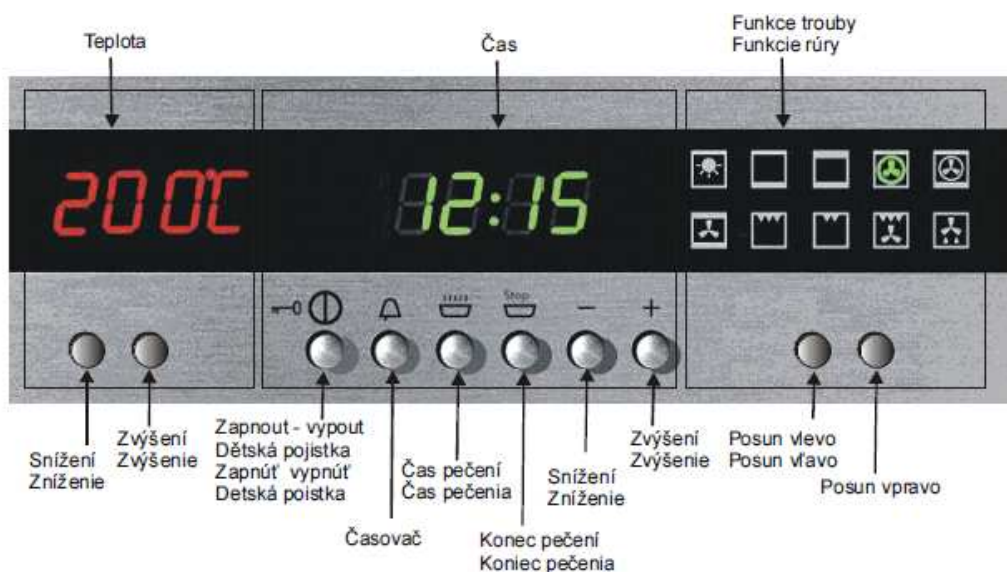
Typ zařízení	THERMOLIFT 100 - 2	
Objem zařízení	100	l
Objem zařízení s přípojným kontejnerem	200	l
Provozní napětí	220 / 400	V
Topný element	4,5	kW
Ventilátor	0,95	kW
Dopravní výška	3	m
Dopravní tlak	0,055	bar
Zdroj sušícího vzduchu	0,74	kW
Celková spotřeba energie	5,5	kW
Celková spotřeba energie zahrnující zdroj sušícího vzduchu	6,2	kW
Množství sušícího vzduchu	90	m ³ .h ⁻¹
Množství obnoveného sušícího vzduchu	20	m ³ .h ⁻¹
Přípojka stlačeného vzduchu pro vakuové dopravní zařízení	4 - 6	bar
Vzduchový filtr / jmenovitý maximální průtok	180	m ³ .h ⁻¹

6.3 Horkovzdušná trouba Mora 4807

Multifunkční trouba s ukazatelem nastavené teploty a funkce, ovládání trouby tlačítky. Tato trouba má 9 funkcí, elektronický programátor funkcí, automatické programování doporučené teploty v troubě. Přesnou elektronickou regulaci teploty v troubě od 40 do 250 °C, katalytické samočisticí vložky, osvětlení trouby COMFORT s automatickým vypnutím po 3 minutách, bezpečnostní dětský zámek, výsuvné teleskopické rošty, velký průhled do trouby, 3 tvrzená bezpečnostní skla dvířek, chromovaný boční vodicí mřížky s 5 polohami, chladicí systém dvířek trouby – nízká vnější povrchová teplota, energetická třída A.

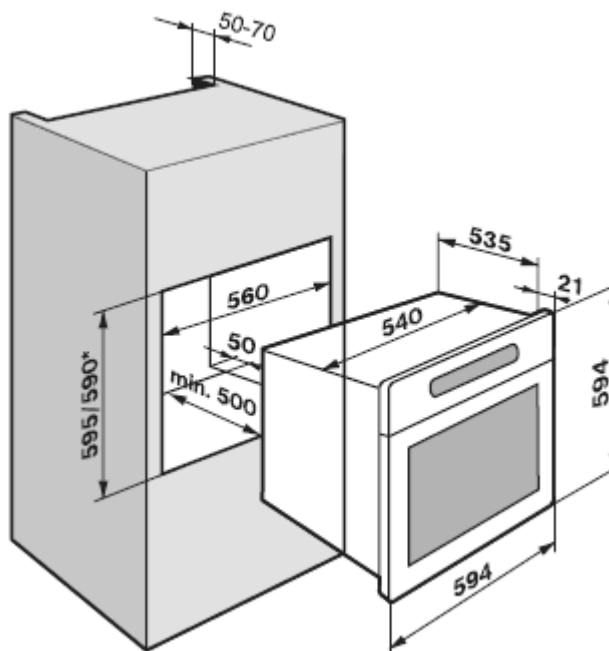


Obr. 32 Horkovzdušná trouba MORA 4807



Obr. 33 Ovládací panel horkovzdušné trouby MORA 4807

6.3.1 Technické parametry horkovzdušné trouby MORA 4807



Obr. 34 Rozměry horkovzdušné trouby MORA 4807

Tab. 8 Technické parametry horkovzdušné trouby MORA 4807

Elektrická vestavná trouba MORA 4807	
Vnější rozměry - (v / š / h) [mm]	(594 / 594 / 535)
Vnitřní rozměry - (v / š / h) [mm]	(460 / 350 / 395)
Rozměry výřezu pro zabudování - (v / š / h) [mm]	(595 / 560 / min. 500)
Objem [l]	58
Elektrické napětí [V]	AC 230
Min. / max. teplota v troubě	50 - 250°C
	El. příkon [W]
Horní a dolní topné těleso	<input type="checkbox"/> 2100
Horní a dolní topné těleso s ventilátorem	<input type="checkbox"/> 2125
Dolní topné těleso s ventilátorem	<input type="checkbox"/> 1125
Topné těleso velkého grilu	<input type="checkbox"/> 2200
Topné těleso grilu	<input type="checkbox"/> 1200
Topné těleso velkého grilu s ventilátorem	<input type="checkbox"/> 2225
Kruhové topné těleso	<input type="checkbox"/> 2300
Kruhové topné těleso + dolní topné těleso + ventilátor	<input type="checkbox"/> 3425
Ventilátor	<input type="checkbox"/> 25
Osvětlení	<input type="checkbox"/> 25
Celkový	3500

6.4 Pec MIWY calor K model V30

Pec je určena k výpalu zboží v oxidačním prostředí s růstem teplot do T_{\max}

Tab. 9 Technické parametry pece MIWY CalorK

Maximální teplota	1260°C
Vnitřní výška	300 mm
Vnitřní šířka	300 mm
Vnitřní hloubka	300 mm
Vnější výška	810 mm
Vnější šířka (bez ovládací jednotky)	800 mm
Vnější hloubka	770 mm
Hmotnost	200 kg
Užitný objem	27 dm ³
Počet vytápěných stěn	2
Instalovaný příkon	3,3 kW
Síťové napětí/ frekvence	230V/50Hz
Typ termočlánku	PtRh-Pt
Regulace teploty	Programovatelný regulátor MIWY TS 1300



Obr. 35 Pec MIWY calor K v30

6.5 Měřicí přístroj Multimetr MY-64

Multimetr MY64 je kompaktní, bateriový, snadno ovladatelný, digitální přístroj pro měření střídavého a stejnosměrného proudu a napětí, elektrického odporu, frekvence, teploty, testování diod a tranzistorů, pro zvukové zkoušky vodivosti a obvodu.

6.5.1 Hlavní charakteristika

Tab. 10 Technické parametry multimetru MY-64

Displej	Maximální zobrazitelné číslo 1999 (3 a 0,5 číslice) s automatickou indikací polarity
Zobrazovací metoda	LCD displej
Měřicí metoda	Duální - reaguje na náběžnou i sestupnou hranu pulsu
Maximální běžný režim	500V DC/AC rms
Čtecí rychlost	2-3 čtení za sekundu (přibližně)
Provozní teplota	23°C +/- 5°C
Teplovní rozsah	Pracovní 0°C až +40°C Skladovací -10°C až +50°C
Napájení	9V baterie, značení 1604 nebo 6F22. Na stav nízkého napětí na baterii je uživatel upozorněn zobrazením ikony "BATERIE" v levé části displeje
Velikost	(91 x 189 x 31,5) mm
Hmotnost	310g (včetně 9V baterie)
Doplňky	Návod k použití, měřící hroty, teplotní sonda

6.5.2 Specifikace

Tab. 11 Parametry měření teploty multimetru MY-64

Teplota			
Rozsah	Teplovní rozmezí	Přesnost	Odchylka
	-50°C až 400°C	±2% z rozsahu	1°C
	400°C až 1000°C	±2% z rozsahu	1°C



Obr. 36 Multimetr MY-64

6.6 Měřicí přístroj Perkin Elmer DMA 7e

Termomechanický analyzátor využívá vysoko rozlišovací snímač řídicího systému, jenž je schopen poskytovat stálé zatížení bez ohledu na rozměrovou změnu. Slouží pro určování modulu v tlaku, penetrace a lineárního součinitele roztažnosti popřípadě smrštění. Vhodné pro kaučuk, elastomery a termoplasty. Touto metodou není možné měřit taveninu.

Postup měření:

Vložení vzorku (obdélníková kostička 4 x 4 x 4mm) do zařízení. Nastavení konstantního zatížení silou 10 N. Předehřev na 50 °C a výdrž na této teplotě 1 min. Následuje ohřev od 50 do 400 °C rychlostí 20 °C/min. SW program vyhodnotí závislost hloubky průniku na teplotě.



Obr. 37 Perkin Elmer DMA 7e

6.6.1 Technické parametry měřicího přístroje Perkin Elmer DMA 7e

Posuv měřicí jednotky: ± 12 mm (0 do 24 mm)

Síla vyvolaná hrotem: -6500 – 8000 mN

Rychlost ohřevu: 0,1 – 100 °C/min

Kruhový průřez jehly: 1 mm²

Rozsah teplot: 70 °C – 1000 °C

Chlazení: kapalný dusík, vzduch

Vyhodnocovací program na PC

6.7 Fotoaparát Samsung WB 600

Kompaktní digitální fotoaparát Samsung WB600 má rozlišení 12 Mpx, ultraširokoúhlý objektiv s 15x optickým zoomem a 3" displejem.



Obr. 38 Fotoaparát Samsung WB600

Tab. 12 Parametry fotoaparátu Samsung WB600

Parametry	Samsung WB600
Rozlišení	12 Mpx
Optický zoom	15x
Stabilizace obrazu	Optická
Velikost snímače	1/2,3"
Min. ohnisková vzdálenost	24 mm
LCD obrazovka	3,0"
Max. ohnisková vzdálenost	360 mm
Druh paměti	SDHC
Min. citlivost ISO	80
Max. citlivost ISO	3200
Rozlišení videosekvence	1280 x 720
Video výstup	HDV
Napájení	Li-Ion

7 POUŽITÉ MATERIÁLY

7.1 Polyolefiny

Pod pojmem polyolefiny rozumíme homopolymery a kopolymery olefinů neboli alkenů, tj. uhlovodíků, které obsahují ve svých molekulách jednu dvojnou vazbu. K nejdůležitějším patří homopolymery a kopolymery etylenu (ethenu) a propylenu (propenu) a homopolymer 1-butenu. [6]

7.1.1 Polyetylen (PE)

Je to nejspíše a tudíž i nejlevněji dostupný polymer z ropy. Monomerní etylen patří k málo reaktivním monomerům, jeho radikálová polymerace byla zvládnuta v Anglii v době 2. světové války použitím extrémně vysokých tlaků (nad 150MPa), jeho katalytickou nízkotlakou polymeraci objevil Ziegler v roce 1952. [29]

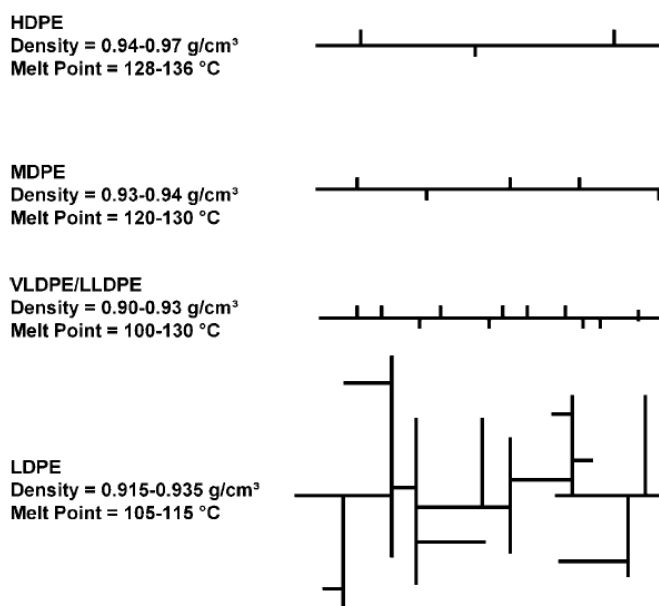
Vlastnosti polyethylenu jsou silně závislé na molekulové hmotnosti, prostorovém uspořádání merů v řetězci makromolekuly a stupni krystalinity.

7.1.1.1 Rozdělení polyethylenu

PE klasifikujeme do několika kategorií, které se liší hlavně z hlediska molekulové hmotnosti, stupně rozvětvení řetězců a měrné hmotnosti, což se odráží v jejich fyzikálně-mechanických vlastnostech. [30]

UHMWPE (Ultra High Molecular Weight PE) PE s ultra vysokou molekulovou hmotností.

Tento polymer má extrémně dlouhé polymerní řetězce s molekulovou hmotností obvykle mezi $(3,1 - 5,7) \cdot 10^6$. Vysoká molekulová hmotnost řetězců a jejich nízké rozvětvení umožňuje velmi dobré ukládání řetězců do krystalických struktur. Výsledkem je velmi pevný a houževnatý materiál s nejvyšší rázovou houževnatostí mezi termoplasty. UHMWPE výborně odolává korozivním chemikáliím s výjimkou oxidačních kyselin. Má extrémně nízkou navlhavost, velmi nízký koeficient tření, je samomazný a vysoko odolný vůči abrazi (až 10 násobek odolnosti oproti uhlíkové oceli). [30]



Obr. 39 Grafické znázornění PE [1]

HMWPE (High Molecular Weight PE) PE s vysokou molekulovou hmotností. [30]

HDPE (High Density PE) PE s vysokou měrnou hmotností (vysokohustotní PE).

HDPE je definovaný minimální měrnou hmotností 941kg/m³. HDPE je charakteristický velmi nízkým obsahem rozvětvení polymerních řetězců, což je dosahováno použitím speciálních (např. Ziegler-Natta) katalyzátorů. Polymerace probíhá dostatečně rychle už při teplotě 100°C a měrném tlaku. Proto se produkt označuje taky jako nízkotlaký PE. Nízký obsah rozvětvení polymerních řetězců umožňuje intenzivní působení intermolekulových sil podél řetězců, což má za následek lepší fyzikálně-mechanické vlastnosti např. v porovnání s LDPE. Vzniká však příliš tvrdý a těžko zpracovatelný polymer, ze kterého se dá vyrobit vlákno, které je 10 krát pevnější než ocel. Lépe zpracovatelný HDPE se získá polymerací etylenu s přísadkou cca 4% 1-butenu, což způsobí, že polymerní řetězce obsahují víc krátkých bočních řetězců, čímž tvrdost výsledného produktu klesá a zlevňuje se zpracovatelnost. [30]

HDXLPE (High Density Cross-Linked PE)

Síťovaný PE s vysokou měrnou hmotností (vysokohustotní síťovaný PE) [30]

PEX (Cross-Linked PE) Sít'ovaný PE

PEX se ve většině případů připravuje z HDPE. V PEX jsou jednotlivé řetězce PE pospojovány do polymerní sítě vhodnými sít'ovacími systémy, čímž se mění původní termoplastický PE na elastomer. Požadovaný stupeň zesít'ování je mezi 65 – 89%. Sít'ováním se zlepšují fyzikálně-mechanické vlastnosti původního PE. PEX si zachovává mechanickou pevnost až do teploty 120 - 150°C přičemž tendence k toku pod napětím je redukována. PEX také lépe odolává organickým rozpouštědlům. Zlepšuje se také rázová houževnatost, pevnost v tahu a odolnost vůči křehkému lomu při nízkých teplotách. [30]

PEX se využívá hlavně na produkci potrubí pro různé účely, převážně však pro konstrukci rozvodů studené a teplé vody. Typické je použití při konstrukci podlahového vytápění obytných místností. V současné době začínají potrubí PEX konkurovat PVC a dokonce i měděným rozvodům vody. Náklady na konstrukci rozvodů jsou přinejmenším o 20% nižší v porovnání s původně používanými materiály (PVC), montáž je jednodušší. Očekávaná životnost potrubí PEX v těchto aplikacích se odhaduje na 50 – 200 roků. Zajímavá je aplikace PEX potrubí pro rozvod zemního plynu. PEX potrubí se také s úspěchem používá při rozvodech kapalin a kalu v oblasti ropného průmyslu, hlavně při těžbě ropy z mořského dna, kde PEX je výhodný vzhledem na svojí bezkonkurenční odolnost vůči mořské vodě a odolnost vůči otěru. [30]

MDPE (Medium Density PE) PE se střední měrnou hmotností (středně hustotní PE) [30]

LDPE (Low Density PE) PE s nízkou měrnou hmotností (nízkohustotní PE)

LDPE je nejstarším a nejdéle vyráběným druhem polyetyleny. Používá se především na výrobu fólií. Vyrábí se radikálovou polymerací při teplotě asi 200°C a vysokém tlaku 100 – 260MPa. Bývá označován jako vysokotlaký PE. Má relativně nižší měrnou hmotnost (pod 941kg/m³), neboť vnitřní struktura, boční řetězce, nedovoluje kompaktní uspořádání makromolekul. [30]

LLDPE (Linear Low Density PE)

Lineární PE s nízkou měrnou hmotností (lineární nízkohustotní PE)

Zvýší-li se přídavek 1-butenu v etylénu na 6 až 8%, polymerací vzniká LLDPE, který už má dostatek vedlejších řetězců na zabránění blízkého uspořádání molekul a omezení tvorby krystalů. LLDPE má stejnou hustotu a podobné vlastnosti jako LDPE. Má však o něco větší mechanickou pevnost a dá se vyrábět na stejném zařízení jako HDPE, teda levněji. Velké množství LLDPE se používá na produkci tzv. strečových fólií. [30]

VLDPE (Very Low Density PE) PE s velmi nízkou měrnou hmotností.

VLDPE je definovaný měrnou hmotností v rozmezí 880 - 915 kg/m³. Je to v podstatě lineární PE s vysokým počtem krátkých bočních řetězců. Obvykle je připravovaný kopolymerací etylenu s krátkými alfa-olefiny (např. 1-buten, 1-hexen a 1-okten) za přítomnosti metaloxidových katalyzátorů. [30]

VLDPE se používá hlavně při výrobě hadic a potrubí, obalů na balení mrazených potravin, sáčků na led, strečových fólií apod. VLDPE se také používá jako příměs do polymerních kompozic na zlepšení rázuvzdornosti polymerních směsí. [30]

7.1.1.2 Vlastnosti polyetylenů

Tab. 13 Vlastnosti polyetylenů [31], [32]

Fyzikální vlastnosti polyetylenů	LDPE*	HDPE**
Hustota [g/cm ³]	0,914	0,953
ITT [g/10 min.] 190°C/2,16kg	22	25
ITT [g/10 min.] 190°C/5,0kg		62
Smrštění [%]		2,1
Zatékavost [cm]		109
250°C, čas vstříkání 2 sekundy		
Napětí na mezi kluzu [Mpa]		25
Napětí na mezi pevnosti [Mpa]	9,3	27
Prodloužení [%]		200
Ohybový modul [Mpa]		870
Modul pružnosti v tahu [Mpa]	8,9	
Tahová houževnatost [kJ/m ²]		55
Tvrdość Shore D		65
Teplota měknutí Vicat [°C]	83,5	124

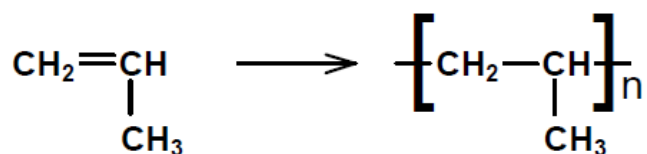
* LDPE, BRALÉN, VA 20-60, Slovnaft petrochemicals

** HDPE, 25055E, DOW

7.1.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen (PP), chemický název poly (1-metyletylen), je termoplastický polymer, využívaný v početných technických aplikacích, zahrnujících automobilový průmysl, výrobu obalů a kontejnerů, fólií, textilií, plastových konstrukčních součástí, laboratorního vybavení, polymerních bankovek a podobně. [30]

Vyrábí se adiční polymerací, výchozím monomerem je propylen. Výsledkem polymerační reakce je polymer s vysokou pevností, houževnatostí a odolností vůči působení nejrůznějších chemikálií – organických rozpouštědel, kyselin a zásad. [30]

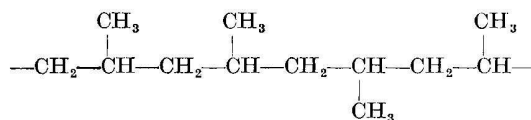


Obr. 40 Polymerace polypropylenu z propylenu [4]

7.1.2.1 Vnitřní struktura polypropylenových řetězců

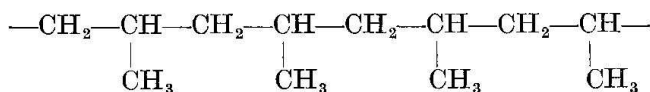
Důležitým pojmem pro pochopení vzájemných vztahů mezi strukturou PP a jeho vlastnostmi je tzv. fakticita, což je míra vzájemné orientace metylových skupin v řetězci PP. Vzájemná orientace sousedních metylových (-CH₃) skupin má zásadní vliv na schopnost polymeru tvořit uspořádané oblasti vykazující některé vlastnosti krystalů (tzv. krystalinity), protože každá (relativně objemná) metylová skupina omezuje ohybnost polymerního řetězce a tím i možnost pravidelného uspořádání úseku řetězce. Z hlediska orientace metylových skupin vzhledem na hlavní řetězec rozeznáváme PP ataktický, izotaktický a syndiotaktický.

V ataktickém PP (obr.41) jsou metylové skupiny vzhledem na hlavní řetězec orientovány statisticky, polymer je amorfní, s velmi omezenými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi.

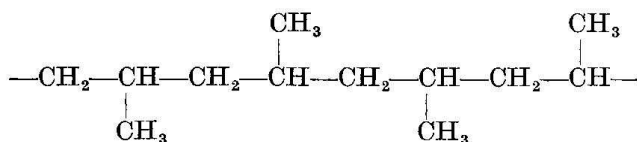


Obr. 41 Řetězec ataktického polypropylenu

Zavedením speciálních katalyzátorů (Ziegler-Natta, Kaminsky) bylo umožněno, že jednotlivé molekuly monomeru se vážou do polymerního řetězce tak, že metylová skupina je specificky orientovaná – v případě izotaktického PP (obr.42) na jedné straně polymerního řetězce, u syndiotaktického PP (obr.43) střídavě na obou stranách řetězce. [30]



Obr. 42 Řetězec izotaktického polypropylenu



Obr. 43 Řetězec syndiotaktického polypropylenu

Nejvíce dostupný PP je syntetizovaný za pomoci katalyzátoru na bázi chloridu titanu, který poskytuje izotaktický PP. Umístění metylových skupin na jedné straně řetězce způsobuje, že řetězce se v prostoru spirálovitě stáčíjí, tyto spirály se uspořádávají těsně vedle sebe vytvářející v konečném důsledku krystaly, které dodávají komerčním PP jejich výborné fyzikálně-chemické a fyzikálně-mechanické vlastnosti. [30]

Použitím speciálních metaloxidových katalyzátorů při polymerační reakci propylenu je možné získat polymer, kde se ve stejném řetězci střídají bloky amorfního a izotaktického polypropylenu. Ataktické bloky řetězce jsou amorfní a vykazují vlastnosti elastomeru. Izotaktické bloky vytvářejí mikrokystalické oblasti, které slouží jako uzlové body polymerní sítě. Tím je umožněno charakteristické chování takového polymeru, který se pod bodem tavení krystalů chová jako vulkanizovaný kaučuk. Na rozdíl od klasického vulkanizátu se tento polymer dá (opakovaně) zpracovávat nad teplotou tavení krystalů technologiemi vhodnými pro zpracování termoplastů a je na rozdíl od klasického vulkanizátu recyklovatelný. [30]

7.1.2.2 Vlastnosti polypropylenu

Tab. 14 Vlastnosti polypropylenu [33]

Fyzikální vlastnosti polypropylenu	Jednotka	Norma	Hodnota*
Hustota	[g/cm ³]	ISO 1183	(0,9)
Nasákavost (24h)	[%]	ISO 62	(0,03)
Nasákavost (nasycený)	[%]	ISO 62	(0,033)
Izod - vrubová houževnatost +23/-30°C	[kJ/m ²]	ISO 180/A	7,7 (7,5)
Charpy - vrubová houževnatost +23/-30°C	[kJ/m ²]	ISO 179-1/1eA	8,3 (8,4)
Charpy - rázová houževnatost +23/-30°C	[kJ/m ²]	ISO 179-1/1eU	(120)
Pevnost v tahu (50mm/min)	[MPa]	ISO 527-1/-2	26
Modul pružnosti v tahu (1mm/min)	[MPa]	ISO 527-1/-2	1100 (1100)
Tažnost	[%]	ISO 527-1/-2	127 (>200)
Pevnost v ohybu	[MPa]	ISO 178	25 (24)
Modul v ohybu +23°C	[MPa]	ISO 178	965 (1000)

* PP, V-PTS-CREALEN-EP-2300L1*M800, PTS

7.2 Polyestery

Polyestery tvoří velkou skupinu polymerů, jejichž společným znakem je přítomnost esterových vazeb v hlavním makromolekulárním řetězci, tj. polymerů obecného vzorce $[-R^1-CO-O-R^2-]_n$. Lze je klasifikovat na dva základní typy: polyestery termoplastické, lineární (odvozené od kyseliny tereftalové a uhličitě) a polyestery reaktoplastické, rozvětvené a v konečném stádiu zpracování sesíťované. [6]

7.2.1 Polybutylentereftalat

Semikrystalický polymer, který je řazen mezi tzv. inženýrské plasty pro náročné aplikace. Za své dobré užitné vlastnosti vděčí své krystalické povaze s poměrně vysokou teplotou tání $T_m = 225^\circ\text{C}$, při poměrně vysoké teplotě skelného přechodu $T_g = 40^\circ\text{C}$ v porovnání s ostatními semikrystalickými polymery. Vysoká rychlost krystalizace => což přispívá k reprodukovatelné hodnotě smrštění ve formě a k snadné zpracovatelnosti na rozměrově přesné výrobky. [34]

PBT má vysokou mechanickou pevnost a tuhost ($E = 2000-2700$ MPa, $\sigma_y = 50-58$ MPa), houževnatost, výborné elektroizolační vlastnosti, výbornou chemickou odolnost, vysoký lesk povrchu výrobků. Mechanické vlastnosti strmě závis na polymeračním stupni.

Pro další modifikaci fyzikálních vlastností se využívá vyztužení vláknitým plnivem (skelná vlákna, nebo také minerální plniva), radiační síťování ionizačním zářením. [34]

PBT se využívá pro mechanicky i elektricky namáhané díly přístrojů spotřební elektroniky, elektrických strojů pro domácnost a elektrické vybavy automobilů. Pro dílce palivového systému automobilů (vzhledem k dobré chemické odolnosti proti ropným derivátům), galanterní zboží (zipy), kapesní walkmany, kalkulačky, apod. [34]

7.2.1.1 Vlastnosti polybutylentereftalátu

Tab. 15 Vlastnosti polybutylentereftalátu [33]

Fyzikální vlastnosti polybutylentereftalátu	Jednotka	Norma	Hodnota*	Hodnota**
Hustota	[g/cm ³]	ISO 1183	1,26	1,51
Smrštění	[%]	ISO 294-4	1,9/1,9	0,3/1,4
Nasákavost (24h)	[%]	ISO 62		0,12
Nasákavost (nasycený)	[%]	ISO 62		0,52
Izod - vrubová houževnatost +23/-30°C	[kJ/m ²]	ISO 180/A	9,0	15
Charpy - vrubová houževnatost +23/-30°C	[kJ/m ²]	ISO 179-1/1eA	10	24
Charpy - rázová houževnatost +23/-30°C	[kJ/m ²]	ISO 179-1/1eU	123	80
Pevnost v tahu (50mm/min)	[MPa]	ISO 527-1/-2		102
Modul pružnosti v tahu (1mm/min)	[MPa]	ISO 527-1/-2	1300	7500
Tažnost	[%]	ISO 527-1/-2	124	3,1
Pevnost v ohybu	[MPa]	ISO 178	45	131
Modul v ohybu +23°C	[MPa]	ISO 178	1500	5800
Teplota měknutí Vicat 50°C/h 9,8N	[°C]	ISO 306	210	217
Teplota měknutí Vicat 50°C/h 49N	[°C]	ISO 306	124	183
HDT (teplota průhybu při zatížení) 0,45MPa	[°C]	ISO 75-1/-2	102	215
HDT (teplota průhybu při zatížení) 1,81MPa	[°C]	ISO 75-1/-2	52	195

* PBT, V-PTS-CREATEC-B3HZC*M800/25 natur, PTS

** PBT 35% GF, V-PTS-CREATEC-B3HG7ZC*M800/25 natur, PTS

7.3 Termoplastické elastomery

Elastomer je makromolekulární látka, která se po podstatné deformaci malým napětím a uvolnění tohoto napětí při pokojové teplotě rychle vrací přibližně k původním rozměrům a tvaru.

Přez (vulkanizovaný elastomer) je charakterizována chemickými, tzv. „příčnými“ vazbami mezi polymerními řetězci, které tvoří uzly prostorové sítě.

Termoplast je za běžných podmínek většinou tvrdá, často i křehká makromolekulární látka. Při zvýšené teplotě se stává plastickou, tvarovatelnou. Změna z plastického do tuhého stavu je vratná.

Termoplastický elastomer (TPE) je polymerní materiál, který při pokojové teplotě má vlastnosti elastomeru, resp. pryže, ale dá se zpracovávat jako termoplast. Ve srovnání s pryží pak odpadá vulkanizace při zachování analogických užitečných vlastností. V podstatě jde o polymerní materiál, který obsahuje tvrdé a měkké domény, charakterizované různými teplotami zesklennění T_g nebo tání T_m .

7.3.1 Struktura termoplastických elastomerů

Hlavní rozdíl mezi TPE a pryžemi je dán rozdílem ve vlastnostech uzlů sítě, které jsou u TPE nikoli chemické, ale fyzikální povahy. Z hlediska zpracování jsou vlastnosti TPE výhodné, protože přechod ze zpracovatelské taveniny k pevnému, elastickému tělesu je rychlý, vratný a nastává pouhým ochlazením taveniny. Při výrobě pryží musí kaučukové směsi k dosažení potřebných užitečných vlastností projít složitým vulkanizačním procesem.

Uzly sítě TPE tvoří obvykle určité množství nemísitelných termoplastických domén, dispergovaných v kontinuální elastomerní fázi. Zatím co u konvenčních směsí polymerů působí na rozhraní fází poměrně malé síly, u TPE se vytvářejí fyzikální vazby, jejichž energie je srovnatelná s energií kovalentních vazeb. Domény v TPE jsou samozřejmě daleko větší než chemické vazby tvořící uzly sítě v klasických pryžích. Domény tvrdé fáze proto působí v TPE i jako plnivo a mohou mít příznivý ztužující vliv na mechanické vlastnosti, zejména při větších deformacích. Domény tvořící uzly jsou při pokojové teplotě tuhé a spojují elastomerní řetězce do trojrozměrné sítě. Při zahřátí tvrdé bloky měknou a TPE je schopen toku. Vícefázová doménová struktura TPE někdy přetrvává i za zvýšených teplot v taveninách a komplikuje jejich reologické chování.

Vlastnosti TPE závisí jak na vlastnostech elastomeru, tak i na poměru mezi obsahem tvrdé a měkké fáze. Zpracovatelnost TPE ovlivňuje také molární hmotnost a stupeň mísitelnosti mezi měkkou a tvrdou fází. Odolnost proti olejům a rozpouštědlům je obvykle lepší, je-li tvrdá fáze krystalická, nebo lze-li do TPE přimíchat polymer schopný krystalizace. Rychlost stárnutí závisí u TPE na termooxidační a světelné odolnosti obou jeho základních složek.

Protože měkké i tvrdé domény TPE mohou být vytvořeny polymery různého složení, struktury, vlastností a různého stupně vzájemné mísitelnosti, existuje mnoho materiálů, které lze na základě jejich vlastností mezi TPE zařadit. Je však zřejmé, že žádná ostrá hranice TPE z ostatních polymerních systémů nevyděljuje. Proto jejich klasifikace není jednoduchá.

7.3.2 Aplikace termoplastického elastomeru

Díky své vysoké houževnatosti byly některé typy TPE použity k náhradě termoplastů. Avšak první oblast, ve které se TPE staly komerčně důležité, je náhrada vulkanizovaných kaučuků. V této aplikaci jsou i značné ekonomické výhody, jako vyloučení přípravy směsí kaučuků s dalšími (vulkanizačními) přísadami, také vyhnutí se drahému procesu vulkanizace, která je poměrně pomalá, ireverzibilní a probíhá prakticky vždy za vyšších teplot. Naproti tomu, přeměna TPE z kapaliny ke kaučukovitému výrobku je rychlá, reverzibilní a probíhá za chlazení. Tato schopnost TPE dává výrobě možnost produkovat výrobky podobné pryži užitím rychlých postupů výroby vyvinutých pro plastikářský průmysl, např. vstřikování apod. Odpad může být většinou recyklován. Bohužel měkké TPE mají malou odolnost k rozpouštědlům a olejům, proto mohou být použity jen v oblastech, kde nejsou tyto vlastnosti tak důležité (např. obuvnictví nebo izolace vodičů) a dále jako adheziva a polymerní modifikátory. Tvrdší produkty, založené např. na polyuretanech, polyesterech a polyamidech, mají větší odolnost k olejům a rozpouštědlům. Proto jsou používány i v takových aplikacích, jako jsou brzdové hadice nebo těsnění a další součásti hnacích a řídicích systémů automobilů či lokomotiv.

7.3.3 Výhody a nevýhody termoplastických elastomerů

Na rozdíl od kaučukových směsí, ve kterých se vzhledem k možnosti navulkanizování sleduje maximální teplota během zpracování, u TPE musí technologický postup zajistit určitou minimální teplotu taveniny, aby v budoucím výrobku nevznikaly studené spoje. TPE jsou proto citlivější na rozdíly teplot během zpracování.

Další rozdíl mezi TPE a kaučukovými materiály je v tom, že kaučukové směsi mohou prostupovat i otvory menšími než 0,03mm a vyžadují proto vysoce těsné formy, kdežto formy pro zpracování TPE takovou těsnost nevyžadují. Při zpracování TPE není také nutno věnovat přílišnou péči přetokům a jinému technologickému odpadu, protože jej lze drtit a znovu použít. Mimo jednodušší zpracování a možnost recyklace odpadu se jako

hlavní výhody TPE ve srovnání s klasickou pryží uvádějí nižší cena hotového výrobku, širší možnost volby barvy materiálu podle požadavků aplikace a rovnoměrnější kvalita výrobků.

TPE mají samozřejmě i své problémy a nedostatky. Největším problémem již před začátkem zpracování je obsah vlhkosti. Voda může při zpracování TPE vyvolat defekty na povrchu nebo uvnitř materiálů již v množstvích pouhých 0,2 až 0,3 %, které v kaučukových směsích nevadí. Pokud se TPE nezpracuje bezprostředně po otevření originálního obalu, zajištěného výrobcem proti vlhkosti, je nutno materiál obvykle sušit 2 až 4 hodiny.

Hlavní námitky proti TPE v některých aplikacích se týkají především horších vlastností za zvýšených teplot a větší trvalé deformace ve srovnání s pryží. Vyskytují se také názory, že přes veškerý pokrok ve vlastnostech, jako je zotavení a olejovzdornost, ani nejnovější TPE dosud nedosáhly skutečné ekvivalence s vhodně vybranou pryží, o což však rozumný polymerní chemik či technolog rozhodně usilovat nebude.

7.3.4 Polyesterový termoplastický elastomer TPE-E

TPE-E se vyznačuje dobrou teplotní stabilitou a žáruvzdorností. Způsob zpracování je dobrý, ale záleží na složení TPE-E. Může se skládat z ester – ester nebo eter – ester domén. Kvůli nízkému ztrátovému činiteli $\tan \delta$ je vhodný zvláště pro dynamicky namáhané součásti. Pro aplikace vyžadující ještě vyšší požadavky (např. stabilitu za vyšších teplot, zlepšenou chemickou odolnost a odolnost vůči hydrolyze) využíváme radiačního sítěvání pro zlepšení těchto vlastností.



Obr. 44 Aplikace TPE-E v praxi [12]

7.3.4.1 Vlastnosti polyesterového termoplastického elastomeru

Tab. 16 Vlastnosti polyesterového termoplastického elastomeru [33]

Fyzikální vlastnosti TPE-E	Jednotka	Norma	Hodnota*
Tvrдост	Shore A	ISO 868	87
Hustota	[g/cm ³]	ISO 1183	1,1
Napětí v tahu	[MPa]	ISO 527-1/-2	17,8/19,5
Modul 10%	[MPa]	ISO 527-1/-2	2,7/2,7
Modul 50%	[MPa]	ISO 527-1/-2	5,6/5,5
Modul 100%	[MPa]	ISO 527-1/-2	6,8/6,6
Modul 300%	[MPa]	ISO 527-1/-2	10,6/9,9
Prodloužení při přetržení	[%]	ISO 527-1/-2	472/515
Síla při přetržení	[kN/m]	ISO 34-1 B	24/25
Odrázová pružnost	[%]	DIN 53 512	68
Smrštění	[%]	PTS	1,1/1,2
Stlačení 70h, 23°C	[%]	ISO 815	16
Stlačení 24h, 70°C	[%]	ISO 815	34
Stlačení 24h, 100°C	[%]	ISO 815	60
Následné smrštění 24h, 70°C	[%]	PTS	0,1/0,1
Následné smrštění 24h, 100°C	[%]	PTS	0,2/0,2
Následné smrštění 24h, 120°C	[%]	PTS	0,2/0,3

* TPE-E 27ShD, V-PTS-UNIFLEX-E25D/M*M800/20 natur, PTS

7.4 Polyamidy

Polyamidy jsou semikrystalické termoplasty s krystalickým podílem 20 až 40 %. Polyamidy jsou makromolekulární látky obsahující v řetězci amidové skupiny –CONH–. Polyamidy patří mezi tzv. konstrukční plasty, používané k výrobě namáhaných technických součástí. Vynikají vysokou mechanickou pevností při statickém a dynamickém namáhání, nízkým tečením i při dlouhodobém zatížení a použitelností v širokém rozsahu teplot. Dnes je využívána řada základních druhů polyamidů, které se liší sice svým chemickým složením a způsobem výroby, ale podobají se základními vlastnostmi. [13]

7.4.1 Rozdělení polyamidů

Podle výrobního způsobu je možno polyamidy dělit do těchto skupin:

- polyamidy na bázi ω -aminokyselin a jejich laktanů
- polyamidy na bázi dikarboxylových kyselin a diaminů
- polyamidy vícesložkové (např. diamin a karboxylová kyselina + ω -aminokyselina)
- polyamidy obsahující v řetězci aromatické jádro

Mezi technicky nejdůležitější a nejvíce užívané patří polyamidy první a druhé skupiny. [13]

7.4.1.1 Polyamidy na bázi ω -aminokyselin a jejich laktanů

Tento typ polyamidů bývá označován značkou PA s číslem vyjadřujícím počet atomů uhlíku použitého laktanu, resp. Příslušné ω -aminokyseliny nebo diaminu. Největší význam pro plastikářské zpracování mají polyamidy 6,11 a 12. [13]

Polymerace 6-kaprolaktamu (PA 6)

Výroba 6-polykaprolaktamu se provádí podle staršího způsobu tlakovou diskontinuální polymerací, nověji tlakovým i beztlakovým kontinuálním způsobem. Při beztlakové kontinuální polymeraci se dávkuje roztavený kaprolaktam (nebo vhodný roztok kaprolaktamu) spolu s iniciátorem polymerace (vhodný roztok kyseliny 6-aminokapronové) do polymeračních trubkových reaktorů, které se vyhřívají topným médiem nebo vzduchem na teplotu 20 až 250 °C. Polymerace trvá 15 až 20 hodin. Během této doby tavenina postupně polymerujícího kaprolaktamu klesá ke dnu reaktoru a v zúžené části reaktoru je zubovým čerpadlem vytlačována v podobě pásky do chladicí lázně, kde se chladí a potom granulují. [13]

Z polyamidu 6 se vyrábějí hedvábná vlákna, stříž, kordy do pneumatik, kobercová vlákna, monofily aj. Vlákna mají značnou pevnost, odolnost proti otěru, dobře se barví, avšak mají sníženou odolnost vůči povětrnostnímu stárnutí. Polyamid 6 se používá jako konstrukční materiál pro výrobu ozubených kol a ložisek a dalších výrobků, kde se uplatní nízký koeficient tření. [11],[13]

7.4.1.2 Polyamidy na bázi dikarboxylových kyselin a diaminů

Sortiment tohoto typu polyamidů je velmi pestrý. Technický význam však mají především polymery s lineárním řetězcem. Jsou to hlavně klasický polyamid 6,6; polyamid 6,10 a polyamid 6,12. [13]

Polykondenzace hexamethylendiaminu a kyseliny adipové (PA 6,6)

Polyamidy tohoto typu se vyrábějí zahříváním vodného roztoku složek v autoklávu za teplot 260 až 280 °C. Výchozí surovinou je asi 60%ní vodný roztok tzv. AH-soli (podstatě je to ekvimolární směs hexamethylendiaminu a kyseliny adipové). Polykondenzace se provádí v dusíkové atmosféře za zvýšeného tlaku a teploty. Po dosažení tlaku 1,5 až 1,6 MPa se konečně fázi polykondenzace probíhající ve vakuu oddestilují zbytky vody. Po skončení polykondenzace se tavenina z autoklávu vytlačí přetlakem dusíku v podobě pásky, která se po ochlazení na granulacním zařízení seká na malé granule, pere, suší a zpracovává na vlákna nebo plastikářskými způsoby na různé výrobky. [13]

PA 66 slouží v širokém měřítku jako konstrukční termoplast i jako materiál pro výrobu vláken a fólií. PA 66 má ve srovnání s PA 6 výhodu ve vyšší teplotě tání, poněkud vyšší pevnosti a nižší navlhavosti. [11],[13]

7.4.2 Vlastnosti polyamidů

Tab. 17 Vlastnosti polyamidů [33]

Fyzikální vlastnosti polyamidů	Jednotka	Norma	PA11*	PA12**	PA9T***
Hustota	[g/cm ³]	ISO 1183	1 (1)		1,52
Smrštění	[%]	ISO 294-4			0,4/1,1
Nasákavost (24h)	[%]	ISO 62	0,17 (0,22)		0,1
Nasákavost (nasycený)	[%]	ISO 62	1,9 (2,51)		0,9
Izod - vrubová houževnatost +23/-30°C	[kJ/m ²]	ISO 180/A	11 (9,3)		11
Charpy - vrubová houževnatost +23/-30°C	[kJ/m ²]	ISO 179-1/1eA	9 (9,45)		11
Charpy - rázová houževnatost +23/-30°C	[kJ/m ²]	ISO 179-1/1eU	122 (122)		70
Pevnost v tahu (50mm/min)	[MPa]	ISO 527-1/-2	58 (58)		230
Modul pružnosti v tahu (1mm/min)	[MPa]	ISO 527-1/-2	1600 (1540)		15000
Tažnost	[%]	ISO 527-1/-2	142 (140)		2
Pevnost v ohybu	[MPa]	ISO 178	49 (32)		300
Modul v ohybu +23°C	[MPa]	ISO 178	1400 (1320)		11000
Teplota měknutí Vicat 50°C/h 9,8N	[°C]	ISO 306	126 (122)		276
Teplota měknutí Vicat 50°C/h 49N	[°C]	ISO 306	118 (115)		245
HDT (teplota průhybu při zatížení) 0,45MPa	[°C]	ISO 75-1/-2	102 (96)		
HDT (teplota průhybu při zatížení) 1,81MPa	[°C]	ISO 75-1/-2	80 (80)		260

* PA11, V-PTS-CREAMID-11T*M600/13 transparent, PTS

** PA12, V-PTS-CREAMID 12-AMN 0 TLD*M800/13 natur, PTS

*** PA9T 45%GF, V-DURAMID-9TH2G9*M800/13 natur, PTS

Tab. 18 Vlastnosti polyamidů [35]¹

Fyzikální vlastnosti polyamidů	Jednotka	Norma	PA6*	PA6,30G F**	PA6.6''	PA6.6,30 GF''''
Hustota	[g/cm ³]	ISO 1183	1,12	1,36	1,13	1,36
Charpy - vrubová houževnatost +23/-30°C	[kJ/m ²]	ISO 179-1/1eA	9/9	11/9	5,5/4,7	8/3
Charpy - rázová houževnatost +23/-30°C	[kJ/m ²]	ISO 179-1/1eU	bez lomu	bez lomu	42/37	bez lomu
Teplota měknutí Vicat 50°C/h 9,8N	[°C]	ISO 306	>300	>300	>300	>300
Teplota měknutí Vicat 50°C/h 49N	[°C]	ISO 306	>300	>300	>300	>300
HDT (teplota průhybu při zatížení) 0,45MPa	[°C]	ISO 75-1/-2	>300	>300	>300	300
HDT (teplota průhybu při zatížení) 1,81MPa	[°C]	ISO 75-1/-2	>300	>300	>300	300

¹ Vlastnosti jsou měřeny u zkušebních těles radiačně sítovaných dávkou 99kGy

* PA6, FRIANYL B63 VN schwarz, FRISETTA

** PA6 30%GF, FRIANYL B63 VN GV30 schwarz 905, FRISETTA

'' PA6.6, FRIANYL A63 VN schwarz, FRISETTA

'''' PA6.6 30%GF, FRIANYL A63 VN GV30 schwarz 9005, FRISETTA

8 POPIS PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍCH TĚLES

8.1 Vstřikování zkušebních těles

Zkušební tělesa byla stříkována na vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 420C. Vstřikovalo se do jednonásobné formy s dutinou ve tvaru lopatičky a tyčinky o rozměrech (80x10x4) mm. Pro zkoušku teplotní odolnosti bylo využito jen zkušebních těles ve tvaru tyčinky. Vystříknuto bylo 14 materiálů viz. tab 19.

Tab. 19 Přehled použitých materiálů

No.	Obchodní název	Typ	Výrobce
1	BRALĚN, VA 20-60	LDPE	Slovnaft petrochemicals
2	25055E	HDPE	DOW
3	V-PTS-CREALEN-EP-2300L1*M800	PP	PTS
4	V-PTS-CREALEN-EP8G5HS*M0083	PP 25% GF	PTS
5	V-PTS-CREATEC-B3HZC*M800/25 natur	PBT	PTS
6	V-PTS-CREATEC-B3HG7ZC*M800/25 natur	PBT 35% GF	PTS
7	V-PTS-UNIFLEX-E25D/M*M800/20 natur	TPE-E 27ShD	PTS
8	V-PTS-CREAMID-11T*M600/13 transparent	PA11	PTS
9	V-PTS-CREAMID 12-AMN 0 TLD*M800/13 natur	PA12	PTS
10	V-DURAMID-9TH2G9*M800/13 natur	PA9T 45% GF	PTS
11	FRIANYL B63 VN schwarz	PA6	FRISSETTA
12	FRIANYL B63 VN GV30 schwarz 905	PA6 30%GF	FRISSETTA
13	FRIANYL A63 VN schwarz	PA6.6	FRISSETTA
14	FRIANYL A63 VN GV30 schwarz 9005	PA6.6 30%GF	FRISSETTA



Obr. 45 Pohled do prostoru vstřikovacího stroje před a po vyhození vzorku

8.1.1 Hodnoty vstřikování

Tab. 20 Hodnoty vstřikování použitých materiálů

Parametr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Vstřikovací rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	60	60	60	60	60	60	100	60	60	100	45	100	40	100
Vstřikovací tlak [MPa]	80	80	50	80	80	80	60	130	80	90	65	100	90	80
Doba chlazení [s]	30	15	15	35	20	20	25	25	25	20	17	20	17	20
Teplota formy [$^{\circ}\text{C}$]	30	40	35	40	70	70	30	90	75	140	70	90	70	90
Celkový čas dotlaku [s]	25	25	25	10	25	25	20	25	25	25	10	25	12	25
Zdvih šneku [mm]	15	15	40	15	8	8	28	8	8	8	15	8	15	8
Teploty pásem plastikační jednotky														
Teplota pod násypkou [$^{\circ}\text{C}$]	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Teplotní pásmo 2 [$^{\circ}\text{C}$]	200	200	180	205	220	220	200	200	200	320	220	220	220	245
Teplotní pásmo 3 [$^{\circ}\text{C}$]	220	220	190	220	225	225	210	210	210	345	250	220	250	260
Teplotní pásmo 4 [$^{\circ}\text{C}$]	230	230	195	230	230	230	215	220	220	340	270	245	270	275
Teplotní pásmo 5 [$^{\circ}\text{C}$]	240	240	205	240	240	240	220	230	230	330	280	255	280	285
Teplota trysky [$^{\circ}\text{C}$]	245	245	210	250	250	250	230	240	235	325	310	265	310	290

8.2 Sítování zkušebních těles

Po vstřikování bylo nutné pečlivě roztrždit a popsat jednotlivé zkušební tělesa podle materiálu a jednotlivých dávek ozáření.



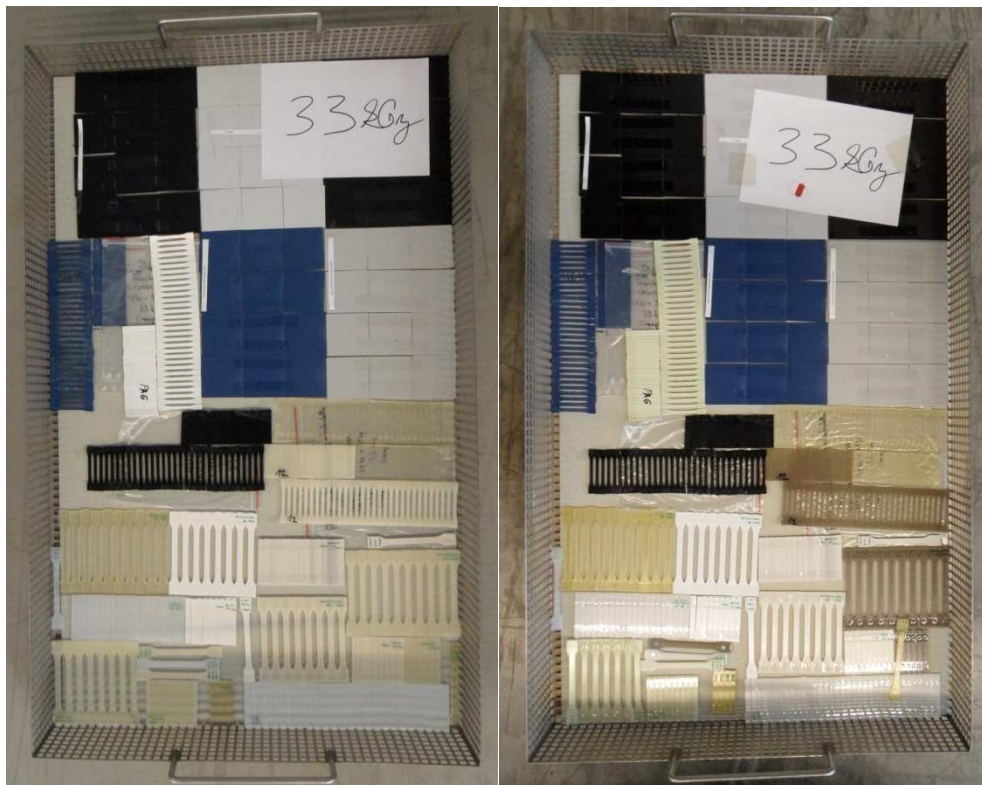
Obr. 46 Roztržené zkušební tělesa před radiačním sítováním

Radiační sítování zkušebních těles bylo provedeno německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg v lokalitě Saal am Donau, SRN.



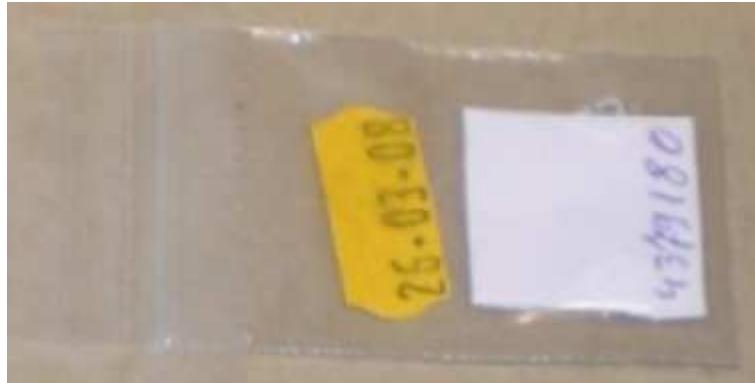
Obr. 47 Sídlo firmy BGS Beta-Gama-Service GmBH & Co, Kg lokalita Saal am Donau, SRN [12]

Zkušební tělesa byla ozařována elektronovým beta zářením o energii 10MeV, dávkami 33kGy, 66kGy, 99kGy, 132kGy, 165kGy a 198kGy. Pro dokonale rovnoměrné ozáření byla zkušební tělesa rozložena na kovových pleších, které procházely ozařovacím zařízením.



Obr. 48 Vyskládané zkušební tělesa před a po radiačním síťování

V každé dávce byl vložen dosimetr, pro určení přesné dávky ozáření. Před ozářením se na bílý papír nalepí fotochemická nálepka, která je před ozářením žlutá, po ozáření zčervená.



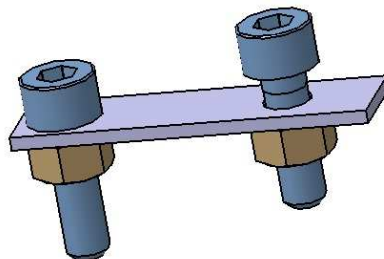
Obr. 49 Dozimetr před použitím

9 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO ZKOUŠKU TEPLOTNÍ ODOLNOSTI

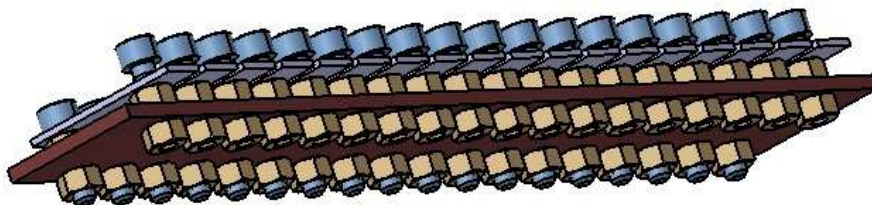
Pro zkoušku teplotní odolnosti byl navržen a vyroben přípravek pro uchycení zkušebních těles. Vycházelo se přitom z osvědčené konstrukce využitě již při řešení BP. Pro zkoušku bylo použito úpravy, aby přípravek umožňoval využití v obou zdrojích tepla. [36]

9.1 Postup návrhu a výroby zařízení pro teplotní odolnost

Hlavním požadavkem bylo, aby jednotlivá zkušební tělesa byla od sebe oddělitelná a manipulace s nimi co nejjednodušší. Z těchto důvodů bylo zvoleno řešení dle obr. 51.



Obr. 50 Držák zkušebních těles



Obr. 51 Držáky zkušebních těles osazených v nosné desce

Tato nosná deska s držáky zkušebních těles je přichycena pomocí permanentních magnetů k přípravku teplotní odolnosti do trouby.



Obr. 52 3D model přípravku do horkovzdušné trouby MORA 4807

Pro odčítání průhybů jednotlivých zkušebních těles je připevněno zezadu stínítko s 5 mm stupnicí.

9.2 Postup návrhu a výroby vestavby do pece

Z předchozích experimentů bylo vidět nerovnoměrné teplotní pole v peci MIWY calorK, které se měnilo se vzdáleností topných spirál. Proto jsem tyto topné spirály zakryl šamotovými cihlami tloušťky 20mm, aby se zabránilo sálavým účinkům topných spirál. S ohledem na zajištění dobrých podmínek při pořizování fotodokumentace byly šamotové cihly obaleny z jedné strany do aluminiové fólie.



Obr. 53 Vestavba pece MIWY CalorK

10 MĚŘENÍ TEPLOTNÍ ODOLNOSTI

Měření teplotní odolnosti probíhalo v horkovzdušné troubě MORA a v peci MIWY, kde zkušební tělesa byla vystavena teplotě po určitou dobu dle programu. Na základě výsledků termomechanické analýzy (TMA) byla zkušební tělesa zahřívána na definovanou teplotu a v určitých časových intervalech byla pořizována fotodokumentace. Z fotodokumentace lze vidět korelaci k výsledkům termomechanické analýzy. V této kapitole jsou porovnávány teplotní odolnosti u jednotlivých materiálů, které nebyly radiačně síťovány a materiály radiačně síťovanými v určitých stupních sesíťování.

10.1 Polyolefiny

Jsou to materiály s poměrně nízkou teplotou tání. Patří do skupiny standardních termoplastů, v praxi hojně využívány, protože jsou to velmi snadno získatelné materiály s velmi dobrou zpracovatelností a zajímavými vlastnostmi. Pro zlepšení mechanických vlastností se tyto materiály plní skelnými vlákny a jiným plnivem dle konečného použití.

Tab. 21 Teplota tání u polyolefinů

Materiál	Teplota tání T_m [°C]
Nízkohustotní polyetylen LDPE	105 - 110
Vysokohustotní polyetylen HDPE	130 - 135
Polypropylen PP	160 - 165

10.1.1 Postup měření

Zkušební tělesa pomocí šroubů a matic byla připevněna k nosné desce, která byla usazena pomocí permanentních magnetů k přípravku do horkovzdušné trouby MORA. Byla měřena teplota uprostřed a v blízkosti zkušebního tělesa. Teplotní pole v jednotlivých časových intervalech bude znázorněno v následujících tabulkách u jednotlivých materiálů. V každém časovém intervalu byla pořizována fotka, která dokumentuje aktuální stav zkušebních těles. Bylo provedeno měření s umístěním zkušebních těles horizontálně. V horizontální rovině byla zkušební tělesa zatížena ohybovým momentem od vlastní hmotnosti a ohybovým momentem od síly působící na konci tělesa (1,5 N.mm).

10.1.2 Nízkohustotní polyetylen (LDPE)

Materiál: BRALÉN, VA 20-60, Slovnaft petrochemicals

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4) mm

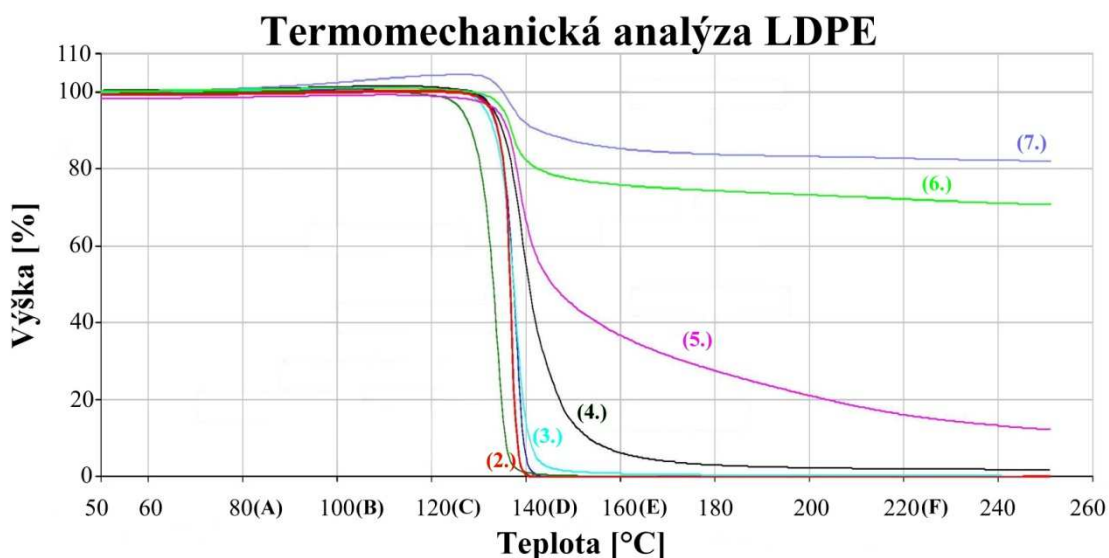
- 1. LDPE neozářený
- 2. LDPE ozářený dávkou 33kGy
- 3. LDPE ozářený dávkou 66kGy
- 4. LDPE ozářený dávkou 99kGy
- 5. LDPE ozářený dávkou 132kGy
- 6. LDPE ozářený dávkou 165kGy
- 7. LDPE ozářený dávkou 198kGy

Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.1.2.1 Termomechanická analýza LDPE

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 54 graficky znázorňuje chování LDPE při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahřívaného zkušebního tělesa dle programu.



Obr. 54 Grafické zobrazení termomechanické analýzy LDPE v různých dávkách ozáření

Neozářené zkušební těleso LDPE, který není znázorněno na obrázku, se roztaví při teplotě tání ($T_m = 105 - 110^\circ\text{C}$). Radiačně sít'ované zkušební tělesa č. 2. a č. 3. s nízkým stupněm sesít'ování ztrácejí teplotní stabilitu při teplotě okolo 140°C . Rovněž zkušební tělesa č. 4. a č. 5. se středním stupněm sesít'ování začínají ztrácet teplotní stabilitu při teplotě 140°C , ale dokážou odolávat vyšším teplotám, při čemž s rostoucí teplotou klesá teplotní stabilita prakticky k nule. Zkušební tělesa č. 6. a č. 7. s vysokým stupněm sesít'ování při teplotě 140°C ztratí 20% ze své teplotní stability, s rostoucí teplotou teplotní stabilita klesá minimálně.

10.1.2.2 Zkouška teplotní odolnosti LDPE

Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 22 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 22 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti LDPE s jednotlivými teplotami

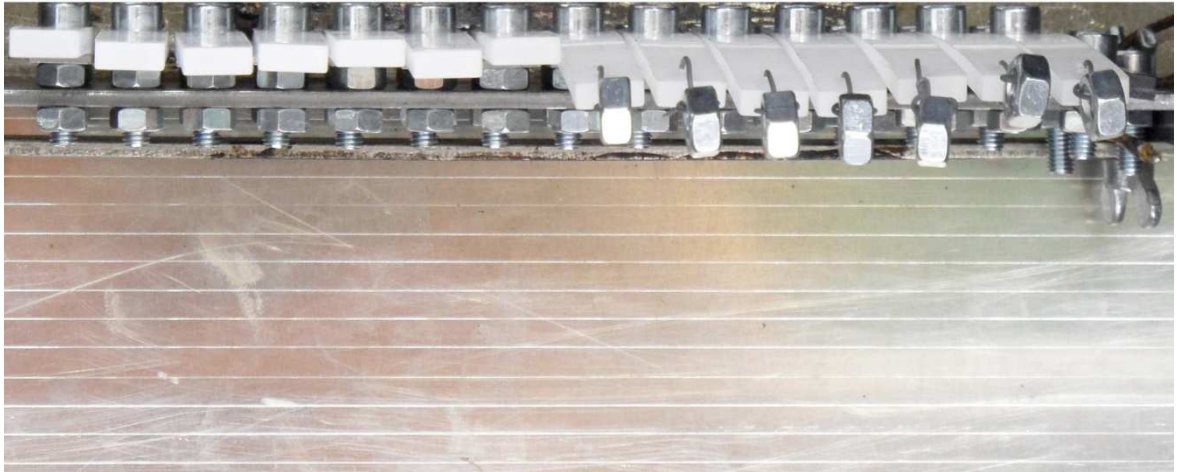
Čas [min.]	Teplota [$^\circ\text{C}$]*	Teplota [$^\circ\text{C}$ **]	Teplota [$^\circ\text{C}$ ***]	Čas [min.]	Teplota [$^\circ\text{C}$]*	Teplota [$^\circ\text{C}$ **]	Teplota [$^\circ\text{C}$ ***]
0	60	39	65	115	160	138	154
5	60	49	61	120	160	140	144
10	70	57	66	125	170	144	151
15	80	64	72	130	170	145	155
20	90	72	82	135	170	147	152
25	90	77	80	140	180	150	160
30	100	83	91	145	180	153	170
35	100	87	89	150	190	159	169
40	110	93	102	155	190	163	177
45	110	97	100	160	200	167	178
50	110	99	101	165	200	171	195
55	120	102	110	170	210	177	189
60	120	105	108	175	210	180	202
65	120	106	108	180	220	183	203
70	130	109	119	185	220	188	201
75	130	111	116	190	230	192	203
80	140	114	126	195	230	196	213
85	140	119	133	200	240	199	210
90	140	121	129	205	240	204	225
95	150	125	134	210	250	209	223
100	150	129	146	215	250	215	235
105	150	130	137	220	250	217	236
110	160	135	141				

* Nastavená teplota, ** Teplota uprostřed zkušebního tělesa, *** Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivé zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

LDPE (A) [t = 35 min, T = 80°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 55 Zobrazení zkušebních těles LDPE v různých dávkách ozáření v čase 35min. o teplotě 80°C

Obr. 55 zobrazuje stav zkušebních tělísek 30°C pod teplotou tání LDPE. Všechny zkušební tělesa jak zatížená tak nezatížená se prakticky nedeformují, nemění svůj tvar a svou barvu.

LDPE (B) [t = 65 min, T = 100°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 56 Zobrazení zkušebních těles LDPE v různých dávkách ozáření v čase 65min. o teplotě 100°C

Obr. 56 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C pod teplotou tání LDPE. Všechny zkušební tělesa jak zatížená tak nezatížená se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa nemění svou barvu a tělesa č. 3. až č. 7. nemění svůj tvar.

LDPE (C) [t = 90 min, T = 120°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)

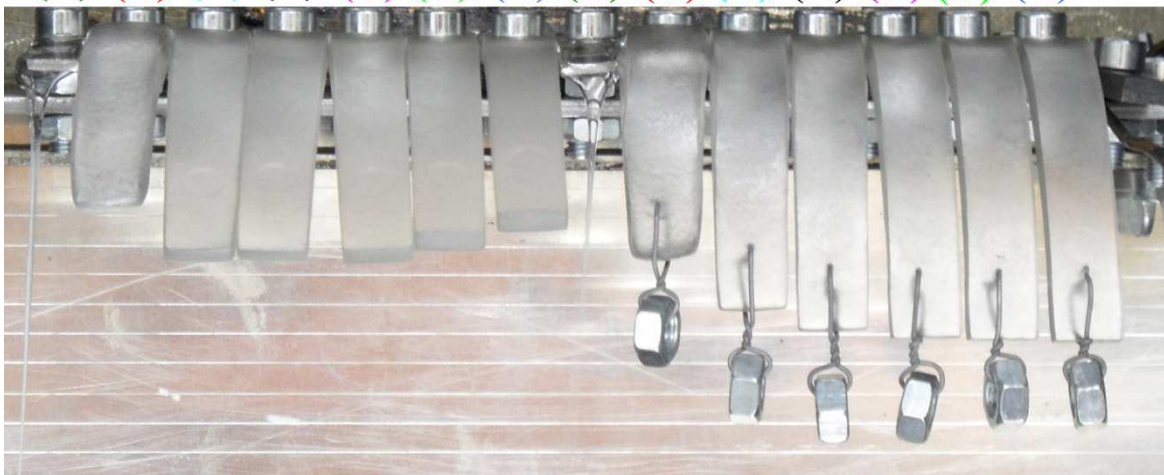


Obr. 57 Zobrazení zkušebních těles LDPE v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 120°C

Obr. 57 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C nad teplotou tání LDPE. Zkušební těleso č. 1. se rozteklo, zkušební těleso č. 2. se zdeformovalo tak že se smršknulo. Ostatní zkušební tělesa se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa nemění svou barvu a tělesa č. 3. až č. 7. nemění svůj tvar.

LDPE (D) [t = 120 min, T = 140°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)

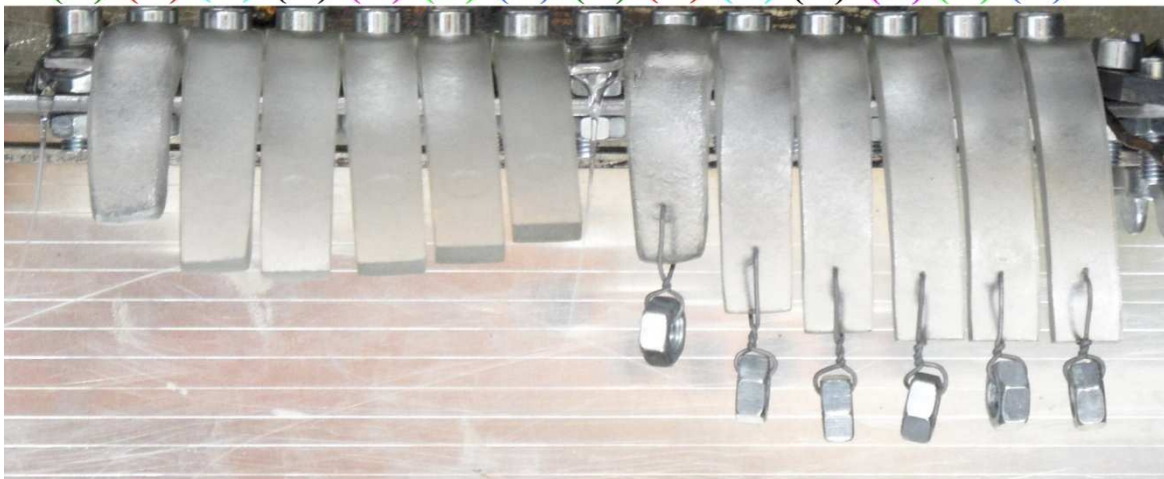


Obr. 58 Zobrazení zkušebních těles LDPE v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 140°C

Obr. 58 zobrazuje stav zkušebních těles 30°C nad teplotou tání LDPE. Stav zkušebních těles od předchozího zobrazení se nezměnil.

LDPE (E) [t = 155 min, T = 160°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)

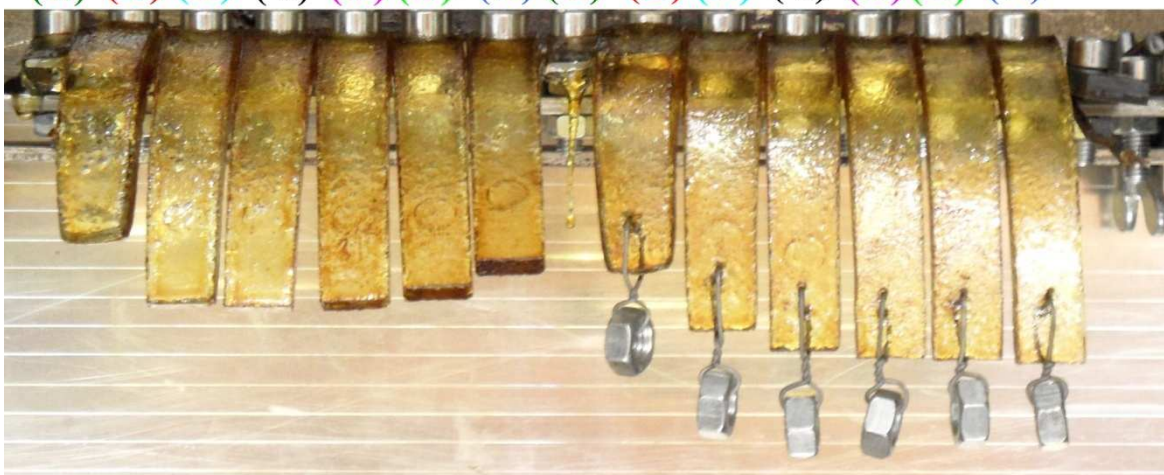


Obr. 59 Zobrazení zkušebních těles LDPE v různých dávkách ozáření v čase 155min. o teplotě 160°C

Obr. 59 zobrazuje stav zkušebních těles 50°C nad teplotou tání LDPE. Stav zkušebních těles od předchozího zobrazení se nezměnil.

LDPE (F) [t = 220 min, T = 220°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 60 Zobrazení zkušebních těles LDPE v různých dávkách ozáření v čase 220min. o teplotě 220°C

Obr. 60 zobrazuje stav zkušebních těles při teplotě 2x vyšší než je teplota tání LDPE. Zkušební tělesa zůstala deformovaná stejně, jako tomu bylo u obr. 56. Změna barvy do

žluto – hněda, zhoršení povrchu zkušebních těles. Tvar zkušebních těles zůstal nezměněn již od obr. 56.

10.1.2.3 Zhodnocení teplotní odolnosti LDPE

Neozářený LDPE je použitelný dlouhodobě do 70°C a krátkodobě do 100°C. Radiačním sít'ováním získává LDPE teplotní odolnost 2x větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesít'ování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezatíženými a zatíženými jsou nepatrné. S rostoucí teplotou se zkušební tělesa už nedeformují, pouze degradují a tím mění svou barvu a povrch. U středně a vysoce sesít'ovaných zkušebních těles zůstává tvar nezměněn až do své degradace.

10.1.3 Vysokohustotní polyetylen (HDPE)

Materiál: HDPE 25055E, DOW

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4)mm

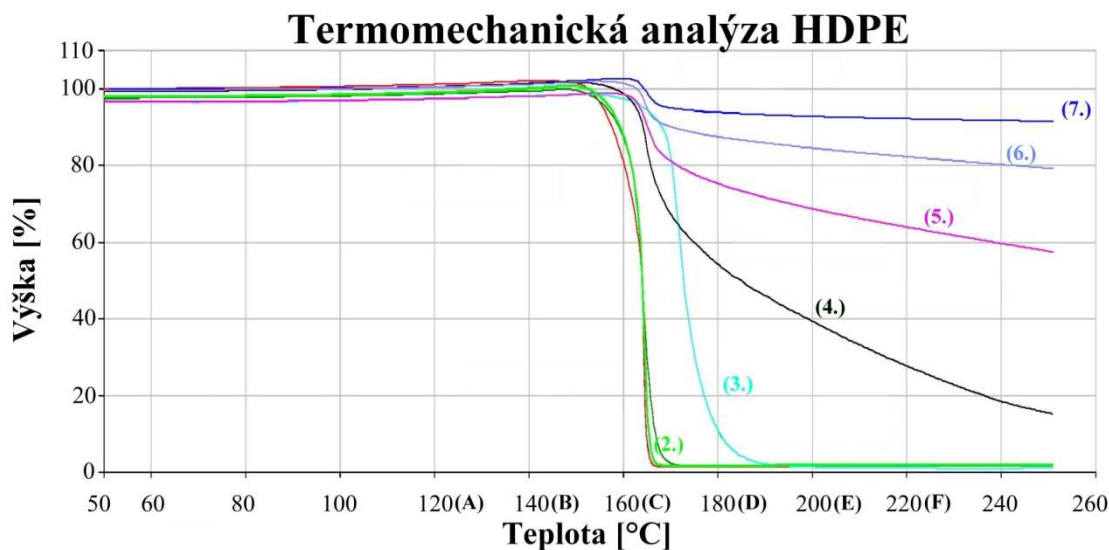
- 1. HDPE neozářený
- 2. HDPE ozářený dávkou 33kGy
- 3. HDPE ozářený dávkou 66kGy
- 4. HDPE ozářený dávkou 99kGy
- 5. HDPE ozářený dávkou 132kGy
- 6. HDPE ozářený dávkou 165kGy
- 7. HDPE ozářený dávkou 198kGy

Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.1.3.1 Termomechanická analýza HDPE

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 61 graficky znázorňuje chování HDPE při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahřívaneého zkušebního tělesa dle programu.



Obr. 61 Grafické zobrazení termomechanické analýzy HDPE v různých dávkách ozáření

Neozářené zkušební těleso HDPE, které není znázorněno na obrázku, se roztaví při teplotě tání ($T_m = 130 - 135^\circ\text{C}$). Radiačně sít'ované zkušební tělesa č. 2. a č. 3. s nízkým stupněm sesít'ování ztrácejí teplotní stabilitu při teplotě okolo 170°C . Zkušební těleso č. 4. se středním stupněm sesít'ování začíná ztrácet pevnost při teplotě 170°C , ale dokáže odolávat vyšším teplotám, při čemž s rostoucí teplotou klesá teplotní stabilita prakticky k nule. Zkušební těleso č. 5. se středním stupněm sesít'ování při teplotě 170°C ztratí 20% ze své teplotní stability, s rostoucí teplotou teplotní stabilita klesá postupně o 20%. Zkušební tělesa č. 6. a č. 7. s vysokým stupněm sesít'ování při teplotě 170°C ztratí 20% ze své teplotní stability, s rostoucí teplotou teplotní stabilita klesá minimálně.

10.1.3.2 Zkouška teplotní odolnosti HDPE

Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 23 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 23 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti HDPE s jednotlivými teplotami

Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Teplota [°C]***	Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Teplota [°C]***
0	60	36	48	115	160	136	149
5	60	53	59	120	160	138	144
10	70	61	67	125	170	140	144
15	80	66	72	130	170	144	155
20	90	73	79	135	170	145	151
25	90	77	79	140	180	150	158
30	100	83	89	145	180	153	169
35	100	89	92	150	190	157	169
40	110	93	100	155	190	160	177
45	110	98	101	160	200	165	178
50	110	101	102	165	200	169	188
55	120	104	108	170	210	176	198
60	120	106	107	175	210	179	193
65	120	108	108	180	220	182	194
70	130	113	119	185	220	186	203
75	130	115	115	190	230	189	203
80	140	119	124	195	230	193	210
85	140	121	134	200	240	197	209
90	140	125	128	205	240	201	219
95	150	127	133	210	250	207	225
100	150	129	142	215	250	213	229
105	150	131	137	220	250	218	232
110	160	134	143				

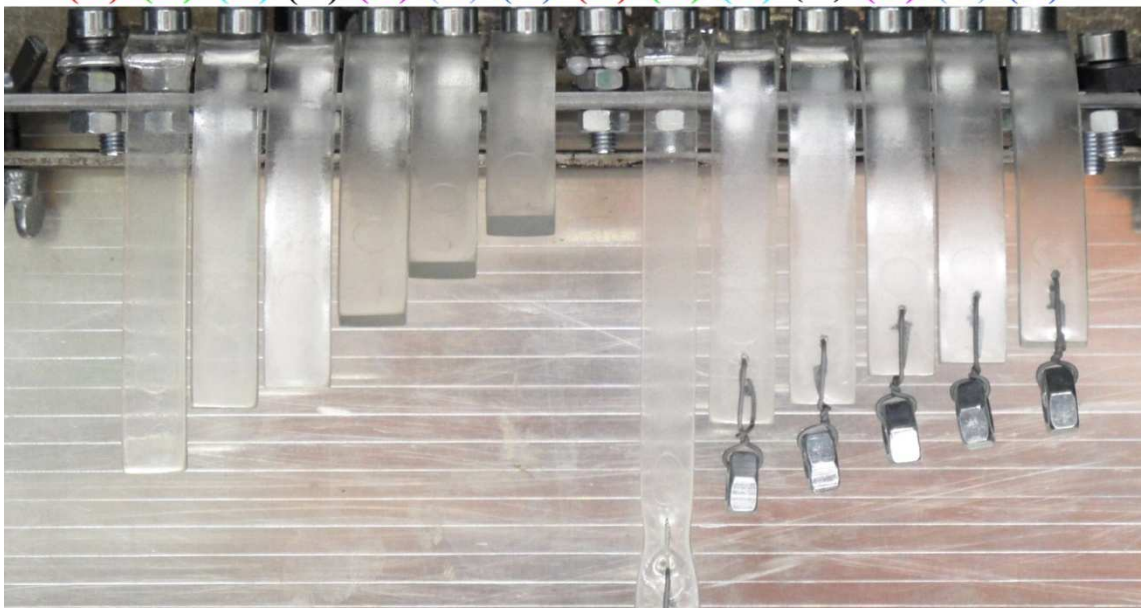
* Nastavená teplota, ** Teplota uprostřed zkušební tělesa, *** Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivé zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

HDPE (A) [t = 90 min, T = 120°C]**(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)**

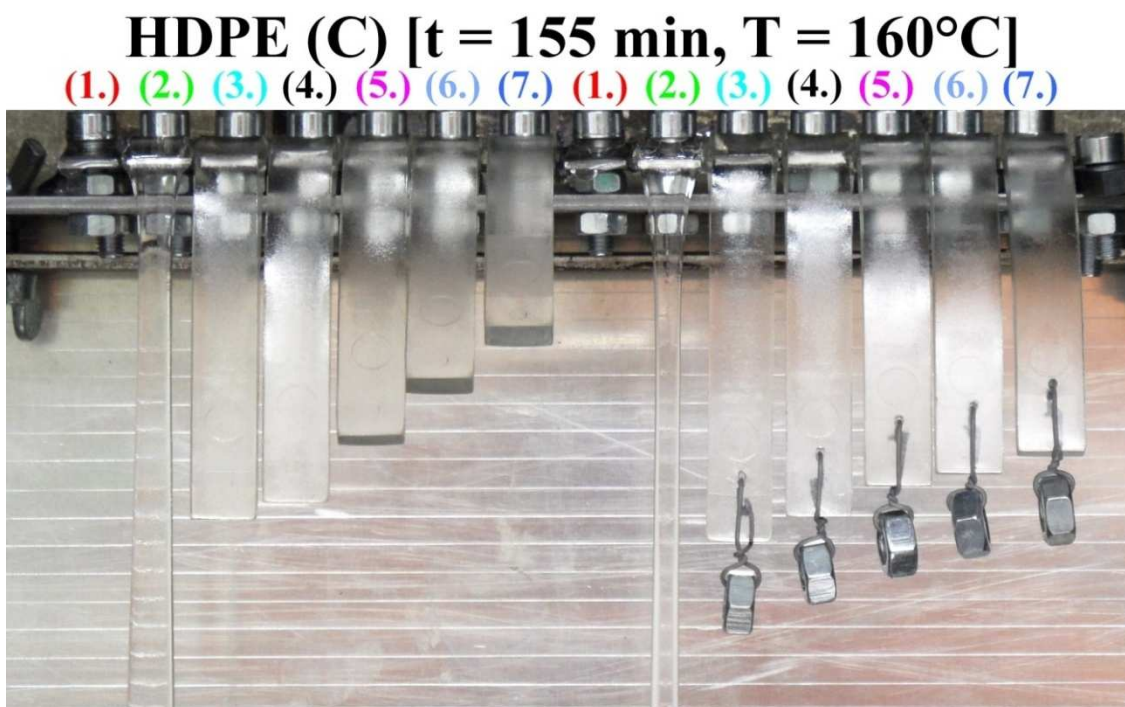
Obr. 62 Zobrazení zkušebních těles HDPE v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 120°C

Obr. 62 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C pod teplotou tání HDPE. Všechny zkušební tělesa jak zatížená tak nezatížená se prakticky nedeformují a nemění svou barvu ani tvar.

HDPE (B) [t = 120 min, T = 140°C]**(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)**

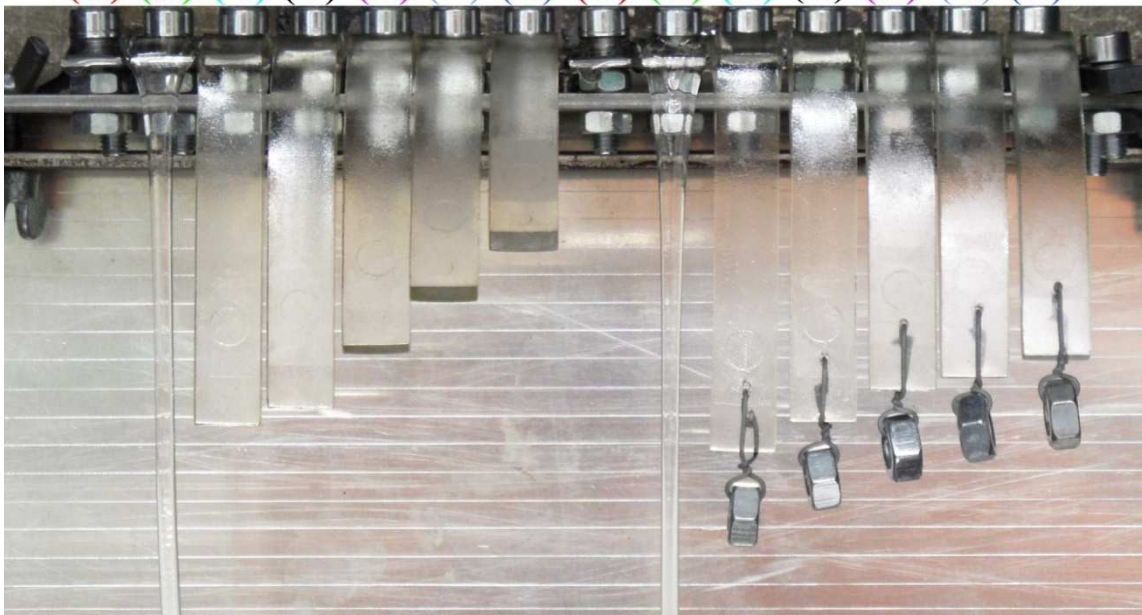
Obr. 63 Zobrazení zkušebních těles HDPE v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 140°C

Obr. 63 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C nad teplotou tání HDPE. Zkušební těleso č. 1. se rozteklo, č. 2. se zdeformovalo tak že se natáhlo dle zatížení. Ostatní zkušební tělesa se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa nemění svou barvu a tělesa č. 3. až č. 7. nemění svůj tvar.



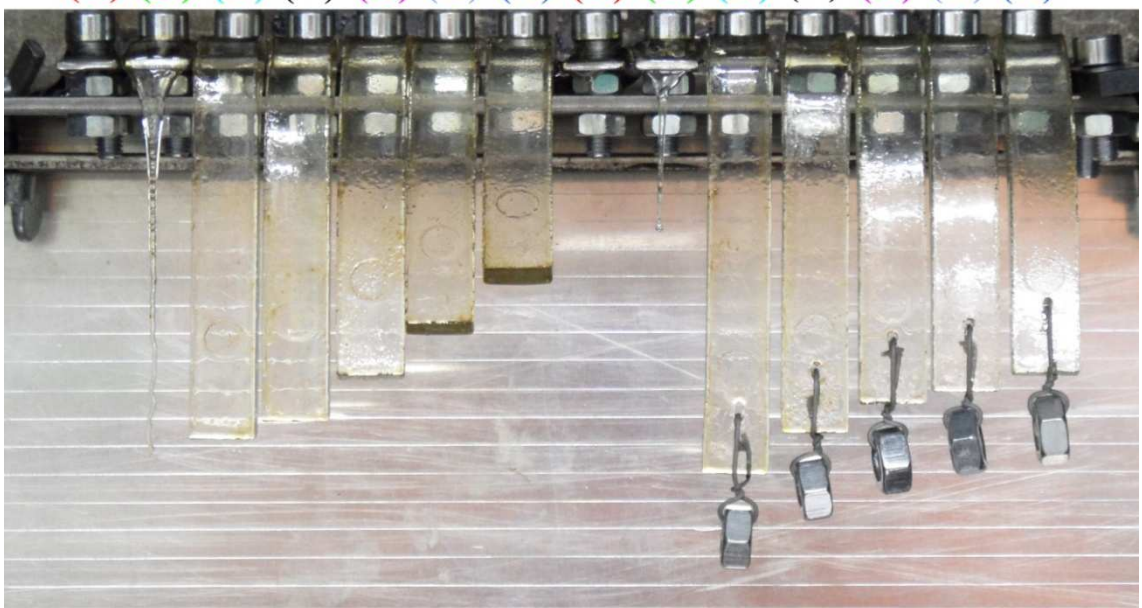
Obr. 64 Zobrazení zkušebních těles HDPE v různých dávkách ozáření v čase 155min. o teplotě 160°C

Obr. 64 zobrazuje stav zkušebních těles 30°C nad teplotou tání HDPE. Zkušební těleso č. 2. se rozteklo. Ostatní zkušební tělesa se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa nemění svou barvu a tělesa č. 3. až č. 7. nemění svůj tvar.

HDPE (D) [t = 175 min, T = 180°C]**(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)**

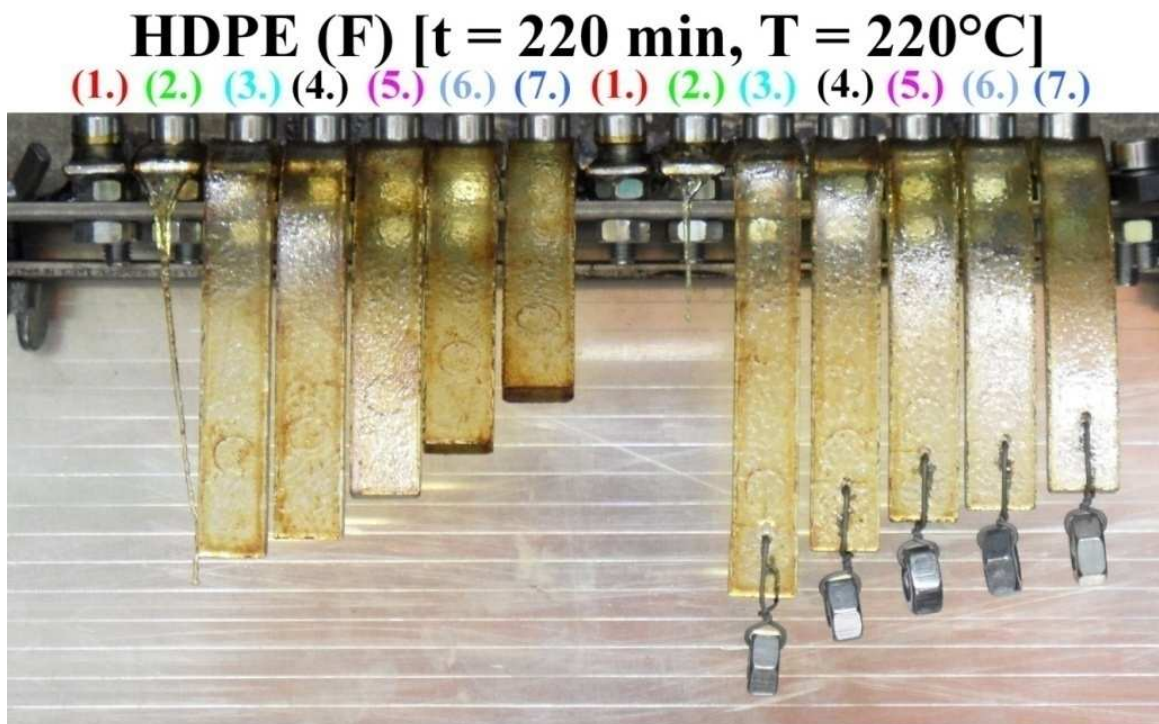
Obr. 65 Zobrazení zkušebních těles HDPE v různých dávkách ozáření v čase 175min. o teplotě 180°C

Obr. 65 zobrazuje stav zkušebních těles 50°C nad teplotou tání HDPE. Zkušební tělesa č. 3. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost a nemění svůj tvar ani barvu.

HDPE (E) [t = 205 min, T = 200°C]**(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)**

Obr. 66 Zobrazení zkušebních těles HDPE v různých dávkách ozáření v čase 205min. o teplotě 200°C

Obr. 66 zobrazuje stav zkušebních těles 70°C nad teplotou tání HDPE. Zkušební tělesa č. 3. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost a nemění svůj tvar. Zkušební tělesa začínají měnit svou barvu do žluto – hněda a zhoršuje se povrch.



Obr. 67 Zobrazení zkušebních tělesa HDPE v různých dávkách ozáření v čase 220min. o teplotě 220°C

Obr. 67 zobrazuje stav zkušebních těles 90°C nad teplotou tání HDPE. Zkušební tělesa č. 3. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost a nemění svůj tvar. Zkušební tělesa mění svou barvu do žluto – hněda a zhoršuje se povrch.

10.1.3.3 Zhodnocení teplotní odolnosti HDPE

Neozářený HDPE je použitelný dlouhodobě do 90°C a krátkodobě do 100°C. Radiačním síťováním získává HDPE teplotní odolnost 2x větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesíťování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezatíženými a zatíženými jsou nepatrné. S rostoucí teplotou se zkušební tělesa deformují minimálně, degradují a tím mění svou barvu a povrch. U středně a vysoce sesíťovaných zkušebních těles zůstává tvar nezměněn až do své degradace.

10.1.4 Polypropylen (PP)

Materiál: V-PTS-CREALEN-EP-2300L1*M800, PTS

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4)mm

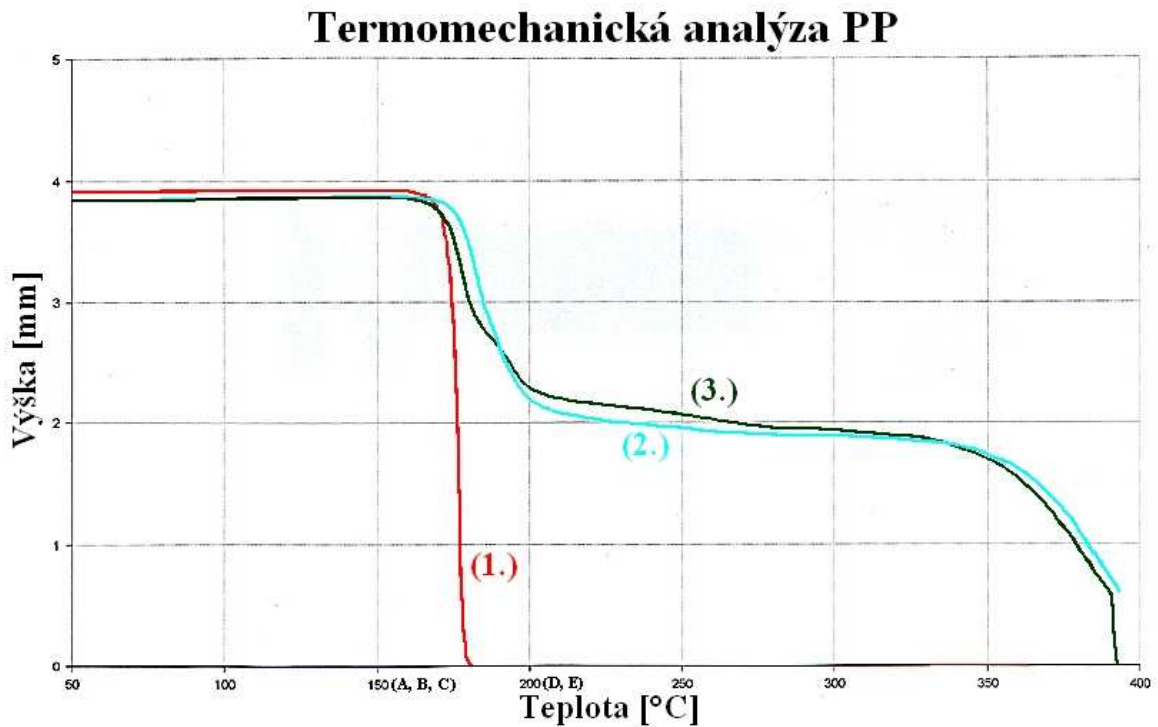
- 1. PP neozářený
- 2. PP ozářený dávkou 15kGy
- 3. PP ozářený dávkou 30kGy
- 4. PP ozářený dávkou 33kGy
- 5. PP ozářený dávkou 45kGy
- 6. PP ozářený dávkou 60kGy
- 7. PP ozářený dávkou 66kGy
- 8. PP ozářený dávkou 90kGy
- 9. PP ozářený dávkou 99kGy

Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.1.4.1 Termomechanická analýza PP

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 68 graficky znázorňuje chování PP při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahřívaného zkušební tělesa dle programu.



Obr. 68 Grafické zobrazení termomechanické analýzy PP v různých dávkách ozáření

Zkušební těleso č. 1. se při teplotě 170°C rozteče. Zkušební tělesa č. 2. a č. 3. začínají při teplotě 170°C ztrácet 50% ze své teplotní stability. Se zvyšující teplotou se teplotní stabilita nemění až do teploty 350°C, kdy teplotní stabilita začíná klesat k nule.

10.1.4.2 Zkouška teplotní odolnosti PP

Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 24 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 24 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PP s jednotlivými teplotami

Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Teplota [°C]***	Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Teplota [°C]***
0	60	25	40	100	180	157	159
5	60	41	56	105	190	161	171
10	70	51	61	110	190	164	174
15	80	61	69	115	190	167	179
20	90	70	78	120	200	170	180
25	90	75	78	125	200	170	180
30	100	82	88	130	200	172	177
35	110	90	96	135	210	174	196
40	120	97	105	140	210	178	188
45	130	106	113	145	210	182	197
50	140	113	122	150	220	188	196
55	150	121	131	155	220	191	208
60	150	127	136	160	230	196	204
65	160	133	144	165	230	198	215
70	160	137	142	170	240	202	221
75	170	143	148	175	240	206	212
80	170	146	159	180	250	211	224
85	170	149	150	185	250	217	231
90	180	154	166	190	250	219	236
95	180	156	166				

* Nastavená teplota, **Teplota uprostřed zkušební tělesa, ***Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivé zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

PP (A) [t = 85 min, T = 150°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)



Obr. 69 Zobrazení zkušebních těles PP v různých dávkách ozáření v čase 85min. o teplotě 150°C

Obr. 69 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C pod teplotou tání PP. Všechny zkušební tělesa jak zatížená tak nezatížená se prakticky nedeformují a nemění svou barvu ani tvar.

PP (B) [t = 100 min, T = 160°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)

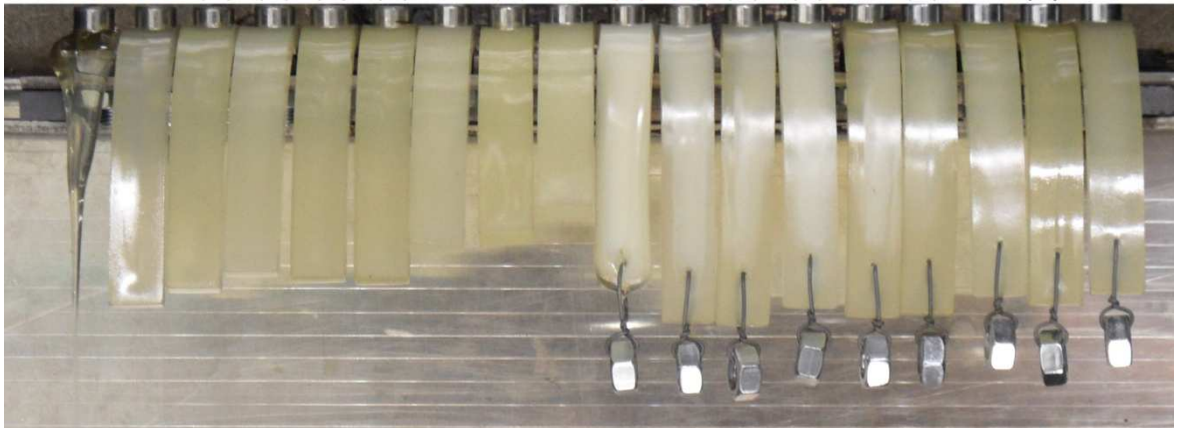


Obr. 70 Zobrazení zkušebních těles PP v různých dávkách ozáření v čase 100min. o teplotě 160°C

Obr. 70 zobrazuje stav zkušebních těles při teplotě tání PP. Zkušební tělesa se začínají deformovat pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa nemění svou barvu a svůj tvar.

PP (C) [t = 130 min, T = 170°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)

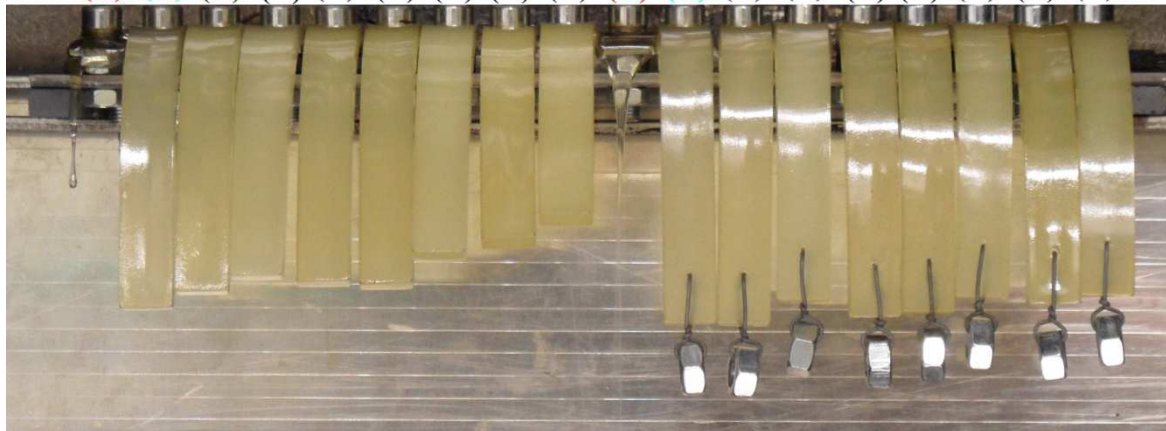


Obr. 71 Zobrazení zkušebních těles PP v různých dávkách ozáření v čase 130min. o teplotě 170°C

Obr. 71 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C nad teplotou tání PP. Zkušební těleso č. 1. se začíná tavit. Ostatní zkušební tělesa se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa č. 2. až č. 9. nemění svou barvu ani svůj tvar.

PP (D) [t = 165 min, T = 200°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)

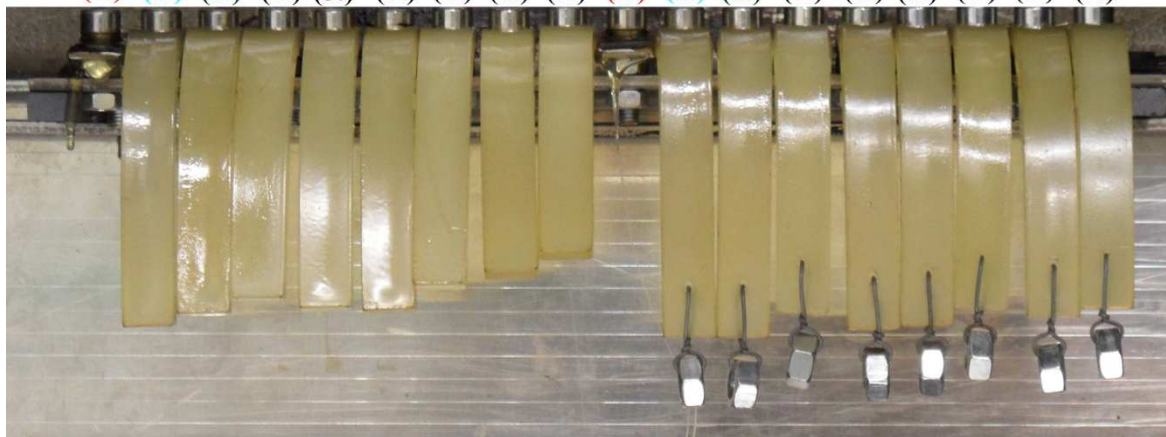


Obr. 72 Zobrazení zkušebních těles PP v různých dávkách ozáření v čase 165min. o teplotě 200°C

Obr. 72 zobrazuje stav zkušebních těles 40°C nad teplotou tání PP. Zkušební těleso č. 1. se rozteklo. Ostatní zkušební tělesa se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa č. 2. až č. 9. nemění svou barvu ani svůj tvar.

PP (D) [t = 190 min, T = 220°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)



Obr. 73 Zobrazení zkušebních těles PP v různých dávkách ozáření v čase 190min. o teplotě 220°C

Obr. 73 zobrazuje stav zkušebních těles 60°C nad teplotou tání PP. Zkušební tělesa č. 2. až č. 9. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost a nemění svůj tvar. Zkušební tělesa začínají měnit svou barvu do žluto – hněda a zhoršuje se povrch.

10.1.4.3 Zhodnocení teplotní odolnosti PP

Neozářený PP je použitelný dlouhodobě do 100°C a krátkodobě do 140°C. Radiačním síťováním získává PP teplotní odolnost 2x větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesíťování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezatíženými a zatíženými jsou nepatrné.

S rostoucí teplotou se zkušební tělesa deformují minimálně, degradují a tím mění svou barvu a povrch. U středně a vysoce sesíťovaných zkušebních těles zůstává tvar nezměněn až do své degradace.

10.1.5 Plněný polypropylen skelným vláknem (PP GF)

Materiál: V-PTS-CREALEN-EP8G5HS*M0083, PTS

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4)mm

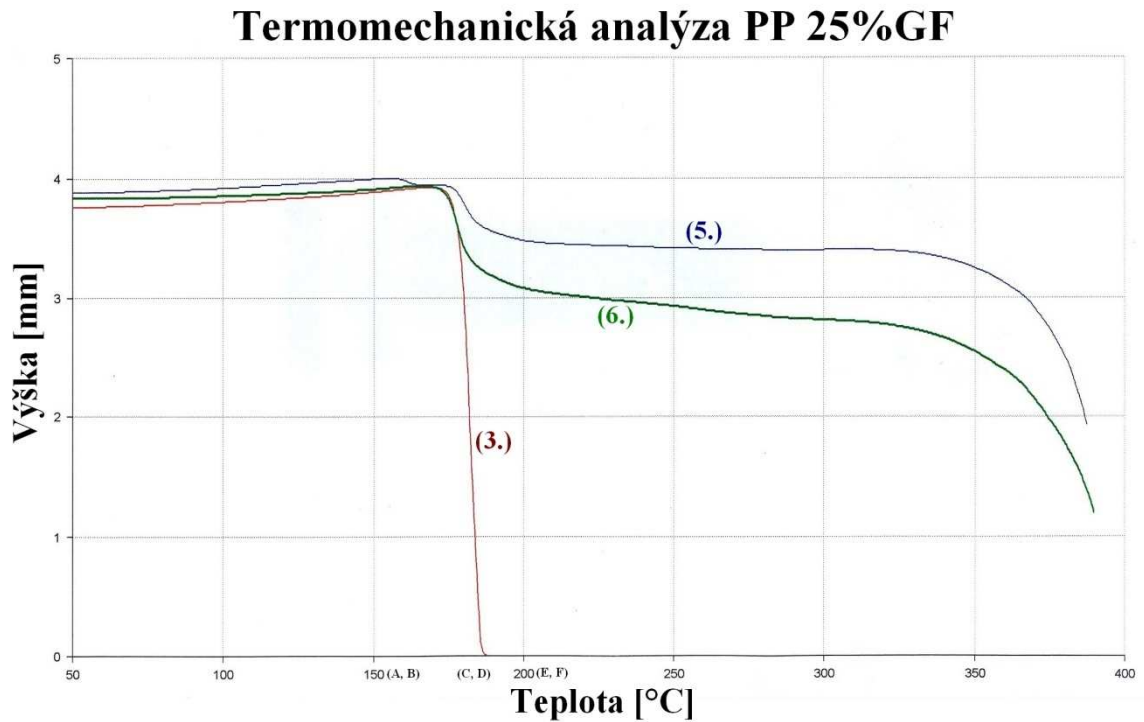
- 1. PP neozářený
- 2. PP 15%GF neozářený
- 3. PP 25%GF neozářený
- 4. PP 30%GF neozářený
- 5. PP 25%GF ozářený dávkou 15kGy
- 6. PP 25%GF ozářený dávkou 30kGy
- 7. PP 25%GF ozářený dávkou 45kGy
- 8. PP 25%GF ozářený dávkou 60kGy
- 9. PP 25%GF ozářený dávkou 90kGy

Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.1.5.1 Termomechanická analýza PP 25%GF

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 74 graficky znázorňuje chování PP 25%GF při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahřívaného zkušebního tělesa dle programu.



Obr. 74 Grafické zobrazení termomechanické analýzy PP 25%GF v různých dávkách ozáření

Zkušební těleso č. 3. se při teplotě 180°C rozteče. Zkušební tělesa č. 5. a č. 6. začíná při teplotě 180°C ztrácet 25% ze své teplotní stability. Se zvyšující teplotou se teplotní stabilita nemění až do teploty 350°C, kdy teplotní stabilita začíná klesat k nule.

10.1.5.2 Zkouška teplotní odolnosti PP GF

Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 25 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 25 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PP 25%GF s jednotlivými teplotami

Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Teplota [°C]***	Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Teplota [°C]***
0	60	27	57	100	180	161	162
5	60	51	69	105	190	165	173
10	70	60	74	110	190	167	175
15	80	69	76	115	190	168	179
20	90	77	82	120	200	170	180
25	90	80	84	125	200	172	184
30	100	84	91	130	200	174	178
35	110	91	98	135	210	177	192
40	120	98	107	140	210	179	187
45	130	107	113	145	210	183	195
50	140	114	123	150	220	188	195
55	150	124	136	155	220	192	209
60	150	129	141	160	230	195	204
65	160	136	150	165	230	198	214
70	160	140	145	170	240	202	222
75	170	145	155	175	240	205	213
80	170	149	150	180	250	212	226
85	170	150	159	185	250	216	230
90	180	154	162	190	250	220	237
95	180	159	166				

* Nastavená teplota, **Teplota uprostřed zkušebního tělesa, ***Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivé zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

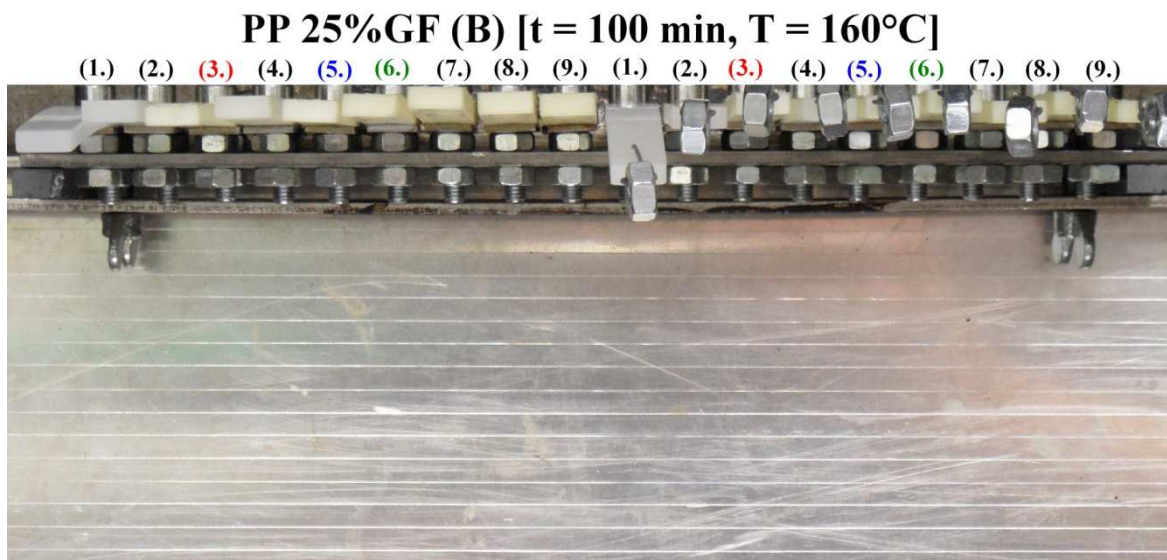
PP 25%GF (A) [t = 85 min, T = 150°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)



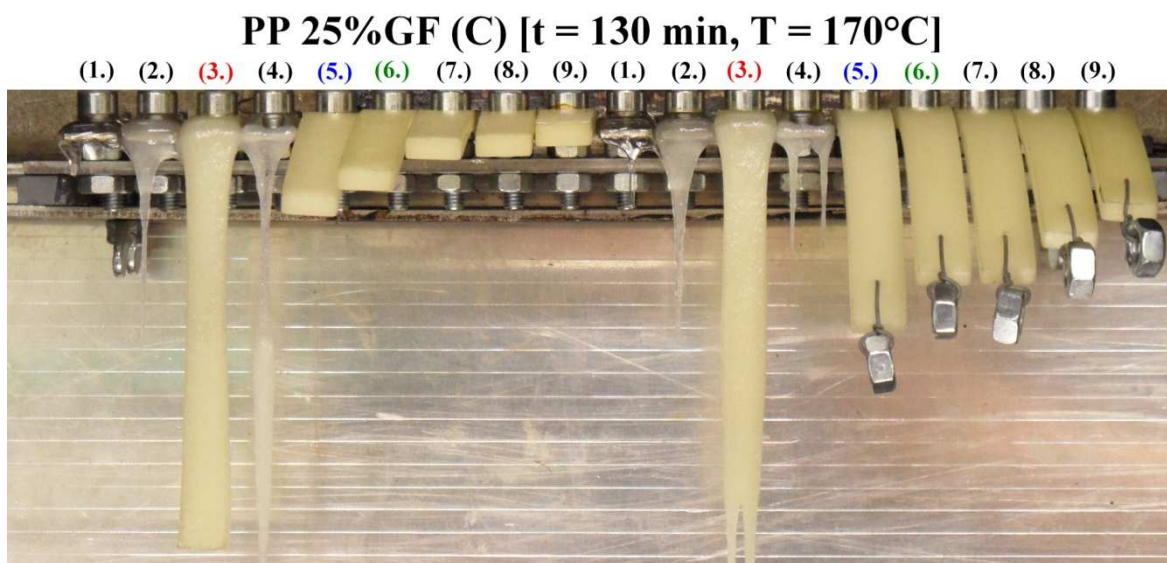
Obr. 75 Zobrazení zkušebních těles PP 25%GF v různých dávkách ozáření v čase 85min. o teplotě 150°C

Obr. 75 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C pod teplotou tání PP 25%GF. Všechny zkušební tělesa jak zatížená tak nezatížená se prakticky nedeformují a nemění svou barvu ani tvar.



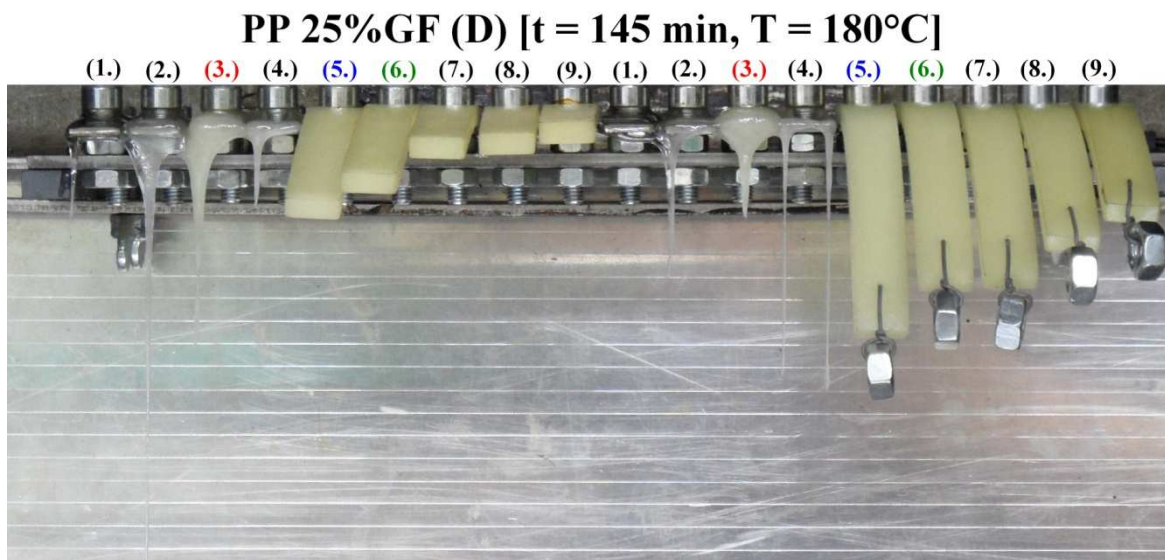
Obr. 76 Zobrazení zkušebních těles PP 25%GF v různých dávkách ozáření v čase 100min. o teplotě 160°C

Obr. 76 zobrazuje stav zkušebních těles při teplotě tání PP 25%GF. Zkušební těleso č. 1. se začíná deformovat pod svou tíhou, ale má určitou pevnost. Ostatní zkušební tělesa jak zatížená tak nezatížená se prakticky nedeformují. Zkušební tělesa nemění svou barvu ani svůj tvar.



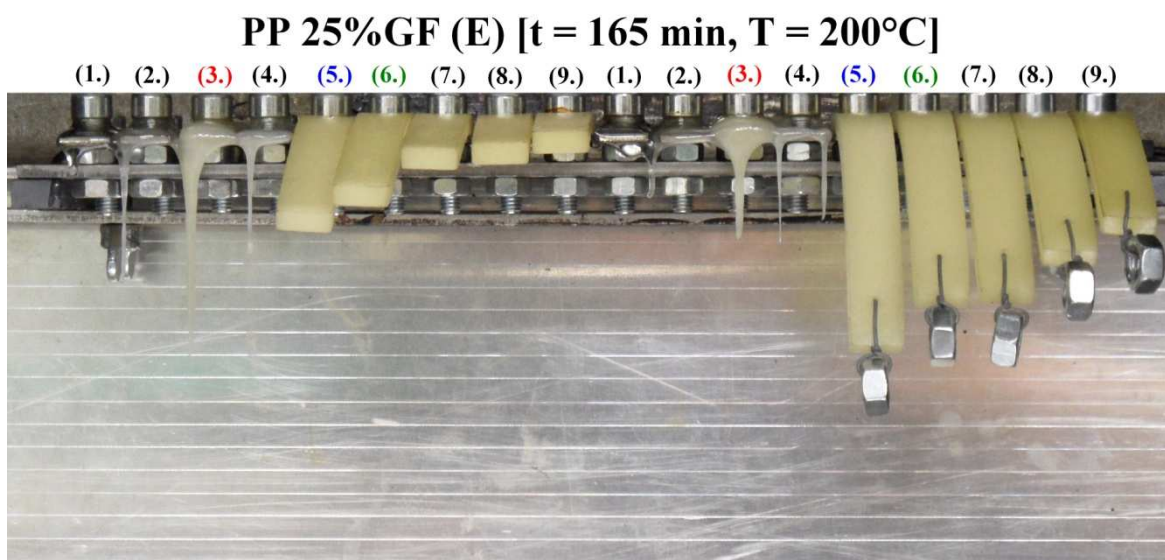
Obr. 77 Zobrazení zkušebních těles PP 25%GF v různých dávkách ozáření v čase 130min. o teplotě 170°C

Obr. 77 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C nad teplotou tání PP 25 %GF. Zkušební tělesa č. 1. až č. 4. se roztavila. Ostatní zkušební tělesa se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost, nemění svou barvu ani svůj tvar.



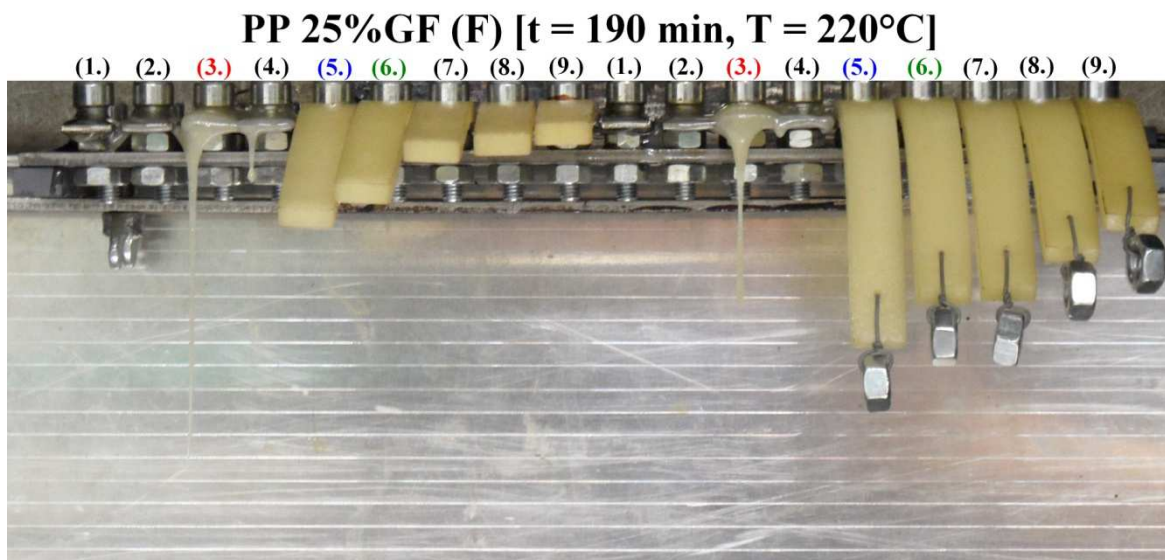
Obr. 78 Zobrazení zkušebních těles PP 25%GF v různých dávkách ozáření v čase 145min. o teplotě 180°C

Obr. 78 zobrazuje stav zkušebních těles 20°C nad teplotou tání PP 25%GF. Zkušební tělesa č. 5. až č. 9. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost a nemění svůj tvar ani barvu.



Obr. 79 Zobrazení zkušebních těles PP 25%GF v různých dávkách ozáření v čase 165min. o teplotě 200°C

Obr. 79 zobrazuje stav zkušebních těles 40°C nad teplotou tání PP 25%GF. Zkušební tělesa č. 5. až č. 9. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost a nemění svůj tvar ani barvu.



Obr. 80 Zobrazení zkušebních těles PP 25%GF v různých dávkách ozáření v čase 190min. o teplotě 220°C

Obr. 80 zobrazuje stav zkušebních těles 60°C nad teplotou tání PP 25%GF. Zkušební tělesa č. 5. až č. 9. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost a nemění svůj tvar. Barva se začíná měnit do žluto – hněda.

10.1.5.3 Zhodnocení teplotní odolnosti PP GF

Neozářený PP 25%GF je použitelný dlouhodobě do 100°C a krátkodobě do 140°C. Radiačním sít'ováním získává PP teplotní odolnost 2x větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesít'ování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezatíženými a zatíženými jsou patrné z obr. 80. S rostoucí teplotou se zkušební tělesa deformují minimálně, degradují a tím mění svou barvu a povrch. U středně a vysoce sesít'ovaných zkušebních těles zůstává tvar nezměněn až do své degradace.

10.2 Polyestery

Jsou to materiály s poměrně vysokou teplotou tání. V praxi využívány hlavně v potravinářství (PET), elektroprůmyslu (PBT: $T_m = 225^\circ\text{C}$) pro své výborné elektroizolační vlastnosti. Pro zvýšení mechanických vlastností se tyto materiály plní skelnými vlákny a jiným plnivem dle konečného použití.

10.2.1 Postup měření

Zkušební tělesa pomoci šroubů a matic byly připevněny k nosné desce, která byla usazena pomoci permanentních magnetů k přípravku do horkovzdušné trouby MORA. Byla měřena teplota v blízkosti zkušebních těles. Teplotní pole v jednotlivých časových intervalech bude znázorněno v následujících tabulkách u jednotlivých materiálů. V každém časovém intervalu byla pořízena fotka, která dokumentuje aktuální stav zkušebních těles. Bylo provedeno měření s umístěním zkušebních těles horizontálně. V horizontální rovině byla zkušební tělesa zatížena ohybovým momentem od vlastní hmotnosti a ohybovým momentem od síly působící na konci tělesa (1,5 N.mm).

10.2.2 Polybutylentereftalat (PBT)

Materiál: V-PTS-CREATEC-B3HZC*M800/25 natur, PTS

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4)mm

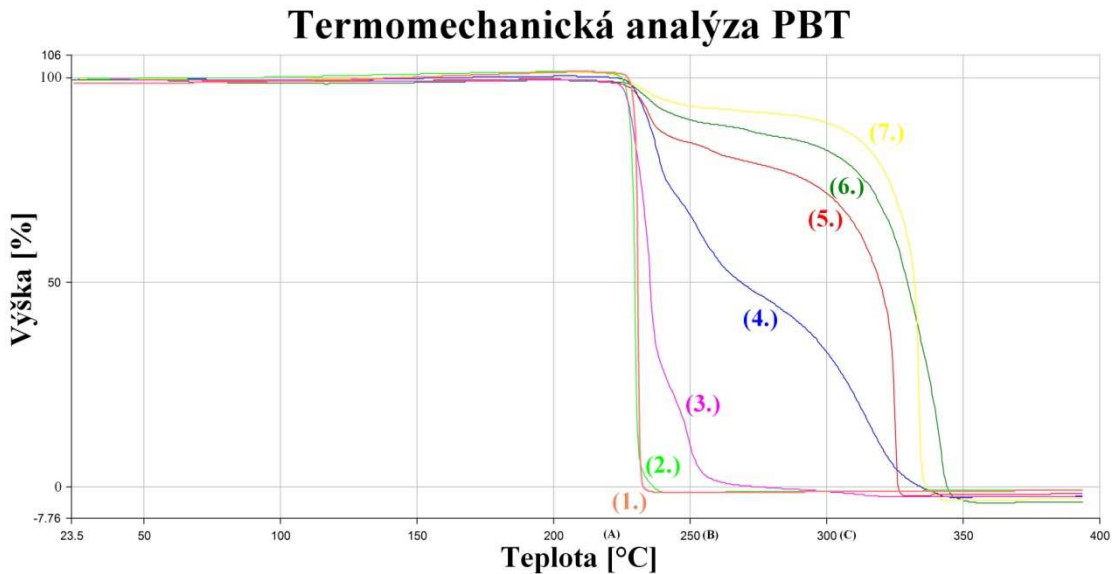
- 1. PBT neozářený
- 2. PBT ozářený dávkou 33kGy
- 3. PBT ozářený dávkou 66kGy
- 4. PBT ozářený dávkou 99kGy
- 5. PBT ozářený dávkou 132kGy
- 6. PBT ozářený dávkou 165kGy
- 7. PBT ozářený dávkou 198kGy

Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Pec MIWY CalorK
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.2.2.1 Termomechanická analýza PBT

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 81 graficky znázorňuje chování PBT při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahříváného zkušebního tělesa dle programu.



Obr. 81 Grafické zobrazení termomechanické analýzy PBT v různých dávkách ozáření

Zkušební tělesa č. 1. až č. 3. ztrácejí při teplotě 230°C teplotní stabilitu. Zkušební těleso č. 4. začíná při teplotě 230°C postupně ztrácet teplotní stabilitu až k nule. Zkušební tělesa č. 5. až č. 7. začínají při teplotě 230°C postupně ztrácet 20% ze své teplotní stability. Se zvyšující teplotou se teplotní stabilita nemění až do teploty 320°C, kdy teplotní stabilita začíná klesat k nule.

10.2.2.2 Zkouška teplotní odolnosti PBT

Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 26 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 26 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PBT s jednotlivými teplotami

Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**
0	90	77	50	250	226
5	90	87	55	250	227
10	90	84	60	250	222
15	170	158	70	250	247
20	170	147	80	250	251
25	170	154	90	250	250
30	220	200	100	300	287
35	220	189	110	300	293
40	220	201	120	300	298
45	250	215			

* Nastavená teplota, ** Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivá zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

PBT (A) [t = 60 min, T = 220°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 82 Zobrazení zkušebních těles PBT v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 220°C

Obr. 82 zobrazuje stav zkušebních těles při teplotě tání PBT. Zkušební tělesa se začínají deformovat pod svou tíhou, mají určitou pevnost, nemění svou barvu ani tvar.

PBT (B) [t = 90 min, T = 250°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 83 Zobrazení zkušebních těles PBT v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 250°C

Obr. 83 zobrazuje stav zkušebních těles 30°C nad teplotou tání PBT. Zkušební tělesa č. 1. a č. 2. se roztavila. Ostatní zkušební tělesa se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost, nemění svůj tvar. Zkušební tělesa začínají měnit barvu do hněda.

PBT (C) [t = 120 min, T = 300°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 84 Zobrazení zkušebních těles PBT v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 300°C

Obr. 84 zobrazuje stav zkušebních těles 80°C nad teplotou tání PBT. Zkušební tělesa č. 1. až č. 5. ztratila teplotní stabilitu. Ostatní zkušební tělesa se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost, nemění svůj tvar. Zkušební tělesa začínají měnit barvu do černa.

10.2.2.3 Zhodnocení teplotní odolnosti PBT

Neozářený PBT je použitelný dlouhodobě do 140°C a krátkodobě do 150°C. Radiačním sít'ováním získává PBT teplotní odolnost o 50% větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesít'ování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezatíženými a zatíženými jsou nepatrné. S rostoucí teplotou se zkušební tělesa deformují, degradují a tím mění svou barvu a povrch. U středně a vysoce sesít'ovaných zkušebních těles zůstává tvar nezměněn až do své degradace.

10.2.3 Plněný polybutyltereftalat (PBT 35%GF)

Materiál: V-PTS-CREATEC-B3HG7ZC*M800/25 natur, PTS

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4)mm

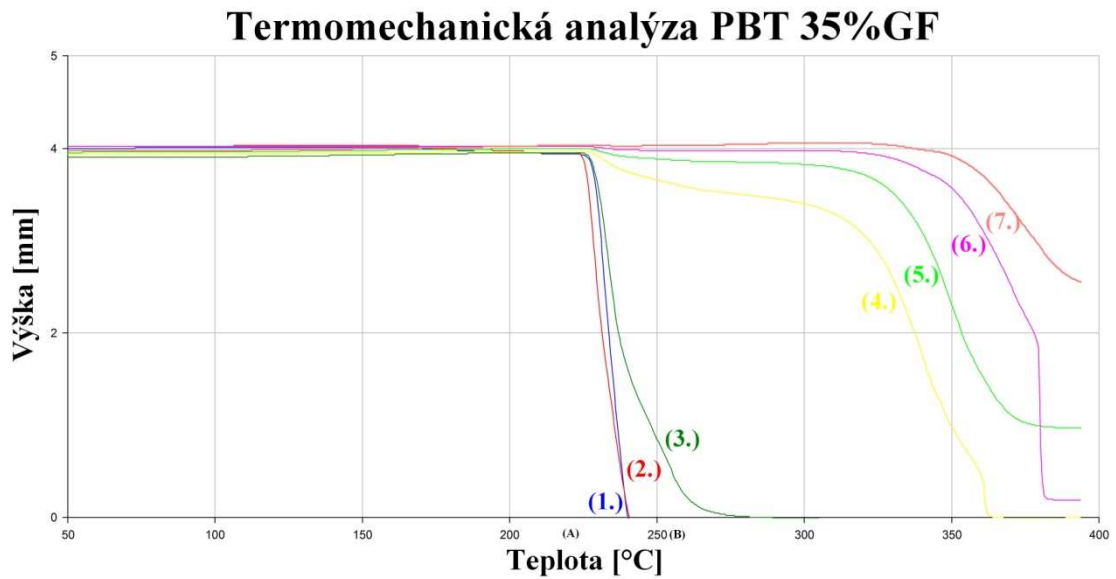
- 1. PBT 35%GF neozářený
- 2. PBT 35%GF ozářený dávkou 33kGy
- 3. PBT 35%GF ozářený dávkou 66kGy
- 4. PBT 35%GF ozářený dávkou 99kGy
- 5. PBT 35%GF ozářený dávkou 132kGy
- 6. PBT 35%GF ozářený dávkou 165kGy
- 7. PBT 35%GF ozářený dávkou 198kGy

Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Pec MIWY CalorK
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.2.3.1 Termomechanická analýza PBT 35%GF

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 85 graficky znázorňuje chování PBT 35%GF při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahřívávaného zkušebního tělesa dle programu.



Obr. 85 Grafické zobrazení termomechanické analýzy PBT 35%GF v různých dávkách ozáření

Zkušební tělesa č. 1. až č. 3. ztratí při teplotě 230°C teplotní stabilitu. Zkušební tělesa č. 4. a č. 5. začínají při teplotě 230°C postupně ztrácet 10% ze své teplotní stability. Se zvyšující teplotou se teplotní stabilita nemění až do teploty 320°C, kdy teplotní stabilita začíná klesat k nule. Zkušební tělesa č. 6. a č. 7. neztrácejí teplotní stabilitu až do teploty 330°C, pak teplotní stabilita postupně klesá.

10.2.3.2 Zkouška teplotní odolnosti PBT 35%GF

Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 27 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 27 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PBT 35%GF s jednotlivými teplotami

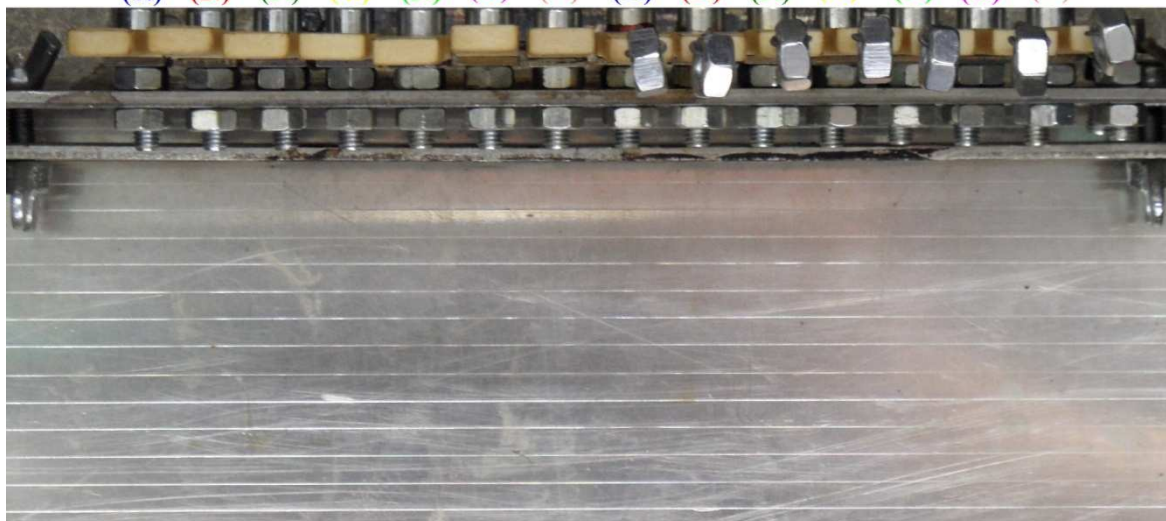
Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**
0	90	89	40	220	202
5	90	92	45	250	213
10	90	92	50	250	225
15	170	160	55	250	224
20	170	152	60	250	229
25	170	156	70	250	250
30	220	201	80	250	250
35	220	201	90	250	256

* Nastavená teplota, ** Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivé zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

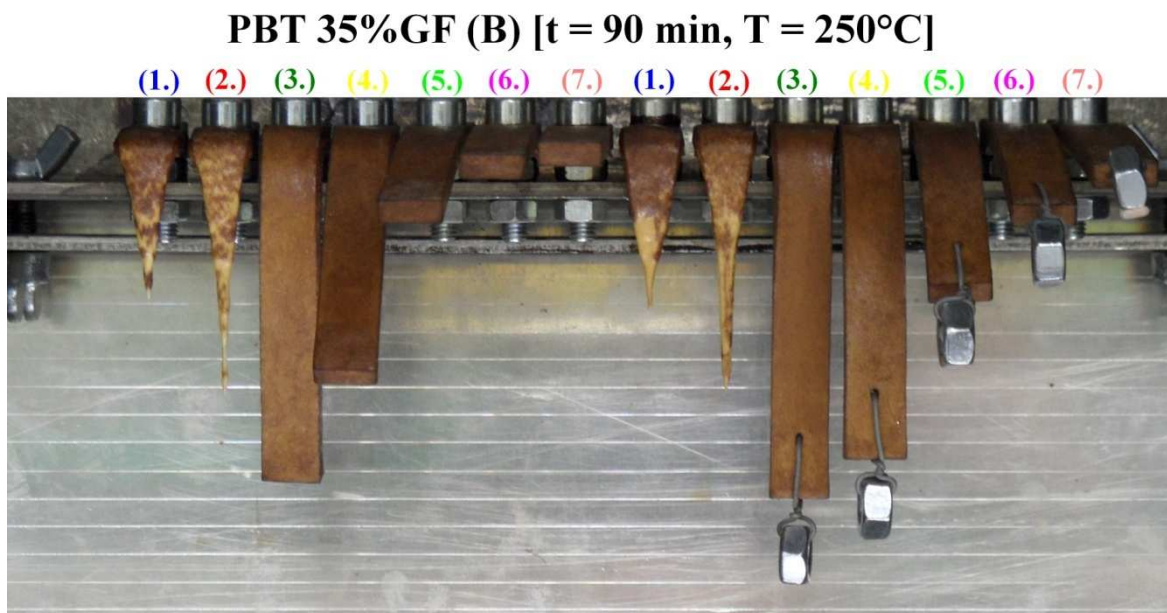
PBT 35%GF (A) [t = 60 min, T = 220°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 86 Zobrazení zkušebních těles PBT 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 220°C

Obr. 86 zobrazuje stav zkušebních těles při teplotě tání PBT. Zkušební tělesa se ne-deformují, nemění svou barvu ani tvar.



Obr. 87 Zobrazení zkušebních těles PBT 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 250°C

Obr. 87 zobrazuje stav zkušebních těles 30°C nad teplotou tání PBT. Zkušební tělesa č. 1. a č. 2. ztratila teplotní stabilitu. Ostatní zkušební tělesa se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost, nemění svůj tvar. Zkušební tělesa začínají měnit barvu do černa.

10.2.3.3 Zhodnocení teplotní odolnosti PBT 35%GF

Neozářený PBT je použitelný dlouhodobě do 140°C a krátkodobě do 210°C. Radiačním síťováním získává PBT teplotní odolnost o 50% větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesíťování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezatíženými a zatíženými jsou nepatrné. S rostoucí teplotou se zkušební tělesa deformují, degradují a tím mění svou barvu a povrch. U středně a vysoce sesíťovaných zkušebních těles zůstává tvar nezměněn až do své degradace.

10.3 Termoplastické elastomery

Jsou to materiály, které spojují vlastnosti termoplastů a elastomerů. Vlastnosti TPE se odvíjejí od základních složek, ze kterých se skládají. TPE polyesterového typu (TPE-E: $T_m = 190^\circ\text{C}$) se využívá hlavně v automobilovém průmyslu.

10.3.1 Postup měření

Zkušební tělesa pomoci šroubů a matic byla připevněna k nosné desce, která byla usazena pomoci permanentních magnetů k přípravku do horkovzdušné trouby MORA. Byla měřena teplota uprostřed a v blízkosti zkušební tělesa. Teplotní pole v jednotlivých časových intervalech bude znázorněno v následujících tabulkách u jednotlivých materiálů. V každém časovém intervalu byla pořízena fotka, která dokumentuje aktuální stav zkušebních těles. Bylo provedeno měření s umístěním zkušebních těles horizontálně. V horizontální rovině byla zkušební tělesa zatížena ohybovým momentem od vlastní hmotnosti a ohybovým momentem od síly působící na konci tělesa (1,5 N.mm).

10.3.2 Polyesterový termoplastický elastomer (TPE-E)

Materiál: V-PTS-UNIFLEX-E25D/M*M800/20 natur, PTS

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4)mm

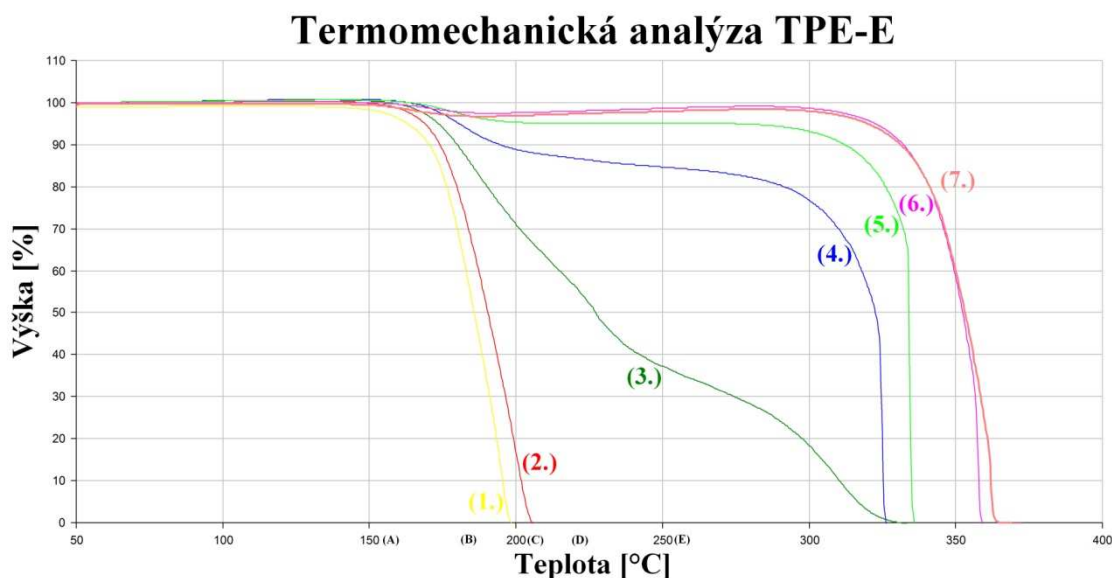
- 1. TPE-E neozářený
- 2. TPE-E ozářený dávkou 33kGy
- 3. TPE-E ozářený dávkou 66kGy
- 4. TPE-E ozářený dávkou 99kGy
- 5. TPE-E ozářený dávkou 132kGy
- 6. TPE-E ozářený dávkou 165kGy
- 7. TPE-E ozářený dávkou 198kGy

Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Pec MIWY CalorK
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.3.2.1 Termomechanická analýza TPE-E

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 88 graficky znázorňuje chování TPE-E při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahříváného zkušebního tělesa dle programu.



Obr. 88 Grafické zobrazení termomechanické analýzy TPE-E v různých dávkách ozáření

Zkušební tělesa č. 1. a č. 2. ztrácí při teplotě 170°C teplotní stabilitu. Zkušební těleso č. 3. začíná při teplotě 170°C postupně ztrácet teplotní stabilitu až k nule. Zkušební tělesa č. 4. a č. 5. ztrácejí při teplotě 170°C ze své teplotní stability 10%. Se zvyšující teplotou se teplotní stabilita nemění až do teploty 330°C kde náhle ztrácí teplotní stabilitu. Zkušební tělesa č. 6. a č. 7. ztrácejí teplotní stabilitu při teplotě 340°C.

10.3.2.2 Zkouška teplotní odolnosti TPE-E

Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 28 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 28 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti TPE-E s jednotlivými teplotami

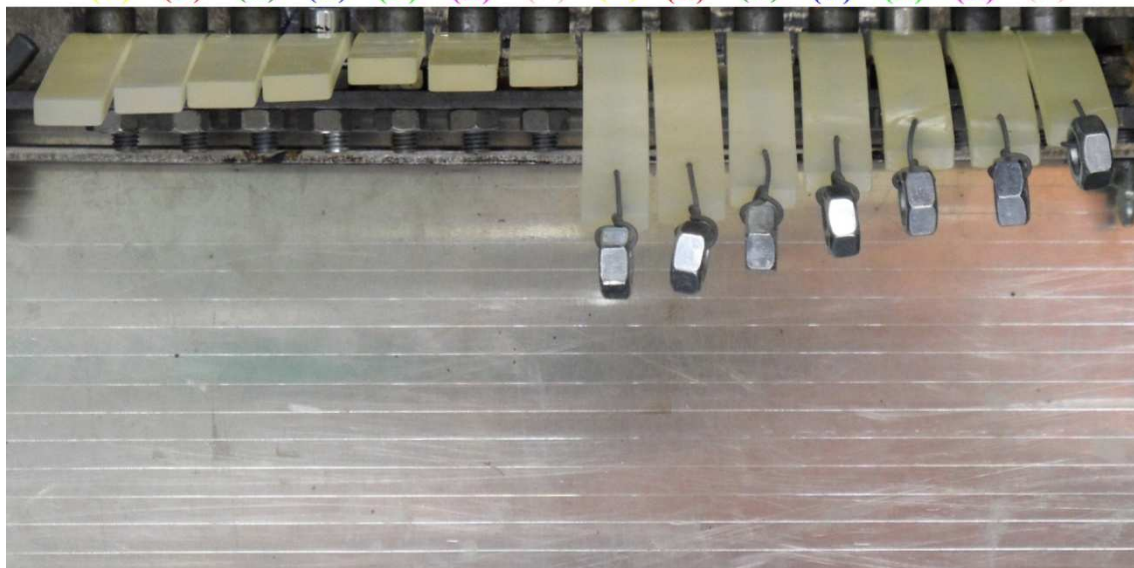
Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Teplota [°C]***	Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Teplota [°C]***
0	90	37	80	90	180	166	163
5	90	61	81	95	190	168	178
10	100	77	85	100	190	170	177
15	110	89	95	105	200	176	186
20	120	98	107	110	200	179	194
25	130	108	113	115	210	185	187
30	140	116	125	120	210	187	193
35	150	124	137	125	220	191	194
40	160	134	140	130	220	196	193
45	160	140	148	135	230	198	199
50	160	144	149	140	230	201	208
55	170	149	152	145	240	207	211
60	170	151	157	150	240	211	224
65	170	153	158	155	250	216	232
70	170	154	150	160	250	222	228
75	180	157	167	170	250	~	235
80	180	160	160	180	250	~	247
85	180	164	169	190	250	~	253

* Nastavená teplota, **Teplota uprostřed zkušebního tělesa, ***Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivé zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

TPE-E (A) [t = 70 min, T = 150°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)

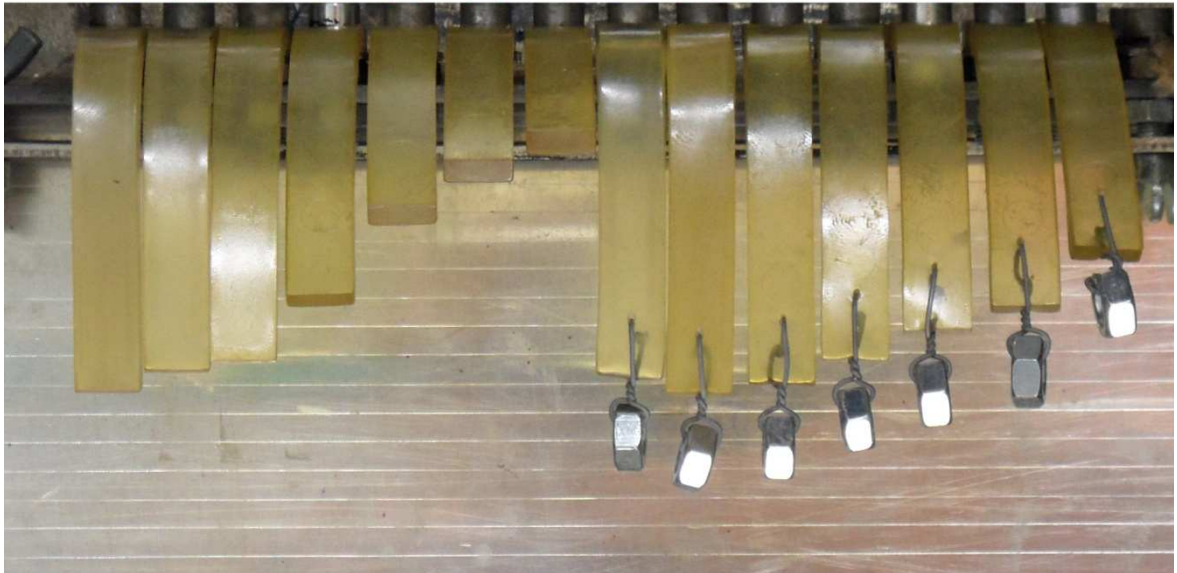


Obr. 89 Zobrazení zkušebních těles TPE-E v různých dávkách ozáření v čase 70min. o teplotě 150°C

Obr. 89 zobrazuje stav zkušebních těles 40°C pod teplotou tání TPE-E. Zkušební tělesa se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost a nemění svůj tvar ani barvu.

TPE-E (B) [t = 110 min, T = 180°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 90 Zobrazení zkušebních těles TPE-E v různých dávkách ozáření v čase 110min. o teplotě 180°C

Obr. 90 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C pod teplotou tání TPE-E. Zkušební tělesa se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost a nemění svůj tvar ani barvu.

TPE-E (C) [t = 140 min, T = 200°C]

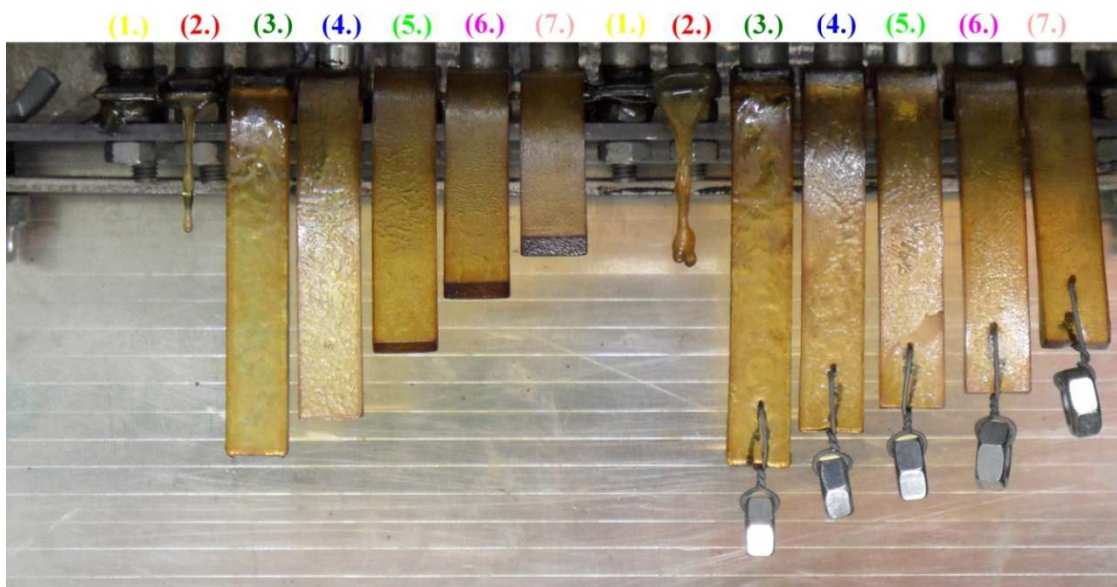
(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 91 Zobrazení zkušebních těles TPE-E v různých dávkách ozáření v čase 140min. o teplotě 200°C

Obr. 91 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C nad teplotou tání TPE-E. Zkušební tělesa č. 1. a č. 2. se roztekla. Zkušební tělesa č. 3. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost a nemění svůj tvar ani barvu.

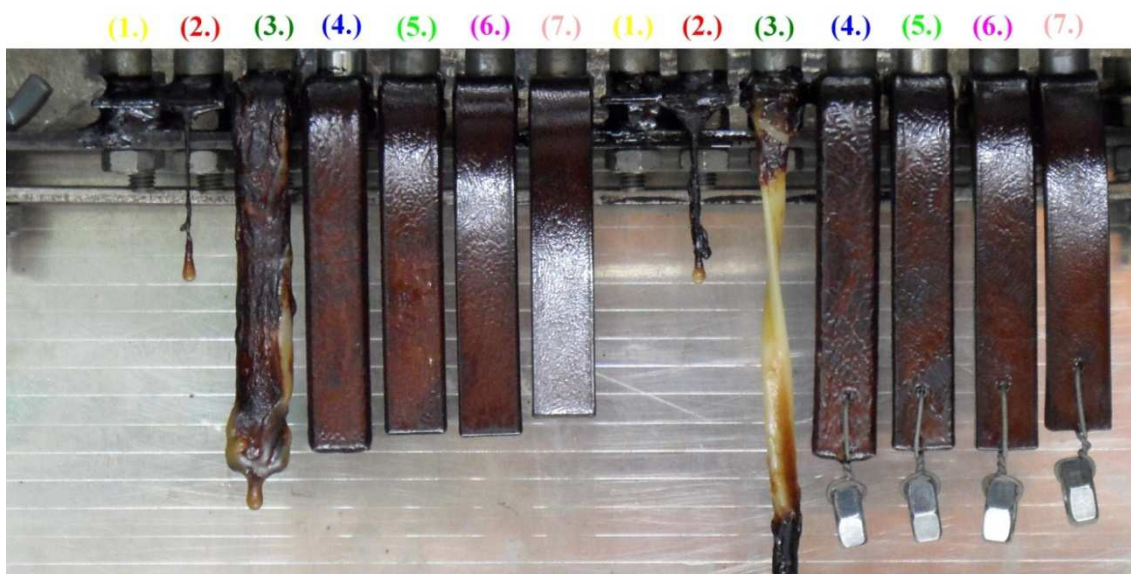
TPE-E (D) [t = 160 min, T = 220°C]



Obr. 92 Zobrazení zkušebních těles TPE-E v různých dávkách ozáření v čase 160min. o teplotě 220°C

Obr. 91 zobrazuje stav zkušebních těles 30°C nad teplotou tání TPE-E. Zkušební tělesa č. 3. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost, nemění svůj tvar. Zkušební tělesa začínají degradovat a měnit barvu do hněda, zhoršuje se povrch.

TPE-E (E) [t = 190 min, T = 250°C]



Obr. 93 Zobrazení zkušebních těles TPE-E v různých dávkách ozáření v čase 190min. o teplotě 250°C

Obr. 91 zobrazuje stav zkušebních těles 60°C nad teplotou tání TPE-E. Zkušební těleso č. 3. ztratilo teplotní stabilitu. Zkušební tělesa č. 4. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost, nemění svůj tvar. Zkušební tělesa degradují a mění barvu do černa, zhoršuje se povrch.

10.3.2.3 Zhodnocení teplotní odolnosti TPE-E

Neozářený TPE-E je použitelný dlouhodobě do 100°C a krátkodobě do 150°C. Radiačním síťováním získává TPE-E teplotní odolnost 2x větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesíťování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezatíženými a zatíženými jsou nepatrné. S rostoucí teplotou se zkušební tělesa deformují, degradují a tím mění svou barvu a povrch. U středně a vysoce sesíťovaných zkušebních těles zůstává tvar nezměněn až do své degradace.

10.4 Polyamidy

Jsou to materiály s poměrně vysokou teplotou tání, vyjma PA11 a PA12. V praxi hojně využívány, pro jejich výborné fyzikální vlastnosti. Pro zvýšení mechanických vlastností se tyto materiály plní skelnými vlákny a jiným plnivem dle konečného použití.

Tab. 29 Teplota tání u polyamidů

Materiál	Teplota tání Tm [°C]
Polyamid 11 PA11	170
Polyamid 12 PA12	190
Polyamid 9T PA9T	305
Polyamid 6 PA6	220
Polyamid 6.6 PA6.6	260

10.4.1 Postup měření

Zkušební tělesa pomoci šroubů a matic byly připevněny k nosné desce, která byla usazena pomoci permanentních magnetů k přípravku do horkovzdušné trouby MORA. Byla měřena teplota v blízkosti zkušebních těles u PA11 a PA12 i uprostřed zkušebních těles. Teplotní pole v jednotlivých časových intervalech bude znázorněno v následujících tabulkách u jednotlivých materiálů. V každém časovém intervalu byla pořízena fotka, která dokumentuje aktuální stav zkušebních těles. Bylo provedeno měření s umístěním zkušebních těles horizontálně. V horizontální rovině byla zkušební tělesa zatížena ohybovým momentem od vlastní hmotnosti a ohybovým momentem od síly působící na konci tělesa (1,5 N.mm).

10.4.2 Polyamid 11 (PA11)

Materiál: V-PTS-CREAMID-11T*M600/13 transparent, PTS

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4)mm

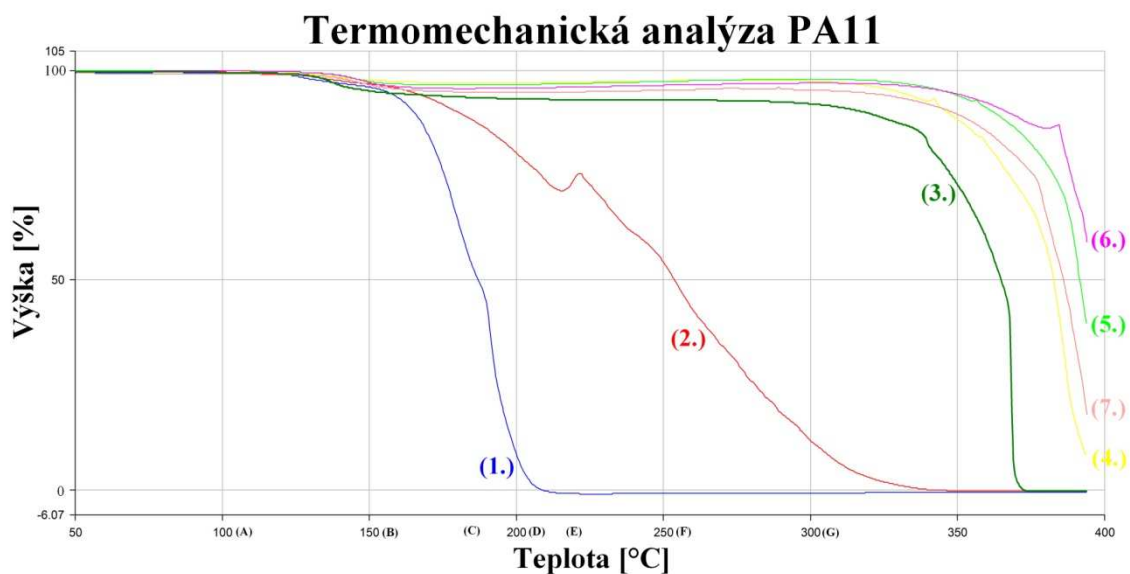
- 1. PA11 neozářený
- 2. PA11 ozářený dávkou 33kGy
- 3. PA11 ozářený dávkou 66kGy
- 4. PA11 ozářený dávkou 99kGy
- 5. PA11 ozářený dávkou 132kGy
- 6. PA11 ozářený dávkou 165kGy
- 7. PA11 ozářený dávkou 198kGy

Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Pec MIWY CalorK
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.4.2.1 Termomechanická analýza PA11

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 94 graficky znázorňuje chování PA11 při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahřívaného zkušebního tělesa dle programu.



Obr. 94 Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA11 v různých dávkách ozáření

Zkušební těleso č. 1. se při teplotě 170°C začne tavit. Zkušební těleso č. 2. začíná při teplotě 170°C postupně ztrácet teplotní stabilitu až k nule. Zkušební tělesa č. 3. až č. 7. ztrácejí při teplotě 340°C teplotní stabilitu.

10.4.2.2 Zkouška teplotní odolnosti PA11

Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 30 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 30 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA11 s jednotlivými teplotami

Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Teplota [°C]***	Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Teplota [°C]***
0	60	29	57	130	200	181	184
5	60	46	62	135	210	183	184
10	70	58	75	140	210	186	201
15	80	64	77	145	210	188	192
20	90	72	80	150	220	190	193
25	90	77	82	155	220	194	206
30	100	82	89	160	220	196	203
35	110	91	97	165	230	202	207
40	120	96	98	170	230	203	214
45	130	106	115	175	230	204	209
50	140	113	124	180	240	205	218
55	150	123	132	185	240	206	210
60	150	128	145	190	240	209	223
65	160	135	153	195	250	215	230
70	160	139	143	200	250	218	231
75	170	145	153	205	250	219	223
80	170	149	153	215	250	~	247
85	170	150	161	225	250	~	249
90	180	154	160	235	250	~	251
95	180	158	168	245	250	~	252
100	180	160	170	255	250	~	254
105	190	164	176	265	250	~	255
110	190	165	172	275	300	~	286
115	190	168	175	285	300	~	289
120	200	172	176	295	300	~	296
125	200	178	192				

* Nastavená teplota, **Teplota uprostřed zkušebního tělesa, ***Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivé zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

PA11 (A) [t = 45 min, T = 100°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)

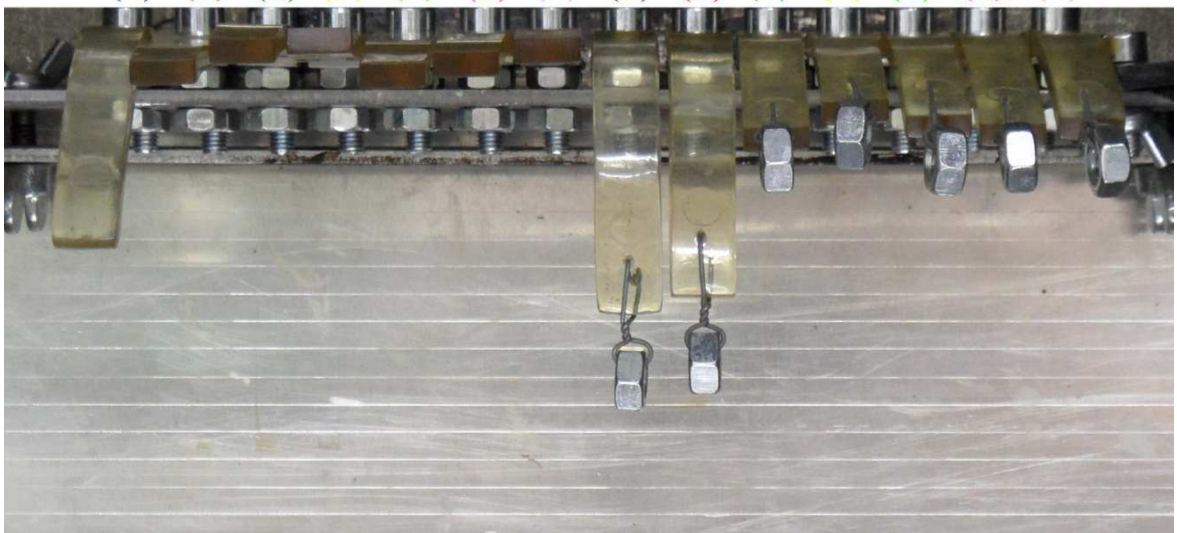


Obr. 95 Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 45min. o teplotě 100°C

Obr. 95 zobrazuje stav zkušebních těles 70°C pod teplotou tání PA11. Zkušební tělesa se nedeformují, nemění svůj tvar ani barvu.

PA11 (B) [t = 85 min, T = 150°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)

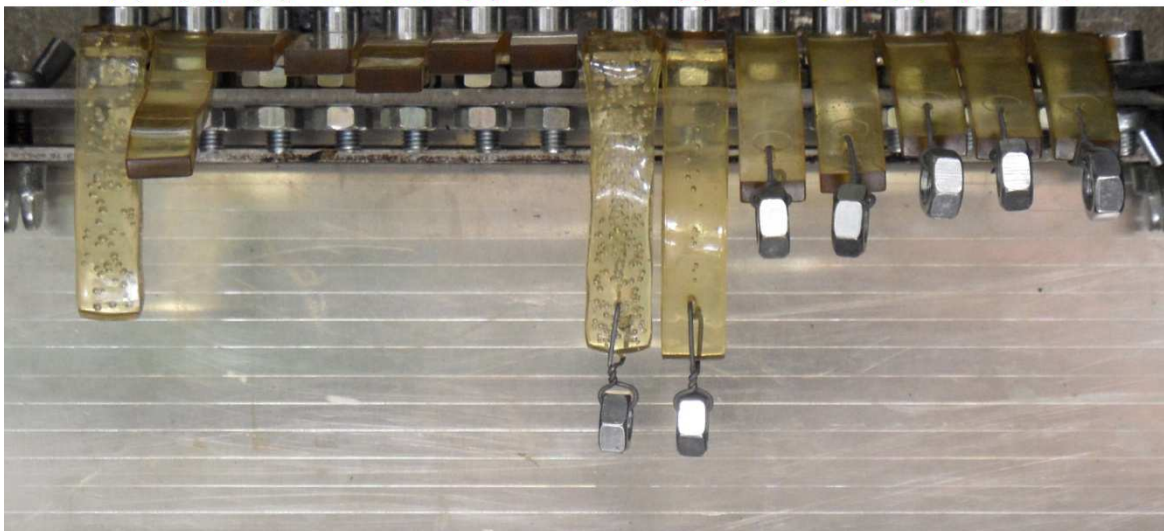


Obr. 96 Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 85min. o teplotě 150°C

Obr. 96 zobrazuje stav zkušebních těles 20°C pod teplotou tání PA11. Zkušební tělesa se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost a nemění svůj tvar ani barvu.

PA11 (C) [t = 130 min, T = 180°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)

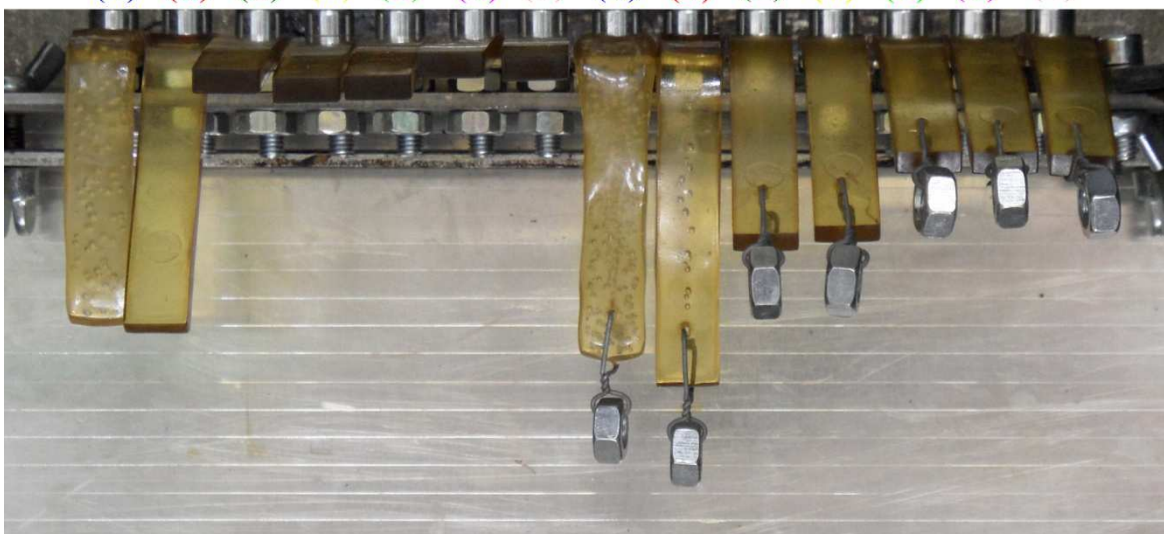


Obr. 97 Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 130min. o teplotě 180°C

Obr. 97 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C nad teplotou tání PA11. Zkušební těleso č. 1. mění svůj tvar, začíná se tavit, uvnitř jsou bublinky. Zkušební těleso č. 2. se deformuje pod svou tíhou, ale má určitou pevnost, nemění svůj tvar, uvnitř se začínají tvořit bublinky. Zkušební tělesa č. 3. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost a nemění svůj tvar ani barvu.

PA11 (D) [t = 175 min, T = 200°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)

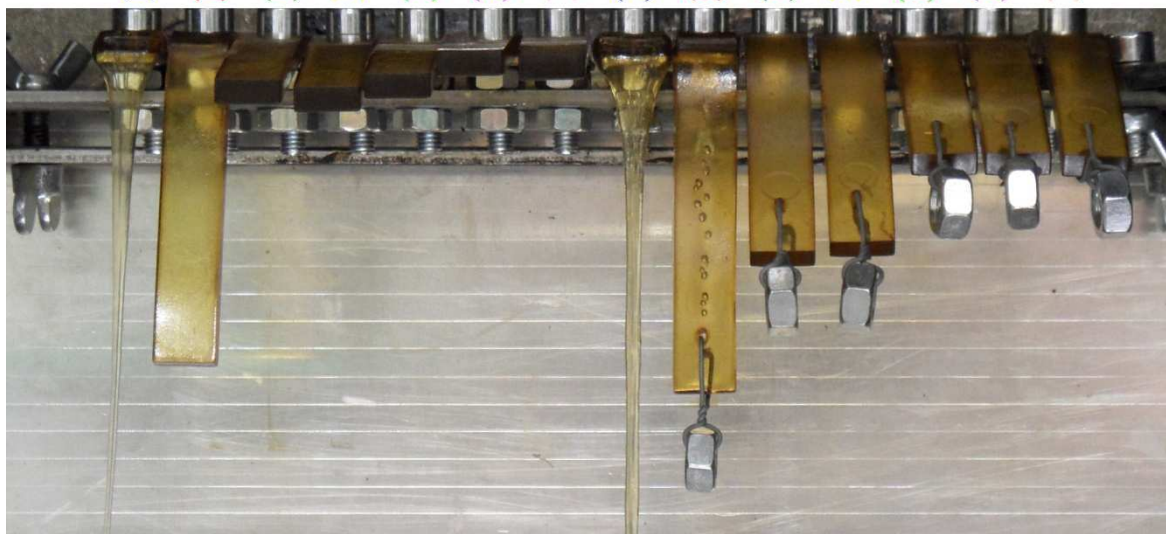


Obr. 98 Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 175min. o teplotě 200°C

Obr. 98 zobrazuje stav zkušebních těles 30°C nad teplotou tání PA11. Zkušební těleso č. 1. mění svůj tvar, začíná se tavit, uvnitř jsou bublinky. Zkušební těleso č. 2. se deformuje pod svou tíhou, ale má určitou pevnost, nemění svůj tvar, uvnitř jsou bublinky. Zkušební tělesa č. 3. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa začínají měnit svou barvu, ale mají stejný tvar.

PA11 (E) [t = 205 min, T = 220°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)

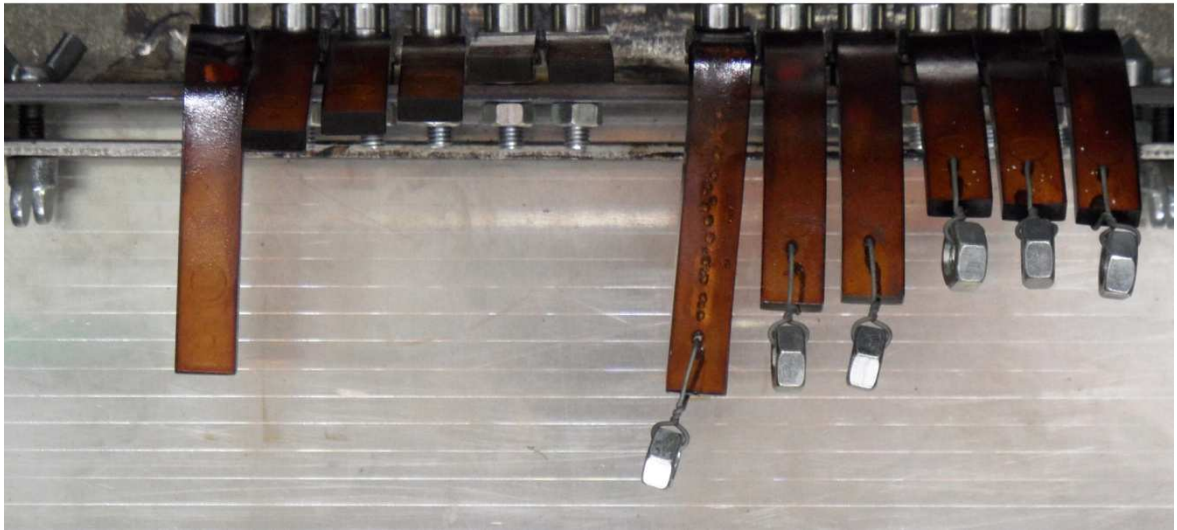


Obr. 99 Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 205min. o teplotě 220°C

Obr. 99 zobrazuje stav zkušebních těles 50°C nad teplotou tání PA11. Zkušební těleso č. 1. se roztavilo. Zkušební těleso č. 2. se deformuje pod svou tíhou, ale má určitou pevnost, nemění svůj tvar, uvnitř jsou bublinky. Zkušební tělíska č. 3. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa mění svou barvu, ale mají stejný tvar.

PA11 (F) [t = 265 min, T = 250°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)

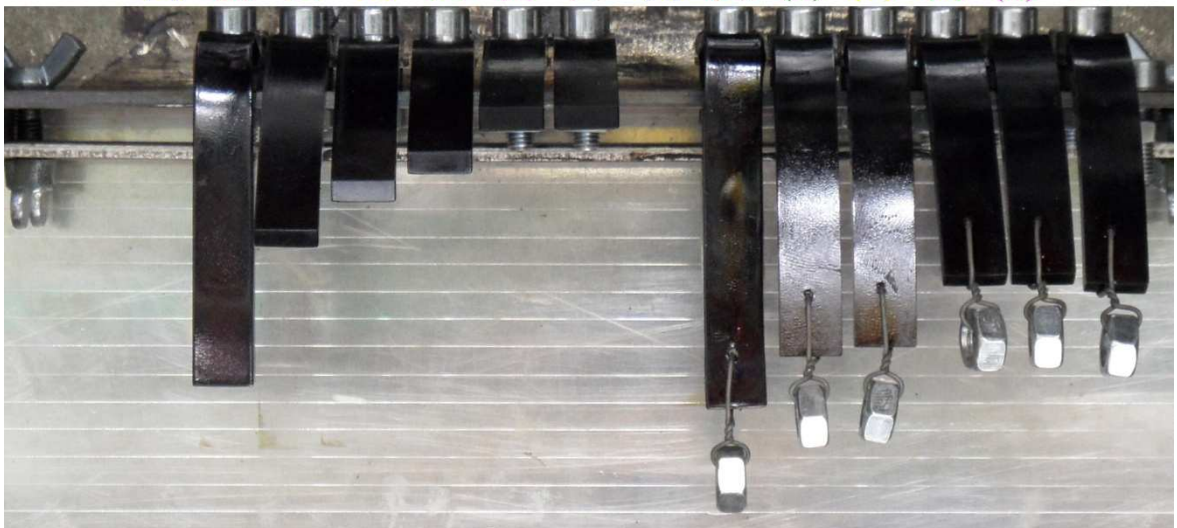


Obr. 100 Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 265min. o teplotě 250°C

Obr. 100 zobrazuje stav zkušebních těles 80°C nad teplotou tání PA11. Stav zkušebních těles je od předchozího obrázku nezměněn. Barva vlivem degradace materiálu je tmavší jako u předchozího obrázku.

PA11 (G) [t = 295 min, T = 300°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 101 Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 295min. o teplotě 300°C

Obr. 101 zobrazuje stav zkušebních těles 130°C nad teplotou tání PA11. Stav zkušebních těles je od předchozího obrázku nezměněn. Barva vlivem degradace materiálu se změnila na černou, ale mají stejný tvar.

10.4.2.3 Zhodnocení teplotní odolnosti PA11

Neozářený PA11 je použitelný dlouhodobě do 100°C a krátkodobě do 140°C. Radiačním síťováním získává PA11 teplotní odolnost o 50% větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesíťování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezatíženými a zatíženými jsou patrné z obr. 101. S rostoucí teplotou se zkušební tělesa deformují, degradují a tím mění svou barvu a povrch. U středně a vysoce sesíťovaných zkušebních těles zůstává tvar nezměněn až do své degradace.

10.4.3 Polyamid 12 (PA12)

Materiál: V-PTS-CREAMID 12-AMN 0 TLD*M800/13 natur, PTS

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4)mm

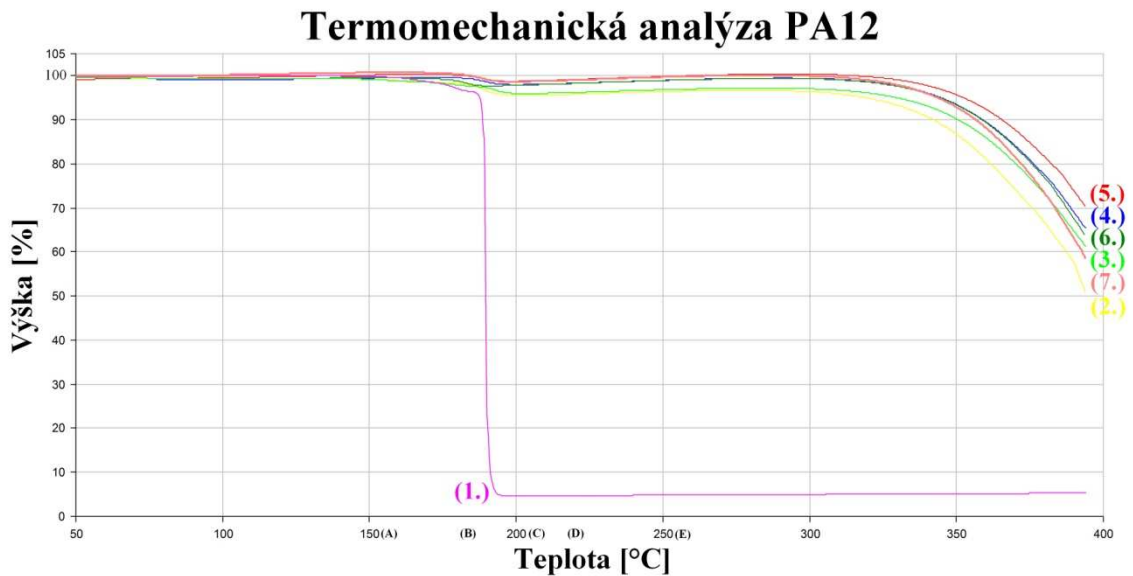
- 1. PA12 neozářený
- 2. PA12 ozářený dávkou 33kGy
- 3. PA12 ozářený dávkou 66kGy
- 4. PA12 ozářený dávkou 99kGy
- 5. PA12 ozářený dávkou 132kGy
- 6. PA12 ozářený dávkou 165kGy
- 7. PA12 ozářený dávkou 198kGy

Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Pec MIWY CalorK
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.4.3.1 Termomechanická analýza PA12

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 102 graficky znázorňuje chování PA12 při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahřívajícího zkušební tělesa dle programu.



Obr. 102 Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA12 v různých dávkách ozáření

Zkušební tělísko č. 1. se při teplotě 190°C začne tavit. Zkušební tělíska č. 2. až č. 7. ztrácejí při teplotě 340°C teplotní stabilitu.

10.4.3.2 Zkouška teplotní odolnosti PA12

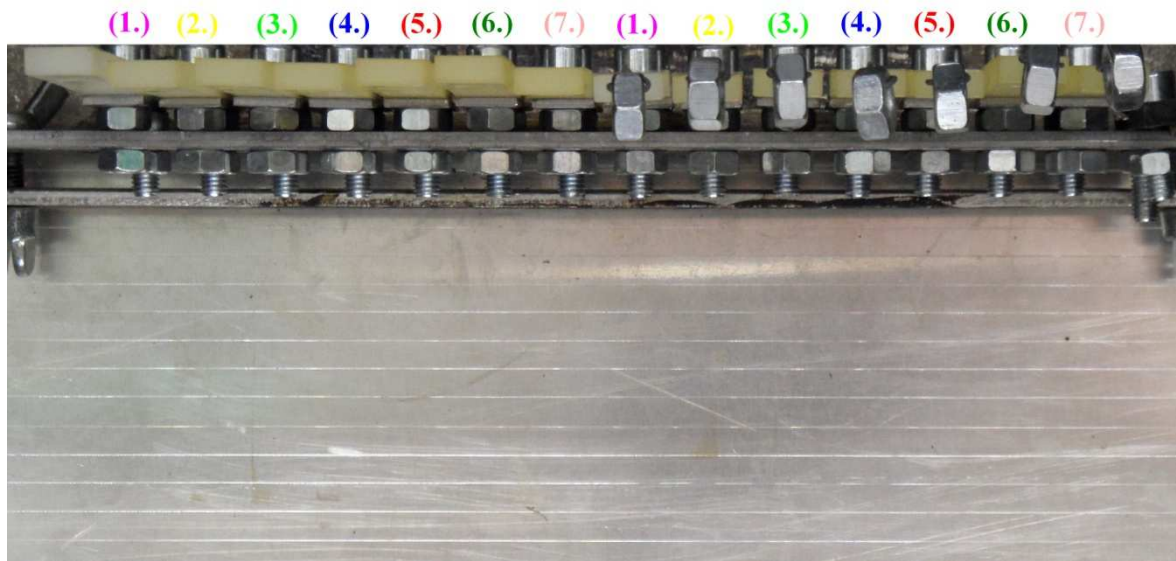
Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 31 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 31 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA12 s jednotlivými teplotami

Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Teplota [°C]***	Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Teplota [°C]***
0	60	27	62	120	200	172	176
5	60	51	67	125	200	174	188
10	70	61	72	130	200	178	185
15	80	69	75	135	210	181	183
20	90	75	83	140	210	183	196
25	90	80	83	145	210	187	191
30	100	86	92	150	220	188	193
35	110	93	99	155	220	190	208
40	120	100	108	160	220	193	194
45	130	108	114	165	230	196	209
50	140	116	125	170	230	198	210
55	150	124	131	175	230	202	215
60	150	129	142	180	240	204	219
65	160	135	151	185	240	208	212
70	160	140	142	190	240	210	225
75	170	145	150	195	250	215	235
80	170	149	160	200	250	218	236
85	170	151	160	205	250	220	229
90	180	155	168	215	250	~	245
95	180	157	164	225	250	~	247
100	180	158	161	235	250	~	250
105	190	163	173	245	250	~	251
110	190	165	167	255	250	~	253
115	190	166	170	265	250	~	255

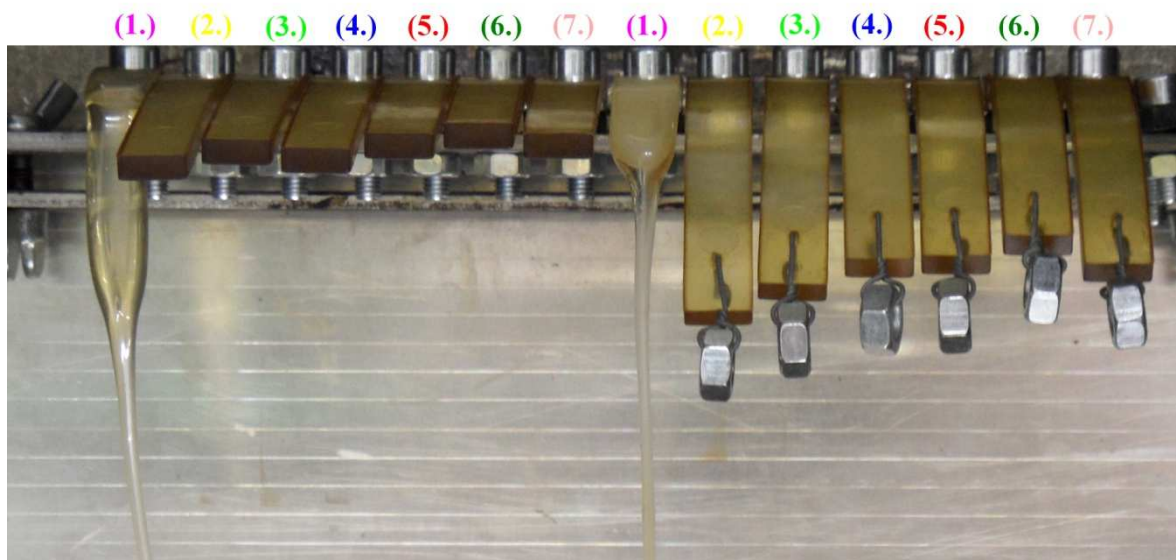
* Nastavená teplota, **Teplota uprostřed zkušební tělesa, ***Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivé zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

PA12 (A) [t = 85 min, T = 150°C]

Obr. 103 Zobrazení zkušebních těles PA12 v různých dávkách ozáření v čase 85min. o teplotě 150°C

Obr. 103 zobrazuje stav zkušebních těles 40°C pod teplotou tání PA12. Zkušební tělesa se nedeformují, nemění svůj tvar ani barvu.

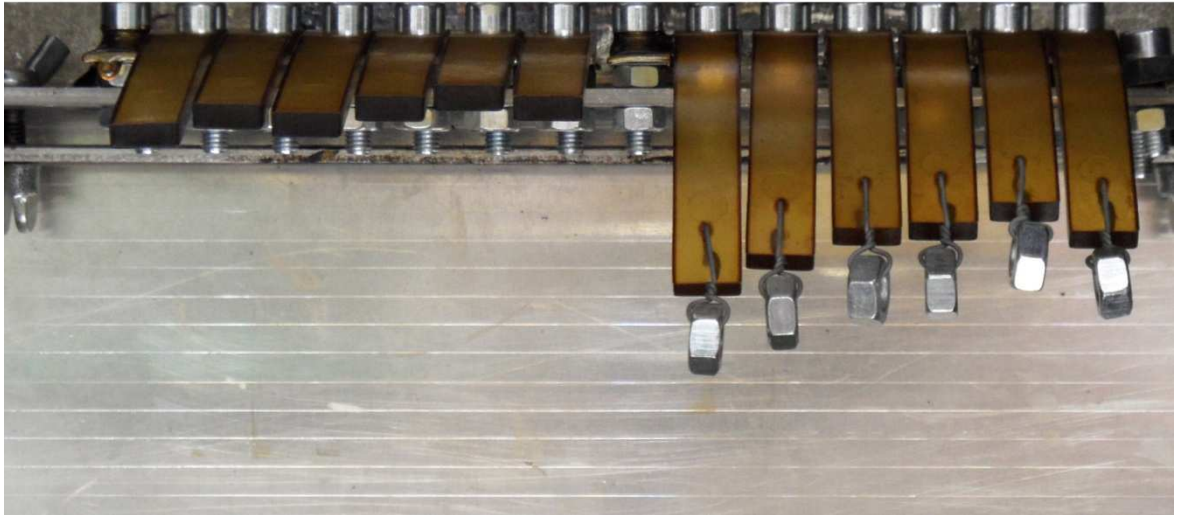
PA12 (B) [t = 130 min, T = 180°C]

Obr. 104 Zobrazení zkušebních těles PA12 v různých dávkách ozáření v čase 130min. o teplotě 180°C

Obr. 104 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C pod teplotou tání PA12. Zkušební těleso č. 1. se začíná tavit. Zkušební tělesa č. 2. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost a nemění svůj tvar ani barvu.

PA12 (C) [t = 175 min, T = 200°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)

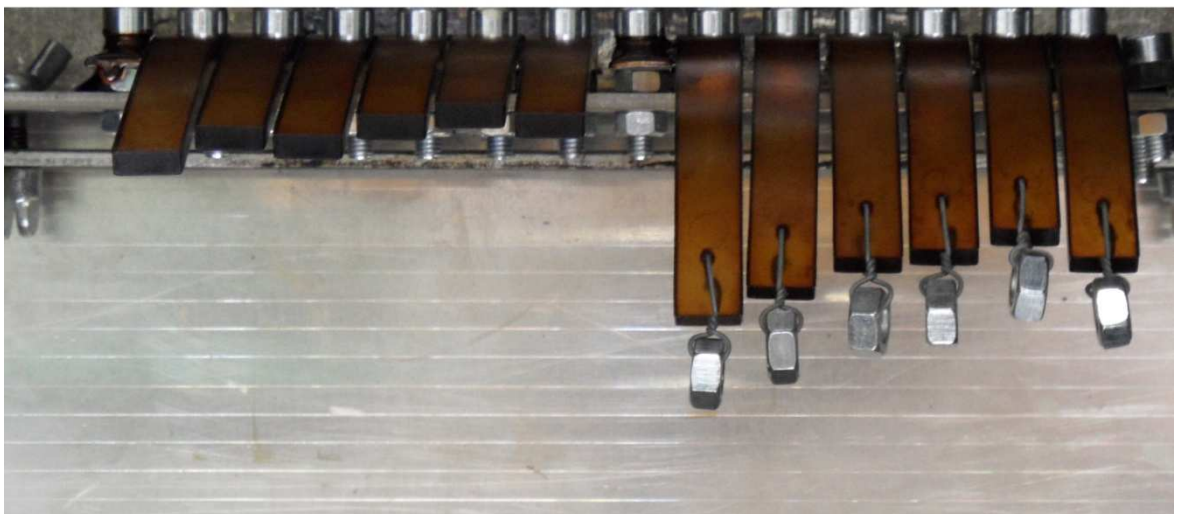


Obr. 105 Zobrazení zkušebních těles PA12 v různých dávkách ozáření v čase 175min. o teplotě 200°C

Obr. 105 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C nad teplotou tání PA12. Zkušební těleso č. 1. se roztavilo. Zkušební tělesa č. 2. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa začínají měnit svou barvu, ale mají stejný tvar.

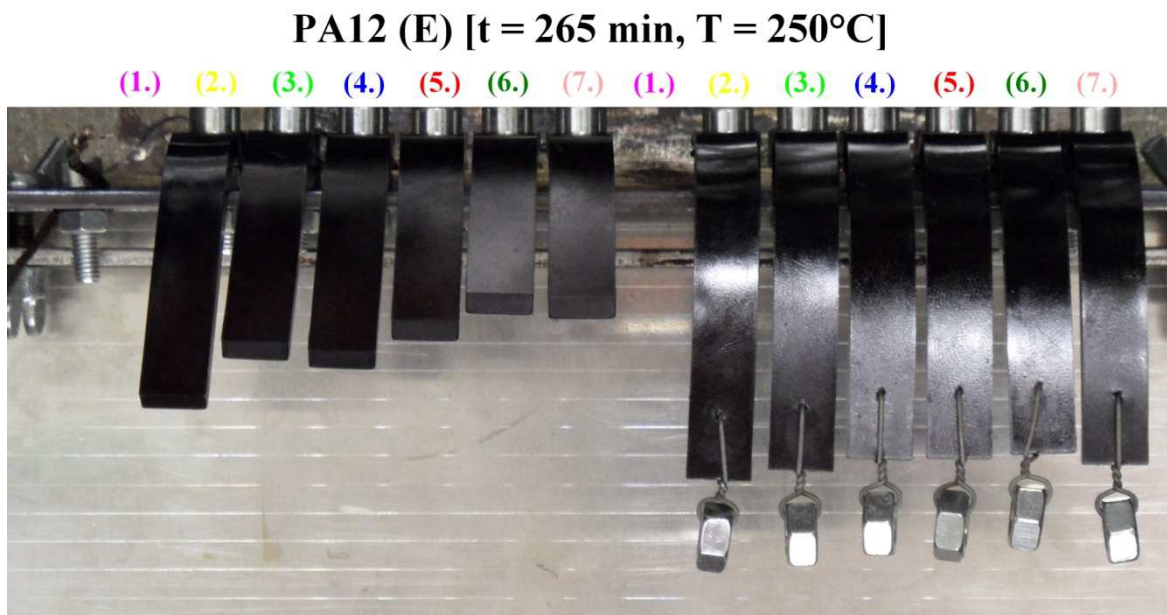
PA12 (D) [t = 205 min, T = 220°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 106 Zobrazení zkušebních těles PA12 v různých dávkách ozáření v čase 205min. o teplotě 220°C

Obr. 106 zobrazuje stav zkušebních těles 30°C nad teplotou tání PA12. Zkušební tělesa č. 2. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Barva vlivem degradace materiálu je tmavší jako u předchozího obrázku.



Obr. 107 Zobrazení zkušebních těles PA12 v různých dávkách ozáření v čase 265min. o teplotě 250°C

Obr. 107 zobrazuje stav zkušebních těles 60°C nad teplotou tání PA12. Zkušební tělesa č. 2. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Barva vlivem degradace materiálu se změnila na černou, ale mají stejný tvar.

10.4.3.3 Zhodnocení teplotní odolnosti PA12

Neozářený PA12 je použitelný dlouhodobě do 110°C a krátkodobě do 150°C. Radiacním sítováním získává PA12 teplotní odolnost o 30% větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesítování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezátíženými a zatíženými jsou patrné z obr. 107. S rostoucí teplotou se zkušební tělesa deformují, degradují a tím mění svou barvu a povrch. U středně a vysoce sesítovaných zkušebních těles zůstává tvar nezměněn až do své degradace.

10.4.4 Polyamid 9T (PA9T)

Materiál: V-DURAMID-9TH2G9*M800/13 natur, PTS

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4)mm

- 1. PA9T neozářený
- 2. PA9T ozářený dávkou 33kGy
- 3. PA9T ozářený dávkou 66kGy
- 4. PA9T ozářený dávkou 99kGy
- 5. PA9T ozářený dávkou 132kGy
- 6. PA9T ozářený dávkou 165kGy
- 7. PA9T ozářený dávkou 198kGy

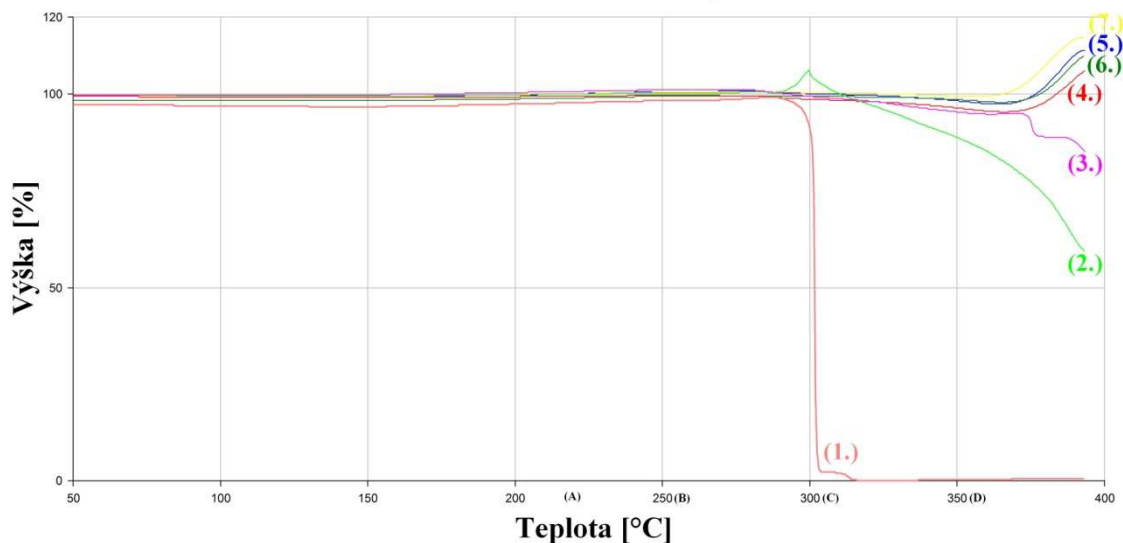
Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Pec MIWY CalorK
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.4.4.1 Termomechanická analýza PA9T

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 108 graficky znázorňuje chování PA9T při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahřívaného zkušebního tělesa dle programu.

Termomechanická analýza PA9T



Obr. 108 Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA9T v různých dávkách ozáření

Zkušební těleso č. 1. se při teplotě 300°C začne tavit. Zkušební těleso č. 2. začíná při teplotě 350°C postupně ztrácet teplotní stabilitu. Zkušební tělesa č. 3. až č. 7. při teplotě 370°C začínají zvětšovat objem viz. obr. 112.

10.4.4.2 Zkouška teplotní odolnosti PA9T

Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 32 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 32 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA9T s jednotlivými teplotami

Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**
0	90	74	50	250	254
5	90	82	60	250	255
10	90	83	70	300	282
15	250	151	80	300	296
20	250	211	90	300	304
25	250	214	100	350	342
30	250	224	110	350	352
40	250	251	120	350	357

* Nastavená teplota, ** Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivé zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

PA9T (A) [t = 30 min, T = 220°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 109 Zobrazení zkušebních těles PA9T v různých dávkách ozáření v čase 30min. o teplotě 220°C

Obr. 109 zobrazuje stav zkušebních těles 80°C pod teplotou tání PA9T. Zkušební tělesa se nedeformují, nemění svůj tvar ani barvu.

PA9T (B) [t = 60 min, T = 250°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)

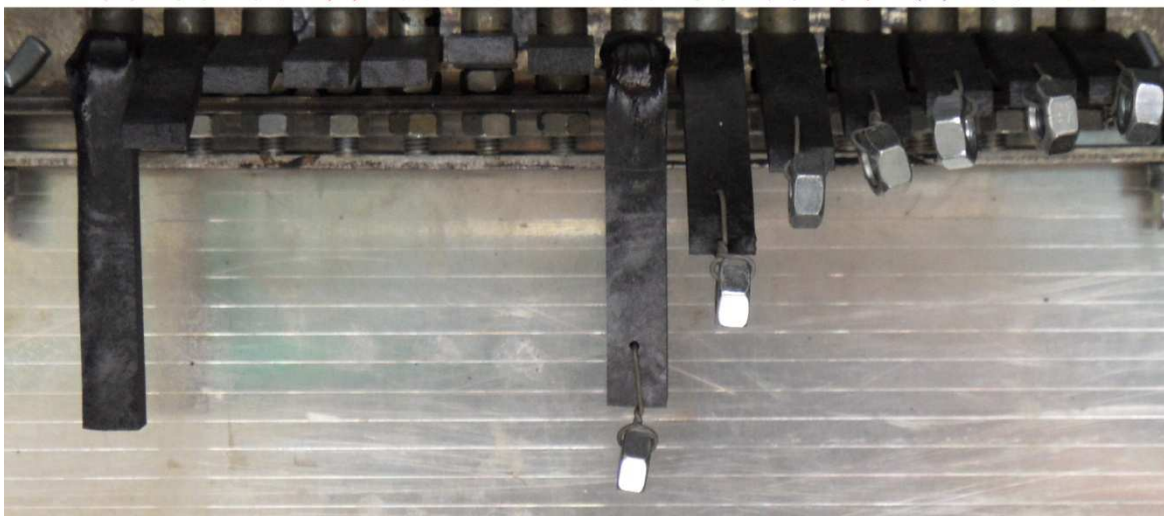


Obr. 110 Zobrazení zkušebních těles PA9T v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 250°C

Obr. 110 zobrazuje stav zkušebních těles 50°C pod teplotou tání PA9T. Zkušební tělesa se nedeformují, nemění svůj tvar, ale barva se vlivem degradace začíná měnit.

PA9T (C) [t = 90 min, T = 300°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 111 Zobrazení zkušebních těles PA9T v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 300°C

Obr. 111 zobrazuje stav zkušebních těles při teplotě tání PA9T. Zkušební těleso č. 1. se roztavilo. Zkušební tělesa č. 2. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa zčernala, ale mají stejný tvar.

PA9T (D) [t = 120 min, T = 350°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.)



Obr. 112 Zobrazení zkušebních těles PA9T v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 350°C

Obr. 112 zobrazuje stav zkušebních těles 50°C nad teplotou tání PA9T. Zkušební tělesa č. 2. až č. 7. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa zvětšila svůj objem a změnil se tvar i povrch. Barva zkušebních těles je černá vlivem působení degradace.

10.4.4.3 Zhodnocení teplotní odolnosti PA9T

Neozářený PA9T je použitelný dlouhodobě do 120°C a krátkodobě do 250°C. Radiačním síťováním získává PA9T teplotní odolnost o 20% větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesíťování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezatíženými a zatíženými jsou patrné z obr. 111. S rostoucí teplotou se zkušební tělesa deformují, degradují a tím mění svou barvu a povrch. U sesíťovaných zkušebních těles zůstává tvar nezměněn až do teploty 350°C, kdy zkušební tělesa zvětší svůj objem několikanásobně.

10.4.5 Polyamid 6 (PA6)

Materiál: FRIANYL B63 VN schwarz, FRISSETTA

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4)mm

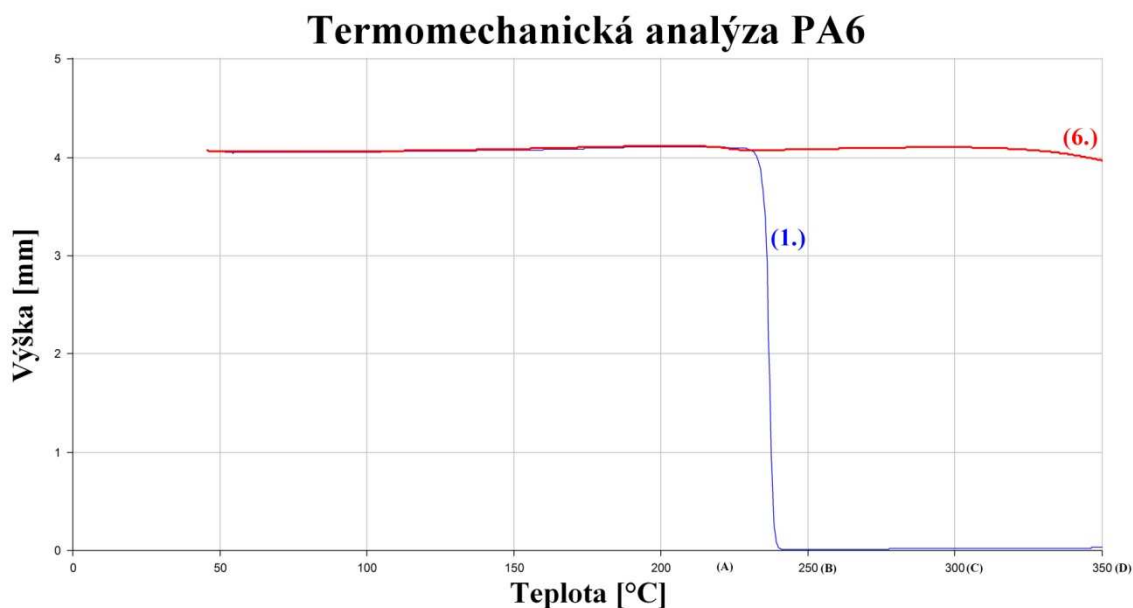
- 2. PA6 ozářený dávkou 15kGy
- 3. PA6 ozářený dávkou 30kGy
- 4. PA6 ozářený dávkou 45kGy
- 5. PA6 ozářený dávkou 66kGy
- 6. PA6 ozářený dávkou 99kGy
- 7. PA6 ozářený dávkou 132kGy
- 8. PA6 ozářený dávkou 165kGy
- 9. PA6 ozářený dávkou 198kGy

Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Pec MIWY CalorK
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.4.5.1 Termomechanická analýza PA6

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 113 graficky znázorňuje chování PA6 při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahřívaného zkušebního tělesa dle programu.



Obr. 113 Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA6 v různých dávkách ozáření

Zkušební těleso č. 1. se při teplotě 230°C začne tavit. Zkušební těleso č. 6. má i při 350°C teplotní stabilitu.

10.4.5.2 Zkouška teplotní odolnosti PA6

Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 33 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 33 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA6 s jednotlivými teplotami

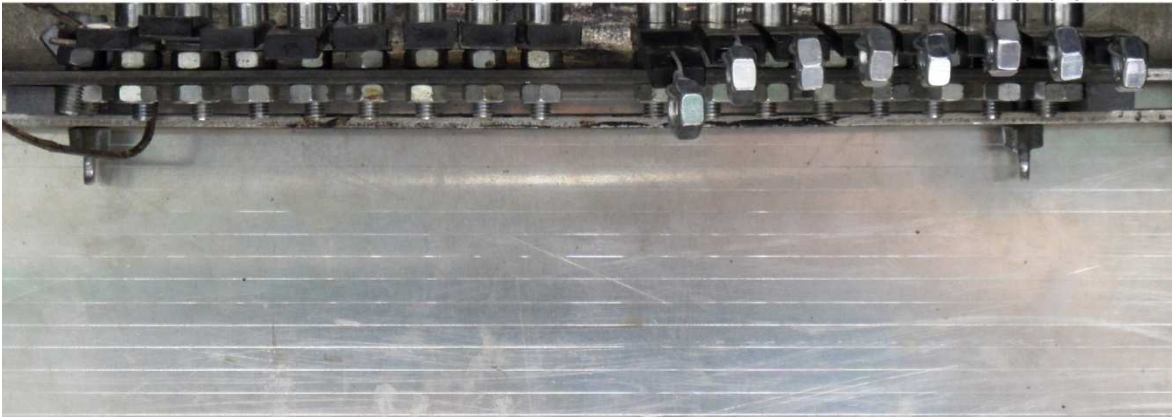
Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**
0	90	74	50	250	257
5	90	86	60	250	257
10	90	89	70	300	290
15	250	174	80	300	301
20	250	225	90	300	302
25	250	217	100	350	324
30	250	227	110	350	337
40	250	254	120	350	350

* Nastavená teplota, ** Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivé zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

PA6 (A) [t = 30 min, T = 220°C]

(2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)

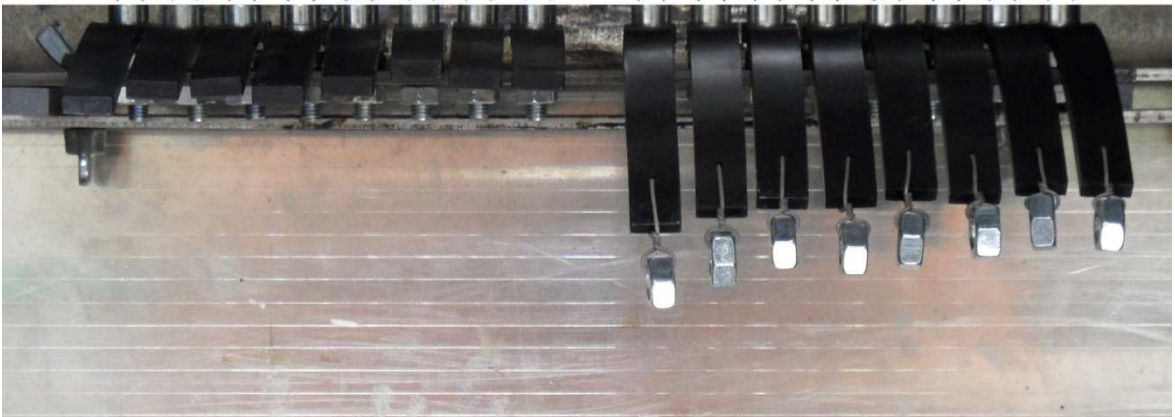


Obr. 114 Zobrazení zkušebních těles PA6 v různých dávkách ozáření v čase 30min. o teplotě 220°C

Obr. 114 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C pod teplotou tání PA6. Zkušební tělesa se nedeformují, nemění svůj tvar ani barvu.

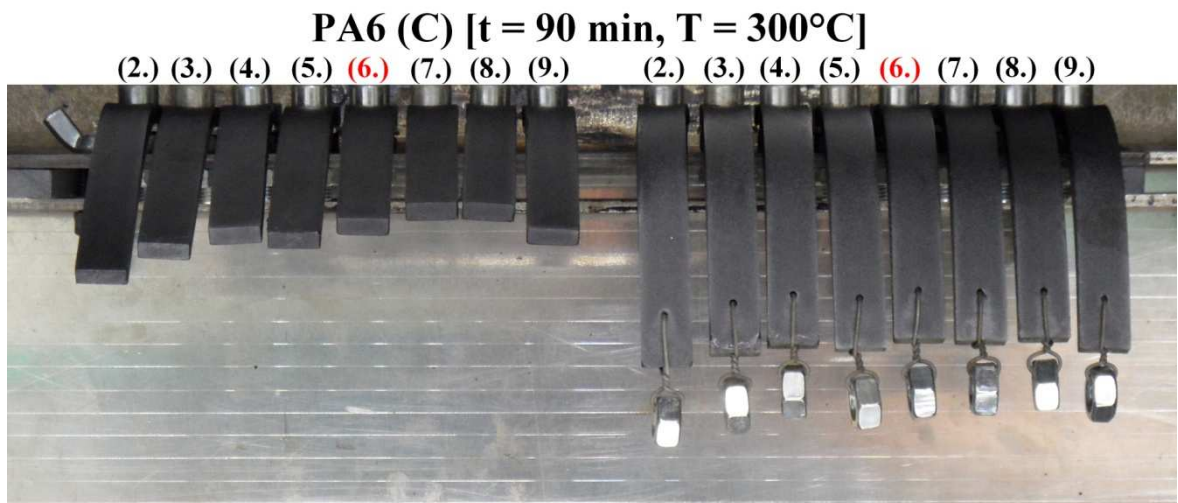
PA6 (B) [t = 60 min, T = 250°C]

(2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)



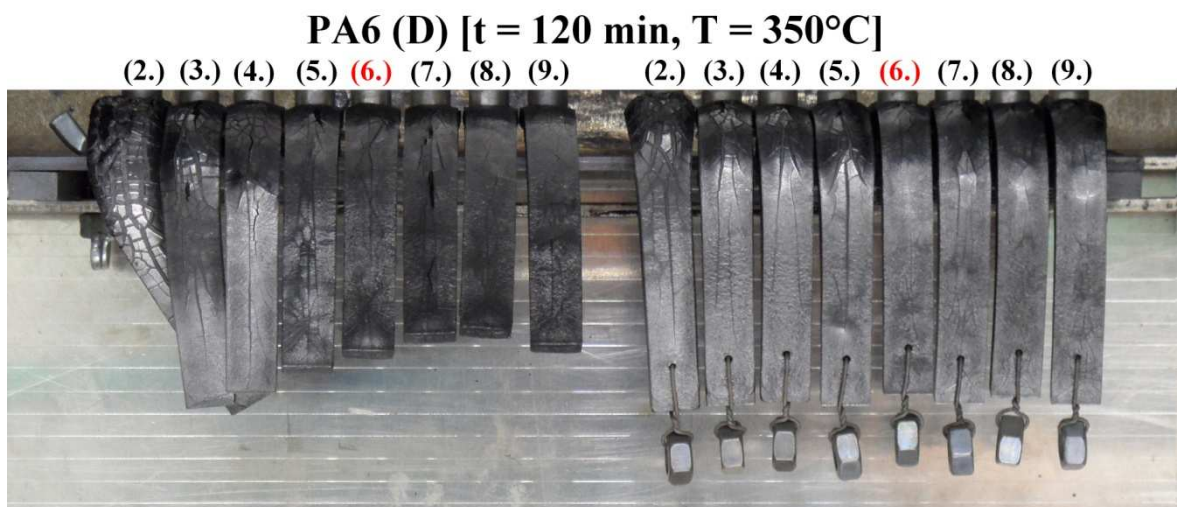
Obr. 115 Zobrazení zkušebních těles PA6 v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 250°C

Obr. 115 zobrazuje stav zkušebních těles 20°C nad teplotou tání PA6. Zkušební tělesa č. 2. až č. 9. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa mají stejný tvar, barvu nelze hodnotit.



Obr. 116 Zobrazení zkušebních těles PA6 v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 300°C

Obr. 116 zobrazuje stav zkušebních těles 70°C nad teplotou tání PA6. Zkušební tělesa č. 2. až č. 9. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa mají stejný tvar, barvu nelze hodnotit.



Obr. 117 Zobrazení zkušebních těles PA6 v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 350°C

Obr. 117 zobrazuje stav zkušebních těles 120°C nad teplotou tání PA6. Zkušební tělesa č. 2. až č. 9. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa zvětšila svůj objem. Změnil se povrch zkušebních těles barvu nelze hodnotit.

10.4.5.3 Zhodnocení teplotní odolnosti PA6

Neozářený PA6 je použitelný dlouhodobě do 90°C a krátkodobě do 180°C. Radiačním sesíťováním získává PA6 teplotní odolnost o 50% větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesíťování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezatíženými a zatíženými jsou patrné z obr. 116. S rostoucí teplotou se zkušební tělesa deformují, degradují a mění se povrch. U sesíťovaných zkušebních těles zůstává tvar nezměněn až do teploty 350°C, kdy zkušební tělesa zvětší svůj objem a povrch popraská.

10.4.6 Plněný polyamid 6 (PA6 30%GF)

Materiál: FRIANYL B63 VN GV30 schwarz 905, FRISETTA

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4)mm

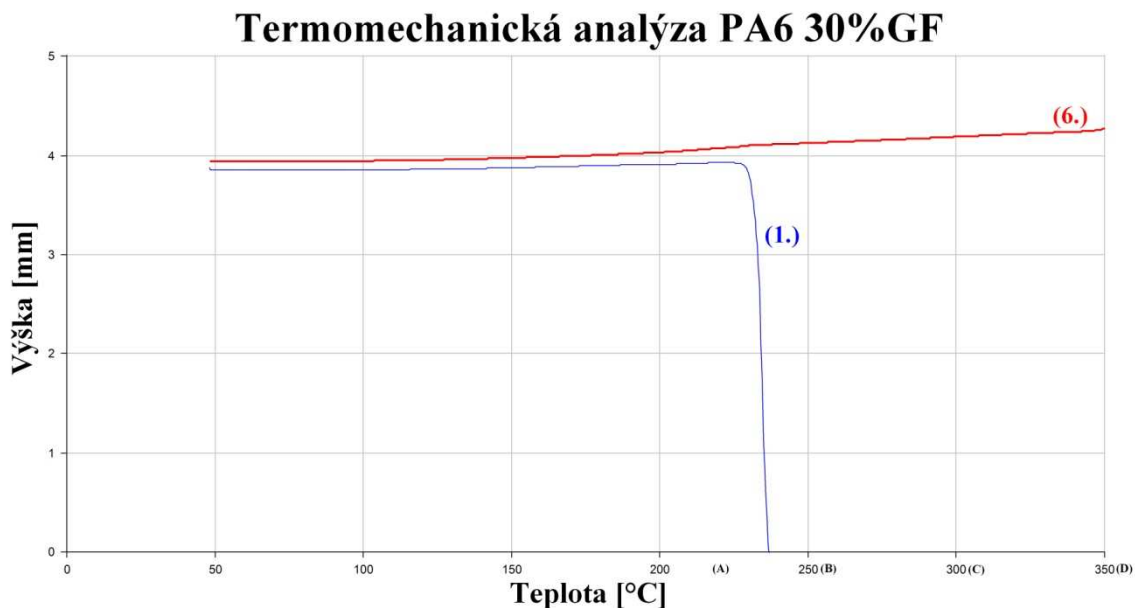
- 1. PA6 30%GF neozářený
- 2. PA6 30%GF ozářený dávkou 15kGy
- 3. PA6 30%GF ozářený dávkou 30kGy
- 4. PA6 30%GF ozářený dávkou 45kGy
- 5. PA6 30%GF ozářený dávkou 66kGy
- 6. PA6 30%GF ozářený dávkou 99kGy
- 7. PA6 30%GF ozářený dávkou 132kGy
- 8. PA6 30%GF ozářený dávkou 165kGy
- 9. PA6 30%GF ozářený dávkou 198kGy

Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Pec MIWY CalorK
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.4.6.1 Termomechanická analýza PA6 30%GF

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 118 graficky znázorňuje chování PA6 30%GF při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahřívajícího zkušebního tělesa dle programu.



Obr. 118 Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA6 30%GF v různých dávkách ozáření
Zkušební těleso č. 1. se při teplotě 230°C začne tavit. Zkušební těleso č. 6. má i při 350°C teplotní stabilitu.

10.4.6.2 Zkouška teplotní odolnosti PA6 30%GF

Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 34 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 34 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA6 30%GF s jednotlivými teplotami

Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**
0	90	83	50	250	256
5	90	83	60	250	257
10	90	84	70	300	294
15	250	147	80	300	297
20	250	206	90	300	301
25	250	201	100	350	318
30	250	221	110	350	333
40	250	250	120	350	337

* Nastavená teplota, ** Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivé zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

PA6 30%GF (A) [t = 30 min, T = 220°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)

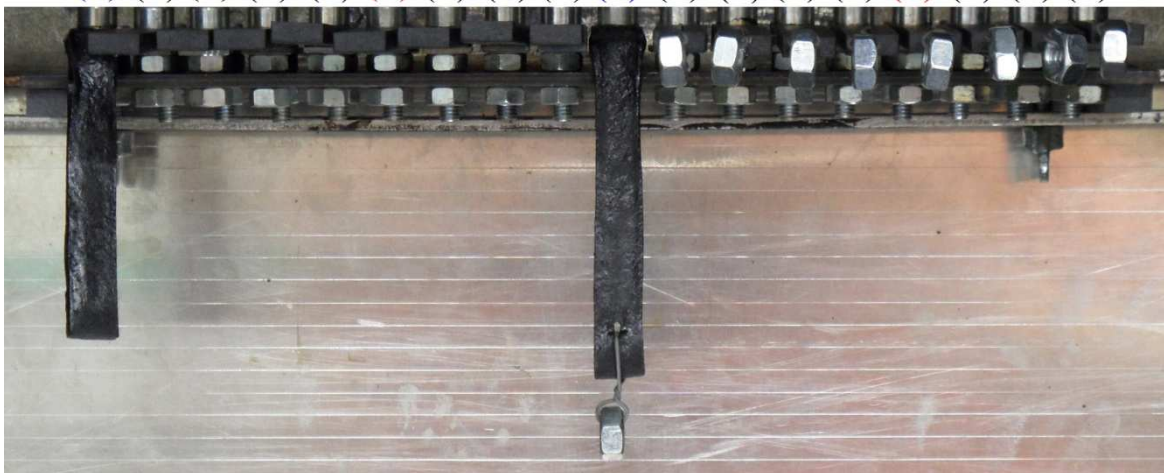


Obr. 119 Zobrazení zkušebních těles PA6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 30min. o teplotě 220°C

Obr. 119 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C pod teplotou tání PA6 30%GF. Zkušební tělesa se nedeformují, nemění svůj tvar ani barvu.

PA6 30%GF (B) [t = 60 min, T = 250°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)



Obr. 120 Zobrazení zkušebních těles PA6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 250°C

Obr. 120 zobrazuje stav zkušebních těles 20°C nad teplotou tání PA6 30%GF. Zkušební těleso č. 1. se roztavilo. Zkušební tělesa č. 2. až č. 9. se nedeformují a nemění svůj tvar. Barvu zkušebních těles nelze hodnotit.

PA6 30%GF (C) [t = 90 min, T = 300°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)

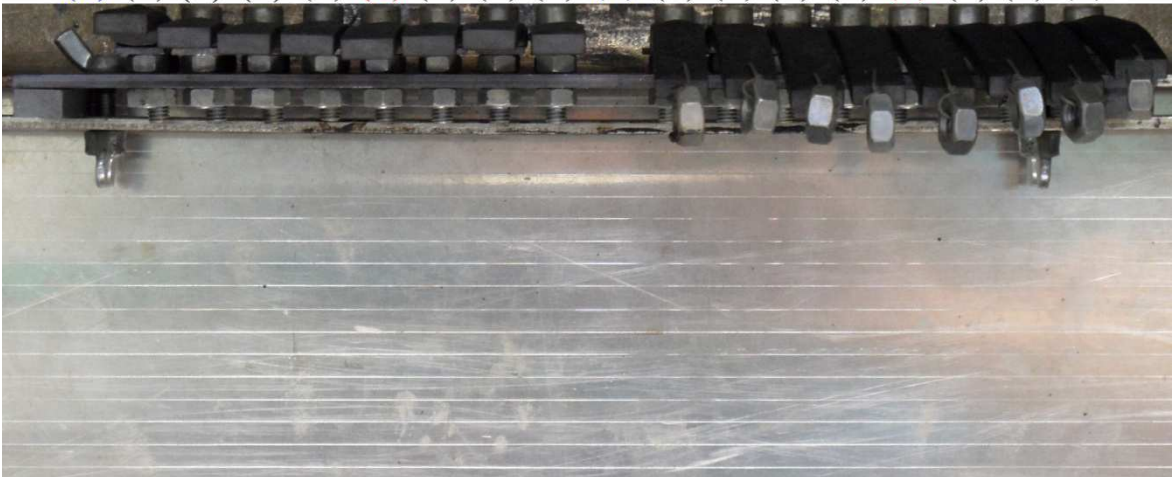


Obr. 121 Zobrazení zkušebních tělísek PA6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 300°C

Obr. 121 zobrazuje stav zkušebních těles 70°C nad teplotou tání PA6 30%GF. Zkušební tělesa č. 2. Až č. 9. se nedeformují a nemění svůj tvar. Barvu zkušebních těles nelze hodnotit.

PA6 30%GF (D) [t = 120 min, T = 350°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)



Obr. 122 Zobrazení zkušebních těles PA6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 350°C

Obr. 122 zobrazuje stav zkušebních těles 120°C nad teplotou tání PA6 30%GF. Zkušební tělesa č. 2. až č. 9. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa mírně zvětšila svůj objem. Změnil se povrch zkušebních těles, barvu nelze hodnotit.

10.4.6.3 Zhodnocení teplotní odolnosti PA6 30%GF

Neozářený PA6 30%GF je použitelný dlouhodobě do 130°C a krátkodobě do 200°C. Radičním sít'ováním získává PA6 30%GF teplotní odolnost o 50% větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesít'ování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezatíženými a zatíženými jsou patrné z obr. 122. S rostoucí teplotou se zkušební tělesa deformují, degradují a mění se povrch. U sesít'ovaných zkušebních těles zůstává tvar nezměněn až do teploty 350°C, kdy zkušební tělesa zvětší svůj objem a změní se povrch.

10.4.7 Plněný polyamid 6.6 (PA6.6)

Materiál: FRIANYL A63 VN schwarz, FRISSETTA

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4)mm

- 2. PA6.6 ozářený dávkou 15kGy
- 3. PA6.6 ozářený dávkou 30kGy
- 4. PA6.6 ozářený dávkou 45kGy
- 5. PA6.6 ozářený dávkou 66kGy
- 6. PA6.6 ozářený dávkou 99kGy
- 7. PA6.6 ozářený dávkou 132kGy
- 8. PA6.6 ozářený dávkou 165kGy
- 9. PA6.6 ozářený dávkou 198kGy

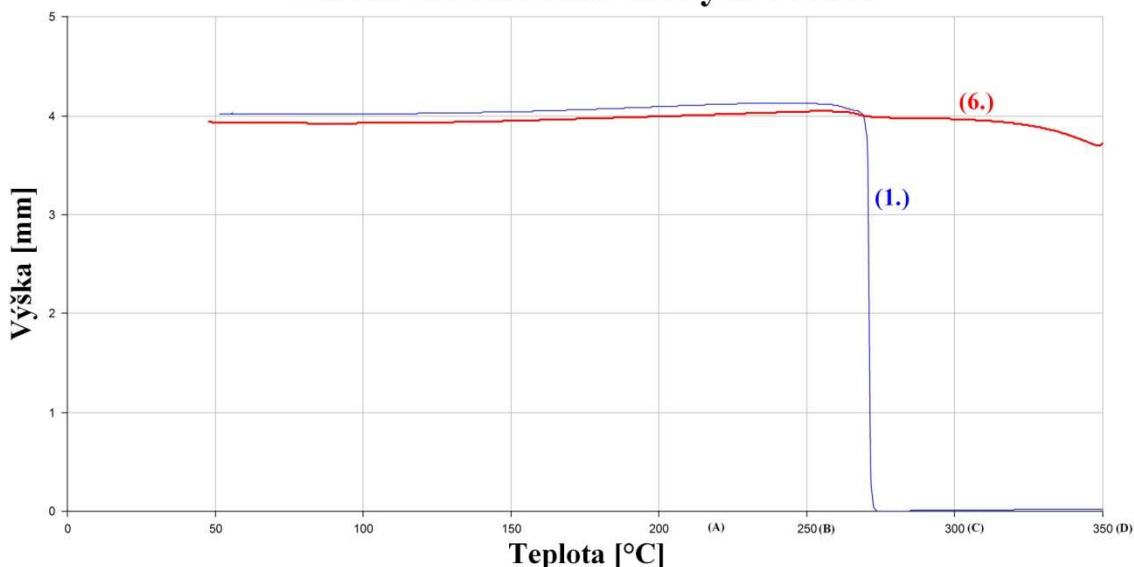
Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Pec MIWY CalorK
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.4.7.1 Termomechanická analýza PA6.6

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 123 graficky znázorňuje chování PA6.6 při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahřívajícího zkušebního tělesa dle programu.

Termomechanická analýza PA6.6



Obr. 123 Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA6.6 v různých dávkách ozáření

Zkušební těleso č. 1. se při teplotě 270°C začne tavit. Zkušební těleso č. 6. má i při 350°C teplotní stabilitu.

10.4.7.2 Zkouška teplotní odolnosti PA6.6

Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 35 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 35 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA6.6 s jednotlivými teplotami

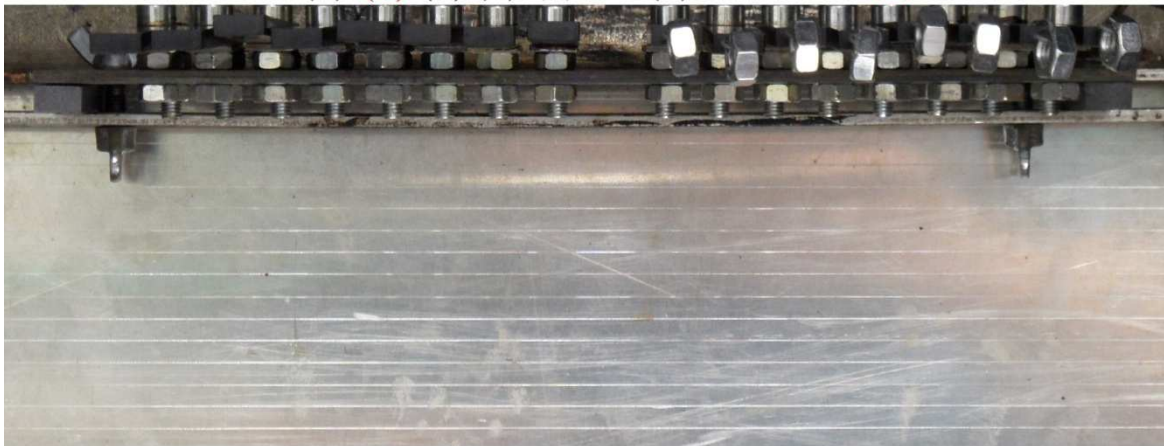
Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**
0	90	65	50	250	254
5	90	80	60	250	255
10	90	81	70	300	283
15	250	142	80	300	299
20	250	200	90	300	299
25	250	212	100	350	323
30	250	214	110	350	338
40	250	245	120	350	343

* Nastavená teplota, ** Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivé zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

PA6.6 (A) [t = 30 min, T = 220°C]

(2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)

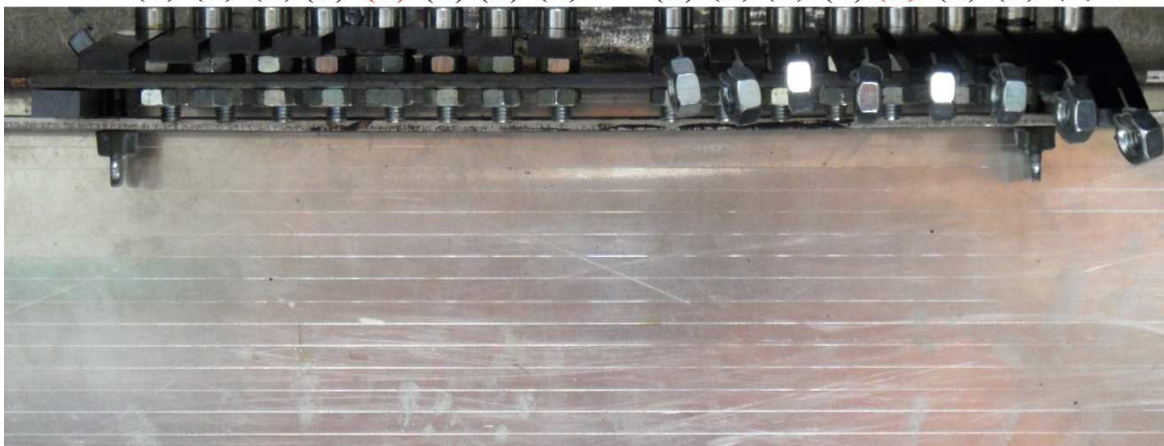


Obr. 124 Zobrazení zkušebních těles PA6.6 v různých dávkách ozáření v čase 30min. o teplotě 220°C

Obr. 124 zobrazuje stav zkušebních těles 40°C pod teplotou tání PA6.6. Zkušební tělesa se nedeformují, nemění svůj tvar ani barvu.

PA6.6 (B) [t = 60 min, T = 250°C]

(2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)

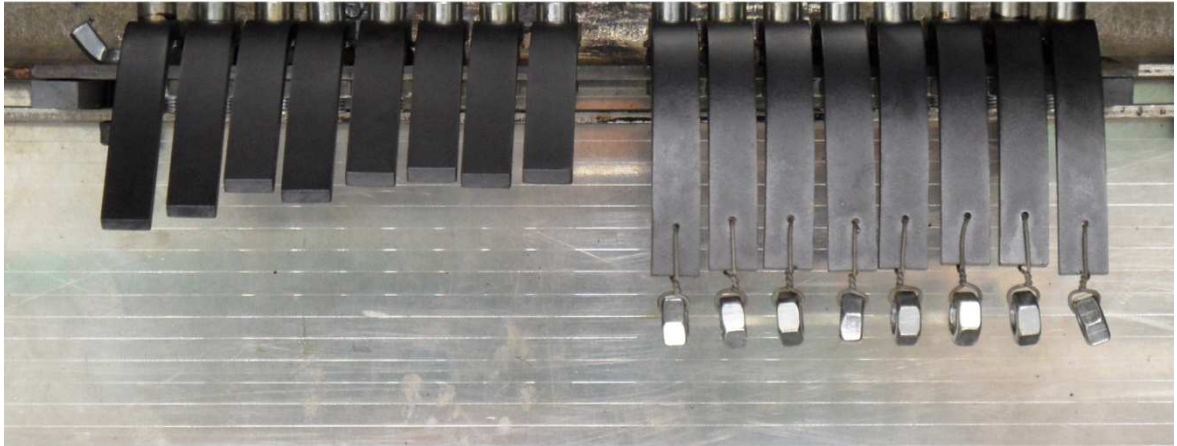


Obr. 125 Zobrazení zkušebních těles PA6.6 v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 250°C

Obr. 125 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C pod teplotou tání PA6.6. Zkušební tělesa č. 2. až č. 9. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa mají stejný tvar, barvu nelze hodnotit.

PA6.6 (C) [t = 90 min, T = 300°C]

(2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)



Obr. 126 Zobrazení zkušebních těles PA6.6 v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 300°C

Obr. 126 zobrazuje stav zkušebních těles 40°C nad teplotou tání PA6.6. Zkušební tělesa č. 2. až č. 9. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa mají stejný tvar, barvu nelze hodnotit.

PA6.6 (D) [t = 120 min, T = 350°C]

(2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)



Obr. 127 Zobrazení zkušebních tělísek PA6.6 v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 350°C

Obr. 127 zobrazuje stav zkušebních těles 90°C nad teplotou tání PA6.6. Zkušební tělesa č. 2. až č. 9. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa zvětšila svůj objem několikanásobně. Změnil se povrch zkušebních těles, barvu nelze hodnotit.

10.4.7.3 Zhodnocení teplotní odolnosti PA6.6

Neozářený PA6.6 je použitelný dlouhodobě do 100°C a krátkodobě do 200°C. Radiačním sít'ováním získává PA6.6 teplotní odolnost o 50% větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesít'ování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezatíženými a zatíženými jsou patrné z obr. 126. S rostoucí teplotou se zkušební tělesa deformují, degradují a mění se povrch. U sesít'ovaných zkušebních tělísek zůstává tvar nezměněn až do teploty 350°C, kdy zkušební tělesa zvětší svůj objem několikanásobně a povrch popraská.

10.4.8 Plněný polyamid 6.6 (PA6.6 30%GF)

Materiál: FRIANYL A63 VN GV30 schwarz 9005, FRISSETTA

Použitá zkušební tělesa: tyčinky (80x10x4)mm

- 1. PA6.6 30%GF neozářený
- 2. PA6.6 30%GF ozářený dávkou 15kGy
- 3. PA6.6 30%GF ozářený dávkou 30kGy
- 4. PA6.6 30%GF ozářený dávkou 45kGy
- 5. PA6.6 30%GF ozářený dávkou 66kGy
- 6. PA6.6 30%GF ozářený dávkou 99kGy
- 7. PA6.6 30%GF ozářený dávkou 132kGy
- 8. PA6.6 30%GF ozářený dávkou 165kGy
- 9. PA6.6 30%GF ozářený dávkou 198kGy

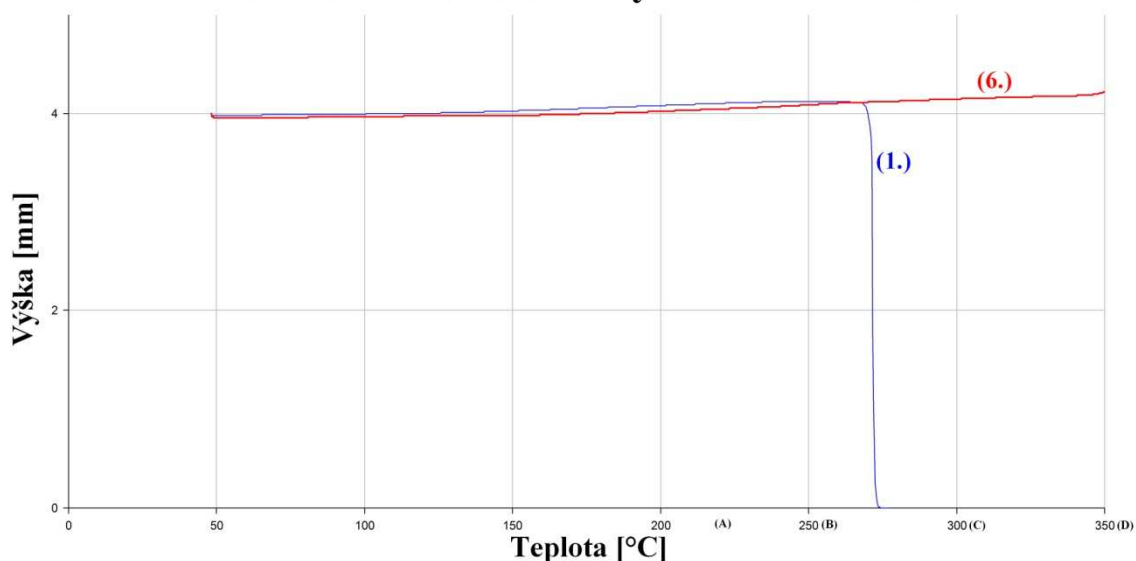
Použitá zařízení a pomůcky:

- Horkovzdušná trouba MORA
- Pec MIWY CalorK
- Přípravek do horkovzdušné trouby MORA
- Fotoaparát Samsung WB600
- Stativ na fotoaparát
- Posuvné měřidlo

10.4.8.1 Termomechanická analýza PA6.6 30%GF

Termomechanická analýza byla měřena Německou firmou BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg na přístroji Perkin Elmer DMA7e. Obr. 128 graficky znázorňuje chování PA6.6 30%GF při vnikání penetrační sondy při zatížení 10N do zahřívajícího zkušebního tělesa dle programu.

Termomechanická analýza PA6.6 30%GF



Obr. 128 Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA6.6 30%GF v různých dávkách ozáření. Zkušební těleso č. 1. se při teplotě 270°C začne tavit. Zkušební těleso č. 6. má i při 350°C teplotní stabilitu.

10.4.8.2 Zkouška teplotní odolnosti PA6.6 30%GF

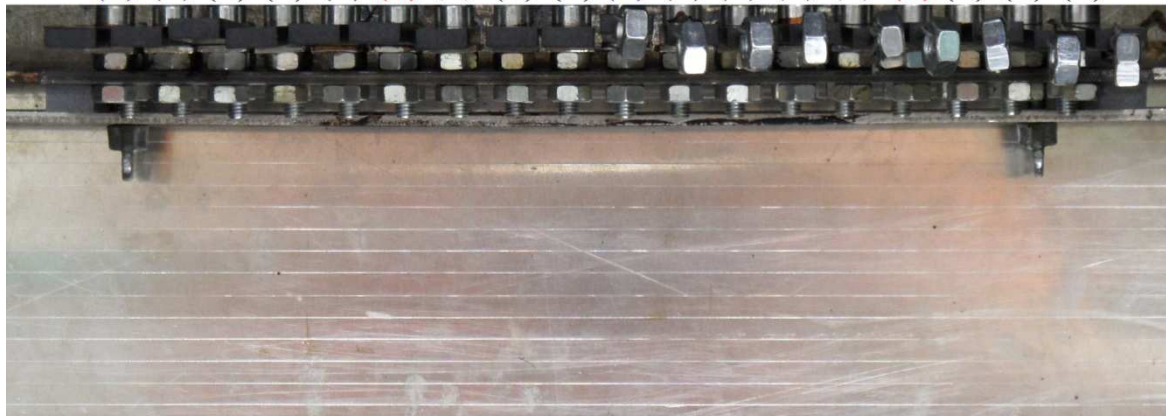
Tato zkouška má za úkol vizualizovat výsledky termomechanické analýzy. Tab. 36 znázorňuje jednotlivé časy pořízení snímků, nastavené a naměřené teploty.

Tab. 36 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA6.6 30%GF s jednotlivými teplotami

Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**	Čas [min.]	Teplota [°C]*	Teplota [°C]**
0	90	61	50	250	251
5	90	80	60	250	250
10	90	78	70	300	288
15	250	144	80	300	295
20	250	201	90	300	302
25	250	211	100	350	322
30	250	218	110	350	339
40	250	250	120	350	345

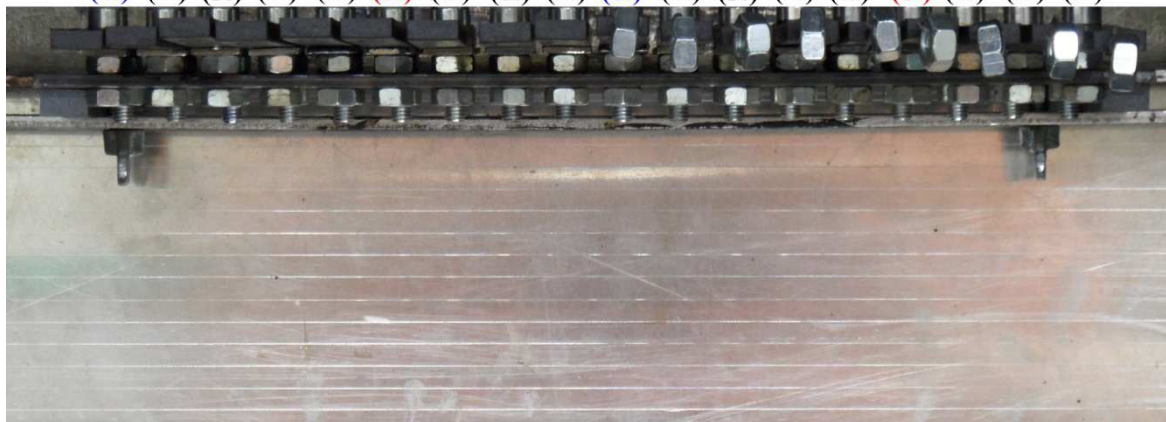
* Nastavená teplota, ** Skutečná teplota okolí

Následující obrázky zobrazují, jak se jednotlivé zkušební tělesa deformují a mění svou barvu při určitých teplotách a časech. Jednotlivé zkušební tělesa jsou pro jednodušší orientaci označena čísly, která jsou barevně rozlišena dle křivek termomechanické analýzy.

PA6.6 30%GF (A) [t = 30 min, T = 220°C]**(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)**

Obr. 129 Zobrazení zkušebních těles PA6.6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 30min. o teplotě 220°C

Obr. 129 zobrazuje stav zkušebních těles 40°C pod teplotou tání PA6.6 30%GF. Zkušební tělesa se nedeformují, nemění svůj tvar ani barvu.

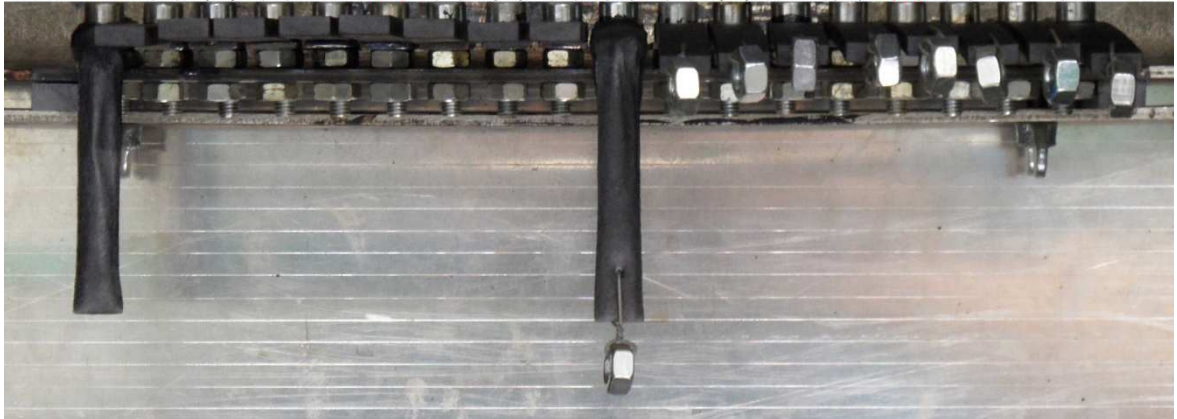
PA6.6 30%GF (B) [t = 60 min, T = 250°C]**(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)**

Obr. 130 Zobrazení zkušebních těles PA6.6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 250°C

Obr. 130 zobrazuje stav zkušebních těles 10°C pod teplotou tání PA6.6 30%GF. Zkušební tělesa se nedeformují a nemění svůj tvar. Barvu zkušebních těles nelze hodnotit.

PA6.6 30%GF (C) [t = 90 min, T = 300°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)



Obr. 131 Zobrazení zkušebních těles PA6.6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 300°C

Obr. 131 zobrazuje stav zkušebních těles 40°C nad teplotou tání PA6.6 30%GF. Zkušební těleso č. 1. se roztavilo. Zkušební tělesa č. 2. až č. 9. se nedeformují a nemění svůj tvar. Barvu zkušebních těles nelze hodnotit.

PA6.6 30%GF (D) [t = 120 min, T = 350°C]

(1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.) (1.) (2.) (3.) (4.) (5.) (6.) (7.) (8.) (9.)



Obr. 132 Zobrazení zkušebních těles PA6.6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 350°C

Obr. 132 zobrazuje stav zkušebních těles 90°C nad teplotou tání PA6.6 30%GF. Zkušební tělesa č. 2. až č. 9. se deformují pod svou tíhou, ale mají určitou pevnost. Zkušební tělesa mírně zvětšila svůj objem. Změnil se povrch zkušebních těles, barvu nelze hodnotit.

10.4.8.3 Zhodnocení teplotní odolnosti PA6.6 30%GF

Neozářený PA6.6 30%GF je použitelný dlouhodobě do 130°C a krátkodobě do 240°C. Radiačním sít'ováním získává PA6.6 30%GF teplotní odolnost o 50% větší. Tvarová stabilita se zvyšuje se stupněm sesít'ování. Rozdíly mezi zkušebními tělesy nezatíženými a zatíženými jsou patrné z obr. 132. S rostoucí teplotou se zkušební tělesa deformují, degradují a mění se povrch. U sesít'ovaných zkušebních těles zůstává tvar nezměněn až do teploty 350°C, kdy zkušební tělesa zvětší svůj objem a změní se povrch.

11 EKONOMICKO-TECHNICKÉ ASPEKTY POUŽITÍ RADIČNÍHO SÍŤOVÁNÍ

Výběr správného materiálu výrobků je velice komplikovaný. V dnešní době existuje velké množství jak konstrukčních, tak speciálních polymerních materiálů různých vlastností. Čím má polymerní materiál lepší vlastnosti, tím je zpravidla dražší. Každý konstruktér by vybral materiál s lepšími vlastnostmi, než by bylo nutné, ale ekonomicky je to nepřijatelné. Proto se volí kompromis respektující všechny požadavky. Co nejpřesněji se analyzuje maximální zatížení výrobků, zvolí se materiál, který toto zatížení s určitou bezpečností vydrží snášet po dobu své životnosti. Když z ekonomického hlediska tento materiál nevyhovuje, použijeme materiál horších vlastností, který se snažíme modifikovat tak, aby splňoval dané požadavky. Jednou z možností je radiační síťování pomocí ionizačního záření, kdy z termoplastického materiálu se stává materiál netavitelný. Tab. 37 zobrazuje teplotní vlastnosti polymerních materiálů a jejich cenu.

Tab. 37 Tepelné vlastnosti a ceny polymerních materiálů

Materiál	Zkratka	Struktura	T _g [°C]	T _m [°C]	Cena [Kč/kg]
Polystyren	PS	A	80 - 100	~	35
Styren akrylo nitril	SAN	A	80 - 100	~	40
Vysokohustotní polyetylen	HDPE	S-K	-80	135	30
Nízkohustotní polyetylen	LDPE	S-K	-80	110	40
Polypropylen	PP	S-K	-15	130	45
Akrylo nitril butadien styren	ABS	A	80 - 100	~	50
Polyetylenereftalat	PET	S-K		250	45
Polybutylenereftalat	PBT	S-K		225	45
Polybutylenereftalat plněný 30% GF	PBT 30%GF	S-K		225	55
Polyamid 6	PA6	S-K	30	220	60
Polyamid 6.6	PA6.6	S-K	30	260	60
Polyesterový termoplastický elastomer	TPE-E	S-K		190	130
Polyeterimid	PEI	A	220	~	280
Polyimid	PI	A	275	~	800
Polytetrafluoretylen	PTFE	S-K	-80	330	235
Polyetereterketon	PEEK	S-K		340	1440

Náklady na výrobu dílu z konstrukčních termoplastů, např. PA6 a následné radiační sítování 100kGy by byl součet ceny za materiál, nákladu na výrobu a ceny za ozáření výrobku. Ozařováním získáváme vlastnosti materiálu, zejména teplotní odolnost obdobnou jako u skupiny speciálních materiálů. Náklady na výrobu dílu ze speciálních polymerů např. PTFE by byl součet ceny za materiál a nákladů na výrobu. Řekněme, že náklady na výrobu dílu z PA6 a PTFE jsou podobné. Tímto zjednodušením nám vychází, že když cena materiálu s cenou za ozáření je menší, než cena výkonnějšího materiálu je to velice lákavé jak z hlediska ekonomického, tak z hlediska technického. Proto je velice důležité věnovat velkou pozornost studiu takto modifikovaných materiálů, aby nedocházelo k nepředvídatelným situacím. Tab. 38 zobrazuje cenu neozářeného a ozářeného materiálu dávkou 100kGy.

Tab. 38 Ceny materiálu neozářeného a ozářeného 100kGy

Materiál	Cena neozářeného materiálu [Kč/kg]	Cena ozářeného materiálu dávkou 100kGy [Kč/kg]
PE	40	80
PP	45	85
PET	45	85
PA6	60	100
PTFE	235	275
PEEK	1440	1480

ZÁVĚR

Náplní diplomové práce bylo zjistit teplotní odolnost u vybraných polymerních materiálů v různých dávkách ozáření. Pod pojmem teplotní odolnost rozumíme, jak se materiál chová při zvýšené a vysoké teplotě. U termomechanické analýzy zjišťujeme hloubku průniku měřící sondy průměru 1 mm² zatížené 10 N do zahřívaného materiálu dle programu. Vizualní zkouška teplotní odolnosti byla prováděna v horizontální poloze se zatížením ohybovým momentem od vlastní hmotnosti a od síly působící na konci zkušební tělesa (1,5 N.mm) v horkovzdušné troubě MORA a peci MIWY při zvýšených a vysokých teplotách.

První skupinou měřených materiálů byly **polyolefiny** (LDPE, HDPE, PP a PP 25%GF). Společným znakem modifikovaných polyolefinů je, že při teplotě 200°C začíná materiál degradovat, to znamená, že materiál mění barvu do hněda a mění se povrch vlivem silné oxidace. Můžeme konstatovat, že s dávkou ozáření roste teplotní odolnost a tvarová stabilita.

Zkušební tělesa **LDPE** s dávkou ozáření vyšší jak 66kGy se deformují pod svou tíhou při teplotě 100°C, ale se zvyšující teplotou, už se nedeformují, ale při extrémně vysokých teplotách degradují. Tvar zkušebních těles zůstává stále stejný, barva se mění rychle.

Zkušební tělesa **PP a PP 25%GF** s dávkou ozáření vyšší jak 15kGy se deformují pod svou tíhou při teplotě 170°C, ale se zvyšující teplotou, už se nedeformují, ale při extrémně vysokých teplotách degradují. Tvar zkušebních těles zůstává stále stejný, barva se mění pozvolna.

Druhou skupinou měřených materiálů byly **polyestery** resp. **PBT a PBT 35%GF**, které mají teplotu tání 225°C, při teplotě 250°C už rychle degradují. Zkušební tělesa s dávkou ozáření vyšší jak 66kGy si drží svůj tvar. Při teplotě 300°C je degradace tak silná že svůj tvar si zachovávají zkušební tělesa s dávkou ozáření vyšší jak 165kGy. Barva těchto zkušebních těles je černá.

Třetí skupinou měřených materiálů byly **termoplastické elastomery** resp. zkušební tělesa **TPE-E** ozářené dávkou vyšší jak 66kGy se deformují pod svou tíhou a při teplotě 200°C začínají degradovat, drží si svůj tvar. Při teplotě 250°C zkušební tělesa ozářené dávkou vyšší jak 99kGy rychle degradují, ale drží si svůj tvar.

Čtvrtou skupinou měřených materiálů byly **polyamidy** (PA11, PA12, PA9T, PA6, PA6 30%GF, PA6.6, PA6.6 30%GF). Společné znaky můžeme pozorovat u PA11 a PA12, kdy zkušební tělesa s rostoucí teplotou rychle degradují, ale od dávky ozáření vyšší jak

66kGy nemění svůj tvar. U zbývajících polyamidů je společným znakem, že při teplotě 350°C zvětší všechny ozářené zkušební tělesa svůj objem.

Zkušební tělesa **PA11** s dávkou ozáření vyšší jak 66kGy se deformují pod svou tíhou při teplotě 180°C, dále se pak mírně deformují až do své degradace. Tvar zkušebních těles zůstává stále stejný, barva se mění rychle.

Zkušební tělesa **PA12** s dávkou ozáření vyšší jak 33kGy se deformují pod svou tíhou při teplotě 180°C, dále se pak mírně deformují až do své degradace. Tvar zkušebních těles zůstává stále stejný, barva se mění rychle.

Zkušební tělesa **PA9T** s dávkou ozáření vyšší jak 33kGy se deformují pod svou tíhou při teplotě 250°C, dále se pak mírně deformují až do své degradace. Při teplotě 350°C prudce naroste objem ozářených zkušebních těles, barva se mění rychle.

Zkušební tělesa **PA6 a PA6 30%GF** s dávkou ozáření vyšší jak 33kGy se deformují pod svou tíhou při teplotě 250°C, dále se pak mírně deformují až do své degradace. Při teplotě 350°C prudce naroste objem ozářených zkušebních těles, tento nárůst není tak velký jako u PA6.6. Barvu zkušebních těles není možno sledovat, protože vzorky jsou stále černé.

Zkušební tělesa **PA6.6 a PA6.6 30%GF** s dávkou ozáření vyšší jak 33kGy se deformují pod svou tíhou při teplotě 250°C, dále se pak mírně deformují až do své degradace. Při teplotě 350°C prudce naroste objem ozářených zkušebních těles několikanásobně. Barvu zkušebních těles není možno sledovat, protože vzorky jsou stále černé.

Radiační síťování zlepšuje teplotní odolnost těchto materiálů, hlavně tvarovou stálost za tepla. Využití těchto materiálů v praxi musí být pečlivě zváženo, aby nedošlo k nesprávné aplikaci vlivem nedokonalého seznámení s těmito materiály. Tyto materiály se využívají v aplikacích, kde jsme přesvědčeni, že budou mít maximální užitek, protože po uplynutí životnosti je nelze zpracovávat běžnými způsoby. Dají se recyklovat. Recyklát se využívá v dalších aplikacích jako plnivo.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MCKEEN, Laurence W. The effect of temperature and other factors on plastics and elastomers [online]. 2nd ed. Norwich, N.Y. : William Andrew, 2008 [cit. 2011-01-12]. 822 s. Dostupné z WWW: <http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2063>. ISBN 9780815515685.
- [2] DOMININGHAUS, Hans. Plastics for Engineers : Material, Properties, Applications. Munich : Hanser, 1993. 785 s. ISBN 3446157239.
- [3] CAMPO, E. Selection of polymeric materials : how to select design properties from different standards [online]. Norwich, N.Y. : William Andrew, 2008 [cit. 2011-01-12]. 253 s. Dostupné z WWW: <http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2064>. ISBN 9780815515517.
- [4] POSPÍCHAL, Jan. Stránky Jana Pospíchala [online]. 2008 [cit. 2011-01-12]. Makromolekulární chemie. Dostupné z WWW: <<http://jan.pospichal.biz/kestazeni/Makromolekul%E1rn%ED%20chemie.pdf>>.
- [5] VLAS, Tomáš. Projekt Alfa [online]. 2003 [cit. 2011-01-12]. Polykondenzace. Dostupné z WWW: <<http://projektafa.ic.cz/polykondenzace.htm>>.
- [6] Polymery : Výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vratislav Ducháček. Praha : VŠCHT Praha, 1995. 354 s.
- [7] VLAS, Tomáš. Projekt Alfa [online]. 2003 [cit. 2011-01-12]. Polyadice. Dostupné z WWW: <<http://projektafa.ic.cz/polyadice.htm>>.
- [8] LAMBOROVÁ, Romana. Recyklace ozářených polymerů [online]. Zlín : UTB ve Zlíně, 2009. 89 s. Diplomová práce. UTB ve Zlíně. Dostupné z WWW: <https://portal.utb.cz/wps/PA_StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=11907>.
- [9] PTS marketing [online]. December 2010 [cit. 2011-05-10]. New Materials. Dostupné z WWW: <http://pts-marketing.de/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=15&Itemid=29&lang=en>.
- [10] *AstroNuklFyzika* [online]. 2009 [cit. 2011-05-10]. Jaderná a radiační fyzika. Dostupné z WWW: <<http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>>.

- [11] *Wikipedie* [online]. 30.4.2011 [cit. 2011-05-10]. Ionizující zařízení. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ionizuj%C3%ADc%C3%AD_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD>.
- [12] BGS [online]. 2011 [cit. 2011-05-10]. BGS. Dostupné z WWW: <www.bgs.de>.
- [13] ADÁMEK, Roman. *Vliv záření na vlastnosti vybraných plastů*. Zlín, 2008. 133 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati, fakulta technologická.
- [14] MEISSNER, B.; ZILVAR, V.: *Fyzika polymerů. Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1987. 308 s.
- [15] VÁLEK, Martin. *Vliv ozářování na mechanické a termomechanické vlastnosti polypropylénu*. Zlín, 2006. 134 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati, fakulta technologická.
- [16] SOVA, M., KREBS, J. a kolektiv. *Termoplasty v praxi*. Praha: ONTL, 2001. ISBN 80-86229-15-7
- [17] SDROBNÝ, J.G.: *Radiation Technology for Polymers*, Boca Raton: CRC Press, 2003
- [18] MELBERG, R. S.: *Radiation processing*, SRI, 1978
- [19] MENCEL, Joseph D; PRIME, R. *Thermal analysis of polymers*. Hoboken, N.J. : John Wiley, 2008. 688 s. ISBN 978-0-471-76917-0.
- [20] *Elektrorevue* [online]. 18.4.2008 [cit. 2011-05-10]. Teoretické a praktické aspekty termomechanické analýzy. Dostupné z WWW: <<http://www.google.cz/url?sa=t&source=web&cd=10&ved=0CFIQFjAJ&url=http%3A%2F%2Fwww.elektrorevue.cz%2Fcz%2Fdownload%2Fteoreticke-a-prakticke-aspekty-termomechanicke-analyzy%2F&ei=jHqsTbCWO4fIsgbiqfmZCA&usg=AFQjCNHAhxOHwneQEWwI0oiqyeVY1nQRQ>>.
- [21] Creep kovů a viskoelastické chování polymerů. *Studijní listy* [online]. 2009, 6, [cit. 2011-05-10]. Dostupný z WWW: <[http://www.google.cz/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CBcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwood.mendelu.cz%2Fcz%2Fsections%2FProps%2Ffiles%2Fverejny%2FMVD%2FStrnade1%2520-%2520Teorie%2520materialoveho%2520inzenyrstvi%2520%2B%2520nomogramy%2520\(CZ\)%2F06%2520-%2520Creep%2520kovu%2520a%2520viskoelasticke%2520chovani%2520polymeru.doc&ei=GiOtTcnMH43usgazqPHWDA&usg=AFQjCNEAoYpVqz8nE8wrDvbmLIutOYbeRg](http://www.google.cz/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CBcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwood.mendelu.cz%2Fcz%2Fsections%2FProps%2Ffiles%2Fverejny%2FMVD%2FStrnade1%2520-%2520Teorie%2520materialoveho%2520inzenyrstvi%2520%2B%2520nomogramy%2520(CZ)%2F06%2520-%2520Creep%2520kovu%2520a%2520viskoelasticke%2520chovani%2520polymeru.doc&ei=GiOtTcnMH43usgazqPHWDA&usg=AFQjCNEAoYpVqz8nE8wrDvbmLIutOYbeRg)>.
- [22] Konstrukční plasty. *Studijní listy* [online]. 2009, č. 3, [cit. 2011-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.google.cz/url?sa=t&source=web&cd=5&sqi=2&ved=0CDAQFjAE&url=http%3A%2F%2Fime.fme.vutbr.cz%2Ffiles%2Fvyuka%2F5FM%2FFM12%2520Konstrukcni%2520>>

- Opplasty.doc&ei=cyatTeL_EMyQswbgoYTYDA&usg=AFQjCNEg95uJ-4tqbCtiGCxgVXTVcUzqw>.
- [23] Viskoelastické modely. *Studijní listy* [online]. 2009, č. 2, [cit. 2011-05-10]. Dostupný z WWW: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_09.pdf
- [24] *Navajo* [online]. 31.1.2011 [cit. 2011-05-10]. Součinitel teplotní roztažnosti. Dostupné z WWW: <<http://soucinitel-teplotni-roztaznosti.navajo.cz/>>.
- [25] Analýza teplotních závislostí dielektrických parametrů s ohledem na. *Studijní listy* [online]. 2009, 2, [cit. 2011-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://ketersv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce3/98.pdf>>.
- [26] *Vševěd* [online]. 2011 [cit. 2011-05-10]. Modul pružnosti. Dostupné z WWW: <<http://encyklopedie.vseved.cz/Young%C5%AFv+modul>>.
- [27] Zkouška ohybem. *Studijní listy* [online]. 2008, 2, [cit. 2011-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.google.cz/url?sa=t&source=web&cd=4&ved=0CCsQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.fch.vutbr.cz%2Fhome%2Fprikryl%2Fpraktika%2Ffuloha9.doc&ei=VTOtTYPIA8ep8APm-ozzAQ&usg=AFQjCNGyGXag199eiS1aiRyRPsTnBScWag>>.
- [28] Tepelné vlastnosti plastů. *Studijní listy*, univerzita Liberec [online]. 2010, č. 3, [cit. 2011-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/projekty/frvs2660/poster1.pdf>>.
- [29] *Polymery*. Karel Veselý. Brno : ČSPCH, 1992. 178 s.
- [30] *MatNet* [online]. 2006 [cit. 2011-01-12]. Dostupný z WWW:<<http://www.matnet.sav.sk/>>.
- [31] *Slovnaft* [online]. 2006 [cit. 2011-05-10]. LDPE Nízkohustotný polyetylén. Dostupné z WWW: <http://www.slovnaft.sk/sk/obchodni_partneri/petchem/vyrobky/tvk-ldpe/>.
- [32] *DOW* [online]. 2011 [cit. 2011-05-10]. HDPE. Dostupné z WWW: <<http://www.dow.com/polyethylene/eu/en/prod/hdpe.htm>>.
- [33] *PTS* [online]. 2010 [cit. 2011-05-10]. PTS. Dostupné z WWW: <<http://pts-marketing.de/>>.
- [34] [Http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p14/polyestery.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p14/polyestery.pdf). *Studijní listy, univerzita Liberec* [online]. 2009, 3, [cit. 2011-05-10]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p14/polyestery.pdf>.
- [35] *Nilit plastics* [online]. 2011 [cit. 2011-05-10]. Nilit plastics. Dostupné z WWW: <<http://www.nilit.com/>>.
- [36] MIZERA, Aleš. *Teplotní odolnost vybraných polymerů*. Zlín, 2009. 102 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati, fakulta technologická.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

C	Uhlík
H	Vodík
n	polymerační číslo
PETP	Polyetylentereftalat
PVC	Polyvinylchlorid
PS	Polystyren
SAN	Styren-akrylo-nitril
ABS	Akronitril-butadien-styren
PMMA	Polymethylmetakrylat
PC	Polykarbonát
COC	Cyklický olefinový kopolymer
PES	Polyetersulfon
PEI	Polyeterimid
PI	Polyimid
TPE	Termoplastický elastomer
TPS	Termoplastický elastomer – styrenový blokový kopolymer
TPO	Termoplastický elastomer – kopolymer na základě polyolefinů
TPV	Termoplastický elastomer – kopolymer termoplastu a pryže (dynamické vulkanizáty)
TPC	Termoplastický elastomer – kopolymer ester, eter
TPU	Termoplastický elastomer – kopolymer na základě polyuretanů
TPA	Termoplastický elastomer – kopolymer na základě polyamidů
LDPE	Nízkohustotní polyetylen
HDPE	Vysokohustotní polyetylen
PP	Polypropylen
PMP	Poly-4-methylpentene-1
PBT	Polybutylentereftalat
PET	Polyetylentereftalat
PA	Polyamid

PPS	Poly(phenylene sulfide)
LCP	Tekuté krystalické polymery
PEEK	Polyetereterketon
FP	Fluoropolymery
α	Označení alfa záření
β	Označení beta záření
γ	Označení gama záření
He	Helium
e	Elektron
p	Proton
n	Neutron
m	Hmotnost
c	Rychlost světla
U	Napětí
E	Energie
kGy	Jednotka intenzity záření kilo Gray
TD	Termodilatometrie
TMA	Termomechanická analýza
T _g	Teplota skelného přechodu
T _m	Teplota tání krystalů
GF	Glass fibber = plnivo skelné vlákno
A	Amorfní polymer
S-K	Semikrystalický polymer

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Zjednodušené výrobní schéma výroby běžných polymerních materiálů (nepřetržitý) [3].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2 Zjednodušené výrobní schéma výroby běžných polymerních materiálů (přetržitý) [3]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3 Schéma rozdělení polymerů [2]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 4 Polymerace polyetyleny z etylenu [4]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 5 Struktura kopolymerů.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 6 Rovnice výroby PETP polykondenzací [5].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 7 Rovnice výroby polyuretanu polyadící [7].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 8 Základní rozdělení polymerů [6].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 9 Rozdělení polymerů dle jejich aplikace, struktury a ceny [9]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 10 Mezinárodní výstražný symbol, označující zdroj ionizujícího záření a nový doplňkový výstražný symbol ionizujícího záření [11]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 11 Základní obecné schéma radioaktivní přeměny a exponenciální zákon radioaktivní přeměny. [10]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 12 Základní schéma radioaktivity α. [10].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 13 Radioaktivita beta. Vlevo: Základní schéma radioaktivity β. Uprostřed: Spojité energetické spektrum záření β. Vpravo: Zvětšený detail koncové části spektra pro nulovou a nenulovou klidovou hmotnost neutrin. [10].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 14 Typické schéma radioaktivní přeměny jádra A na excitované jádro B* a jeho následné deexcitace za vyzáření fotonu záření γ[10].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 15 Zjednodušené schéma lineárního urychlovače elektrostatického (vlevo) a vysokofrekvenčního (vpravo). [10]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 16 Schematické znázornění betatronu. [10].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 17 Elektronové záření beta 1 – hloubka vniknutí elektronů; 2 – primární elektrony; 3 – sekundární elektrony; 4 – ozářený materiál [12]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 18 Záření gama 3 – sekundární elektrony; 4 – ozářený materiál; 5 – zapouzdržený zdroj záření Co^{60}; 6 – g kvanta [12]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 19 Hloubka průniku beta a gama záření, 1 – gama záření $60Co$, 1MeV 2 – elektrony 4,5MeV 3 – elektrony 20MeV[12]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 20 Schéma vzniku sítě: 1 – postupnými reakcemi nízkomolekulárních látek, 2 – síťovací polymerací, 3 - spojováním reaktivních konců nízkomolekulárních polymerů, 4 – nahodilým síťováním lineárních polymerů [14]</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 21 Charakteristika vlastností v závislosti na dávce ozáření [12].....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 22 Konstrukční uspořádání aparatury TMA a indukčního snímače polohy LVDT [20].....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 23 Měřicí sondy (shora: penetrační, makroexpanzní, expanzní) [20]</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 24 Detail uspořádání sonda-vzorek při měření tříbodového ohybu [20].....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 25 Aparatura TMA Q400 od firmy TA Instruments [20]</i>	<i>44</i>

Obr. 26 Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420C.....	52
Obr. 27 Rozměry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C.....	53
Obr. 28 Rozměry vnitřního prostoru vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C	53
Obr. 29 Cirkulace vzduchu v sušící jednotce ARBURG Thermolift 100-2	55
Obr. 30 Sušící jednotka ARBURG Thermolift 100-2.....	55
Obr. 31 Rozměry sušící jednotky ARBURG Thermolift 100-2.....	56
Obr. 32 Horkovzdušná trouba MORA 4807	58
Obr. 33 Ovládací panel horkovzdušné trouby MORA 4807	58
Obr. 34 Rozměry horkovzdušné trouby MORA 4807	59
Obr. 35 Pec MIWYcalor K v30.....	60
Obr. 36 Multimetr MY-64.....	61
Obr. 37 Perkin Elmer DMA 7e.....	62
Obr. 38 Fotoaparát Samsung WB600	63
Obr. 39 Grafické znázornění PE [1]	65
Obr. 40 Polymerace polypropylenu z propylenu [4].....	68
Obr. 41 Řetězec ataktického polypropylenu	68
Obr. 42 Řetězec izotaktického polypropylenu	69
Obr. 43 Řetězec syndiotaktického polypropylenu.....	69
Obr. 44 Aplikace TPE-E v praxi [12].....	74
Obr. 45 Pohled do prostoru vstřikovacího stroje před a po vyhození vzorku	78
Obr. 46 Roztřízené zkušební tělesa před radiačním sítováním	79
Obr. 47 Sídlo firmy BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, Kg lokalita Saal am Donau, SRN [12]	80
Obr. 48 Vyskládané zkušební tělesa před a po radiačním sítování.....	80
Obr. 49 Dozimetr před použitím.....	81
Obr. 50 Držák zkušebních těles	82
Obr. 51 Držáky zkušebních těles osazených v nosné desce	82
Obr. 52 3D model přípravku do horkovzdušné trouby MORA 4807	82
Obr. 53 Vestavba pece MIWY CalorK.....	83
Obr. 54 Grafické zobrazení termomechanické analýzy LDPE v různých dávkách ozáření.....	85
Obr. 55 Zobrazení zkušebních těles LDPE v různých dávkách ozáření v čase 35min. o teplotě 80°C	87
Obr. 56 Zobrazení zkušebních těles LDPE v různých dávkách ozáření v čase 65min. o teplotě 100°C.....	87
Obr. 57 Zobrazení zkušebních těles LDPE v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 120°C.....	88
Obr. 58 Zobrazení zkušebních těles LDPE v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 140°C.....	88

Obr. 59 Zobrazení zkušebních těles LDPE v různých dávkách ozáření v čase 155min. o teplotě 160°C.....	89
Obr. 60 Zobrazení zkušebních těles LDPE v různých dávkách ozáření v čase 220min. o teplotě 220°C.....	89
Obr. 61 Grafické zobrazení termomechanické analýzy HDPE v různých dávkách ozáření.....	91
Obr. 62 Zobrazení zkušebních těles HDPE v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 120°C.....	93
Obr. 63 Zobrazení zkušebních těles HDPE v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 140°C.....	93
Obr. 64 Zobrazení zkušebních těles HDPE v různých dávkách ozáření v čase 155min. o teplotě 160°C.....	94
Obr. 65 Zobrazení zkušebních těles HDPE v různých dávkách ozáření v čase 175min. o teplotě 180°C.....	95
Obr. 66 Zobrazení zkušebních těles HDPE v různých dávkách ozáření v čase 205min. o teplotě 200°C.....	95
Obr. 67 Zobrazení zkušebních těles HDPE v různých dávkách ozáření v čase 220min. o teplotě 220°C.....	96
Obr. 68 Grafické zobrazení termomechanické analýzy PP v různých dávkách ozáření.....	98
Obr. 69 Zobrazení zkušebních těles PP v různých dávkách ozáření v čase 85min. o teplotě 150°C.....	99
Obr. 70 Zobrazení zkušebních těles PP v různých dávkách ozáření v čase 100min. o teplotě 160°C.....	100
Obr. 71 Zobrazení zkušebních těles PP v různých dávkách ozáření v čase 130min. o teplotě 170°C.....	100
Obr. 72 Zobrazení zkušebních těles PP v různých dávkách ozáření v čase 165min. o teplotě 200°C.....	101
Obr. 73 Zobrazení zkušebních těles PP v různých dávkách ozáření v čase 190min. o teplotě 220°C.....	101
Obr. 74 Grafické zobrazení termomechanické analýzy PP 25%GF v různých dávkách ozáření.....	103
Obr. 75 Zobrazení zkušebních těles PP 25%GF v různých dávkách ozáření v čase 85min. o teplotě 150°C.....	104
Obr. 76 Zobrazení zkušebních těles PP 25%GF v různých dávkách ozáření v čase 100min. o teplotě 160°C.....	105
Obr. 77 Zobrazení zkušebních těles PP 25%GF v různých dávkách ozáření v čase 130min. o teplotě 170°C.....	105
Obr. 78 Zobrazení zkušebních těles PP 25%GF v různých dávkách ozáření v čase 145min. o teplotě 180°C.....	106
Obr. 79 Zobrazení zkušebních těles PP 25%GF v různých dávkách ozáření v čase 165min. o teplotě 200°C.....	106

<i>Obr. 80</i> Zobrazení zkušebních těles PP 25%GF v různých dávkách ozáření v čase 190min. o teplotě 220°C	107
<i>Obr. 81</i> Grafické zobrazení termomechanické analýzy PBT v různých dávkách ozáření	109
<i>Obr. 82</i> Zobrazení zkušebních těles PBT v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 220°C	110
<i>Obr. 83</i> Zobrazení zkušebních těles PBT v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 250°C	111
<i>Obr. 84</i> Zobrazení zkušebních těles PBT v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 300°C	111
<i>Obr. 85</i> Grafické zobrazení termomechanické analýzy PBT 35%GF v různých dávkách ozáření.....	113
<i>Obr. 86</i> Zobrazení zkušebních těles PBT 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 220°C	114
<i>Obr. 87</i> Zobrazení zkušebních těles PBT 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 250°C	115
<i>Obr. 88</i> Grafické zobrazení termomechanické analýzy TPE-E v různých dávkách ozáření.....	117
<i>Obr. 89</i> Zobrazení zkušebních těles TPE-E v různých dávkách ozáření v čase 70min. o teplotě 150°C	118
<i>Obr. 90</i> Zobrazení zkušebních těles TPE-E v různých dávkách ozáření v čase 110min. o teplotě 180°C	119
<i>Obr. 91</i> Zobrazení zkušebních těles TPE-E v různých dávkách ozáření v čase 140min. o teplotě 200°C	119
<i>Obr. 92</i> Zobrazení zkušebních těles TPE-E v různých dávkách ozáření v čase 160min. o teplotě 220°C	120
<i>Obr. 93</i> Zobrazení zkušebních těles TPE-E v různých dávkách ozáření v čase 190min. o teplotě 250°C	120
<i>Obr. 94</i> Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA11 v různých dávkách ozáření.....	123
<i>Obr. 95</i> Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 45min. o teplotě 100°C	125
<i>Obr. 96</i> Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 85min. o teplotě 150°C	125
<i>Obr. 97</i> Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 130min. o teplotě 180°C	126
<i>Obr. 98</i> Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 175min. o teplotě 200°C	126
<i>Obr. 99</i> Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 205min. o teplotě 220°C	127
<i>Obr. 100</i> Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 265min. o teplotě 250°C	128

<i>Obr. 101</i> Zobrazení zkušebních těles PA11 v různých dávkách ozáření v čase 295min. o teplotě 300°C.....	128
<i>Obr. 102</i> Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA12 v různých dávkách ozáření.....	130
<i>Obr. 103</i> Zobrazení zkušebních těles PA12 v různých dávkách ozáření v čase 85min. o teplotě 150°C.....	132
<i>Obr. 104</i> Zobrazení zkušebních těles PA12 v různých dávkách ozáření v čase 130min. o teplotě 180°C.....	132
<i>Obr. 105</i> Zobrazení zkušebních těles PA12 v různých dávkách ozáření v čase 175min. o teplotě 200°C.....	133
<i>Obr. 106</i> Zobrazení zkušebních těles PA12 v různých dávkách ozáření v čase 205min. o teplotě 220°C.....	133
<i>Obr. 107</i> Zobrazení zkušebních těles PA12 v různých dávkách ozáření v čase 265min. o teplotě 250°C.....	134
<i>Obr. 108</i> Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA9T v různých dávkách ozáření	136
<i>Obr. 109</i> Zobrazení zkušebních těles PA9T v různých dávkách ozáření v čase 30min. o teplotě 220°C.....	137
<i>Obr. 110</i> Zobrazení zkušebních těles PA9T v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 250°C.....	137
<i>Obr. 111</i> Zobrazení zkušebních těles PA9T v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 300°C.....	138
<i>Obr. 112</i> Zobrazení zkušebních těles PA9T v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 350°C.....	138
<i>Obr. 113</i> Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA6 v různých dávkách ozáření.....	140
<i>Obr. 114</i> Zobrazení zkušebních těles PA6 v různých dávkách ozáření v čase 30min. o teplotě 220°C.....	141
<i>Obr. 115</i> Zobrazení zkušebních těles PA6 v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 250°C.....	141
<i>Obr. 116</i> Zobrazení zkušebních těles PA6 v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 300°C.....	142
<i>Obr. 117</i> Zobrazení zkušebních těles PA6 v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 350°C.....	142
<i>Obr. 118</i> Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA6 30%GF v různých dávkách ozáření	144
<i>Obr. 119</i> Zobrazení zkušebních těles PA6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 30min. o teplotě 220°C.....	145
<i>Obr. 120</i> Zobrazení zkušebních těles PA6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 250°C.....	145
<i>Obr. 121</i> Zobrazení zkušebních tělísek PA6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 300°C.....	146

<i>Obr. 122</i> Zobrazení zkušebních těles PA6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 350°C	146
<i>Obr. 123</i> Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA6.6 v různých dávkách ozáření.....	148
<i>Obr. 124</i> Zobrazení zkušebních těles PA6.6 v různých dávkách ozáření v čase 30min. o teplotě 220°C	149
<i>Obr. 125</i> Zobrazení zkušebních těles PA6.6 v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 250°C	149
<i>Obr. 126</i> Zobrazení zkušebních těles PA6.6 v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 300°C	150
<i>Obr. 127</i> Zobrazení zkušebních tělísek PA6.6 v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 350°C	150
<i>Obr. 128</i> Grafické zobrazení termomechanické analýzy PA6.6 30%GF v různých dávkách ozáření	152
<i>Obr. 129</i> Zobrazení zkušebních těles PA6.6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 30min. o teplotě 220°C	153
<i>Obr. 130</i> Zobrazení zkušebních těles PA6.6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 60min. o teplotě 250°C	153
<i>Obr. 131</i> Zobrazení zkušebních těles PA6.6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 90min. o teplotě 300°C	154
<i>Obr. 132</i> Zobrazení zkušebních těles PA6.6 30%GF v různých dávkách ozáření v čase 120min. o teplotě 350°C	154

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Charakteristické hodnoty beta a gama záření [12]	32
Tab. 2 Polymery převážně degradující při ozařování [17].....	38
Tab. 3 Polymery převážně sítující při ozařování [12]	39
Tab. 4 Komerčně využitelné aplikace ionizačního záření [18].....	40
Tab. 5 Přehled aplikace měřících sond pro TMA [20]	45
Tab. 6 Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C.....	54
Tab. 7 Technické parametry sušící jednotky ARBURG THERMOLIFT 100-2	57
Tab. 8 Technické parametry horkovzdušné trouby MORA 4807	59
Tab. 9 Technické parametry pece MIWY CalorK	60
Tab. 10 Technické parametry multimetru MY-64	61
Tab. 11 Parametry měření teploty multimetru MY-64	61
Tab. 12 Parametry fotoaparátu Samsung WB600	63
Tab. 13 Vlastnosti polyetyleny [31], [32].....	67
Tab. 14 Vlastnosti polypropylenu [33]	70
Tab. 15 Vlastnosti polybutylentereftalatu [33]	71
Tab. 16 Vlastnosti polyesterového termoplastického elastomeru [33]	75
Tab. 17 Vlastnosti polyamidů [33]	77
Tab. 18 Vlastnosti polyamidů [35] ¹	77
Tab. 19 Přehled použitých materiálů	78
Tab. 20 Hodnoty vstřikování použitých materiálů	79
Tab. 21 Teplota tání u polyolefinů	84
Tab. 22 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti LDPE s jednotlivými teplotami	86
Tab. 23 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti HDPE s jednotlivými teplotami.....	92
Tab. 24 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PP s jednotlivými teplotami	99
Tab. 25 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PP 25%GF s jednotlivými teplotami.....	104
Tab. 26 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PBT s jednotlivými teplotami	110
Tab. 27 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PBT 35%GF s jednotlivými teplotami.....	114
Tab. 28 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti TPE-E s jednotlivými teplotami	118
Tab. 29 Teplota tání u polyamidů	121
Tab. 30 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA11 s jednotlivými teplotami	124
Tab. 31 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA12 s jednotlivými teplotami	131
Tab. 32 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA9T s jednotlivými teplotami	136
Tab. 33 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA6 s jednotlivými teplotami	140
Tab. 34 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA6 30%GF s jednotlivými teplotami.....	144
Tab. 35 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA6.6 s jednotlivými teplotami	148
Tab. 36 Časový profil zkoušky teplotní odolnosti PA6.6 30%GF s jednotlivými teplotami.....	152
Tab. 37 Tepelné vlastnosti a ceny polymerních materiálů.....	156
Tab. 38 Ceny materiálu neozářeného a ozářeného 100kGy	157