

Vplyv množstva sieťovacieho činidla na vlastnosti ožiareného polyamidu

Bc. Jozef Abrahám

Diplomová práca
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jozef ABRAHÁM**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Vplyv množstva sieťovacieho činidla na vlastnosti ožiareného polyamidu.**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na danou tému
2. Připravtekušební tělesa
3. Provedte soubor měření vybraných vlastností
4. Vyhodnoťte výsledky měření

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP.

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

Ústav výrobního inženýrství

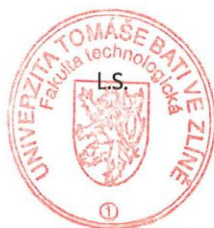
Datum zadání diplomové práce: **19. února 2010**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2010**

Ve Zlíně dne 20. ledna 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.
vedoucí katedry

Příjmení a jméno: Jozef Abrahám

Obor: KTZ

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 6/5/2010



.....

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 nevydávalečně 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 nahlášení 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 díla vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

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

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

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

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

ABSTRAKT

Daná diplomová práca sa zaoberá problematikou množstva sieťovacieho činidla na ožarovaný Polyamid 6.

V teoretickej časti sa rozoberá problematika výroby a rozdelenia polyamidov, ďalej spôsoby sieťovania. Taktiež sa oboznámime s problematikou ožarovania a zdrojmi jednotlivých žiarení. Spracované sú aj niektoré metódy merania mechanických vlastností polymérnych materiálov.

V praktickej časti sa stretávame s jednotlivými metódami merania mechanických vlastností, ich podrobnejší popis a s hodnotami, ktoré vychádzajú z meraní ako (medza pevnosti, modul pružnosti, vrubová húževnatosť). Dané metódy skúšania sú uskutočňované pri rôznych teplotách.

Kľúčové slová: polyamid, zdroje žiarení, Gama a Beta žiarenie, mechanické skúšanie vlastností polymérov, sieťovacie činidlo, sieťovanie

ABSTRACT

Current diploma thesis describes problematics about influence of amount of cross-linking agent onto irradiated Polyamide 6.

Theoretical part is dealing with topic of producing and dividing of polyamides, also ways how to cross-linking. In thesis will be also introduced problematic of irradiation and sources of types of irradiation. Thesis describes some of ways how to measure mechanical properties of polymer materials.

Practical part contains measurement methods of mechanical properties, their detail description and values like (tensile strength, E-modulus, impact toughness), which come out from measurements. The ways of measuring are realized with different temperatures.

Keywords: polyamide, source of irradiation, gamma and beta irradiation, mechanical measurements of properties of polymers, cross-linking agent, cross-linking

Chcel by som týmto spôsobom poďakovať vedúcemu doc.Ing Miroslavovi Maňasovi CSc. za pomoc pri vyhotovovaní diplomovej práce, za jeho vedenie ako aj užitočné rady a trpezlivosť.

Ďalej by som chcel poďakovať Ing. Zdeňkovi Holíkovi a Ing.Michalovi Daňkovi za pomoc pri experimentálnej časti a poskytnuté materiály na vyhodnotenie práce. V neposlednom rade ďakujem aj firme Obzor za vyhotovenie skúšobných teliesok a firme BGS Beta-Gama-service GmbH & Co. za následné ožiarenie vzorkov.

Súhlasím s tým že s výsledkami mojej práce môže byť naložené podľa uvážení vedúceho diplomovej práce a riaditeľa ústavu. V prípade publikácie budem uvedený ako spoluautor.

Prehlasujem že som na celej diplomovej práci pracoval samostatne a použitú literatúru som citoval. Ďalej prehlasujem že odovzdaná verzia diplomovej práce a verzia elektronická nahraná do IS/STAG sú totožné.

V zlíne 2009

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČASŤ	11
1 MATERIÁL A JEHO CHARAKTERISTIKY	12
1.1 POLYAMID VŠEOBECNE	12
1.2 VZNIK POLYAMIDOV	13
1.2.1 POLYKONDENZÁCIA DIAMÍNOV A KYSELÍN.....	14
1.2.2 SPÔSOB VÝROBY PA NA BÁZY DIAMÍNOV A KYSELÍN.....	15
1.2.3 AMK METÓDA.....	15
1.2.4 SPÔSOB AMK NA VÝROBU PA.....	16
1.3 MODIFIKOVANÉ POLYAMIDY	17
1.3.1 PLNENÉ POLYAMIDY.....	17
1.3.2 KOPOLYMÉRY POLYAMIDOV.....	18
1.3.3 VRÚBĽOVANÉ POLYAMIDY.....	18
1.3.4 POLYMERANALOGICKY ZMENENÉ POLYAMIDY.....	18
1.3.5 ZMIEŠANÉ POLYAMIDY.....	19
2 OŽAROVANIE	20
2.1 BETA ŽIARENIE	20
2.2 GAMA ŽIARENIE	21
2.3 ROZDIEL MEDZI BETA A GAMA ŽIARENÍM	23
2.4 ZDROJE ŽIARENIA	25
2.4.1 LINEÁRNE URÝCHĽOVAČE.....	26
2.4.2 KATÓDOVÝ LINEÁRNY URÝCHĽOVAČ.....	28
2.4.3 KRUGOVÉ URÝCHĽOVAČE.....	29
2.4.4 ZDROJ GAMA ŽIARENIA.....	36
3 SIEŤOVANIE	38
3.1 VZNIK SIETÍ	38
3.1.1 NÁHODNÉ SIEŤOVANIE LINEÁRNYCH POLYMÉROV.....	40
3.1.2 BOD GELÁCIE.....	41
3.1.3 IDEÁLNA SIEŤ.....	41
3.1.4 REÁLNA SIEŤ.....	43
3.2 SIEŤOVACIE PROSTRIEDKY	44
3.3 RADIAČNÉ SIEŤOVANIE	44
4 SKÚŠANIE POLYMÉROV	47
4.1 KONDICIOVANIE	48
4.2 ŤAHOVÁ SKÚŠKA	49
4.2.1 SKÚŠOBNÉ TELIESKA PRI ŤAHOVEJ SKÚŠKE.....	50
4.3 RÁZOVÁ SKÚŠKA	51

4.3.1	SKÚŠOBNÉ TELIESKA PRE RÁZOVÚ A VRUBOVÚ HÚŽEVNATOSŤ	52
4.3.2	RÁZOVÁ HÚŽEVNATOSŤ	53
4.3.3	VRUBOVÁ HÚŽEVNATOSŤ	53
II	PRAKTICKÁ ČASŤ	55
5	EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	56
5.1	POUŽITÍ MATERIÁL	56
5.1.1	SIETOVACIE ČINIDLO	56
5.2	OŽIARENIE VZORKOV	57
5.2.1	MERNÉ JEDNOTKY POUŽÍVANÉ PRI OŽAROVANÍ	60
5.3	STUPEŇ ZOSIETOVANIA.....	61
5.4	ŤAHOVÁ SKÚŠKA.....	63
5.4.1	ZARIADENIE NA ŤAHOVÚ SKÚŠKU	63
5.4.2	SKÚŠOBNÉ TELIESKO PRE ŤAHOVÚ SKÚŠKU.....	64
5.4.3	ŤAHOVÁ SKÚŠKA PRI TEPLOTE 23 ⁰ C.....	64
5.4.4	ŤAHOVÁ SKÚŠKA PRI TEPLOTE 100 ⁰ C.....	72
5.5	DYNAMICKÁ SKÚŠKA RÁZOM	77
5.5.1	ZARIADENIE NA MERANIE VRUBOVEJ A RÁZOVEJ HÚŽEVNATOSTI.....	78
5.5.2	SKÚŠOBNÉ TELIESKO.....	79
5.5.3	NAMERANÉ HODNOTY PRI POKOJOVEJ TEPLOTE 21 ⁰ C	80
5.5.4	NAMERANÉ HODNOTY PRI ZNÍŽENEJ TEPLOTE -30 ⁰ C.....	82
6	DISKUSIA VÝSLEDKOV	84
6.1	DISKUSIA ŤAHOVEJ SKÚŠKY	84
6.1.1	ŤAHOVÁ SKÚŠKA PRI TEPLOTE 23 ⁰ C.....	84
6.1.2	ŤAHOVÁ SKÚŠKA PRI TEPLOTE 100 ⁰ C.....	87
6.2	DISKUSIA RÁZOVEJ SKÚŠKY	89
6.2.1	RÁZOVÁ SKÚŠKA PRI TEPLOTE 21 ⁰ C.....	89
6.2.2	RÁZOVÁ SKÚŠKA PRI TEPLOTE - 30 ⁰ C.....	91
	ZÁVER.....	93
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	95
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK	96
	ZOZNAM OBRÁZKOV	98
	ZOZNAM TABULIEK	100
	PRÍLOHY.....	101

ÚVOD

Ľudstvo s pribúdajúcim časom prichádza na rôzne objavy, vynálezy a podobne. Tento nezastaviteľný vývoj je zapríčinený stále narastajúcimi potrebami a požiadavkami ľudí. Pokroky sa uskutočňujú v rôznych smeroch a odvetviach. Veľká zmena prišla aj z inováciami nových materiálov, ktoré viac uspokojujú požiadavky ľudí.

V poslednej dobe sa stali jedným z najpoužívanějších materiálov plasty. Polymérne materiály v poslednej dobe prešli obrovskými zmenami, čo sa týka ich inovácií. Stále častejšie nahrádzajú známe materiály ako kovy, drevo, keramiku atd. Hlavný dôvod je dostupnosť týchto materiálov, množstvo energie potrebné na výrobu a porovnateľnosť hlavných vlastností ako sú pevnosť, ťažnosť, hmotnosť a v neposlednom rade pestrosť produkcie týchto materiálov.

Známe sú rôzne praktiky ako sa dá dosiahnuť zlepšenia vlastností polymérov ako pridanie rôznych aditív a iných prídavných látok. V neposlednom rade aj sieťovanie polymérnych materiálov hrá dôležitú úlohu v ich inovácií. Sieťovanie je možné spustiť sieťovacími prostriedkami alebo radiačným ožarovaním. Pri radiačnom ožarovaní dochádza k chemickej zmene materiálu. Materiál sieťuje a zlepšuje tak svoje mechanické, chemické ale aj fyzikálne vlastnosti. Tento spôsob sieťovania má vysoký potenciál pre inováciu polymérov dnes aj do budúcnosti.

Táto práca sa bude zaoberať zmenami mechanických vlastností polyamidu ktorý, obsahuje sieťovacie činidlo. Mechanické zmeny materiálu budú dosiahnuté radiačným sieťovaním, ktoré bude uskutočnené vo firme, BGS Beta-Gama-service GmbH & Co a následne budú zmeny testované mechanickými skúškami.

TEORETICKÁ ČASŤ

1 MATERIÁL A JEHO CHARAKTERISTIKY

1.1 Polyamid všeobecne

Polyamidy patria medzi dôležitú skupinu polymérnych materiálov, ktorá sa vyznačujú vynikajúcimi mechanickými vlastnosťami. Všetky polyamidy obsahujú v molekule amidové skupiny $-NHCO-$, ktoré môžu byť usporiadané tromi rôznymi spôsobmi. Podľa tohto existujú tri základné typy polyamidov:

-pravidelne usporiadané so štruktúrou

$-NHCO-CONH-NHCO-CONH-NHCO-NHCO-NHCO-NHCO-$

-a zmiešaný typ

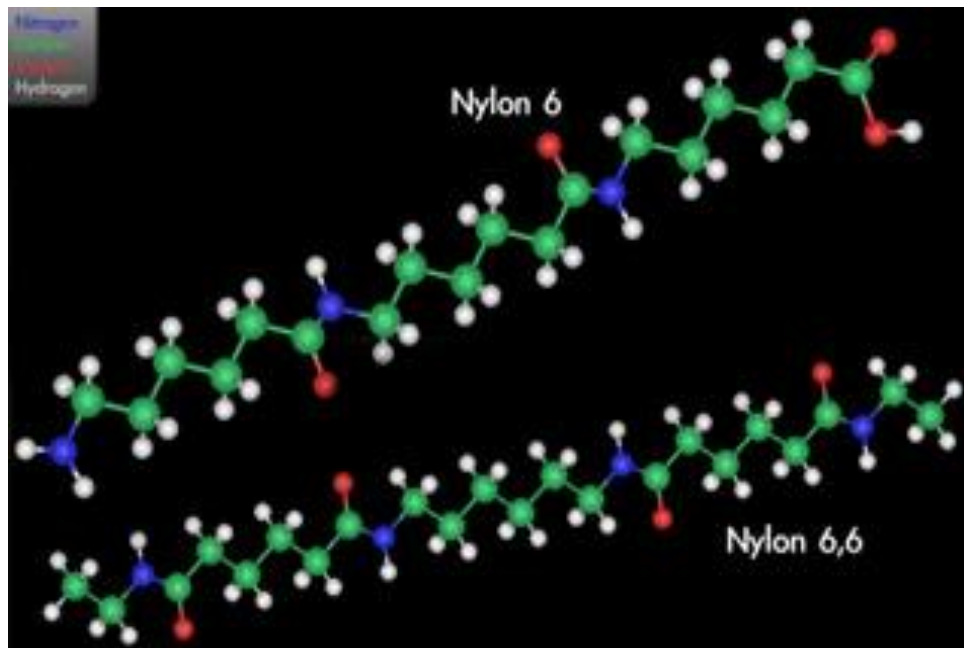
$-NHCO-CONH-NHCO-NHCO-$ [1]

Pravidelné usporiadanie lineárnych makromolekúl dáva predpoklad pre vysoký stupeň kryštalizácie polyamidov. Podiel kryštalickej fáze môže dosahovať až 60%.

Hustota takého polyméru sa pohybuje v rozmedzí $1100-1200 \text{ kg.m}^{-3}$. Vďaka svojim vynikajúcim mechanickým vlastnostiam, hlavne pevnosti v ťahu, ohybu, pomerne značnou tvrdosťou sa stali vyhľadávanými konštrukčnými plastmi napriek tomu, že cenovo nemôžu konkurovať hlavným masovo vyrábaným polymérom. Svojou vysokou odolnosťou voči oderu polyamidy prekonávajú väčšinu doposiaľ známych polymérov.

Rôzne varianty výrobných metód umožňujú pripravovať polyamidy extrémne odlišných vlastností. Od mäkkých ohybných materiálov po typy tvrdé a tuhé, typy amorfné, s nízkym a vysokým podielom kryštalickej fáze, polyamidy transparentné, prírodné aj farebné, polyamidy veľmi, stredne aj slabo navlhavé, viac alebo menej rázu vzdorné, vláknotvorné, oderuvzdorné, elastomerné typy, polyamidy antistatické, samo zhasínajúce, vystužené, so zvýšenou odolnosťou k termooxidácií, korózii, poveternostnému starnutiu atd. Spoločné vlastnosti pre všetky typy polyamidov sú: ľahká spracovateľnosť, relatívne vysoká húževnatosť, veľmi dobrá odolnosť proti opotrebeniu a únave, odolnosť voči olejom a pohonným hmotám. Nevýhodou je relatívne vysoká absorpcia vody a relatívne nízka odolnosť k poveternostnému starnutiu (spolupôsobenie slnečného žiarenia, kyslíku, vlhkosti

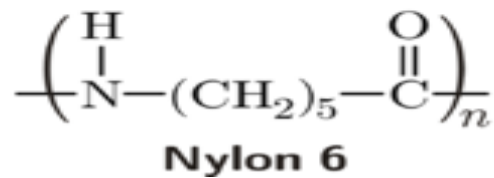
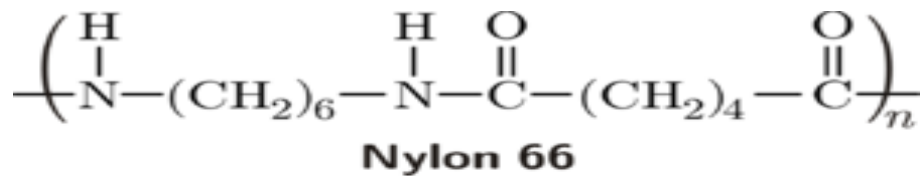
a kyslo reagujúcich plynných exhalácií). Účinkom termooxidačného starnutia dochádza predovšetkým k poklesu ťažnosti a rázovej húževnatosti. Tieto nevýhodné vlastnosti je však možné zmeniť vhodnými stabilizátormi. Polyamidy majú obdobné dobré elektrické vlastnosti ako väčšina ostatných plastov. Izolačný odpor, permitivita a stratový činiteľ je u všetkých typov polyamidov rovnaký. Všetky tieto vlastnosti sa však zhoršujú tj. dosahujú vyšších hodnôt s obsahom vlhkosti.



Obrázok 1 - Základné typy polyamidu

1.2 Vznik polyamidov

Vlastnosti každého vzniknutého polyamidu závisia od jeho štruktúry a od dĺžok úsekov medzi jednotlivými amidovými skupinami.



Obrázok 2 - Vzorce PA6 a PA66

Polyamidy sú technologicky vyrobiteľné štyrmi spôsobmi:

1. Polykondenzáciou diamínov a dikarboxylových kyselín
2. Polykondenzáciou diamínov a dichloridov dikarboxylových kyselín
3. Polykondenzáciou aminokyselín (AMK)
4. Polymerizáciou cyklických laktámov AMK [2]

1.2.1 Polykondenzácia diamínov a kyselín

Polykondenzácia je polyreakcia pri ktorej sa získa postupnou kondenzáciou monomérených látok makromolekulárny produkt za vzniku jednoduchej nízko molekulárnej reakčnej splodiny (najviac však vody, alkoholu, amoniaku, halogénvodíku, atd.) Reakcia prebieha postupne v celej hmote a vedľa už vzniknutých vysokomolekulárnych látok sú v zostave zastúpené aj nižšie polyméry vrátane ešte nezreagovaných častí monoméru. Oproti polymerácií nemá vytvorený produkt polykondenzáciou zhodné zloženie ako konečný monomér. Molekulovú hmotnosť polykondenzátu je možné ovplyvniť pridaním látok reagujúcich s reakčnými skupinami. K tomuto účelu sa často používajú jednosytné alkoholy, aminy alebo monokarboxylové kyseliny. Podľa funkčných skupín konečných zlúčenín môžu vznikať polykondenzáty buď lineárne (v prípade dvoch funkčných skupín) alebo trojrozmerné-priestorové (u konečných látok s tromi funkčnými skupinami). Polykondenzáciou sa okrem polyamidov pripravujú taktiež živice fenolformaldehydové, krezoformaldehydové, močovinoformaldehydové a polyesterové živice. [2]

1.2.2 Spôsob výroby PA na bázy diamínov a kyselín

Pre tento spôsob výroby polyamidov sú známe tieto najpoužívanejšie monoméry, a to kyselina adipová a kyselina sebaková a ich deriváty. Kyselina adipová sa vyrába z fenolu, benzénu, cyklohexanolu alebo cyklohexanu.

Oxidáciacyklohexanolu:

fenol → hydrogenácia → cyklohexanol → oxidácia → k.adipová

Druhá popísaná kyselina sebaková sa získava hydrolýzou ricínového oleja a štiepením vzniknutej kyseliny ricínolejovej pri zvýšenej teplote.

Najdôležitejším diamínom je hexametyléndiamín, ktorý sa priemyselne vyrába nasledovne:

-ide o katalickú redukciu dinitrilu kyseliny adipovej

Kyselina adipová → dinitril kyseliny adipovej → hexametyléndiamín

Hexametyléndián je taktiež prístupný i z butadiénu alebo z acetylénu a formaldehydu. [2]

1.2.3 AMK metóda

V polymerizácií ide v podstate o reťazovú reakciu veľkého počtu monomérnych látok za vzniku dlhých makromolekúl už novej polymérnej zlúčeniny, ktorá má však rovnaké elementárne zloženie ako konečná nízko molekulárna látka. Pri polymerizácií nevznikajú žiadne vedľajšie produkty a vznikajúci vysokomolekulárny reťazec narastá do svojej konečnej dĺžky vo veľmi krátkom čase. Polymerizácie sú schopné hlavne monoméry obsahujúce v molekule dvojnú väzbu ako napr. C=C, C=O, C=N atd.

K vyprovokovaniu celého polymerizačného procesu je nutné molekuly monoméru zaktivovať a to buď vonkajšími vplyvmi (svetlom, teplom, žiarením) alebo chemickým pôsobením to znamená ľahko sa aktivujúcim činidlom-katalyzátorom (často nazývaným pre tento účel taktiež iniciátorom)

Polymerizačné deje pri vytváraní makromolekulárnych reťazcov môžeme rozdeliť na tri hlavné fáze:

1. Iniciácia (začiatok reakcie)
2. Propagácia (rast reťazca)
3. Terminácia (zakoňčenie reťazca)

1.2.4 Spôsob AMK na výrobu PA

AMK sa vyrábajú rozličnými postupmi. Napríklad premenou chlórderivátov uhlíkov vzniknutých telomerizáciou etylénu s chloridom uhličitým na aminokyseliny pôsobením amoniaku a vody. Najdôležitejším zástupcom cyklických laktámov je ϵ -kaprolaktám. Pripravuje sa z fenolu, hydrogenáciou a oxidáciou sa získava cyklohexanón, ktorý podlieha Beckmannovmu prešmyku a dáva ϵ -kaprolaktám s dobrým výťažkom.

fenol \rightarrow hydrogenácia \rightarrow cyklohexanol \rightarrow dehydrogenácia \rightarrow cyklohexanon \rightarrow hydroxyamin \rightarrow cyklohexanonoxim \rightarrow Beckmanov prešmyk \rightarrow ϵ -kaprolaktám

Donedávna bola zrejماً pri výrobe monomérov tendencia maximálneho využívania ropy a ropných derivátov. V súčasnosti je nedostatok týchto surovín a preto je zrejماً odklon od tohto spôsobu produkcie. Preto sa zväčšuje využívanie prírodných a najmä rastlinných odpadov a zdrojov. Preto sa zdokonalili známe postupy výroby, napr. hexametyléndiamínu alebo kyseliny 11-aminoundekánovej a ustavične sa hľadajú možnosti syntéz ďalších monomérov nezávislých od ropy. Všetky monoméry musia mať veľkú čistotu, čo je podmienkou vzniku akéhokoľvek makromolekulového polyamidu.

Postup prípravy polyamidov metódami 1-3 vyššie uvedené, má spoločné črty vtom, že ide o polykondenzačnú reakciu medzi karboxylovými a aminovými skupinami. Pretože reakcie sú rovnovážne, je posun rovnováhy v prospech vzniku polyamidov podmienený odstraňovaním nízkomolekulových látok vznikajúcich pri polykondenzácii.

Pri polykondenzáciach možno vysoký polymerizačný stupeň dosiahnuť iba pri ekvimólovom pomere funkčných skupín. Presne ekvivalentný pomer karboxylových a aminových skupín 1:1 možno výhodne nastaviť i použitím soli diamínu a dikarboxylovej kyseliny. Namiesto kyseliny adipovej a hexametyléndiamínu sa používa tzv. soľ AH (kyselina adipová a hexametyléndiamín sú suroviny na výrobu vlákna nylon 66). Podobne existuje soľ SH. Okrem dokonalej ekvivalencie zaručuje soľ AH (SH) aj veľkú čistotu monoméru, pretože je kryštalická a dá sa teda lepšie vyčistiť ako nekryštalické monoméry kyselina adipová a hexametyléndiamín. V ČR sa priemyselne robí polymerizácia ϵ -kaprolaktámu. Čistý ϵ -kaprolaktám sám o sebe nepolymerizuje, na polymér sa mení až účinkom rôznych katalyzátorov. Podľa ich povahy sa mení kinetika reakcie. [13]

1.3 Modifikované polyamidy

Polyamidy sa modifikujú fyzikálne (rôzne prísady ako plnivá, retardéry horenia, pigmenty, antistatické prísady, mazadlá, nadúvadlá, zjasňovače, činidlá a podobne alebo chemicky a to (kopolymerizácia, rubovanie, polymeranalogické premeny, zmiešavanie polymérov). V priemysle sa používajú najviac nasledovné modifikácie.

1.3.1 Plnené polyamidy

Pre zlepšenie niektorých vlastností polyamidov a s cieľom rozšíriť ich aplikačné možnosti, boli vyvinuté typy polyamidov ktoré sú plnené sklenenými vláknami. Takéto polyamidy sa nazývajú aj kompozity. Polyamidy sú takto pripravené s väčšou pevnosťou, tuhosťou a sú tvarovo stálejšie. Zmenšila sa tepelná rozťažnosť a absorpcia vody.

V súčasnosti sú na svetovom trhu dostupné typy polyamidov s obsahom 15-50% sklenených vlákien. Zlepšenie vlastností je tým výraznejšie, čím sú sklenené vlákna dlhšie. S dĺžkou vlákien sa ale naopak zhoršuje spracovateľnosť, preto sú bežnejšie používané krátke vlákna. Plnenie polyamidov vláknami zjavne zlepšuje ich vlastnosti avšak treba spomenúť aj nevýhody. Jedná sa predovšetkým o orientáciu vlákien pri vstrekaní a ďalej vysoký oder

spracovateľských strojov vplyvom sklenených vlákien. Avšak obe tieto metódy je možné eliminovať inými plnivami ako (krieda, kaolín, slúda a pod.)

1.3.2 Kopolyméry polyamidov

V súčasnosti sa venuje veľa pozornosti kopolymerizácií 6-kaprolaktamu s jeho alkylderivátmi, ktoré sa dajú získavať zo zmesi krezolov rovnakým postupom, akým sa vyrába z fenolu 6-kaprolaktan. Výroba týchto kopolymérov sa používa pri výrobe masívnych blokov PA6 polymeračným odlievaním. Najviac pozornosti bolo venované dvom alebo viacerým polyamidotvorným monomérom hlavne kopolymerácií 6-kaprolaktamu s 12-dodekanlaktanom alebo termopolimerácií troch zo štyroch obvyklých zložiek: 6-kaprolaktamu, 12-dodekanlaktam, AH a SH soli. Termopolimeráciou je možné dosiahnuť zníženie intervalu tavenia až k teplote 100°C, kopolymery s týmito vlastnosťami sú dnes bežne vyrábané pod názvom tavné lepidlá pre aplikáciu v textilnom priemysle. Zavedenie aromatického jadra do kopolymeru znamená u polyamidov naopak zvýšenie bodu tavenia, zlepšenie tepelnej stability, ale zlepšenie farbitelnosti a podobne. [6]

1.3.3 Vrúbľované polyamidy

Metóda vrúbľovania je jednou z najefektívnejších metód modifikácie polyamidov, pretože vlastnosti polymérov sa menia nielen vlastným vrúbľovaním, ale aj štruktúrnymi zmenami, ku ktorým behom procesu dochádza. Väčšinou sa však používa vo vláknarských aplikáciách. Najbežnejšia je polymerácia vinylových alebo akrylových monomérov za prítomnosti polyamidov buď pôsobením peroxidov, alebo ožarovaním za prítomnosti vinylových alebo akrylových polymérov. V oboch prípadoch dochádza k navrúbľovaniu postranných reťazcov vinylového alebo akrylového typu na reťazec polyamidov. Väčšinou je cieľom vrúbľovania zlepšenie hygienických vlastností vlákien (zvýšenie absorpcie vody), zlepšenie farbitelnosti, spracovateľnosti a podobne.

1.3.4 Polymeranalogicky zmenené polyamidy

Rozsiahle možnosti poskytuje reaktívna amidová skupina aj obe koncové skupiny polyamidov. Najbežnejšou modifikáciou tohto typu je reakcia formaldehydu v kyslom prostredí za prítomnosti nižších alkoholov. Reakcia sa

obvykle uskutočňuje v roztoku polyamidov napr. v kyseline mravčej. Roztoky takto modifikovaných polyamidov sa používajú k výrobe povlakov, filmov a fólií, ich pevnosť ide zvýšiť dodatočným sieťovaním (napr. pôsobením kyselín) za vzniku metylénových mostov medzi reťazcami polyamidu.

1.3.5 Zmiešané polyamidy

Ďalšou významnou modifikáciou polyamidov sa v posledných rokoch stávajú ich vzájomné kombinácie alebo kombinácie polyamidov s inými polymérmi. Patria sem hlavne olefinické polyméry a kopolymery. Takéto zmesi sa vyznačujú zlepšenými rázovými vlastnosťami a to aj pri nízkych teplotách. Zmesi ktoré sa už bežne používajú na trhu sú PA/PP, PA/ABS, PA/elastomer. Neobvyklí avšak úspešne modifikovaný Trogamid T, je vyrobený polykondenzáciou kyseliny tereftalátovej a alkylovaného hexametyléndiaminu. Dôsledkom čiastočne amorfného charakteru polymérneho reťazca a taktiež prítomnosťou postranných substituentov sa svojimi vlastnosťami vymyká z rady ostatných polyamidov. Je amorfní a vyznačuje sa vysokou transparentnosťou. V porovnaní s PA 6,6 je cez podstatne nižšie zastúpenie amidových skupín tuhší, tvrdší a pevnejší. Uplatnenie nachádza v špeciálnych prípadoch kde je potrebná vysoká transparentnosť. [7]

2 OŽAROVANIE

Žiarenie ako také je prenos energie a hybnosti priestorom. Poznáme rôzne druhy žiarenia ako alfa, beta, gama, ultrafialové žiarenie a podobne.

Avšak na ožarovanie plastov za účelom zlepšenia ich vlastností sa používajú dve žiarenia a to beta žiarenie a gama žiarenie.

2.1 Beta žiarenie

Tento typ žiarenia sa delí na β^+ a β^- . Žiarenie β^- je tvorené prúdom záporne nabitých elektrónov. Jedná sa o žiarenie ktoré má väčšiu prenikavosť ako žiarenie alfa. Žiarenie β^+ je žiarenie tvorené kladne nabitými pozitronmi.

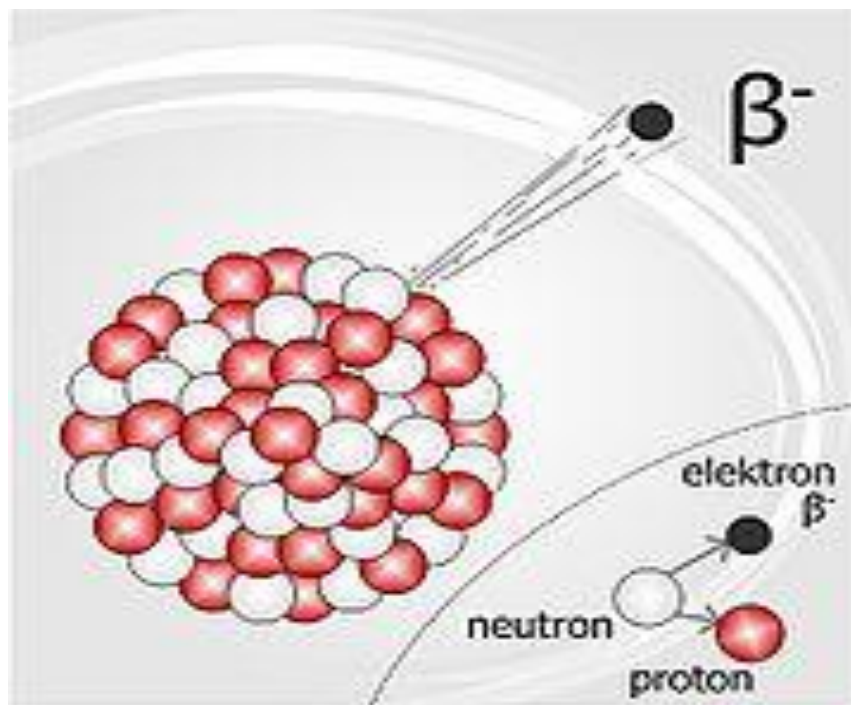
Rozpad β^- je charakteristický pre jadrá nuklidov, ktoré vybočujú z rieky stability počtom neutrónov. V takomto prípade sa môže niektorý z neutrónov premeniť na protón a elektrón. Protón zostáva v jadre na rozdiel od elektrónu ktorý jadro opúšťa. Jadro ktoré vznikne rozpadom β^- má o jeden protón viac. Vzniká nuklid, ktorý je v periodickej sústave vzhľadom k pôvodným prvkom posunutý o jedno miesto vpravo.

Pri rozpade β^+ niektoré umelo pripravené nuklidy vybočujú z rieky stability, pretože ich jadrá majú relatívny nadbytok protónov. V takýchto prípadoch môže dôjsť k premene niektorého z protónov na neutrón a pozitron.

Pozitron opúšťa jadro a veľmi rýchlo zaniká rekombináciou s elektrónom za vzniku fotónu. Pri rozpade vzniká nuklid, ktorý je v periodickej tabuľke posunutý o jedno miesto vľavo.

Rieka stability je dôležitý faktor, ktorý rozhoduje o tom, či bude daný nuklid stabilný alebo nestabilný. Jedná sa o pomer počtu neutrónov N k počtu protónov Z . u prvkov s protónovým číslom 20 sú najstabilnejšie tie jadrá u ktorých podiel medzi N a Z je rovný 1. Zo zvyšujúcim sa protónovým číslom pomer N a Z pre stabilné nuklidy rastie až do hodnoty 1,5. Pri rozpade typu beta sa neutrón premení na protón (alebo naopak) a je vymrštená častica beta, aby bola zachovaná rovnováha elektrických nábojov a aby bol uvoľnený prebytok energie. Atóm sa stane prvkom v postupnosti o jednotku vyšším alebo nižším. Beta žiarenie zastaví 1-2cm vrstva

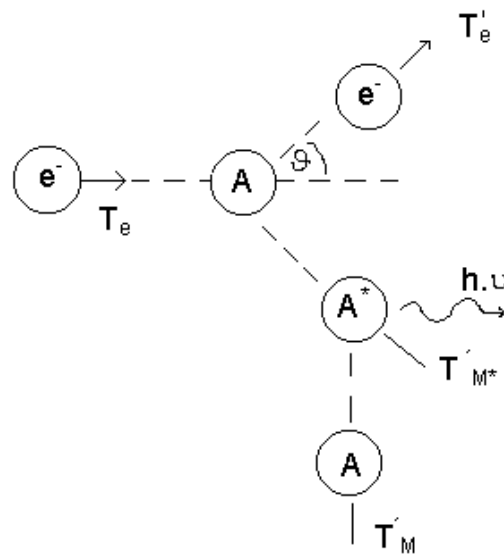
vody alebo niekoľko metrov vzduchu. Lúče Beta majú prenikavú silu stokrát väčšiu ako lúče alfa a tvoria ho záporné častice. [5]



Obrázok 3 - Schematicky znázornené beta žiarenie

2.2 Gama žiarenie

Žiarenie gama je fotónové žiarenie pochádzajúce z jadra atómu. Pri vzniku žiarenie najprv musí dôjsť k nepružnej zrážke elektrónu s atómom.



Obrázok 4 - Energia gama žiarenia

A – atóm

A^* - excitovaný atóm

e^- - elektrón

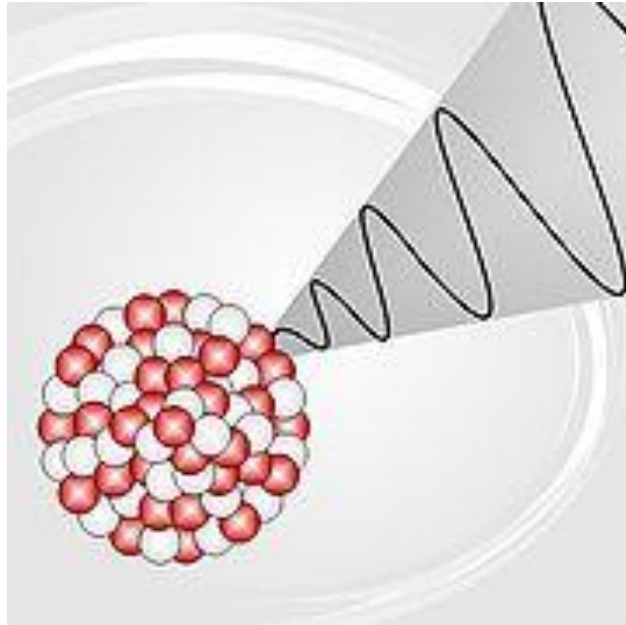
T_e – kinetická energia elektrónu

T'_M – kinetická energie atómu po zrážke

$h \nu$ - energie fotonu \Rightarrow gama žiarenie

$$T_e = T'_e + T'_M + h \cdot \nu \quad (1)$$

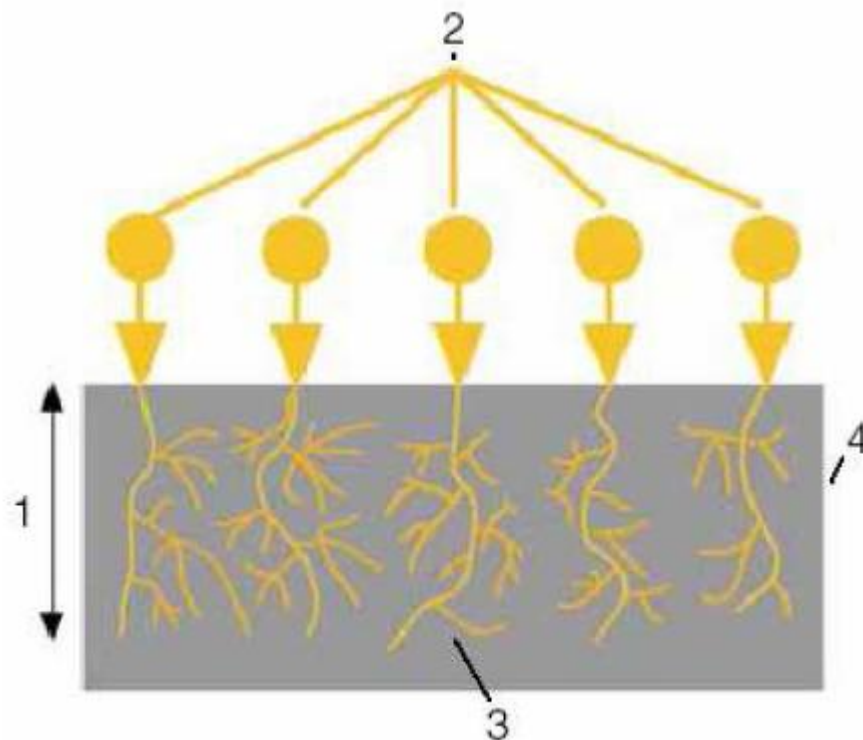
Kinetická energia elektrónu sa z časti premení na kinetickú energiu atómu a na energiu potrebnú k existencii atómového jadra, ktorá sa pri dexcitácií uvoľní vo forme gama žiarenia. Časť kinetickej energie elektrónu sa zachová. [5]



Obrázok 5 - Schematické znázornenie gama žiarenia

2.3 Rozdiel medzi beta a gama žiarením

Hlavný rozdiel medzi oboma druhmi žiarení spočíva v schopnosti prenikania materiálom a intenzite ožiarenia. V zariadeniach s urýchľovačmi elektrónov sa pracuje s vysokými intenzitami dávok ožiarenia, ale s obmedzenou hĺbkou prenikania závislou na energii.



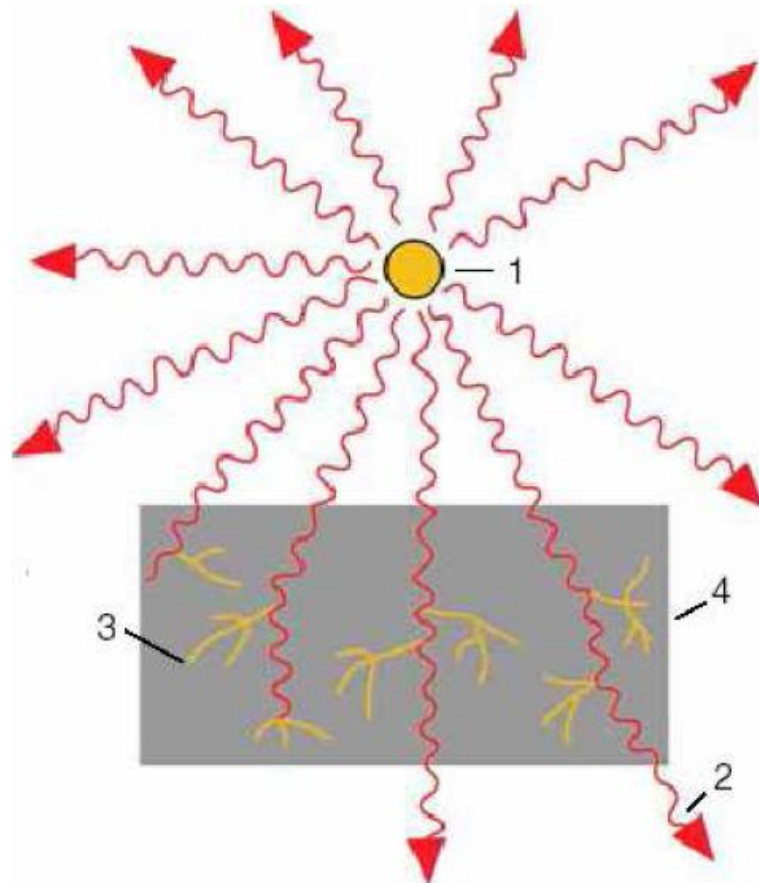
Obrázok 6 - Prenikanie beta žiarenia

1.hĺbka preniknutia elektrónov, 2.primárne elektróny, 3.sekundárne elektróny,
4.ožarovaný materiál

Naproti tomu žiarenie gama má vysokú schopnosť penetrácie (hĺbka prenikania) pri relatívne nízkej intenzite dávky ožiarovania. Výkon dávky ožiarovania je závislý na inštalovanej celkovej aktivite gama žiarenia. Z technického hľadiska použitia to znamená, že v urýchľovačoch elektrónov je v priebehu niekoľkých sekúnd dodaná dávka, pre ktorú by zariadenie zo žiarením gama potrebovalo niekoľko hodín. Preto sú v priemysle pri zariadeniach z gama žiarením použité väčšie objemy súčasne. Pretože sú pre sieťovanie polymérnych materiálov použité celkom veľké dávky žiarenia, používa sa v súčasnosti prevažne elektrónové beta žiarenie.

Hlavnou oblasťou použitia gama žiarení je radiačné sterilizovanie zdravotníckych produktov a potravín. Stále viac sa však používa aj na sieťovanie plastov, pretože poskytuje oproti elektrónovému žiareniu výhody z hľadiska hĺbky preniknutia napríklad u zložitých objemových dielov. V dnešnej dobe použité gama

žiarení v percentách na sieťovanie je asi 10% a z 90% sa používa na sterilizáciu. U beta žiarenia je to presne naopak. [3]



Obrázok 7 - Prenikanie gama žiarenia

1.Zdroj žiarenia (Izotop kobaltu), 2.gama kvanta, 3.sekundárne elektróny,
4.ožiarený materiál [3]

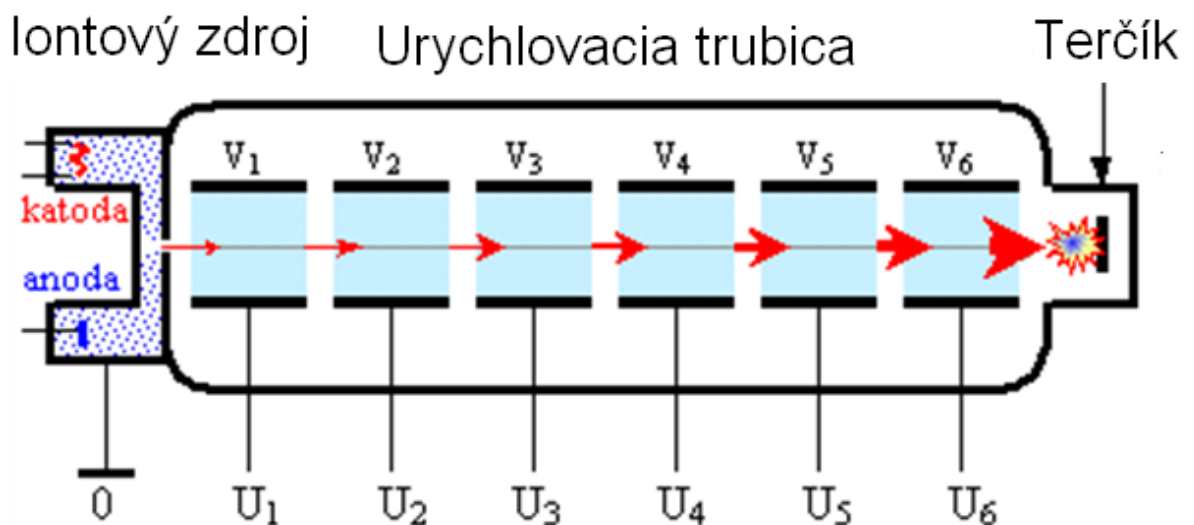
2.4 Zdroje žiarenia

Urýchľovače sú zariadenia ktoré udeľujú určitú energiu časticiam. Urýchľovať je však možné iba tie častice ktoré majú určitý elektrický náboj. Urýchľovanie sa deje priechodom nabitej častice elektrickým polom, v ktorom je častica silovým pôsobením pola urýchlená.

Známe sú dva typy urýchľovačov ktoré sa odlišujú dráhou ktorú elektrón pri urýchlení vykoná. Jedná sa o lineárne a cyklické urýchľovače

2.4.1 Lineárne urýchľovače

Lineárne urýchľovače urýchľujú nabitú časticu pôsobením elektrického poľa v priebehu ich pohybu po lineárnej priamkovej dráhe. Často sa tieto typy urýchľovačov nazývajú aj Linac (Linear akcelerator). Rozdeľujeme ich na elektrostatické a vysokofrekvenčné.



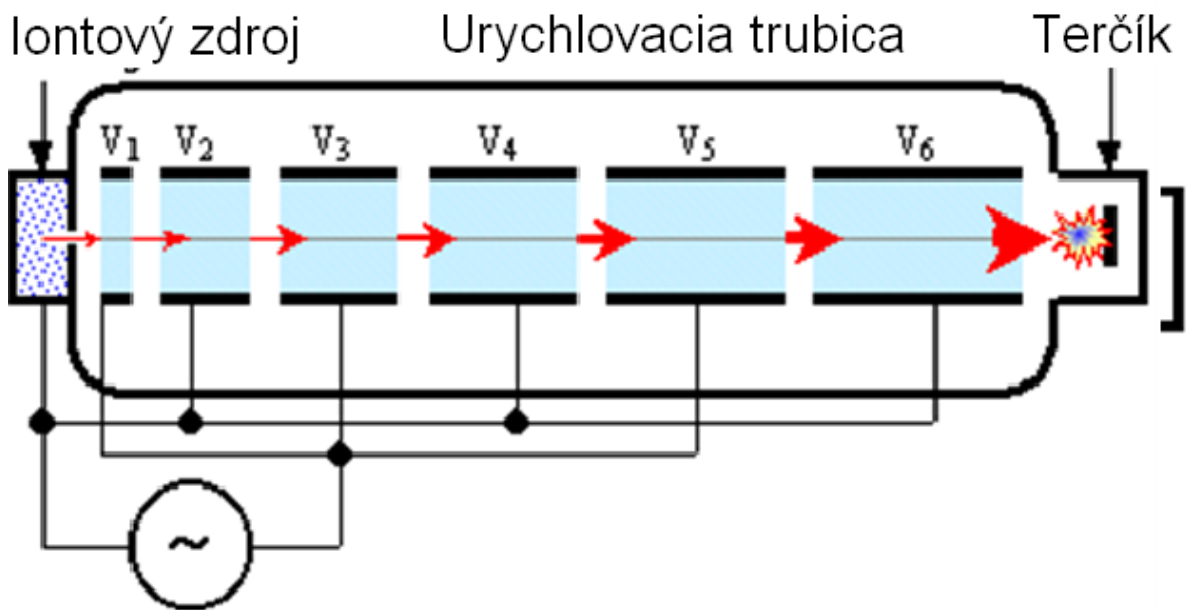
Obrázok 8 - Elektrostatický lineárny urýchľovač

Z iontového zdroja vstupujú požadované častice (elektróny, protóny, neutróny a podobne) do urýchľovacieho systému, tvoreného niekoľkými sú osími válcovými elektródami V1, V2... medzi ktorými je postupne rozložené narastajúce vysoké napätie U1, U2,.... Elektrostatickým polom sú nabitú časticu s nábojom „q” na lineárnej dráhe urýchľované na energiu

$$E=q.(U_1+U_2+U_3\dots) \quad (2)$$

Energia je daná súčtom napätí na jednotlivých elektródach. Medzera medzi dvoma po sebe nasledujúcimi valcovými elektródami pôsobí na letiace častice ako

elektrická šošovka, ktorá sústredí častice do úzkeho zväzku, ktorý nakoniec dopadá na terčik. Tieto elektródy sú napájané vysokým napätím buď z elektronického kaskádového násobiča alebo z elektromechanického generátora. Používané napätie je v rozmedzí od stoviek kilovoltov až po 5MV.



Obrázok 9 - Vysokofrekvenční urýchľovač

Efektívnejší spôsob ako na lineárnej dráhe urýchliť nabité častice na značne vysokú energiu bez použitia extrémne vysokého napätia, je realizovaný vo vysokofrekvenčnom lineárnom urýchľovači. Nabité častice z iontového zdroja vstupujú do urýchľovaného systému valcových elektród V1, V2... ktoré sú pripojené k striedavému elektrickému napätiu

$$U(t) = U_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) = U_0 \cdot \cos(2\pi f \cdot t) \quad (3)$$

O amplitúde U_0 a frekvencii f . Nepárne valce sú pripojené k jednému pólu, a párne valce k druhému pólu vysokofrekvenčného zdroja vysokého elektrického napätia.

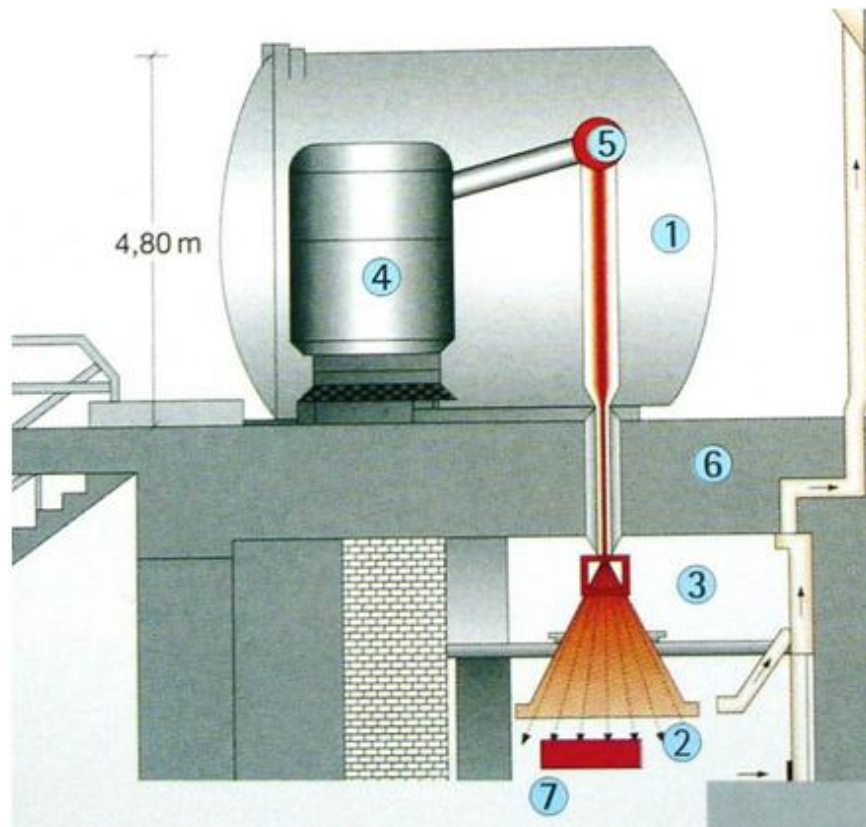
Vývoj týchto urýchľovačov postupoval tak, že frekvencia f sa zvyšovala, pričom miesto valcových elektród sa používajú dutinové rezonátory. Novšie lineárne urýchľovače využívajú pre vytvorenie urýchľovacieho pola vlnovod, rozdeleného vhodnými diskovými výbežkami na radu rezonančných dutín a napájaného frekvenciou niekoľkých GHz z klystronového alebo magnetronového generátora. Vo vlnovode sa vytvára vysokofrekvenčné striedavé elektromagnetické pole vo forme postupnej alebo stojatej elektromagnetickej vlny. Pokiaľ sa v poli tejto nosnej vlny urýchľovaná nabitá častica pohybuje synchronizovane na časti pôsobí stála urýchľujúca sila daná elektrickou zložkou E elektromagnetickej vlny. Častice k urýchleniu sa do urýchľovacieho systému dutinových rezonátorov čo vlnovodu vstrekujú z iontového zdroja, či elektrónovej trysky v prípade elektrónov vo forme zhlukov v pulznom režime, v presnej elektronickej synchronizácii s urýchľujúcim vysokofrekvenčným polom. [11]

2.4.2 Katódový lineárny urýchľovač

Princíp tohto elektrónového urýchľovača je porovnateľný s Braunovou elektrónkou. Princíp funguje na zohrievaní žhaviacej katódy, ktorá následne vysiela elektróny, ktoré ďalej putujú do elektromagnetického poľa kde sú tieto častice urýchľované. Energia respektíve rýchlosť elektrónov je závislá na striedavom napätí, ktoré je medzi žhaviacou katódou a anódou (potenciálny spád).

Žhaviaca katóda ktorá generuje vysoké napätie je napojená na zvislú urýchľovaciu trubicu, ktorá je naplnená vysokým vákuom. Elektróny vystupujúce z katódy sú viazané elektromagnetickým polom do zväzkov a sú urýchľované.

Pomocou tohto magnetického striedavého poľa je prúd elektrónov odchýlený tak, že na vyústení snímacieho lieviku vystupuje ako vejárovitý prúd elektrónov na výrobok. Časti urýchľovača elektrónov sú za účelom zabránenia elektrického výboja uložené v tlakovej nádobe, ktorá je naplnená izolujúcim plynom. Penetrácia vysoko energetických elektrónov je závislá na ich energii a tým na napätí urýchľovaná.[3]



Obrázok 10 - Katódový urýchľovač

1-tlaková nádoba naplnená izolačným plynom, 2-titánová fólia, 3-vychílovací magnet, 4-vysokonapäťový generátor, 5-termokatóda, 6-tienenie z betónu, 7-produkt

2.4.3 Kruhové urýchľovače

Veľmi efektívnym spôsobom, jak urýchliť nabité častice na vysoké energie, je ich mnohonásobné urýchlenie v elektrickom poli, kam sú častice opakovane vracané po kruhovej dráhe pôsobením magnetického poľa. Na častice s nábojom „q“ je aplikovaná nielen elektrická urýchľujúca sila

$$F_e = q \cdot E, \quad (4)$$

ale aj Lorentzova sila

$$F_m = q \cdot (v \cdot B) \quad (5)$$

Pôsobiaca v magnetickom poli intenzity B kolmá k smeru pohybu nabitej častice rýchlosti „ v “. Táto magnetická sila spôsobuje, že nabitá častica sa bude pohybovať po kruhovej dráhe o polomere

$$R = m \cdot v \cdot c / (q \cdot B). \quad (6)$$

Ak je vhodným miestom tejto kruhovej dráhy synchronne aplikované elektrické urýchľujúce pole, budú častice periodicky urýchľované pri každom svojom obehu.

Cyklotrón

Jedná sa o základný typ kruhového urýchľovača. Medzi póly silného elektromagnetu sú v plochej vákuovej komore upevnené dva duté kovové poloválce $D1$ a $D2$ tzv. duanty, medzi ktorými je urýchľovacia medzera. Duanty sú pripojené k zdroju striedavého napätia

$$U = U_0 \cdot \cos(2\pi f \cdot t) \quad (7)$$

o frekvencii okolo 20MHz, takže v medzere medzi doskami je striedavé elektrické pole. Nabité častice vstupujú do stredu urýchľovacej medzery z iontového zdroja. Následkom sily, silou ktorou elektrické pole v medzere pôsobí na častice s nábojom „ q “ a hmotnosti „ m “, je častica vtiahnutá do jedného z duantov (ktorý má práve opačnú polaritu) s určitou rýchlosťou v_1 . Vo vnútri duantu je elektrické pole odtienené, pôsobením silného magnetického poľa B opíše častica polkružnicu o polomere

$$R_1 = m \cdot v_1 / (q \cdot B) \quad (8)$$

Doba za ktorú prejde častica touto polkružnicou je

$$T = pR_1 / v_1 = pm / (q \cdot B) \quad (9)$$

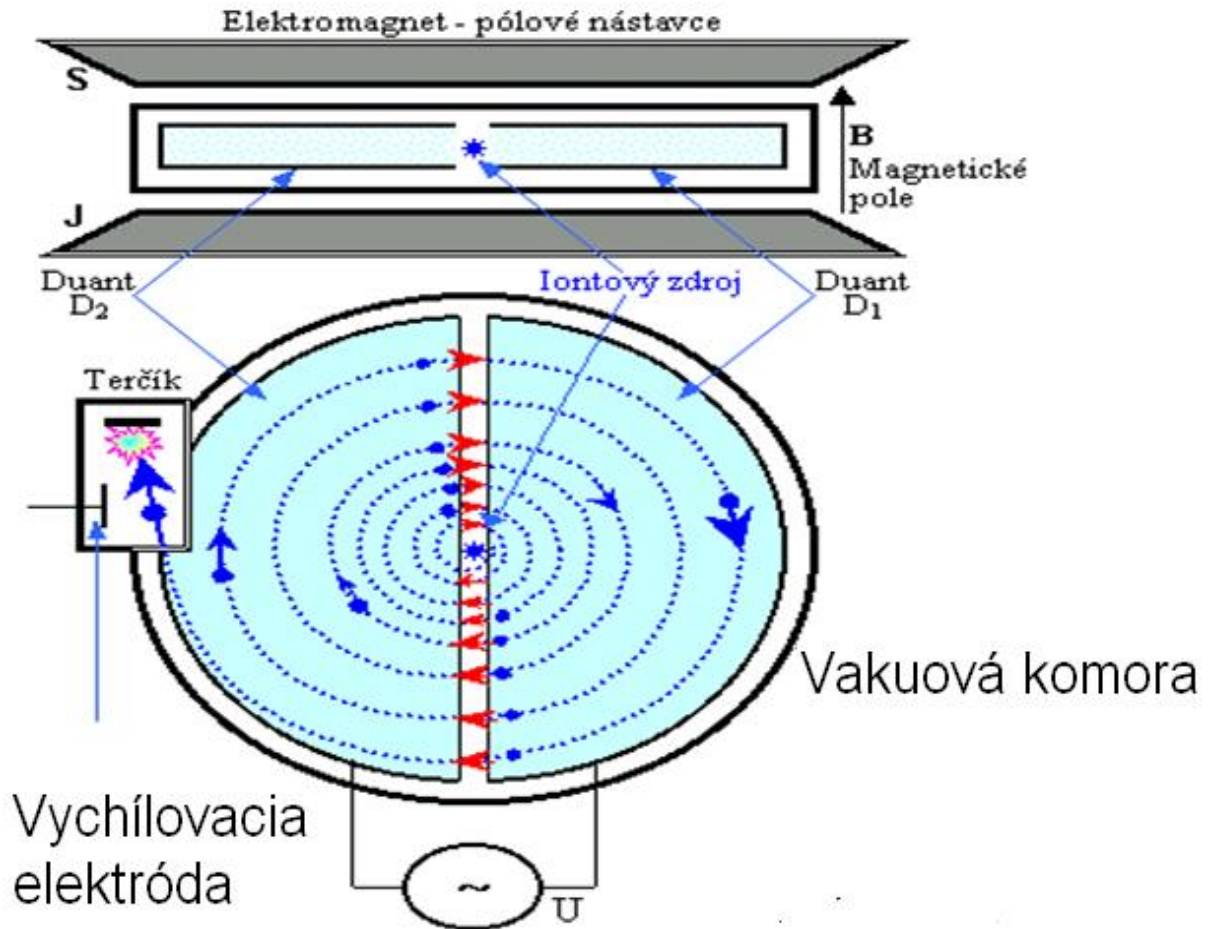
vidíme že táto doba (pol periódy) obehu častice nezávisí na jej rýchlosti ani na jej polomere dráhy, frekvencia kruhového obehu častice teda je

$$f = q.B/(2\pi m) \quad (10)$$

a je konštantná pretože m , q , a B sú dané usporiadanými konštantami. Ak sú duanty napájané striedavým napätím práve o tejto frekvencii f (je splnená podmienka rezonancie či synchronizácie), potom v okamihu kedy častica opíše polkružnicu v prvom duante a ocitne sa opäť v urýchľovacej medzere, je polarita duantov už opačná a častica bude opäť urýchlená elektrickým polom, takže do druhého duantu vletí s väčšou rýchlosťou $v_2 > v_1$. V druhom duante sa bude pohybovať opäť po kružnici, ale teraz o polomere

$$R_2 = m.v_2/(q.B) \quad (11)$$

ktorý je väčší než bol R_1 , ale s rovnakou periódou a frekvenciou kruhového pohybu. Rovnakým spôsobom je potom častica pri každom svojom priechode medzerou medzi duantami znovu a znovu urýchľovaná, pričom sa pohybuje po kružniciach s rotujúcim polomerom, teda po špirále. Z poslednej svojej dráhy o maximálnom polomere je urýchlená častica elektrostaticky alebo magneticky vychýlená a vyvedená do priestoru terčiku, na ktorej narazí a vyvolá tam patričné jadrové procesy.



Obrázok 11 - Schéma cyklotronu

Princíp činnosti cyklotronu bude pri konštantnej frekvencii fungovať len do tej doby, kedy hmotnosť urýchľovanej častice môžeme považovať za konštantnú tj. iba v nerealistickej oblasti. Ak chceme použiť cyklotron k urýchľovaniu častíc na vyššej energii, kde rýchlosť častíc je už zrovnateľná s rýchlosťou svetla, prestáva byť zotrvačná hmotnosť častice m konštantná, ale zvyšuje sa s rastúcou rýchlosťou

$$m = m_0 / (1 - v^2/c^2) \quad (12)$$

V rovnakom tempe sa znižuje frekvencia obehu častíc v konštantnom magnetickom poli

$$R = m_0 \cdot v / (q \cdot B \cdot (1 - v^2/c^2)) \quad (13)$$

Aby mohla byť častica ďalej urýchľovaná aj v tejto realistickej oblasti, je treba produkovať frekvenciu urýchľovacieho napätia tak, aby bola stále v rezonancii s frekvenciou obehu častice, alebo zosilňovať magnetické pole. Takto upravený cyklotrón so synchronizáciou sa nazýva synchrociklotrón alebo realistický cyklotrón. Tieto prístroje pracujú v pulznom režime, pričom kmitočet urýchľovacieho napätia na duantoch je modulovaný a mení sa cca 50-krát za sekundu z hodnôt cca 25MHz na cca 12MHz, používajú sa pre urýchľovanie protónov na energiu do cca 1GeV.

Synchrotrón

Pre urýchľovanie častíc na veľmi vysokej energii vychádza v kruhovom urýchľovači veľký polomer ich orbit, takže cyklotrónový spôsob so špirálovým pohybom častíc v plochej vákuovej komore už nie je prakticky použiteľný. Aby dokonale vákuový priestor nebol enormne veľký, rovnako ako elektromagnety, je nutné použiť kruhové urýchľovače s pevnou kruhovou dráhou. Aby sa nabitá častica urýchľovala a udržala sa na pevnej kruhovej dráhe o polomere R , je potreba aby s rastúcou rýchlosťou $v(t)$ urýchľovaných častíc sa s časom synchronne zvyšovala ako frekvencia urýchľovacieho napätia, tak aj intenzita magnetického poľa $B(t)$, ktorá už nemôže byť konštantná ale je rovnako funkciou času. Takto synchronne pracujúci urýchľovač s pevnou kruhovou dráhou sa nazýva synchrotrón. Častice sú urýchľované vo vákuovej trubici o priemere cca 3-8 cm (väčšinou eliptického prierezu), ktorý budí magnetické pole udržiavajúce častice na kruhovom orbite. Synchrotrón urýchľuje už predbežne urýchlené častice, ktoré sa do urýchľovacej komory vstrekujú z vodného injektora, ktorým býva najčastejšie lineárny urýchľovač s energiou cca 20-100MeV. Pri veľkých prístrojoch môže byť predurýchlenie aj viacstupňové – najskôr lineárni urýchľovač, potom menší synchrotrón, ktorý injektuje častice do hlavného urýchľovača. Spolu s magnetmi sú vo vhodných miestach kruhové dráhy umiestnené urýchľovacie elektródy napájané striedavým vysokým napätím, ktorého frekvencia je synchronne modulovaná tak, aby častica medzi elektródami prišla v dobe, kde polarita zaistí vždy ďalšie a ďalšie urýchlenie častice. Súčasne s frekvenciou je zvyšovaná aj intenzita magnetického poľa.

Synchrotrón pracuje v pulznom režime, kde protóny vstupujú v pravidelných dávkach z injektora do urýchľovacej trubice pri energiách rádovo 100MeV,

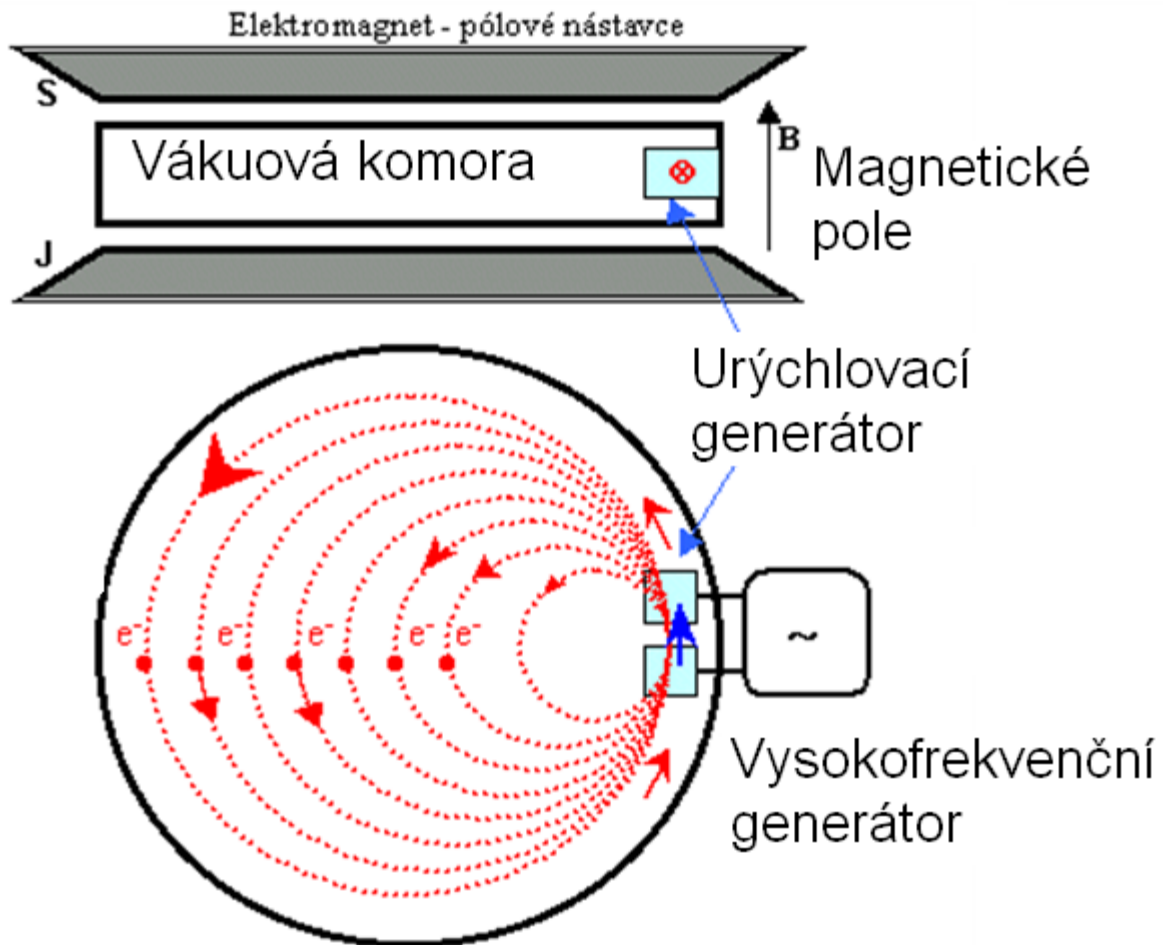
vykonajú behom urýchľovacieho cyklu, trvajúceho cca 3-5 sekúnd, niekoľko miliónov obehov, pričom sa urýchli na rádovo 100GeV až niekoľko TeV, magnetické pole v priebehu urýchľovacieho cyklu vzrastie z hodnoty desiatín Tesla na niekoľko T. Urýchľovací cyklus sa periodicky opakuje cca 5-10 krát za minútu.

Po skončení urýchľovacieho cyklu dopadajú častice buď na vnútorný terčik, alebo sú vyvedené elektromagnetickým polom na vonkajší terčik, popr. Sú vedené do akumuláčného prstenca pre realizáciu interakcií častíc vo zväzkoch. Pri náraze zväzku napr. protónu na terčik vzniká množstvo častíc najrôznejších druhov, z ktorých môžeme sústavu elektrických a magnetických polí odseparovať častice požadovaného druhu, sústredeníím sformovať do zväzku a zamieriť na terčik. Získavame tak sekundárne zväzky. K separácii častíc sa používa premenných elektrických a magnetických polí, k sústredeniu zväzkov sa používa magnetických šošoviek, väčšinou v kvadrupólovom usporiadaní, kde sa krížia dve magnetické polia, ktorých gradienty postupne sústreďujú zväzok vo vertikálnom aj horizontálnom smere.

Betatrón

Kruhový indukčný urýchľovač sa nazýva betatrón, pretože vyrába umelé žiarenie β^- , čo sú rýchle elektróny, známe inak zo žiarenia beta.

Urýchľovacia trubica betatronu má tvar prstenca(toroidu) zhotoveného z elektricky nevodivého materiálu (sklo, porcelán) s vysokým vákuom vo vnútri. Trubica je umiestnená medzi pólovými nastavcami elektromagnetu, napájaného striedavým prúdom. Elektróny sú vo vhodnom okamžiku vstrekané do urýchľovacej trubice elektrónovou tryskou, tvorenou žhavenou katódou, mriežkou a urýchľujúcou a sústreďujúcou anódou – jedná sa o podobné elektrónové delo ktoré je aj pri obrazovke. Časovo premenené magnetické pole indukuje v trubici vírivé elektrické pole, ktorého elektromotorická sila, smerujúca pozdĺž kruhovej dráhy, tieto elektróny urýchľuje.

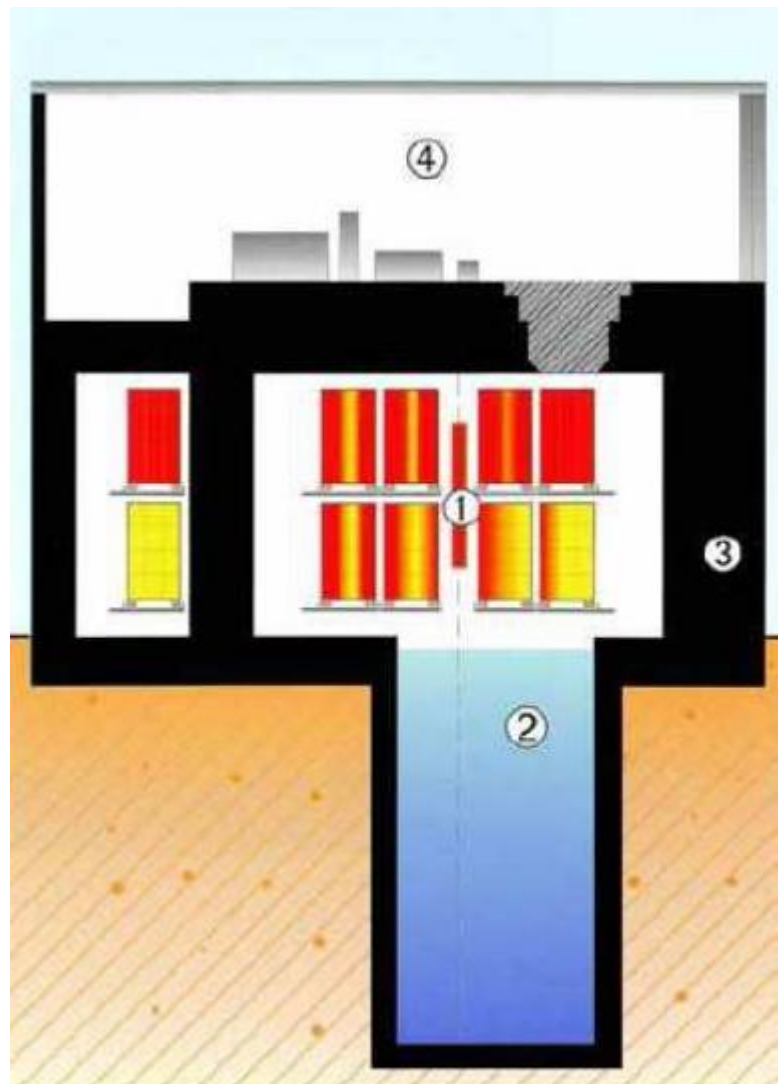


Obrázok 12 - Betatrón schematicky

Z elektronického hľadiska je betatrón vlastne transformátorom, ktorého primárne vinutie je napájané striedavým prúdom a ktorého sekundárnym vinutím (o jednom závine) je urýchľovacia trubica, v ktorej sa vo vákuu (namiesto v drôtoch vinutia) pohybujú elektróny urýchľované indukovanou elektromotorickou silou. Na kruhovej dráhe sú elektróny udržiavané magnetickým polom. K urýchľovaniu elektrónov dochádza len v prvej štvrtine sínusového priebehu striedavého napätia v elektromagnete. Vo vhodnom okamihu vzostupnej časti sinusovky sú injektované elektróny, ktoré sú urýchľované, magnetické pole narastá, elektróny sa po špirále stáčajú dovnútra po určitú dobu obiehajú po stacionárnej dráhe, na ktorej sú neustále urýchľované. Po dosiahnutí vrcholu štvrť periódy slabne vírivé elektrické pole, obracajú svoj smer a elektróny by následne boli naopak brzdené. Zároveň však dochádza k zoslabnutiu magnetického poľa a elektróny sa začnú pohybovať po špirále k vonkajšiemu okraju trubice, kde narazí na terčik alebo sú

vyvedené k vonkajšiemu použitiu. Niektoré typy betatronov majú radiálni gradient magnetického poľa a urýchľovaciu fázu nastavenú tak, že pohyb elektrónov na konci urýchľovacieho cyklu prebieha po špirále smerom dovnútra a terčik je umiestnení pri vnútornom okraji urýchľovacej trubice. [11]

2.4.4 Zdroj gama žiarenia



Obrázok 13 - Zdroj gama žiarenia

1-zdroj žiarenia (kobalt CO^{60}), 2-vodná nádrž, 3-betónové tienenie, 4-strojovňa

■ -Ožiarené výrobky, ■-Neožiarené výrobky

V dnešnej dobe sa v priemysle ako zdroj gama žiarenia používa rádionuklid kobaltu (^{60}Co), ktorý emituje žiarenie gama zo strednej energie cca 1,3MeV a vysokou penetráciou. Tieto účinky umožňujú používať ako jednotky ožarovania priemyslové palety (euro palety). Celkové dávky ožarovania sa dosahujú opakovaným jazdením paliet okolo zdroja, pričom sa vpoly žiarenia súčasne nachádza 24 paliet.

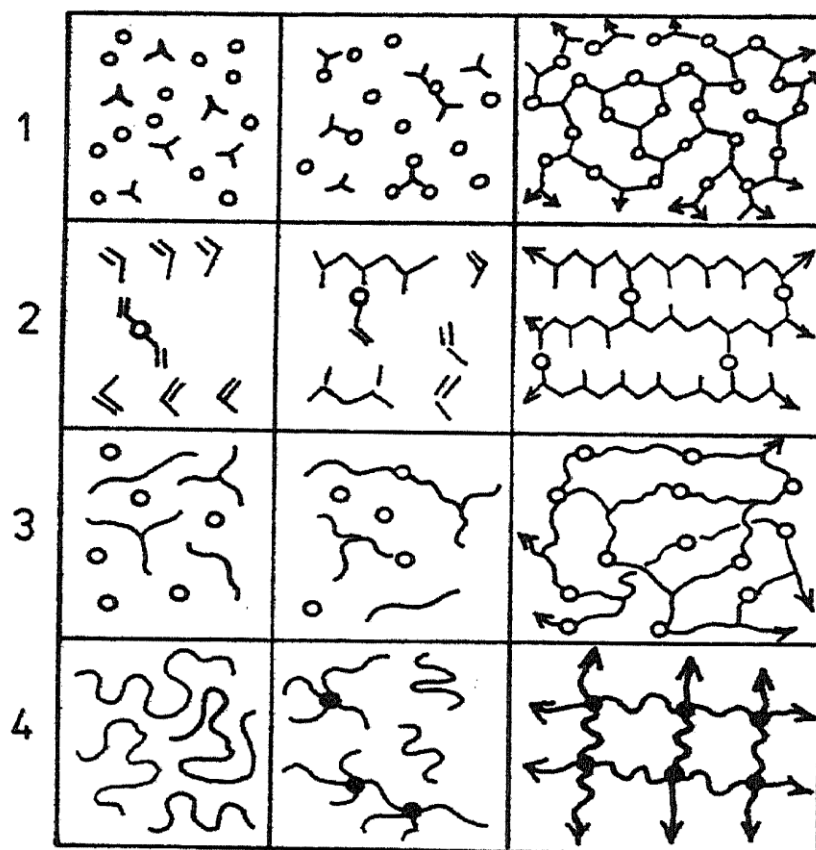
Doba ožarovania je v závislosti na požadovanej dávke až niekoľko hodín. Oproti elektrónovým urýchľovačom nie je možné u gama žiarení samotný zdroj žiarenia vypnúť. Aby však bolo možné aj cez tento fakt vstúpiť do ožarovacieho priestoru bez rizika, musí byť žiarenie tienené. Z tohto dôvodu je zdroj ponorený vo vodnej nádrži, ktorá slúži ako tienidlo. [3]

3 SIEŤOVANIE

Lineárne polyméry vznikajú chemickým spojovaním dvoj funkčných jednotiek (monomerov) rôznymi typmi chemických reakcií, ako napr. polyadíciou, polykondenzáciou alebo reťazovou polymeráciou násobných väzieb. Ak je alebo ak sa stane niektorá zo zložiek viac než dvoj funkčnou, dochádza k priebehu reakcie vetveniu a ďalej i k vzniku trojrozsomernej štruktúry. V praxi ide väčšinou o sieťovanie zámerné, pretože sieťované polyméry majú radu výhodných vlastností podmienených nekonečnou štruktúrou. Je to napr. vratná kaučuková elasticita, zvýšená mechanická a chemická odolnosť atď.

3.1 Vznik sietí

Zosieťované polyméry môžu vznikať nasledujúcimi spôsobmi.



Obrázok 14 - Výstavba sietí(z ľava doprava)

1. Polykondenzácia alebo polyadícia nízkomolekulárnych látok (v rádoch 10^2 g/mol)

Postupnými reakciami nízkomolekulárnych látok. Polyadičnými či polykondenzačnými reakciami vznikajú napr. epoxidové a fenolové živice. Ich sieť sa dokončuje vo vytvrdzovacom kroku.

2.Sieťujúca kopolymerácia typu styren-divinylbenzen

Polymeračnou reťazovou reakciou, sieťovacíou polymeráciou. Napríklad kopolymeráciou styrénu s divinylbenzenom vznikajú hmoty použiteľné pre meniče iontov, kopolymeráciou hydroxyethylmethakrylátu s glykoldimethakrylátom hydrofilné gély používané v lekárstve.

3.Spojovanie relatívne konečných predpolymerov, z pravidla polyadičnou reakciou (v rádoch 10^3 g/mol)

Spojovaním reaktívnych koncov nízko molekulárnych polymérov o molárnej hmotnosti rádov 10^3 g/mol. Proces vzniku siete v tomto prípade je obdobný ako v prvom prípade. Napríklad zo zmesi polyeterdioulu, polyethertriolu a diisokyanátu môžu vzniknúť polyurethanové materiály buď kaučukovité alebo tvrdé.

4.Náhodné sieťovanie vysokomolekulárnych reťazcov (v rádoch 10^5 g/mol)

Zavedením priečných väzieb do vysokomolekulárnych polymérov. Napríklad vulkanizáciou kaučuku vzniká pryž, a taktiež aj zosieťované polyméry pomocou žiarenia.

Vo všetkých typoch vzniku výstavby sietí prebiehajú tieto deje:

- V prvej fáze vzrastajú rozmery molekúl aj polydisperzita celého systému.
- Pri určitom stupni reakcie dospeje systém do tzv. bodu gelácie, v ktorom molekulová hmotnosť vzrastie nad všetky medze a v systéme sa objavia prvé stopy nekonečnej štruktúry, gélu.
- Po prekročení bodu gelácie sa systém skladá z dvoch častí, a to: z nekonečnej štruktúry a gélu, a z molekúl konečnej veľkosti, soľ, ktorý je možné od gélu oddeliť extrakciou, gél je nerozpustný, v rozpúšťadle iba botná.
- Ďalšom priebehu reakcie obsah solu klesá a jeho molárna hmotnosť i polydisperzita sa znižujú.

- V géle vznikajú tzv. elasticky aktívne reťazce siete, ktoré pri deformácií nesú napätie a určujú veľkosť modulu pružnosti gélu a jeho rovnovážny stupeň nabotnania.

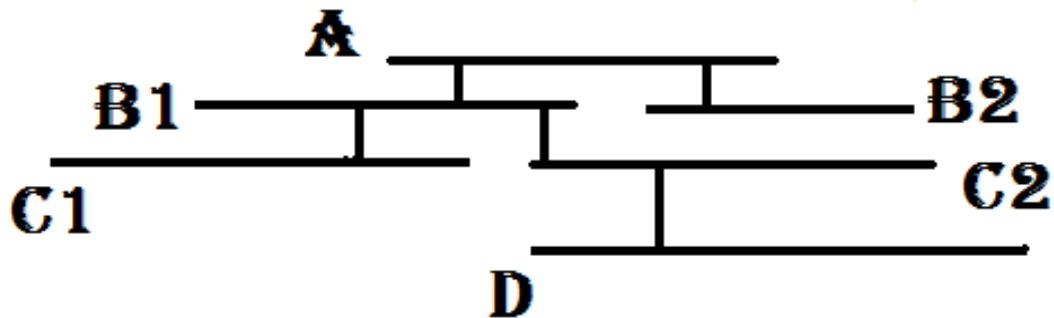
Kvantitatívnym popisom tvorby sietí sa zaoberá teória sieťovania. Celý proces sieťovania je založený na statických úvahách. [9]

3.1.1 Náhodné sieťovanie lineárnych polymérov

Polymér, ktorý má byť sieťovaný priečnymi väzbami, musí obsahovať v reťazci reaktívne miesta, ktoré by boli schopné zreagovať s reaktívnymi miestami iných reťazcov za vzniku spojov medzi reťazcami – priečnych väzieb. Reakcie sa účastia molekuly sieťovacích činidiel alebo iné častice napr. urýchlené elektróny. Označme úsek reťazca, ktorý nesie jedno reaktívne miesto termínom štruktúrna jednotka ale len jednotka. U polydienov je takto definovaná jednotka totožná s monomernou jednotkou a reaktívnym miestom je dvojná väzba, resp. jej bezprostredné okolie. Molárna hmotnosť štruktúrnej jednotky nech je M_0 , počet štruktúrnych jednotiek v reťazci bude označený pre jednoduchosť termínom polymeračný stupeň „y“. Počet mólov štruktúrnych jednotiek v 1kg polyméru, tj. látková (molárna) koncentrácia štruktúrnych jednotiek $n_0=1/M_0$ (mol.kg^{-1}). Štruktúrne jednotky je možné rozdeliť na zosieťované, tj. tie ktoré už zreagovali a nesú priečnu väzbu a na nezosieťované (nezreagované). Ak je „n“ (mol.kg^{-1}) látková koncentrácia zosieťovaných jednotiek, je $q=n/n_0$ zlomkom zosieťovaných jednotiek, „q“ je miera stupňa reakcie, konverzie. Prevrátená hodnota konverzie $1/q= n/n_0=y_c$ udáva počet „ y_c “ jednotiek pripadajúcich na jednu zosieťovanú jednotku. $M_c= y_c.M_0$ udáva molárnu hmotnosť úseku reťazca pripadajúci na jednu zosieťovanú jednotku. Priečna väzba je spojenie najčastejšie dvoch, obecné však niekoľkých štruktúrnych jednotiek rôznych reťazcov v jednom mieste. Z pravidla sa toto spojenie pokladá za bodové aj keď býva niekedy sprostredkované dosť veľkými molekulami. Napríklad molekuly reaktívnych živíc používaných pre vulkanizáciu majú molárnu hmotnosť okolo 500g.mol^{-1} . [8]

3.1.2 Bod gelácie

Nasledujúci obrázok ukazuje schéma jednej skutočnej makromolekuly, ktorá vzniká spojením niekoľkých pôvodných (primárnych reťazcov v predgelačnom štádiu).



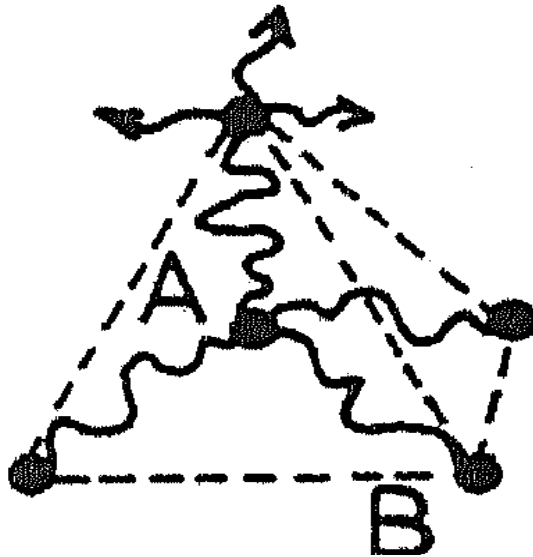
Obrázok 15 - Sieťovacia schéma v predgelačnom štádiu

Prvé stopy gélu sa objavia vtedy, keď aspoň jeden taký útvar systému dosiahne „nekonečných“ (makroskopických) rozmerov. Aký musí byť stupeň zosieťovania aby primárna molekula náhodne vybraná v systéme mohla byť súčasťou nekonečnej skutočnej makromolekuly? Vychádzajme napr. od primárnej makromolekuly označenej v sechémate písmenom „A“. Ak existuje mostík k ďalšej primárnej makromolekule napr. „B1“ od nej cesta cez ďalšiu priečnu väzbu k ďalšej primárnej makromolekule a tak ďalej až do nekonečna, potom je systém určite už v bode gelácie. Pravdepodobnosť že náhodne vybraná štruktúrna jednotka je zosieťovaná, je daná stupňom zosieťovania „q“. Ak prejdeme od A k B1 cez priečnu väzbu, ostáva na molekule ešte $y-1$ jednotiek a pravdepodobnosť „p“, že jedna z nich nesie priečnu väzbu k ďalšej molekule je $p=q(y-1)$. Cesta do nekonečna (k hranici systému) bude možná v prípade, že „p“ bude jednotkové.

3.1.3 Ideálna sieť

Ideálna sieť je hypotetická štruktúra. Obsahuje uzly siete a úseky polymérnych reťazcov medzi uzlami, nazývané reťazce siete. Všetky reťazce siete sú v ideálnej sieti rovnako dlhé a každý reťazec je na oboch koncoch zachytený

v uzloch siete. Z každého uzlového bodu vychádza „f“ reťazcov. Funkčnosť uzlu siete „f“ definuje teraz ako počet reťazcov vychádzajúcich z jedného uzlu. Tento pojem ma teda iný obsah ako skôr definovaná funkčnosť priechnej väzby. Koncentráciu uzlov „C“ budeme vzťahovať na objemovú jednotku, bude mať rozmer $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$.



Obrázok 16 - Ideálna sieť

Molárna hmotnosť reťazcov siete M_C ($\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$) násobená koncentráciou reťazcov siete „v“ sa rovná hmotnosti objemovej jednotky, hustote „ ρ “

$$v\cdot M_C = \rho \Rightarrow v = \rho / M_C \quad (14)$$

Každému uzlu prísluší „f“ polovic reťazcov, takže

$$v = C \cdot f / 2 \quad (15)$$

V bežných sieťach $f=4$ a platí pre ne vzťah

$$v = 2C \quad (16)$$

$$M_C = \rho / 2C \quad (17)$$

Pri danej funkčnosti uzlov je sieť tým hustejšia, čím väčšia je koncentrácia uzlov a koncentrácia reťazcov siete, reťazce sú pritom kratšie.

Ideálnu sieť si môžeme teoreticky skonštruovať nasledovne:

1. Do hypotetického lineárneho polyméru o nekonečnej molárnej hmotnosti a neobsahujúceho žiadne fyzikálne uzly, zavedieme v rovnakých vzdialenostiach dvoj funkčné priečne väzby. Každá priečna väzba vedie ku vzniku jedného uzlu siete. Veličinu „C“ budeme preto v ďalšom stotožňovať s koncentráciou priečných väzieb.
2. Necháme zreagovať napr. „n_A“ mólov dvoj funkčných molekúl A o molárnej hmotnosti „M_A“ s „n_B“ mólmí štvorfunkčných molekúl „B“ o molárnej hmotnosti M_B. Pri reakcii nech nevzniknú fyzikálne uzly. Ak bude pomer funkčných skupín presne stechiometrický (n_A=2n_B) a konverzia bude jednotková, potom sa koncentrácia vzniknutých reťazcov siete bude rovnáť látkovej koncentrácií zložky „A“ vo východiskovom systéme. Koncentrácia uzlov bude potom rovná látkovej koncentrácií zložky „B“ a vo východiskovom systéme

$$C = \frac{n_B \cdot \rho}{n_A M_A + n_B M_B} \quad [\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (18)$$

Reťazec siete sa bude skladať z jednej molekuly „A“ a dvoch štvrtín molekuly „B“:

$$M_C = M_A + \frac{M_B}{2} = \frac{\rho}{v} \quad [\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}] \quad [9] \quad (19)$$

3.1.4 Reálna sieť

Zavedením priečných väzieb medzi makromolekuly konečnej dĺžky vznikne sieť reálna, neideálna. Každý koniec pôvodnej makromolekuly a jeho okolia vytvorí v hotovej sieti defekt, pretože priečne väzby vznikajú na reťazci náhodne a krajná priečna väzba je v priemere rovnako vzdialená od konca reťazca ako od susednej priečnej väzby. Koncové úseky pôvodných makromolekúl (od konca pôvodnej makromolekuly k prvej priečnej väzbe) sú tzv. koncové či voľné reťazce siete. Druhým typom defektu reálnych sietí sú fyzikálne uzly. Predstavujeme si ako zapletení reťazec siete. Pre možnosť posudzovania elastických vlastností siete je nutné definovať tieto pojmy:

- Elasticky účinný uzol siete je uzol, z ktorého vedú najmenej tri nezávislé cesty k okraju systému (tj. do nekonečna)
- Elasticky účinný reťazec siete je reťazec, ktorý spojuje dva elasticky účinné uzly siete

Iba elasticky účinné (elasticky aktívne) reťazce siete sú schopné prenášať vonkajšie napätie. Naproti tomu koncové reťazce napätie neprenášajú, sú teda elasticky neúčinné. Koncentrácia elasticky účinných reťazcov siete „ v_e “ určuje elastické vlastnosti siete. Jej rovnovážny odpor proti deformáciám a rovnovážny stupeň jej nabotnania v tých kvapalinách, ktoré sú rozpúšťadlom príslušného nezosieťovaného polyméru. [9]

3.2 Sieťovacie prostriedky

Jedná sa o prísady ktoré sú súčasťou sieťovacích reakcií, tj. Spojovanie lineárnych alebo rozvetvených makromolekulárnych reťazcov priečnymi väzbami.

Pre kaučuky sa ako sieťovací prostriedok používa síra čo je vlastne vulkanizačné činidlo v tomto prípade. Pri reaktoplastoch sú to zväčša kyseliny, a organické peroxidy. U termoplastov sa k sieťovaniu používajú organické peroxidy alebo žiarenie pri vysokých energiách.

3.3 Radiačné sieťovanie

V súčasnosti rastú požiadavky na materiály používané v rôznych odvetviach a tým sa inovujú technológie produkcie týchto materiálov. Nie je nevyhnutné používať drahé materiály, stačí zlepšiť vlastnosti lacnejších materiálov čo je možné viacerými spôsobmi. Jeden z nich je aj radiačné sieťovanie. Ako zdroj takého sieťovania sa používa žiarenie beta a žiarenie gama. Zdroje takýchto žiarení sú elektrónové urýchľovače a izotopy rádioaktívnych prvkov. Podstata radiačného sieťovania spočíva vo vytváraní tzv. priečných väzieb medzi reťazcami molekúl. Do materiálu je pridaná energia vo forme žiarenia toto žiarenie narušuje štruktúru spôsobom odštiepenia vodíkov z časti reťazca a tým vytvorenie požadovanej priečnej väzby. Tento úkon sieťovania sa vykonáva až po vystreknutí výrobku čiže až po procese výroby. Výrobok sa ožaruje za normálnych teplôt niekoľko minút alebo hodín v závislosti na typu žiarenia. Rádioaktívne žiarenie

ktoré takto vzniká ďalej neostáva vo výrobku ale nim len prejde a zmení štruktúru. Na požadované zosieťovanie materiálu musíme použiť presnú dávku žiarenia. Prehnaná dávka môže viesť až k degradácii materiálu. Radiačné sieťovanie nám zjavne mení chemické, tepelné a mechanické vlastnosti.

Zlepšenie mechanických vlastností radiačným sieťovaním:

- Nárast modulu
- Zvýšenie pevnosti
- Pokles pomerného predĺženia pri pretrhnutí
- Redukcia studeného tečenia
- Nárast tvrdosti (Shore)
- Zlepšenie medze únavy
- Zlepšenie zotavenia materiálu (memory effect)
- Zlepšenie chovania pri dlhodobom zaťažení vnútorným tlakom
- Zlepšenie povrchovej pevnosti voči obtlačkom a nespojitosti vstrekovaných dielov

Zlepšenie chemických vlastností radiačným sieťovaním:

- Zníženie rozpustnosti
- Zlepšenie odolnosti proti botnaniu
- Zvýšenie odolnosti proti vzniku trhlín spôsobených pnutím
- Zlepšenie odolnosti voči hydrolýze a zvýšená olejvzdornosť

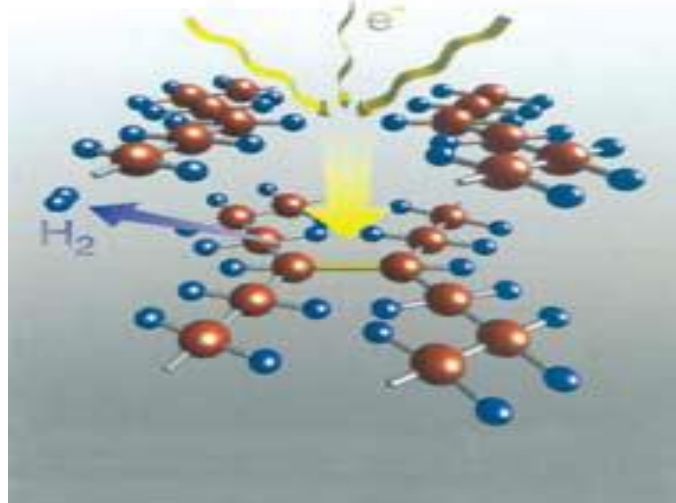
Zlepšenie tepelných vlastností radiačným sieťovaním:

- Zlepšenie tvarovej stálosti za tepla
- Zlepšenie trvalej deformácií pri zaťažení tlakom
- Zvýšenie tepelnej odolnosti
- Zvýšenie odolnosti proti vniknutiu horúceho drátu

- Vyššia odolnosť voči starnutiu

Vo výsledku sa ožiarení lacnejší materiál môže zrovnávať z drahým materiálom čo sa týka mechanických, tepelných a chemických vlastností. Taktiež cena ktorá vyplýva z ožiarenia je vo výsledku výhodnejšia ako drahší materiál, preto je sieťovanie týmto spôsobom na vzostupe.

Výhodou tohto sieťovania je aj fakt že výrobky sa môžu ožarovať už zabalené čiže obsluha a manipulácia je pomerne jednoduchá pri takomto procese. [3]



Obrázok 17 - Tvorba priečnych väzieb

4 SKÚŠANIE POLYMÉROV

Skúškové telesá sa pripravujú dvoma spôsobmi a to:

1. Priamo zo skúšaných materiálov ich vulkanizáciou, lisovaním, vstrekaním či vytvrdzovaním v príslušných formách s tvarom skúšaného telesa alebo vzorku či, z ktorého sa ďalej vysekáva skúškové teleso.
2. Skúškové telesá sa pripravujú z hotových výrobkov alebo polotovarov vysekaním, vyrezávaním alebo obrábaním.

Často sa zrovnávajú vlastnosti skúškových telies pripravených oboma spôsobmi, aby boli získané korelácie medzi podmienkami, za ktorých sú polyméry spracované v laboratóriu a vo výrobe. V laboratóriu sú podmienky modelované hlavne z hľadiska reprodukovateľnosti za z celá iných tepelných a tlakových podmienok vo výrobe. Pri rozdielnosti vlastností je nutné brať v úvahu vplyv tepelného prestupu, objemu, sieťovacích systémov, podmienok chladenia a podobne.

Termoplasty sa spracovávajú prevažne vstrekaním do formy, valcovaním, vytlačovaním alebo lisovaním. Pri vstrekaní a lisovaní sa pripravujú v konečnom tvare, u ostatných procesov sa získavajú dosky, tyče, trubky, z ktorých sa zhotovujú skúškové telesá strojným obrábaním.

Pre každý typ polyméru je výhodný a z hľadiska reprodukovateľnosti vlastností nutný určitý vstrekovací cyklus, ktorý zahŕňa uzavieranie formy, plnenie formy, tuhnutie taveniny a vyprázdňovanie formy. Sú dané teploty taveniny a formy, tlaky a spôsob ich kontroly. Vlastnosti polymérneho vzorku sú závislé na vzniknutej štruktúre, ktorú ovplyvňuje charakter toku pri vstrekaní a potom hlavne rýchlosť ochladzovania.

Pri rýchlom ochladení sa získa pri kryštalických polyméroch výlisok s prevažne amorfnou štruktúrou na povrchu. Smerom do stredu pribúda kryštalických centier a v strede obzvlášť u objemových výlisok sú už dobre vyvinuté sférolity. Kryštalické oblasti nie sú teda dobre vyvinuté a ich ďalšie usporiadanie závisí na teplote, vlhkosti a čase. Výlisok mení svoje vlastnosti ešte dlho po vyňatí z formy

a je v nerovnovážnom stave nevhodný pre skúšanie. Navonok sa to prejaví tým, že rýchlo zatvrdne najskôr na chladnej forme vonkajšia vrstva. Ďalším ochladzovaním následne tuhnú aj vnútorné vrstvy, ktoré ale majú snahu vyrovnáť teplotnú rozťažnosť zmršťovaním, čomu zabraňujú zatuhnuté vonkajšie vrstvy. Vzniká potom vnútorné napätie, ktoré ide zmierniť tepelnou stabilizáciou, ale celkom odstrániť sa nedá. To sa prejaví v mechanických vlastnostiach, tvarovej stálosti a v odolnosti proti korózií za napätia.

Na pripravených vzorkách sa vykonávajú tzv mechanické skúšky, ktoré sa rozdeľujú na statické, dynamické a únavové skúšky. V prípade PA sa budú používať iba niektoré z nich. [10]

4.1 Kondicionovanie

V zásade platí že skúšobné telesá, ktoré budú podrobené fyzikálne mechanickým skúškam, nemôžu byť dopredu vystavené mechanickému, fyzikálne chemickému alebo tepelnému namáhaniu, ktoré by mohlo výsledky skúšok ovplyvniť. Výnimku tvoria skúšky starnutia, korózie, skúšky tepelnej odolnosti, pri ktorých sa telesá vystavujú zámerne prirodzenému alebo zrýchlenému starnutiu a stanoví sa zmena mechanických vlastností voči pôvodným hodnotám.

Väčšina skúškových vzorkov a materiálov pre skúšanie prešla tepelným namáhaním. Aj vzorky pripravené obrábaním a brúsením sa povrchovo zahŕňajú. Pred prevedením vlastnej skúšky je nutné materiál nechať odležať, až dosiahne rovnovážneho stavu, hlavne z hľadiska teploty a vzdušnej vlhkosti. Všetky faktory, ktoré ovplyvňujú pri príprave stav polymérneho materiálu, tvoria tzv. históriu vzorku, ktorá sa má kondicionovaním vyrovnáť, aby sa čo najmenej podieľala na výsledkoch merania.

Kondicionovanie spočíva vtom, že sa vzorky nechávajú určitú dobu odležať, v klimatizovaných priestoroch za podmienok zmluvnej teploty a relatívnej vlhkosti. Vzorky preberajú teplotu okolitého vzduchu, vlhkosť sa vyrovnáva, pričom doba kondicionovania je závislá na teplote, pri ktorej bola vzorka pripravený, hrúbka vzorku, tepelnej vodivosti a difúzných vlastnostiach hmoty. Používajú sa tri normálové skúšobné klímy:

- Klíma miernych pásiem, hlavne v Európe: teplota $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, relatívna vlhkosť $65\pm 5\%$
- Klíma pre teplejšie a suchšie pásma, hlavne USA: teplota $23\pm 2^{\circ}\text{C}$, relatívna vlhkosť $50\pm 5\%$
- Klíma pre tropické a subtropické pásma: teplota $27\pm 2^{\circ}\text{C}$, relatívna vlhkosť $65\pm 5\%$

4.2 Ťahová skúška

Tento typ mechanického skúšania materiálu patrí medzi statické skúšky krátkodobé. Táto skúška bola medzi prvými skúškami ktoré sa podieľali na hodnotení mechanických vlastností polymérnych materiálov.

Ťahová skúška hodnotí pevnosť materiálu v ťahu. Princíp spočíva v namáhaní skúšobného telesa do okamihu kedy nastane pretrhnutie vzorku. Ak by sa jednalo o izotropný materiál čo v reálnej situácii nenastáva, mal by vozorok napätie rozložené rovnomerne po celom priereze vzorku. Skúšobné teleso na tento typ skúšky má tvar lopatky, ktorá je na koncoch uchytená a silovým pôsobením tak deformovaná. Presné rozmery a tvar telieska je stanovený normou ČSN ISO 527. Ťahovú skúšku je možné vykonávať aj pri rôznych teplotách ak je nato zariadenie vybavené. Zväčša takéto meranie býva vybavené komoru do ktorého sa buď zavedie chladiace médium alebo naopak sa zabezpečí vyhrievanie skúšobnej komory.

Priebeh skúšky popisuje ťahová krivka, čo je závislosť napätia na deformácií. Pri pôsobení silou F na prierez vzorku S bude osovú napätie,

$$\sigma = (dF / dS) \quad (20)$$

Prierez telesa sa pri skúške mení až do okamihu kedy nastane rovnováha medzi deformáciou a napätím. Pri ďalšom pôsobení sily sa teleso pretrhne. Taktiež dochádza k predĺženiu s pôvodnej dĺžky l_0 na dĺžku l čo vyjadruje hodnota pomerného predĺženia

$$\varepsilon = (l - l_0) / l_0 = \Delta l / l_0 \quad (21)$$

V lineárnej časti ťahovej krivky platí Hookov zákon, deformácia je priamo úmerná sile. Konštantou úmernosti je Youngov modul E , ktorý je popísaný ako

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (22)$$

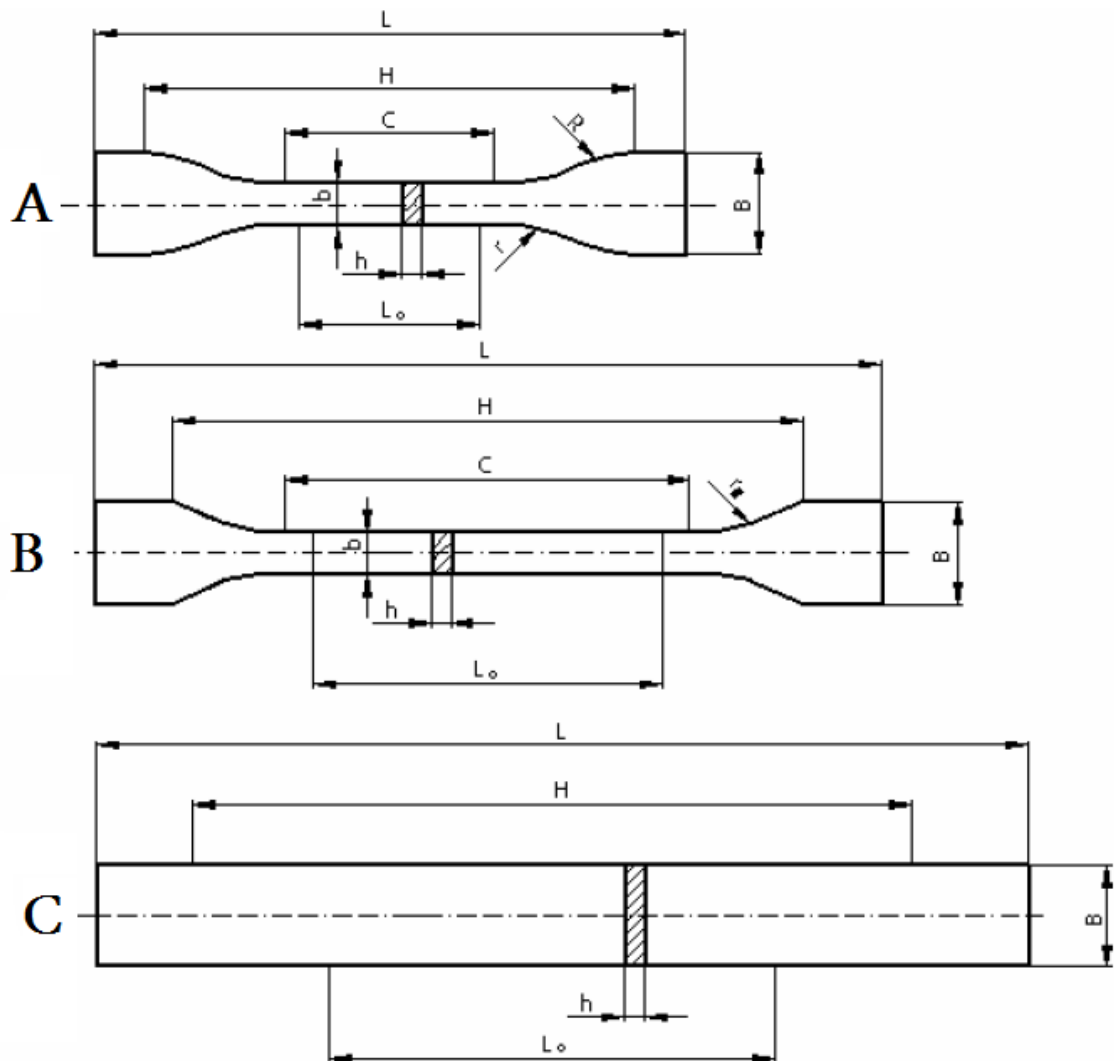
4.2.1 Skúšobné telieska pri ťahovej skúške

Pri ťahových skúškach sa používajú dva druhy skúšobných teliesok a to vo tvare obojstrannej lopatky tzv. osmičky alebo v tvare krúžkov. Použitie daných tvarov závisí od materiálu, obojstranné lopatky sa používajú pri všetkých typoch polymérov, avšak krúžky iba pri kaučukových vulkanizátoch.

Tvar osmičiek je u polymérov rôzny podľa ich pevnosti a spôsobu prípravy, preto sa buď vstrekujú do foriem alebo sa pripravujú obrábaním. Ich presné rozmery sú dané príslušnou normou, a ich tvar závisí od čelustí stroja a koncentrácií osového napätia do zúženej časti vzorku L_0 . [16]

Rozmery	Skúšobné teleso typu		
	typ A	typ B	typ C
celková dĺžka L	75	150	250
šírka upínacej hlavy B	12,5±1	20±0,5	25±0,5
dĺžka pracovnej časti C	25±1	80±0,5	/
dĺžka pracovne časti b	4±1	10±0,5	/
menší polomer zakrivenia r	8±0,5	/	/
väčší polomer zakrivenia R	12,5±1	/	/
počiatočná merná dĺžka L_0	20±0,5	50±0,5	50±1
vzdialenosť medzi značkami H	50±2	110±5	170±5
polomer zakrivenia r_1	/	20-25	/
hrúbka h	4±0,2	4±0,2	4±0,2

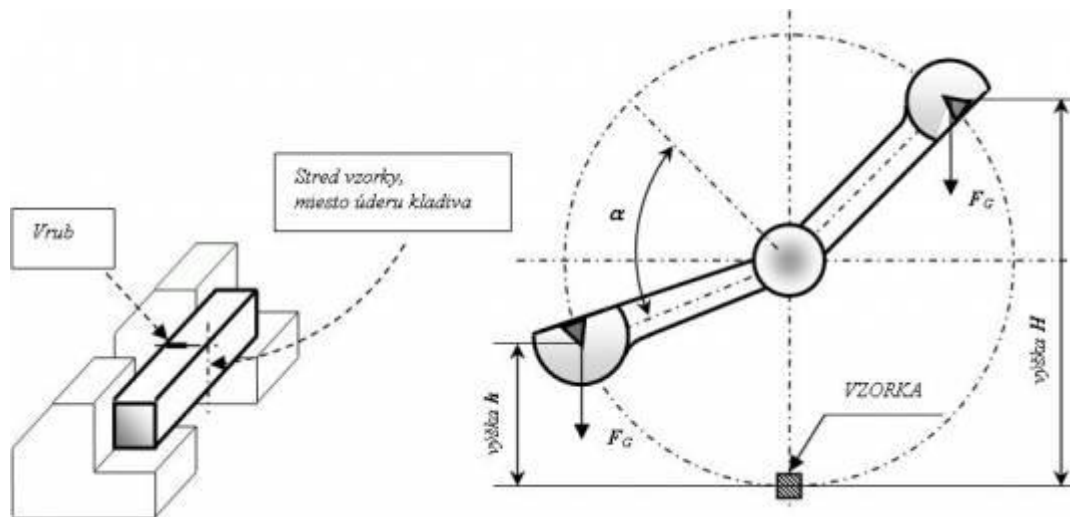
Tabuľka 1 - Rozmery teliesok pri ťahovej skúške



Obrázok 18 - Skúšobné telieska typu A,B,C.

4.3 Rázová skúška

Princíp tejto skúšky spočíva v uchytení skúšobného telesa medzi dvomi podperami a aplikácií sily koncentrovanej do veľmi krátkej doby. Táto sila je vyvolaná pohybom kladiva smerom k vzorku veľkou rýchlosťou. Teleso je namáhané na ohyb vo veľmi krátkom čase pričom dôjde k prerazeniu. Táto metóda sa nazýva metóda pomocou Charpyho kladiva.



Obrázok 19 - Schematické znázornenie Charpyho kladiva.

Pri dynamickej skúške Charpyho kladivom rátame rázovú húževnatosť a vrubovú húževnatosť, ktorá závisí od druhu meraného materiálu a jeho vlastností. [17]

4.3.1 Skúšobné telieska pre rázovú a vrubovú húževnatosť

Skúšobné telieska určené pre rázovú skúšku Charpyho kladivom sa pripravujú lisovaním či vstrekaním z daného materiálu podľa príslušnej normy ISO 293, ISO 294, ISO 295, alebo sú zhotovené mechanickým obrábaním podľa ISO 2818 z dosiek, ktoré boli pripravené lisovaním alebo vstrekaním východiskového materiálu. Rozmery týchto teliesok sú normalizované a norma dovoľuje použiť niekoľko typov, ktoré sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Skúšobné telesá	Dĺžka l [mm]	Šírka b [mm]	Hrúbka h [mm]	Vzdialenosť Podpier [mm]
veľké	120	15	10	70
stredné	80	4	10	70
malé	50	6	4	40

Tabuľka 2 - Skúšobné telesá pre skúšky vrubovej húževnatosti

4.3.2 Rázová húževnatosť

Takýto typ skúšania sa uskutočňuje na materiáloch, ktoré sú krehkejšie a tým pádom ich prerušenie je uskutočniteľné jednoduchšie. Zväčša sa jedná o amorfné materiály. Pri rázovej húževnatosti je kinetická energia kyvadlového rázového kladiva, spotrebovaná na prerazenie skúšobného telesa bez vrubu, vzťahnutá na pôvodnú plochu jeho priečného prierezu. Výpočet sa prevedie podľa vzorca:

$$A_n = W/b.h \quad (23)$$

Kde „W“ je deformačná energia spotrebovaná k pretrhnutiu telesa a odčítaná na stupnici skúšobného prístroja, „b“ je šírka a „h“ je hrúbka skúšobného telesa. Rázová húževnatosť sa prevádza podľa normy ČSN ISO 179.

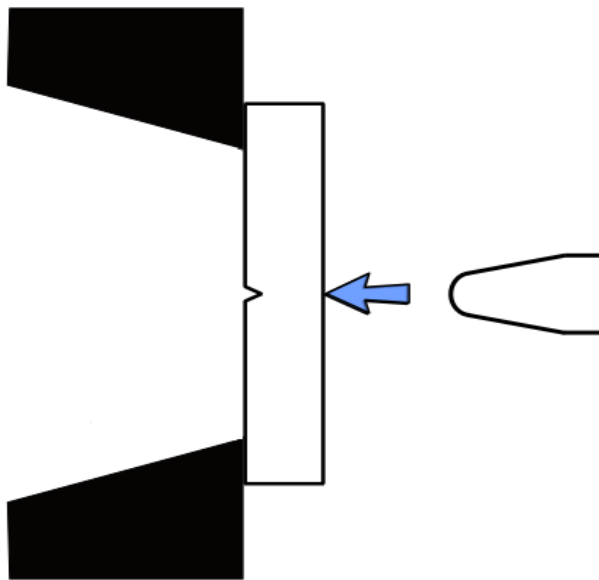
4.3.3 Vrubová húževnatosť

Tento typ dynamického skúšania polymérnych materiálov sa vyznačuje charakteristickým zavedením vrubu na skúšobné teliesko. Jedná sa o hodnotu ktorá je získaná zo skúšobných telies zoslabených vrubom rôznych tvarov, vzťahnutá na prierez po odčítaní hĺbky vrubu. Výpočet je obdobný s tým rozdielom že dosadzujeme

$$A_k = W/b.h_k \quad (24)$$

„h_k“ je hrúbka skúšobného telesa v mieste vrubu.

Skúška s vrubom bola zavedená pôvodne preto, aby došlo k lomu v mieste zoslabenia, tj. v strede skúšobnej tyčinky a aby lom prebiehal kolmo n a pozdĺžnu os. Pri skúške sa telieska ukladajú tak aby vrub bol v ťahovej oblasti tj. na opačnej strane telesa, kde je prevedená rázová deformácia. U homogénnych izotropných materiálov by mal byť teoreticky minimálny rozdiel medzi rázovou a vrubovou húževnosťou. V skutočnosti je však vplyv narušenia hladkého povrchu vrubom taký, že hodnoty vrubovej húževnosti sú 5-10 krát nižšie než rázová húževnosť. [17]



Obrázok 20 - Skúšobný vzorok s vrubom

PRAKTICKÁ ČÁST

5 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

5.1 Použití materiál

Materiál ktorý bol ožiarený a následne testovaný je od firmy EPSAN PLASTIK SAN. VE TIC. LTD. STI.

Názov materiálu je EPLAMID 6 GFR30 FRV0 NATURAL, jedná sa o prírodný polyamid 6, ktorý je plnený sklenenými vláknami, do ktorého bol následne pridaný retardér horenia. Ďalšie vlastnosti materiálu sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Materiálové vlastnosti Polyamidu 6		
Mechanické vlastnosti	Modul pružnosti v ťahu	8500 – 9000 N/mm ²
	Sila pri pretrhnutí	145 – 155 N/mm ²
	Pomerné predĺženie	3 – 4%
	Vrubová húževnatosť	14 – 15 KJ/m ²
Fyzikálne vlastnosti	Hustota	1,5 – 1,52 g/cm ³
	Tvrdosť	80 – 85 D
Horľavosť	Samozhasivosť (1,6 mm)	VO
	Horúci drôt(2 mm)	960°C
Tepelné vlastnosti	Bod tavenia	215 – 225°C
	HDT/A (1,6 mm)	210°C
	VICAT/B (50 N)	210°C

Tabuľka 3 - Vlastnosti Polyamidu 6

5.1.1 Siet'ovacie činidlo

Použitie činidlo, ktoré bolo primiešané do Polyamidu 6 v rôznych dávkach od 1% až po 6% a nesie názov Masterbach BETALINK®-Master IC/W65PA6.

Dané sieťovacie činidlo je v špeciálnych prípadoch prípravy vyrobené pri pokojovej teplote, čo má za následok prevenciu voči tepelnej degradácii prísad. Činidlo svojím zloženým predchádza klasickým problémom s tekutými či už práškovými prísadami. Produkt je vhodný pre technológie vstrekovania ale aj pre extrúziívne účely.

Hlavné výhody BETALINK činidla v porovnaní s inými tekutými alebo práškovými prísadami:

- žiadna prašnosť pri spracovávaní a pri suchom mixovaní s polymérmi
- kompatibilita s PA6 a PA6.6
- žiadne vyparovanie činidla v násypke
- redukcia riziku sklúznutia v plniacej zóne extrudéru

BETALINK by nemal byť predsušovaný a mal by byť pridávaný do polymérov (PA 6) až potom ako je materiál vysušený.

Pridávaním Betalinku-Master IC/W65PA6 sa redukuje viskozita. Vo veľa prípadoch teplota tavenia môže byť taktiež znížená.

Podmienky skladovania:

- životnosť nepoužitého balenia pri stanovených podmienkach skladovania je 1 rok
- skladovanie by malo byť uskutočňované v chladných, suchých a tmavých miestach [15]

5.2 Ožiarenie vzorkov

Vzhľadom nato že samotné ožiarenie vzorkov je nutné vykonať špeciálnym zariadeným, boli vzorky odvezené do Nemeckej firmy „Beta-Gamma-Service“. Vzorky boli ožiarené tromi dávkami a to: 66kGy, 99kGy a 132kGy.

Vzhľadom k tomu že daný materiál nebolo možné ožiariť ihneď veľkou dávkou tak boli dávky ožarovania vyberané tak aby bol materiál vhodne vystavený danému žiareniu. Ožarovanie sa teda uskutočnilo vo viacerých okruhoch. Počet okruhov a dávky ožiarení sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Okruhy	Predpokladaná dávka [KGy]	Skutočná dávka [KGy]
1.okruh	33	34,13
2.okruh	33	35,43
3.okruh	33	35,43

Tabuľka 4 - Dávky ožiarenia v okruhoch

Pre rovnomerné a kvalitnejšie ožiarenie vzorkov boli rozdelené do viacerých kontajnérov a vhodne uložené viz. Nasledujúce obrázky. Energia elektrónové urychlovača dosahuje hodnoty 10 [MeV].



Obrázok 21 - Ožiarované vzorky

Na obrázkoch je znázornení proces uloženia vzorkov na kontajnery a následné uloženie na dopravné pásy, ktoré vzorky dopraví pod tzv.(scanner), čo je vlastne vyústenie urýchlených elektrónov.

5.2.1 Merné jednotky používané pri ožarovaní

U radiačného sieťovania, určuje v prvom rade dávka ožiarenia požadovanej zmeny vlastností, tzn. Množstvo absorbovanej energie žiarenia na mernú jednotku hmoty.

Dávka intenzity žiarenia (dosis)= absorbovanej energii žiarenia / hmotnosť

Jednotka intenzity je (gray) [Gy], predtým to bol (rad).

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

$$10\text{kGy} = 1\text{Mrad}$$

Energia žiarenia absorbovaná výrobkom za časovú jednotku a vzťahnutá na hmotnosť je dávková intenzita žiarenia.

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

Penetrácia (hĺbka prenikania) vysoko energetických elektrónov poprípade gama žiarenie je závislé na ich energií. Merná jednotka energie je joule [J], predtým [eV].

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

Výkon zdroja rádioaktívneho žiarenia je charakterizovaný jeho aktivitou. Jednotka pre aktivitu je Becquerel [Bq], predtým: Curie [Ci].

$$1\text{Bq} = 1 \text{ rozpad/s}$$

$$1\text{Ci} = 3,7\cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

5.3 Stupeň zosieťovania

Stupeň zosieťovania alebo (gel content) je meranie, ktoré sa uskutočňovalo za účelom zistenia do akej miery daný materiál zosieťoval. Hodnota zosieťovania daného materiálu následne ovplyvňuje celkové vlastnosti materiálu ako pevnosť, húževnatosť a podobne. Na vyhodnotení výsledkov sa zúčastnila Nemecká firma „Beta-Gamma-Service“.

Následný postup merania stupňa zosieťovania je v súlade s normou EN ISO 579.

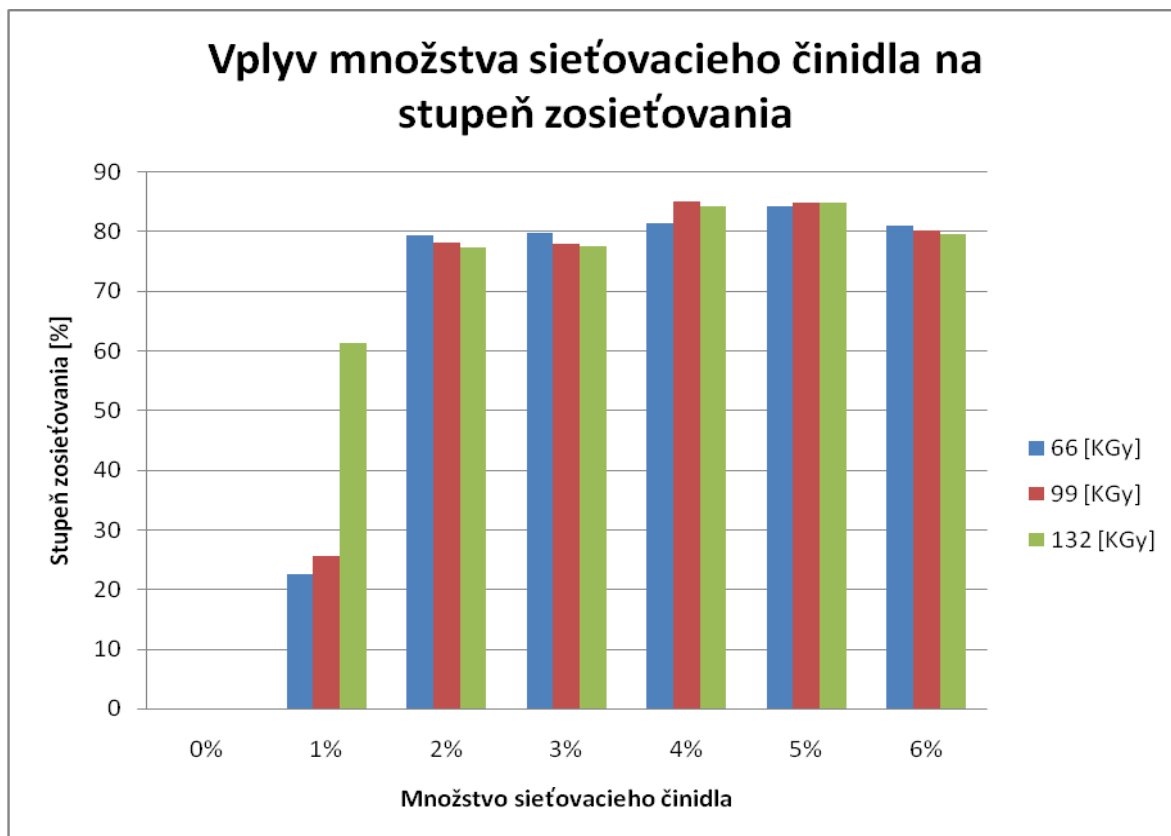
Približne jeden gram materiálu bol navážený a ďalej rozdrvený na malé kúsky. Výsledné kúsky boli namočené v 150 ml roztoku kyseliny mravčej (HCOOH) a povarené približne 6 hodín. Následne boli vzorky vyňaté a sušené vo vákuu pri teplote 100°C po dobu troch hodín, alebo po dobu potrebnú na získanie konštantnej váhy.

Na vyhodnotenie stupňa zosieťovania (gel contentu) bol použitý vzorec uvedený ďalej:

$$\text{Stupeň zosieťovania (gel content)} = \frac{\text{finálna váha}}{\text{počiatočná váha}} \times 100$$

Množstvo sieťovacieho činidla v (%)	Dávka ožiarenia	Stupeň zosieťovania
	v (kGy)	v (%)
1	66	22,5
1	99	25,7
1	132	61,2
2	66	79,4
2	99	78,2
2	132	77,4
3	66	79,7
3	99	78
3	132	77,5
4	66	81,3
4	99	85,1
4	132	84,3
5	66	84,3
5	99	84,9
5	132	84,8
6	66	80,9
6	99	80,2
6	132	79,6

Tabuľka 5 - Stupeň zosieťovania



Obrázok 22 - Graf stupňa zosieťovania

Na výsledkoch merania je zrejmé pri ktorej dávke žiarenia a pri ktorom množstve sieťovacieho činidla boli dosiahnuté najväčšie hodnoty zosieťovania. Najväčší stupeň zosieťovania bol dosiahnutý pri dávke ožiarovania 99kGy a pri množstve sieťovacieho činidla 4%. Platí fakt že nie vždy s dávkou ožiarovania rastie aj stupeň zosieťovania ako je zrejmé aj z tejto skúšky.

5.4 Ťahová skúška

Ťahová skúška bola vykonaná na mechanickom stroji typu Zwick Roell 1456.

Pri vyhodnocovaní získaných dát sme použili štatistických hodnôt, ktoré sú uvedené nasledovne:

- Aritmetický priemer „ \bar{x} “, namerané výsledky sa sčítajú a následne podelia svojim počtom.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (25)$$

- Smerodajná odchýlka „ s “, je absolútna hodnota druhej odmocniny.

$$s = |\sqrt{s^2}| \quad (26)$$

- Stredná kvadratická chyba aritmetického priemeru „ σ “

$$\sigma = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (27)$$

5.4.1 Zariadenie na ťahovú skúšku

Na vyhodnotenie niektorých mechanických vlastností polymérnych materiálov ako je medza pevnosti v ťahu, modul pružnosti, potrebujeme špeciálne zariadenie. V danom prípade bolo použité zariadenie Zwick Roell 1456. Daný prístroj je vybavený čelustami ktoré slúžia na vyhodnotenie daných dát. Prístroj je možné použiť aj na skúšku ohybovú a tlakovú. Prístroj je navyše vybavený komorou, v ktorej je možné temperovať alebo chladieť vzorok na vyššie ale aj minusové teploty.

Niektoré parametre stroja:

- celková výška stroja [2012mm]
- celková šírka stroja [630mm]
- šírka pracovného priestoru [420mm]
- hmotnosť [150kg]
- maximálna skúšobná sila [20kN]
- maximálna posuvná rýchlosť [750mm.min⁻¹]

5.4.2 Skúšobné teliesko pre ťahovú skúšku

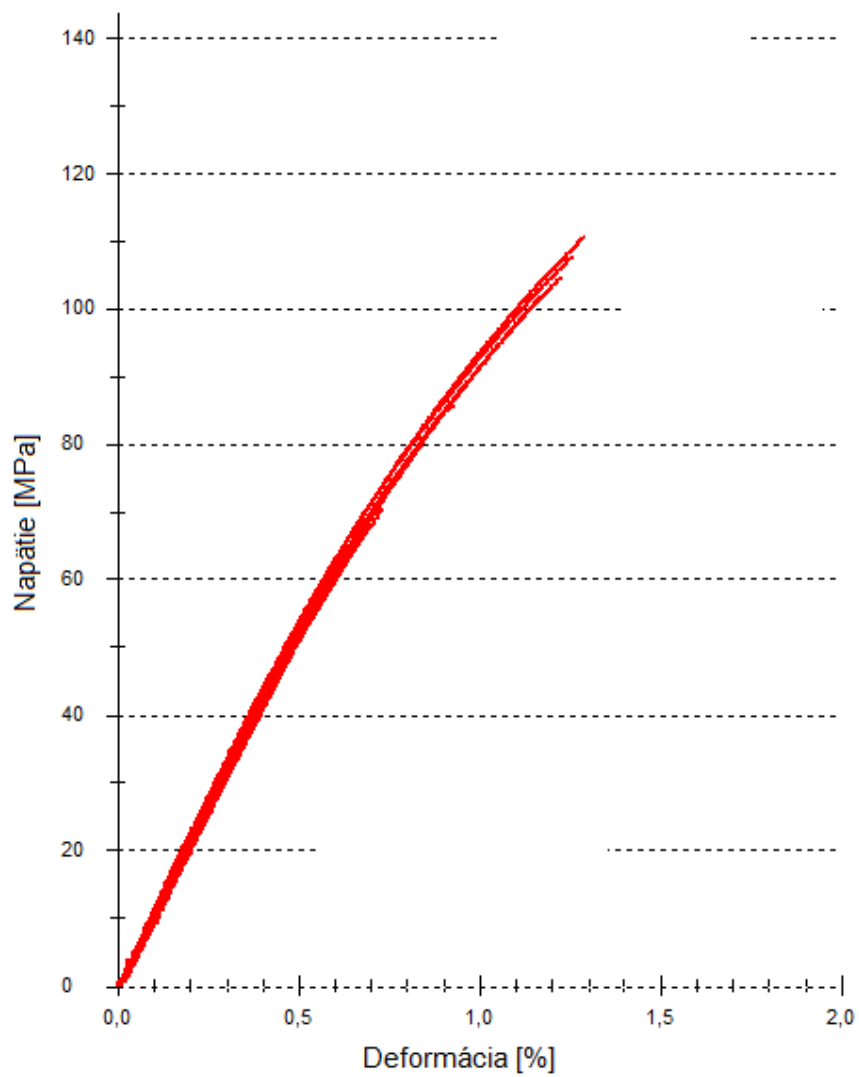
Skúšobné vzorky na danú skúšku sú vyhotovené podľa normy ČSN EN ISO 527, podrobnejšie údaje o normalizovaných rozmeroch sú uvedené v kapitole 4.2.1. Rozmer v strede profilu, ktorý je smerodajný bol v danom prípade 10x4 mm.



Obrázok 23 - Skúšobná lopatka na ťahovú skúšku

5.4.3 Ťahová skúška pri teplote 23⁰ C

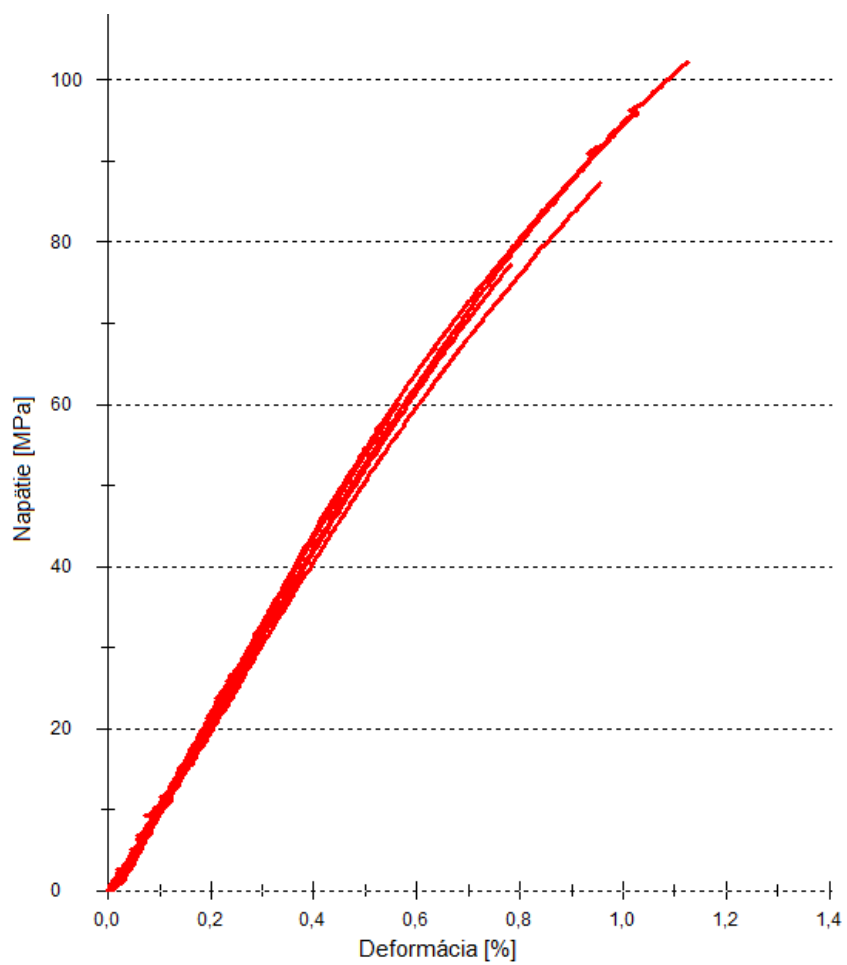
Pre každé množstvo sieťovacieho činidla, a tak isto aj pre každú dávku ožiarenia bolo nameraných desať vzorkov z ktorých boli následne vyhodnotené výsledky.



Obrázok 24 - Graf pri 23°C a dávke 66 KGy

Dávka ožiarenia 66KGy pri 23 ⁰ C							
Množstvo sieťovacieho čidla		1%	2%	3%	4%	5%	6%
E [MPa]	\bar{x}	11257.53	11379.6	11369.68	10774.27	10536.76	10604.25
	s	975.87	733.18	455.43	470.18	747.9	385.12
	σ	8.67	6.44	4.01	4.36	7.1	3.63
Rm [MPa]	\bar{x}	120.78	119.91	121.77	120.46	117.32	117.58
	s	4.56	5.3	4.79	2.7	3.66	5.05
	σ	3.78	4.42	3.93	2.24	3.12	4.29
RB [MPa]	\bar{x}	120.64	119.6	121.29	120.46	116.98	117.54
	s	4.43	5.27	2.27	2.7	3.93	5.04
	σ	3.67	4.41	3.69	2.24	3.36	4.28
ϵ_B [mm]	\bar{x}	0.32	0.31	0.31	0.32	0.3	0.31
	s	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03
	σ	9.98	8.89	8.78	6.64	6.03	8.47
ϵ [%]	\bar{x}	1.58	1.54	1.55	1.59	1.5	1.56
	s	0.15	0.14	0.14	0.11	0.09	0.13
	σ	9.62	8.87	8.72	6.64	6.05	8.45

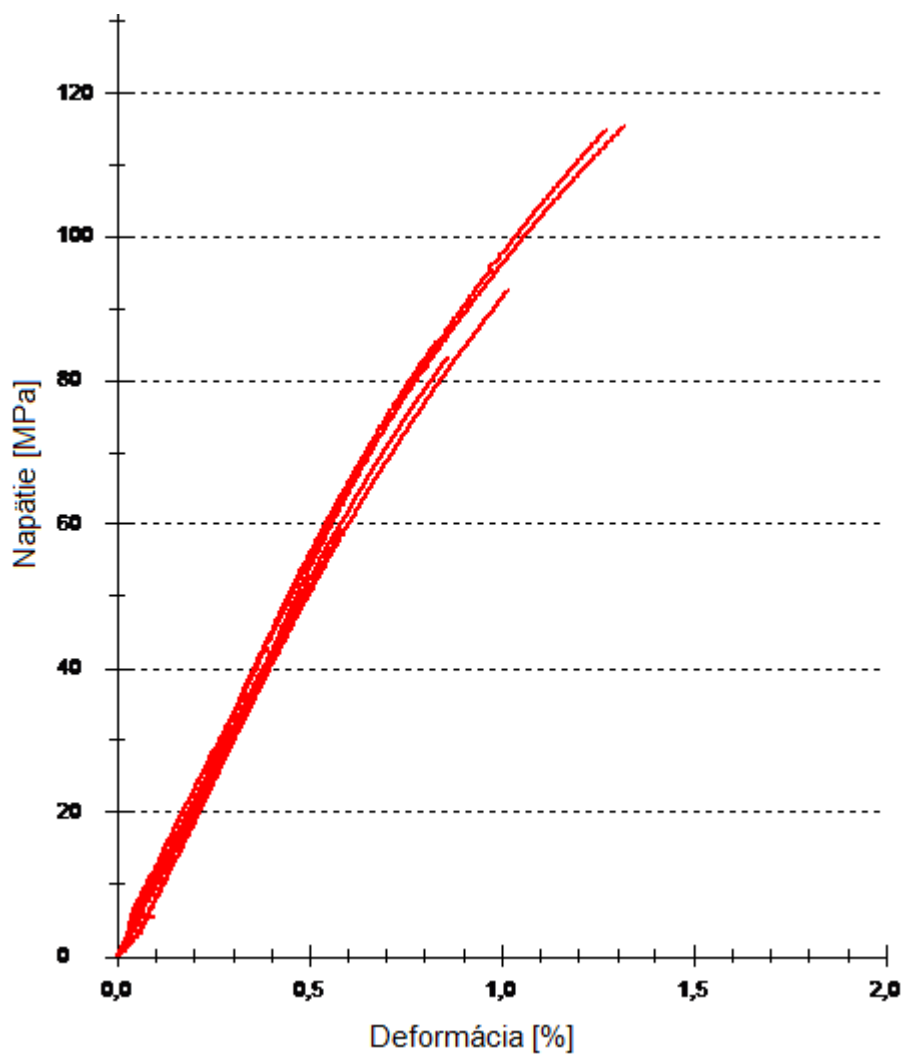
Tabuľka 6 - Dávka ožiarenia 66KGy pri 23⁰C



Obrázok 25 - Graf pri 23°C a dávke 99KGy

Dávka ožiarenia 99KGy pri 23 ⁰ C							
Množstvo sieťovacieho čidla		1%	2%	3%	4%	5%	6%
E [MPa]	\bar{x}	10721.53	10419.27	10702.95	10897.15	11003.07	10493.88
	s	598.65	832.66	502.99	580.87	558.34	638.06
	σ	5.58	7.99	4.7	5.33	5.07	6.08
Rm [MPa]	\bar{x}	122.7	125.31	126.71	125.22	124.75	123.64
	s	3.84	3.23	1.88	2.45	2.21	4.16
	σ	3.13	2.58	1.49	1.96	1.78	3.36
RB [MPa]	\bar{x}	122.7	125.29	126.61	124.54	124.42	123.26
	s	3.84	3.22	2	3.52	2.88	4.36
	σ	3.13	2.57	1.58	2.83	2.32	3.53
ε_B [mm]	\bar{x}	0.33	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
	s	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
	σ	6.26	4.28	5.04	4.71	3.43	6.93
ε [%]	\bar{x}	1.63	1.61	1.6	1.58	1.6	1.6
	s	0.1	0.07	0.08	0.08	0.06	0.11
	σ	6.26	4.28	5.05	4.77	3.54	6.91

Tabuľka 7 - Dávka ožiarenia 99KGy pri 23⁰C



Obrázok 26 - Graf pri 23°C a dávke 132KGy.

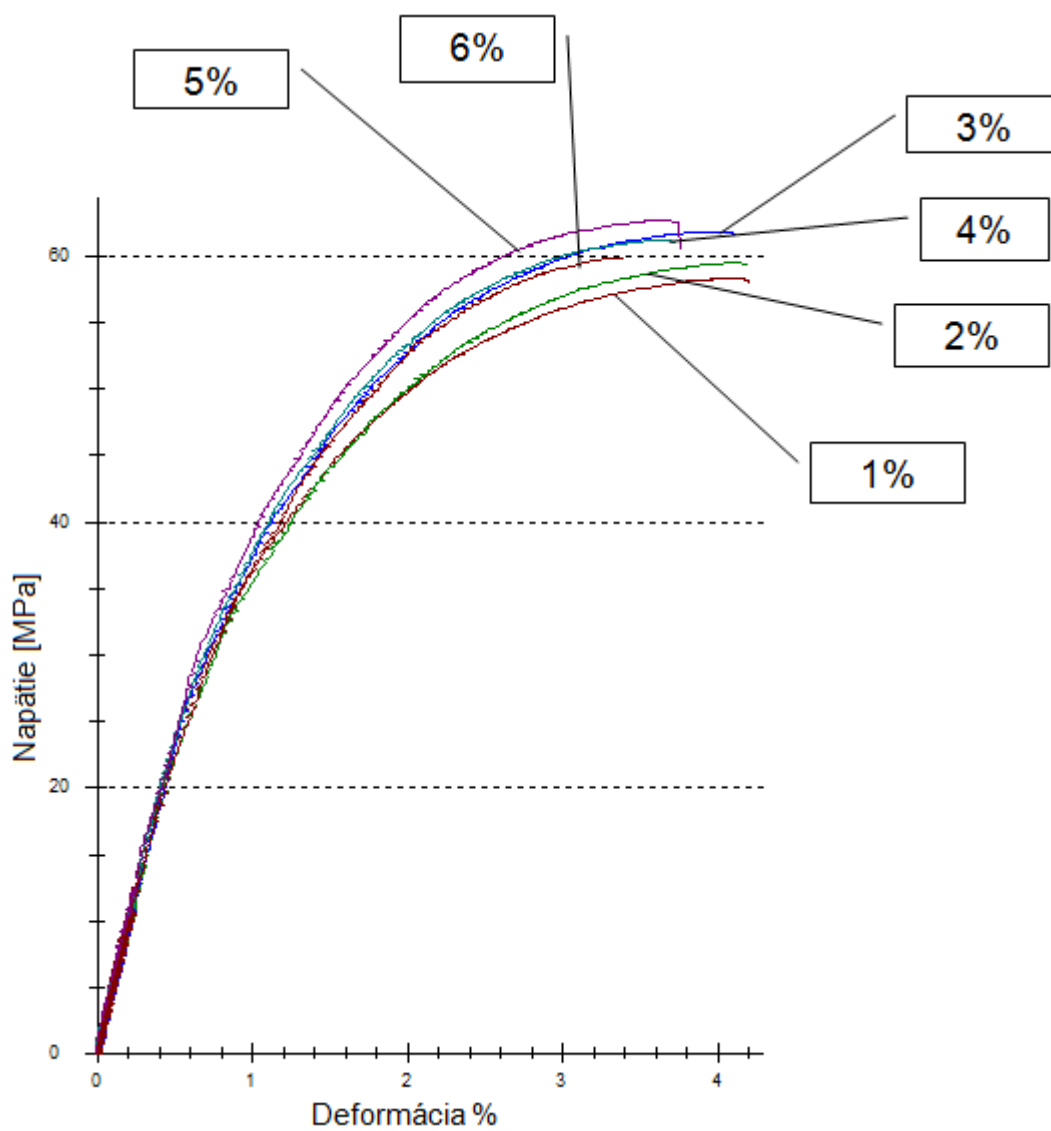
Dávka ožiarenia 132KGy pri 23 ⁰ C							
Množstvo sieťovacieho čidla		1%	2%	3%	4%	5%	6%
E [MPa]	\bar{x}	10864.4	10646.98	10641.71	10699.37	10535.83	10513.48
	s	350.06	1810.01	776.3	460.88	658.72	340.2
	σ	3.22	17	7.29	4.31	6.25	3.24
Rm [MPa]	\bar{x}	124.6	124.94	125.57	124.31	125.29	124.63
	s	1.8	2.68	3.33	2.91	2.08	2.76
	σ	1.44	2.14	2.65	2.34	1.66	2.21
RB [MPa]	\bar{x}	124.59	124.59	125.57	123.96	125.21	124.3
	s	1.78	2.81	3.33	2.87	1.99	3.4
	σ	1.43	2.25	2.65	2.32	1.59	2.74
ε_B [mm]	\bar{x}	0.33	0.32	0.31	0.32	0.33	0.32
	s	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
	σ	3.57	6.24	5.36	5.9	3.88	5.03
ε [%]	\bar{x}	1.66	1.6	1.57	1.59	1.63	1.59
	s	0.06	0.1	0.08	0.09	0.06	0.08
	σ	3.53	6.23	5.36	5.9	3.87	5.05

Tabuľka 8 - Dávka ožiarenia 132KGy pri 23⁰C

Neožiarené pri 23 ⁰ C							
Množstvo sieťovacieho činidla		1%	2%	3%	4%	5%	6%
E [MPa]	\bar{x}	10593.94	10196.66	9778.97	9247.18	8844.87	8842.4
	s	674.26	578.07	426.8	618.56	437.55	512.06
	σ	6.36	5.67	4.36	6.69	4.95	5.79
Rm [MPa]	\bar{x}	114.91	113.44	110.5	104.08	101.07	98.58
	s	1.42	1.04	1.53	4.7	3.65	3.15
	σ	1.23	0.91	1.39	4.52	3.61	3.19
RB [MPa]	\bar{x}	114.91	113.44	110.49	103.94	100.93	97.83
	s	1.42	1.03	1.52	4.84	3.77	3.83
	σ	1.23	0.91	1.38	4.66	3.73	3.91
ϵ_B [mm]	\bar{x}	0.33	0.34	0.35	0.35	0.34	0.34
	s	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03
	σ	6.48	5.5	4.05	7.17	6.25	8.1
ϵ [%]	\bar{x}	1.65	1.69	1.73	1.71	1.66	1.68
	s	0.1	0.09	0.07	0.1	0.08	0.12
	σ	6.21	5.42	3.87	6.05	4.99	7.04

Tabuľka 9 - Neožiarené vzorky pri 23⁰C

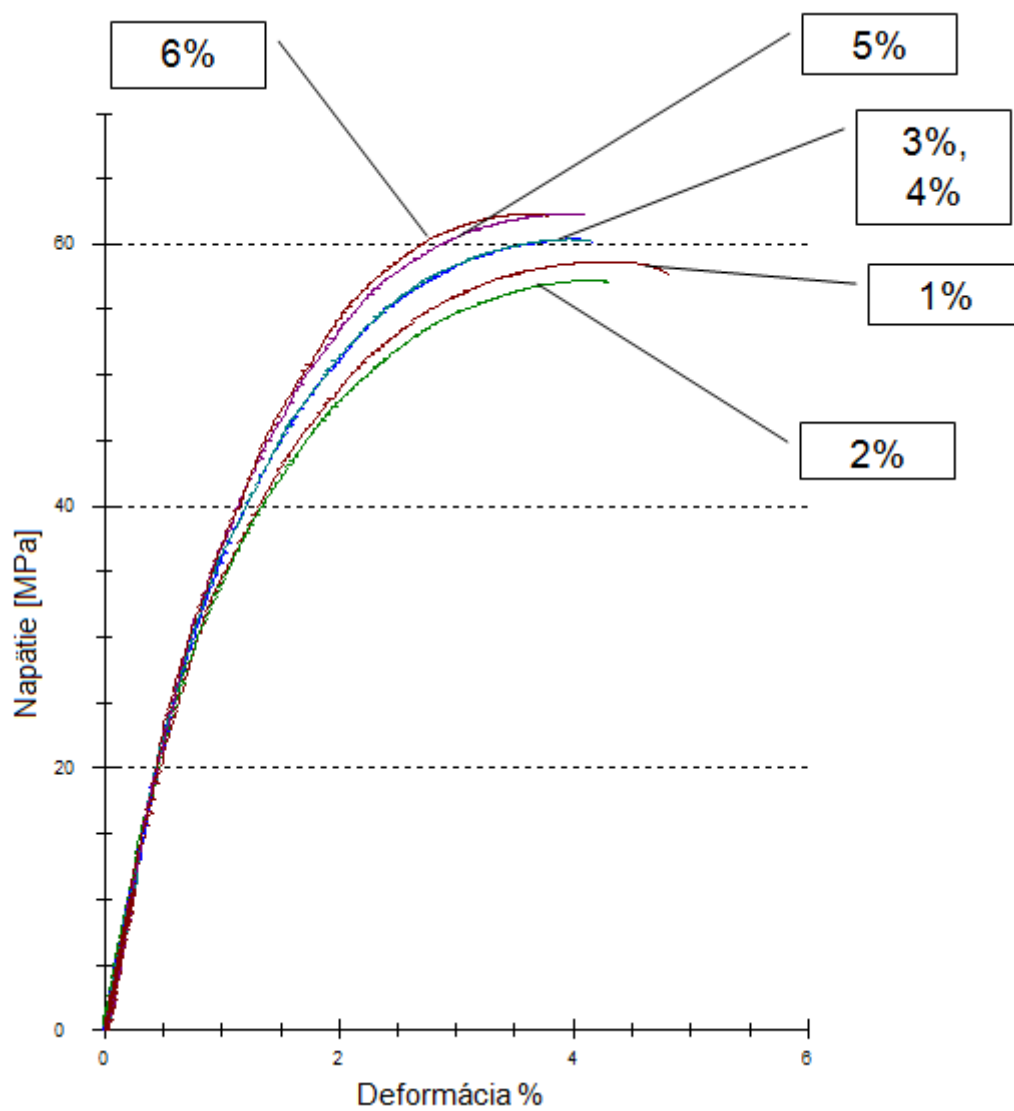
5.4.4 Ťahová skúška pri teplote 100° C



Obrázok 27 - Graf pri 100°C a dávke 66KGy

Dávka ožiarenia 66 KGy pri 100°C							
Množstvo sieťovacieho činidla		1%	2%	3%	4%	5%	6%
E[MPa]	\bar{x}	4807,77	4620,18	4841,43	4787,14	4907,06	4622,61
	s	360,26	307,98	640,55	320,69	355,84	250,06
	σ	7,49	6,67	13,23	6,7	7,25	5,41
Rm[MPa]	\bar{x}	58,35	59,65	60,9	61,25	61,82	60,24
	s	0,61	0,73	0,87	0,84	1	1,24
	σ	1,04	1,22	1,43	1,37	1,61	2,06
Rb[MPa]	\bar{x}	57,76	59,09	60,27	60,78	61,36	59,99
	s	0,58	0,98	1,62	1,48	1,06	1,28
	σ	1,01	1,66	2,69	2,44	1,72	2,13
ε [mm]	\bar{x}	0,85	0,84	0,8	0,74	0,72	0,73
	s	0,03	0,05	0,06	0,04	0,07	0,05
	σ	3,02	5,36	6,88	5,23	9,17	6,93
ε [%]	\bar{x}	4,12	4,04	3,86	3,63	3,47	3,56
	s	0,11	0,15	0,18	0,17	0,27	0,22
	σ	2,76	3,74	4,64	4,59	7,64	6,04

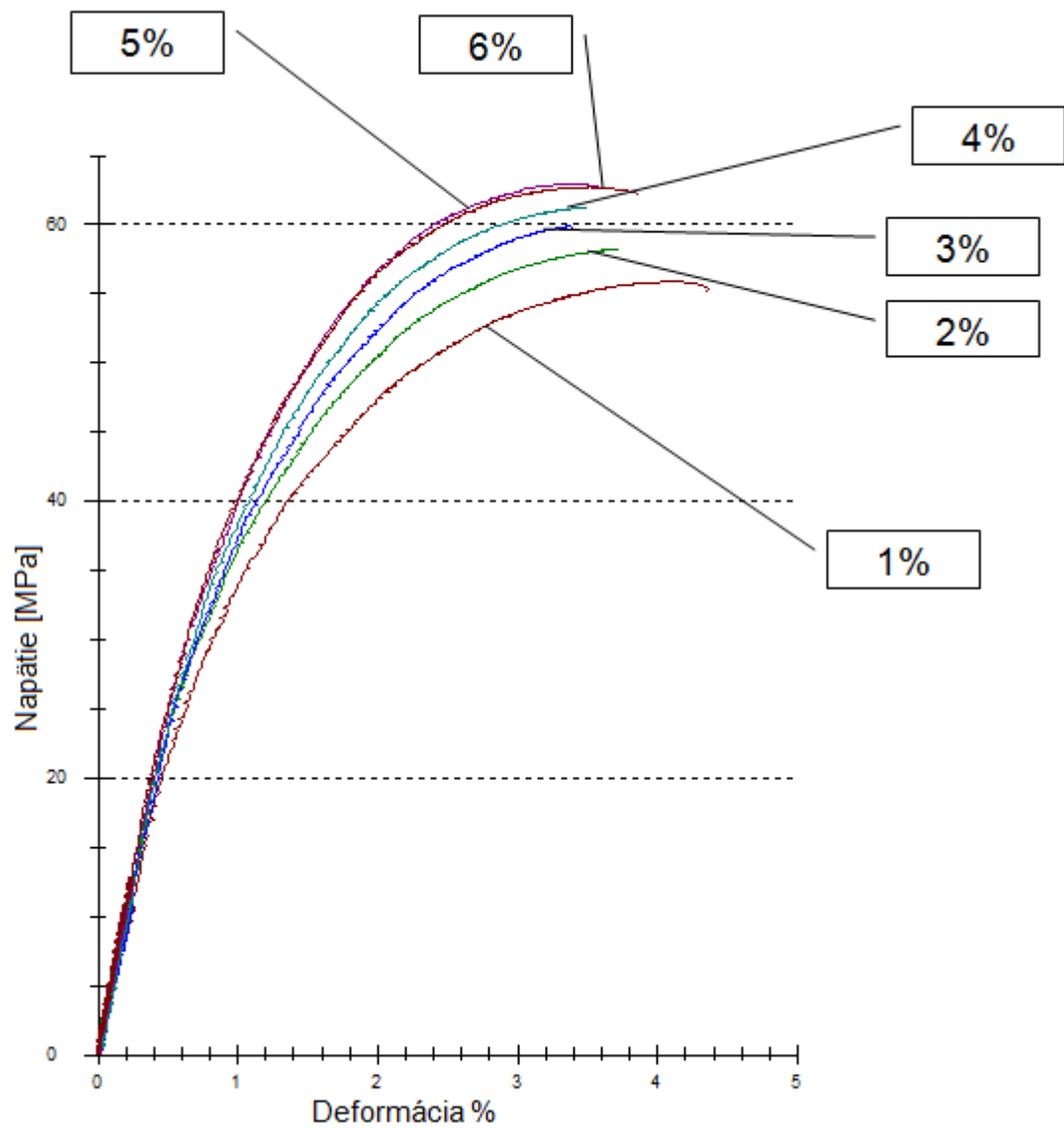
Tabuľka 10 - Dávka ožiarenia 66KGy pri 100°C



Obrázok 28 - Graf pri 100°C a dávke 99KGy

Dávka ožiarenia 99 KGy pri 100°C							
Množstvo sieťovacieho čidla		1%	2%	3%	4%	5%	6%
E[MPa]	\bar{x}	4497,67	4622,17	4692,75	4698,77	4652,54	4508,11
	s	224,96	217,24	274,08	210,53	230,5	268,58
	σ	5	4,7	5,84	4,48	4,95	5,96
Rm[MPa]	\bar{x}	56,36	58,83	59,38	61,56	62,57	62,17
	s	1,64	1,06	2,24	0,88	0,37	1,44
	σ	2,91	1,8	3,77	1,43	0,59	2,31
Rb[MPa]	\bar{x}	55,75	58,45	59,23	61,1	62,39	61,87
	s	1,53	1,08	2,25	1,03	0,45	1,47
	σ	2,75	1,84	3,79	1,69	0,72	2,38
ε [mm]	\bar{x}	0,89	0,82	0,77	0,78	0,77	0,78
	s	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,04
	σ	7,15	6,36	7,11	4,85	4,37	5,77
ε [%]	\bar{x}	4,19	3,97	3,77	3,74	3,75	3,74
	s	0,22	0,2	0,24	0,18	0,11	0,17
	σ	5,29	5,09	6,3	4,8	2,98	4,66

Tabuľka 11 - Dávka ožiarenia 99KGy pri 100°C



Obrázok 29 - Graf pri 100°C a dávke 132KGy

Dávka ožiarenia 132 KGy pri 100°C							
Množství síťovacího činidla		1%	2%	3%	4%	5%	6%
E[MPa]	\bar{x}	4016,74	4517,36	4820,25	5023,89	5051,3	5278,08
	s	471,18	683,07	204,98	91,76	293,72	237
	σ	11,73	15,12	4,25	1,83	5,81	4,49
Rm[MPa]	\bar{x}	57,28	59,23	60,45	62,19	62,93	62,41
	s	1,07	0,73	0,75	0,91	0,81	0,66
	σ	1,88	1,24	1,23	1,46	1,29	1,06
Rb[MPa]	\bar{x}	56,79	58,46	60,08	61,92	62,45	62,23
	s	1,15	1,08	0,91	0,9	0,96	0,61
	σ	2,03	1,85	1,51	1,46	1,54	0,97
ε [mm]	\bar{x}	0,88	0,84	0,76	0,74	0,69	0,64
	s	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,08
	σ	4,59	7,14	7,38	5,2	7,11	11,86
ε [%]	\bar{x}	4,19	3,95	3,68	3,56	3,33	3,11
	s	0,15	0,21	0,19	0,13	0,17	0,3
	σ	3,59	5,36	5,07	3,56	5,16	9,59

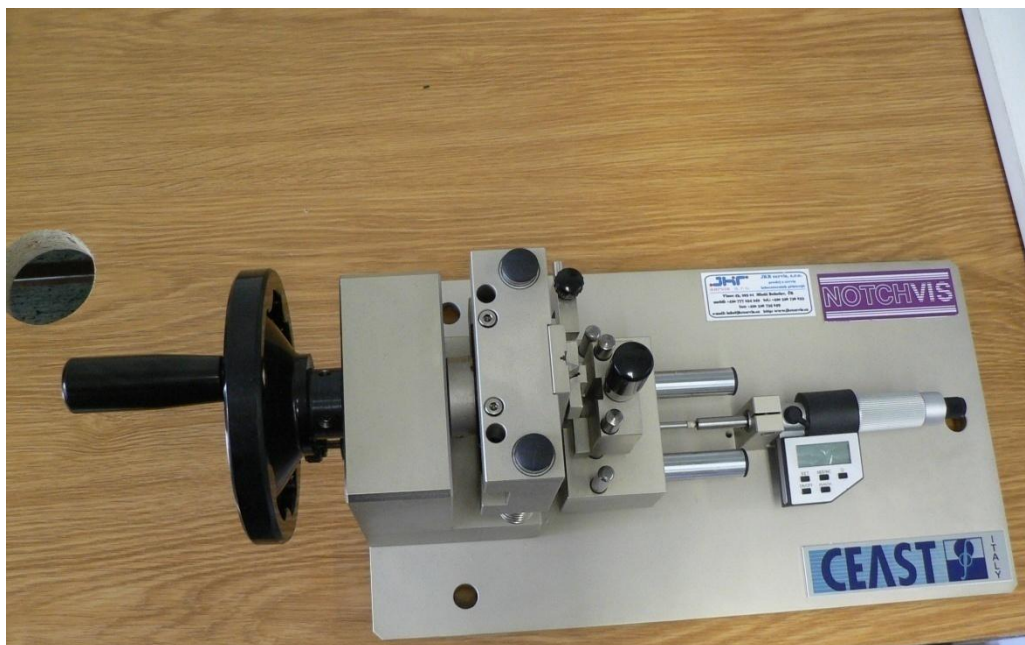
Tabuľka 12 - Dávka ožiarenia 132KGy pri 100°C

5.5 Dynamická skúška rázom

Pri vyhodnocovaní dynamickej skúšky boli použité štatistické hodnoty ako aritmetický priemer, smerodajná odchýlka a stredná kvadratická chyba. Výpočet týchto štatistických hodnôt je uvedený v úvode kapitoly 5.4.

5.5.1 Zariadenie na meranie vrubovej a rázovej húževnatosti

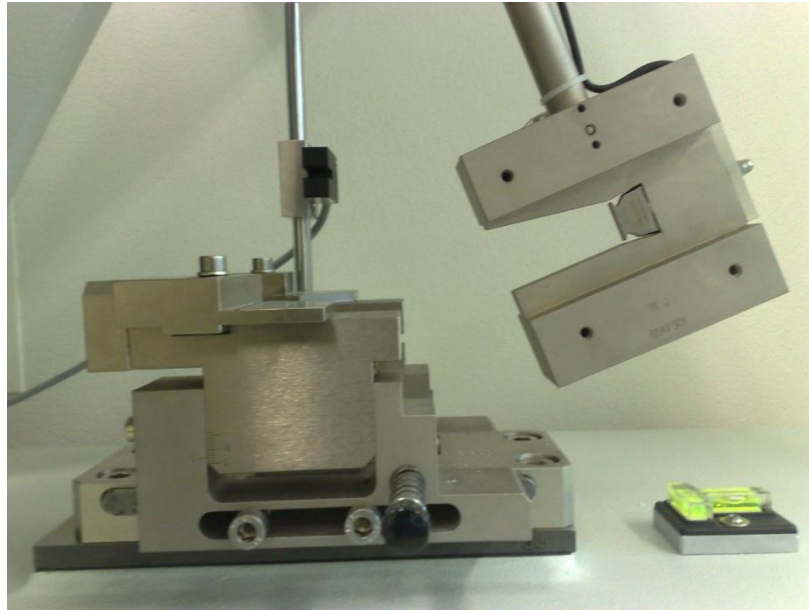
Použitú zariadenie slúži na vyhodnotenie rázovej alebo vrubovej húževnatosti. V konkrétnom prípade sa jednalo o vrubovú húževnatosť, ktorá sa od rázovej líši iba aplikáciou vrubu na skúšobné telieska. Tento vrub bol vytvorený vrubovacím zariadením. Veľkosť vrubu je 2mm a bol vytvorený mechanicky podľa normy ISO 2818. Pri meraní bola zvolená energia o hodnote 2.87J a kyvadlo bolo spúšťané z uhlu 50° . Hmotnosť kyvadla je 2,18 kg. Kyvadlo je spúšťané zo zvolenej výšky, následne narazí na umiestnené skúšobné teliesko a spôsobí jeho prerazenie. Prístroj je napojený na pevný počítač, ktorý následne pomocou príslušného programu s názvom „DAS8WIN“ vyhodnocuje namerané hodnoty.



Obrázok 30 - Vrbovací prístroj

Prístroj na vykonanie rázu sa nazýva „Resil Impactor Junior“ jeho parametre sú nasledovné:

- rozsah energie 1-25 [J]
- rozmery zariadenia (LxDxH), 900x500x800 [mm]
- hmotnosť 180 [kg]



Obrázok 31 - Kyvadlo rázového zariadenia



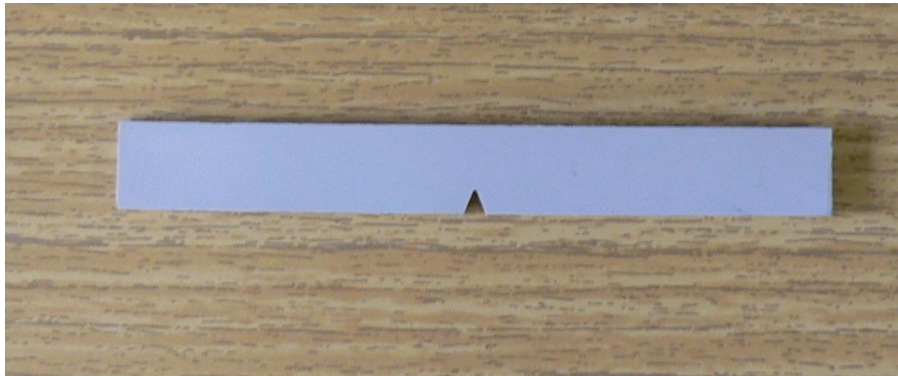
Obrázok 32 - Prístroj „Resil Impactor Junior“

5.5.2 Skúšobné teliesko

Na meranie vrubovej húževnatosti boli dané telieska upravené vrubom. Rozmery telieska sú stanovené normou uvedenou v kapitole 4.3.1. Vrub sa na

teliesko vytvára mechanicky podľa normy ISO 2818. Rozmery telieska sú nasledovné:

- dĺžka vzorku 80[mm]
- rozmery profilu telieska 10x4 [mm]
- rozmery profilu telieska v mieste vrubu 8x4 [mm]



Obrázok 33 - Skúšobné telieska

5.5.3 Namerané hodnoty pri pokojovej teplote 21°C

		Neožiarené pri 21°C						
Množstvo sieťovacieho činidla		0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%
Fm [N]	\bar{x}	1146.24	1084.59	1325.32	1144.54	1036.01	1031.14	1044.94
	s	143.51	41.23	250.53	213.88	35.28	55.67	94.4
	σ	115.35	29.1	206.88	158.27	28.04	44.92	74.91
Sm [mm]	\bar{x}	0.77	0.64	1.16	0.72	0.65	0.65	0.63
	s	0.3	0.09	0.7	0.15	0.07	0.07	0.1
	σ	0.21	0.07	0.56	0.12	0.05	0.05	0.08
Sb [mm]	\bar{x}	0.89	0.71	1.25	0.8	0.75	0.75	0.72
	s	0.25	0.06	0.65	2.13	0.06	0.07	0.06
	σ	0.18	0.05	0.51	1.5	0.05	0.05	0.05
Ab [kJ/m²]	\bar{x}	11.58	10.89	11.13	10.21	10.27	10.53	9.84
	s	1.5	1.03	0.54	2.13	0.72	1.05	1
	σ	1.17	0.69	0.38	1.5	0.6	0.74	0.8

Tabuľka 13 - Dynamická skúška neožiarených vzorkov pri 21°C

Dávka ožiarenia 66KGy pri 21 ⁰ C							
Množstvo sieťovacieho činidla		1%	2%	3%	4%	5%	6%
Fm [N]	\bar{x}	1191.63	1112.19	1117.7	1096.09	1058.07	976.88
	s	115.28	55.66	139.36	52.61	59.51	55.22
	σ	82.87	41.81	77.13	39.38	48.58	48.01
Sm [mm]	\bar{x}	0.74	0.67	0.7	0.67	0.65	0.63
	s	0.12	0.02	0.08	0.1	0.07	0.08
	σ	0.09	0.02	0.05	0.08	0.05	0.07
Sb [mm]	\bar{x}	0.81	0.76	0.75	0.78	0.74	0.7
	s	0.12	0.05	0.08	0.08	0.05	0.04
	σ	0.09	0.04	0.05	0.06	0.05	0.03
Ab [kJ/m ²]	\bar{x}	11.9	11.34	10.72	10.44	9.68	9.01
	s	0.95	0.59	0.78	0.7	0.57	0.29
	σ	0.68	0.45	0.6	0.53	0.44	0.21

Tabuľka 14 - Dynamická skúška 66KGy pri 21⁰C

Dávka ožiarenia 99KGy pri 21 ⁰ C							
Množstvo sieťovacieho činidla		1%	2%	3%	4%	5%	6%
Fm [N]	\bar{x}	1095.42	1064.43	1074.58	1018.28	1056.04	1050.08
	s	37.75	44.68	151.35	67.19	55.67	60.02
	σ	32.07	35.89	92.18	54.13	45.74	49.53
Sm [mm]	\bar{x}	0.58	0.64	0.61	0.62	0.61	0.77
	s	0.22	0.07	0.08	0.1	0.08	0.13
	σ	0.14	0.05	0.08	0.08	0.08	0.11
Sb [mm]	\bar{x}	0.65	0.72	0.73	0.72	0.72	0.86
	s	0.2	0.06	0.08	0.06	0.05	0.1
	σ	0.11	0.06	0.06	0.05	0.05	0.08
Ab [kJ/m ²]	\bar{x}	10.03	10.47	10.41	10.1	9.64	11.27
	s	2.71	0.74	0.99	0.9	0.62	1.55
	σ	1.79	0.63	0.75	0.77	0.54	1.24

Tabuľka 15 - Dynamická skúška 99KGy pri 21⁰C

Dávka ožiarenia 132KGy pri 21 ⁰ C							
Množstvo sieťovacieho čidla		1%	2%	3%	4%	5%	6%
Fm [N]	\bar{x}	1118.96	1125.05	1027.76	1017.47	1053.47	1025.05
	s	25.2	28.71	64.24	57.45	55.35	296.07
	σ	15.78	20.19	53.59	42.9	45.6	171.67
Sm [mm]	\bar{x}	0.86	0.86	0.79	0.81	0.88	0.84
	s	0.02	0.02	0.11	0.17	0.29	0.09
	σ	0.02	0.01	0.1	0.13	0.17	0.07
Sb [mm]	\bar{x}	0.98	1.88	0.91	0.92	1.04	0.92
	s	0.06	2.86	0.07	0.13	0.28	0.06
	σ	0.05	1,63	0.06	0.08	0.16	0.04
Ab [kJ/m ²]	\bar{x}	14.87	14.79	13.06	12.63	12.49	11.98
	s	0.6	0.55	0.9	0.64	0.92	0.61
	σ	0.43	0.37	0.71	0.41	0.68	0.4

Tabuľka 16 - Dynamická skúška 66KGy pri 21⁰C5.5.4 Namerané hodnoty pri zníženej teplote -30⁰C

Dávka ožiarenia 66KGy pri -30 ⁰ C plus (0%neožiarená)								
Množstvo sieťovacieho čidla		0% neožiar.	1%	2%	3%	4%	5%	6%
Fm [N]	\bar{x}	187.03	241.13	375.22	352.09	373.44	366.77	361.27
	s	5.84	15.38	18.6	39.26	45.54	63.96	66.27
	σ	4.88	11.42	15.76	26.74	30.37	47.99	52.96
Sm [mm]	\bar{x}	0.56	0.61	0.84	0.89	0.85	0.97	0.97
	s	0.09	0.08	0.11	0.09	0.14	0.14	0.17
	σ	0.07	0,07	0.09	0.07	0.1	0.11	0.14
Sb [mm]	\bar{x}	0.66	0.74	1.01	1.09	1.02	1.11	1.12
	s	0.11	0.11	0.05	0.14	0.16	0.13	0.16
	σ	0.08	0.08	0.03	0.12	0.14	0.11	0.13
Ab [kJ/m ²]	\bar{x}	1.54	1.68	4.27	4.47	4.19	4.06	4.07
	s	0.2	0.05	0.52	0.36	0.28	0.35	0.38
	σ	0.15	0.03	0.36	0.27	0.25	0.28	0.26

Tabuľka 17 - Dynamická skúška 66KGy pri -30⁰C

Dávka ožiarenia 99KGy pri -30°C							
Množstvo sieťovacieho činidla		1%	2%	3%	4%	5%	6%
Fm [N]	\bar{x}	195.88	389.66	354	330.03	352.52	317.44
	s	10.23	61.62	21.51	19	55.72	14.57
	σ	7.33	52.9	14.81	13.84	33.4	11.87
Sm [mm]	\bar{x}	0.53	0.91	0.81	0.84	0.97	0.83
	s	0.06	0.16	0.3	0.06	0.22	0.14
	σ	0.04	0.13	0.17	0.05	0.14	0.1
Sb [mm]	\bar{x}	0.63	1.07	0.95	0.96	1.11	1.02
	s	0.08	0.15	0.3	0.08	0.21	0.1
	σ	0.06	0.13	0.18	0.06	0.13	0.07
Ab [kJ/m ²]	\bar{x}	1.55	4.45	4.11	4.11	4.11	3.9
	s	0.09	0.41	1.16	0.26	0.37	0.28
	σ	0.06	0.24	0.65	0.18	0.3	0.22

Tabuľka 18 - Dynamická skúška 99KGy pri -30°C

Dávka ožiarenia 132KGy pri -30°C							
Množstvo sieťovacieho činidla		1%	2%	3%	4%	5%	6%
Fm [N]	\bar{x}	184.92	375.45	334.8	372.33	322.08	317.44
	s	7.45	53.62	12.16	61.26	17.74	14.57
	σ	4.2	40.01	7.91	46.31	14.16	11.87
Sm [mm]	\bar{x}	0.45	0.99	0.84	0.9	0.86	0.83
	s	0.07	0.13	0.09	0.18	0.16	0.14
	σ	0.05	0.11	0.07	0.14	0.12	0.1
Sb [mm]	\bar{x}	0.55	1.12	0.97	1.06	1	1.02
	s	0.04	0.11	0.09	0.17	0.1	0.1
	σ	0.03	0.08	0.07	0.14	0.08	0.07
Ab [kJ/m ²]	\bar{x}	1.36	4.52	4.27	4.25	3.97	3.9
	s	0.06	0.4	0.28	0.42	0.2	0.28
	σ	0.04	0.26	0.23	0.35	0.16	0.22

Tabuľka 19 - Dynamická skúška 132KGy pri -30°C

6 DISKUSIA VÝSLEDKOV

6.1 Diskusia ťahovej skúšky

V nasledujúcej kapitole budú diskutované namerané výsledky a hodnoty pre materiál z rôznymi dávkami sieťovacieho činidla od 1 po 6 a dávkami ožiarenia od 66 do 132kGy, z ktorých následne budú vyvedené závery.

6.1.1 Ťahová skúška pri teplote 23°C

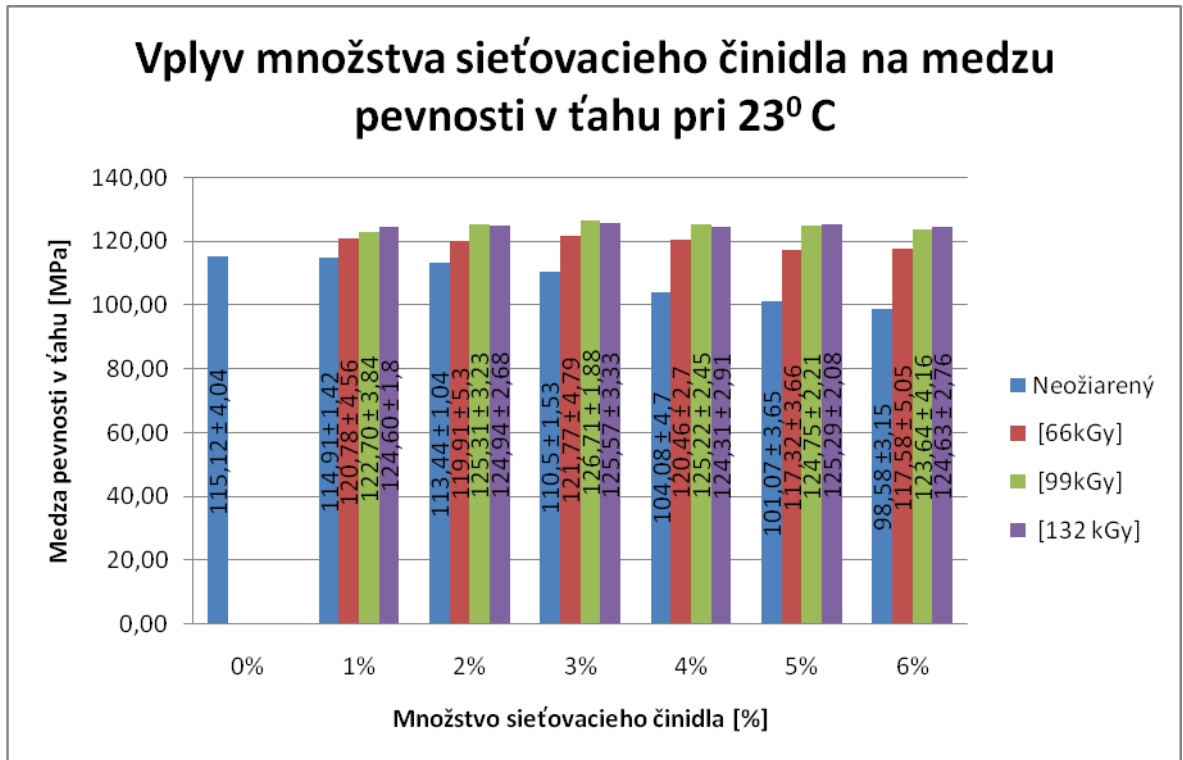
Z nasledujúcich výsledkov pri porovnávaní medze pevnosti v ťahu pri rôznych hodnotách činidla a rôznych dávkach ožiarenia, je zrejmé že medza pevnosti sa príliš nemení. Hodnota stúpa so zvyšujúcimi sa dávkami ožiarenia ale nie markantne.

Avšak zmena nastáva pri vzorkách, ktoré neboli ožiarené, modul sa v týchto prípadoch znižuje pridávaním sieťovacieho činidla. Vzorky ktoré majú 6% množstva sieťovacieho činidla majú hodnotu medze pevnosti o zhruba 15% menšiu ako vzorky bez sieťovacieho činidla.

Je zrejmé že zo zvyšujúcim množstvom činidla medza pevnosti klesá, avšak iba v prípadoch kedy nedošlo k ožiareniu.

Hodnoty medze pevnosti v ťahu pri teplote 23°C v [MPa]				
Množstvo sieť.činidla	Neožiarené	66kGy	99kGy	132kGy
0%	115,12±4,04			
1%	114,91±1,42	120,78±4,56	122,7±3,84	124,6±1,8
2%	113,44±1,04	119,91±5,3	125,31±3,23	124,94±2,68
3%	110,5±1,53	121,77±4,79	126,71±1,88	125,57±3,33
4%	104,08±4,7	120,46±2,7	125,22±2,45	124,31±2,91
5%	101,07±3,65	117,32±3,66	124,75±2,21	125,29±2,08
6%	98,58±3,15	117,58±5,05	123,64±4,16	124,63±2,76

Tabuľka 20 - Hodnoty medze pevnosti v ťahu pri 23°C



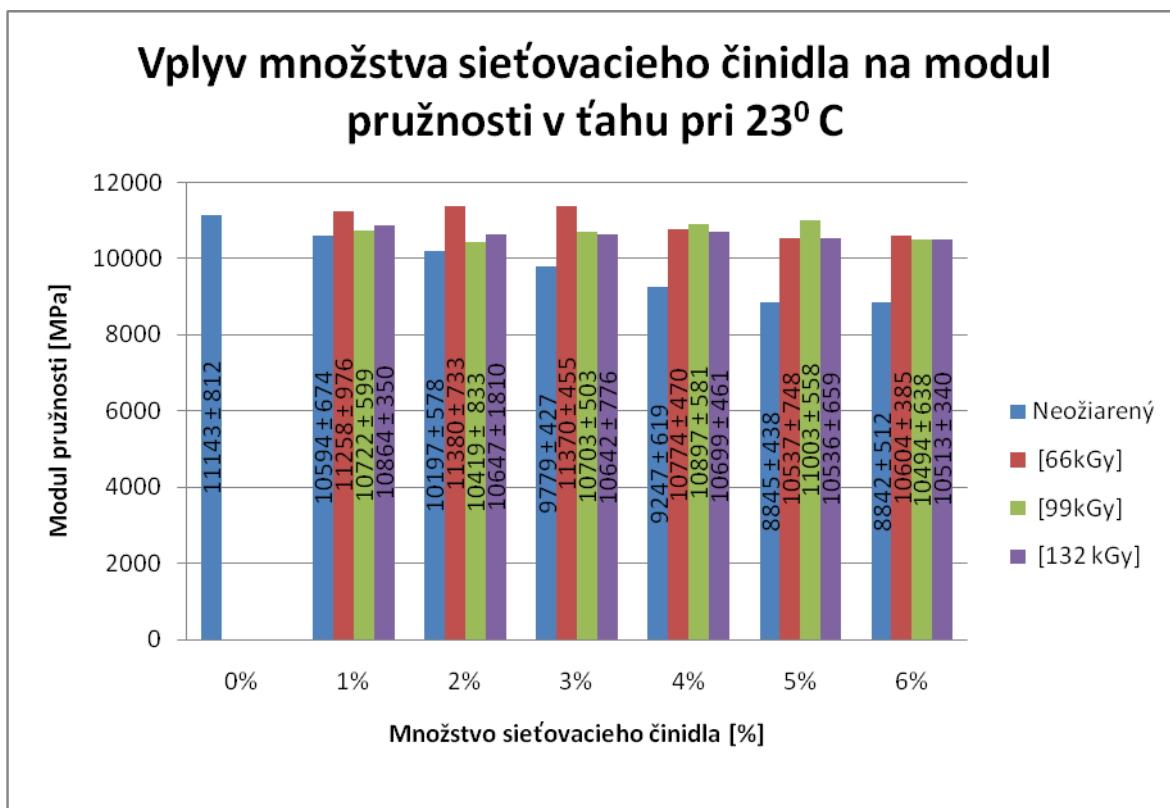
Obrázok 34 - Graf porovnania medzí pevnosti pri 23⁰C

Pri vyhodnocovaní výsledkov modulu pružnosti sú hodnoty tiež podobné, i keď o málo vyšších hodnôt bolo dosiahnuté hlavne pri ožiarení dávkou 66 kGy.

Avšak pri vzorkách bez sieťovacieho činidla bol opäť trend klesajúci ako pri medzi pevnosti. Vzorky s množstvom sieťovacieho činidla 6% mali o 20 % nižšiu hodnotu modulu pružnosti ako vzorky bez činidla.

Hodnoty modulu pružnosti v ťahu pri teplote 23°C v [MPa]				
Množstvo sieť. činidla	Neožiarené	66kGy	99kGy	132kGy
0%	11143±812			
1%	10594±674	11258±976	10722±599	10864±350
2%	10197±578	11380±733	10419±833	10647±1810
3%	9779±427	11370±455	10703±503	10642±776
4%	9247±619	10774±470	10897±581	10699±461
5%	8845±438	10537±748	11003±558	10536±659
6%	8842±512	10604±385	10494±638	10513±340

Tabuľka 21 - Hodnoty modulu pružnosti pri 23°C



Obrázok 35 - Graf porovnania modulu pružnosti pri 23°C

6.1.2 Ťahová skúška pri teplote 100°C

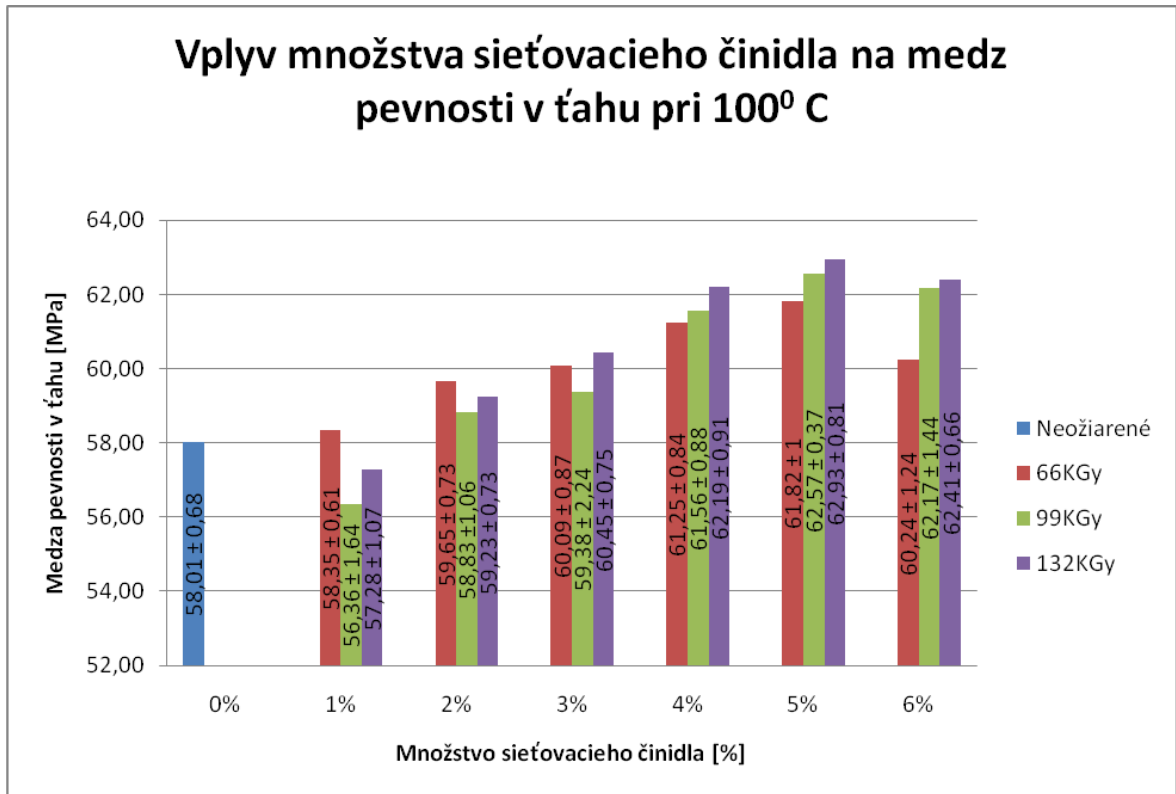
Pri zvýšenej teplote sa výsledky pozorovateľne menili oproti predošlým prípadom pri pokojovej teplote.

Hodnoty medze pevnosti v ťahu pri teplote 100°C v [MPa]				
Množstvo sieť.čínidla	Neožiarené	66kGy	99kGy	132kGy
0%	58,01±0,68			
1%		58,35±0,61	56,36±1,64	57,28±1,07
2%		59,65±0,73	58,83±1,06	59,23±0,73
3%		60,09±0,87	59,38±2,24	60,45±0,75
4%		61,25±0,84	61,56±0,88	62,19±0,91
5%		61,82±1	62,57±0,37	62,93±0,81
6%		60,24±1,24	62,17±1,44	62,41±0,66

Tabuľka 22 - Hodnoty medze pevnosti v ťahu pri 100°C

V danom prípade medz pevnosti nadobudla najuspokojivejších výsledkoch, až pri vyšších množstvách sieťovacieho čínidla a to konkrétne pri 4%, 5%, 6% sieťovacieho čínidla. Taktiež vyššie dávky žiarenia preukázali lepšiu medzu pevnosti.

Percentuálny rozdiel medzi neožiarenými vzorkami a vzorkami z najvyššou hodnotou medze pevnosti činil 8%.

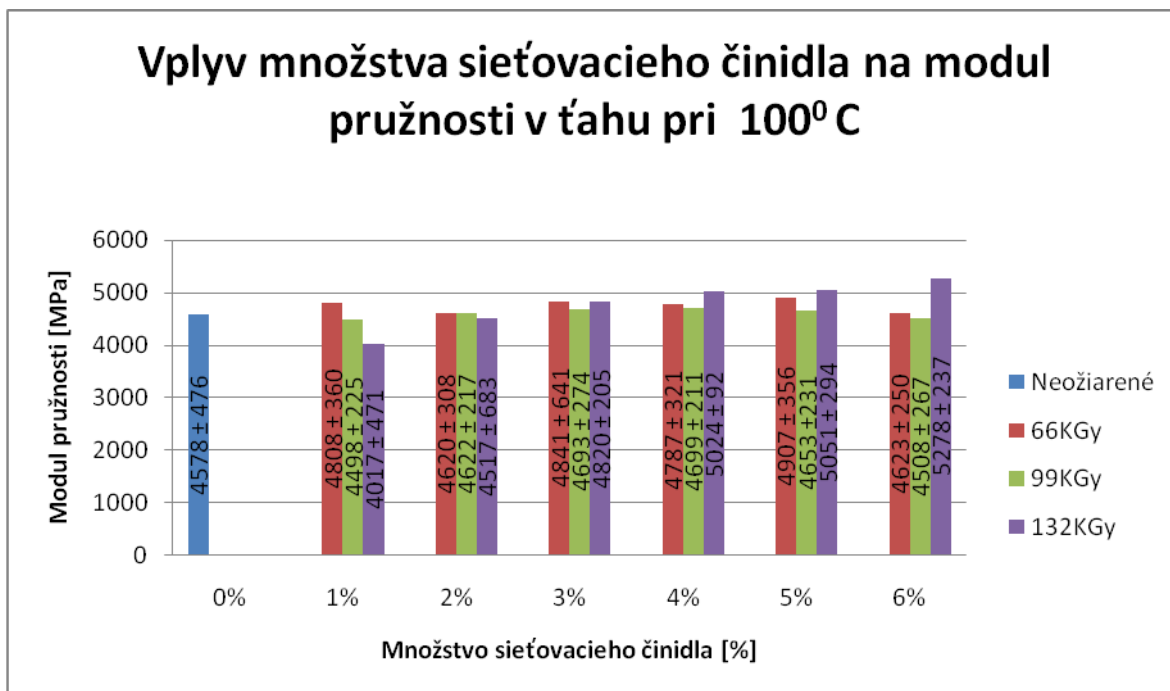
Obrázok 36 - Graf porovnania medzí pevnosti pri 100⁰C

Hodnoty modulu pružnosti v ťahu pri teplote 100 ⁰ C v [MPa]				
Množstvo sieť. činidla	Neožiarené	66kGy	99kGy	132kGy
0%	4578±476			
1%		4808±360	4498±225	4017±471
2%		4620±308	4622±217	4517±683
3%		4841±641	4693±274	4820±205
4%		4787±321	4699±211	5024±92
5%		4907±356	4653±231	5051±294
6%		4623±250	4508±267	5278±237

Tabuľka 23 - Hodnoty modulu pružnosti pri 100⁰C

Najvyšších hodnôt modulu pružnosti bolo dosiahnuté pri dávke ožiarenia 132kGy a množstve sieťovacieho činidla 6%.

Z výsledkov je zjavné že najuspokojivejšie výsledky boli dosiahnuté pri vyšších množstvách sieťovacieho činidla.



Obrázok 37 - Graf porovnania modulov pružností pri 100^oC

6.2 Diskusia rázovej skúšky

Boli vyhodnotené dynamické skúšky rázom, ktorých výsledky sú diskutované nasledovne. Jednalo sa o skúšky pri pokojovej teplote a pri teplote zníženej. Zníženie teploty bolo dosiahnuté tekutým dusíkom.

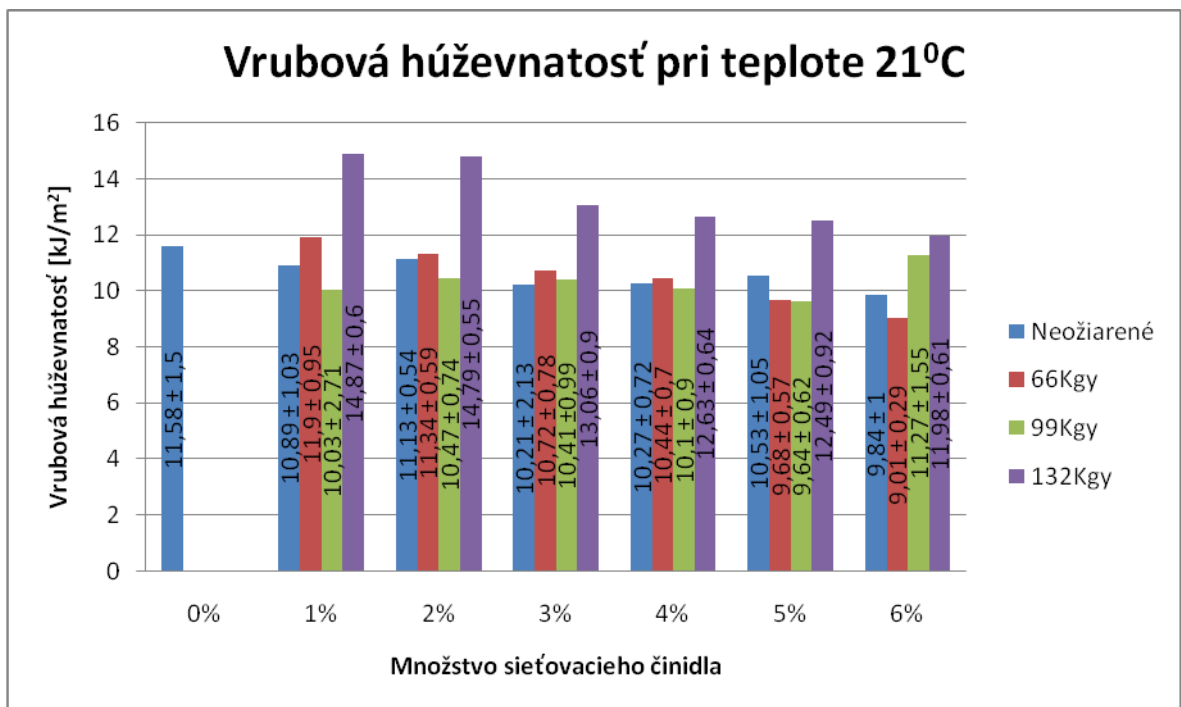
6.2.1 Rázová skúška pri teplote 21^oC

Pri rázovej skúške pri pokojovej teplote bolo zistené že najvyšších hodnôt sa dosiahne pri ožiarení najvyššou dávkou a to 132kGy.

Hodnoty vrubovej húževnatosti pri teplote 21 ⁰ C v [kJ/m ²]				
Množstvo sieť. činidla	Neožiarené	66kGy	99kGy	132kGy
0%	11,58±1,5			
1%	10,89±1,03	11,9±0,95	10,03±2,71	14,87±0,6
2%	11,13±0,54	11,34±0,59	10,47±0,74	14,79±0,55
3%	10,21±2,13	10,72±0,78	10,41±0,99	13,06±0,9
4%	10,27±0,72	10,44±0,7	10,1±0,9	12,63±0,64
5%	10,53±1,05	9,68±0,57	9,64±0,62	12,49±0,92
6%	9,84±1	9,01±0,29	11,27±1,55	11,98±0,61

Tabuľka 24 - Vrbová húževnatosť pri 21⁰C

Najideálnejšie množstvo sieťovacieho činidla je 1%-2% kde rozdiel medzi najvyššou a najnižšou hodnotou činí takmer 20%.

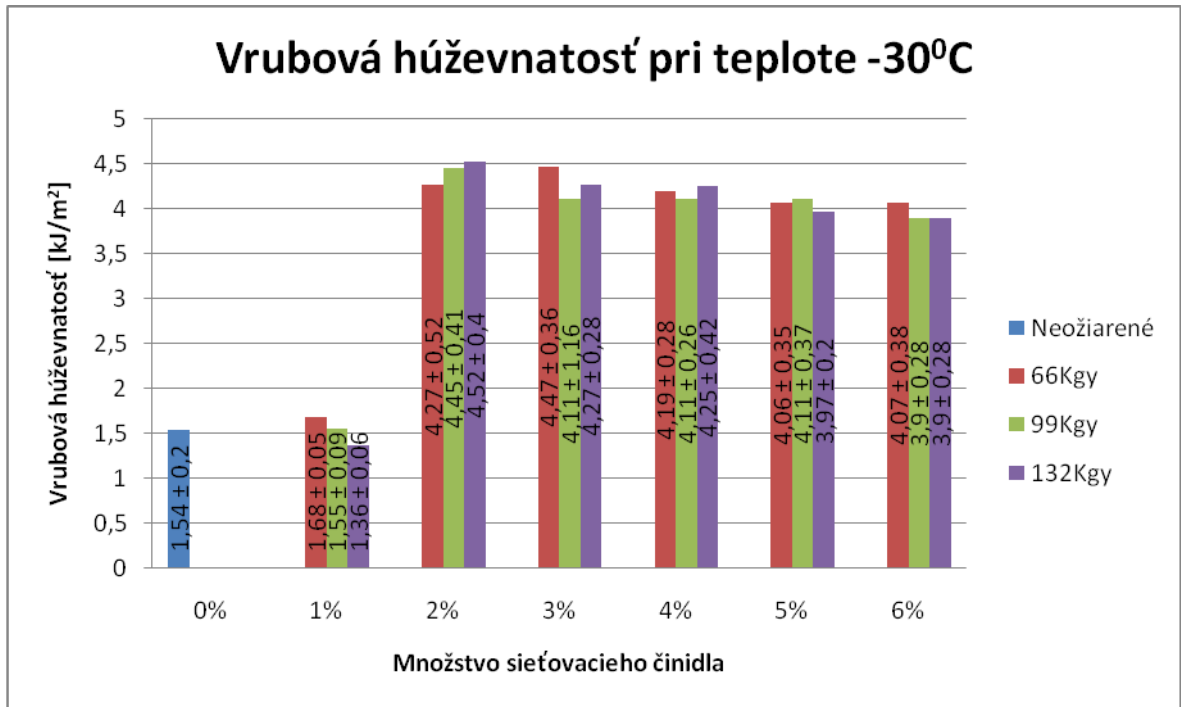
Obrázok 38 - Graf porovnania vrbových húževnatostí pri 21⁰C

6.2.2 Rázová skúška pri teplote - 30°C

Pri zníženej teplote sa najvyššie hodnoty vrubovej húževnatosti pohybovali pri 2%, avšak aj väčšie hodnoty sieťovacieho činidla nemajú negatívny vplyv na rast vrubovej húževnatosti. sieťovacieho činidla. Výsledky v závislosti od dávok ožiarenia neboli markantne ovplyvnené.

Hodnoty vrubovej húževnatosti pri teplote -30°C v [kJ/m ²]				
Množstvo sieť.činidla	Neožiarené	66kGy	99kGy	132kGy
0%	1,54±0,2			
1%		1,68±0,05	1,55±0,09	1,36±0,06
2%		4,27±0,52	4,45±0,41	4,52±0,4
3%		4,47±0,36	4,11±1,16	4,27±0,28
4%		4,19±0,28	4,11±0,26	4,25±0,42
5%		4,06±0,35	4,11±0,37	3,97±0,2
6%		4,07±0,38	3,9±0,28	3,9±0,28

Tabuľka 25 - Vrubová húževnatosť pri -30°C



Obrázok 39 - Graf porovnania vrubových húževnatostí pri -30°C

ZÁVER

Náplňou danej diplomovej práce bolo skúmanie vplyvu sieťovacieho činidla na mechanické vlastnosti polyamidu 6, ožarovaného dávkami beta žiarenia 66kGy, 99kGy a 132kGy. Na daný materiál boli uskutočnené ťahové skúšky pri pokojovej 23⁰C a zvýšenej teplote 100⁰C. Ďalej bola vyhotovená rázová skúška pri teplote 21⁰C a taktiež pri zníženej teplote a to -30⁰C.

Z meraní, ktoré boli vyhotovené pri ťahovej skúške pri pokojovej teplote, vyplýva že hodnoty medze pevnosti a modulu pružnosti sa s jednotlivými dávkami sieťovacieho činidla príliš nelíšia. Avšak neožiarené vzorky vykazovali pri hodnote 6% sieťovacieho činidla pokles medze pevnosti až o 15%. Modul pružnosti pri zvyšujúcej hodnote sieťovacieho činidla bez ožiarovania taktiež klesal. Rozdiel najvyššej a najnižšej hodnoty činil takmer 20%. Takže pre vzorky ktoré nie sú ožiarené ale množstvo sieťovacieho činidla sa pridáva, má za následok znižovanie mechanických vlastností na materiál.

Iná situácia nastala pri zvýšenej teplote, kde hodnoty mechanických vlastností ako medza pevnosti a modul pružnosti zlepšovali. Najuspokojivejších hodnôt sa dosiahlo pri množstvách sieťovacieho činidla 4%,5%,6%. Oproti neožiareným vzorkám bolo zlepšenie týchto vlastností o 8%.

Nižšie množstvá sieťovacieho činidla pri namáhaní na ťah nemajú výrazné zlepšenie mechanických vlastností. Preto aj v praxi sa najčastejšie používa 4% až 5% sieťovacieho činidla, tento fakt bol potvrdení meraniami v tejto práci.

Pri meraní vrubovej húževnatosti, ktorá bola vykonaná pri teplote 21⁰C, bolo najvýraznejšie zlepšenie húževnatosti pri množstve 1% a 2% množstva činidla. Najvhodnejšia dávka na ožiarovanie, pri ktorej sa dosiahlo najvyššej húževnatosti bola 132kGy. Hodnoty rázovej húževnatosti pri vzorkách ktoré neboli ožiarené ale obsahovali rôzne množstvá sieťovacieho činidla, klesali.

Avšak po zmrazení vzoriek v tekutým dusíkom na teplotu -30⁰C sa hodnoty vrubovej húževnatosti oproti pokojovej teplote menili. Najväčšej hodnoty bolo dosiahnuté pri 2% sieťovacieho činidla. Zvyšujúce dávky činidla mali len málo klesavú tendenciu voči 2% činidla. Veľmi nízke hodnoty boli namerané pri neožiarených vzorkách a taktiež pri vzorkách s 1% sieťovacieho činidla.

Celkovo môžeme zhodnotiť, že množstvo sieťovacieho čidla na mechanické vlastnosti má pozitívny vplyv, avšak vzorky musia byť ožarované aby bolo zlepšenie evidentné. Bez ožiarenia zaistíme len zhoršenie mechanických vlastností pridávaním čidla.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1].B., M. (1984). *Fyzika polymérov*. Praha: SNTL.
- [2].Blažej A., P. E. (1980). *Polyméry v kožiarskom, obuvníckom a galantérnom priemysle*. Bratislava: Alfa.
- [3].company, Beta-Gama-service GmbH & Co. (2007). www.bgs.de.
- [4].Lutonský. (2007) Vliv teploty na mechanické chování polymerů a kompozitů a. Zlín:UTB
- [5].Drobny, J. G. (2003). *Radiation technology for polymers*. Boca Raton: CRC press LLC.
- [6].J.Škeřík. (1991). *Plasty v elektrotechnike a elektronike*. Praha: SNTL.
- [7].J.Mleziva (1993) *Polymery: výroba struktura vlastnosti a použití*, Brno CENTRA
- [8].K.Veselý. (1992). *Polymery*. Brno: Uniplast Brno.
- [9].M.Lazár, T. J. (1986). *Chemické reakcie polymérov*. Bratislava: Redakcia chemickej literatúry.
- [10].R.Brown. (1999). *Handbook of polymer testing*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [11].V.Ulmann. (2006). www.astronuklfyzika.cz/Fyzika.
- [12].Woods R., P. A. (1994). *Applied radiation chemistry*. New York: John Wiley & sons, Inc.
- [13].Ducháček V.(2006) *Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování a použití*
- [14].www.obzor.cz
- [15].www.pts-marketing.de
- [16.] www.zwick.com
- [17].Technická norma ČSN EN ISO 527
- [18].Technická norma ČSN EN ISO 179

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

PA	Polyamid
PA6	Polyamid 6
PA6.6	Polyamid 6.6
PE	Polyetylén
AMK	Aminokyseliny
PP	Polypropylén
ABS	Akrilonytril butadién styren
T	Trogamid
β^-, β^+	Beta žiarenie
A	Atóm
A*	Excitovaný atóm
Te	Kinetická energia elektrónu
T'M	Kinetická energia atómu po zrážke
h.v	Energia fotónu
HCOOH	Kyselina mravčia
CO ⁶⁰	Rádionuklid kobaltu
M _o	Molárna hmotnosť štruktúrnej jednotky (kg.mol ⁻¹)
T _m	Teplota tavenia (°C)
\bar{x}	Aritmetický priemer
s ²	Rozptyl
s	Smerodatná odchyľka
σ	stredná kvadratická chyba
E	Youngov modul (MPa)
L _o	Počiatočná merná dĺžka (mm)
L	celková dĺžka (mm)

h	Hrúbka (mm)
c	šírka upínacej hlavy
r	polomer (mm)
b	šírka (mm)
A_b	Vrubová húževnatosť (KJ/m ²)
F_m	Maximálna rázová sila
S_m	Priehyb pri maximálnej rázovej sile
R_m	Medza pevnosti materiálu v ťahu(MPa)
R_b	Napätie v ťahu pri pretrhnutí (MPa)
ϵ_B	Pomerná deformácia pri maximálnej sile (mm)
ϵ	Pomerná deformácia pri maximálnom napätí (%)

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 - Základné typy polyamidu	13
Obrázok 2 - Vzorce PA6 a PA66	14
Obrázok 3 - Schematicky znázornené beta žiarenie	21
Obrázok 4 - Energia gama žiarenia	22
Obrázok 5 - Schematické znázornenie gama žiarenia	23
Obrázok 6 - Prenikanie beta žiarenia	24
Obrázok 7 - Prenikanie gama žiarenia	25
Obrázok 8 - Elektrostatický lineárny urýchľovač	26
Obrázok 9 - Vysokofrekvenčný urýchľovač	27
Obrázok 10 - Katódový urýchľovač	29
Obrázok 11 - Schéma cyklotronu	32
Obrázok 12 - Betatrón schematicky	35
Obrázok 13 - Zdroj gama žiarenia	36
Obrázok 14 - Výstavba sietí(z ľava doprava)	38
Obrázok 15 - Sieťovacia schéma v predgelačnom štádiu	41
Obrázok 16 - Ideálna sieť	42
Obrázok 17 - Tvorba priečných väzieb	46
Obrázok 18 - Skúšobné telieska typu A,B,C.	51
Obrázok 19 - Schematické znázornenie Charpyho kladiva.	52
Obrázok 20 - Skúšobný vzorok s vrubom	54
Obrázok 21 - Ožiarované vzorky	59
Obrázok 22 - Graf stupňa zosieťovania	62
Obrázok 23 - Skúšobná lopatka na ťahovú skúšku	64
Obrázok 24 - Graf pri 23°C a dávke 66 KGy	65
Obrázok 25 - Graf pri 23°C a dávke 99KGy	67
Obrázok 26 - Graf pri 23°C a dávke 132KGy.	69
Obrázok 27 - Graf pri 100°C a dávke 66KGy	72
Obrázok 28 - Graf pri 100°C a dávke 99KGy	74
Obrázok 29 - Graf pri 100°C a dávke 132KGy	76
Obrázok 30 - Vrubovací prístroj	78
Obrázok 31 - Kyvadlo rázového zariadenia	79
Obrázok 32 - Prístroj „Resil Impactor Junior“	79

<i>Obrázok 33 - Skúšobné telieska.....</i>	<i>80</i>
<i>Obrázok 34 - Graf porovnania medzi pevnosti pri 23°C.....</i>	<i>85</i>
<i>Obrázok 35 - Graf porovnania modulu pružnosti pri 23°C.....</i>	<i>86</i>
<i>Obrázok 36 - Graf porovnania medzi pevnosti pri 100°C.....</i>	<i>88</i>
<i>Obrázok 37 - Graf porovnania modulov pružností pri 100°C.....</i>	<i>89</i>
<i>Obrázok 38 - Graf porovnania vrubových húževnatostí pri 21°C.....</i>	<i>90</i>
<i>Obrázok 39 - Graf porovnania vrubových húževnatostí pri -30°C.....</i>	<i>92</i>

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tabuľka 1 - Rozmery teliesok pri ťahovej skúške</i>	50
<i>Tabuľka 2 - Skúšobné telesá pre skúšky vrubovej húževnatosti</i>	53
<i>Tabuľka 3 - Vlastnosti Polyamidu 6</i>	56
<i>Tabuľka 4 - Dávky ožiarenia v okruhoch</i>	58
<i>Tabuľka 5 - Stupeň zosieťovania</i>	62
<i>Tabuľka 6 - Dávka ožiarenia 66KGy pri 23°C</i>	66
<i>Tabuľka 7 - Dávka ožiarenia 99KGy pri 23°C</i>	68
<i>Tabuľka 8 - Dávka ožiarenia 132KGy pri 23°C</i>	70
<i>Tabuľka 9 - Neožiarené vzorky pri 23°C</i>	71
<i>Tabuľka 10 - Dávka ožiarenia 66KGy pri 100°C</i>	73
<i>Tabuľka 11 - Dávka ožiarenia 99KGy pri 100°C</i>	75
<i>Tabuľka 12 - Dávka ožiarenia 132KGy pri 100°C</i>	77
<i>Tabuľka 13 - Dynamická skúška neožiarенých vzorkov pri 21°C</i>	80
<i>Tabuľka 14 - Dynamická skúška 66KGy pri 21°C</i>	81
<i>Tabuľka 15 - Dynamická skúška 99KGy pri 21°C</i>	81
<i>Tabuľka 16 - Dynamická skúška 66KGy pri 21°C</i>	82
<i>Tabuľka 17 - Dynamická skúška 66KGy pri -30°C</i>	82
<i>Tabuľka 18 - Dynamická skúška 99KGy pri -30°C</i>	83
<i>Tabuľka 19 - Dynamická skúška 132KGy pri -30°C</i>	83
<i>Tabuľka 20 - Hodnoty medze pevnosti v ťahu pri 23°C</i>	84
<i>Tabuľka 21 - Hodnoty modulu pružnosti pri 23°C</i>	86
<i>Tabuľka 22 - Hodnoty medze pevnosti v ťahu pri 100°C</i>	87
<i>Tabuľka 23 - Hodnoty modulu pružnosti pri 100°C</i>	88
<i>Tabuľka 24 - Vrubová húževnatosť pri 21°C</i>	90
<i>Tabuľka 25 - Vrubová húževnatosť pri -30°C</i>	91

PRÍLOHY

Príloha1: Formulár pre jednotlivé dávky ožiarenia

Príloha2: Materiálový list

Príloha3: Certifikát 1

Príloha4: Certifikát 2

PRÍLOHA P 1: FORMULÁR PRE JEDNOTLIVÉ DÁVKY OŽIARENIA

BGS Saal Single Dose Sheet (Aer'ODE Vers.4.4.1j) (Current data)

Sheet ID: S2009/03/06-01
Operator: Schmaus
Mode: Measure (Indiv. BGD)
Entry/Order N°:
Calibration ID: C2009/01/09-00
Batch (Type): 1086 (FWT 60-510)
W. L. (nm): 510
Range-L (kGy): 2
Range-H (kGy): 70
Ref. mean BGD: 0.0
Curr. mean BGD: 12714
Ref. UCTY (%): 5.0
Mode of fitting R=f(Log(D))

RMS of fitting: 3.05 %
C5 =
C4 =
C3 = 26.63570157015
C2 = -41.99689158889
C1 = 37.20595972934
C0 = -5.012992859541
Measure T ? No
Mean T(µm): 50.5
Control mode: Beep-beep
Standard T:
Temperature (°C):

Note:

Sample-N°	BGD	ABS	[A-B]/T (1/cm)	Dose (kGy)	UCTY (kGy,k=2)	Measurement time
14027	0.064	0.313	49.306	34.13	4.08	20090306@07h53m07
14028	0.058	0.315	50.891	35.43	4.21	20090306@07h53m22
14029	0.059	0.316	50.891	35.43	4.21	20090306@07h53m37
14030	0.058	0.302	48.316	33.32	3.97	20090306@07h53m47
14031	0.062	0.314	49.900	34.62	4.13	20090306@07h54m04
14032	0.063	0.310	48.910	33.81	4.04	20090306@07h54m16

PRÍLOHA P 2: MATERIÁLOVÝ LIST POLYAMIDU 6



EPSAN

PLASTİK SAN. VE TİC. LTD. ŞTİ.
Demirtaş Org. San. Böl. A. O. Söğmeç cd.
No:16 16369 BURSA/TÜRKİYE
Tel: +90 224 2612020 Fax: +90 224 2612718

EDLAMID / EDLON

POLYAMİD 6 VE 66

POLYAMİDE 6 & 66

www.epsan.com.tr

TEKNİK BİLGİ / DATA SHEET

Ürün Adı / Product Name

: EPLAMİD 6 GFR30 FRV0 NATURAL

Ürün Kodu / Product Code

: EPM3GV000D001

Malzeme Bilgisi / Material Information

*** This material has been highly heat stabilized for hot-runner system.
: Bu ürün Poliamid 6 Naturel cam elyaf takviyeli, alev geciktirici katkılı malzemedir ve enjeksiyon kalıplama için uygundur.
: Eplamid 6 Natural is glass fiber reinforced and flame retardant additive polyamide 6 and is suitable for injection moulding.

FİZİKSEL TESTLER / PHYSICAL TESTS

	STANDART/STANDARD	DEĞERLER/VALUES
YOĞUNLUK / DENSITY	ISO 1183	1,50-1,52 g/cm ³
KATKI ORANI / ASH CONTENT	ISO 3451	28-32 %
R. VİSKOZİTE / R. VISCOSITY	ISO 307	-
SERTLİK / HARDNESS (SHORE D)	ISO 868	80-85 D

MEKANİK TESTLER / MECHANICAL TESTS

ESNEKLİK MODÜLÜ / TENSİLE MODULUS	ISO 527	8500-9000 N/mm ²
KOPMA MUKAVEMETİ / STRENGTH AT BREAK	ISO 527	145-155 N/mm ²
KOPMADAKİ UZAMA / ELONGATION AT BREAK	ISO 527	3-4 %
İZOD DARBE (ÇENTİKLİ) / İZOD IMPACT (NOTCHED)	ISO 180/1A	13-15 kJ/m ²

İSİ TESTLERİ / THERMAL TESTS

ERİME NOKTASI / MELTING POINT	ISO 3146	215-225 °C
HDT/A (1,8 MPa)	ISO 75	210 °C
VİCAT/B (50 N)	ISO 306	210 °C

YANMA TESTLERİ / FLAMMABILITY

YANMA TESTİ / FLAME RETARDENCY (1,6 mm)	UL-94	V0
KIZGIN TEL TESTİ / GLOW WIRE - GWIT (2 mm)	TS EN 60695	960 °C

TEST KOŞULLARI / TEST CONDITIONS

Laboratuvar koşulları 23 ±2°C, 45-55 % RH dir. Bu ortamda kuru olarak (DAM olarak) yapılmıştır.
Laboratory conditions are 23 ±2°C and 45-55 % RH. Also tests are made dry as molded (DAM).

ÇALIŞMA KOŞULLARI / PROCESSING CONDITIONS

Malzeme enjeksiyon çalışma sıcaklığı 250°C' dir. Hammaddenin kurutma sıcaklığı 80°C olup ortalama kurutma süresi 2-4 saattir.
Recommended injection moulding temperature is 250°C. Drying temperature of raw material is 80°C and average drying time is 2-4 hours.

ONAY / APPROVAL

Bu Teknik Bültende belirtilen bilgiler güvenilir bir şekilde test edilerek verilmiştir fakat EPSAN Plastik farklı şartlar altında elde edilebilecek değerlerden sorumlu tutulamaz.
Ürünümüzün kullanımında ve sizin tarafınızdan üretilen ürünler bizim kontrolümüz dışında olduğu için sorumluluk tamamen size aittir. Eplamid ve Eplon Epsan Plastik Ltd. Şti' nin potansiyel ürünüdür.
The information in this datasheet is given in good faith but without warranty. These data do not release you from the obligation to test our products as to their suitability for the intended processes and uses. The application, use and processing of our products and the products manufactured by you are beyond our control and, therefore, entirely your own responsibility. Eplamid and Eplon are registered name of Epsan Plastik Ltd. Şti.

KK-004/R04

HAZ.TAR.:20.08.2003

REV.TAR.:01.12.2006

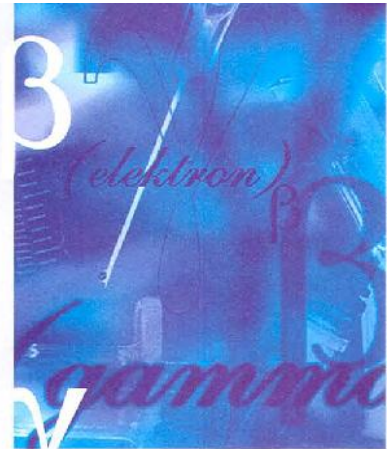
PRÍLOHA P 3: CERTIFIKÁT 1



EN ISO 9001
EN ISO 13485

Zertifikat

BGS Industriestraße 9 93342 Saal
BGS Werk Saal
Industriestrasse 9
93342 Saal/Donau



Customer-no. : 339999
Date : 06.03.2009
Page : 1 of 2

Certificate-no.: 9000474

BGS-order-no.: 293.00365.01

Your order.: Herr Danek...

Batch: TPE/PA
Prüfstäbe

200 piece(s)

Type of irradiation: Electrons
Energy [MeV]: 10,00
Min. dose [kGy]: 66,00
Irradiation date: 05.03.2009

BGS-order-no.: 293.00365.02

Your order.: Herr Danek...

Batch: PA /JTPE
Prüfstäbe

200 piece(s)

Type of irradiation: Electrons
Energy [MeV]: 10,00
Min. dose [kGy]: 99,00
Irradiation date: 05.03.2009

BGS-order-no.: 293.00365.03

Your order.: Herr Danek...

Batch: PA / TPE
Prüfstäbe

200 piece(s)

Type of irradiation: Electrons
Energy [MeV]: 10,00
Min. dose [kGy]: 132,00
Irradiation date: 05.03.2009

BGS-order-no.: 293.00365.04

Your order.: Herr Danek...

Batch: LDPE Pulver
Batch: TPE
Prüfstäbe

1 piece(s)

200 piece(s)

Type of irradiation: Electrons
Energy [MeV]: 10,00
Min. dose [kGy]: 185,00
Irradiation date: 06.03.2009

PRÍLOHA P 4: CERTIFIKÁT 2



EN ISO 9001
EN ISO 13485

Zertifikat

Certificate-no.: 9000474
Page : 2 of 2

BGS-order-no.: 293.00365.05

Your order.: Herr Danek...

Batch: TPE

Prüfstäbe

Type of irradiation:

Energy [MeV]:

Min. dose [kGy]:

Irradiation date:

Electrons

10,00

200,00

06.03.2009

200 piece(s)

Bestrahlungszertifikat · Certificate of irradiation · Bestrahlungszertifikat
BGS IDEEN PLUS ENERGIE BGS IDEEN PLUS ENERGIE BGS IDEEN PLUS ENERGIE