

Vliv radiačního síťování na chemickou odolnost vybraných polymerních materiálů v závislosti na dávce záření.

Bc. Pavel Kubík

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel KUBÍK**
Osobní číslo: **T11578**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv radiačního síťování na chemickou odolnost vybraných polymerních materiálů v závislosti na dávce záření.**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujete literární rešerši na dané téma
2. Provedte přípravu zkušebních tělísek
3. Provedte ozáření zkušebních tělísek
4. Provedte chemické zkoušky
5. Vyhodnoťte naměřené výsledky zkoušek

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Doporučená literatura dle zadání vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Daněk
BGS

Datum zadání diplomové práce:

8. února 2013

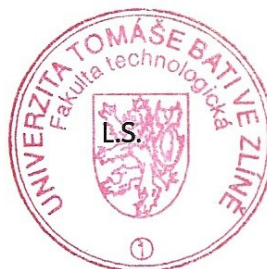
Termín odevzdání diplomové práce:

10. května 2013

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby 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

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je porovnání vlivu radiačního síťování na chemickou odolnost vybraných polymerů v závislosti na dávce záření, kterou byly vybrané polymery ozářeny.

Teoretická část zahrnuje rozdělení polymerů a jejich chemickou odolnost, radiační síťování pomocí ionizačního záření a vybrané chemické odolnosti podle příslušných norem.

Praktická část se zabývá přípravou zkušebních tělísek, použitým zařízením k jejich výrobě a testování, ozářením zkušebních tělísek doporučenými dávkami záření a jejich naložení do vybraných chemikálií. Jako vyhodnocovací zkoušky byly zvoleny zkouška botnání, vrubová houževnatost a u vybraných polymerů byla provedena zkouška koroze pod napětím.

Klíčová slova: Polymer, chemická odolnost, radiační síťování, vrubová houževnatost, botnání, koroze pod napětím.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to compare the effect of radiation crosslinking on the chemical resistance of polymers depending on the dose of radiation that were selected irradiated. The theoretical part includes the distribution of polymers and their chemical resistance, radiation crosslinking of polymers by ionizing radiation and chemical resistance, selected by the relevant standards.

The practical part deals with the preparation of test specimens, used equipment for their production and testing, radiation testing bodies with recommended doses of radiation and loading of components to selected chemicals. As evaluation tests were performed swelling test, impact strength and selected polymers were tested for stress corrosion cracking.

Keywords: Polymer, chemical resistance, radiation cross-linking, impact strength, swelling, stress
cracking.

Rád bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Michalovi Daňkovi z firmy BGS Beta-Gama-Service HmbH & Co.KG, za profesionální vedení, odborné rady, vstřícné jednání a pomoc při realizaci mé diplomové práce. Velké poděkování patří také Ing. Zdeňku Holíkovi, za pomoc a další velmi užitečné rady při realizaci praktické části. Dále chci poděkovat celé firmě BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co.KG, za zprostředkování radiačního síťování v jejich firmě v Saal a. d. Donau v Německu, panu Ing. Davidovi Matajsovi z firmy Robert Bosch s.r.o., který mi poskytl odbornou pomoc při návštěvě jejich firmy v Českých Budějovicích a celé firmě Robert Bosch s.r.o. České Budějovice za zprostředkování naložení testovacích tělísek. Poděkování patří i všem zaměstnancům školních dílen a panu Ing. Vladimíru Šumberovi za pomoc při výrobě zkušebních tělísek. Poděkování patří i Ing. Ondřeji Šetinovi za výrobu přípravku na měření ESC. Ze srdce bych chtěl také poděkovat svým rodičům a celá své rodině, kteří mě vždy a ve všech směrech podporovali a během studia mi byli neocenitelnou oporou.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	13
1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	14
1.1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ PODLE PŮVODU:.....	14
1.1.1 Přírodní.....	14
1.1.2 Syntetické	14
1.2 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ Z TECHNICKÉHO HLEDISKA	15
2 POUŽITÉ PLASTY	16
2.1 POLYAMIDY.....	16
2.2 POLYESTERY	18
3 MODIFIKACE POLYMERŮ	19
3.1 FYZIKÁLNÍ MODIFIKACE	19
3.2 MECHANOCHEMICKÁ MODIFIKACE	19
3.3 CHEMICKÁ MODIFIKACE	20
4 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	21
4.1 ZÁKLADNÍ DRUHY ZÁŘENÍ.....	21
4.2 ZÁŘENÍ BETA	22
4.3 ZÁŘENÍ GAMA	23
4.4 MĚRNÉ JEDNOTKY	24
4.5 TECHNOLOGIE ZÁŘENÍ.....	25
4.5.1 Lineární urychlovače	25
4.5.2 Kruhové urychlovače	27
5 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ	28
5.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	29
5.2 CHEMICKÉ VLASTNOSTI.....	30
5.3 TEPelné VLASTNOSTI.....	31
5.4 SÍŤOVÁNÍ BETA A GAMA ZÁŘENÍM.....	32
6 CHEMICKÁ ODOLNOST	34
6.1 Vliv CHEMIKÁLIÍ NA POLYMERY	35
6.1.1 Chemicky aktivní prostředí	36
6.1.2 Fyzikálně aktivní prostředí.....	36
6.1.2.1 Botnání.....	37

6.2	KOROZE POD NAPĚTÍM (ESC).....	37
6.3	DIFÚZE PROSTŘEDÍ DO POLYMERU.....	38
6.4	CHEMICKÁ DESTRUKCE POLYMERŮ.....	38
6.4.1	Hydrolyza polymerů.....	39
6.5	MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ ODOLNOSTI POLYMERŮ PROTI CHEMICKÉMU PROSTŘEDÍ.....	39
7	ZKOUŠKY CHEMICKÉ ODOLNOSTI.....	40
7.1	STANDARDNÍ PODMÍNKY PRO ZKOUŠENÍ – ISO 291.....	40
7.2	CHEMICKÁ ODOLNOST PŘI PONOŘENÍ DO KAPALINY ISO 175.....	41
7.2.1	Zkušební tělíska.....	41
7.2.2	Podmínky zkoušení.....	41
7.2.3	Chemická kapalina.....	41
7.2.4	Postup zkoušky.....	43
7.2.5	Interpretace výsledků.....	44
7.3	CHEMICKÉ ZATÍŽENÍ ISO 16750-5.....	45
7.3.1	Testování a podmínky.....	45
7.4	KOROZE POD NAPĚTÍM ISO 22088.....	47
7.5	STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI KOROZI POD NAPĚTÍM (ESC) - ČÁST 3: METODA OHNUTÉHO PÁSKU.....	48
7.5.1	Podmínky testování.....	48
7.5.1.1	Vyhodnocení.....	48
7.6	STANOVENÍ ZBYTKOVÉ VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI (CHARPYHO KLADIVO).....	50
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	52
8	CÍLE DILOMOVÉ PRÁCE.....	53
8.1	POSTUP DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	53
9	TESTOVACÍ CHEMIKÁLIE.....	54
9.1	NEMRZNOUCÍ KAPALINA DO OSTRÍKOVACŮ SHERON® SCREENWASH -40°C.....	54
9.2	CHLADÍCÍ KAPALINA SHERON® ANTIFREEZE G48.....	54
9.3	BRZDOVÁ KAPALINA BRAKE FLUID SAE J1703 DOT4.....	55
9.4	MOTOROVÝ OLEJ BP® VISCO 3000 A3/B4 10W-40.....	56
9.5	TESTOVACÍ KAPALINA FAM-B - DIN 51604.....	56
9.6	SMĚSNÁ MOTOROVÁ NAFTA BIODIESEL B30.....	57
10	TESTOVANÉ POLYMERY.....	58
10.1	SEZNAM TESTOVANÝCH POLYMERŮ.....	58
11	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK.....	59
12	RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ.....	62
13	ZKOUŠKA BOTNÁNÍ.....	65
13.1	VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY BOTNÁNÍ.....	69
14	NALOŽENÍ TĚLÍSEK PRO RÁZOVOU ZKOUŠKU.....	71

15 VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST	73
15.1 PŘÍSTROJE POUŽITÉ K MĚŘENÍ.....	73
16 MĚŘENÍ VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI	75
16.1 POLYAMID 6 GF30	75
16.1.1 Vyhodnocení vrubové houževnatosti PA 6 GF30.....	76
16.2 POLYAMID 66 GF25	79
16.2.1 Vyhodnocení vrubové houževnatosti PA 66 GF25.....	80
16.3 POLYAMID 66 GF45	83
16.3.1 Vyhodnocení vrubové houževnatosti PA 66 GF45.....	84
16.4 POLYAMID 6	87
16.4.1 Vyhodnocení vrubové houževnatosti PA 6.....	87
16.5 POLYBUTYLENTEREFTALAT.....	89
16.5.1 Vyhodnocení vrubové houževnatosti PBT.....	89
17 KOROZE POD NAPĚTÍM	92
17.1 POLYAMID 6 GF30	92
17.1.1 Vyhodnocení PA 6 GF30	95
17.2 POLYAMID 66 GF25	95
17.2.1 Vyhodnocení PA 66 GF25	97
18 KŘIVKY GELU A TMA VYBRANÝCH MATERIÁLŮ	98
ZÁVĚR	102
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	106
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	108
SEZNAM OBRÁZKŮ	110
SEZNAM TABULEK.....	113
SEZNAM PŘÍLOH.....	115

ÚVOD

Už dlouhou dobu se lidé v různých odvětvích průmyslu snaží nahradit těžko zpracovatelné nebo vyrobitelné materiály levnější a dostupnější alternativou. Jako nejvhodnějším kandidátem v mnoha oblastech se nabízejí polymerní materiály. Tyto materiály často slouží jako náhrada za kovy, dřevo, sklo, kůži či vlnu. S rostoucími nároky na použití těchto polymerů, samozřejmě rostou i nároky na jejich vlastnosti.

V oblastech průmyslu, kde se nahrazují konstrukční materiály polymerními materiály, jde často o dosažení větší odolnosti vůči okolnímu prostředí a je všeobecně známé, že polymerní materiály těchto zvýšených odolností v mnoha odvětvích dosahují. Zde však nastává otázka, které polymerní materiály, nebo jejich modifikace, jsou pro danou aplikaci nejvhodnější, a které materiály budou plnit požadavky a potřebnou životnost. Proto je pro nás důležité zvyšovat tuto odolnost polymerů, a tím prodlužovat životnost výrobků, které z těchto materiálů vyrábíme.

Možností, jak v různých směrech zvýšit odolnost konstrukčních polymerů, je metoda radiačního síťování. Radiační síťování polymerů je prováděno pomocí ionizačního beta nebo gama záření a výsledkem jsou zlepšené mechanické, tepelné a chemické vlastnosti. Takto lze vytvořit z levných komoditních plastů plasty použitelné v širokém odvětví průmyslu.

Tato práce je zaměřena na zlepšení chemických vlastností, respektive chemické odolnosti radiačně zesíťovaných polymerů. Chemické odolnosti bývá v praxi často věnována menší pozornost. Jak ale však ukazují některé data, například W.A. Woishnis a D.C. Wright, se ve své práci „*Advanced Materials and Processes*“ zmiňují, že ve Velké Británii způsobuje Koroze pod napětím (ESC) v průmyslu škody za více než 100mil.£. za rok. [23] Proto se v této práci budeme věnovat odolnosti zesíťovaných a nezesíťovaných polymerů a zkoumat jak se mění jejich odolnost vůči různým chemicky aktivním látkám a jaký vliv budou mít na tuto odolnost dávky záření.

Jako testovací chemikálie, díky velmi rozšířenému automobilovému průmyslu, byly vybrány methanolová Bionafta B30, laboratorní kapalina FAM-B, kapalina do ostřikovačů, brzdová kapalina, chladicí kapalina a motorový olej. Tělíška byla vyrobena metodou vstřikování z materiálů PA6, PA6 30%GF, PA66 25%GF, PA66 45%GF a PBT. Radiační síťování bylo provedeno ve firmě BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co.KG pomocí tří

dávek záření 33,99 a 198 kGy. Dalším krokem byla naložení zkušebních tělísek do čtyř testovacích médií v prostorách školních laboratoří a naložení do dvou testovacích chemikálií ve firmě Robert Bosch s.r.o. České Budějovice. Po naložení byla zkušební tělíska podrobena mechanickým a chemickým zkouškám. Výsledky byly porovnány a vyhodnoceny.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ

Polymery jsou přírodní nebo syntetické látky. V jejich makromolekule se opakuje článek základní monomerní jednotky. Polymery si můžeme představit jako chemickou stavebnici s nepřebernou možností proměny struktur a vlastností polymerních látek takto vytvořených. V 1. polovině 20. století nastává s vývojem syntetických polymerů mohutný rozvoj plastikářského průmyslu a gumárenství. [1]

1.1 Rozdělení polymerů podle původu:

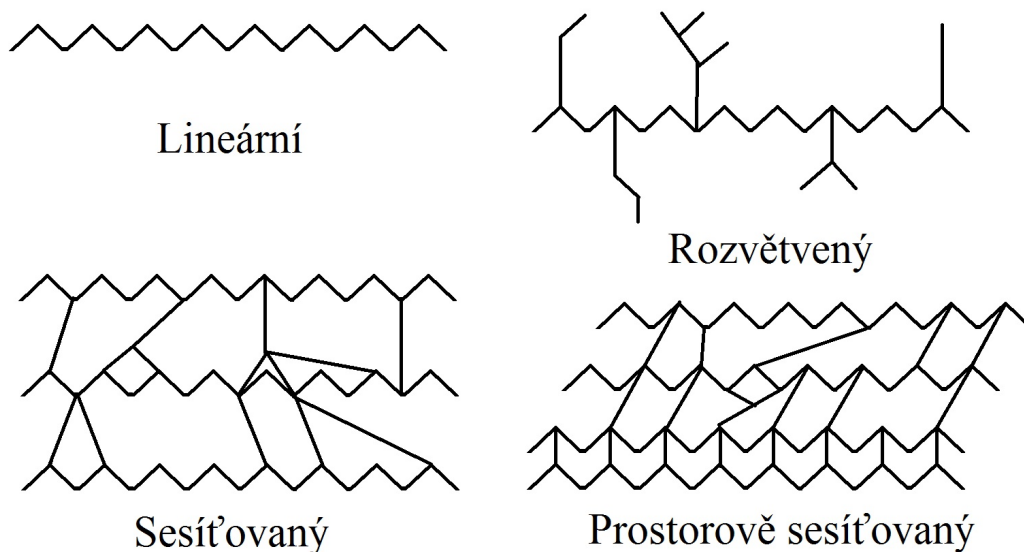
Polymery dělíme dle několika aspektů. Podle původu je rozdělujeme na přírodní a syntetické.

1.1.1 Přírodní

Přírodní polymery dále dělíme na původní a modifikované, které jsou chemicky upravené.

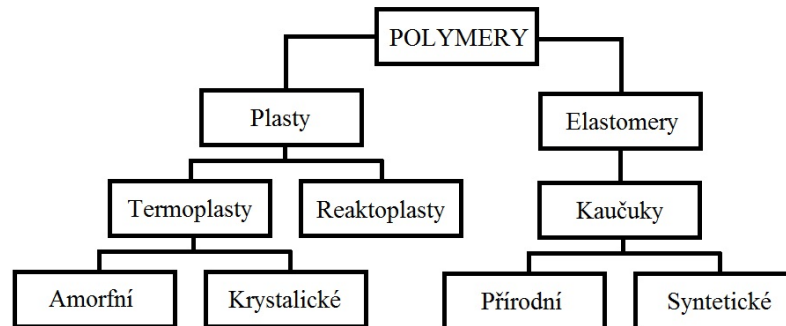
1.1.2 Syntetické

Syntetické polymery rozdělujeme podle typu chemických reakcí na polymery připravené polymerací, polykondenzací, polyadící. Dále podle tvaru molekul a to na lineární, rozvětvené, zesíťované a prostorově zesíťované. [2]



Obr. 1 Syntetické polymery podle tvaru molekul

1.2 Rozdělení polymerů z technického hlediska

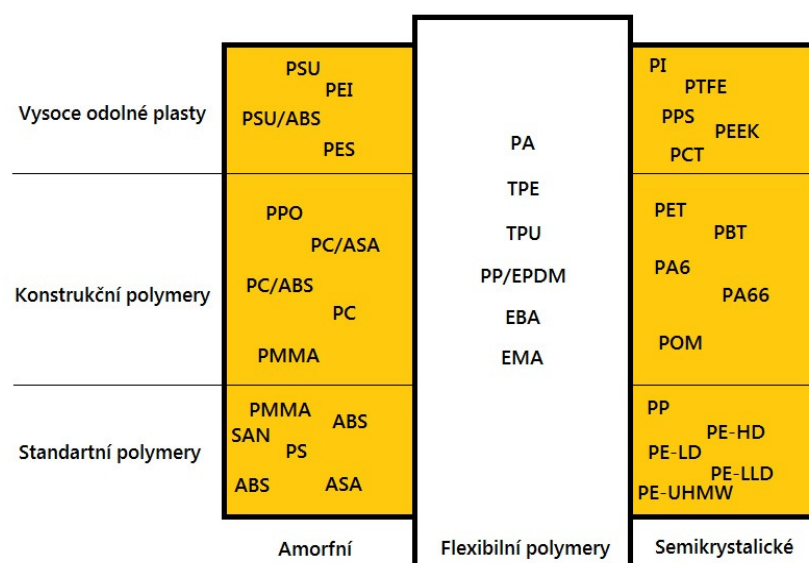


Obr. 2. Rozdělení polymerů z technického hlediska

Termoplasty jsou opětovně tvarovatelné plasty. Ohřevem lze opakovaně tyto plasty uvést do stavu taveniny či viskózního toku. Po ochlazení, při různých teplotách pro daný termoplast, plast opět ztuhne.

Reaktoplasty jsou ve vytvrzeném stavu opětovně nerozpustné a netavitelné. Jsou to plasty, které při zpracování procházejí chemickými reakcemi a účinky tepla, záření či síťovacích činidel. Toto způsobuje vznik hustých prostorově zesíťovaných struktur. Původní molekuly reaktoplastů jsou spojeny kovalentními vazbami, což se nazývá vytvrzování.

Elastomery jsou vysoce elastické polymery. Největší uskupení elastomerů se nazývá kaučuky. Z těchto kaučuků se vyrábí pryže. Za normálních podmínek je lze určitou malou silou deformovat aniž by byly poškozeny. Deformace je většinou vratná. [3]



Obr. 3. Rozdělení polymerů dle aplikace a jejich nad molekulární struktury.

2 POUŽITÉ PLASTY

2.1 Polyamidy

Polyamidy (PA) jsou semikrystalické polymery. Rozlišují se na polyamidy vyrobené z jednoho základního materiálu (např. PA 6) a na polyamidy vyrobeny ze dvou základních materiálů (např. PA 66). Polyamidy mají velmi dobré mechanické vlastnosti, jsou obzvláště tvrdé, pevné a mají vynikající kluzné vlastnosti. Vlastnosti polyamidů se velmi liší. Např. pevný a tvrdý PA 66 oproti měkkému a pružnému PA 12. V závislosti na typu, polyamidy absorbují různé množství vlhkosti, které má vliv na mechanické vlastnosti a rozměrovou přesnost. Polotovary lze vyrábět vstřikováním nebo litím. Výroba polotovarů litím umožňuje výrobu kompozitních polyamidů s většími rozměry a vyšším stupněm krystalinity (mechanická pevnost), což vede k menšímu vnitřnímu pnutí. Vytlačování, potažmo vstřikování, je ovšem daleko úspornější a rychlejší proces. [6]

Vlastnosti polyamidů:

- střední až vysoká mechanická pevnost, tvrdost, tuhost, houževnatost
- vysoká mechanická tlumící vlastnosti
- dobrá únavová pevnost
- velmi dobrá odolnost proti opotřebení
- dobré kluzné vlastnosti

Použití:

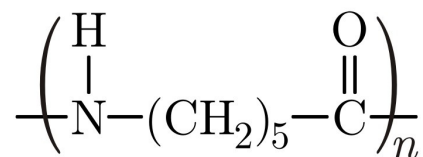
- polyamidová vlákna
- automobilový průmysl
- elektrotechnika
- ložiska, pouzdra a kluzné části
- sportovní potřeby

Polyamid 6

Polyamid 6 je nejčastěji používaný polyamid, který nabízí vyváženou kombinaci všech typických vlastností této skupiny materiálů. Důležitými parametry jsou tlumicí vlastnosti a houževnatost, stejně jako vysoká houževnatost při nízkých teplotách. Dále je u tohoto polyamidu dobrá odolnost proti otěru, zvláště proti tření protějších nerovných povrchů. Ve srovnání s litými typy PA 6G má vstříkovaný PA 6 vyšší schopnost absorpce vlhkosti, je méně odolný proti opotřebení a má horší rozměrovou. Při výrobě je omezená velikost a hmotnost polotovarů, které může vyrábět. [6]

Vlastnosti:

- dobrá mechanická pevnost
- vysoká rázová houževnatost
- dobré tlumicí vlastnosti
- dobré kluzné vlastnosti [6]



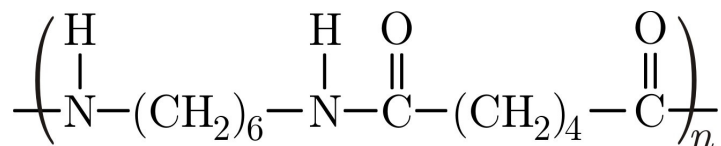
Obr. 4. Chemická struktura Polyamidu 6

Polyamid 66

Polyamid 66 má dobrou tuhost, tvrdost, odolnost proti otěru a tepelnou rozměrovou stálost. S ohledem na tyto konkrétní aspekty, nabízí PA66 ve srovnání s litým PA 6 určité výhody, například vyšší schopnost absorpce vlhkosti. PA 66 je srovnatelná se standardní litými typy PA 6 G, ale je podstatně dražší. [6]

Vlastnosti:

- dobrá mechanická pevnost
- vysoká rázová houževnatost
- dobré tlumicí vlastnosti
- dobrá odolnost proti opotřebení [6]



Obr. 5. Chemická struktura Polyamidu 66

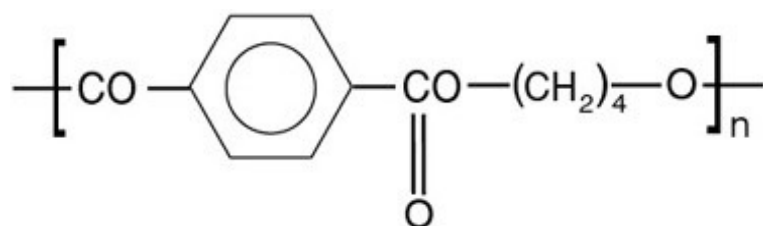
2.2 Polyestery

Polyestery jsou tvořeny obrovskou skupinou polymerů, nesoucí společnou přítomnost esterových vazeb s hlavním makromolekulárním řetězcem. Lze je rozdělit do dvou skupin a to na polyestery termoplastické, lineární a polyestery reaktoplastické, rozvětvené, v konečném stavu zpracování zesíťované. [1]

Polybutyltereftalát (PBT)

Polybutyltereftalát je semikrystalický termoplastický polyester, odvozený z 1,4-butandiolu kyseliny tereftalové nebo dimethyl tereftalátové. Tento plast se v minulosti používal hlavně v automobilovém, elektronickém a elektrotechnickém průmyslu. Díky rychlé krystalizaci a snadné zpracovatelnosti je nejvíce používaným polymerem oboru termoplastů ve strojírenství. Významným rozdílem mezi nabízenými polymery a polybutyltereftalátem je rychlost kterou krystalizuje. Při výrobě součástí z PBT je výhodou rychlá schopnost krystalizovat a díky tomu se dosahuje vysoké produktivity.

Výhodou jsou dobré zpracovatelské vlastnosti. Pro dosažení optimální krystalinity postačuje teplota formy 30- 60 °C. Mechanické vlastnosti a T_g jsou nižší jak u polyethyltereftalátu. Vzhledem k nízké hodnotě T_g je využití tohoto polyesteru v technice pod zatížením jen do 50-70°C. Polybutyltereftalát má výbornou odolnost proti otěru a velkému množství chemikálií, také má vysokou rázovou houževnatost, malou absorpci vody a dobrou rozměrovou stabilitu. Spojení dobré rozměrové stability, kluzných vlastností a výhodnými podmínkami při zpracování umožňují rozmanité použití v technice.



Obr. 6. Chemická struktura polybutyltereftalátu

3 MODIFIKACE POLYMERŮ

Jedná se o široký pojem, který obsahuje velké množství variant fyzikálních a chemických přeměn různých polymerů. Jde o řízenou transformaci polymerů, prováděnou za účelem dosažení nového polymerního materiálu s upravenými vlastnostmi. Se zvyšujícími se nároky na vlastnosti polymerů v závislosti na rozšiřující se oblasti jejich použití, je modifikace polymerů stále důležitější. [1]

3.1 Fyzikální modifikace

Jde o nejjednodušší způsob modifikace polymerů, který má širokou oblast použití. Pomocí mechanického smíchání několika polymerů často vznikají směsi s výbornými mechanickými vlastnostmi. Např. přidavkem polyvinylchloridu k butadienakrylonitrilovému kaučuku se zvýší odolnost pryže vytvořené z takto vyrobené směsi vůči ozonu. [1]

3.2 Mechanochemická modifikace

K této modifikaci dochází pomocí reakce aktivních částic, které vznikají při mechanické destrukci makromolekulárních řetězců. Používá se při ní dvou primárních metod.

- **Mechanické degradace směsi polymerů** vznikají modifikované polymery míšením makro-radikálů, případně reakcí makro-radikálů s mechanicky aktivovanými polymerními řetězci.
- **Mechanické degradace polymeru v přítomnosti monomeru** vznikají makro-radikály, které iniciují polymeraci přítomného monomeru.

V každé této metodě probíhá současně několik reakcí. Tyto reakce vedou k vzniku roubovaných nebo blokových kopolymerů, které se liší strukturou a délkou bloků. Výsledkem je výrobek, který není z hlediska struktury jednotný ani jednoznačně definovatelný. Takto vzniklý polymer, obsahující různé zastoupení uvedených struktur spolu s homopolymery, nazýváme termínem interpolymer. [1]

3.3 Chemická modifikace

Chemická modifikace je brána jako záměrná přeměna chemické struktury pomocí účinných chemických látek nebo reakčních podmínek. Chemické reakce polymerů lze rozdělit z hlediska délky řetězců makromolekuly (střední molekulové hmotnosti) na:

- **Reakce ke změnám střední molekulové hmotnosti**, ke kterým patří reakce probíhající při mechanochemické modifikaci a reakce probíhající při síťování polymerů.
- **Polymer-analogické přeměny**, které probíhají za při zachování střední molekulové hmotnosti polymeru. Těmto přeměnám můžeme vystavit makromolekulární látky se stabilním hlavním řetězcem, nejlépe čistě uhlíkatým. Nejvhodnější jsou například vinylové a akrylové polymery. [1]

4 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Pod pojem záření obecně řadíme procesy, kdy dochází k přenosu energie prostorem, které je zprostředkováno pomocí fyzikálních polí, případně mikročástic. Při procesu dochází kromě přenosu energie i k přenosu informací a hmoty. Zářeními jsou např. letící neutrony, protony, elektrony, urychlená jádra atomů, ionty, nebo celé atomy. Radiační přenos energie může být uskutečňován pomocí časově proměnného pole, tedy vln šířících se prostorem, které se odpoutávají od zdroje a přenáší jeho část energie, nebo mechanismem pohybující se částice, kdy částice letí prostorem velkou rychlostí a přenášejí tak kinetickou energii ze zdroje do prostoru v jeho okolí. Mechanismus časově proměnného pole nazýváme jako vlnový, jeho příkladem jsou elektromagnetické vlny a mechanismus pohybující se částice je nazýván jako korpuskulární, u kterého je příkladem záření β . Záření β se šíří pomocí vakua, kde je volný pohyb částic, nebo v látkovém prostředí, kde část záření jde původním směrem, ovšem menší či větší část je rozptýlena a absorbována. Dochází zde ke vzniku sekundárního záření.

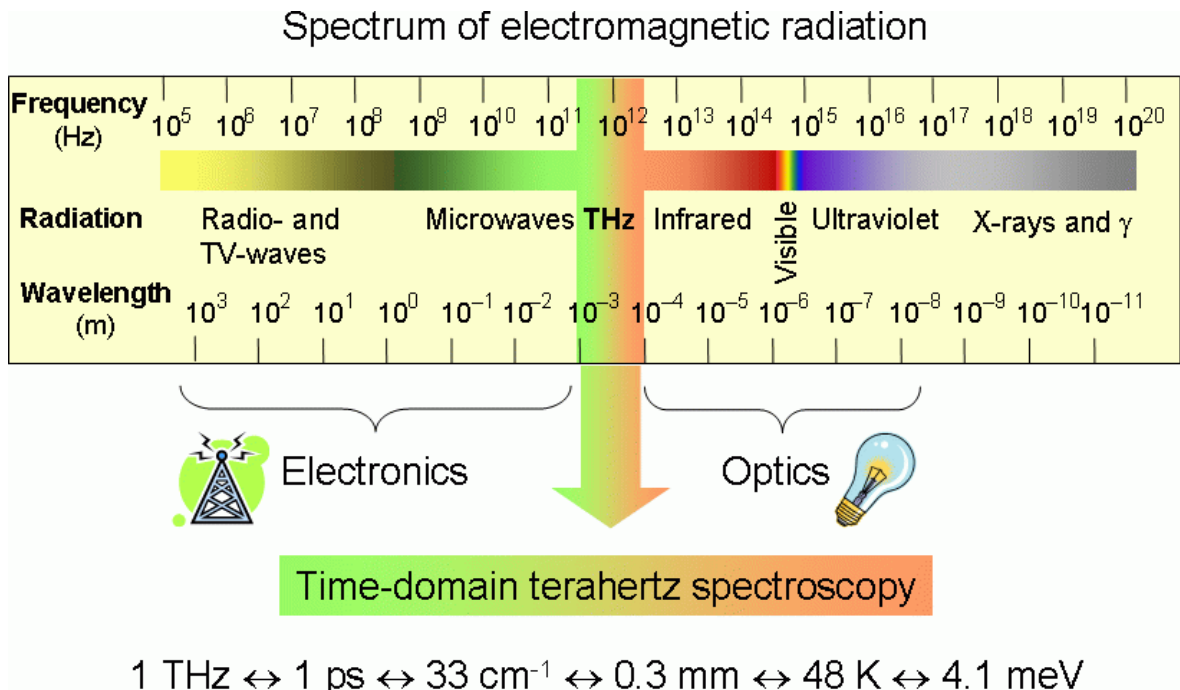
Ionizující záření, jehož kvanta mají dostatečně vysokou energii, aby byly schopné vyrazit z atomového obalu elektrony, je schopné ionizovat příslušnou látku. Pro základní druhy fotonového záření γ a elektronového záření β je 5keV energetickou hranicí pro ionizující záření.

Ionizační účinky jsou vlastností, které náleží všem druhům ionizujícího záření, ovšem interakce záření s hmotou jsou specifické pro každý druh záření specifické. Proto z tohoto hlediska rozdělujeme záření na přímo ionizující, patří zde nám důležité záření α , β^+ a β^- , jehož kvanta nesou elektrický náboj a přímo vytrhávají elektrony z atomů pomocí Coulombických elektrických sil a nepřímo ionizující, patří zde především γ záření, kde kvanta nejsou nabitá a svou kinetickou energii v látce předávají nabitým částicím, které poté přímými účinky na atomy ionizují látku. [11]

4.1 Základní druhy záření

Světlo je druhem elektromagnetického vlnění a jeho zdrojem je transformace energie v molekulách a atomech tělesa, které světlo vyzařuje. Pokud atom získá vyšší energii (jako je tomu při vyšší teplotě), může vyzářit tuto energii v podobě elektromagnetického vlnění. Elektromagnetické vlnění je dáno vlnovou délkou a tato vlnová délka určuje jeho fyzikální

vlastnosti. Elektromagnetickému vlnění nazýváme také termínem elektromagnetické záření. Dle frekvence elektromagnetického vlnění rozlišujeme několik druhů elektromagnetického záření. Vlny se liší svojí vlnovou délkou, energií a také frekvencí. [8]

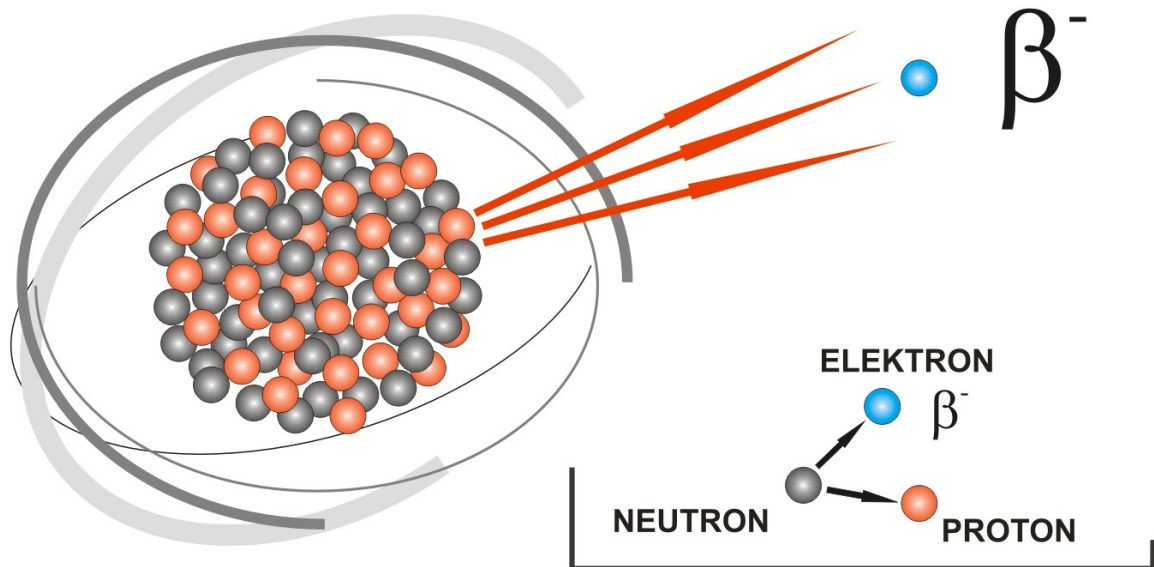


Obr. 7. Druhy elektromagnetického záření [9]

4.2 Záření beta (β)

Záření beta jsou částice vysílané radioaktivními jádry prvků při beta-rozpadu. Pohybují se velmi rychle, nesou kladný nebo záporný elektrický náboj, a tak může být jejich pohyb ovlivňován elektrickým polem. Částice beta jsou elektrony nebo pozitrony. Pozitrony jsou podobné elektronům, ale mají kladný náboje. Jejich prostupnost překážkou je větší než u alfa částic. Mohou pronikat materiály s nižší hustotou nebo malou tloušťkou a k jejich zastavení stačí vrstva vzduchu silná 1m nebo kovu o šířce 1mm. [11]

Záření beta je tvořeno zrychleným proudem elektronů a rozdělujeme ho na β^- a β^+ . Záření β^- je proud záporně nabitých elektronů, které nesou náboj e^- . U β^+ záření je jako nositel energie proud pozitronu. Průchod prostředím daleko méně záření ionizuje a má výrazně větší dosah.



Obr. 8: Elektronové záření beta (β^-)

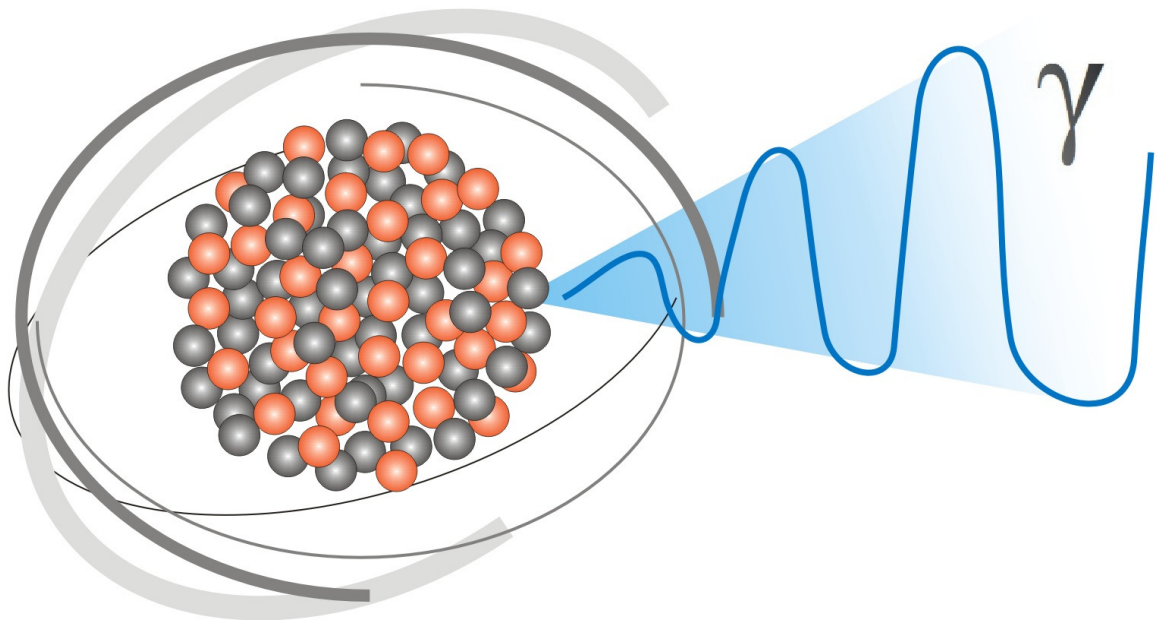
Jako zdroje beta záření jsou nejčastěji používány elektronové urychlovače (lineární, toroidní). Ze žhavicí katody jsou emitovány elektrony a ty jsou následně urychlovány v elektromagnetickém poli. Rychlost těchto elektronů je řízena pomocí střídavého napětí mezi žhavicí katodou a anodou. Užitečná hloubka vniknutí je upravitelná pomocí volby energie. Její velikost je ovšem omezena výkonem a typem urychlovače, který je použit a proto se často používá oboustranné ozařování materiálu. [6]

4.3 Záření gama (γ)

Záření gama vzniká nejčastěji při radioaktivním rozpadu jader. Proud gama částic má charakter vlnění s přibližně podobnými vlastnostmi jako světlo nebo rentgenové záření. Částice gama se pohybují rychlostí světla, mají vysokou pronikavost a to je způsobuje nejnebezpečnějšími. Před škodlivými účinky gama záření byly stanoveny tzv. polotloušťky materiálů, které slouží k ochraně před tímto zářením. Polotloušťka určitého materiálu udává tloušťku materiálu, která zbrzdí polovinu množství dopadajícího gama záření. Pro průchod zářením gama má vzduch polotloušťku 120 m. Olovo má polotloušťku 13 mm. [11]

Záření gama je definováno jako proud částic – fotonů. Frekvence těchto fotonů se pohybuje v oblasti nad 2,42 GHz a vlnou délkou 124 pm. Do materiálů prochází lépe než beta záření. Jádro je vybuze do excitovaného stavu a po navrácení na původní energetickou hladinu vyzáří energii ve formě proudu fotonů.

Vysoko energetický charakter záření gama z něj vytváří účinný nástroj na hubení mikroorganismů, čehož se využívá z velké části při sterilizaci zdravotnických produktů, dekontaminaci potravin, nebo archiválii. K radiačnímu síťování plastů se gama záření využívá nejčastěji, protože je zde možnost ozařování rozměrných a masivních dílů (např. UHMPE tyče), ale taky je často potřeba ozářit více materiálů současně. [6]



Obr. 9: Záření gama (γ)

4.4 Měrné jednotky

Intenzitu zdroje ionizujícího záření popisuje aktivita, kterou definujeme jako počet radioaktivních přeměn radionuklidu za sekundu, měříme ji v becquerelech (Bq) a její jednotkou je reciproká sekunda. Aktivitu 1 Bq vydává zdroj, kde dochází k jedné přeměně za 1 s. Jednotka curie (Ci), která se již dnes tak hojně nepoužívá, vyjadřovala aktivitu radonu v rovnováze s jedním gramem rádia a rovnala se $3,6 \cdot 10^{10}$ Bq. Měrná aktivita se vztahuje k jednotce hmotnosti, objemu popřípadě plochy. Celkové působení ionizujícího záření na látku charakterizuje dávka, definovaná jako poměr střední energie předané ionizujícím zářením objemovému elementu látky a hmotnosti tohoto elementu. Jednotkou dávky je Gray (Gy), který se rovná jednomu joulu energie předané 1kg látky. Nárůst dávky za jednotku času je nazýván dávkový příkon a měří se (Gy/s). Různé druhy ionizujícího záření mají při stejné dávce odlišné biologické účinky a proto byl zaveden dávkový ekvivalent, zahrnující formou bezrozměrného číselného jakostního faktoru Q škodlivý

důsledek různých druhů záření na lidský organismus. Dávkový ekvivalent je měřen v jednotkách zvaných Sievert (Sv). Tato jednotka odpovídá jednomu Grayi s uvážením jakostního faktoru a není tedy přesně vzato fyzikální jednotkou. [13]

Energie -kinematické energie získaná elektronem při průchodu potencionálním rozdílem

$$\text{eV (elektrovolt)} \qquad 1\text{eV} = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ J} \qquad (1)$$

Dávka- energie záření (hmoty), kterou těleso absorbovalo

$$\text{Gy (Gray)} \qquad 1\text{Gy} = 1\text{Joule} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ J} = 100\text{rad} \qquad (2)$$

Dávková intenzita- energie záření, kterou těleso absorbovalo na jednotku času

$$\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1} \text{ (Gray za sekundu)} \qquad 1\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1} = 1\text{Watt} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ J} \qquad (3)$$

Aktivita- výkon radioaktivních paprsků záření, charakterizován jejich aktivitou

$$\text{Bq (Becquerel)} \qquad 1\text{Bq} = 1 \text{ rozpad/s}^{-1} \qquad (4)$$

4.5 Technologie záření

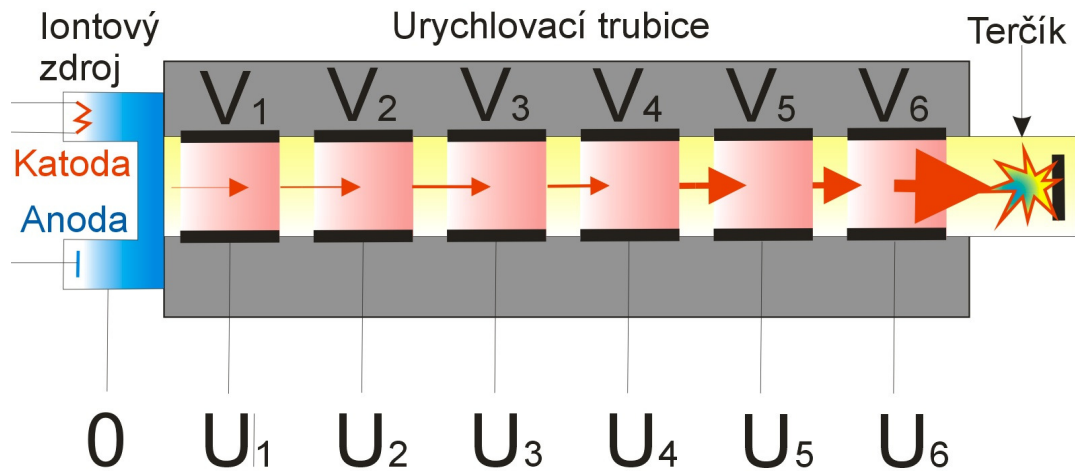
Jako urychlovače nabitých částic nazýváme přístroje, které využívají působení silných elektrických a magnetických polí a urychlují částice na vysoké kinetické energie. Přírodní radioaktivní látky nabízí pouze omezenou intenzitu a energii emitovaných částic, a proto je zapotřebí částice urychlovat uměle. Pouze stabilní elektricky nabitě částice je možno urychlit uměle. Mezi tyto částice patří elektrony, pozitrony, protony, deutrony, jádra helia a jádra těžších prvků. K usměrnění nebo změně dráhy nabitých částic se používá magnetického pole.

Dle tvaru dráhy urychlovače, na kterém urychlování částic probíhá a dle jeho technické realizace, můžeme urychlovače rozdělit na lineární a kruhové.

4.5.1 Lineární urychlovače

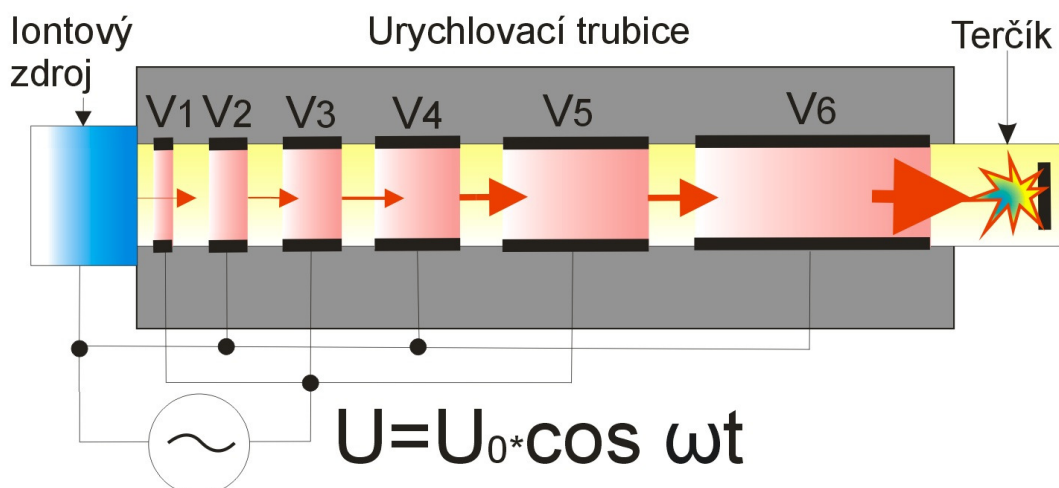
Urychlování nabitých částic v lineárních urychlovačích je zprostředkováno působením elektrického pole během pohybu částic po přímkové (lineární) trajektorii. Lineární urychlovače můžeme rozdělit na elektrostatické a vysokofrekvenční. **Elektrostatické**, u kterých z iontového zdroje směřují dané částice (proton, deuteron, elektron) do

urychlovacího systému. Ten tvořen kovovými válcovými elektrodami, mezi kterými je postupně rozděleno vzrůstající vysoké napětí a procházející částice s nábojem q jsou urychlovány elektrostatickým polem na energii $E=q$, která je dána součtem dílčích napětí na elektrodách.



Obr. 10. Jednoduché schéma elektrostatického lineárního urychlovače

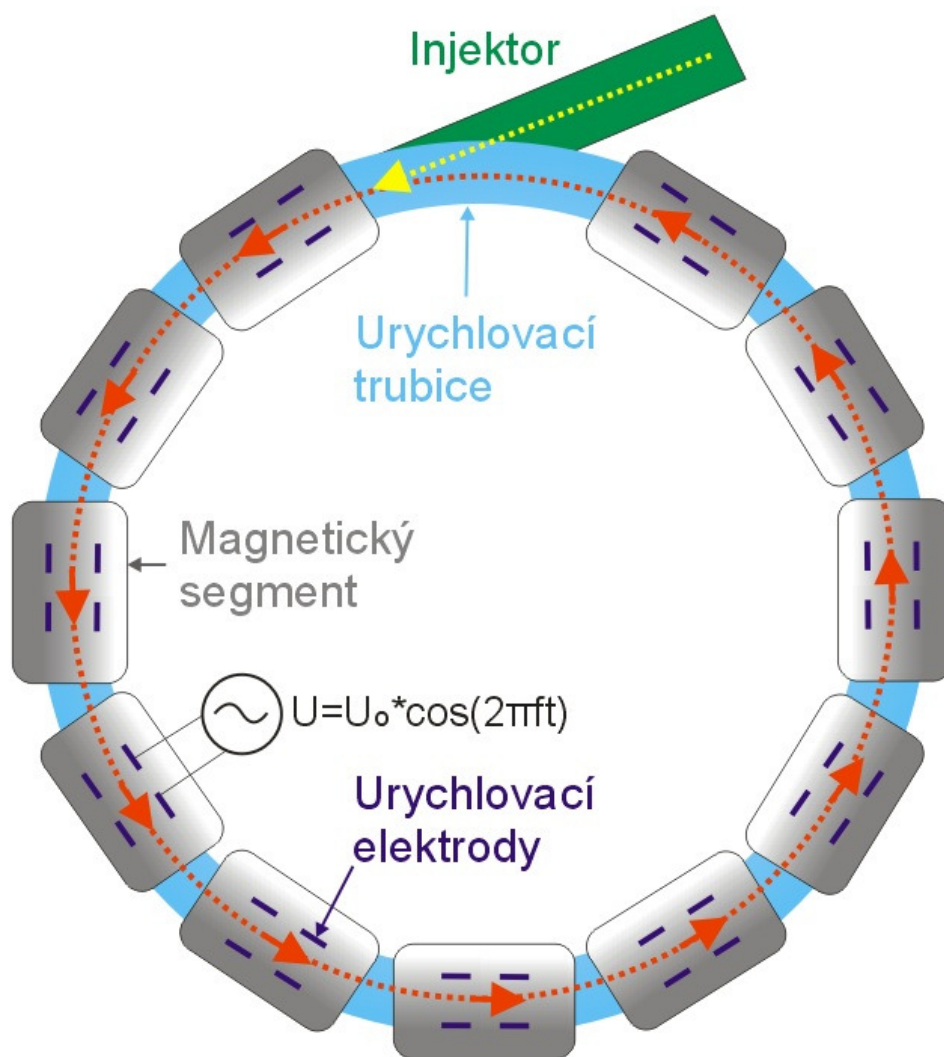
U **Vysokofrekvenčních** urychlovačů nabité částice vycházející z iontového zdroje, poté vstupují do systému urychlovače složeného z válcových elektrod připojených na střídavé elektrické napětí. Liché válce připojeny k jednomu pólu, sudé k druhému pólu vysokofrekvenčního zdroje. Průchodem částic dochází k jejich urychlení. Je to efektivní způsob urychlení částic bez potřeby extrémně vysokého napětí.



Obr. 11. Jednoduché schéma vysokofrekvenčního lineárního urychlovače

4.5.2 Kruhové urychlovače

Vysoce efektivní způsob urychlení nabitých částic na vysoké energie, je mnohonásobné zrychlení těchto částic v elektrickém poli, kde jsou nabitě částice vícekrát navraceny do kruhové dráhy urychlovače pomocí magnetického pole. Magnetická síla způsobuje, že částice se pohybuje po kruhové dráze. V patřičných oblastech této kruhové dráhy je synchronně použito elektrické urychlovací pole (tečně na kruhovou dráhu) a částice jsou periodicky urychlovány při každém oběhu dráhy. Mezi nejčastější kruhové urychlovače patří cyklotron, betatron či synchrotron.



Obr. 12. Jednoduché schéma synchrotronu.

5 RADIČNÍ SÍŤOVÁNÍ

Radiační síťování funguje na jednoduchém principu, kdy urychlené elektrony (beta záření) vyvolávají v ozařovaném materiálu chemickou reakci. Energie ze záření je materiálem absorbována, vznikají volné radikály, které spolu reagují a při následné chemické reakci dochází ke vzniku nekonečné trojrozměrné struktury, prostorové sítě, gelu. [7]

Radiační síťování dává levným komoditním a technickým plastům lepší mechanické, tepelné a chemické vlastnosti podobné vysoce odolným plastům. Toto posílení vlastností umožňuje použití těchto plastů v podmínkách, kterým by jinak nebyly schopny odolat. Energeticky bohaté beta nebo gama záření spouští chemické reakce v plastech, které vedou k vytvoření sítí nebo-li "síťování" molekul. Tímto způsobem se optimalizují materiálové vlastnosti plastů, a otevírají se nové oblasti použití, pro tyto materiály.

Z hlediska objemu jsou mezi nejdůležitějšími plasty, které podstoupí zesíťování, polyethylen, polyamid, PVC a PBT. Také síťování termoplastických elastomerů (TPO, TPC a TPA) čím dál více nabývá na významu. V zásadě je také možné síťování u polypropylenu, ovšem u tohoto materiálu obvykle převažuje tendence degradovat. Obecně lze konstatovat, že radiační síťování je možné použít všude tam, kde je chemické síťování volnými radikály, iniciátory (jako jsou např. peroxidy). [6]

Tab. 1. Síťovatelné polymery

<i>Síťovatelné polymery</i>			
<i>Označení</i>		<i>Síťovací aditiva</i>	
		<i>Ano</i>	<i>Ne</i>
<i>Termoplasty:</i>	Polyethylen PE		x
	Polypropylen PP	x	
	Polyamidy PA	x	
	Polybutylentereftalát PBT	x	
	Polyviniliden fluorid PVDF	x	
	Ethylen-tetrafluorethylen ETFE	x	
	Polyvinilchlorid PVC	x	
	Ethylen vinil acetát EVA		x
<i>Termoplastické elastomery:</i>	Chlorovaný polyethylen CPE		x
	Polyether-ester blokový kopolymer TPE-E		x
	Polyuretan blokový kopolymer TPE-U	x	
<i>Elastomery:</i>	Polyether blokový amid TPE-A		x
	Styren Butadien pryž SBR	x	
	Silikonová pryž		x

Výhody radiačního sítování:

- probíhá při pokojové teplotě a tlaku
- sítování se provádí na hotových výrobcích
- přizpůsobení parametrů sítování k individuálním požadavkům
- zušlechťení komoditních a technických plastů
- některé materiály nemusí obsahovat sítovací příměsi (PE)
- schopnost ozařování plastů v kombinaci s kovem [6]

Oblasti použití radiačního sítování:

- izolace kabelů a vodičů
- potrubí pro systémy podlahového vytápění a dodávky teplé vody
- trubky, folie, profily vstřikovaných tepelně smršťovaných dílů
- vstřikované a lisované díly pro automobilový, elektrotechnický průmysl a zdravotnictví, ve strojírenství, pro stavebnictví a mnoho dalších odvětví průmyslu
- polotovary
- kompozitní materiály pro automobilový průmysl, letecké technologie a sport
- fólie pro speciální aplikace [6]

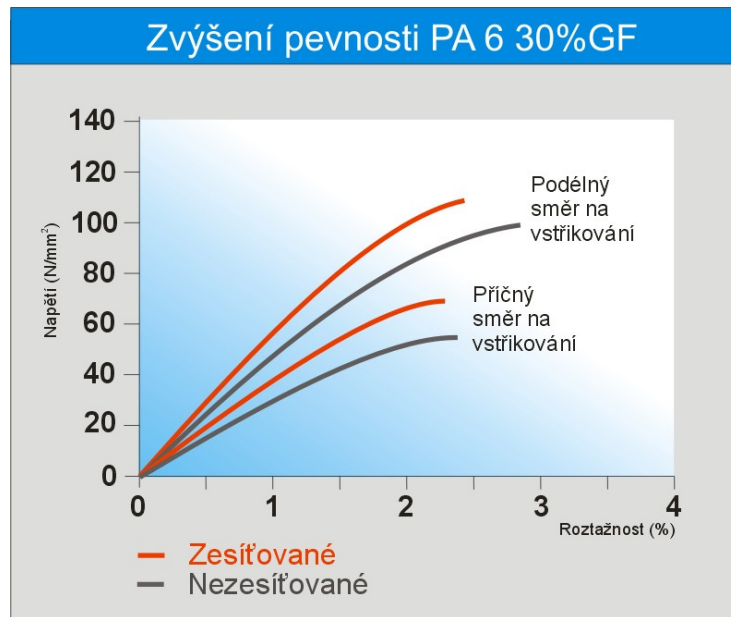
5.1 Mechanické vlastnosti

Radiační sítování zlepšuje mechanickou pevnost vyztužených plastů i při pokojové teplotě. Důvodem je zejména lepší přilnutí plniva do polymerní matrice a v důsledku toho aktivace rozhraní.

Radiační sítování také zvyšuje pevnost svarů proti vibracím a zvyšuje pevnost spojení při kombinaci různých spojovaných materiálů (např. polymer / polymer a polymer / kov). [14]

Zlepšení mechanických vlastností v důsledku ozáření:

- zvýšení modulů
- snížení studeného tečení (Creep)
- zlepšení pevnosti v ohybu
- zvýšení pevnosti sváru
- zlepšení dlouhodobé odolnosti proti hydrostatickému tlaku



Obr. 13. Zvýšení pevnosti PA6 30 %GF po radičním síťování [14]

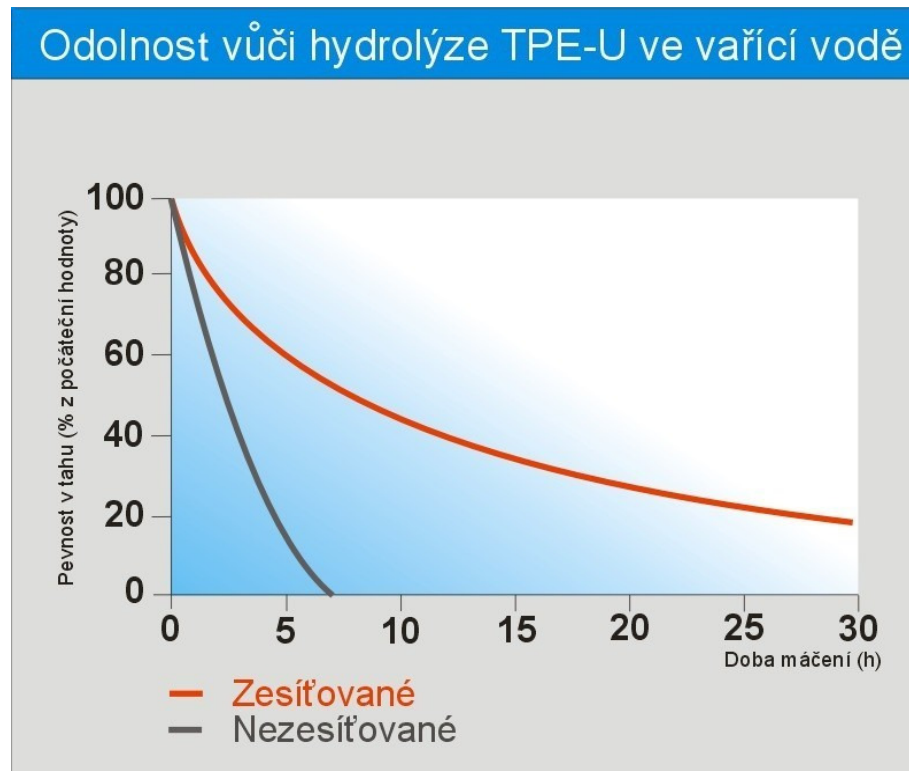
5.2 Chemické vlastnosti

Radiační síťování u plastů výrazně snižuje jejich rozpustnost a botnání v rozpouštědlech. Tento fakt je využíván při určování stupně zesíťování extrakčními testy. Bod gelace získaný tímto způsobem koreluje v širokém rozsahu se stupněm zesíťování. Stupeň zesíťování se zvyšuje a stupeň botnání klesá.

Radiační síťování také zvyšuje chemickou odolnost vůči chemicky aktivním prostředím (brzdová kapalina, olej, atd.) a vůči hydrolýze. To je znázorněno na příkladu, že se zvýšenou odolností proti korozi pod napětím se výrazně snížila ztráta pevnosti při ponoření v chemikálii. [14]

Zlepšené chemické vlastností v důsledku ozáření:

- snížená rozpustnost
- snížené botnání
- větší odolnost proti vzniku trhlin pod napětím
- zlepšená odolnost vůči hydrolýze a sorpci oleje



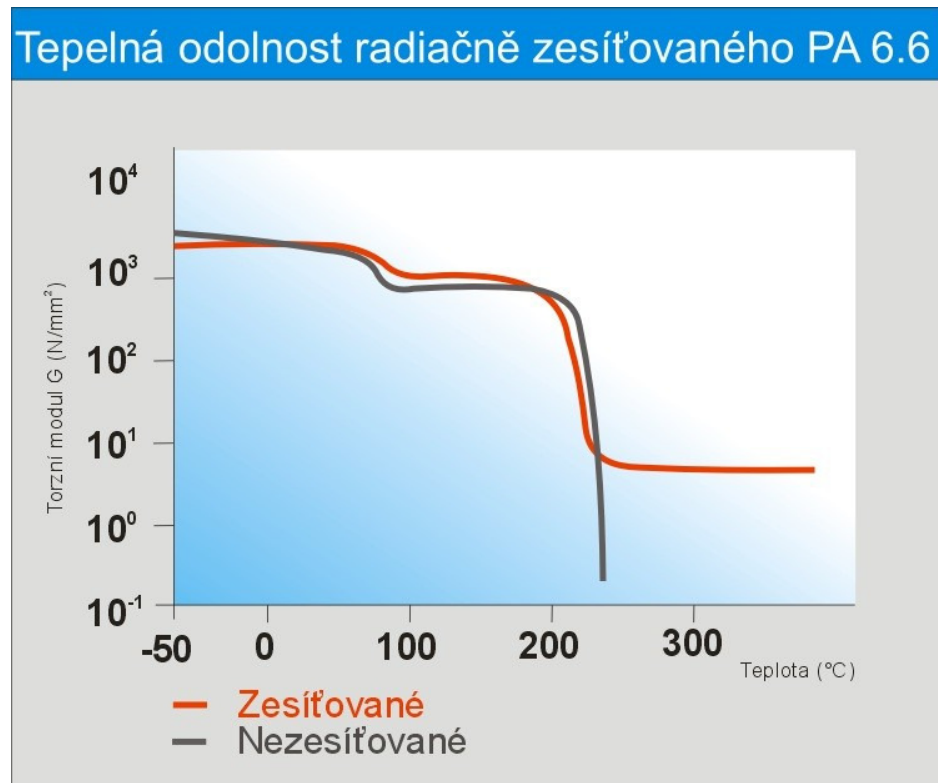
Obr. 14. Odolnost vůči hydrolyze TPE-U ve vařící vodě [14]

5.3 Tepelné vlastnosti

Pokud jsou termoplastické hmoty síťovány pomocí radiačního síťování, stávají se z nich hmoty termoelastické. Síťovací reakcí je vytvoření sítě, která zpomaluje tendenci tečení plastu a při vyšších teplotách se materiál chová jako elastomer. Pro takto zesíťované polymery je charakteristické zlepšení tepelného odporu a výrazné zlepšení mechanických vlastností. Například u zesíťovaného PA 6.6 se podstatně zvyšují moduly a zachovává si dostatečnou pevnost i při teplotách na 350 ° C. Síťovaný PA6.6 prokazuje snížení protažení při přetrhnutí o 60% oproti neozářenému. Také je zde nižší koeficient tepelné roztažnosti. [14]

Zlepšení tepelných vlastností v důsledku ozáření:

- lepší tepelná odolnost
- zlepšení vlastností v tahu a tlaku
- zlepšená odolnost proti stárnutí
- zvýšení odporu tepelného vodiče



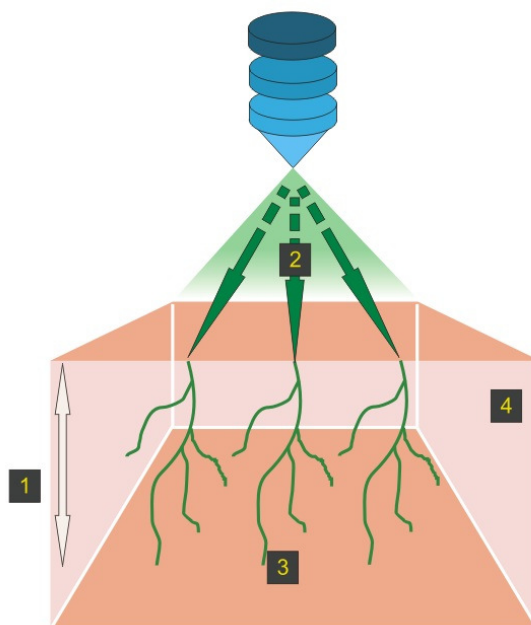
Obr. 15. Tepelná odolnost radiačně zesíťovaného PA 66 [14]

5.4 Síťování beta a gama zářením

Hlavním rozdílem mezi beta a gama zářením je v hloubce jejich proniknutí. Záření beta je usměrněný proud elektronů a hloubka jeho penetrace do materiálu je omezená. Gama záření je vyzařováno ve formě elektromagnetických vln a má schopnost proniknout hluboko do materiálu. Elektronové urychlovače disponují limitovanou hloubkou vniknutí, ale vysokými dávkami příkonu, zatímco v gama zářičích je hloubka vniknutí vysoká, ale za podmínek nízkých dávek, což má za následek delší dobu ozařování.

Markantním rozdílem je i čas ozařování mezi jednotlivými technologiemi. Zatímco u elektronových urychlovačů trvá ozáření dávkou jen několik sekund, gama zářiče potřebují až několik hodin. Výhodou gama záření je však větší možný ozařovaný objem materiálu než u beta záření za stejný čas.

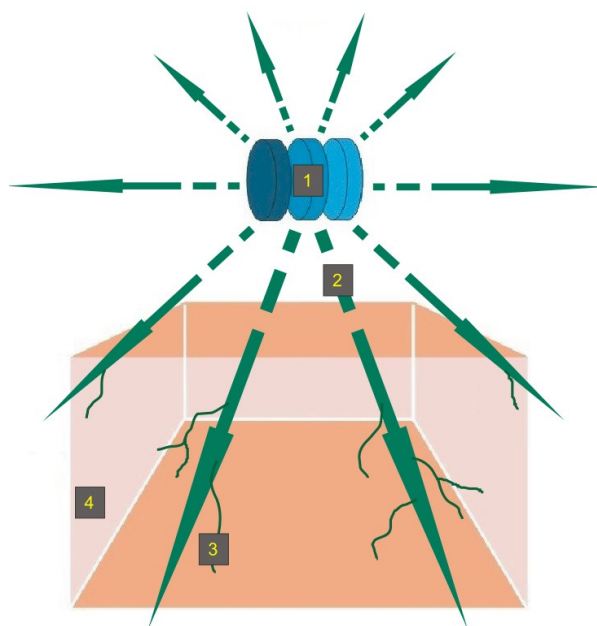
Pro síťování polymerů se v současné době nejvíce využívá beta záření, kterým se dosahuje relativně velkých dávek. Navíc čím kratší dobu jsou polymery ozařovány, tím méně trpí na nežádoucí účinky oxidace. Gama záření se ovšem používá k ozařování velkých a objemných dílů. [14]



Obr. 16. Princip beta záření

1- hloubka vniknutí elektronů 2- primární elektrony

3 – sekundární elektrony 4 - ozářený materiál



Obr. 17. Princip gama zářiče

1- Zdroj záření Co^{60} , 2 - Gama záření, 3 – sekundární elektrony, 4 - ozářený materiál

6 CHEMICKÁ ODOLNOST

Většina součástek v průmyslu, které jsou vyrobeny z plastů, jsou vystavovány chemickým látkám nebo chemicky aktivnímu prostředí. To vyvolává reakce s polymerem a působí na jeho mechanické a vzhledové vlastnosti.

Odolnost vůči chemikáliím je u daných polymerů závislá na více faktorech. Jsou to zejména rychlosti reakcí, jejich koncentrace a schopnost reakce s působící chemikálií. Výrobky z polymerů jsou také často vystavovány přírodním vlivům. Jako jedna z nejčastějších chemických příčin degradace polymerů je reakce s kyslíkem. To způsobuje problémy nejen u působení vnějšího vzdušného kyslíku na „zvětrávání polymerů“, ale také při jeho zpracování. Je ovšem nutné zařazovat do působení také skleníkové plyny, které reagují s polymery vystavenými průmyslově znečištěnému vzduchu. Látky v tomto ovzduší zejména představují NO_2 a SO_2 . Reakce a jejich rychlost v působících chemických látkách jsou ovlivňovány podmínkami, v kterých daná chemická látka působí. Chemická reakce může být ovlivněna nebo iniciována působením různých typů záření, přítomností katalyzátoru, vlhkostí, mechanických namáhání, nebo teplot. Vlastnosti chemických prostředí, které na polymer působí, jsou neméně důležité, stejně jako přímo vlastnosti polymerů. [16]

Odolnost polymerních materiálů proti rozpouštědlům je důsledkem uspořádání vnitřní struktury makromolekulárních látek. Mezi vlastnosti těchto látek patří hlavně molekulová hmotnost, distribuční molekulová hmotnost, druhy vazeb, které se nacházejí v polymeru a podíl krystalické a amorfní fáze. Polymery obsahující vazbu uhlík-uhlík, která je nenasyčená, jsou velice náchylné k dvojitým reakcím a degradaci pomocí ozonu.

Do jaké míry a zda-li, dojde ke znehodnocení polymeru, rozhoduje i chemické složení a struktura (složení polymeru, plniva, změkčovadla, přísady a nečistoty), také prostředí a jeho působení na polymer. [17]

Testování chemické odolnosti upravují především normy ISO 16750-5, ČSN EN ISO 175, EN ISO 22088

Rozdělení procesů působení korozního prostředí na polymery

1. Sorpce prostředí na povrchu materiálu
2. Difúze prostředí polymerem
3. Interakce mezi polymerem a pronikajícím prostředím
4. Difúze reakčních produktů z vnitřku polymeru na povrch
5. Difúzi reakčních produktů z povrchu polymeru do okolního prostředí [17]

6.1 Vliv chemikálií na polymery

Reakce, které probíhají v polymerních materiálech, jsou řízeny zákonem reakcí nízkomolekulárních látek. Dějem, který v tomto případě řídí kinetiku těchto reakcí, bývá v mnoha případech difúze chemických činidel polymerů.

Průnik nízkomolekulárních chemikálií do polymerní látky se zprostředkován mechanismem difúze. Tento mechanismus je podmíněn tepelným pohybem částí makromolekuly a přítomnosti volných objemů v polymeru, které vznikají a zanikají důsledkem tepelného pohybu částí makromolekuly. Pohyblivost těchto částí velkou mírou souvisí s teplotou skelného přechodu polymeru T_g . K difúzi médií v polymeru může nastávat i v submikroskopických pórech. [18]

Působení chemikálií na polymery:

- sorpce na povrch polymeru
- difúze do polymeru
- fyzikální nebo chemická interakce s polymerem
- difúze reakčních produktů na povrch polymeru
- transport reakčních produktů z povrchu polymeru do okolí

Za určitých podmínek mohou chemikálie na polymer působit chemicky nebo fyzikálně. Poté se obvykle označují jako chemicky nebo fyzikálně aktivní prostředí. Do jaké míry dojde k poškození, neboli k interakci polymeru chemikálií, rozhoduje chemické složení a struktura polymeru (poměr krystalických a amorfních částí), přísady (plniva, změkčovadla, apod.), nečistoty, složení prostředí a v neposlední řadě podmínky působení tohoto prostředí. [18]

6.1.1 Chemicky aktivní prostředí

Prostředí reagující s polymerem, způsobující nenávratné změny vlastností tohoto polymeru. Chemickou reakcí dochází k nejzávažnějšímu narušení polymerních materiálů. Už malá destrukce polymeru způsobuje výrazné změny jeho vlastností. Tyto změny se projevují například tvrdnutím nebo změknutím popřípadě lepivosti. Rychlost reakcí se zvyšuje exponenciálně s teplotou a při teplotách nad teplotu skelného přechodu T_g začíná docházet k následujícímu urychlení reakcí. S rostoucí teplotou je ulehčena difúze chemického činidla do povrchu polymeru. Odolnost polymerních materiálu proti odbourávání chemikáliemi mají na svědomí tyto vlivy:

- chemické složení a podíl krystalické fáze
- přísady (pozitivní nebo negativní ovlivnění)
- teplota (zrychluje difúzi, urychluje chemické reakce a zvyšuje pohyblivost řetězců)
- mechanické namáhání, které urychluje korozi (koroze pod napětím)

Například alkany a makromolekuly z těchto monomerů jsou vůči chemickým reakcím netečné. U polyethylenu můžeme pozorovat odolnost vůči kyselinám, zásadám, vodným roztokům anorganických solí a působení slabých oxidačních činidel. Pokud se ovšem do uhlovodíkového řetězce aplikuje polární substituent, jako je např. polyvinylacetát nebo polyvinylalkohol, dojde zde k poklesu odolnosti polymeru. Ani jeden z těchto dvou polymerů neodolává působení kyselin ani zásad, polyvinylalkohol je také rozpustný ve vodě. Odolnost makromolekuly vůči působení oxidačních činidel, snižuje především její dvojná vazba. Tyto polymery za normálních teplot snadno oxidují vzdušným kyslíkem. Makromolekuly, obsahující ve svém hlavním řetězci neuhlíkový atom jako O, N nebo S, podléhají hydrolytickému štěpení, vznikající na místě styku uhlíku a neuhlíkového atomu v řetězci. [18]

6.1.2 Fyzikálně aktivní prostředí

Fyzikální vliv chemikálií nezpůsobuje chemické reakce s polymerem ani s jeho přísadami. Chemikálie v tomto případě způsobují nabotnávání polymerů a přísad v polymeru, nebo vymývání těchto přísad. Pokud dojde difundování rozpouštědla do polymeru a nezapříčiní jeho nabotnání, tak se ve velké míře nemění ani fyzikální vlastnosti polymeru.

6.1.2.1 Botnání

Proces, při kterém dochází k absorbování chemicky aktivní látky do povrchu látky, čímž vznikají sekundární vazby mezi řetězci makromolekul a kapalinou. Tímto se řetězce oddalují a dochází k botnání. Botnání lineárních polymerů může v poklidu přecházet v rozpouštění. Rozpouštědla vnikají mezi makromolekuly, oddalují je, způsobují roztrhnutí sekundárních vazeb mezi makromolekulami (iontové vazby, vodíkové můstky a Van der Waalsovy vazby) a tím botnají polymer. Následkem je zvýšení pohyblivosti makromolekul, vzrůst elasticity polymeru, snížení jeho pevnosti a změna dielektrických vlastností. Botnání určitého polymeru jde na základě znalostí parametru rozpustnosti polymeru v rozpouštědle snadno odhadnout. Polymery s polárními skupinami (-OH, -COOH atd.) botnají v polárních rozpouštědlech a nepolární polymery (polyethylen, atd.) botnají v nepolárních rozpouštědlech. Botnání polymeru v rozpouštědlech je ovlivněn i nadmolekulární strukturou polymeru, stupněm zesílení polymerů, teplotou, typem a přítomností plniv. Čím má polymer vyšší stupeň krystalinity, tím je odolnější proti působení rozpouštědel. [18]

6.2 Koroze pod napětím (ESC)

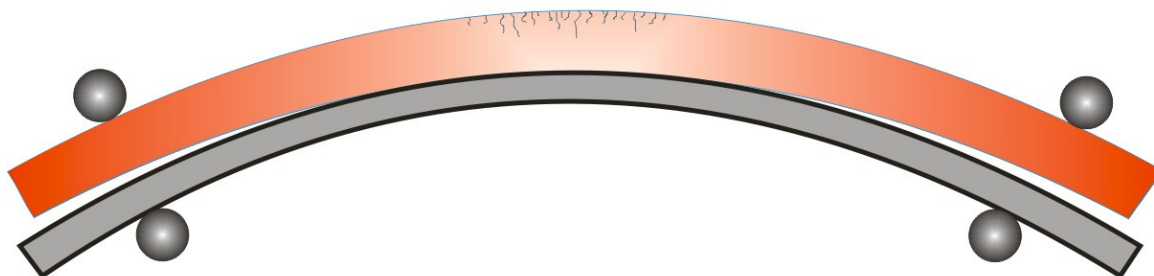
Koroze pod napětím vzniká při vzájemném působení chemického prostředí a tahového napětí. Na povrchu vznikají povrchové trhliny, které pronikají do hloubky materiálu a mohou způsobovat porušení celistvosti materiálu. Jde o jeden z nejnebezpečnějších následků styku materiálu a prostředí. Při tvorbě trhlin klesá pevnost a životnost materiálu při mechanickém namáhání a zároveň klesá odolnost proti únavě.

Při mechanismu koroze pod napětím víme že:

- v materiálu jsou přirozené neviditelné a viditelné vady (trhliny)
- v místech trhlin se během deformace koncentruje napětí
- napětí v místech trhlin, může postačit k porušení kovalentních vazeb, defekty jsou viditelné a přerušuje se celistvost
- při malých napětích vznikají malé trhliny, při velkém napětí jedna větší trhlina.

Mechanismus tvoření trhlin na povrchu polymeru je z velké části ovlivněn teplotou, charakterem a koncentrací chemicky aktivního prostředí, ale taky povrchem, strukturou a

pórovitostí povrchu. Záleží přitom i na technologii výroby dílů, na vnitřním napětí a na napětí, kterým je díl namáhán. [17]



Obr. 18. Tvorba trhlin při korozi pod napětím

6.3 Difúze prostředí do polymeru

Pokud nemůže prostředí vniknout do polymeru, nastává jejich interakce na povrchu. U chemicky aktivního prostředí se reakce objeví pouze na povrchu polymeru, proto nedojde k jeho porušení a nedochází k významnému ovlivnění vlastností.

Přenos nízkomolekulárních sloučenin probíhá pomocí mechanismem aktivované difúze. Proces je podmíněn tepelným pohybem makromolekulárních segmentů a je spojen s přítomností volného objemu v polymerech. Aby mohlo dojít k přeskočení difundující molekuly z jednoho na druhé místo, musí být v blízkosti difundující molekuly volné prostor a sama musí mít dostatek energie k přeskočení energetické bariéry. [17]

6.4 Chemická destrukce polymerů

Je vyvolána účinkem daného činidla. Polymer si v činidle buď zachová své vlastnosti, kdy se pojednává o odolnosti proti tomuto prostředí, nebo polymer své vlastnosti mění v závislosti na čase stráveném v tomto prostředí. Poté lze tvrdit, že takovému prostředí neodolává.

V některých činidlech dochází za daných podmínek až k reakci, kdy dochází k poškození a destrukci polymeru. Reakcí může být například dehydrochlorace, štěpení dvojných vazeb kyslíkem nebo ozonem, či další organicko-chemické reakce.

Nejvýznamnější reakcí je ovšem hydrolýza, jako vratná reakce polykondenzace, které mohou podléhat i polymery připravené jinými polymeračními reakcemi. [10]

6.4.1 Hydrolýza polymerů

Destrukční reakce zvláště charakteristická pro polyamidy, polyestery, polyuretany, karbidové pryskyřice a bílkoviny. Značné množství polykondenzátů a celulóza podléhají za určitých podmínek vlivům hydrolýzy.

U těchto polymerů probíhá hydrolýza ve vodě dostatečně rychle až při zvýšené teplotě s přítomností potřebných katalyzátorů. Katalyzovat lze kyselým nebo zásaditým prostředím. [10]

6.5 Možnosti zvýšení odolnosti polymerů proti chemickému prostředí

Tato modifikace polymeru bývá často složitá a vyžaduje velký zásah do struktury polymeru. Vytvoření takového odolného polymeru často dosahuje složitosti vývoje nového polymerního materiálu. Jedno z jednodušších řešení je zvýšení odolnosti proti botnání pomocí síťování polymeru nebo zvýšení krystalinity. Odolnost polymeru může do značné míry ovlivnit také složení a množství plniv. Další možností je příměs látek, které zpomalují vnikání chemicky aktivního prostředí do povrchu a tím zvyšují odolnost proti korozi. [17]

7 ZKOUŠKY CHEMICKÉ ODOLNOSTI

Zkoušky chemických odolností polymerů jsou normalizovány dle norem ISO. Normy ISO jsou zaměřené a normalizované na širokou škálu aplikací od koroze pod napětím, přes chemickou odolnost trubek až k odolnosti elektromateriálu.

7.1 Standardní podmínky pro zkoušení – ISO 291

Standardní podmínky pro testování polymerů jsou upřesněny normou ISO 291. Pro dané polymerní materiály jsou předepsány podmínky pro kondicionování a vysoušení, které probíhá před příslušnou zkouškou nebo zpracováním. V materiálu je nutné dosáhnout rovnoměrné relativní vlhkosti a teploty. [19]

Tab. 2. Podmínky zkoušení podle ISO 291 [19]

Označení standardního prostředí	Teplota vzduchu T /°C/	Dovolená odchylka ΔT /°C/	Relativní vlhkost U /%/	Dovolená odchylka ΔU /%/	Poznámka
23/50	23	±1	50	±1	<i>používaná pokud není domluveno jinak</i>
27/65	27	±2	65	±2	<i>může být použita v tropických oblastech po dohodě všech stran</i>
<i>Tyto hodnoty jsou dosažitelné v normální nadmořské výšce s atmosférickým tlakem 86 kPa a 106 kPa a rychlostí cirkulace vzduchu $\geq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$</i>					

7.2 Chemická odolnost při ponoření do kapaliny ISO 175

Při běžném používání jsou plastové díly vystavovány působení různých chemických kapalin. Tyto chemikálie absorbují nebo s nimi reagují. Typy kapalin, pomocí kterých se budou materiály testovat, jsou voleny dle využití v reálné praxi. Podmínky zkoušení uvedené v normě, jsou voleny dle vlastností a aplikace materiálu. [19]

7.2.1 Zkušební tělíska

Typy zkušebních tělísek závisejí podle parametrů, které budou vyhodnoceny (hmotnost, rozměry, fyzikální vlastnosti), tělíska ve formě desek, fólií, trubek používaných ve výrobě. Zkušební tělíska lze vyrábět obráběním z desek nebo vstřikováním (ISO 294-3). Je potřebné, aby testované vzorky byly bez otřepů, protože by mohl být ovlivněn průběh chemické reakce a tím výsledek testu. [19]

Specifikace odolnosti:

- změny v hmotnosti, rozměrech, vzhledu po odstranění z kapaliny a vysušení
- změna fyzikálních vlastností (mechanické, teplotní, optické atd.)
- množství absorbované kapaliny [19]

7.2.2 Podmínky zkoušení

Dané teploty jsou $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ a $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Pokud vzniká při chemické reakci teplo, které zvýší teplotu prostředí, je potřeba ochlazovat testovaný materiál na teplotu 23°C .

Norma také určuje časy ponoření. Časy ponoření jsou pouze doporučeny, pokud se zúčastněné strany nedohodnou jinak. Preferované časy jsou:

- 24 hodin pro krátkodobý test
- 1 týden pro standardní test (zejména 23°C)
- 16 týdnů pro dlouhodobý test [19]

7.2.3 Chemická kapalina

Chemická kapalina by měla být zvolena dle praktického využití zkoušeného materiálu, s kterým kapalinami přichází polymer do styku. Z toho důvodu, že průmyslové kapaliny nemívají konstantní složení, musí být chemická látka přesně definována. Tato látka musí dosahovat stanovené kvality a splňovat dané složení. [19]

Tab. 3 Používané chemikálie podle ISO175 [19]

<i>Název</i>	<i>Koncentrace</i>		<i>Hustota při 20°C</i>
	<i>hm. %</i>	<i>kg.m⁻³</i>	<i>kg.m⁻³</i>
<i>kyselina octová</i>	99,5		1050
<i>kyselina octová</i>	5	50	
<i>Aceton</i>	100		785
<i>roztok hydroxidu amonného</i>	25	230	907
<i>roztok hydroxidu amonného</i>	10	96	958
<i>anilín</i>	100		1021
<i>roztok kyseliny chromové</i>	40	550	
<i>roztok kyseliny citronové</i>	10	100	
<i>diethyl ether</i>	100		719
<i>destilovaná voda</i>	100		
<i>ethanol</i>		770	802
<i>ethanol</i>	50	460	
<i>ethylacetat</i>	100		901
<i>n-heptan</i>	100		683
<i>kyselina chlorovodíková</i>	36		1180
<i>kyselina chlorovodíková</i>	10	105	
<i>kyselina fluorovodíková^c</i>	40	450	1160
<i>peroxid vodíku</i>	30	330	
<i>peroxid vodíku</i>	3	31	
<i>kyselina mléčná</i>	10	100	

Tab. 4 Používané chemikálie podle ISO175 [19]

Název	Koncentrace		Hustota při 20°C
	hm. %	kg.m ⁻³	kg.m ⁻³
<i>methanol</i>	100		790
<i>kyselina dusičná</i>	70		1420
<i>kyselina dusičná</i>	40	500	1250
<i>kyselina dusičná</i>	10	105	1050
<i>kyselina olejová</i>	100		890
<i>roztok fenolu</i>	5	50	
<i>roztok uhličitanu sodného</i>	20	216	1080
<i>roztok uhličitanu sodného</i>	2	20	1010
<i>roztok chloridu sodného</i>	10	108	1070
<i>roztok hydroxidu sodného</i>	40	575	1430
<i>roztok hydroxidu sodného</i>	1	10	1010
<i>roztok chlornanu sodného</i>	10		
<i>kyselina sírová</i>	98		1840
<i>kyselina sírová</i>	75	1250	1670
<i>kyselina sírová</i>	10		
<i>kyselina sírová</i>	5		
<i>toluen</i>	100		871
<i>2,2,4 – trimethylpentan</i>	100		698

7.2.4 Postup zkoušky

Vzorky pro testování musí být ponořeny v kádi celým svým objemem. Je vhodné, aby byla kompletní série ponořena ve stejné kádi. U dlouhodobého testu je zapotřebí, aby se chemikálie měnila v intervalu každých 7 dní. Mění se celý objem. Pokud dojde k velké nasákavosti materiálu je zapotřebí zajistit, aby i po absorbování kapaliny polymerním materiálem byly zkušební tělíska ponořeny celým svým objemem v kapalině.

Tělíska se po vyjmutí z chemické kapaliny musejí sušit. Způsob sušení má dvě formy:

- pro tělíska ponořeny v kyselinách, zásadách nebo jiném vodním roztoku, je potřeba dokonalé omytí čistou vodou. U hygroskopických látek (např. kyseliny sírové) je potřeba absorbovanou vlhkost z povrchu před měřením odstranit

- u prchavých látek, nebo u ve vodě nerozpustných organických kapalin bude omyta prchavými neagresivními látkami (např. nafta). [19]

7.2.5 Interpretace výsledků

Výsledky můžeme vyhodnotit dvěma způsoby a to číselné nebo graficky. Číselné hodnocení změn může být vyjádřeno buď v absolutních hodnotách, v procentních jednotkách, nebo v jednotkách na plochu. Grafické vyhodnocení je závislost funkce na čase. Čas je zadáván v absolutních hodnotách, v případě dlouhotrvajícího testování v logaritmickém měřítku. Mezi vyhodnocované vlastnosti zahrnujeme hmotnost zkušebního tělíška, změna rozměrů a množství absorbované kapaliny. Do protokolu je potřeba zadat hodnoty před a po vložení do kapaliny, po vysušení. Další vyhodnocovanou vlastností je změna barvy povrchu nebo jiných vzhledových vlastností. U vzhledových vlastností se srovnává otestované tělíško s původním.

Mezi další vzhledové vlastnosti, které se hodnotí, patří:

- lesklost a průhlednost
- průběh praskání
- průběh tvoření bublinek, tvoření jamek, apod.
- lepivý povrch
- štěpení, kroucení a jiné deformace
- částečný rozpad [19]

Tab. 5. Odhad změn

<i>Kvalitativní odhad změn</i>
Žádné
Nepodstatné
Nepatrné
Mírné
Značné

7.3 Chemické zatížení ISO 16750-5

7.3.1 Testování a podmínky

Norma pro testování polymerních materiálů na chemickou odolnost v automobilovém průmyslu. Hodnocení probíhá pouhým okem v dobře osvětlené místnosti a vyhodnocují se u ní stejné hodnoty jako u normy ISO 175. [21]

Aplikace chemikálií:

1. bavlněná tkanina
2. kartáč
3. ponoření do chemikálie
4. nasprejování
5. nalití

Zkouška probíhá do 24 hodin za teploty podle doporučených teplot z normy ISO 16750-4.

Tab. 6. Seznam chemických kapalin dle ISO 16750-5 [21]

Označení	Chemická kapalina	Popis	Teplota pro zatížení
A	nafta	podle ISO 3170 (EN 590)	T _{max}
B	bio nafta	podle DIN 51606	T _{max}
C	bezolovnatý benzín	podle ISO 3170 (EN 228)	RT
D	benzín s 15 % metanolu	podle DIN 53245	RT
E	zkušební palivo FAM	podle DIN 51604 B	RT
F	bateriová kapalina	37% kyselina sírová nebo	80°C
G	brzdová kapalina	DOT 4 (SAE J 1790)	T _{max}
H	chladičí aditiva (nezředěná nemrznoucí	°	T _{max}
I	ochranný lak	°	T _{max}
J	odstraňovač ochranného laku	°	RT
K	motorový olej	SAE 10 W 50	T _{max}
L	přípravek pro čištění za studena	°	TA
M	metanol	podle DIN 53245	RT
N	olej pro diferenciály	°	T _{max}
O	kapalina do převodovky	°	T _{max}

P	čistič pro interiéry	c	T_{max}
Q	občerstvení obsahující kofein a cukr	c	T_{max}
R	hydraulická kapalina	c	T_{max}
S	autokosmetika	c	RT
T	čistič čelního skla	c	T_{max}
U	čistič skla	c	T_{max}
V	čistič kol	c	T_{max}
W	čistič motoru	c	T_{max}
X	petrolej	c	RT
Y	denaturovaný líh	c	RT
Z	ochrana proti kavitaci	c	T_{max}
0	dodatečné přídavky	c	

T_{max} se vybírá podle ISO 16750-4:2003 tab. 1
-RT, ISO 16750-1:2003, 7.2 (pokojová teplota)
-dohodnuto mezi zákazníkem a výrobcem

Tab. 7. Doporučené teploty podle ISO 16750-4. [22]

Název	T_{min} /°C/	T_{max} /°C/	Název	T_{min} /°C/	T_{max} /°C/
A	-20	65	J	-40	120
B	-30	65	K	-40	125
C	-40	65	L	-40	130
D	-40	70	M	-40	140
E	-40	80	N	-40	150
F	-40	85	O	-40	155
G	-40	90	P	-40	160
H	-40	100	Z		
I	-40	110			

7.4 Koroze pod napětím ISO 22088

Stanovení koroze pod napětím se určuje pomocí relativního proměnného parametru odolnosti působení chemického prostředí. Při zkoušení se mění pouze jeden s následujících parametrů, ostatní zůstávají konstantní.

Určení koroze pod napětím je dáno relativním proměnným parametrem odolnosti vůči chemickému prostředí. Během zkoušky dochází ke změně jednoho z daných parametrů. Ostatní parametry jsou konstantní. [20]

Určující parametry:

1. rozměry zkušební tělesa
2. stav zkušební tělesa (orientace, struktura, vnitřní napětí)
3. příprava zkušební tělesa
4. tepelná historie zkušební tělesa
5. trvání zkoušky
6. chemické prostředí
7. metoda aplikace napětí a deformace
8. kritérium porušení [20]

Výslednou hodnotou bude určení indexu ESC (koroze pod napětím).

Tři způsoby definice ESC:

1. poměr určené lomové vlastnosti stanovené v referenčním prostředí (většinou vzduch), měřené za stejné teploty a době trvání zkoušky
2. poměr hodnoty deformace u lomu stanovené ve zkušebním prostředí k hodnotě stanovené v referenčním prostředí pro stejnou dobu vystavení
3. poměrná hodnota odklonu napětí, které snímá ESC citlivost různých materiálů vystavených specifickému prostředí [20]

Zkušební tělíska jsou během zkoušky vystavena normální teplotě $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ nebo zvýšené teplotě (norma specifikuje $(40\pm 2)^{\circ}\text{C}$, $(55\pm 2)^{\circ}\text{C}$, $(70\pm 2)^{\circ}\text{C}$, $(85\pm 2)^{\circ}\text{C}$, $(100\pm 2)^{\circ}\text{C}$ nebo podle dohody zúčastněných stran). [20]

7.5 Stanovení odolnosti proti korozi pod napětím (ESC) - Část 3:

Metoda ohnutého pásku

Na tuhé nebo špatně ohybné plasty s mírným relaxačním napětím v čase se často využívá metoda ohnutého pásku. Tato zkouška slouží především k hodnocení materiálu, proto ji nevyužíváme k získání hodnot pro provoz nebo pro návrh výrobků. [20]

7.5.1 Podmínky testování

Na pásek ohnutý v přípravku působí nominální ohybové napětí, které se vypočítá dle rovnice:

$$\varepsilon_x = \frac{d}{2r+d} \cdot 100(\%) \quad (5)$$

Ohýbaný pásek je současně vystaven chemické kapalině, ve které je ponořen. Testovaný díl je hodnocen vizuálně, poté uvolněn a hodnocen například mechanickými či jinými zkouškami. Zkouška probíhá za standardní teploty $23 \pm 2^\circ\text{C}$, popřípadě za zvýšených teplotních podmínek $40 \pm 2^\circ\text{C}$ nebo 55°C . Chemická kapalina musí být v kontaktu s povrchem tělíska v minimální vrstvě 2 - 4 mm. Nejlepší je ovšem celkové ponoření tělíska. Zkouška probíhá jako krátkodobá, kdy je čas namočení $24\text{hod} \pm 15\text{ min}$, nebo dlouhodobá, kdy je čas určený vzájemnou dohodou.

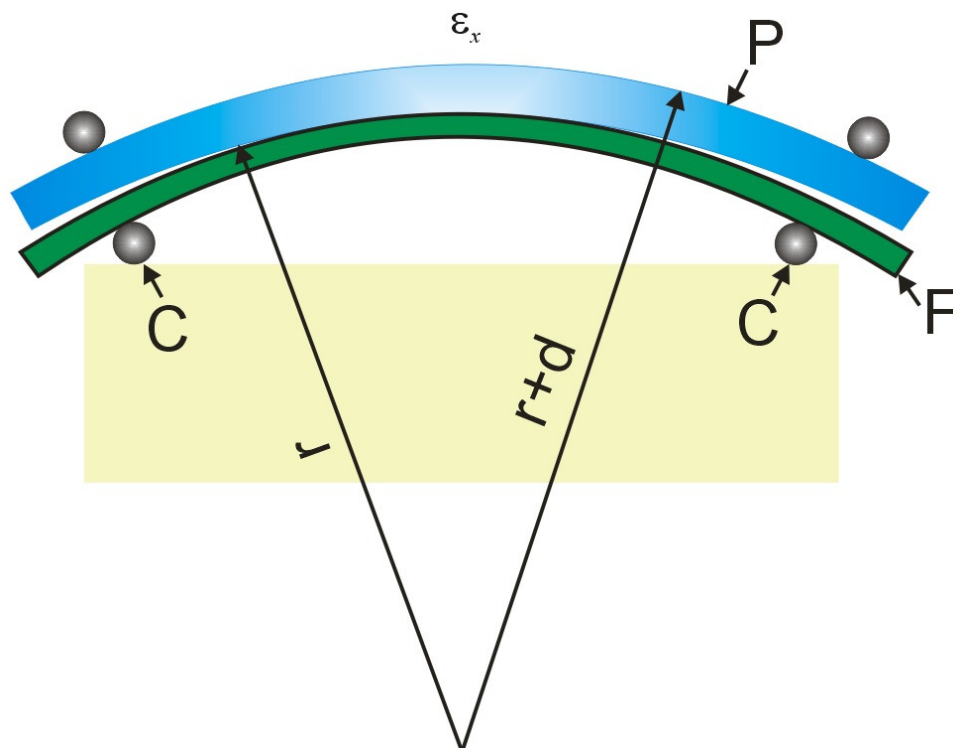
Koncem zkoušky je vyjmutí a stanovení určujících vlastností. U krátkodobého testování se provádí zkouška okamžitě po vyjmutí tělíska z chemického prostředí a u dlouhodobého testu jsou tělíska ponechány v prostředí vzduchu na 22 až 24 hodin za teploty $23 \pm 2^\circ\text{C}$. U zkoušky Charpyho kladivem musí být části, které nebyli v kontaktu s chemickou kapalinou, na podporách. Kritické napětí koresponduje s kritériem selhání, to je odečteno z tabulky nebo grafu. [20]

7.5.1.1 Vyhodnocení

Vyhodnocení této zkoušky probíhá písemně a graficky. Potřebné údaje pro měření jsou uvedeny v normě a zpráva a vyhodnocení by měli být co nejvíce podrobné, jelikož norma udává mnoho přizpůsobení podmínek zkoušení a kritérii selhání. [20]

Tab. 8. Sledované vlastnosti [20]

Označení	Sledovaná vlastnost	ISO	Kritérium selhání
A1	stav povrchu (vyhodnoceno vizuálně)	-	trhliny a praskání na dlouhé straně
A2	stav povrchu (vyhodnoceno vizuálně)	-	trhliny a praskání na větší ploše
A3	stav povrchu (vyhodnoceno vizuálně)	-	jiné pozorování: změna barvy apod.
B1	Napětí při přetržení nebo mez kluzu v tahu	ISO 527 - 2	80% z hodnoty získané z tělísek nezatížených předpětím
B2	ohybové napětí při maximálním zatížení	ISO 178	80% z hodnoty získané z tělísek nezatížených předpětím
B3	percentuálně prodloužení při protržení	ISO 527	50% z hodnoty získané z tělísek nezatížených předpětím
B4	Charpyho rázová zkouška	ISO 179	50% z hodnoty získané z tělísek nezatížených předpětím
B5	smyková rázová zkouška	-	50% z hodnoty získané z tělísek nezatížených předpětím
B6	vlastnosti zkoušené po vzájemné	-	po vzájemné dohodě

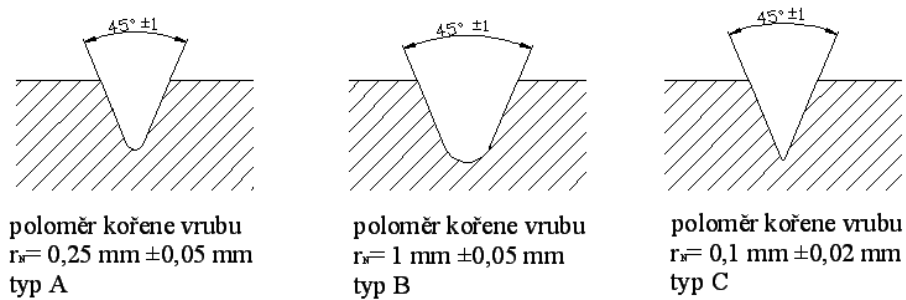


Obr. 19. Princip zkoušení ESC

P – zkušební tělísko, d – tloušťka materiálu, F – přidržovač,
 r – zaoblení přidržovače, c – svorka, ϵ_x – nominální napětí

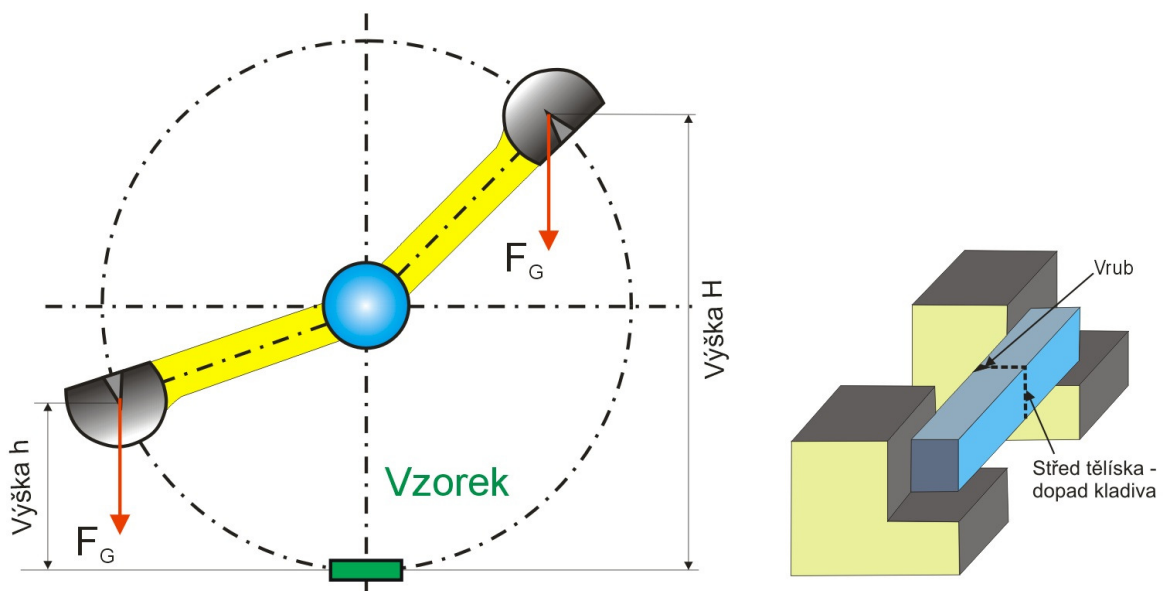
7.6 Stanovení zbytkové vrubové houževnatosti (Charpyho kladivo)

Při této zkoušce se vyhodnocuje především rázová a vrubová houževnatost Charpy. Principem zkoušky je umístění tělíska na podpěrný stůl Charpyho kladiva. Tělísko s vytvořeným vrubem je namáháno uprostřed jeho délky a to jedním rázem kladiva, zavěšeného na otočném rameni.



Obr. 20. Typy vrubů na tělísku

Spouštění kladiva pomocí setrvačnosti je nadefinováno z určité výšky. Zaznamenává se rázová síla a energie při přetržení.



Obr. 21. Charpyho kladivo

Zaznamenává se rázová a vrubová houževnatost a energie při přetržení.

Rázová houževnatost
$$a_{cU} = \frac{W_B}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (6)$$

Vrubová houževnatost
$$KC = \frac{W_B}{h \cdot b_N} \cdot 10^3 \quad (7)$$

h (mm) - tloušťka zkušebního tělesa

b (mm) - šířka zkušebního tělesa

b_N (mm) - šířka zkušebního tělesa pod vrubem

W_B (J) - energie při přeražení

Po přeražení, se na tělísku uskuteční také optické vyhodnocení lomu a optické zhodnocení deformace zkušebního tělíška

N- nepřeraženo N

P- částečně přeraženo P

C- úplné přeražení a H- kloubové přeražení - t- tvárné přeražení

b- křehké přeražení

s- tříštivé přeražení

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je porovnání vlivu radiačního síťování na chemickou odolnost vybraných polymerů v závislosti na dávce záření, kterou byly vybrané polymery ozářeny a za pomoci určených zkoušek porovnat jejich mechanickou a chemickou odolnost proti chemikáliím neozářených a ozářených tělísek v závislosti na dávce záření.

8.1 Postup diplomové práce

1. Výroba zkušebních tělísek metodou vstřikování
2. Zesíťování polymerů pomocí radiační technologie
3. Naložení ozářených a neozářených tělísek do chemikálií
4. Zkouška botnání
5. Provedení zkoušky vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu
6. Zkouška ESC
7. Vyhodnocení a porovnání výsledků

9 TESTOVACÍ CHEMIKÁLIE

Jako testovací chemikálie byly zvoleny provozní kapaliny běžně používané v automobilovém průmyslu (nemrznoucí kapalina do ostřikovačů, chladicí směs do chladičů, brzdová kapalina a motorový olej). Tyto chemikálie byly uloženy ve skleněných nádobách v prostorech laboratoří. Ze zástupců běžně nedostupných testovacích chemikálií byly vybrány kapaliny FAM-B a bionafta B30 u kterých probíhalo měření v autoklávech ve firmě Robert Bosch s.r.o.

9.1 Nemrznoucí kapalina do ostřikovačů SHERON® Screenwash -40°C

Nemrznoucí směs do ostřikovačů založena na bázi ethanolu. Obsahuje aniontové povrchově aktivní látky (do 5%). Použitelnost v prostředí do teploty -40°C.



Obr. 22. SHERON® Screenwash -40°C

9.2 Chladicí kapalina SHERON® Antifreeze G48

Tato bez nitritová chladicí kapalina na bázi ethylenglykolu, která s vodou vytváří chladicí směs s vysokou antikorozií ochranou kovových součástí v chladiči. Je určena na celoroční použití do motorů z hliníkových slitin.



Obr. 23 SHERON® Antifreeze G48

9.3 Brzdová Kapalina Brake Fluid SAE J1703 DOT4

Brzdová kapalina založená na bázi 2,2'-oxybisethanolu, určená pro brzdové a spojkové systémy motorových vozidel, včetně systému ABS.



Obr. 24 Brzdová Kapalina Brake Fluid SAE J1703 DOT4

9.4 Motorový olej BP® VISCO 3000 A3/B4 10W-40

Jde o polosyntetický motorový olej pro benzínové a naftové motory splňující nebo převyšující specifikace API SL/CF, ACEA A3/B4, VW 505.00, MB-Approval 229.1



Obr. 25. Motorový olej BP® VISCO 3000 A3/B4 10W-40

9.5 Testovací kapalina FAM-B - Din 51604

Jedná se o chemikálii používanou v laboratořích při testování chemické odolnosti polymerních materiálů používaných v automobilovém průmyslu.

Tab. 9. Složení FAM-B

<i>Prvek</i>	<i>Procento obsahu (%)</i>
<i>Toulen</i>	25-50
<i>2,2,4-trimethylpentan</i>	10-25
<i>Methanol</i>	10-25
<i>2,4,4-trimethylpentene</i>	10-25
<i>Ethanol</i>	1-5

Tab. 10. Vlastnosti FAM-B

<i>Vlastnost</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
<i>Teplota varu</i>	65	°C
<i>Bod vzplanutí</i>	-12	°C
<i>Zápalná teplota</i>	410	°C
<i>Hustota při 20°C</i>	0,79	g/cm ³

9.6 Směsná motorová nafta Biodiesel B30

Jde o směsnou motorovou naftu obsahující 30% metylesteru řepkového oleje a 70% běžně prodávané motorové nafty. Metylester řepkového oleje je volně mísitelný s motorovou naftou a v různých jejich koncentracích se používá jako motorové palivo

Tab. 11. Vlastnosti 100% metylesteru řepkového oleje

<i>Vlastnost</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
<i>Hustota (20°C)</i>	885	Kg/cm ³
<i>Bod varu</i>	300-360	°C
<i>Bod vzplanutí</i>	181	°C
<i>Teplota samovznícení</i>	405	°C
<i>Bod tání</i>	-5	°C

10 TESTOVANÉ POLYMERY

Pro zkoušky chemické odolnosti byly vybrány polymery z řad polyamidů a polyesterů. Z polyamidů je to nejrozšířenější konstrukční polyamid PA 6 a jeho plněná modifikace PA 6 30%GF, dále PA 6.6 25%GF a PA 6.6 45%GF doporučený ke zkoušce chemické odolnosti. Jako zástupce polyesterů je vybrán PBT.

10.1 Seznam testovaných polymerů

1. POLYAMID 6 - CompaMid SV black (1001) - Firma Dimelika
2. POLYAMID 6 GF30 - V-CREAMID-B3H2G6*M9000/12+Wst. - Firma PTS
3. POLYAMID 66 GF25 - V-CREAMID-AG5FRPH*M0128A - Firma PTS
4. POLYAMID 66 GF45 - V-CREAMID-A3H9.1G9*M9000 Oil and hydro stabilized
- Firma PTS
5. POLYBUTYLENTEREFTALÁT - CompaDur 121 SV black (114) - Firma
Dimelika

11 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK

Zkušební tělíska byly vyrobeny na vstřikovacím stroji Arburg Allrounder 420C Advance, který se nachází ve školních dílnách.



Obr. 26. Arburg Allrounder 420C Advance.

Před vstřikováním byly materiály ve formě granulátu vysušeny v sušárně Arburg Thermolift 100-2 po dobu 4 hodin na teplotu 80°C.

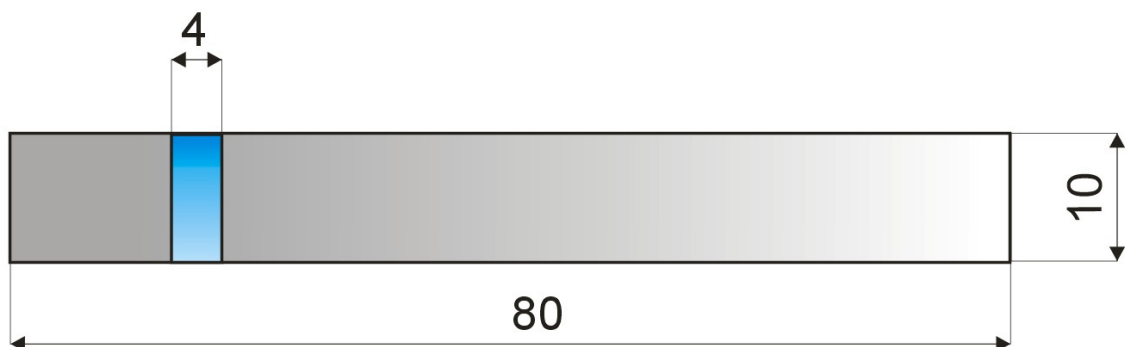


Obr. 27. Arburg Thermolift 100-2

Tab. 12. Technické parametry stroje Arburg Allrounder 420C Advance.

Vstřikovací jednotka	
Průměr šneku	40 mm
Poměr šneku	20 L/D
Zdvih šneku	max. 145 mm
Objem dávky	max. 182 cm ³
Vstřikovací tlak	max. 2120 bar
Vstřikovací rychlost	max. 168 cm ³ .s ⁻¹
Zpětný tlak pozitivní/negativní	max. 350/160 bar
Kroutící moment šneku	max. 700Nm
Přítlačná síla šneku	max. kN
Objem násypky	50l
Uzavírací jednotka	
Uzavírací síla	max. 1000kN
Otevírací síla / zvýšená otevírací síla	max. 35/250 kN
Otevření	max. 500 mm
Vzdálenost mezi vodícími sloupy	420x420 mm
Velikost upínací desky	570x570 mm
Vyhazovací síla	max. 40 kN
Zdvih vyhazovače	max. 175 mm
Hydraulika a pohon	
Výkon čerpadla	22 kW
Celkový příkon stroje	33,9 kN

Zkušební tělíska byla vstřikována do jednonásobné formy a jejich rozměry jsou normalizované. Pro naše zkoušky byly využity pouze tělíska menších rozměrů normalizované na zkoušku Charpyho kladivem.



Obr. 28. Rozměry normalizovaného tělíska



Obr. 29. Vystříknutá tělíska

Tab. 13. Vstříkovací podmínky pro jednotlivé materiály

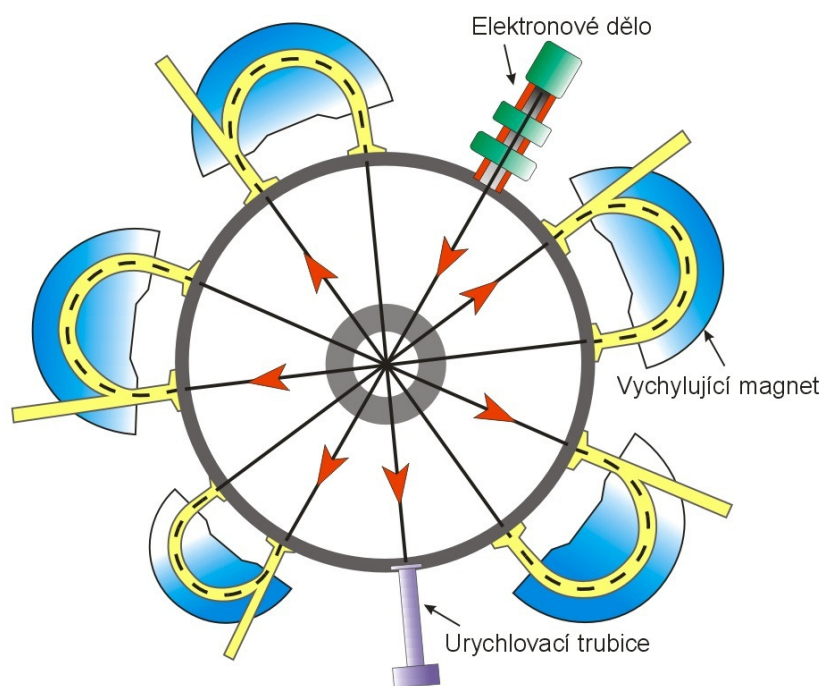
<i>Materiál</i>	<i>PA 6</i>	<i>PA 6 GF30</i>	<i>PA 66 GF25</i>	<i>PA 66 GF45</i>	<i>PBT</i>
<i>Parametr</i>					
<i>Vstříkovací rychlost (cm³.s-1)</i>	80	80	80	80	80
<i>Vstříkovací tlak (MPa)</i>	80	80	80	150	80
<i>Doba chlazení (s)</i>	20	20	20	40	20
<i>Teplota formy (°C)</i>	90	90	90	100	90
<i>Celkový čas dotlaku (s)</i>	30	30	30	20	20
<i>Dotlak (Mpa)</i>	60	60	60	80	60
<i>Teplota trysky (°C)</i>	290	290	290	300	260
<i>Teplota pod násypkou (°C)</i>	280	270	270	280	255
<i>2. teplotní pásmo (°C)</i>	285	275	275	285	260
<i>3. teplotní pásmo (°C)</i>	280	280	280	290	255
<i>4. teplotní pásmo (°C)</i>	275	285	285	295	250
<i>5. teplotní pásmo (°C)</i>	270	290	290	300	245

12 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ

Radiační síťování polymerů bylo provedeno ve firmě BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co. KG, v místě Saal a. d. Donau v Německu. Zesíťování beta zářením proběhlo pomocí urychlovače elektronů typu Rhodotron® o energii 10 MeV.



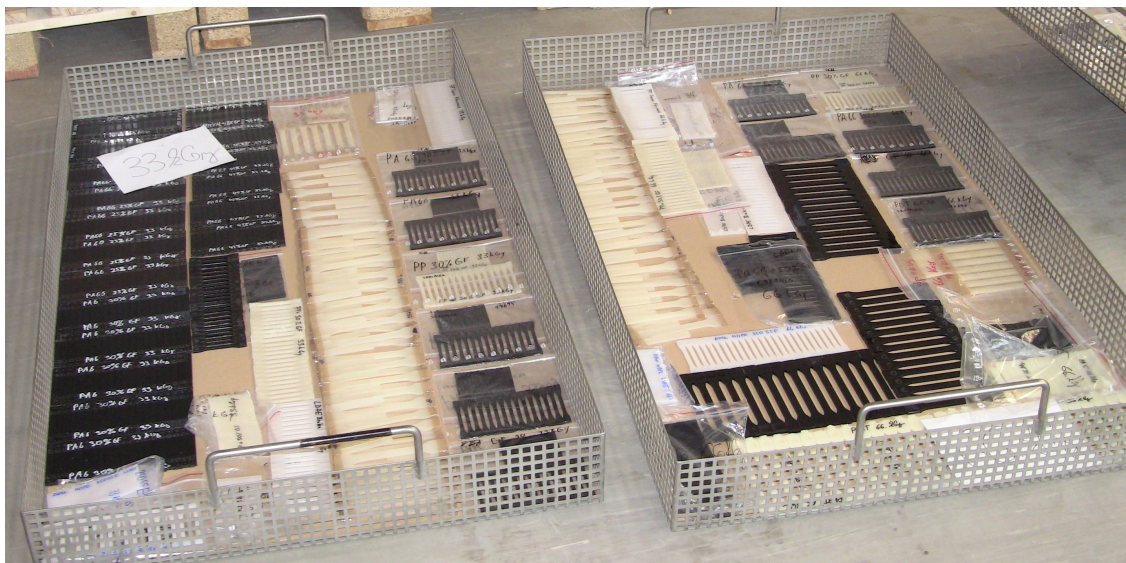
Obr. 30 Elektronový urychlovač typu Rhodotron [24]



Obr. 31. Schéma urychlovače Rhodotron



Obr. 32. Tělíška rozdělena podle dávek v BGS



Obr. 33. Tělíška připravena na ozáření



Obr. 34. Radiačně zesíťovaná tělíška

Tab. 14. Dávky záření

<i>Materiál</i>	<i>Dávka (kGy)</i>
<i>PA 6</i>	33, 99, 198
<i>PA 6 GF30</i>	33, 99, 198
<i>PA 66 GF25</i>	33, 99, 198
<i>PA 66 GF45</i>	33, 99, 198
<i>PBT</i>	33, 99, 198

13 ZKOUŠKA BOTNÁNÍ

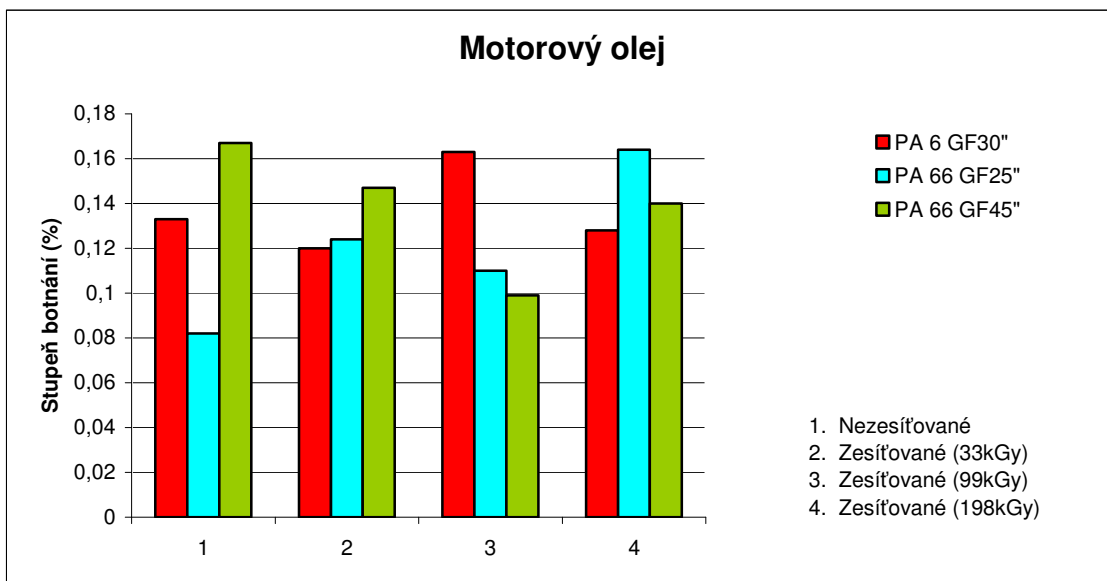
Zkouška botnání byla provedena u tří vybraných materiálů. Před zkouškou byly zváženy všechny tělíška a následně po vyjmutí z chemicky aktivního prostředí opět převáženy. Zkušební tělíška byly naloženy do skleněných nádob po dobu 336 hodin. Zkouška probíhala při pokojové teplotě 23°C. Po zvážení tělíšek a zaznamenání rozdílových hodnot byl vyhodnocen koeficient botnání a následně jeho přepočet na procento botnání.

$$\text{Koeficient botnání : } Q = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \text{ (-)} \quad (8)$$

$$\text{Procento botnání : } Q_{\%} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 (\%) \quad (9)$$

Tab. 15. Koeficienty a procenta botnání v motorovém oleji

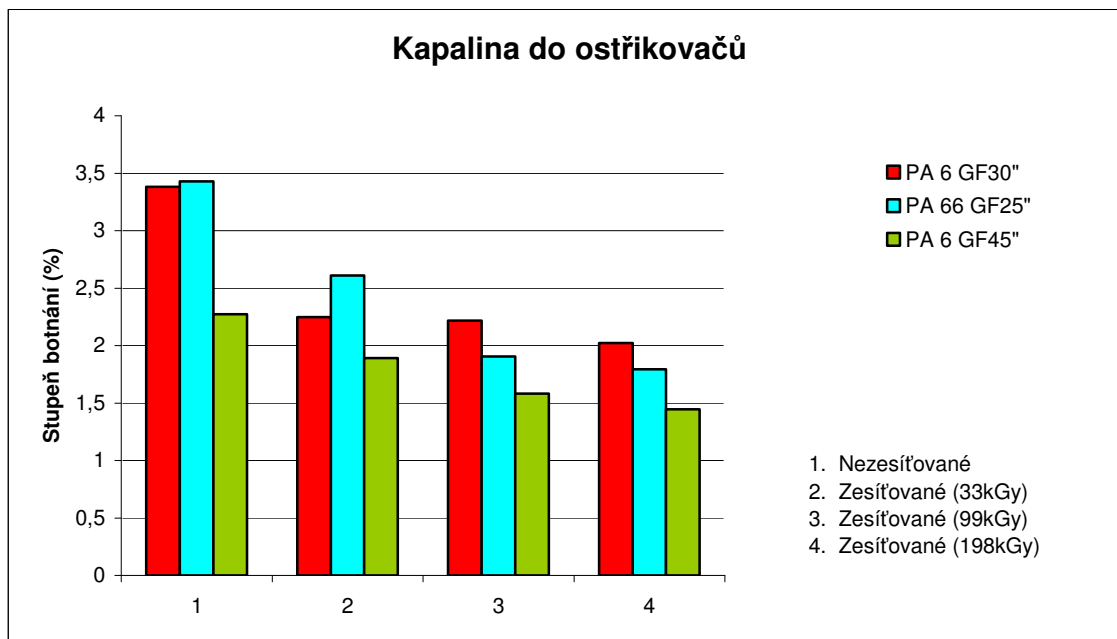
<i>Motorový olej</i>		<i>Materiál</i>		
		<i>PA 6 GF30</i>	<i>PA 66 GF25</i>	<i>PA 66 GF45</i>
Nezesířované	Koeficient botnání (-)	0,001	0,001	0,002
	Procento botnání (%)	0,133	0,082	0,167
Zesířované (dávka 33kGy)	Koeficient botnání (-)	0,001	0,001	0,001
	Procento botnání (%)	0,120	0,124	0,147
Zesířované (dávka 99kGy)	Koeficient botnání (-)	0,002	0,001	0,001
	Procento botnání (%)	0,163	0,110	0,099
Zesířované (dávka 198kGy)	Koeficient botnání (-)	0,001	0,002	0,001
	Procento botnání (%)	0,128	0,164	0,140



Obr. 35. Stupeň botnání v motorovém oleji

Tab. 16. Koeficienty a procenta botnání v kapalině do ostříkovačů

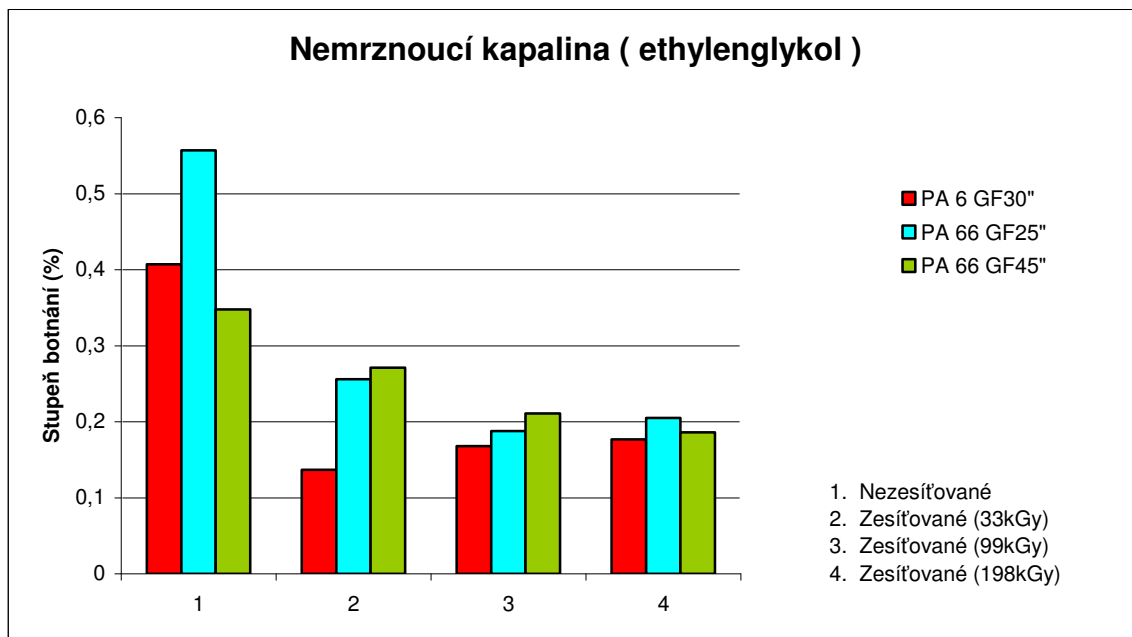
Kapalina do ostříkovačů (ethanol)		Materiál		
		PA 6 GF30	PA 66 GF25	PA 66 GF45
Nezesíťované	Koeficient botnání (-)	0,034	0,034	0,023
	Procento botnání (%)	3,382	3,428	2,274
Zesíťované (dávka 33kGy)	Koeficient botnání (-)	0,022	0,026	0,019
	Procento botnání (%)	2,248	2,610	1,892
Zesíťované (dávka 99kGy)	Koeficient botnání (-)	0,022	0,019	0,016
	Procento botnání (%)	2,217	1,906	1,581
Zesíťované (dávka 198kGy)	Koeficient botnání (-)	0,020	0,018	0,014
	Procento botnání (%)	2,022	1,795	1,446



Obr. 36. Stupeň botnání v kapalině do ostříkovačů

Tab. 17. Koeficienty a procenta botnání v chladicí kapalině

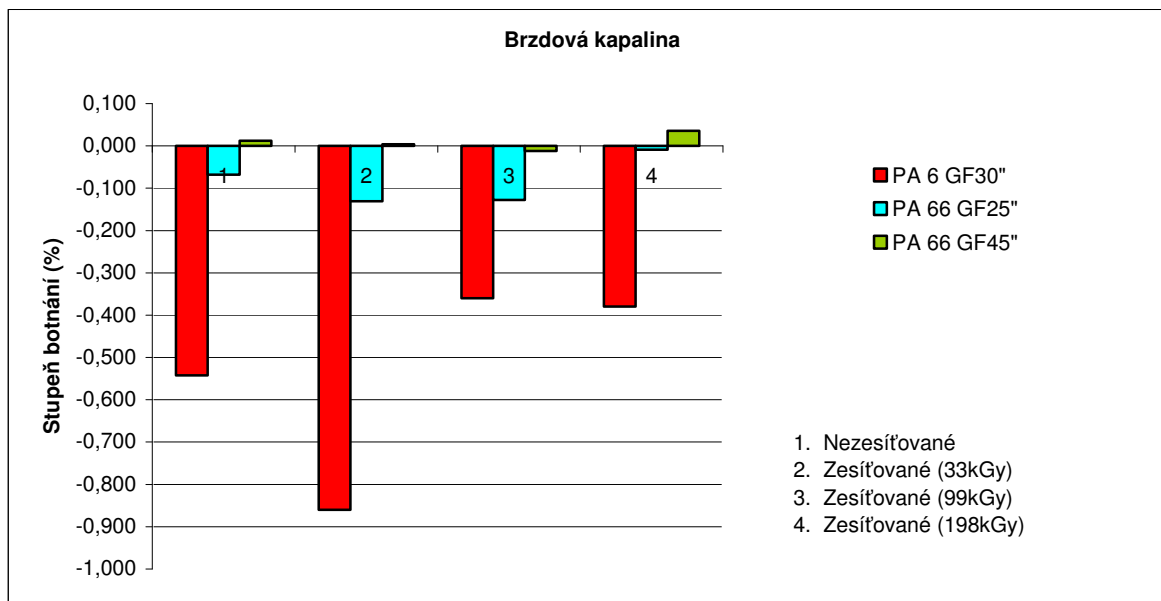
Chladicí kapalina (ethylenglykol)		Materiál		
		PA 6 GF30	PA 66 GF25	PA 66 GF45
Nezesíťované	Koeficient botnání (-)	0,004	0,006	0,003
	Procento botnání (%)	0,407	0,557	0,348
Zesíťované (dávka 33kGy)	Koeficient botnání (-)	0,001	0,003	0,003
	Procento botnání (%)	0,137	0,256	0,271
Zesíťované (dávka 99kGy)	Koeficient botnání (-)	0,002	0,002	0,002
	Procento botnání (%)	0,168	0,188	0,211
Zesíťované (dávka 198kGy)	Koeficient botnání (-)	0,002	0,002	0,002
	Procento botnání (%)	0,177	0,205	0,186



Obr. 37. Stupeň botnání v chladící kapalině

Tab. 18. Koeficienty a procenta botnání v brzdové kapalině

Brzdová kapalina		Materiál		
		PA 6 GF30	PA 66 GF25	PA 66 GF45
Nezesíťované	Koeficient botnání (-)	-0,005	-0,001	0,000
	Procento botnání (%)	-0,542	-0,068	0,012
Zesíťované (dávka 33kGy)	Koeficient botnání (-)	-0,009	-0,001	0,000
	Procento botnání (%)	-0,860	-0,131	0,004
Zesíťované (dávka 99kGy)	Koeficient botnání (-)	-0,004	-0,001	0,000
	Procento botnání (%)	-0,360	-0,128	-0,012
Zesíťované (dávka 198kGy)	Koeficient botnání (-)	-0,004	0,000	0,000
	Procento botnání (%)	-0,380	-0,009	0,036



Obr. 38. Stupeň botnění v brzdové kapalině

13.1 Vyhodnocení zkoušky botnění

Největší stupeň botnění měl nezesíťovaný PA6 30% GF v kapalině na bázi ethanolu (3,382%), ovšem se zvyšující se dávkou záření stupeň botnění klesal. Nejmenší hodnotu dosáhl při dávce 198kGy (2,022%), což je zlepšení o 40,2%. Nejmenší kladný stupeň botnění měl v motorovém oleji (0,133%), kde se jeho hodnota po ozáření dávkou 33kGy klesla na nejmenší hodnotu (0,120%), což je zlepšení o 9,8%. Vyšší dávky záření nebyly prospěšné a stupeň botnění zvyšovaly. V ethylenglykolu měl nejvyšší stupeň nezesíťovaný (0,407%) a nejnižší stupeň zesíťovaný polymer dávkou 33kGy (0,137%), což je zlepšení o 66,3%. Další dávky procento zesíťování zvyšovaly. V brzdové kapalině se nezesíťovaný PA 6 30% GF začal rozpouštět (-0,542%). Zesíťování dávkou 33kGy ještě podpořilo rozpouštění (-0,860%), ale dávka 99kGy již rozpouštění zpomalila na - 0,360%, což je zlepšení o 58,1% oproti nezesíťovaným zkušebním tělískům.

Nezesíťovaný PA66 25% GF měl nejvyšší stupeň botnění u naložení v kapalině do ostřikovačů na bázi ethanolu (3,428%) a stupeň botnění u zesíťovaného klesal až po dávku 198kGy (1,795%), kdy byla hodnota menší o 48,7% než u nezesíťovaných tělísek. U naložení v chladicí kapalině bylo největší procento botnění u nezesíťovaných (0,557%), nejmenšího procenta se dosáhlo zesíťováním dávkou 99 kGy, kdy došlo ke zlepšení o 66,3% na procento botnění 0,188%. Nejmenší stupeň botnění u neozářeného materiálu byl zaznamenán u motorového oleje (0,082%). Všechny tři dávky záření stupeň botnění

zvětšily, a proto byly neprospěšné. V brzdové kapalině se nezesíťovaný PA66 25% GF začal rozpouštět (-0,068%) a zesíťování dávkou 198kGy pomohlo ke snížení jeho rozpouštění o 86,7% na procento rozpouštění -0,009%.

U PA66 45% GF byl nejvyšší stupeň botnání zaznamenán u kapaliny na bázi ethanolu. Největší stupeň botnání byl u nezesíťovaného (2,274%) a nejmenší stupeň u zesíťovaného dávkou 198kGy (1,446%), což bylo zlepšení o 36,4%. Procento se dále postupně zmenšovalo dle dávky záření. Při naložení v chladicí kapalině bylo největší procento botnání u nezesíťovaných (0,348%), nejmenšího procenta bylo dosaženo při zesíťování dávkou 99 kGy, u kterého došlo ke zlepšení o 46,6% na procento botnání 0,186%. Pro motorový olej byl naměřen stupeň botnání u nezesíťovaného materiálu (0,167%). Zesíťovaný polymer při dávce záření 99 kGy byl pro motorový olej vyhodnocen jako materiál s nejnižším stupněm botnání (0,099%), které odpovídalo zlepšení o 40,7%. Nejnižší stupeň botnání byl v brzdové kapalině u nezesíťovaného PA66 45% (0,012%), při zesíťování dávkou 33kGy tento stupeň ještě poklesl o 66,7% na procento botnání 0,004%. Při dávce 99kGy se dokonce začal polymer rozpouštět (-0,012%).

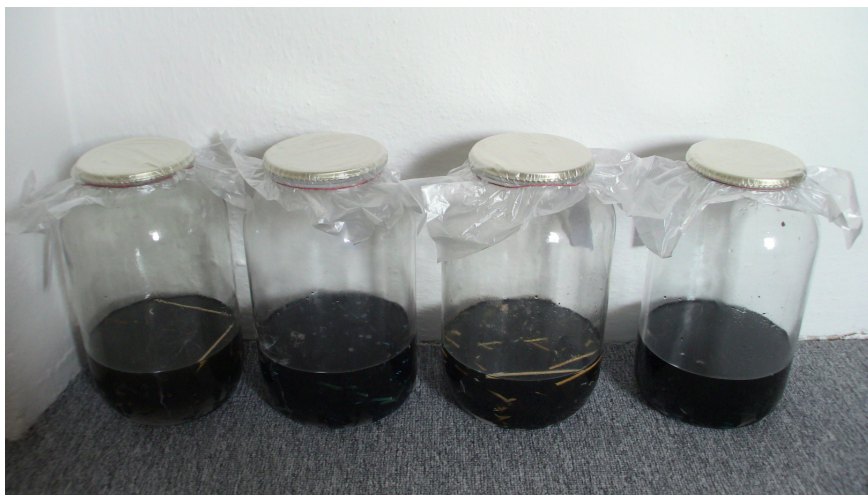
14 NALOŽENÍ TĚLÍSEK PRO RÁZOVOU ZKOUŠKU

První část tělísek byla naložena do čtyř chemikálií v laboratorním prostředí ve skleněných nádobách. Jako testovací kapaliny byly použity kapalina do ostříkovačů, chladicí kapalina, brzdová kapalina a motorový olej. Tyto kapaliny byly blíže specifikovány v kapitole 9.

Tab. 19. Teploty prostředí při naložení zkušebních tělísek

<i>Médium</i>	<i>Teplota prostředí (°C)</i>
<i>Kapalina do ostříkovačů</i>	23
<i>Chladicí kapalina</i>	23
<i>Brzdová kapalina</i>	23
<i>Motorový olej</i>	23

Doba naložení tělísek: **168 hod.**



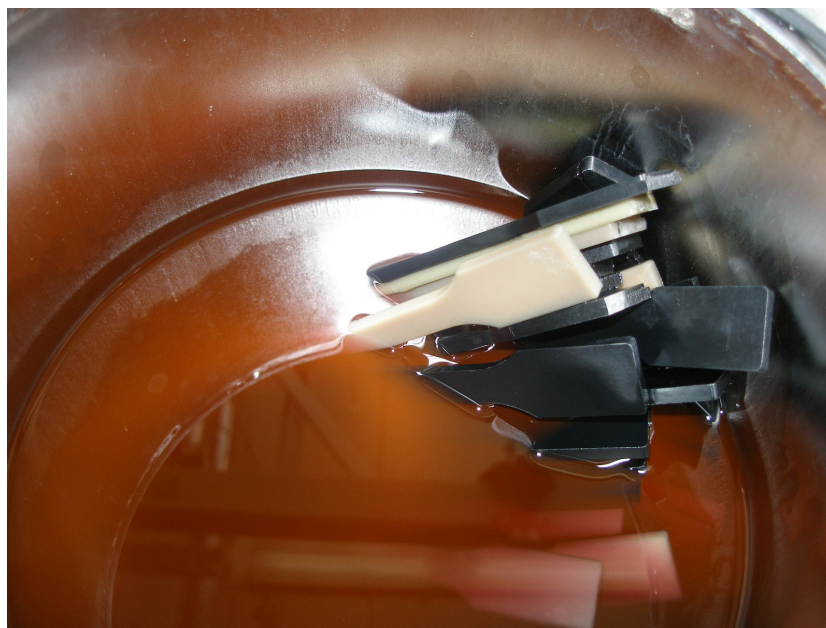
Obr. 39. Naložená tělíska

Druhá část testovacích tělísek byla naložena do testovacích chemikáliích FAM-B a bionafta B30 u kterých probíhalo měření v autoklávech ve firmě Robert Bosch s.r.o.

Tab. 20. Teploty prostředí při naložení zkušebních tělísek

<i>Médium</i>	<i>Teplota prostředí (°C)</i>
<i>FAM-B</i>	70
<i>Biodiesel B30</i>	100

Doba naložení tělísek: **96 hod.**



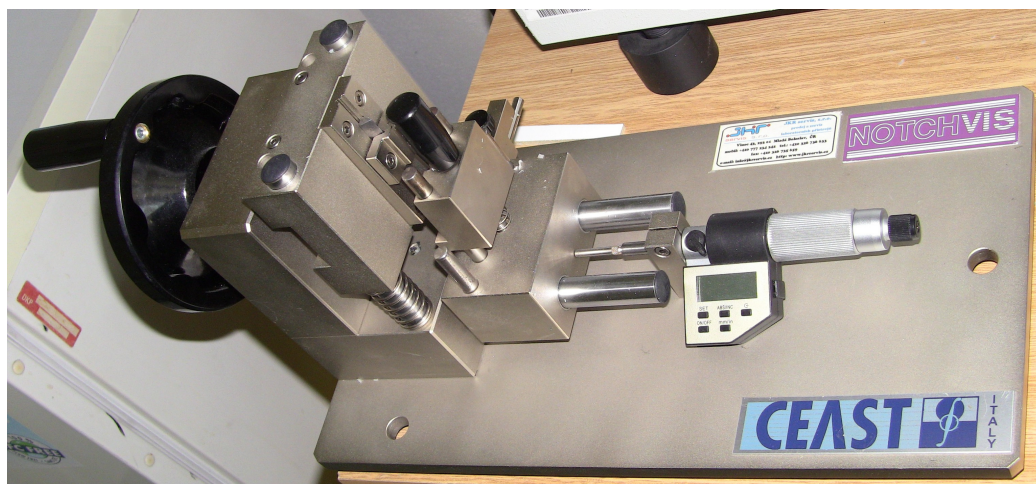
Obr. 40. Naložené tělíška v autoklávech

15 VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST

Dynamická zkouška vrubové houževnatosti (KC) proběhla dle normy ČSN EN ISO 179-2. Měření bylo provedeno ve školních laboratořích za pokojové teploty 23°C

15.1 Přístroje použité k měření

Pomocí vrubovacího přístroje Notchvis byly na zkušebních tělíscích vytvořeny vruby typu A.



Obr. 41. Vrubovací přístroj Notchvis

Pro měření vrubové houževnatosti byl použit přístroj typu Charpyho kladivo Resil Impactor Junior.

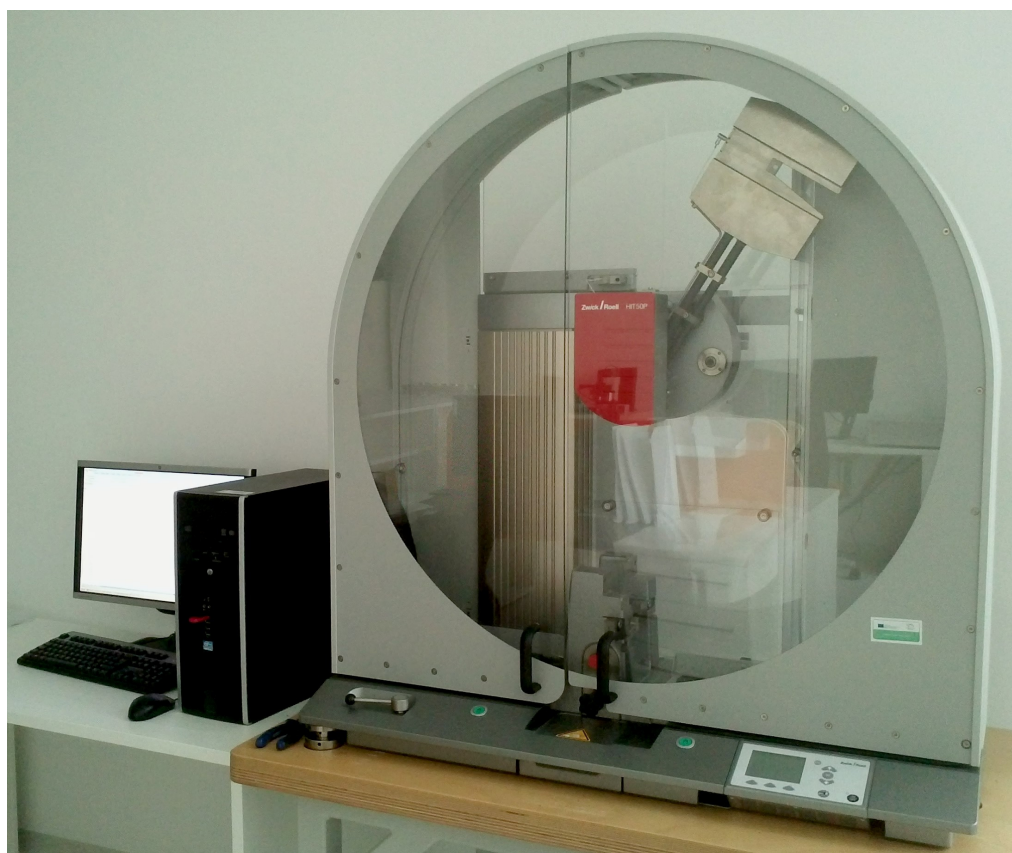


Obr. 42. Resil Impactor Junior.

Tab. 21. Technická data stroje Resil Impactor Junior.

Resil Impactor Junior	
Rázová energie	15J
Rozměry	900x500x800mm
Výkon	50W
Hmotnost	180kg
Úhel zpuštění ramene	40°

Z důvodu nedostatečného měřicího rozsahu stroje Resil Impactor Junior musel být u materiálu POLYAMID 66 45%GF V-PVS-CREAMID použit stroj Zwick Roell HIT50P.



Obr. 43. Zwick Roell HIT50P

Tab. 22. Technická data Zwick Roell HIT50P

Zwick Roell HIT50P	
Rázová energie	50J
Úhel zpuštění ramene	147,5°
Nárazová rychlost	2,2-3,8m/s
Rozměry	1170x1180x500mm
Hmotnost	475kg

16 MĚŘENÍ VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI

Tab. 23. Podmínky měření vrubové houževnatosti

Parametr	Jednotka	Hodnota
Technologická norma	-	ISO 179-2/1 e A
Způsob zkoušky	-	Ráz na tenkou stěnu
Rozměry tělíska	mm	4(b)x10(h)x80(l)
Typ vrubu	-	A
Hloubka vrubu	mm	2
Teplota při měření	°C	21-23°C
Čas po vyjmutí z kapaliny	Hod.	22-24

16.1 POLYAMID 6 GF30

Tab. 24. Vrubová houževnatost PA 6 GF30 v referenčním prostředí

PA 6 GF30	KC [kJ/m ²]			
	n	\bar{x}	s	Medián
Nezesít'ovaný	5	13,454	1,967	12,400
Zesít'ovaný 33kGy	5	24,552	0,973	24,350
Zesít'ovaný 99kGy	5	24,940	1,992	26,140
Zesít'ovaný 198kGy	5	24,304	0,822	23,890

Tab. 25. Vrubová houževnatost PA 6 GF30 v kapalině do ostříkovačů (ethanol)

PA 6 GF30	KC [kJ/m ²]			
	n	\bar{x}	s	Medián
Nezesít'ovaný	5	0	0	0
Zesít'ovaný 33kGy	5	23,222	1,174	23,340
Zesít'ovaný 99kGy	5	23,316	0,645	23,130
Zesít'ovaný 198kGy	5	23,524	1,334	22,350

Tab. 26. Vrubová houževnatost PA 6 GF30 v chladící kapalině (ethylenglykol)

PA 6 GF30	KC [kJ/m ²]			
	n	\bar{x}	s	Medián
Nezesít'ovaný	5	16,167	0,959	16,420
Zesít'ovaný 33kGy	5	23,372	1,245	24,200
Zesít'ovaný 99kGy	5	20,756	2,175	20,330
Zesít'ovaný 198kGy	5	20,232	1,988	20,970

Tab. 27. Vrubová houževnatost PA 6 GF30 v motorovém oleji

PA 6 GF30	KC [kJ/m ²]			
	n	\bar{x}	s	Medián
Nezesít'ovaný	5	15,148	1,684	14,630
Zesít'ovaný 33kGy	5	21,260	0,778	21,570
Zesít'ovaný 99kGy	5	21,450	2,850	22,630
Zesít'ovaný 198kGy	5	21,300	2,230	20,210

Tab. 28. Vrubová houževnatost PA 6 GF30 v brzdové kapalině

PA 6 GF30	KC [kJ/m ²]			
	n	\bar{x}	s	Medián
Nezesít'ovaný	5	14,550	1,343	14,700
Zesít'ovaný 33kGy	5	21,877	1,338	21,950
Zesít'ovaný 99kGy	5	20,274	1,744	20,260
Zesít'ovaný 198kGy	5	20,772	0,554	20,520

Tab. 29. Vrubová houževnatost PA 6 GF30 v B30

PA 6 GF30	KC [kJ/m ²]			
	n	\bar{x}	s	Medián
Nezesít'ovaný	5	15,906	1,370	16,150
Zesít'ovaný 33kGy	5	18,686	0,957	18,290
Zesít'ovaný 99kGy	5	17,914	0,629	17,990
Zesít'ovaný 198kGy	5	17,526	0,872	17,120

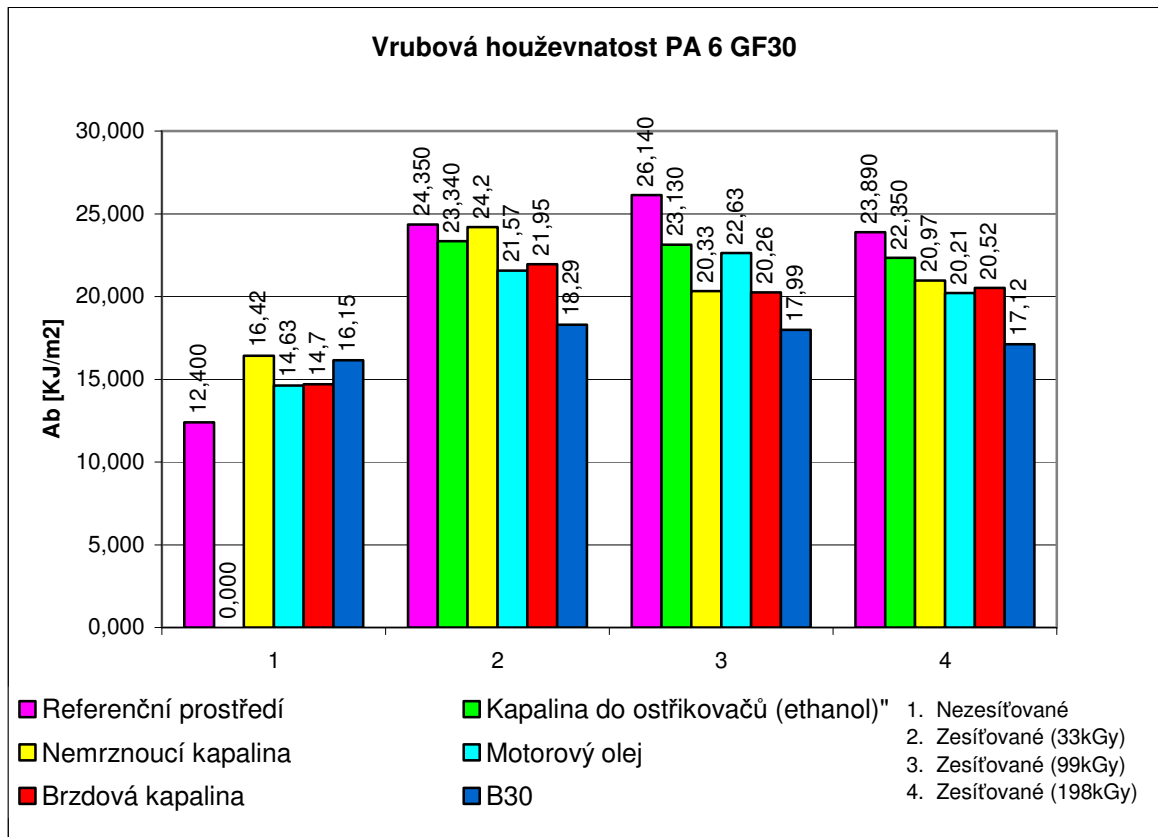
16.1.1 Vyhodnocení vrubové houževnatosti PA 6 GF30

Při měření vrubové houževnatosti **nezesít'ovaných** zkušebních tělísek naložených v referenčním prostředí, byla naměřena hodnota 12,400 kJ/m². U tělísek naložených v kapalině do ostříkovačů (ethanol), došlo z takovému narušení struktury, že hodnota vrubové houževnatost na přístroji nebyla programem vyhodnocena. V prostředí chladicí kapaliny (ethylenglykol) už byla vrubová houževnatost oproti referenčnímu prostředí zvýšena o 32,4%, v prostředí motorového oleje o 18% a v brzdové kapalině o 18,5%. V kapalině B30 byl zaznamenán nárůst 30,2%, což byl po etanolu druhý největší nárůst vrubové houževnatosti ze všech testovaných chemikálií.

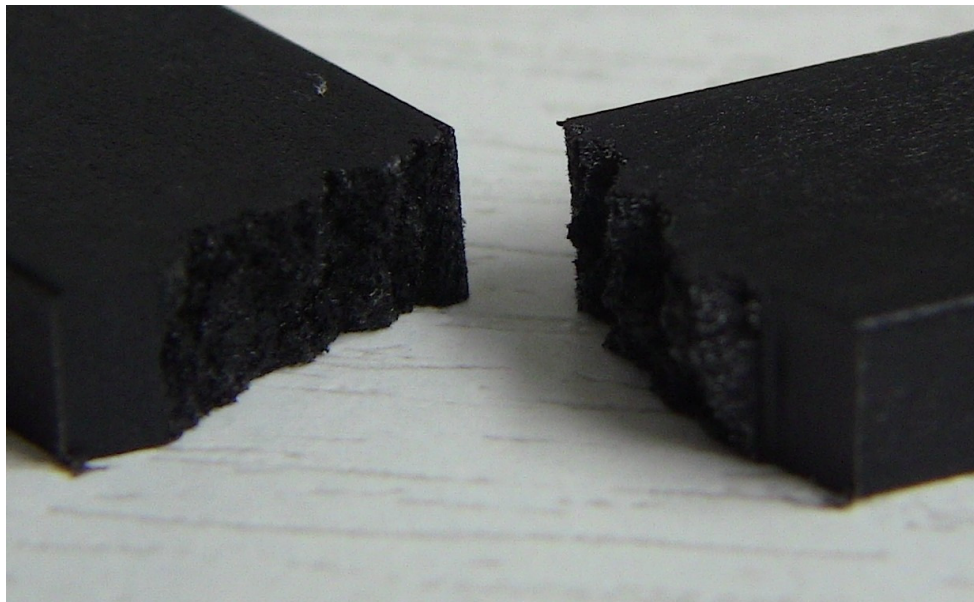
U tělísek zesíťovaný dávkou **33 kGy** v referenčním prostředí se oproti nezesíťovaným tělískům zvedla hodnota houževnatosti o 96,3% na 24,350 kJ/m². Po naložení zesíťovaných tělísek do testovacích chemikálií ovšem hodnota houževnatosti klesala. V kapalině do ostřikovačů (ethanol) klesla oproti referenčnímu prostředí o -4,15%, v chladicí kapalině (ethylenglykol) o -0,6%, v motorovém oleji o -11,4% a v brzdové kapalině o -9,9%. V B30 byl zaznamenán nejvýraznější pokles, a to o -24,9%.

Zesíťování pomocí dávky **99 kGy** způsobilo u PA6 30%GF v referenčním prostředí největší zvýšení vrubové houževnatosti. Oproti tělískům zesíťovaným dávkou 33kGy, byl nárůst o 7,3%, a oproti nezesíťovaným tělískům o 110,8% na 26,140 kJ/m². Největšího poklesu rázové houževnatosti došlo u tělísek naložených v B30 o -25,5%. Dále byl největší pokles zaznamenán u naložení v brzdové kapalině (-22,5%), v chladicí kapalině (ethylenglykol) (-22,2%) a v motorovém oleji (-13,4%). Nejmenší pokles vrubové houževnatosti u tělísek zesíťovaných dávkou 99 kGy, byl zaznamenán u naložení v kapalině do ostřikovačů (ethanol) a to o -11,5% oproti referenčnímu prostředí.

U dávky **198 kGy** již materiál degradoval. Tato dávka už nebyla materiálu prospěšná a jeho vrubová houževnatost v referenčním prostředí se oproti zesíťování dávkou 99 kGy snížila o -8,6% na hodnotu 23,890 kJ/m². U této dávky došlo k největšímu poklesu vrubové houževnatosti opět u naložení v B30 (-28,3%). V motorovém oleji byl pokles o -15,4%, v brzdové kapalině o -14,1%, v chladicí kapalině (ethylenglykol) o -12,2% a nejmenší změna byla zaznamenána u kapaliny do ostřikovačů (ethanol), a to o -6,4%.



Obr. 44. Vrubová houževnatost PA 6 GF30



Obr. 45. Lom zkušební tělíska PA 6 GF30

16.2 POLYAMID 66 GF25

Tab. 30. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v referenčním prostředí

PA 66 GF25	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesít'ovaný	5	8,018	1,017	8,540
Zesít'ovaný 33kGy	5	9,628	0,1184	9,610
Zesít'ovaný 99kGy	5	10,250	0,505	10,220
Zesít'ovaný 198kGy	5	9,782	0,614	9,630

Tab. 31. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v kapalině do ostřikovačů (ethanol)

PA 66 GF25	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesít'ovaný	5	7,868	1,278	7,460
Zesít'ovaný 33kGy	5	12,782	1,765	12,720
Zesít'ovaný 99kGy	5	11,568	0,741	11,830
Zesít'ovaný 198kGy	5	10,494	1,082	10,960

Tab. 32. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v chladící kapalině (ethylenglykol)

PA 66 GF25	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesít'ovaný	5	8,998	1,072	9,300
Zesít'ovaný 33kGy	5	9,074	0,579	9,250
Zesít'ovaný 99kGy	5	8,886	0,565	8,840
Zesít'ovaný 198kGy	5	8,658	0,549	8,610

Tab. 33. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v motorovém oleji

PA 66 GF25	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesít'ovaný	5	8,228	0,960	8,490
Zesít'ovaný 33kGy	5	8,574	0,547	8,590
Zesít'ovaný 99kGy	5	8,808	0,342	8,790
Zesít'ovaný 198kGy	5	8,674	0,825	8,600

Tab. 34. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v brzdové kapalině

PA 66 GF25	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesíťovaný	5	7,722	0,278	7,730
Zesíťovaný 33kGy	5	8,728	0,483	8,580
Zesíťovaný 99kGy	5	8,260	0,396	8,260
Zesíťovaný 198kGy	5	8,580	0,334	8,440

Tab. 35. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v FAM-B

PA 66 GF25	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesíťovaný	5	0	0	0
Zesíťovaný 33kGy	5	19,370	3,360	20,800
Zesíťovaný 99kGy	5	22,390	1,669	23,300
Zesíťovaný 198kGy	5	20,740	1,017	20,820

Tab. 36. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v B30

PA 66 GF25	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesíťovaný	5	8,765	0,415	8,710
Zesíťovaný 33kGy	5	9,107	0,383	9,165
Zesíťovaný 99kGy	5	8,964	0,706	9,260
Zesíťovaný 198kGy	5	8,354	0,341	8,440

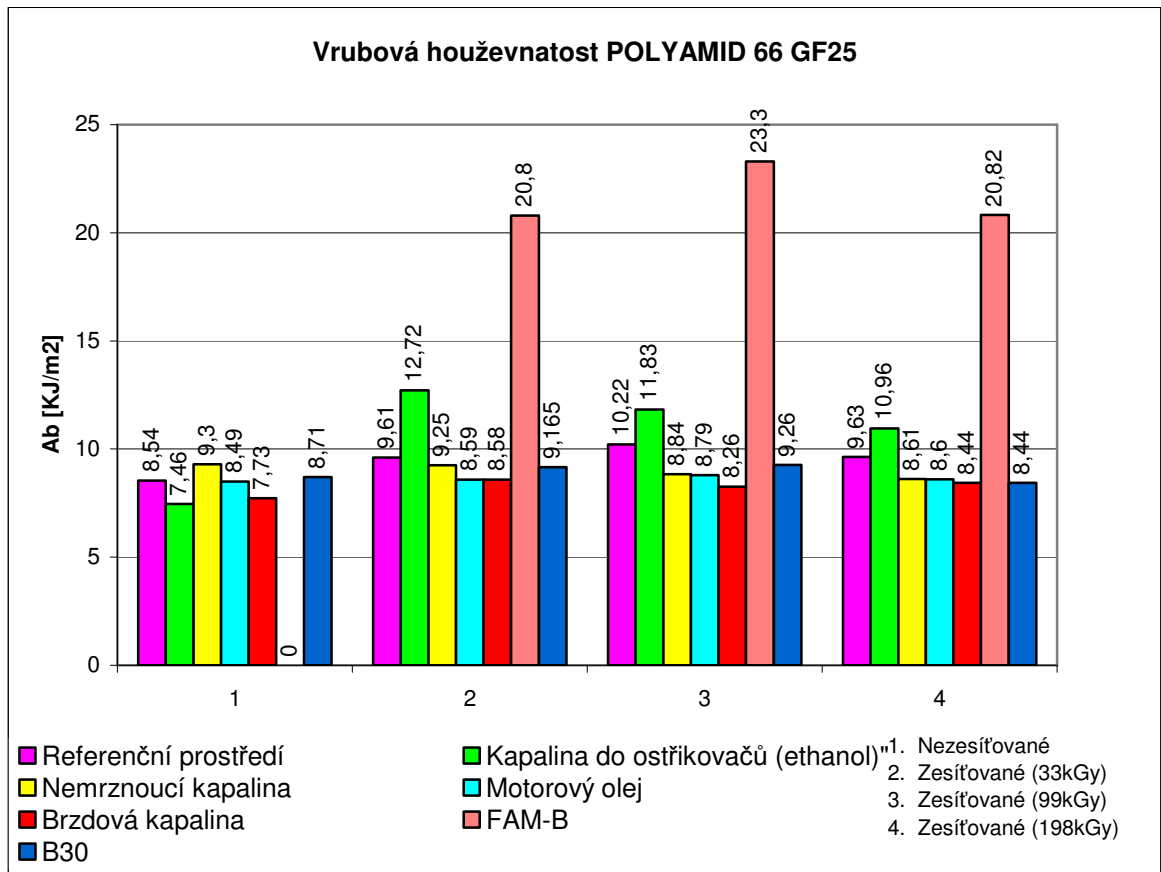
16.2.1 Vyhodnocení vrubové houževnatosti PA 66 GF25

U nezesíťovaných zkušebních tělísek v referenčním prostředí byla naměřena hodnota vrubové houževnatosti 8,540 kJ/m². Pokles houževnatosti byl zaznamenán v kapalině do ostřikovačů (ethanol) o -12,6%, u brzdové kapaliny o -9,5% a v motorovém oleji o -0,6%. Naopak zvýšení vrubové houževnatosti bylo nejvýše naměřeno u chladicí kapaliny (ethylenglykol) o 8,9%. Naložení v B30 zvýšilo houževnatost pouze o 2%. U tělísek naložených v FAM-B došlo z narušení struktury a hodnota vrubové houževnatost na přístroji nebyla programem vyhodnocena.

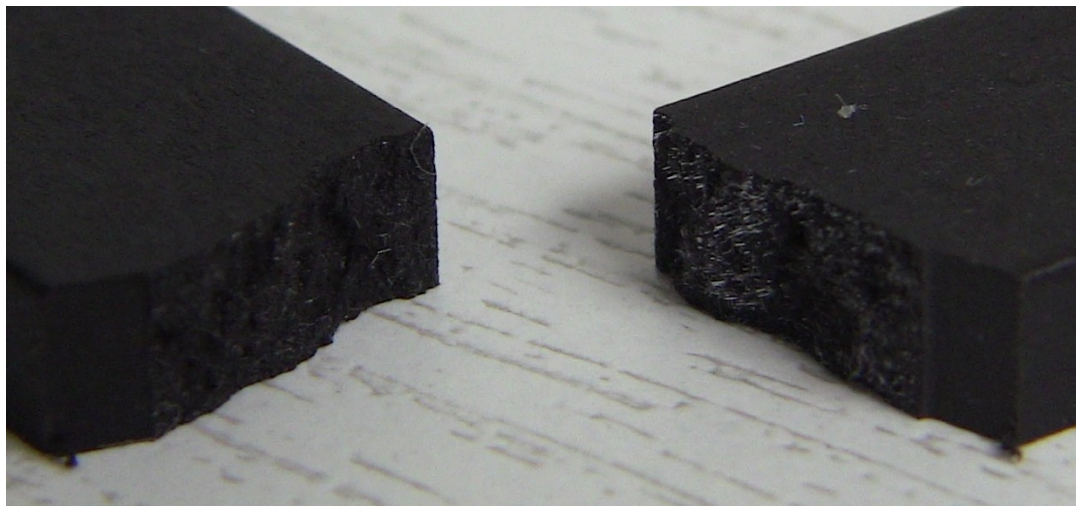
U dávky **33 kGy** došlo k navýšení vrubové houževnatosti v referenčním prostředí na 9,610 kJ/m², což je navýšení o 12,5% oproti nezesíťovaným tělískům. Nejrazantnější navýšení hodnoty vrubové houževnatosti bylo naměřeno u tělísek naložených do FAM-B, které se dostaly na hodnotu vyšší o 116,4% oproti referenčnímu prostředí, a proti nezesíťovaným dokonce nárůst o 143,6%. Ostatní chemikálie již měly na houževnatost mírnější dopad. Naložení v kapalině do ostříkovačů (ethanol) ještě zvýšilo houževnatost o 32,4%, ale další chemikálie už houževnatost snižovaly. V brzdové kapalině bylo snížení proti referenčnímu prostředí o -10,7%, v motorovém oleji o -10,6%, v B30 o -4,6% a v chladicí kapalině (ethylenglykol) o -3,8%.

V referenčním prostředí byla největší naměřená vrubová houževnatost u tělísek zesíťovaných dávkou **99 kGy**. Zde bylo zvýšení o 19,7% oproti materiálu nezesíťovanému a to na hodnotu 10,220 kJ/m². Zde bylo také zvýšení o 6,4% proti zesíťovaným 33 kGy. K nejvyššímu nárůstu houževnatosti došlo u naložení ve FAM-B a to o 128% oproti materiálu v referenčním prostředí. K zvýšení vrubové houževnatosti došlo pouze při naložení v kapalině do ostříkovačů (ethanol) o 15,8%. Dále docházelo ke snižování vrubové houževnatosti. U brzdové kapaliny o -19,2%, u motorového oleje o -14%, u chladicí kapaliny (ethylenglykol) o -13,5% a u B30 o -9,4%.

U tělísek zesíťovaných dávkou **198 kGy**, už ke zvýšení houževnatosti nedošlo. Proti nezesíťovanému materiálu se houževnatost zvýšila o 12,8% na 9,630 kJ/m², ovšem proti materiálu zesíťovanému 33 kGy se houževnatost snížila o 5,8%. Nejvíce se houževnatost zvýšila opět u FAM-B a to o 116,2%, poté u kapaliny do ostříkovačů (ethanol) o 13,8%. U dalších chemikálií docházelo ke snížení vrubové houževnatosti. V brzdové kapalině a v B30 bylo shodné snížení o -12,4%, v motorovém oleji o -10,7% a v chladicí kapalině (ethylenglykol) o -10,6%.



Obr. 46. Vrubová houževnatost PA 66 GF25



Obr. 47. Lom zkušebního tělíska PA 66 GF25

16.3 POLYAMID 66 GF45

Měření vrubové houževnatosti u tohoto materiálu proběhlo z důvodu nedostačujícího měřicího rozpětí na testovacím stroji Zwick Roell HIT50P.

Tab. 37. Vrubová houževnatost PA 66 GF45 v referenčním prostředí

PA 66 GF45	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesít'ovaný	5	13,313	1,603	13,125
Zesít'ovaný 33kGy	5	16,937	0,342	16,875
Zesít'ovaný 99kGy	5	17,188	0,221	17,188
Zesít'ovaný 198kGy	5	16,500	0,559	16,875

Tab. 38. Vrubová houževnatost PA 66 GF45 v kapalině do ostříkovačů (ethanol)

PA 66 GF45	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesít'ovaný	5	18,118	0,992	18,438
Zesít'ovaný 33kGy	5	17,438	0,713	17,188
Zesít'ovaný 99kGy	5	17,250	0,513	17,500
Zesít'ovaný 198kGy	5	16,563	0,856	16,563

Tab. 39. Vrubová houževnatost PA 66 GF45 v chladící kapalině (ethylenglykol)

PA 66 GF45	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesít'ovaný	5	12,813	0,442	12,813
Zesít'ovaný 33kGy	5	13,250	0,280	13,438
Zesít'ovaný 99kGy	5	13,875	0,356	13,750
Zesít'ovaný 198kGy	5	14,250	0,356	14,375

Tab. 40. Vrubová houževnatost PA 66 GF45 v motorovém oleji

PA 66 GF45	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesít'ovaný	5	13,063	0,651	12,344
Zesít'ovaný 33kGy	5	13,594	0,541	13,750
Zesít'ovaný 99kGy	5	13,875	0,356	13,750
Zesít'ovaný 198kGy	5	14,250	0,523	14,375

Tab. 41. Vrubová houževnatost PA 66 GF45 v brzdové kapalině

PA 66 GF45	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesít'ovaný	5	12,188	0,255	12,188
Zesít'ovaný 33kGy	5	13,063	0,342	13,125
Zesít'ovaný 99kGy	5	13,813	0,809	13,750
Zesít'ovaný 198kGy	5	13,938	0,171	14,063

Tab. 42. Vrubová houževnatost PA 66 GF45 v B30

PA 66 GF45	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesít'ovaný	5	12,891	0,644	12,696
Zesít'ovaný 33kGy	5	13,625	0,609	13,438
Zesít'ovaný 99kGy	5	13,563	0,474	13,438
Zesít'ovaný 198kGy	5	13,750	0,221	13,750

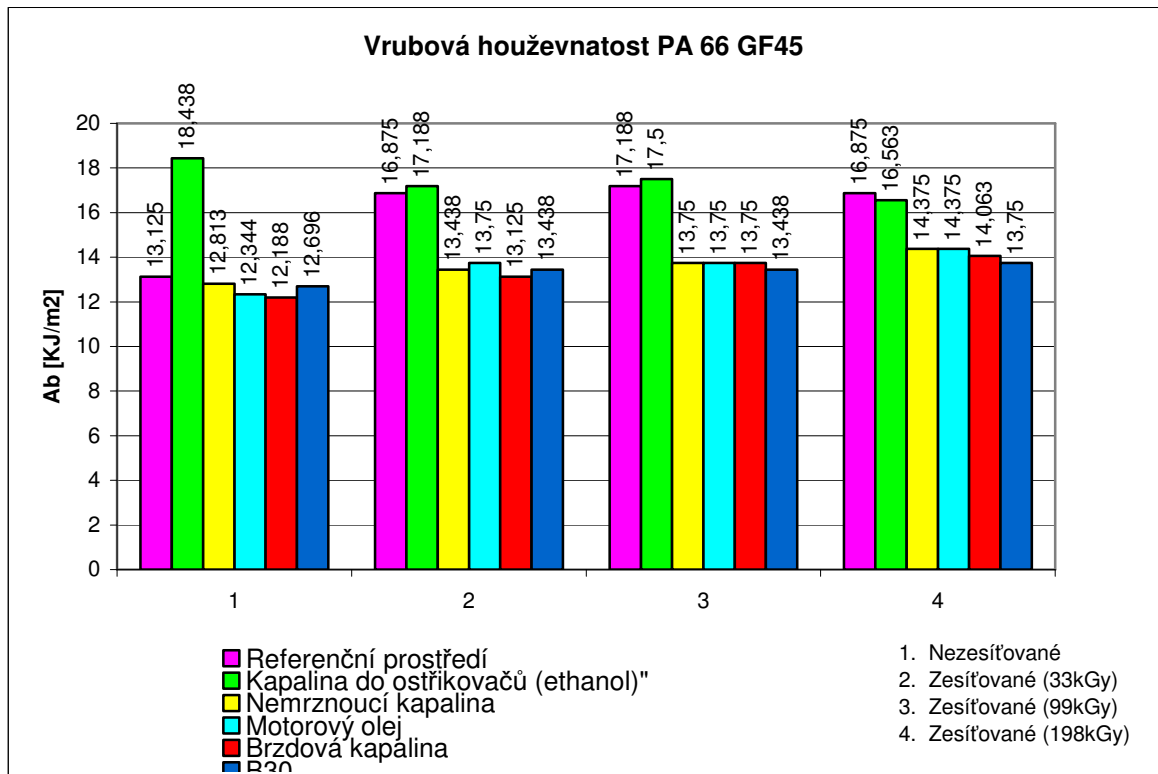
16.3.1 Vyhodnocení vrubové houževnatosti PA 66 GF45

Při hodnocení vrubové houževnatosti **nezesít'ovaných** zkušebních tělísek v referenčním prostředí, byla naměřena hodnota 13,125 kJ/m². V prostředí kapaliny do ostřikovačů (ethanol) byla vrubová houževnatost oproti referenčnímu prostředí zvýšena o 40,5%, naopak u ostatních chemikálií došlo ke snížení houževnatosti. Nejvíce v brzdové kapalině o -7,1%, dále v prostředí motorového oleje o -6%, v B30 o -3,3% a nejmenší snížení bylo zaznamenáno v chladící kapalině (ethylenglykol), a to o -2,4%.

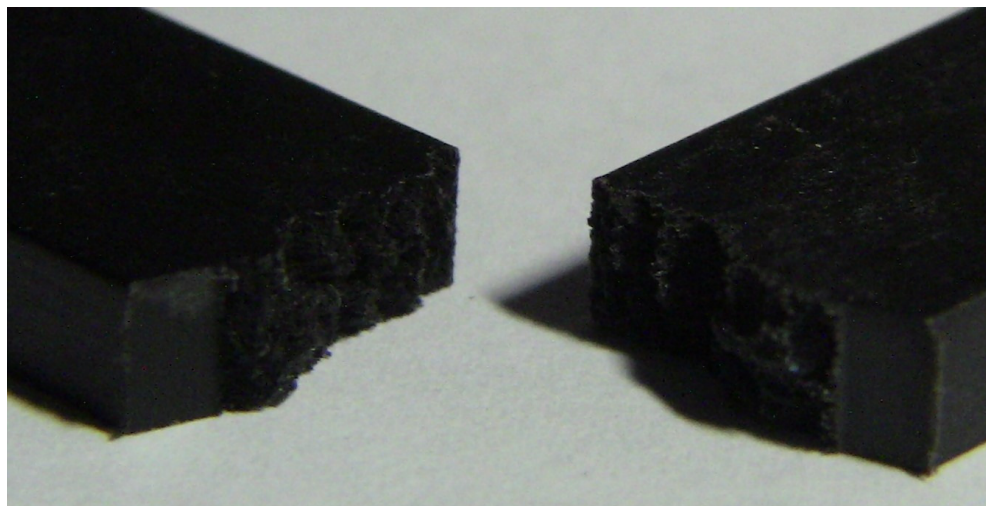
U zkušebních tělísek zesíťovaných dávkou **33 kGy** se oproti nezesíťovaným tělískům v referenčním prostředí zvýšila hodnota houževnatosti o 28,6% na 16,875 kJ/m². Po naložení zesíťovaných tělísek v kapalině do ostříkovačů (ethanol) se houževnatost stejně jako u nezesíťovaných zvýšila, konkrétně o 1,9%. U ostatních chemikálií ovšem hodnota houževnatosti klesala. Nejvíce v brzdové kapalině o -22,2%, dále shodně v chladicí kapalině (ethylenglykol) a v B30 o -20,4% a nejmenší pokles byl naměřen v motorovém oleji o -18,5%

Zesíťování pomocí dávky **99 kGy** způsobilo u PA66 GF25 v referenčním prostředí největší zvýšení vrubové houževnatosti. Oproti tělískům zesíťovaným dávkou 33kGy byl nárůst o 1,9% a oproti nezesíťovaným tělískům o 31% na 17,188 kJ/m². Největšího poklesu vrubové houževnatosti došlo u tělísek naložených v B30 o -21,8%. Dále byl pokles zaznamenán u naložení v brzdové kapalině, v chladicí kapalině (ethylenglykol) a motorovém oleji, kde došlo ke shodnému snížení u těchto tří chemikálií o -20% . U naložení v kapalině do ostříkovačů (ethanol) jako u jediné, došlo ke zvýšení houževnatosti a to o 1,8%

U dávky **198 kGy** již houževnatost klesla na úroveň dávky 33 kGy, která byla 16,875 kJ/m². Vrubová houževnatost při naložení ve všech chemických prostředích u dávky 198 kGy klesla. Největšího poklesu o -18,5% dosáhly tělíska naložené v B30. Dále o -16,7% v brzdové kapalině, o -14,8% v chladicí kapalině (ethylenglykol) a motorovém oleji. Nejmenší pokles byl naměřen u kapaliny do ostříkovačů (ethanol), kde byla hodnota oproti tělískům v referenčnímu prostředí nižší o -1,9%.



Obr. 48. Vrubová houževnatost PA 66 GF45



Obr. 49. Lom zkušebního tělíska PA 66 GF45

16.4 POLYAMID 6

Tab. 43. Vrubová houževnatost PA6 v referenčním prostředí

PA 6	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesíťovaný	5	7,864	0,806	7,910
Zesíťovaný 33kGy	5	11,044	1,035	11,370
Zesíťovaný 99kGy	5	13,868	1,651	13,560
Zesíťovaný 198kGy	5	14,976	1,501	15,180

Tab. 44. Vrubová houževnatost PA6 v B30

PA 6	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesíťovaný	5	16,610	2,420	16,420
Zesíťovaný 33kGy	5	14,810	2,520	16,280
Zesíťovaný 99kGy	5	15,864	1,297	15,220
Zesíťovaný 198kGy	5	15,070	2,620	14,750

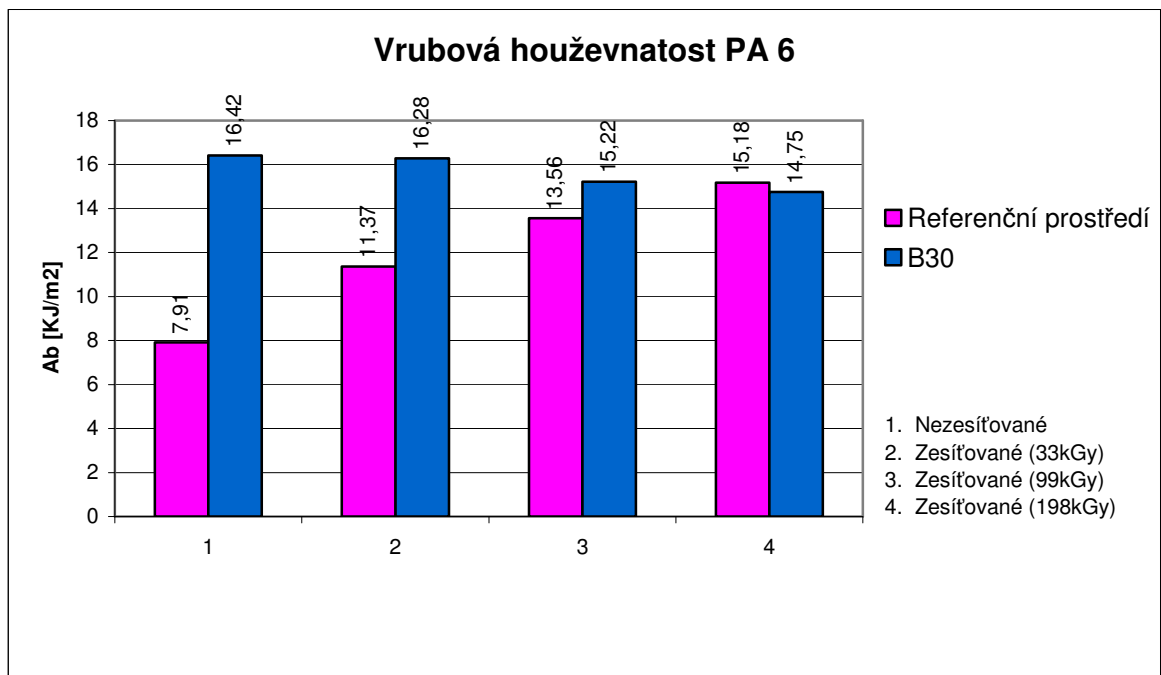
16.4.1 Vyhodnocení vrubové houževnatosti PA 6

U **nezesíťovaného** PA6 byla naměřena vrubová houževnatost 7,910 kJ/m². Po naložení do B30 se jeho houževnatost zvedla o 107,6%.

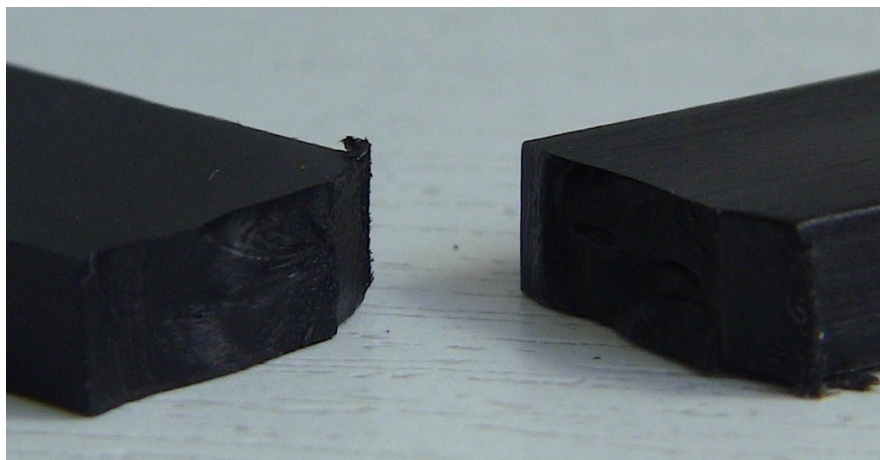
Při zasíťování dávkou **33 kGy** stoupla vrubová houževnatost o 43,7% oproti nezesíťovaným na hodnotu 11,370 kJ/m². U tělísek naložených v B30 se hodnota houževnatosti zvýšila o 43,2%.

Dávka **99 kGy** u PA6 způsobila nárůst vrubové houževnatosti na 13,560 kJ/m², což je oproti nezesíťovaným zkušebním tělískům nárůst o 71,4%. U naložení v B30 se opět zvýšila houževnatost, ovšem už ne tak razantně a to o 12,2%.

U zkušebních tělísek zesíťovaných **198 kGy** došlo k největšímu nárůstu vrubové houževnatosti. Hodnota vrubové houževnatosti se zvýšila na 15,180 kJ/m². Jedná se o zvýšení o 91,9% oproti nezesíťovanému materiálu. U dávky 198 kGy jako u jediné, došlo při naložení v B30 ke snížení houževnatosti a to o -2,8%.



Obr. 50. Vrubová houževnatost PA 6



Obr. 51. Lom zkušebního tělíska PA 6

16.5 POLYBUTYLENTEREFTALAT

Tab. 45. Vrubová houževnatost PBT v referenčním prostředí

PBT	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesít'ovaný	5	5,906	0,580	5,820
Zesít'ovaný 33kGy	5	6,542	0,256	6,480
Zesít'ovaný 99kGy	5	6,566	0,327	6,410
Zesít'ovaný 198kGy	5	6,892	0,458	6,810

Tab. 46. Vrubová houževnatost PBT v FAM-B

PBT	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesít'ovaný	5	4,974	0,381	4,850
Zesít'ovaný 33kGy	5	5,572	0,923	5,660
Zesít'ovaný 99kGy	5	6,422	0,171	6,340
Zesít'ovaný 198kGy	5	6,720	0,595	6,640

Tab. 47. Vrubová houževnatost PBT v B30

PBT	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>s</i>	Medián
Nezesít'ovaný	5	4,742	0,2166	4,800
Zesít'ovaný 33kGy	5	5,072	0,255	5,180
Zesít'ovaný 99kGy	5	6,006	0,539	6,150
Zesít'ovaný 198kGy	5	6,434	0,435	6,410

16.5.1 Vyhodnocení vrubové houževnatosti PBT

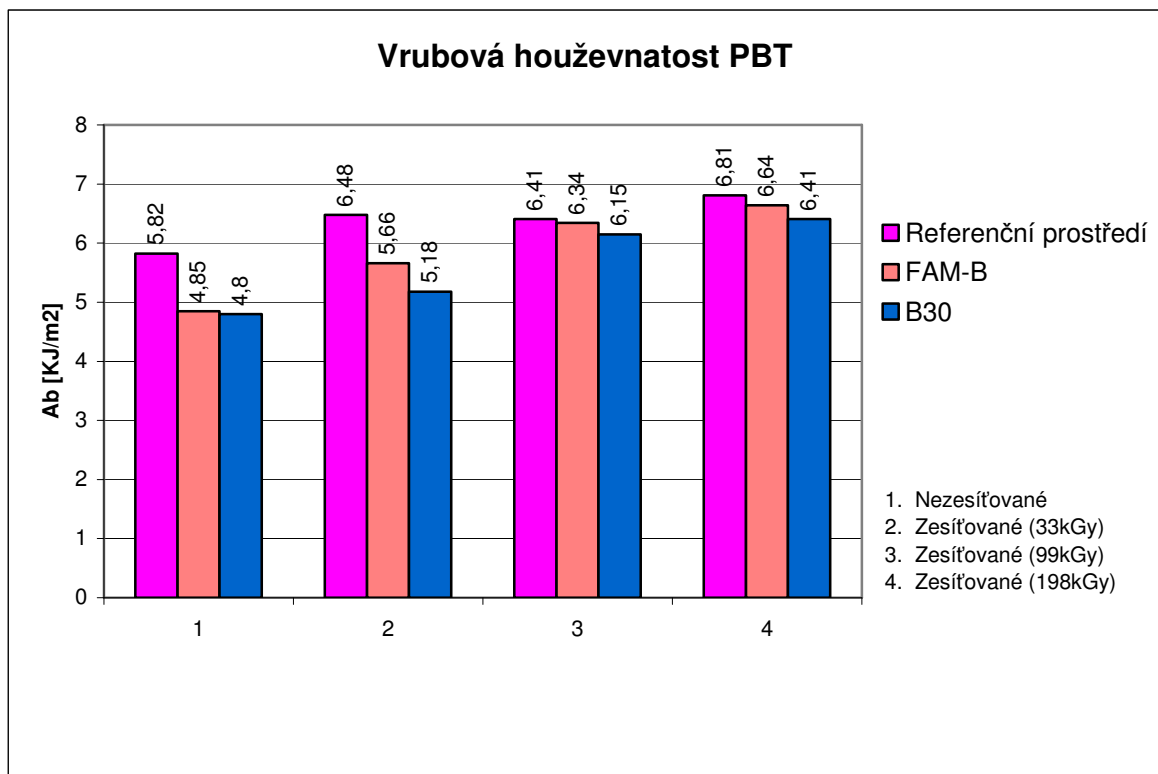
U **nezesít'ovaného** PBT, byla naměřena vrubová houževnatost 5,820 kJ/m². Po naložení do FAM-B se jeho houževnatost snížila o -17,5 % a u tělísek naložených v B30 byl pokles o -16,7%.

Při zasít'ování dávkou **33 kGy** se zvýšila vrubová houževnatost PBT o 11,3% oproti nezesít'ovaným na hodnotu 6,480 kJ/m². U tělísek naložených v B30 se hodnota

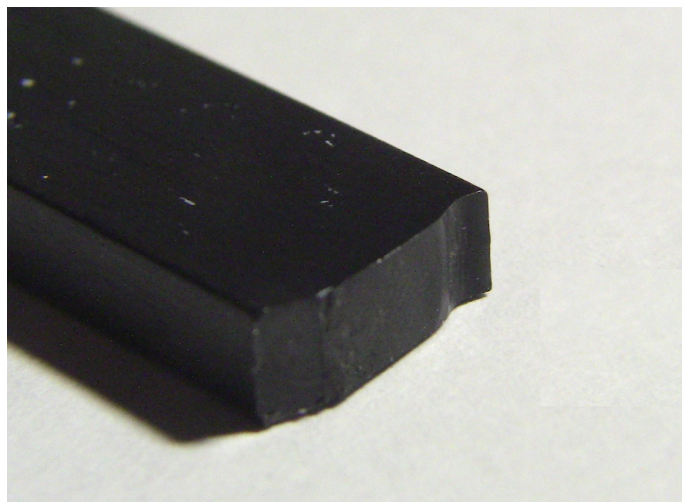
houževnatosti snížila o -20%. U naložení ve FAM-B poklesla vrubová houževnatost o -12,7%.

Dávka **99 kGy** u PBT způsobila zvýšení vrubové houževnatosti na 6,410 kJ/m², což bylo oproti nezesíťovaným zkušebním tělískům nárůst o 10,1%, ale oproti dávce 33 kGy je to pokles o -1,6%. U naložení v B30 se snížila houževnatost o -1,1%, u naložení ve FAM-B byla vrubová houževnatost snížena o -4,1%.

U zkušebních tělísek zesíťovaných dávkou **198 kGy** došlo k největšímu nárůstu vrubové houževnatosti. Hodnota vrubové houževnatosti se zvýšila na 6,810 kJ/m². Jedná se o zvýšení o 17% oproti nezesíťovanému materiálu. K nejrazantnějšímu snížení houževnatosti došlo v B30 a to o -5,9%. Menšího snížení došlo u naložení ve FAM-B (-2,5%).



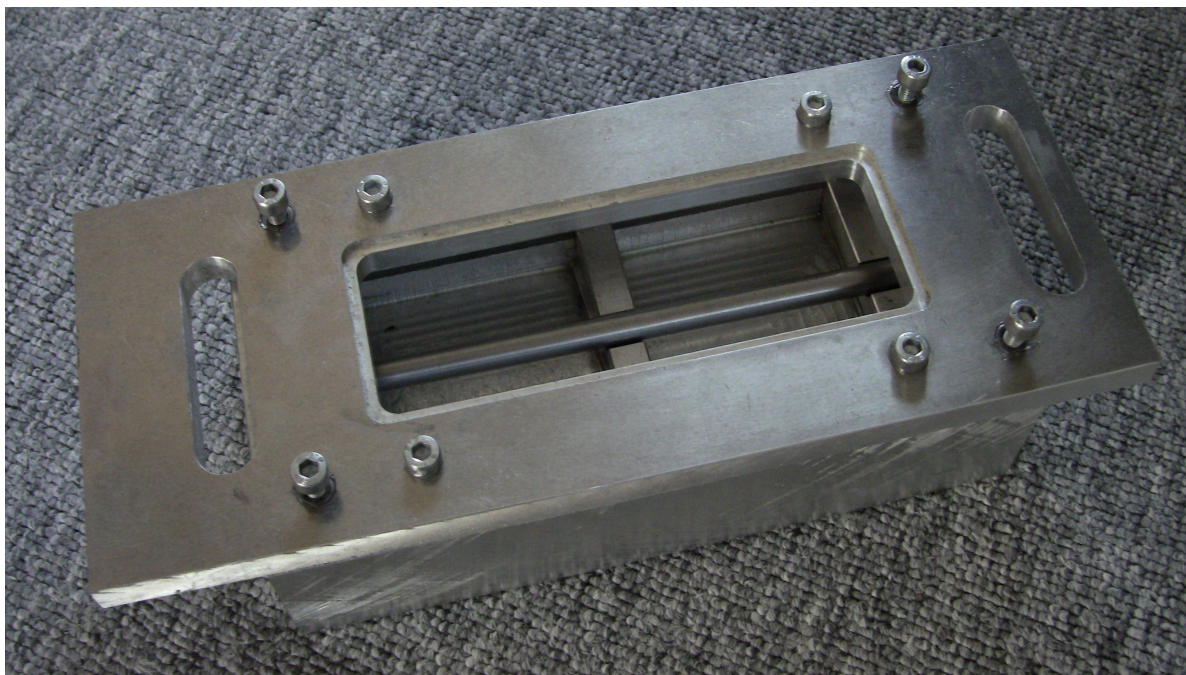
Obr. 52. Vrubová houževnatost PBT



Obr. 53. Lom zkušebního tělíska PBT

17 KOROZE POD NAPĚTÍM

Tato zkouška byla provedena dle normy ISO 22088-3, metoda ohnutého pásku. Měření koroze pod napětím bylo uskutečněno ve školním přípravku. Zkouška probíhala při konstantní deformaci a teplotě 23°C po dobu 168hod. Kontrola zkušebních tělísek probíhala vždy po 24 hodinách. Po ukončení zkoušky byla všechna tělíska podrobena zkoušce zbytkové rázové houževnatosti, která proběhla při pokojové teplotě 23°C.



Obr. 54. Přípravek na zkoušku koroze pod napětím

17.1 POLYAMID 6 GF30

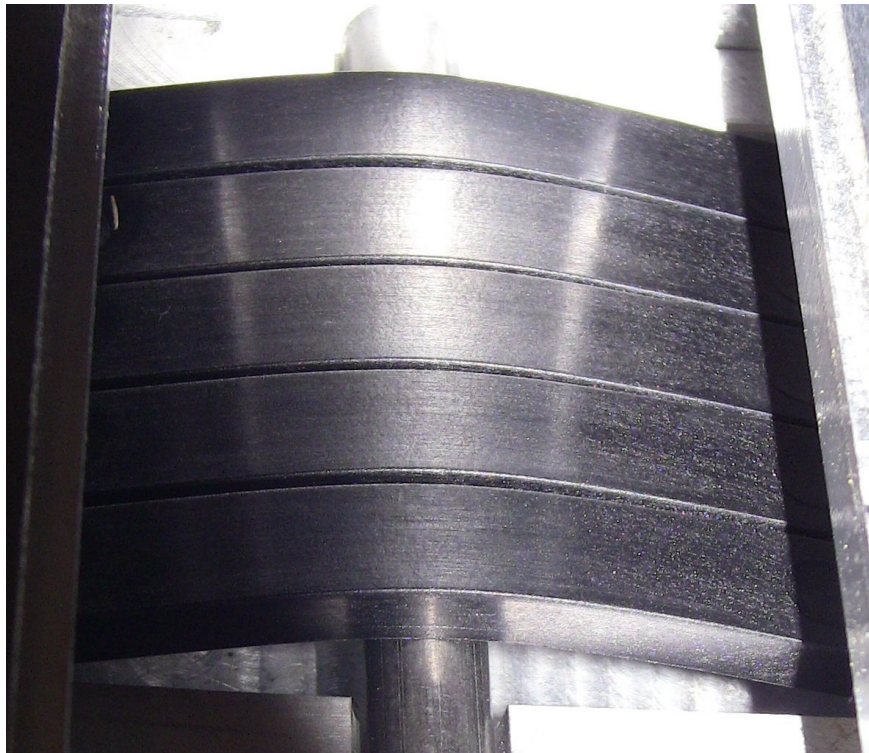
Tab. 48. PA 6 GF30 - Koroze pod napětím v referenčním prostředí

<i>Poloměr ohnutí $r = 74\text{mm}$</i>				
<i>Čas t (hod.)</i>	<i>Popis (referenční prostředí)</i>			
	<i>Nezesíťované</i>	<i>Zesíťované 33 kGy</i>	<i>Zesíťované 99 kGy</i>	<i>Zesíťované 198 kGy</i>
<i>0</i>	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin
<i>24-144</i>	Žádné změny	Žádné změny	Žádné změny	Žádné změny

168	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu
------------	---	---	---	---

Tab. 49. Zbytková vrubová houževnatost PA 6 GF30 v referenčním prostředí

PA 6 GF30	KC [kJ/m ²]			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>S</i>	Medián
<i>Nezesíťovaný</i>	5	16,408	1,744	16,130
<i>Zesíťovaný 33kGy</i>	5	20,634	0,975	20,640
<i>Zesíťovaný 99kGy</i>	5	19,942	2,114	19,740
<i>Zesíťovaný 198kGy</i>	5	19,648	0,920	19,710



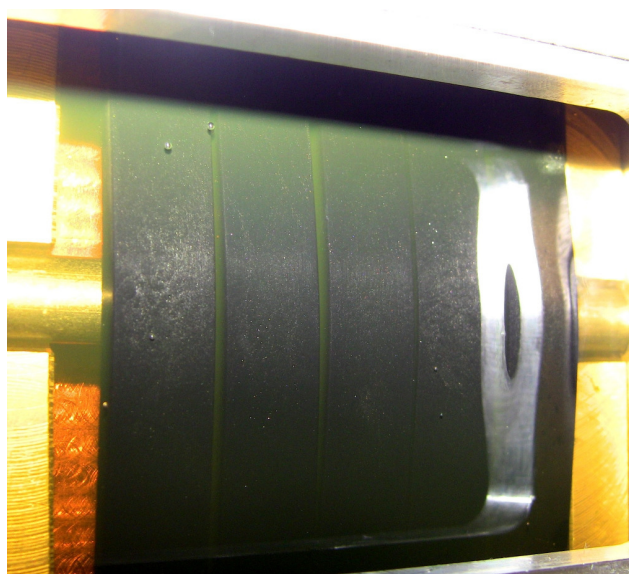
Obr. 55. PA 6 GF30 - Koroze pod napětím v referenčním prostředí

Tab. 50. PA 6 GF30 - Koroze pod napětím v oleji

<i>Poloměr ohnutí $r = 74\text{mm}$</i>				
<i>Čas t (hod.)</i>	<i>Popis (olej)</i>			
	<i>Nezesít'ované</i>	<i>Zesít'ované 33 kGy</i>	<i>Zesít'ované 99 kGy</i>	<i>Zesít'ované 198 kGy</i>
<i>0</i>	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin
<i>24-144</i>	Žádné změny	Žádné změny	Žádné změny	Žádné změny
<i>168</i>	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu

Tab. 51. Zbytková vrubová houževnatost PA 6 GF30 v oleji - měření při 23°C

<i>PA 6 GF30</i>	<i>KC [kJ/m²]</i>			
	<i>n</i>	\bar{x}	<i>S</i>	<i>Medián</i>
<i>Nezesít'ovaný</i>	5	24,030	0,745	24,340
<i>Zesít'ovaný 33kGy</i>	5	25,748	1,040	25,900
<i>Zesít'ovaný 99kGy</i>	5	25,068	2,048	25,720
<i>Zesít'ovaný 198kGy</i>	5	24,500	0,676	24,685



Obr. 56. PA 6 GF30 - Koroze pod napětím v oleji

17.1.1 Vyhodnocení PA 6 GF30

Zkouška koroze při napětí proběhla při pokojové teplotě na zesíťovaných i nezesíťovaných tělískách. Při ponechání tělísek v referenčním prostředí, nebyly během 168 hod. na povrchu zkušebních tělísek pozorovány žádné změny. Při naložení tělísek do prostředí oleje, také po dobu 168 hod., se rovněž na povrchu tělísek neprojevila žádná viditelná změna. Pozorování změn povrchu a prasklin s největší pravděpodobností znemožnila netransparentnost měřeného materiálu. U zbytkové vrubové houževnatosti zkušebních tělísek naložených v motorovém oleji, došlo u všech dávek zesíťování k navýšení vrubové houževnatosti.

17.2 POLYAMID 66 GF25

Tab. 52. PA 66 GF25 - Koroze pod napětím v referenčním prostředí

<i>Poloměr ohnutí $r = 149\text{mm}$</i>				
<i>Čas t (hod.)</i>	<i>Popis (referenční prostředí)</i>			
	<i>Nezesíťované</i>	<i>Zesíťované 33 kGy</i>	<i>Zesíťované 99 kGy</i>	<i>Zesíťované 198 kGy</i>
<i>0</i>	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin
<i>24-144</i>	Žádné změny	Žádné změny	Žádné změny	Žádné změny
<i>168</i>	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu

Tab. 53. Zbytková vrubová houževnatost PA 66 GF25 v referenčním prostředí

<i>PA 66 GF25</i>	<i>KC [kJ/m²]</i>			
	<i>n</i>	<i>\bar{x}</i>	<i>S</i>	<i>Medián</i>
<i>Nezesíťovaný</i>	5	7,664	1,051	7,540
<i>Zesíťovaný 33kGy</i>	5	8,234	0,590	8,190
<i>Zesíťovaný 99kGy</i>	5	8,700	0,620	8,710
<i>Zesíťovaný 198kGy</i>	5	8,798	0,403	8,700



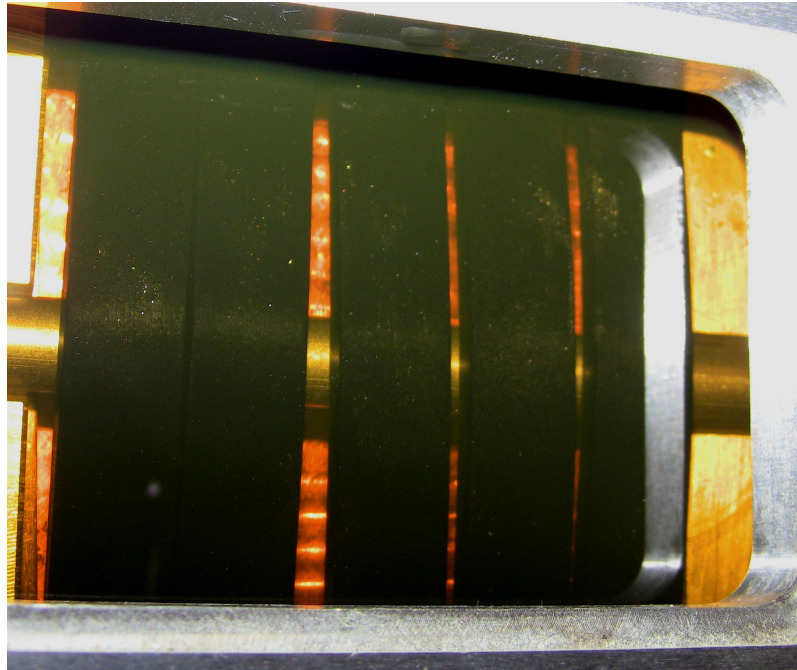
Obr. 57. PA 66 GF25 - Koroze pod napětím v referenčním prostředí

Tab. 54. PA66 25%GF - Koroze pod napětím v oleji

<i>Poloměr ohnutí $r = 149\text{mm}$</i>				
<i>Čas t (hod.)</i>	<i>Popis (olej)</i>			
	<i>Nezesít'ované</i>	<i>Zesít'ované 33 kGy</i>	<i>Zesít'ované 99 kGy</i>	<i>Zesít'ované 198 kGy</i>
<i>0</i>	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin	Kontrola vzorků - bez viditelných vad, prasklin nebo trhlin
<i>24-144</i>	Žádné změny	Žádné změny	Žádné změny	Žádné změny
<i>168</i>	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu	Zkouška ukončena - následná zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu

Tab. 55. Zbytková vrubová houževnatost PA 66 GF25 v oleji - měření při 23°C

<i>PA 66 GF25</i>	<i>KC [kJ/m²]</i>			
	<i>n</i>	<i>\bar{x}</i>	<i>S</i>	<i>Medián</i>
<i>Nezesít'ovaný</i>	5	8,002	0,423	7,900
<i>Zesít'ovaný 33kGy</i>	5	8,214	0,158	8,140
<i>Zesít'ovaný 99kGy</i>	5	8,314	0,445	8,430
<i>Zesít'ovaný 198kGy</i>	5	8,258	0,297	8,340



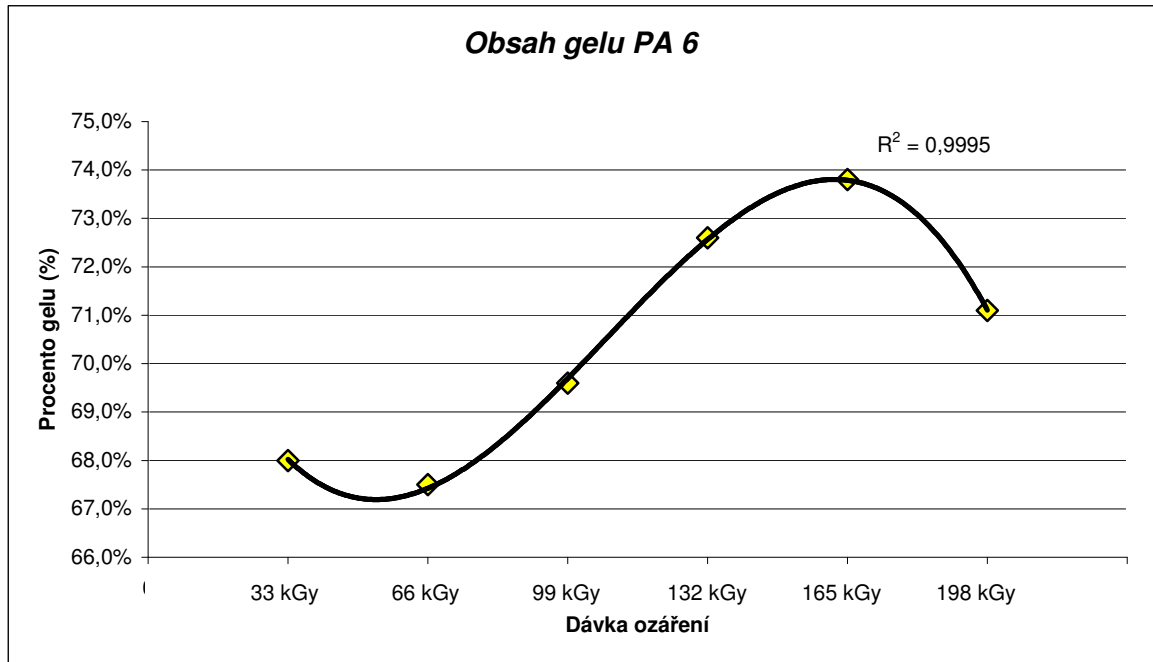
Obr. 58. PA 66 GF25 - Koroze pod napětím v oleji

17.2.1 Vyhodnocení PA 66 GF25

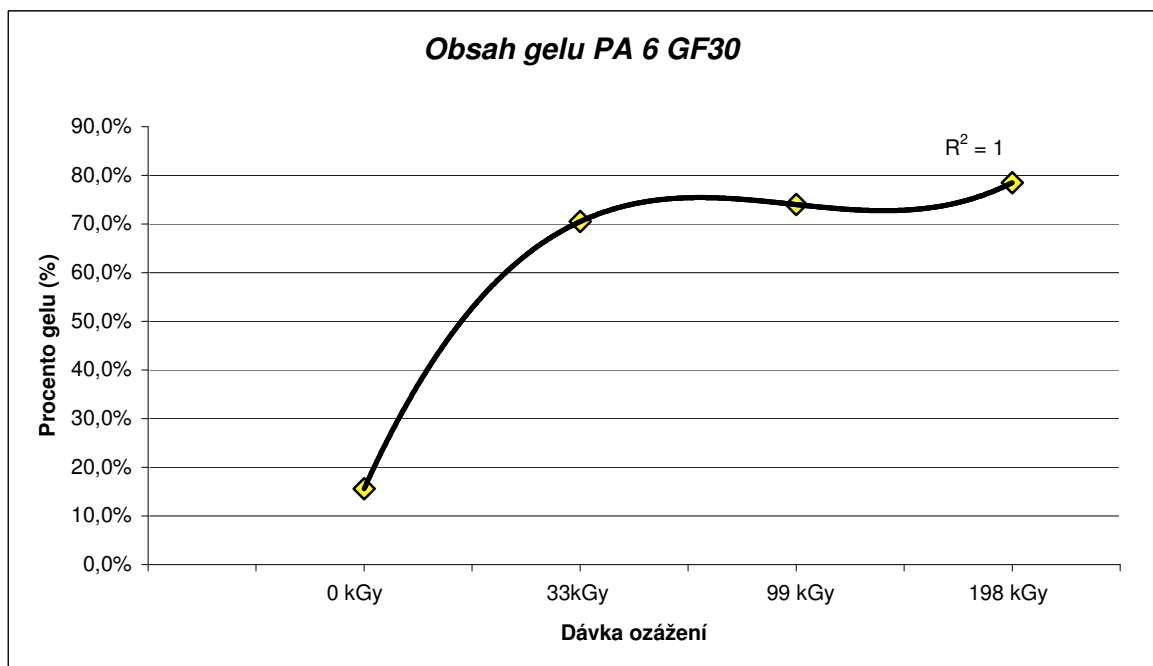
Zkouška koroze pod napětí PA 66 GF25 proběhla při pokojové teplotě 23°C u zesíťovaných i nezesíťovaných tělísek. Při ponechání tělísek v referenčním prostředí, nebyly na povrchu zkušebních tělísek během 168 hod. pozorovány žádné změny. Tělíska naložená do prostředí oleje, také po dobu 168 hod., neprojevily žádné viditelné znaky po korozi. Pozorování změn povrchu a prasklin také znemožnila netransparentnost měřeného materiálu. U nezesíťovaných zkušebních tělísek naložených v motorovém oleji došlo k nárůstu hodnoty zbytkové vrubové houževnatosti. U zesíťovaných zkušebních tělísek naopak došlo ke snížení vrubové houževnatosti.

18 KŘIVKY GELU A TMA VYBRANÝCH MATERIÁLŮ

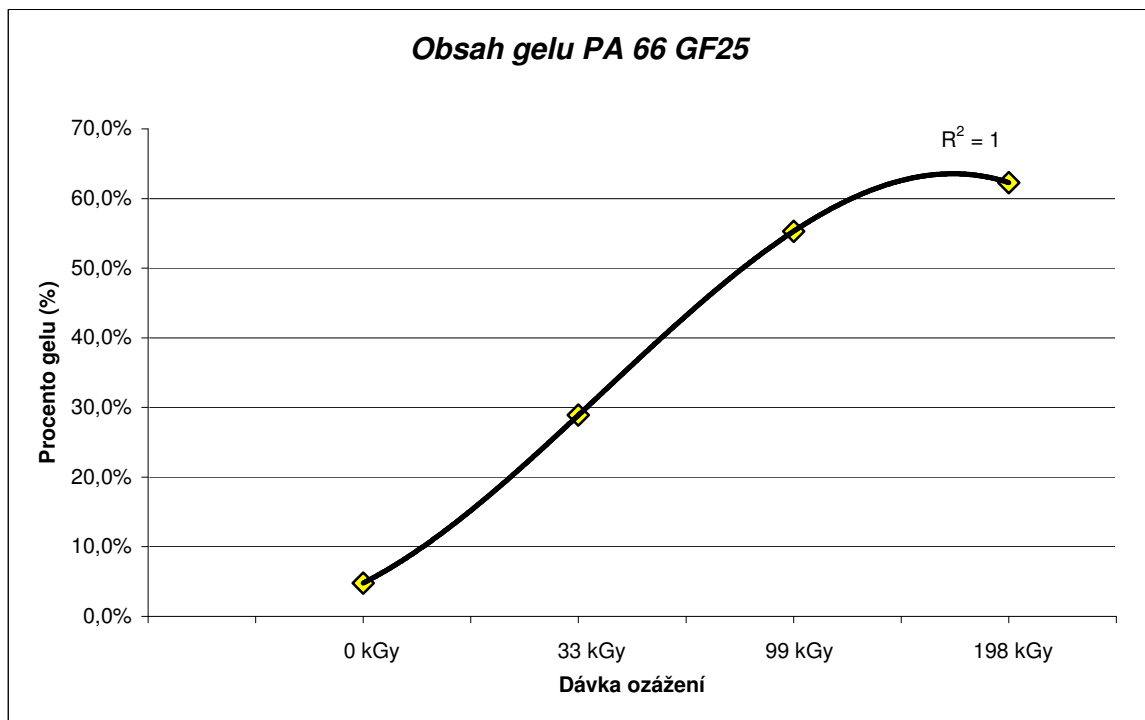
Jako doplňující měření pro nastínění změny struktury testovaných materiálů, byly zvoleny zkoušky měření obsahu gelu a TMA (Thermo Mechanical Analysis). Tyto zkoušky dostatečně charakterizují vliv dávek záření na strukturu materiálu.



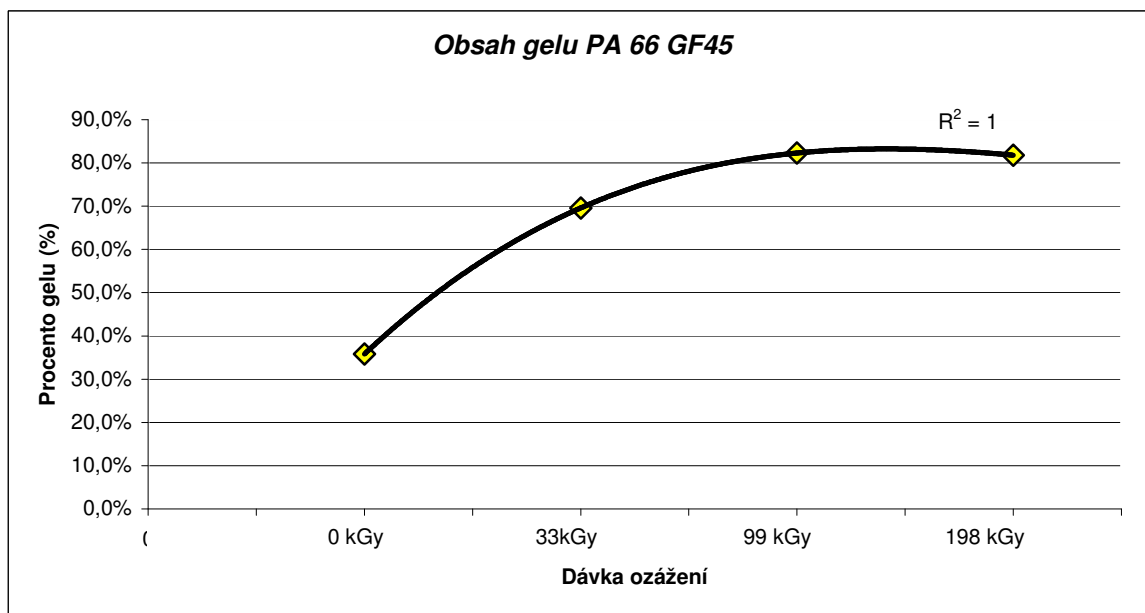
Obr. 59. Obsah gelu PA 6



Obr. 60. Obsah gelu PA 6 GF30



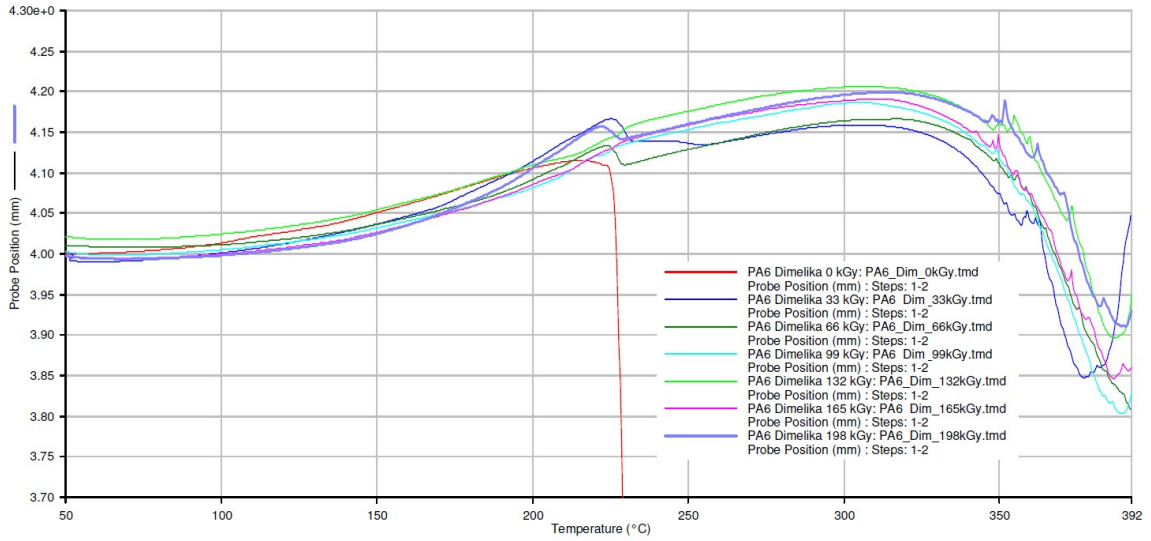
Obr. 61. Obsah gelu PA 66 GF25



Obr. 62. Obsah gelu PA6 GF45

TMA křivky PA 6

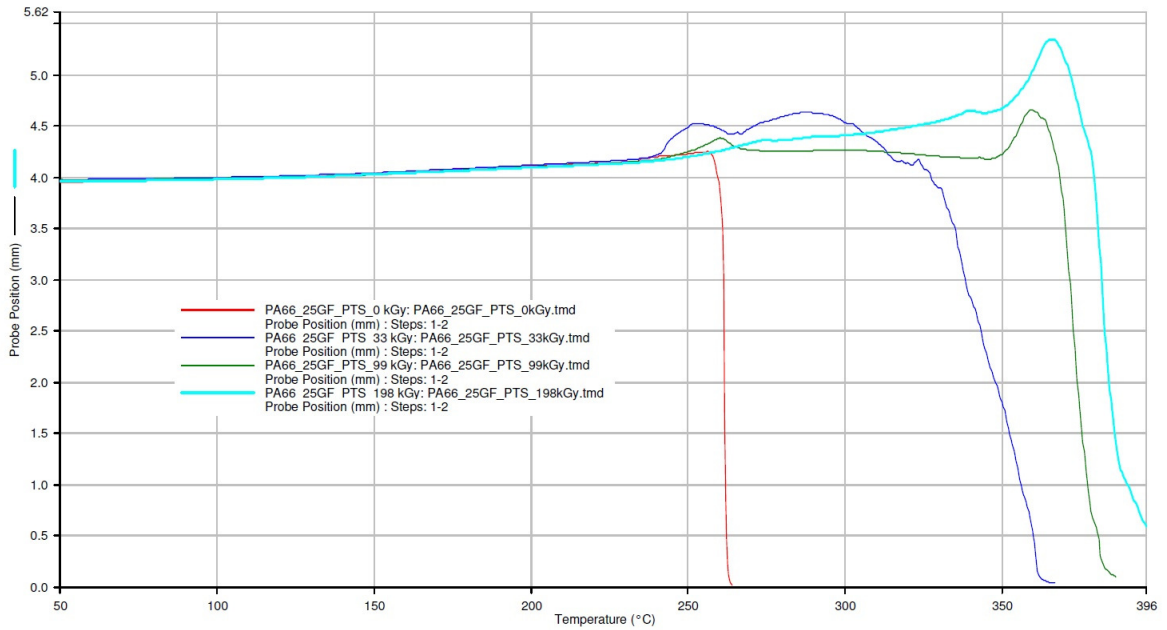
Perkin-Elmer Thermal Analysis



Obr. 63. TMA křivky PA 6

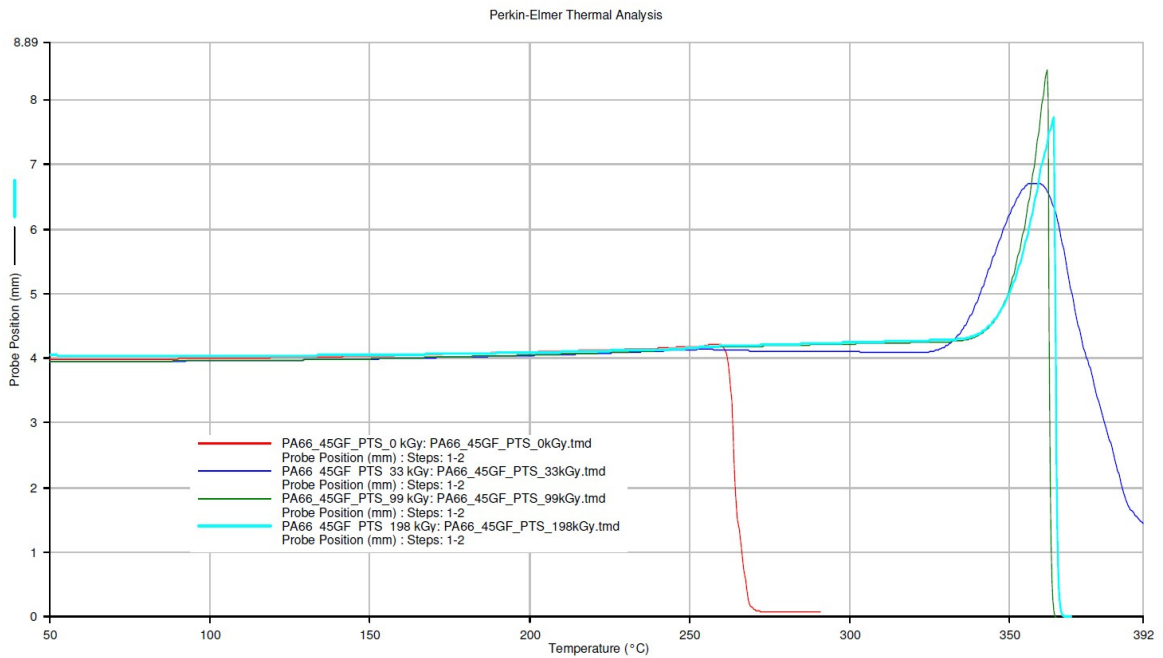
TMA křivky PA 66 GF25

Perkin-Elmer Thermal Analysis



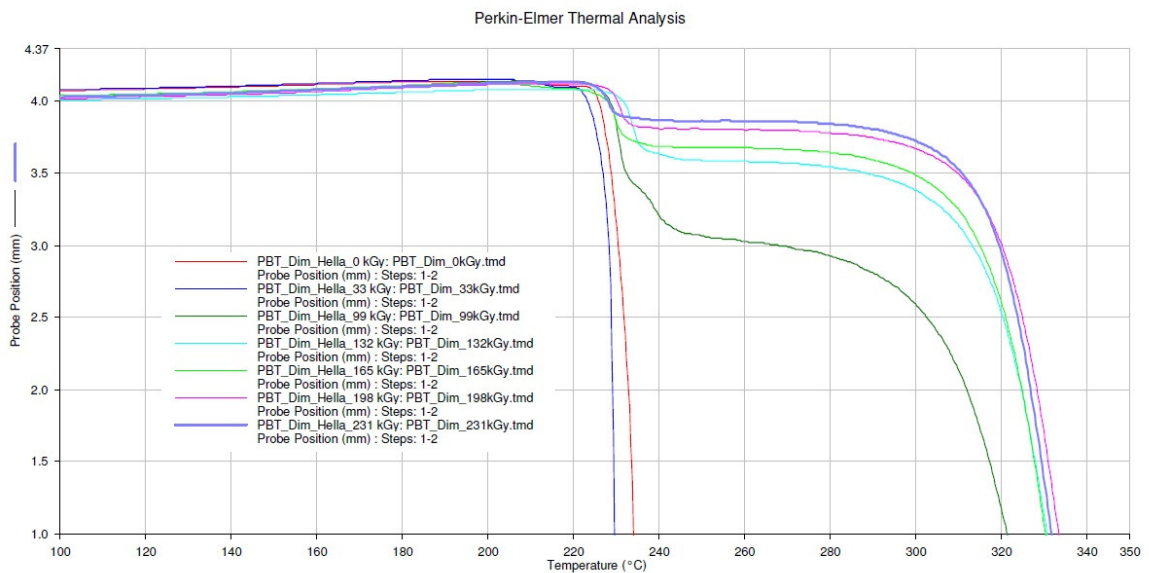
Obr. 64. TMA křivky PA 66 GF25

TMA křivky PA 66 GF45



Obr. 65. TMA křivky PA 66 GF45

TMA křivky PBT



Obr. 66. TMA křivky PBT

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo stanovit vliv různých chemických prostředí na chemickou odolnost radiačně zesíťovaných polymeru a zjistit, jak se tato odolnost mění v závislosti na dávce záření, kterou byly vybrané polymery zesíťovány. Měření proběhlo jak u nezesíťovaných, tak u zesíťovaných polymerů. Jako testované polymery byly zvoleny PA 6, PA 6 GF30, PA 66 GF25, PA 66 GF45 a PBT. Zesíťování těchto materiálů bylo provedeno pomocí ionizačního beta záření dávkami 33, 99 a 198 kGy. Vybrané materiály byly testovány v prostředí zkušebních médií, která se běžně používají v automobilovém průmyslu. Tato zkušební média byla zvolena z důvodu, že v praxi přicházejí polymery s nimi do styku (kapalina do ostříkovačů (ethanol), brzdová kapalina, chladicí kapalina (ethylénglykol) a motorový olej). Další testovací kapaliny, které se používají k laboratornímu výzkumu, jsou klasický směsný biodiesel B30 a speciálně navržená laboratorní chemikálie FAM-B, která je používána k testování palivového ústrojí osobních vozů. V těchto kapalinách byly materiály testovány formou naložení a následné mechanické nebo optické zkoušky.

U všech polymerních materiálů byla provedena zkouška botnání. Podle normy ISO 16750-5 bylo provedeno chemické zatížení, a dle normy ISO 179-2 byla změřena vrubová houževnatost pomocí Charpyho kladiva. U vybraných materiálů byla provedena zkouška koroze pod napětím v motorovém oleji.

Při zkoušce botnání, se ve většině případů potvrdil předpoklad vlivu ionizačního záření na polymery tím, že nezesíťované materiály dosáhly většího procenta botnání než materiály zesíťované. Některé materiály se ovšem projeví nestandardně a neodpovídaly předpověděným chováním při doporučených dávkách. Například u **PA 6 GF30** v motorovém oleji měla největší vliv na snížení procenta botnání dávka 33 kGy, ovšem dávka 99 kGy procento botnání zvýšila. V kapalině do ostříkovačů procento botnání postupně klesalo až k 198 kGy, kdy bylo nejmenší. V chladicí kapalině měla opět největší vliv dávka 33 kGy, ale se zvyšující se dávkou se nepříznivě zvyšovalo i procento botnání, což si lze vysvětlit vyšší mírou povrchové degradace materiálu. U brzdové kapaliny došlo při všech dávkách záření k rozpouštění polymeru. Vliv dávek však vedl k tomu, že k největšímu rozpouštění docházelo u dávky 33 kGy, ovšem při dávce 99 kGy už se rozpouštění zpomalilo na nejmenší hodnotu. **PA 66 GF25** měl u motorového oleje

nepochopitelně nejmenší procento botnání u nezesíťovaných vzorků, což lze vysvětlit vyšší mírou stabilizace polymeru. Dávky ozáření toto procento jen zvýšily, což lze vysvětlit vyšší mírou povrchové degradace. U kapaliny do ostřikovačů docházelo se zvyšující se dávkou ozáření k postupnému snižování procenta botnání. Nejmenší procento bylo zaznamenáno u dávky 198 kGy. Chladicí kapalina měla nejmenší procento botnání u dávky 99 kGy. V brzdové kapalině došlo opět k rozpouštění polymeru, kde dávky 33 a 99 kGy procento rozpouštění zvyšovaly, ale již při 198 kGy došlo k razantnímu zlepšení a téměř k zastavení rozpouštění polymeru. **PA 66 GF45** naložený v motorovém oleji dosahoval nejmenšího procenta botnání u doporučené dávky 99 kGy. V kapalině do ostřikovačů a v chladicí kapalině docházelo k postupnému snižování procenta botnání s navyšující se dávkou záření. Nejmenší procento botnání tudíž bylo naměřeno u dávky 198 kGy. Naložení v brzdové kapalině způsobilo nejmenší nabotnání u dávky 33 kGy. U dávky 99 kGy botnání přešlo v mírné rozpouštění polymeru.

Při zkouškách vrubové houževnatosti (dále jen "houževnatosti") byly u všech materiálů potvrzeny předpoklady zvýšení houževnatosti. U materiálů PA 6 GF30, PA 66 GF25 a PA GF45 bylo největší navýšení houževnatosti u dávky ozáření 99 kGy a u materiálů PA 6 a PBT byla maximální houževnatost naměřena u dávky 198 kGy.

U **PA 6 GF30** došlo téměř ve všech testovacích chemikáliích a u všech dávek ozáření ke snížení houževnatosti. Výjimkou bylo naložení nezesíťovaných tělísek, kde došlo u všech kapalin ke zvýšení houževnatosti. U nezesíťovaných tělísek naložených v kapalině do ostřikovačů došlo k takovým změnám struktury, že přístroj vrubovou houževnatost nedokázal vyhodnotit.

Při naložení **PA 66 GF25** byly největší změny zaznamenány ve FAM-B, kde se houževnatost zesíťovaných tělísek zvýšila na zhruba dvojnásobnou hodnotu. U nezesíťovaných tělísek nebyl přístroj schopen zkoušku vyhodnotit. Zvýšení houževnatosti zesíťovaných tělísek bylo zaznamenáno ještě v kapalině do ostřikovačů, ale u ostatních chemikálií už byla houževnatost snížena. Houževnatost se u nezesíťovaných tělísek naložených v brzdové kapalině, v kapalině do ostřikovačů a v motorovém oleji snížila, u chladicí kapaliny a B30 naopak zvýšila.

Houževnatost **PA 66 GF45** naloženého v kapalině do ostřikovačů se zvýšila jako jediná. U nezesíťovaných tělísek a u zesíťovaných dávkou 33 a 99 kGy došlo ke zvýšení

houževnatosti, avšak výjimkou bylo zesíťování 198 kGy, kde se houževnatost mírně snížila. K přibližně stejnému (20%) snížení došlo ve všech ostatních chemických prostředích, a to jak u zesíťovaných, tak u nezesíťovaných zkušebních tělísek.

PA 6 byl testován hlavně v biodieselu B30, kde došlo u nezesíťovaných tělísek oproti referenčnímu prostředí ke zvýšení houževnatosti na dvojnásobek. U tělísek zesíťovaných dávkami 33 a 99 kGy došlo ke zvýšení houževnatosti. Naopak při zesíťování 198 kGy houževnatost klesla.

Testování **PBT** bylo uskutečněno v biodieselu B30 a FAM-B. Jak v biodieselu B30, tak i ve FAM-B došlo ke snížení houževnatosti jak u nezesíťovaných tak u zesíťovaných tělísek. V obou případech došlo k největšímu poklesu houževnatosti u nezesíťovaných tělísek (18%). Nejmenší pokles byl u obou chemikálií zaznamenán u dávky ozáření 99 kGy.

Všechny testované polymerní materiály byly naloženy v laboratorní kapalině FAM-B, ovšem u PA 6, PA 6 GF30 a PA 66 GF45 došlo k jejich nabotnutí a tudíž porušení struktury, které způsobilo, že hodnoty vrubové houževnatosti přístroj nebyl schopen vyhodnotit.

Dle normy ISO 22880-3 byla u vybraných materiálu PA 6 GF30 a PA 66 GF25 provedena zkouška koroze pod napětím (ESC) v prostředí motorového oleje. Nejedná se exaktní zkoušku, proto u ní nejsou důležitá čísla, ale vyhodnocují se hlavně rozdíly různých materiálů, na které během zkoušky působí mechanické a chemické napětí. Proto probíhá ve výsledku hlavně vizuální kontrola, kterou doplňuje mechanická zkouška vrubové houževnatosti. U PA 6 GF30 došlo ve všech případech k navýšení rázové houževnatosti. U PA 66 GF25 došlo ke zvýšení houževnatosti pouze u nezesíťovaných tělísek. U všech zesíťovaných tělísek naopak došlo k mírnému poklesu vrubové houževnatosti. Ani u jednoho materiálu nebylo během zkoušky zaznamenáno žádné viditelné porušení povrchu ani struktury tělíška. Je pravděpodobné, že pozorování trhlin zamezila netransparentnost testovaných polymerů.

Výsledky uskutečněných zkoušek potvrdily vliv ionizačního záření na zkoušené polymery a rovněž různý vliv dávek ionizačního záření na chemickou odolnost vybraných polymerních materiálů. Naměřené výsledky ukázaly zlepšení mechanických a chemických vlastností některých polymerů, ale v určitých případech i zhoršení požadovaných vlastností. Potvrdilo se také, že ne vždy zaručuje zesíťování vyšší dávkou záření lepší chemickou

nebo mechanickou odolnost. V mnoha případech bylo dokázáno, že zesíťování větší dávkou bylo zbytečné nebo dokonce nežádoucí. Ve většině případů ale došlo u zesíťovaných polymerních materiálů ke snížení náchylnosti k botnání a ke zvýšení jejich vrubové houževnatosti. Celkové zhodnocení výsledků ukázalo pozitivní přínos radiačního síťování na vybraných polymerech a jeho potenciál pro aplikaci v technické praxi.

Je však nutné volit dávku záření individuálně v závislosti na aplikovaném polymerním materiálu a na chemickém prostředí, ve které se konečný výrobek bude nacházet.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠVORČÍK, V. *Polymery* [online]. [s.2], 2012 [cit. 2013-01-26] Dostupné z WWW: <<http://www.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>>
- [2] *Makromolekulární látky (Polymery)* [online]. [s.1], 2010 [cit. 2013-02-2] Dostupné z WWW: <<http://www.gvi.cz/files/chemie/mml.pdf>>
- [3] *Plasty* [online]. [s.2], 2006 [cit. 2013-02-2] Dostupné z WWW: <<http://www.ateam.zcu.cz/plasty.pdf>>
- [4] NEUHÄUSL, Emil. *Polymery amorfni a semikrystalicke z hlediska vstrikovani* [online]. 2012 [cit. 2013-02-3] Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/polymery-amorfni-a-semikrystalicke-z-hlediska-vstrikovani.html>>
- [5] *Polyamides PA* [online]. [cit. 2013-02-3] Dostupné z WWW: <<http://www.ensinger-online.com/en/materials/engineering-plastics/polyamides>>
- [6] *Radiation Crosslinking* [online]. [cit. 2013-02-10] Dostupné z WWW: <<http://www.bgs.eu/strahlenvernetzung.html?&L=1>>
- [7] <http://www.plasticportal.cz> [online]. [cit. 2013-01-9]. Dostupné z WWW: <<http://www.plasticportal.cz/cs/radiacni-sitovani-plastovych-vyrobku/ka/1324>>
- [8] *Elektromagnetické záření* [online]. [s.1], [cit. 2013-02-2]. Dostupné z WWW: <<http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=27312&docGroup=4899&cmd=0&instance>>
- [9] *Spektrum elektromagnetické záření* [online], 2012 [cit. 2013-03-5]. Dostupné z WWW: <<http://lts.fzu.cz/cz/>>
- [10] STOKLASA, Karel. *Makromolekulární chemie I*, Zlín, 2006, 106s.
- [11] ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika* [online]. [cit. 2013-04-12] Dostupné z WWW: <<http://astronuklfyzika.cz/strana2.htm>>
- [13] *Ionizující záření* [online], 2013 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.uake.cz/OZP/content/section59.html>>
- [14] *Radiation Crosslinking*, Dostupné z WWW: <www.bgs.eu>

- [15] KRYNICKÝ, Martin. *Učebnice fyziky pro gymnázia* [online]. [s. l.] : [s. n.], 2010 [cit. 2011-01-20]. Radiové vlny a mikrovlny, s. Dostupné z WWW: <<http://ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/index.html>>.
- [16] GERSHON J. Shugar, Jack T. Ballinger: *Chemical technicians' ready reference handbook*, USA, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1996
- [17] DOLEŽEL, B.: *Odolnost plastů a pryží*, Praha, SNTL, 1981
- [18] *Koroze a degradace polymerů* [online], 2009 [cit. 2013-02-19]. Dostupné z WWW: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_materialu_pro_restauratory/kadm/pdf/3_2.pdf>
- [19] ČSN EN ISO 179. Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy. Praha: Český normalizační institut, 2000. 38 s.
- [20] ISO 22088. Plastics - Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [21] ISO 16750-5, Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment -- Part 5: Chemical loads
- [22] ISO 16750-4, Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment -- Part 4: Climatic loads
- [23] W.A WOISHNIS AND D.C.WRIGHT, *Advanced Materials and Processes*, 12, 39-40 (1994)
- [24] www.iba-sterilization.com [online]. [cit. 2013-01-9]. Dostupné z WWW: <<http://www.iba-sterilization.com/accelerators/rhodotron>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PA	Polyamid
PBT	Polybutylentereftalát
Gy	Gray
°C	Stupeň celsia
T _g	Skelný přechod
B	Beta
Γ	Gama
eV	Elektrovolt
Hz	Hertz
UHMPE	Ultra vysokomolekulární polyethylen
Bq	Becquerel
GF	Skelné vlákna
Co ⁶⁰	Cobalt 60
ESC	Koroze pod napětím
NO ₂	Oxid dusičitý
SO ₂	Oxid siřičitý
OH	Hydroxylová skupina
COOH	Karboxylová skupina
T	Teplota
ΔT	Odchylka teploty
U	Relativní vlhkost
ΔU	Odchylka vlhkosti
Δ	Hustota
T _{min}	Minimální teplota

T_{\max}	Maximální teplota
ε_{χ}	Nominální ohybové napětí
D	Průměr
R	Poloměr
H	Tloušťka zkušebního tělíska
B	Šířka zkušebního tělíska
bN	Šířka zkušebního tělíska pod vrubem
Wb	Energie při přeražení
KC	Vrubová houževnatost
a_{cU}	Rázová houževnatost
ABS	Anti block system
N	Newton
Q	Koeficient botnání
Q%	Stupeň botnání
m1	Hmotnost před naložením
m2	Hmotnost po naložení
N	Počet tělísek
X	Průměr
S	Směrodatná odchylka
J	Joule
W	Watt
Mm	Milimetr
Kg	Kilogram
F	Síla

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Syntetické polymery podle tvaru molekul</i>	14
<i>Obr. 2. Rozdělení polymerů z technického hlediska</i>	15
<i>Obr. 3. Rozdělení polymerů dle aplikace a jejich nad molekulární struktury.</i>	15
<i>Obr. 4. Chemická struktura Polyamidu 6</i>	17
<i>Obr. 5. Chemická struktura Polyamidu 66</i>	18
<i>Obr. 6. Chemická struktura polybutylentereftalátu</i>	18
<i>Obr. 7. Druhy elektromagnetického záření [9].....</i>	22
<i>Obr. 8: Elektronové záření beta (β).....</i>	23
<i>Obr. 9: Záření gama (γ).....</i>	24
<i>Obr. 10. Jednoduché schéma elektrostatického lineárního urychlovače.....</i>	26
<i>Obr. 11. Jednoduché schéma vysokofrekvenčního lineárního urychlovače</i>	26
<i>Obr. 12. Jednoduché schéma synchrotronu.....</i>	27
<i>Obr. 13. Zvýšení pevnosti PA6 30 %GF po radiačním síťování [14].....</i>	30
<i>Obr. 14. Odolnost hydrolyze TPE-U ve vařící vodě[14]</i>	31
<i>Obr. 15. Teplotní odolnost radiačně zesíťovaného PA 66 [14]</i>	32
<i>Obr. 16. Princip elektronového paprsku.....</i>	33
<i>Obr. 17. Princip gama zářiče</i>	33
<i>Obr. 18. Tvorba trhlin při korozi pod napětím</i>	38
<i>Obr. 19. Princip zkoušení ESC</i>	49
<i>Obr. 20. Typy vrubů na tělisku</i>	50
<i>Obr. 21. Charpyho kladivo</i>	50
<i>Obr. 22. SHERON® Screenwash -40°C</i>	54
<i>Obr. 23 SHERON® Antifreeze G48.....</i>	55
<i>Obr. 24 Brzdová Kapalina Brake Fluid SAE J1703 DOT4</i>	55
<i>Obr. 25. Motorový olej BP® VISCO 3000 A3/B4 10W-40.....</i>	56
<i>Obr. 26. Arburg Allrounder 420C Advance.</i>	59
<i>Obr. 27. Arburg Thermolift 100-2</i>	59
<i>Obr. 28. Rozměry normalizovaného těliska</i>	60
<i>Obr. 29. Vystříknutá těliska</i>	61
<i>Obr. 30 Elektronový urychlovač typu Rhodotron [24]</i>	62
<i>Obr. 31. Schéma urychlovače Rhodotron</i>	62

<i>Obr. 32. Tělíska rozdělena podle dávek v BGS</i>	63
<i>Obr. 33. Tělíska připravena na ozáření.....</i>	63
<i>Obr. 34. Radiačně zesíťovaná tělíska</i>	63
<i>Obr. 35. Stupeň botnání v motorovém oleji</i>	66
<i>Obr. 36. Stupeň botnání v kapalině do ostříkovačů.....</i>	67
<i>Obr. 37. Stupeň botnání v chladící kapalině</i>	68
<i>Obr. 38. Stupeň botnání v brzdové kapalině.....</i>	69
<i>Obr. 39. Naložená tělíska</i>	71
<i>Obr. 40. Naložené tělíska v autoklávech.....</i>	72
<i>Obr. 41. Vrubovací přístroj Notchvics.....</i>	73
<i>Obr. 42. Resil Impactor Junior.</i>	73
<i>Obr. 43. Zwick Roell HIT50P</i>	74
<i>Obr. 44. Vrubová houževnatost PA 6 GF30</i>	78
<i>Obr. 45. Lom zkušebního tělíska PA 6 GF30</i>	78
<i>Obr. 46. Vrubová houževnatost PA 66 GF25</i>	82
<i>Obr. 47. Lom zkušebního tělíska PA 66 GF25</i>	82
<i>Obr. 48. Vrubová houževnatost PA 66 GF45</i>	86
<i>Obr. 49. Lom zkušebního tělíska PA 66 GF45</i>	86
<i>Obr. 50. Vrubová houževnatost PA 6</i>	88
<i>Obr. 51. Lom zkušebního tělíska PA 6.....</i>	88
<i>Obr. 52. Vrubová houževnatost PBT</i>	90
<i>Obr. 53. Lom zkušebního tělíska PBT.....</i>	91
<i>Obr. 54. Přípravek na zkoušku koroze pod napětím.....</i>	92
<i>Obr. 55. PA 6 GF30 - Koroze pod napětím v referenčním prostředí</i>	93
<i>Obr. 56. PA 6 GF30 - Koroze pod napětím v oleji</i>	94
<i>Obr. 57. PA 66 GF25 - Koroze pod napětím v referenčním prostředí</i>	96
<i>Obr. 58. PA 66 GF25 - Koroze pod napětím v oleji</i>	97
<i>Obr. 59. Křivka gelu PA 6</i>	98
<i>Obr. 60. Křivka gelu PA 6 GF30</i>	98
<i>Obr. 61. Křivka gelu PA 66 GF25</i>	99
<i>Obr. 62. Křivka gelu PA6 GF45</i>	99
<i>Obr. 63. TMA křivka PA 6</i>	100
<i>Obr. 64. TMA křivka PA 66 GF25.....</i>	100

<i>Obr. 65. TMA křivka PA 66 GF45</i>	101
<i>Obr. 66. TMA křivka PBT</i>	101

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Síťovatelné polymery</i>	28
<i>Tab. 2. Podmínky zkoušení podle ISO 291</i>	40
<i>Tab. 3 Používané chemikálie podle ISO175 [19]</i>	42
<i>Tab. 4 Používané chemikálie podle ISO175 [19]</i>	43
<i>Tab. 5. Odhad změn</i>	44
<i>Tab. 6. Seznam chemických kapalin dle ISO 16750-5 [21]</i>	45
<i>Tab. 7. Doporučené teploty podle ISO 16750-4. [22]</i>	46
<i>Tab. 8. Sledované vlastnosti [20]</i>	49
<i>Tab. 9. Složení FAM-B</i>	56
<i>Tab. 10. Vlastnosti FAM-B</i>	56
<i>Tab. 11. Vlastnosti 100% metylesteru řepkového oleje</i>	57
<i>Tab. 12. Technické parametry stroje Arburg Allrounder 420C Advance.</i>	60
<i>Tab. 13. Vstřikovací podmínky pro jednotlivé materiály</i>	61
<i>Tab. 14. Dávky záření</i>	64
<i>Tab. 15. Koeficienty a procenta botnání v motorovém oleji</i>	65
<i>Tab. 16. Koeficienty a procenta botnání v kapalině do ostřikovačů</i>	66
<i>Tab. 17. Koeficienty a procenta botnání v chladicí kapalině</i>	67
<i>Tab. 18. Koeficienty a procenta botnání v brzdové kapalině</i>	68
<i>Tab. 19. Teploty prostředí při naložení zkušebních tělísek</i>	71
<i>Tab. 20. Teploty prostředí při naložení zkušebních tělísek</i>	71
<i>Tab. 21. Technická data stroje Resil Impactor Junior.</i>	74
<i>Tab. 22. Technická data Zwick Roell HIT50P</i>	74
<i>Tab. 23. Podmínky měření vrubové houževnatosti</i>	75
<i>Tab. 24. Vrubová houževnatost PA 6 GF30 v referenčním prostředí</i>	75
<i>Tab. 25. Vrubová houževnatost PA 6 GF30 v kapalině do ostřikovačů (ethanol)</i>	75
<i>Tab. 26. Vrubová houževnatost PA 6 GF30 v chladicí kapalině (ethylenglykol)</i>	75
<i>Tab. 27. Vrubová houževnatost PA 6 GF30 v motorovém oleji</i>	76
<i>Tab. 28. Vrubová houževnatost PA 6 GF30 v brzdové kapalině</i>	76
<i>Tab. 29. Vrubová houževnatost PA 6 GF30 v B30</i>	76
<i>Tab. 30. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v referenčním prostředí</i>	79
<i>Tab. 31. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v kapalině do ostřikovačů (ethanol)</i>	79

<i>Tab. 32. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v chladící kapalině (ethylenglykol)</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 33. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v motorovém oleji.....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 34. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v brzdové kapalině</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 35. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v FAM-B.....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 36. Vrubová houževnatost PA 66 GF25 v B30</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 37. Vrubová houževnatost PA 66 GF45 v referenčním prostředí.....</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 38. Vrubová houževnatost PA 66 GF45 v kapalině do ostříkovačů (ethanol).....</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 39. Vrubová houževnatost PA 66 GF45 v chladící kapalině (ethylenglykol)</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 40. Vrubová houževnatost PA 66 GF45 v motorovém oleji.....</i>	<i>84</i>
<i>Tab. 41. Vrubová houževnatost PA 66 GF45 v brzdové kapalině</i>	<i>84</i>
<i>Tab. 42. Vrubová houževnatost PA 66 GF45 v B30</i>	<i>84</i>
<i>Tab. 43. Vrubová houževnatost PA6 v referenčním prostředí.....</i>	<i>87</i>
<i>Tab. 44. Vrubová houževnatost PA6 v B30</i>	<i>87</i>
<i>Tab. 45. Vrubová houževnatost PBT v referenčním prostředí.....</i>	<i>89</i>
<i>Tab. 46. Vrubová houževnatost PBT v FAM-B.....</i>	<i>89</i>
<i>Tab. 47. Vrubová houževnatost PBT v B30</i>	<i>89</i>
<i>Tab. 48. PA 6 GF30 - Koroze pod napětím v referenčním prostředí.....</i>	<i>92</i>
<i>Tab. 49. Zbytková vrubová houževnatost PA 6 GF30 v referenčním prostředí.....</i>	<i>93</i>
<i>Tab. 50. PA 6 GF30 - Koroze pod napětím v oleji</i>	<i>93</i>
<i>Tab. 51. Zbytková vrubová houževnatost PA 6 GF30 v oleji - měření při 23°C</i>	<i>94</i>
<i>Tab. 52. PA 66 GF25 - Koroze pod napětím v referenčním prostředí.....</i>	<i>95</i>
<i>Tab. 53. Zbytková vrubová houževnatost PA 66 GF25 v referenčním prostředí.....</i>	<i>95</i>
<i>Tab. 54. PA66 25%GF - Koroze pod napětím v oleji</i>	<i>96</i>
<i>Tab. 55. Zbytková vrubová houževnatost PA 66 GF25 v oleji - měření při 23°C</i>	<i>96</i>

SEZNAM PŘÍLOH

1. Kompletní data zkoušky vrubové houževnatosti po chemickém zatížení (přiloženo na CD)
2. Kompletní data zkoušky botnání (přiloženo na CD)
3. Kompletní data zkoušky vrubové houževnatosti po zkoušce ESC (přiloženo na CD)

1. Kompletní data zkoušky vrubové houževnatosti po chemickém zatížení

PA6

Referenční prostředí

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
11.46	11.46	15.9	16.96
11.88	11.88	14.28	15.18
11.27	11.27	13.56	12.96
11.37	11.37	12.36	14.20
9.24	9.24	15.24	15.58

B30

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
14.37	16.4	14.61	17.66
19.69	12.55	17.23	11.52
16.42	17.16	17.3	14.75
14.19	11.65	14.96	13.81
18.37	16.28	15.22	17.61

PA 6 GF30

Referenční prostředí

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
15.91	23.85	26.48	23.89
12.29	26.1	23.43	23.8
12.40	24.8	26.45	25.7
11.47	24.35	26.14	24.39
15.2	23.66	22.20	23.74

Kapalina do ostříkovačů

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
0.00	21.94	23.40	22.1
0.00	23.34	23.13	22.35
0.00	24.55	22.58	23.9
0.00	22.12	23.13	20.6
0.00	24.16	24.34	23.67

Chladicí kapalina

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
15.41	22.54	20.32	21.63
16.42	24.20	17.61	19.18
16.43	21.58	23.32	17.28
17.52	24.26	22.2	22.10
15.10	24.28	20.33	20.97

Brzdová kapalina

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
14.40	20.18	21.83	21.73
12.56	21.77	21.9	20.36
14.76	22.13	19.71	20.75
14.70	23.43	20.26	20.5
16.33	20.18	17.67	20.52

Motorový olej

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
13.40	19.91	18.68	22.8
14.63	21.61	18.14	24.47
14.35	21.34	24.32	20.21
15.52	21.57	22.63	19.49
17.84	21.87	23.49	19.53

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
15.43	19.50	18.73	17.12
13.89	18.17	17.99	18.42
17.59	17.6	18.27	16.62
16.15	18.29	17.35	18.50
16.47	19.87	17.23	16.97

PA 66 GF25

Referenční prostředí

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
7.29	9.61	10.22	10.62
6.60	9.57	9.46	9.21
8.54	9.47	10.55	10.20
8.80	9.75	10.22	9.63
8.86	9.74	10.8	9.25

Kapalina do ostřikovačů

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
7.46	10.18	11.83	9.48
6.71	12.31	11.99	11.32
7.1	15.1	11.27	10.96
8.11	12.72	12.32	9.19
6.96	12.60	10.43	11.52

Chladící kapalina

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
9.20	9.6	8.69	8.75
9.35	8.14	9.75	9.55
9.98	8.93	8.19	8.48
7.16	9.45	8.96	8.61
9.3	9.25	8.84	7.90

Brzdová kapalina

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]
7.73	8.58	8.54	8.93
7.57	9.47	7.89	8.44
8.11	8.25	0	8.93
7.83	8.42	0	8.41
7.37	8.92	0	8.19

Motorový olej

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]
9.45	8.63	9.2	7.77
8.49	8.59	9.10	9.7
8.63	7.81	8.53	9.3
7.59	9.35	8.42	8.00
6.98	8.49	8.79	8.6

B30

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]
9.23	4.18	8.6	7.76
9.00	9.12	9.7	8.63
8.42	9.21	9.26	8.50
8.41	8.59	7.92	8.44
0	9.51	9.34	8.44

FAM-B

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]
0	15.31	20.43	20.80
0	16.21	23.44	20.84
0	22.41	23.3	0.00
0	22.1	0	21.9
0	20.8	0	19.42

PA 66 GF45

Referenční prostředí

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]
11,875	16,875	17,1875	16,875
12,1875	17,5	17,5	16,875
13,125	16,875	16,875	16,25
15,9375	16,875	17,1875	16,875
13,4375	16,5625	17,1875	15,625

Kapalina do ostříkovačů

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]
18,4375	16,5625	16,5625	17,1875
17,8125	17,1875	16,875	16,25
18,4375	18,4375	17,5	15,3125
16,875	17,8125	17,5	17,5
19,375	17,1875	17,8125	16,5625

Chladící kapalina

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]
12,5	13,4375	13,75	14,375
16,875	13,4375	13,75	14,6875
16,5625	13,4375	14,0625	14,0625
13,125	12,8125	13,4375	14,375
0	13,125	14,375	13,75

Brzdová kapalina

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]
12,1875	13,125	13,4375	13,75
12,1875	12,5	12,8125	14,0625
12,5	13,125	14,0625	13,75
11,875	13,4375	13,75	14,0625
0	13,125	15	14,0625

Motorový olej

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]
12,5	13,75	14,375	13,4375
11,5625	14,0625	13,75	14,375
12,1875	13,75	13,75	14,6875
15,9375	12,8125	14,0625	14,6875
13,125	0	13,4375	14,0625

B30

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]
12,1875	14,6875	14,0625	13,4375
12,5	13,4375	13,4375	14,0625
16,25	13,4375	14,0625	13,75
13,4375	13,125	13,125	13,75
13,4375	13,4375	13,125	13,75

PBT

Referenční prostředí

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]
6.33	6.39	6.3	7.40
6.62	6.69	6.41	6.81
5.16	6.9	6.90	6.32
5.82	6.25	6.28	6.62
5.60	6.48	6.94	7.31

B30

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]	Resilience [KJ/m2]
4.81	5.20	6.25	6.9
4.40	5.18	5.12	5.89
4.71	5.37	6.15	6.14

4.99	4.81	6.55	6.83
4.80	4.80	5.96	6.41

FAM-B

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
4.62	4.64	6.41	6.17
5.22	6.9	6.31	7.52
4.85	5.90	6.33	7.11
4.67	4.76	6.72	6.64
5.51	5.66	6.34	6.16

2. Kompletní data zkoušky botnání

PA 6 GF30

Kapalina do ostřikovačů

0 kGy		m	m-bot		
1.0.1	1.0.1	4,552	4,702	0,032953	3,295255
1.0.2	1.0.2	4,511	4,671	0,035469	3,546885
1.0.3	1.0.3	4,54	4,694	0,033921	3,39207
1.0.4	1.0.4	4,51	4,668	0,035033	3,503326
1.0.5	1.0.5	4,574	4,719	0,031701	3,170092
				0,034	3,382
33 kGy					
1.33.1	1.33.1	4,527	4,625	0,021648	2,164789
1.33.2	1.33.2	4,534	4,65	0,025584	2,558447
1.33.3	1.33.3	4,583	4,682	0,021602	2,160157
1.33.4	1.33.4	4,36	4,456	0,022018	2,201835
1.33.5	1.33.5	4,502	4,599	0,021546	2,154598
				0,022	2,248
99 kGy					
1.99.1	1.99.1	4,552	4,645	0,020431	2,043058
1.99.2	1.99.2	4,503	4,596	0,020653	2,06529
1.99.3	1.99.3	4,539	4,645	0,023353	2,335316
1.99.4	1.99.4	4,558	4,662	0,022817	2,281703
1.99.5	1.99.5	4,493	4,599	0,023592	2,359225
				0,022	2,217
198 kGy					
1.198.1	1.198.1	4,522	4,623	0,022335	2,233525
1.198.2	1.198.2	4,518	4,616	0,021691	2,169101
1.198.3	1.198.3	4,584	4,672	0,019197	1,919721
1.198.4	1.198.4	4,307	4,389	0,019039	1,903877
1.198.5	1.198.5	4,514	4,599	0,01883	1,883031
				0,020	2,022

Chladicí kapalina

0 kGy		m	m-bot		
1.0.1	1.0.1	4,57	4,587	0,00372	0,371991
1.0.2	1.0.2	4,508	4,53	0,00488	0,488021
1.0.3	1.0.3	4,521	4,538	0,00376	0,376023
1.0.4	1.0.4	4,497	4,519	0,004892	0,489215
1.0.5	1.0.5	4,539	4,553	0,003084	0,308438
				0,004067	0,406738
33 kGy					
1.33.1	1.33.1	4,536	4,542	0,001323	0,132275
1.33.2	1.33.2	4,51	4,515	0,001109	0,110865
1.33.3	1.33.3	4,505	4,509	0,000888	0,08879
1.33.4	1.33.4	4,501	4,508	0,001555	0,155521
1.33.5	1.33.5	4,534	4,543	0,001985	0,1985
				0,001372	0,13719
99 kGy					
1.99.1	1.99.1	4,548	4,555	0,001539	0,153914
1.99.2	1.99.2	4,529	4,535	0,001325	0,13248
1.99.3	1.99.3	4,551	4,562	0,002417	0,241705
1.99.4	1.99.4	4,518	4,526	0,001771	0,177069
1.99.5	1.99.5	4,497	4,503	0,001334	0,133422
				0,001677	0,167718
198 kGy					
1.198.1	1.198.1	4,543	4,549	0,001321	0,132071
1.198.2	1.198.2	4,501	4,51	0,002	0,199956
1.198.3	1.198.3	4,543	4,553	0,002201	0,220119
1.198.4	1.198.4	4,511	4,517	0,00133	0,133008
1.198.5	1.198.5	4,508	4,517	0,001996	0,199645
				0,00177	0,17696

Brzdová kapalina

0 kGy	m	m-bot		
1.0.1	4,494	4,489	-0,00111	-0,11126
1.0.2	4,532	4,527	-0,005	-0,5
1.0.3	4,525	4,52	-0,005	-0,5
1.0.4	4,586	4,575	-0,011	-1,1
1.0.5	4,515	4,51	-0,005	-0,5
			-0,005	-0,542
33 kGy				
1.33.1	4,5	4,492	-0,008	-0,8
1.33.2	4,529	4,519	-0,01	-1
1.33.3	4,511	4,504	-0,007	-0,7
1.33.4	4,517	4,507	-0,01	-1
1.33.5	4,672	4,664	-0,008	-0,8
			-0,009	-0,860
99 kGy				
1.99.1	4,503	4,499	-0,004	-0,4
1.99.2	4,509	4,505	-0,004	-0,4
1.99.3	4,517	4,512	-0,005	-0,5

1.99.4	4,495	4,492	-0,003	-0,3
1.99.5	4,487	4,485	-0,002	-0,2
			-0,004	-0,360
198 kGy				
1.198.1	4,512	4,506	-0,006	-0,6
1.198.2	4,54	4,536	-0,004	-0,4
1.198.3	4,548	4,547	-0,001	-0,1
1.198.4	4,496	4,492	-0,004	-0,4
1.198.5	4,539	4,535	-0,004	-0,4
			-0,004	-0,380

Motorový olej

0 kGy		m	m-bot		
1.0.1	1.0.1	4,497	4,506	0,002001	0,200133
1.0.2	1.0.2	4,531	4,533	0,000441	0,04414
1.0.3	1.0.3	4,53	4,535	0,001104	0,110375
1.0.4	1.0.4	4,522	4,527	0,001106	0,110571
1.0.5	1.0.5	4,498	4,507	0,002001	0,200089
				0,001	0,133
33 kGy					
1.33.1	1.33.1	4,512	4,518	0,00133	0,132979
1.33.2	1.33.2	4,521	4,526	0,001106	0,110595
1.33.3	1.33.3	4,545	4,549	0,00088	0,088009
1.33.4	1.33.4	4,508	4,514	0,001331	0,133097
1.33.5	1.33.5	4,508	4,514	0,001331	0,133097
				0,001	0,120
99 kGy					
1.99.1	1.99.1	4,603	4,61	0,001521	0,152075
1.99.2	1.99.2	4,506	4,515	0,001997	0,199734
1.99.3	1.99.3	4,643	4,648	0,001077	0,107689
1.99.4	1.99.4	4,516	4,525	0,001993	0,199291
1.99.5	1.99.5	4,51	4,517	0,001552	0,155211
				0,002	0,163
198 kGy					
1.198.1	1.198.1	4,51	4,517	0,001552	0,155211
1.198.2	1.198.2	4,53	4,532	0,000442	0,04415
1.198.3	1.198.3	4,514	4,52	0,001329	0,13292
1.198.4	1.198.4	4,557	4,563	0,001317	0,131666
1.198.5	1.198.5	4,524	4,532	0,001768	0,176835
				0,001	0,128

PA 66 GF25

Kapalina do ostřikovačů

0 kGy	m	m-bot		
2.0.1	4,368	4,521	0,035027473	3,502747
2.0.2	4,395	4,539	0,032764505	3,276451
2.0.3	4,391	4,535	0,032794352	3,279435

2.0.4	4,386	4,536	0,034199726	3,419973
2.0.5	4,37	4,53	0,036613272	3,661327
			0,034	3,428
33 kGy				
2.33.1	4,395	4,509	0,025938567	2,593857
2.33.2	4,363	4,498	0,030942012	3,094201
2.33.3	4,365	4,472	0,024513173	2,451317
2.33.4	4,381	4,489	0,024651906	2,465191
2.33.5	4,378	4,485	0,024440384	2,444038
			0,026	2,610
99 kGy				
2.99.1	4,371	4,454	0,01898879	1,898879
2.99.2	4,403	4,485	0,018623666	1,862367
2.99.3	4,352	4,436	0,019301471	1,930147
2.99.4	4,381	4,464	0,018945446	1,894545
2.99.5	4,368	4,453	0,019459707	1,945971
			0,019	1,906
198 kGy				
2.198.1	4,364	4,443	0,018102658	1,810266
2.198.2	4,366	4,444	0,017865323	1,786532
2.198.3	4,408	4,487	0,01792196	1,792196
2.198.4	4,428	4,507	0,017841012	1,784101
2.198.5	4,388	4,467	0,018003646	1,800365
			0,018	1,795

Chladicí kapalina

0 kGy		m	m-bot		
2.0.1	2.0.1	4,387	4,41	0,005242763	0,524276
2.0.2	2.0.2	4,373	4,399	0,005945575	0,594558
2.0.3	2.0.3	4,379	4,404	0,005709066	0,570907
2.0.4	2.0.4	4,419	4,442	0,005204797	0,52048
2.0.5	2.0.5	4,359	4,384	0,00573526	0,573526
				0,005567492	0,556749
33 kGy					
2.33.1	2.33.1	4,383	4,395	0,002737851	0,273785
2.33.2	2.33.2	4,363	4,374	0,002521201	0,25212
2.33.3	2.33.3	4,368	4,377	0,00206044	0,206044
2.33.4	2.33.4	4,386	4,397	0,00250798	0,250798
2.33.5	2.33.5	4,357	4,37	0,002983704	0,29837
				0,002562235	0,256224
99 kGy					
2.99.1	2.99.1	4,356	4,365	0,002066116	0,206612
2.99.2	2.99.2	4,372	4,382	0,002287283	0,228728
2.99.3	2.99.3	4,375	4,381	0,001371429	0,137143
2.99.4	2.99.4	4,401	4,409	0,001817769	0,181777
2.99.5	2.99.5	4,363	4,371	0,001833601	0,18336
				0,001875239	0,187524
198 kGy					
2.198.1	2.198.1	4,43	4,439	0,002031603	0,20316
2.198.2	2.198.2	4,396	4,408	0,002729754	0,272975

2.198.3	2.198.3	4,382	4,391	0,002053857	0,205386
2.198.4	2.198.4	4,357	4,365	0,001836126	0,183613
2.198.5	2.198.5	4,362	4,369	0,001604768	0,160477
				0,002051222	0,205122

Brzdová kapalina

0 kGy		m	m-bot		
2.0.1	2.0.1	4,372	4,368	-0,000914913	-0,09149
2.0.2	2.0.2	4,406	4,404	-0,000453926	-0,04539
2.0.3	2.0.3	4,391	4,388	-0,000683216	-0,06832
2.0.4	2.0.4	4,371	4,368	-0,000686342	-0,06863
2.0.5	2.0.5	4,407	4,404	-0,000680735	-0,06807
				-0,001	-0,068
33 kGy					
2.33.1	2.33.1	4,393	4,388	-0,001138174	-0,11382
2.33.2	2.33.2	4,502	4,496	-0,001332741	-0,13327
2.33.3	2.33.3	4,347	4,341	-0,001380262	-0,13803
2.33.4	2.33.4	4,451	4,445	-0,001348012	-0,1348
2.33.5	2.33.5	4,474	4,468	-0,001341082	-0,13411
				-0,001	-0,131
99 kGy					
2.99.1	2.99.1	4,384	4,379	-0,001140511	-0,11405
2.99.2	2.99.2	4,381	4,376	-0,001141292	-0,11413
2.99.3	2.99.3	4,359	4,354	-0,001147052	-0,11471
2.99.4	2.99.4	4,367	4,361	-0,001373941	-0,13739
2.99.5	2.99.5	4,36	4,353	-0,001605505	-0,16055
				-0,001	-0,128
198 kGy					
2.198.1	2.198.1	4,362	4,361	-0,000229253	-0,02293
2.198.2	2.198.2	4,364	4,363	-0,000229148	-0,02291
2.198.3	2.198.3	4,375	4,374	-0,000228571	-0,02286
2.198.4	2.198.4	4,392	4,391	-0,000227687	-0,02277
2.198.5	2.198.5	4,354	4,356	0,000459348	0,045935
				0,000	-0,009

Motorový olej

0 kGy		m	m-bot		
2.0.1	2.0.1	4,408	4,412	0,000907441	0,090744
2.0.2	2.0.2	4,436	4,441	0,001127142	0,112714
2.0.3	2.0.3	4,374	4,376	0,000457247	0,045725
2.0.4	2.0.4	4,394	4,397	0,000682749	0,068275
2.0.5	2.0.5	4,4	4,404	0,000909091	0,090909
				0,001	0,082
33 kGy					
2.33.1	2.33.1	4,374	4,379	0,001143118	0,114312
2.33.2	2.33.2	4,368	4,375	0,001602564	0,160256
2.33.3	2.33.3	4,341	4,346	0,001151808	0,115181
2.33.4	2.33.4	4,403	4,407	0,000908471	0,090847

2.33.5	2.33.5	4,363	4,369	0,001375201	0,13752
				0,001	0,124
99 kGy					
2.99.1	2.99.1	4,373	4,379	0,001372056	0,137206
2.99.2	2.99.2	4,373	4,379	0,001372056	0,137206
2.99.3	2.99.3	4,387	4,389	0,000455892	0,045589
2.99.4	2.99.4	4,383	4,388	0,001140771	0,114077
2.99.5	2.99.5	4,382	4,387	0,001141031	0,114103
				0,001	0,110
198 kGy					
2.198.1	2.198.1	4,386	4,393	0,001595987	0,159599
2.198.2	2.198.2	4,38	4,39	0,002283105	0,228311
2.198.3	2.198.3	4,403	4,41	0,001589825	0,158983
2.198.4	2.198.4	4,379	4,386	0,001598538	0,159854
2.198.5	2.198.5	4,408	4,413	0,001134301	0,11343
				0,002	0,164

PA 66 GF45

Kapalina do ostřikovačů

0 kGy	m	m-bot		
3.0.1	5,009	5,124	0,022958674	2,295867
3.0.2	5,123	5,241	0,023033379	2,303338
3.0.3	5,011	5,127	0,023149072	2,314907
3.0.4	5,048	5,16	0,022187005	2,2187
3.0.5	5,004	5,116	0,022382094	2,238209
			0,023	2,274
33 kGy				
3.33.1	5,023	5,127	0,020704758	2,070476
3.33.2	5,004	5,097	0,018585132	1,858513
3.33.3	5,067	5,161	0,018551411	1,855141
3.33.4	5,095	5,187	0,018056919	1,805692
3.33.5	5,032	5,126	0,018680445	1,868045
			0,019	1,892
99 kGy				
3.99.1	4,99	5,069	0,015831663	1,583166
3.99.2	4,976	5,056	0,01607717	1,607717
3.99.3	5,065	5,145	0,015794669	1,579467
3.99.4	5,043	5,121	0,015466984	1,546698
3.99.5	5,039	5,119	0,015876166	1,587617
			0,016	1,581
198 kGy				
3.198.1	5,031	5,104	0,014510038	1,451004
3.198.2	4,988	5,06	0,014434643	1,443464
3.198.3	4,991	5,063	0,014425967	1,442597
3.198.4	5,053	5,125	0,014248961	1,424896
3.198.5	5,033	5,107	0,01470296	1,470296
			0,014	1,446

Chladicí kapalina

0 kGy		m	m-bot		
3.0.1	3.0.1	5,06	5,078	0,003557312	0,355731
3.0.2	3.0.2	5,046	5,064	0,003567182	0,356718
3.0.3	3.0.3	5,071	5,088	0,003352396	0,33524
3.0.4	3.0.4	5,035	5,054	0,003773585	0,377358
3.0.5	3.0.5	5,065	5,081	0,003158934	0,315893
				0,003	0,348
33 kGy					
3.33.1	3.33.1	5,019	5,032	0,002590157	0,259016
3.33.2	3.33.2	5,025	5,039	0,00278607	0,278607
3.33.3	3.33.3	5,042	5,056	0,002776676	0,277668
3.33.4	3.33.4	4,998	5,012	0,00280112	0,280112
3.33.5	3.33.5	4,974	4,987	0,002613591	0,261359
				0,003	0,271
99 kGy					
3.99.1	3.99.1	5,003	5,012	0,001798921	0,179892
3.99.2	3.99.2	5,04	5,05	0,001984127	0,198413
3.99.3	3.99.3	5,022	5,034	0,002389486	0,238949
3.99.4	3.99.4	5,009	5,02	0,002196047	0,219605
3.99.5	3.99.5	5,04	5,051	0,00218254	0,218254
				0,002	0,211
198 kGy					
3.198.1	3.198.1	5,103	5,11	0,001371742	0,137174
3.198.2	3.198.2	5,009	5,019	0,001996406	0,199641
3.198.3	3.198.3	5,021	5,03	0,001792472	0,179247
3.198.4	3.198.4	5,071	5,082	0,002169197	0,21692
3.198.5	3.198.5	5,027	5,037	0,001989258	0,198926
				0,002	0,186

Brzdová kapalina

0 kGy		m	m-bot		
3.0.1	3.0.1	5,07	5,071	0,000197239	0,019724
3.0.2	3.0.2	5,11	5,109	0,000195695	-0,01957
3.0.3	3.0.3	5,059	5,06	0,000197668	0,019767
3.0.4	3.0.4	5,092	5,093	0,000196386	0,019639
3.0.5	3.0.5	5,016	5,017	0,000199362	0,019936
				0,000	0,012
33 kGy					
3.33.1	3.33.1	5,039	5,04	0,000198452	0,019845
3.33.2	3.33.2	5,061	5,063	0,000395179	0,039518
3.33.3	3.33.3	5,063	5,062	0,000197511	-0,01975
3.33.4	3.33.4	5,076	5,076	0	0
3.33.5	3.33.5	5,026	5,025	0,000198965	-0,0199
				0,000	0,004
99 kGy					

3.99.1	3.99.1	5,069	5,067	0,000394555	-0,03946
3.99.2	3.99.2	5,046	5,046	0	0
3.99.3	3.99.3	5,038	5,038	0	0
3.99.4	3.99.4	5,01	5,01	0	0
3.99.5	3.99.5	4,991	4,99	0,000200361	-0,02004
				0,000	-0,012
198 kGy					
3.198.1	3.198.1	4,979	4,98	0,000200844	0,020084
3.198.2	3.198.2	5,064	5,065	0,000197472	0,019747
3.198.3	3.198.3	5,023	5,025	0,000398168	0,039817
3.198.4	3.198.4	5,049	5,052	0,000594177	0,059418
3.198.5	3.198.5	5,037	5,039	0,000397062	0,039706
				0,000	0,036

Motorový olej

0 kGy		m	m-bot		
3.0.1	3.0.1	5,105	5,114	0,001762977	0,176298
3.0.2	3.0.2	4,995	5,003	0,001601602	0,16016
3.0.3	3.0.3	5,019	5,028	0,001793186	0,179319
3.0.4	3.0.4	5,061	5,068	0,001383126	0,138313
3.0.5	3.0.5	5,014	5,023	0,001794974	0,179497
				0,002	0,167
33 kGy					
3.33.1	3.33.1	5,027	5,033	0,001193555	0,119355
3.33.2	3.33.2	5,01	5,016	0,001197605	0,11976
3.33.3	3.33.3	5,045	5,054	0,001783944	0,178394
3.33.4	3.33.4	5,1	5,108	0,001568627	0,156863
3.33.5	3.33.5	5,011	5,019	0,001596488	0,159649
				0,001	0,147
99 kGy					
3.99.1	3.99.1	5,054	5,056	0,000395726	0,039573
3.99.2	3.99.2	5,036	5,041	0,000992851	0,099285
3.99.3	3.99.3	5,052	5,056	0,000791766	0,079177
3.99.4	3.99.4	5,061	5,067	0,001185536	0,118554
3.99.5	3.99.5	5,04	5,048	0,001587302	0,15873
				0,001	0,099
198 kGy					
3.198.1	3.198.1	5,017	5,026	0,001793901	0,17939
3.198.2	3.198.2	5,004	5,008	0,000799361	0,079936
3.198.3	3.198.3	5,009	5,016	0,001397485	0,139748
3.198.4	3.198.4	5,039	5,047	0,001587617	0,158762
3.198.5	3.198.5	5,001	5,008	0,00139972	0,139972
				0,001	0,140

3. Kompletní data zkoušky vrubové houževnatosti po zkoušce ESC

PA 6 GF30

Referenční prostředí

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
17.11	19.80	18.33	19.71
15.82	21.82	19.74	18.20
16.13	19.55	21.74	19.71
18.86	21.36	17.50	20.76
14.12	20.64	22.4	19.86

Motorový olej

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
24.52	25.90	27.29	24.67
24.32	24.78	23.00	25.10
24.36	24.69	22.82	24.7
22.92	26.19	25.72	23.53
28.10	27.18	26.51	0

PA 66 GF25

Referenční prostředí

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]
8.9	8.45	8.25	8.62
7.54	8.19	9.16	9.44
8.42	9.10	7.94	8.36
6.20	7.88	8.71	8.7
7.26	7.55	9.44	8.87

Motorový olej

0 kGy	33 kGy	99 kGy	198 kGy
Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]	Resilience [KJ/m ²]

8.32	8.14	8.72	8.44
7.42	8.49	8.47	8.34
8.50	8.12	8.43	8.58
7.9	8.12	8.4	8.1
7.87	8.2	7.55	7.83