

Creepové zkoušky radiačně síťovaných polymerů

Bc. Libor Jandík

Diplomová práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Libor JANDÍK**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Kříповé zkoušky radiačně síťovaných polymerů**

Zásady pro vypracování:

- 1.) Vypracujte literární rešerši na dané téma
- 2.) Připojte zkušební tělesa
- 3.) Navrhněte vhodnou metodu pro realizaci zkoušek
- 4.) Vyhodnoťte výsledky experimentu

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

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

Ústav výrobního inženýrství

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

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

Ve Zlíně dne 19. ledna 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.
vedoucí katedry

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že:

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové 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 práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou 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 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 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 práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové 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, 19.5. 2010

.....

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

(1) Vysoká škola 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 stanovit vliv beta záření na creepové vlastnosti vybraných materiálů. Práce je rozdělena do dvou částí.

V první části je vypracována literární rešerše, která seznamuje se základními pojmy, ionizujícím záření a statickými dlouhodobými zkouškami.

V druhé části, praktické, jsou dále popsány vlastnosti jednotlivých zkoušených materiálů, procesní podmínky vyrobených zkušebních těles, návrh, konstrukce, popis měřících zařízení a zvolení vhodného postupu měření. Dále zde budou popsány jednotlivé zkoušky s jejich parametry. V poslední části je celkové vyhodnocení naměřených výsledků.

Klíčová slova: polymery, síťování, ozařování, creepová zkouška

ABSTRACT

The aim of the master thesis is to establish the impact of beta radiation on creep properties of selected materials. The work is divided into two parts.

In the first part the research literature developed, which introduces the basic concepts, types of polymerization, ionizing radiation and long-term static tests.

In the second part, practical, are also describe the characteristics of test materials, process conditions produced test pieces, design, construction, description of the measuring device and select the appropriate measurement method. They will also describe the tests with their parameters. The last part of the overall evaluation of the measured results.

Keywords: polymers, cross linking, irradiation, creep test

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Miroslavu Maňasovi, CSc. za jeho odborné vedení a za rady při zpracování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat Doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi CSc. za jeho čas a technickou pomoc při měření a rady, rovněž Ing. Vladimíru Šumberovi za technickou asistenci a pomoc při výrobě zkušebních těles a Ing. Jiřímu Šálkovi za pomoc při zhotovení měřicího stojanu a čelistí.

Také firmě BGS GmbH & Co, KG v Saal am Donau, SRN konkrétně panu Ing. Michalu Daňkovi za provedení ozáření zkušebních těles. Závěrem bych poděkoval své rodině, rodičům a přátelům za podporu při studiu.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERY	12
1.1 OBECNĚ K POLYMERŮM.....	12
1.2 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ.....	13
2 SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ	19
2.1 ZPŮSOBY VÝSTAVBY SÍŤÍ.....	20
2.2 SÍŤOVÁNÍ KYSLÍKEM.....	21
2.3 SÍŤOVÁNÍ PEROXIDEM	22
2.4 SÍŤOVÁNÍ POMOCÍ SILANŮ	22
2.5 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ	22
2.5.1 Radiační síťování polyamidu (PA).....	23
2.5.2 Radiační síťování polybutyltereftalátu (PBT)	24
3 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	25
3.1 RADIOAKTIVITA.....	26
3.1.1 Záření alfa (α).....	26
3.1.2 Záření beta (β)	27
3.1.3 Záření gama (γ)	27
3.2 ROZDÍL MEZI ELEKTRONOVÝM BETA A GAMA ZÁŘENÍM.....	28
3.3 VLIV OZAŘOVÁNÍ NA VLASTNOSTI POLYMERŮ.....	30
3.3.1 Materiály pro radiační síťování.....	31
3.3.2 Chemické vlastnosti	32
3.3.3 Mechanické vlastnosti	32
3.3.4 Tepelné vlastnosti.....	33
4 STATICKÉ ZKOUŠKY DLOUHODOBÉ	36
4.1 CREEPOVÉ ZKOUŠKY (TEČENÍ).....	37
4.1.1 Creepové vlastnosti polymerů	40
4.1.2 Měření deformace creepové zkoušky	43
4.2 RELAXAČNÍ ZKOUŠKY	46
4.2.1 Měření relaxačního napětí.....	48
II PRAKTICKÁ ČÁST	50
5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	51
6 POUŽITÝ MATERIÁL	52
6.1 POLYBUTYLENTEREFTALÁT (PBT)	52
6.1.1 Použití PBT	52
6.1.2 Parametry vstřikovacího stroje pro PBT	52

7	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	53
7.1	ZKUŠEBNÍ TĚLESA	53
7.2	VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	54
8	SÍŤOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	56
8.1	MĚRNÉ JEDNOTKY PŘI OZAŘOVÁNÍ MATERIÁLŮ	57
9	KONSTRUKCE MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ	58
9.1	NÁVRH UPÍNACÍCH ČELISTÍ.....	58
9.2	NÁVRH MĚŘICÍHO STOJANU	60
9.3	ZÁVAŽÍ.....	61
10	STATISTICKÉ VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	63
11	POUŽITÁ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ.....	64
11.1	LASEINTERFEROMETR RENISHAW XL-80	64
12	CREEPOVÁ ZKOUŠKA MATERIÁLU.....	66
12.1	MĚŘENÍ PROTAŽENÍ POMOCÍ LASERU RENISHAW.....	66
12.1.1	Měření neozářeného PBT s frekvencí záznamu 1 kHz	67
12.1.2	Měření neozářeného PBT s frekvencí záznamu 10 Hz	69
12.2	MĚŘENÍ CREEPOVÉ ZKOUŠKY POMOCÍ ČÍSELNÍKOVÉHO ÚCHYLKOMĚRU.....	71
12.2.1	Creepové zkoušky neozářeného PBT.....	72
12.2.2	Creepové zkoušky PBT ozářeného 33kGy.....	75
12.2.3	Creepové zkoušky PBT ozářeného 66 kGy.....	77
12.2.4	Creepové zkoušky PBT ozářeného 99 kGy.....	79
13	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	81
	ZÁVĚR	84
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	86
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	89
	SEZNAM OBRÁZKŮ	92
	SEZNAM TABULEK.....	95
	SEZNAM PŘÍLOH.....	96
III	PŘÍLOHY	97

ÚVOD

V dnešní době jsou polymery hojně využívány a nahrazují se jimi například materiály z kovu, či jiných materiálů. Je to způsobeno tím, že polymerní materiály jsou vyhledávány především kvůli jejich relativně jednoduché zpracovatelnosti, výrobě a jejich odolávání vůči povětrnostním vlivům apod.

Technický pokrok a trend rozvoje polymerů vedl postupem času ke stále větším nárokům na jejich vlastnosti. Proto bylo nezbytné najít způsob, jak výsledné vlastnosti polymerů vylepšit a nahrazovat jimi jiné, mnohdy dražší, konstrukční materiály.

Jedním ze způsobů zlepšení vlastností polymerních materiálů je jejich ozáření (elektronovým nebo gama zářením). Při ozařování vznikají v materiálu radikály, při jejichž následné reakci vzniká v materiálu chemický proces síťování.

Radiačním ozářením lze u běžně používaných materiálů, zlepšit jejich mechanické, chemické a tepelné vlastnosti. Nespornou výhodou radiační ozáření je, že jej lze provádět za pokojové teploty na hotových výrobcích. Radiační ozařování se používá v mnoho průmyslových odvětvích, ať už je to automobilový, letecký, elektrotechnický průmysl, tak i v lékařství (sterilizace chirurgických nástrojů).

Cílem této práce je zjistit, jak radiační záření ovlivňuje výsledné vlastnosti vybraného materiálu při jejich dlouhodobém zatížení - creepu. Z materiálu budou vyrobeny zkušební tělesa a následně odeslány do firmy BGS GmbH & Co, KG, kde se nechají ozářit. Následně se budou měřit a vyhodnocovat jejich creepové vlastnosti před a po ozáření na zkonstruovaném měřícím aparátu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

1.1 Obecně k polymerům

Polymery jsou chemické makromolekulární látky neobvyklé šíře vlastností, obsahující ve svých obrovských molekulách atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často dusíku, chloru i jiných prvků. Polymery jsou ve formě výrobku prakticky v tuhém stavu, ale v určitém stadiu zpracování ve stavu v podstatě kapalném, dovolujícím, většinou za zvýšené teploty a tlaku, udělit budoucímu výrobku nejrůznější tvar, podle jeho předpokládaného použití. [1]

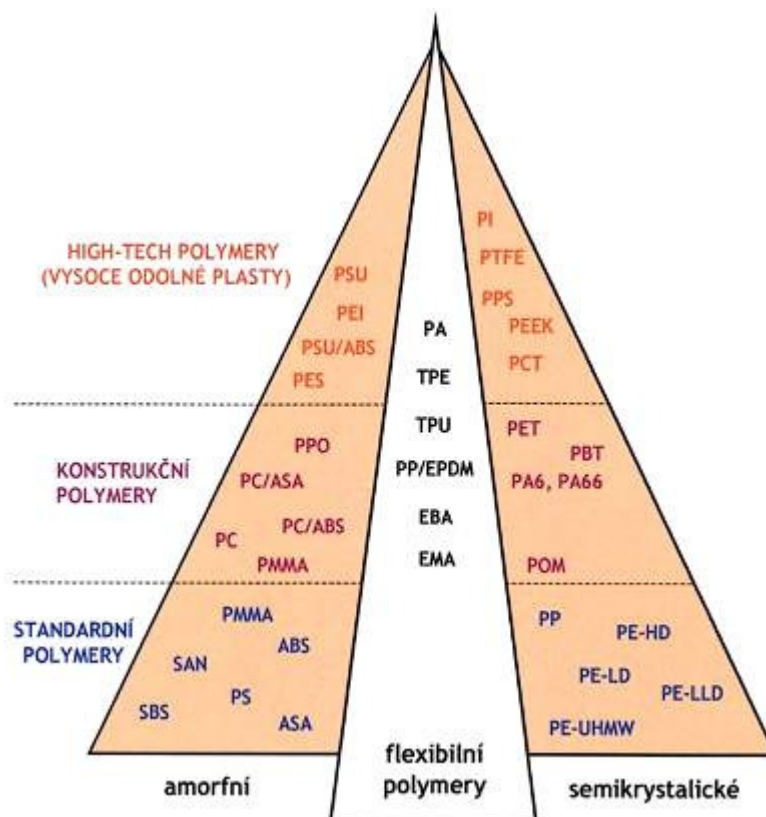
Molekuly polymerů se vyznačují tím, že v jejich řetězové struktuře se mnohonásobně opakuje jedna nebo více základních jednotek – **merů**. Názvosloví většiny základních pojmů makromolekulární chemie vychází z řečtiny (předpona **makro-** značí velký rozměr, **poly-** obecně označuje mnohost, četnost nebo různost; naopak **mono-** ve složeninách znamená jedno-, samo-; **oligo-** tento název znamená několik). [2]

Monomery jsou látky o nízké molekulové hmotnosti a vhodné chemické struktuře, které mohou sloužit jako surovina pro výrobu polymerů. Je zřejmé, že vhodným pospojováním malých neokul monomerů (obsahujících v molekule jednu jedinou základní strukturní jednotku) může vzniknout makromolekula, ve které je mnoho merů nějakým způsobem uspořádáno – tedy **polymer**. [2]

1.2 Rozdělení polymerů

Podle aplikace a podle konstrukční složitosti vyráběných dílů, lze plasty rozdělit do následujících skupin:

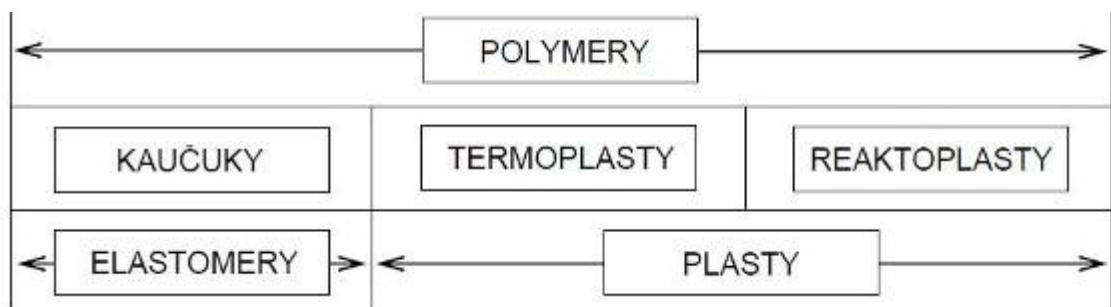
- **plasty pro široké použití** – mezi tyto polymery patří polyolefiny (PE, PP), polystyrénové hmoty (PS), polyvinylchlorid (PVC), fenolformaldehydové (PF) a močovinoformaldehydové hmoty (UF). [3]
- **plasty pro inženýrské aplikace** - zde lze zařadit polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyoximetylén (POM), polymetylmakrylát (PMMA), terpolymer ABS, polyfenilénoxid (PPO), polyuretan (PU), epoxidové (EP) a polyesterové (UP) pryskyřice. [3]
- **plasty pro špičkové aplikace** - do této skupiny polymerů můžeme zařadit polysulfon (PSU), polyfenylénsulfid (PPS), tetrafluoretylén (PTFE), polyimidy (PI) aj. [3]



Obr. 1. Rozdělení polymerů dle aplikace a jejich nadmolekulární struktury [3]

Na základě teplotního působení můžeme rozdělit materiály do těchto skupin:

- **termoplasty** - jedná se o polymerní materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu, do stavu vysoce viskózních neneutronovských kapalin, kde je lze snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání T_m (semikrystalické plasty), resp. teplotu viskózního toku T_f (amorfní plasty). Protože při zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury, lze proces měknutí a následného tuhnutí opakovat teoreticky bez omezení. Jedná se pouze o fyzikální proces. K termoplastům patří většina zpracovávaných hmot, jako je polyethylen (**PE**), polypropylen (**PP**), polystyren (**PS**), polyvinylchlorid (**PVC**), polyamid (**PA**), aj. [3]
- **reaktoplasty** - jedná se o polymerní materiály, dříve nazývané termosety, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury, k tzv. **vytvrzování**. Výrobek je možno považovat za jednu velkou makromolekulu. Ochlazování reaktoplastů probíhá mimo nástroj, neboť zajištění rychlého ohřevu formy pro vytvrzení a následné rychlé ochlazení materiálu by bylo obtížné. Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit, dalším zahříváním dojde k rozkladu hmoty (degradaci). Patří sem fenolformaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice (**EP**), polyesterové hmoty, apod. [3]
- **kaučuky, pryže a elastomery** - jedná se o polymerní materiály, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury, probíhá tzv. vulkanizace. U elastomerů na bázi termoplastů nedochází ke změnám chemické struktury, proces měknutí a následného tuhnutí lze opakovat teoreticky bez omezení, probíhá zde pouze fyzikální děj. [3]



Obr. 2. Základní klasifikace polymerů

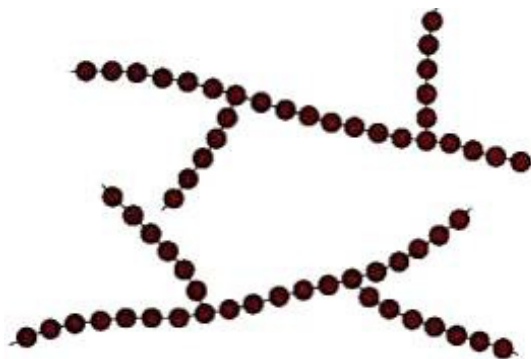
V zásadě můžeme polymerní makromolekuly rozdělit do tří po sobě jdoucích samostatných skupin na:

- **lineární makromolekuly** - vznikají tak, že se jednotlivé monomerní molekuly řadí vedle sebe (viz Obr. 3.). Lineární makromolekuly se mohou z prostorových důvodů více přiblížit jedna ke druhé a vyplnit tak kompaktnější prostor. Polymery potom mají vyšší hustotu. Lineární makromolekuly snáze vytvářejí prostorově pravidelné shluky krystalických struktur, takže tyto polymery mají vyšší obsah krystalických podílů. Plasty s lineárními makromolekulami jsou obvykle dobře rozpustné a tavitelné (dobrá pohyblivost makromolekul), v tuhém stavu se vyznačují houževnatostí a ve formě tavenin dobrou zpracovatelností. [3]



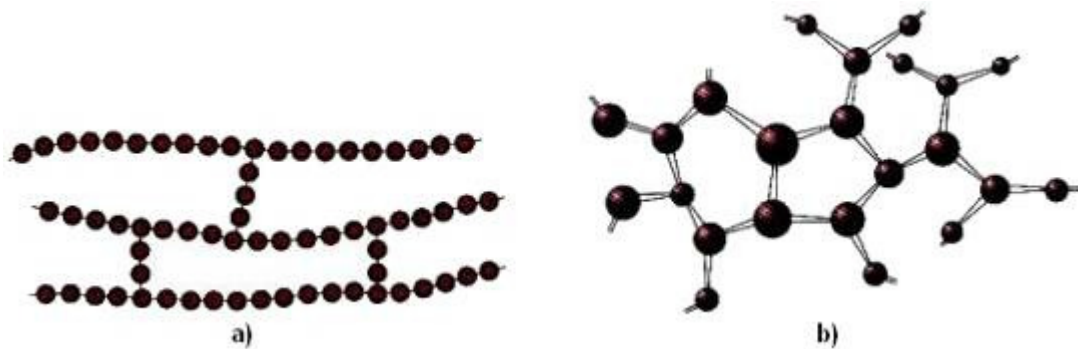
Obr. 3. Tvar lineárních makromolekul [4]

- **rozvětvené makromolekuly** (typické pro termoplasty) - se vyznačují tím, že mají na základním řetězci boční větve (viz Obr. 4.). Rozvětvené makromolekuly se na rozdíl od lineárních makromolekul nemohou v důsledku bočních větví jedna ke druhé dostatečně přiblížit → vyznačují se nižší hustotou. Uspořádanost jejich shluků je nízká, a proto hůře krystalizují a mají nižší stupeň krystalinity. Rozvětvení zhoršuje i pohyblivost makromolekul a tedy i tekutost v roztaveném stavu. Boční řetězce, které způsobují oddálení sousedních makromolekul, mají za následek pokles mezimolekulárních sil a tím zhoršení většiny mechanických vlastností. [3]



Obr. 4. Tvar rozvětvených makromolekul [4]

- **zesíťované makromolekuly** (kaučuky, reaktoplasty) - v tomto případě je několik přímých nebo rozvětvených makromolekulárních řetězců mezi sebou propojeno vazbami, takže vytvářejí jednu takřka nekonečnou makromolekulu - **prostorovou síť** (viz Obr. 5.). Tato síť vede ke ztrátě tavitelnosti a rozpustnosti polymeru. Polymery vykazují vysokou tvrdost, tuhost a odolnost proti zvýšené teplotě, avšak nízkou odolnost proti rázovému namáhání. Síťe mohou být řídké, což je charakteristické pro elastomerní kaučukovité polymery, nebo husté (reaktoplasty). [3]



Obr. 5. Tvary zesíťovaných makromolekul [4]

a – makromolekuly se zkříženými vlákny, b – prostorově zesíťované makromolekuly

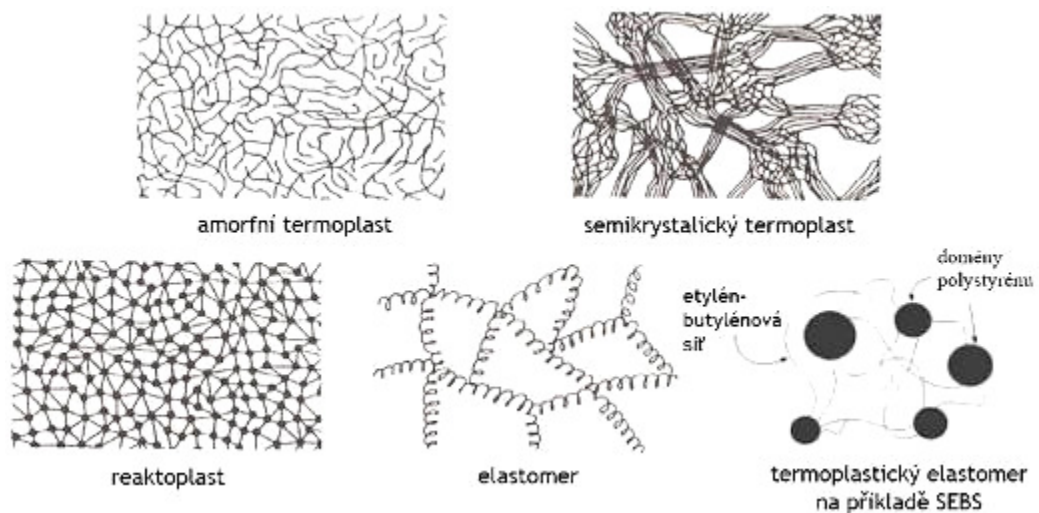
Polymery se podle stupně uspořádanosti, kdy nadmolekulární struktura je nadřazena makromolekulám, dělí na:

- **amorfní plasty** - jejich makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici. Patří sem například PS, PMMA, PC, apod. Jsou charakteristické tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností, modulem pružnosti. Součinitel teplotní roztažnosti α je menší, než u semikrystalických polymerů. Použitelnost amorfních polymerů je do teploty zesíťování T_g . [3]

Tab. 1. Součinitel teplotní roztažnosti plastů v závislosti na jejich nadmolekulární struktuře [3]

	Druh plastu	α [$10^{-5}/K$]
Semikrystalické polymery	PI	0,52
	HPDE	0,45
	LDPE	0,35
	POM	0,29
	PEEK	0,25
	PTFE	0,25
	PP	0,24
	PA6	0,21
	PA 6.6	0,20
Amorfní plasty	PSU	0,22
	PC	0,21
	PMMA	0,19
	SAN	0,18
	ASA	0,18
	ABS	0,17
	PVC	0,16
	PC	0,15

- **krystalické (semikrystalické) plasty** - vykazují určitý stupeň uspořádanosti. Ten se označuje jako stupeň krystalinity (pohybuje se od 40 do 90 %) a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí, uložených mezi oblastmi amorfními. Nemůže nikdy dosáhnout 100 %, proto se krystalické plasty označují jako semikrystalické. Patří sem PE, PP, PA, PTFE, POM, aj. Jsou mléčně zakalené, index lomu je větší a jsou charakterizovány houževnatostí materiálu, pevnost a modul pružnosti roste se stupněm krystalinity. Použití semikrystalických plastů je do teploty tání T_m . [3]



Obr. 6. Nadmolekulární struktura polymerů [3]

Rozdělení podle druhu přísad na:

- **neplněné plasty** - neplněný plast je takový plast, u kterého množství přísad neovlivňuje vlastnosti polymerní matrice. [3]
- **plněné plasty** – plnivo ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti plastu. Makromolekulární látka plní funkci pojiva a určuje základní fyzikální a mechanické vlastnosti hmoty. Přísadou mohou být plniva, stabilizátory, maziva, barviva, změkčovadla, iniciátory, nadouvadla, tvrdidla, retardéry hoření, apod. [3]

Rozdělení polymerů podle polarit:

- **polární plasty** – mají trvalý dipól a mezi polární plasty patří PA, některé pryskyřice, atd. [3]
- **nepolární plasty** – nemají trvalý dipól a patří sem PE, PP, PS, atd. [3]

Tab. 2. Základní systematické rozdělení plastů dle chemického složení [3]

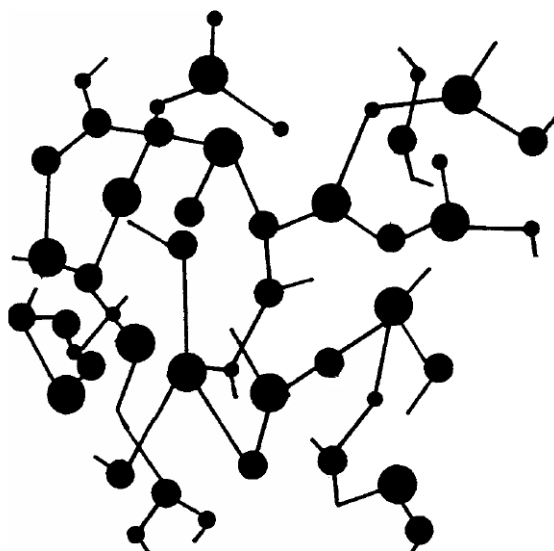
TERMOPLASTY			
Polyolefiny		Akryláty	
PE	polyetylén	PMMA	polymetylmetakrylát
HDPE	lineární polyetylén	MBS	metylmetakrylát - butadien - styrén
	LDPE	Polyamidy	
	UHMWPE	PA	polyamid
PP	polypropylén	Polyétery	
Chlorované plasty		POM	polyoxymetylén
PVC	polyvinylchlorid	PFO	polyfenylénoxid
Styrénové plasty		Polyestery	
PS	polystyrén	PET	polyetyléntereftalát
PS-GP	standartní polystyrén	PBT	polybutadienstyren
	PS-HI	PC	polykarbonát
	PS-E	Vinylové plasty	
SB	styrén butadien	PVAC	polyvinylacetát
ABS	akrylonitril - butadien - styren	Ketony, sulfidy, sulfony a imidy	
SAN	styrén - akrylonitril	PEEK	polyéteréterketon
ASA	akrylonitril - styrén - akrylát	PPS	polyfenylénsulfid
Fluoroplasty		PSU	polysulfon
PTFE	polytetrafluóretylén	PES	polyéthersulfon
ETFE	etylén - tetrafluóretylén	PI	polyimid
REAKTOPLASTY			
Fenoplasty		Epoxidy	
PF	fenolformaldehydová pryskyřice	EP	epoxidová pryskyřice
Aminoplasty		Polyestereové pryskyřice	
UF	močovinoformaldehydová	PESL	polyesterocé skelné lamináty
MF	melaninová pryskyřice		

2 SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ

Pod pojmem síťované polymery rozumíme makromolekulární látky řetězce, jejichž makromolekuly jsou vzájemně spojeny chemickými vazbami tak, že vytvářejí trojrozměrnou prostorovou síť. Vznikají buď zesíťováním lineárního nebo rozvětveného polymeru, nebo vzájemnou reakcí dvou nebo více monomerů o formální funkčnosti (tj. schopnosti vytvořit chemickou vazbu) větší než 2. Síťování lineárních polymerů je charakteristické pro kaučuky, kde pak mluvíme o vulkanizaci – procesu, poskytujícím pryž. [1]

Polymerní sítě mají v praxi mimořádný význam, protože síťované polymery si zachovávají vratnou elasticitu a nepodléhají nežádoucímu creepu. [8]

Zesíťované polymery nejsou rozpustné v rozpouštědlech, i když se v nich v lineárním stavu výborně rozpouštěly, většinou jimi bobtnají a jsou netavitelné, proto je účelné vytvořit síťovou strukturu až v hotovém výrobku. Do určitého, velmi malého stupně zesíťování si zachovávají jistou tepelnou tvarovatelnost, která však prudce klesá se vzrůstající koncentrací příčných vazeb. [1]

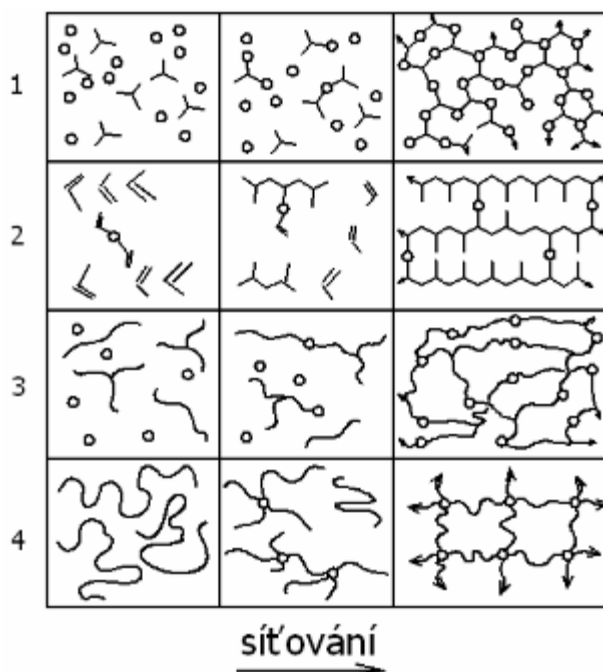


Obr. 7. Struktura sítě vytvrzeného reaktoplastu

2.1 Způsoby výstavby sítí

Chemickým spojováním dvoufunkčních jednotek vznikají lineární polymery. Je-li některá ze složek více než dvoufunkční, dochází v průběhu reakce k větvení a později i ke vzniku nekonečné trojrozměrné struktury, prostorové sítě, gelu. Nesíťované polymery mohou vznikat těmito procesy: [11]

- **postupnými reakcemi nízkomolekulárních látek** – polyadičními či polykondezačními reakcemi vznikají například epoxidové a fenolové pryskyřice. Jejich síť se dokončuje ve vytvrzovacím kroku. [11]
- **polymerační řetězovou reakcí, síťovací polymerací** – například kopolymerací styrenu s divinylbenzinem vznikají hmoty použitelné pro měniče iontů, kopolymerací hydroxyethylmethakrylátu s glykoldimethakrylátem pak hydrofilní gely používané v lékařství. [11]
- **spojováním reaktivních konců nízkomolekulárních polymerů o molární hmotnosti řádu 10^3 gmol^{-1}** – proces vzniku sítě je formálně podobný jako v prvním případě. [11]
- **zavedením příčných vazeb do vysokomolekulárních polymerů** – vulkanizací kaučuků vzniká pryž, ozářením nesíťovaný polyetylen apod. [11]



Obr. 8. Schéma vzniku sítě [11]

Ve všech čtyřech případech probíhají při síťování tyto děje:

- v první fázi vzrůstají rozměry molekul i polydisperzita systému
- při určitém stupni reakce dospěje systém do bodu gelace, ve kterém molární hmotnost vzroste nad všechny meze a v systému se objeví první stopy nekonečné struktury – gelu. [11]
- po překročení bodu gelace se systém skládá ze dvou částí: u nekonečné struktury, gelu, a z molekul konečné velikosti, solu, který lze oddělit extrakcí; gel je nerozpustný, v rozpouštědle pouze botná. [11]
- v dalším průběhu reakce obsah solu klesá a jeho molární hmotnost i polydisperzita se zmenšují. [11]
- v gelu vznikají tzv. elasticky aktivní řetězce sítě, které při deformaci nesou napětí a určují velikost modulu pružnosti gelu a jeho rovnovážný stupeň nabotnění. [11]

Kvantitativním popisem tvorby sítí se zabývá teorie síťování. Její pracovní postup je založen na statických úvahách.

2.2 Síťování kyslíkem

Rozvětvené nenasycené polyestery připravené z trojfunkčního nebo čtyřfunkčního polyalkoholu (glycerolu, pentaerythritolu), dikarboxylové kyseliny (ftalanhydridu) a nenasycených mastných kyselin (linolové, linoleové kyseliny) se označují jako vysychavé alkydy. Alkydy se používají jako pojiva nátěrových hmot a v nátěrovém filmu podléhají zesíťování vzdušným kyslíkem. Tato reakce, která je katalyzována ionty Co^{2+} , Pb^{2+} , Mn^{2+} , aj., bývá označována jako zasychání. Mechanismus síťování probíhajícího na nenasycených mastných kyselinách je odlišný u izolovaných a konjugovaných dvojných vazeb. Izolované dvojně vazby podléhají síťování přes stupeň hydroperoxidu, který se rozpadá na radikály, a sérií následných reakcí umožňuje zesíťování. Zesíťování systémů obsahujících mastné kyseliny s konjugovanými dvojnými vazbami probíhá přes stupeň cyklického peroxidu. [13]

2.3 Síťování peroxidem

Při síťování pomocí peroxidu (dibenzonylperoxid, butyl-peroxid) se obvykle používají vyšší teploty (polymer se při ní taví). V prvním kroku se pomocí tepla rozloží peroxid (ROOR) na volné radikály $RO\cdot$, jenž dále reagují polymerním řetězcem. Při této rekombinaci polymerních radikálu dochází ke spojení řetězce přes C-C vazbu. [12]

Nevýhody tohoto způsobu síťování:

- nízká účinnost (vedlejší reakce peroxidu a volných radikálu)
- nutnost použít velké množství poměrně drahých peroxidů
- míchání směsi polymeru s peroxidy a stabilizátory ve speciálním zařízení [12]

2.4 Síťování pomocí silanů

Peroxid je zde použit na vytvoření primárního radikálu. Molekuly silanu se poté naroubují na tyto primární radikály. Vytvoří se Si-O-Si můstky. Pro optimální rychlost reakce se využívá zvýšené teploty (u PE 80°C až 90°C) a přítomnosti katalyzátoru. Výhoda síťování silany je ta, že proces výroby síťovaného materiálu se provádí na běžných strojích a navíc je zde přípustný širší rozsah teplot než u síťování peroxidem. Problémem je, že při reakci vznikají vedlejší produkty (methanol a voda). [12]

2.5 Radiační síťování

Radiační síťování probíhá při pokojové teplotě bez dodatečného namáhání výrobků. Další výhodou je variace ozařovacích parametrů, kterými lze měnit stupeň síťování v ozařovaném dílu a ovlivňovat tak vlastnosti materiálu přesně podle toho, jak je vyžadováno. Používaná záření (beta, gama) iniciují na základě svých energií chemické procesy. Nezávisle od délky ozařování, nemůže v používaných průmyslových zařízeních ani v ozářených produktech, vzniknout žádná radioaktivita. [14]

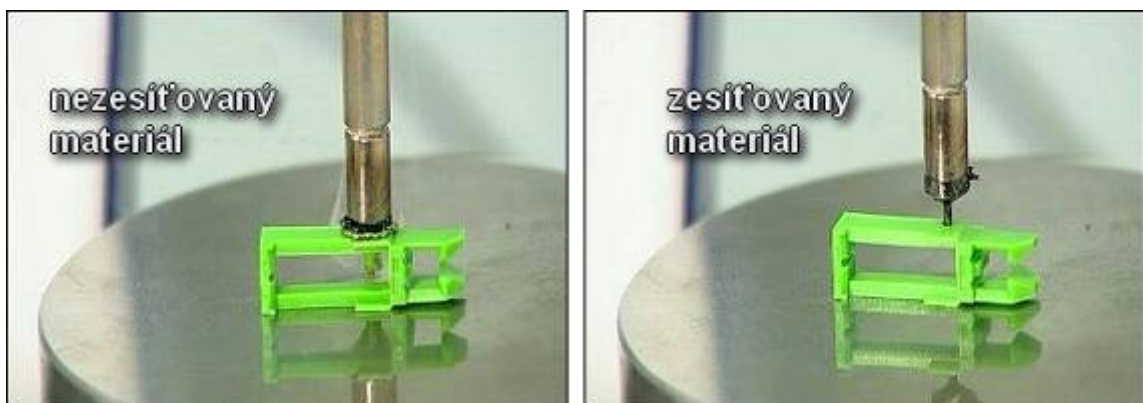
Pro radiační síťování je základní předpoklad, že materiál při působení ionizačního záření převážně síťuje a ne degraduje. U některých polymerů resp. receptur je potřebný přídavek pomocného síťovacího činidla. [14]

U komerčních směsí pro radiační síťování jsou v současnosti používány síťovací činidla zvláště ke zlepšení výsledných vlastností materiálu, k redukci dávek záření, ke snížení hořlavosti, atd. Hlavním předpokladem je přítomnost tří a více funkčních monomerů. Interakcí záření s polymerem vznikají polymerní radikály (rozpad vazeb C-H), ty pomocí rekombinace v řetězci vytvoří síť a to spojením dvou volných radikálů mezi sousedními řetězci za vzniku vazby C-C. Síťování nejčastěji provádíme beta nebo gama zářením. [14]

2.5.1 Radiační síťování polyamidu (PA)

V současné době jsou nejrozšířenější typy používané k radiačnímu síťování PA 6, PA 6.6, PA 11 a PA12. Avšak radiačně síťovatelné jsou veškeré polyamidy. Jestliže jsou v materiálu přídavné látky (aditiva), jsou přidány buď přímo před procesem, nebo už od výrobce. Po nesíťování může mít ozářený materiál výrazně vyšší teplotní odolnost. Rovněž výrazně narůstá deformační odolnost po teplotním namáhání. Takto ozářenými polyamidy lze částečně nahradit termosety a vysoce výkonné plasty, jako jsou kupříkladu PPS, PEI, LCP, atd. [15]

Vzhledem k tomu, že PA má velmi dobré elektrické i mechanické vlastnosti, jsou předurčeny k použití v elektronickém průmyslu. Radiačně síťované polyamidy hojně využíváme rovněž v průmyslu automobilovém, ale i leteckém. V automobilovém průmyslu se používají kupříkladu uvnitř motoru nebo uvnitř výfukového potrubí. Tento trend, využití plastu místo kovu, je především z důvodu redukce hmotnosti a nabízí v této oblasti velký potenciál. [15]



Obr. 9. Materiál před a po radiačním zesíťování [15]

2.5.2 Radiační síťování polybutyltereftalátu (PBT)

PBT získává po radiačním zesíťování značnou tepelnou odolnost. Snese velmi vysoké krátkodobé teplotní zatížení, které může být až 400°C. Speciálně pro technologii 3D-MID byl vyvinut materiál PBT, kde část povrchu je pokovena a část nepokovena. Tento způsob nazýváme tzv. **selektivní pokovování**. Teplotní stabilita nezbytná pro následný pájecí proces je vytvořena samotným ozářením materiálu. Ozářením se zlepšuje celková přilnavost pokovovací vrstvy. Takto ozářené materiály se používají převážně elektrotechnickém průmyslu a to k výrobě spínacích kontaktů relé nebo složité elektroniky.

[15]



Obr. 10. Ozářené konektory z PBT po teplotním zatížení [15]

3 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Pod pojmem záření (radiace) si lze představit přenos energie prostorem prostřednictvím fyzikálních polí nebo mikročástic. Tento přenos energie může být uskutečňován těmito dvěma druhy mechanismů: [16]

- **časově proměnné pole** - šíří se prostorem ve formě vln, které se odpoutávají od zdroje a přenášejí z něj do prostoru část energie. Příkladem jsou elektromagnetické vlny. Hovoříme tedy o vlnovém záření. [16]
- **pohybující se částice** – tyto částice jsou emitovány zdrojem, velkou rychlostí letí prostorem a přenášejí tak kinetickou energii, hybnost, popř. i elektrický náboj ze zdroje do okolního prostoru. Příkladem je záření β (proud rychle letících elektronů) nebo α (proud héliových jader). V tomto případě se jedná o korpuskulární záření. [16]

Záření se může šířit buď:

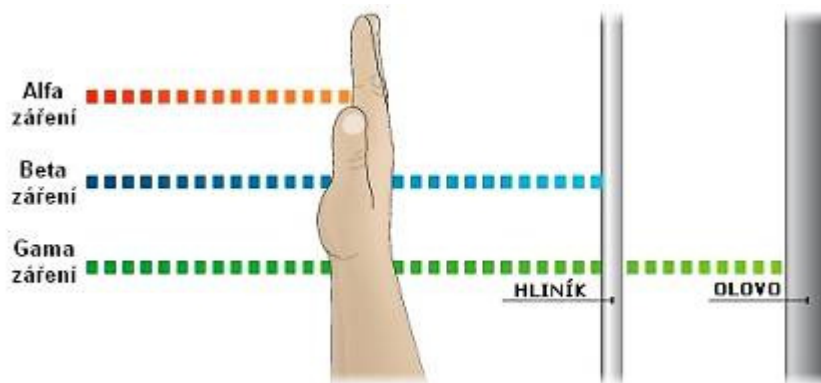
- **ve vakuu** - volné šíření vln a volný pohyb částic podle zákona setrvačnosti. [16]
- **v látkovém prostředí** - část záření může projít původním směrem, avšak větší či menší část záření bývá rozptýlena a absorbována (s příp. následnou re-emisí části záření). Míra rozptylu a absorpce je většinou energeticky závislá, v důsledku čehož při průchodu záření látkou dochází nejen k zeslabení záření, ale často i ke změně jeho spektrálního rozložení. [16]

Různé druhy emitovaného záření zde mají zpravidla značně vysokou energii, mnohem větší než obvyklé světlo. Tato vysoká energie kvant radioaktivního záření a záření X je důležitou vlastností, rozhodující o účincích záření na hmotu – takto vzniklé záření nazýváme tedy ionizující. [16]

Ionizující záření - ionizujícím zářením nazýváme takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat. [16]

Pro běžné druhy záření fotonového (X a γ), elektronového (β) a α se za energetickou hranici ionizujícího záření bere energie 5 keV. Složitější situace je u neutronového záření, kde i velmi pomalé neutrony vstupují do jader a prostřednictvím jaderných reakcí mohou vyvolávat sekundárně ionizaci (a to i zpožděně či dlouhodoběji -

aktivace jader, vznik radionuklidů). Podobně není definována prahová energie u záření β^+ , kde i velmi pomalé pozitrony anihilují s elektrony za vzniku tvrdého ionizujícího záření γ . [16]



Obr. 11. Ukázka průchodnosti ionizujícího záření

3.1 Radioaktivita

Radioaktivita je schopnost některých atomových jader vysílat záření. Přitom se jádro může měnit v jiné nebo alespoň ztratí část své energie. Při jaderné přeměně se pak mění struktura jádra, izotop jednoho prvku se mění na izotop prvku jiného. Radioaktivita může být přirozená nebo umělá. Postupně bylo zjištěno, že existuje několik druhů radioaktivního záření. [20]

3.1.1 Záření alfa (α)

Tento typ záření vydává většina přírodně radioaktivních izotopů. Částicí α se označuje jádro hélia (${}^4_2\text{He}$). Alfa částice je tedy tvořena ze dvou protonů a dvou neutronů, což znamená, že alfa částice je kladně nabitá, a to s nábojem e^{+2} . Proud těchto částic se nazývá alfa zářením. Alfa záření vzniká tak, že původní jádro ztrácí dva protony a dva neutrony. Záření α silně ionizuje prostředí, kterým prochází a dá se velmi snadno odstínit, a to i např. listem papíru. Z hlediska využití je α záření nejméně důležité. α záření vzniká jen z „těžkých“ jader, navíc má malou pronikavost. Příkladem použití jsou hlásiče požárů, v medicíně použití nemá. [17]

Záření alfa se vychyluje jak v elektrickém tak v magnetickém poli. Částice alfa letí velkou rychlostí a mají silné ionizační účinky. Jejich kinetická energie se pohybuje mezi 2 MeV a 8 MeV. [20]

3.1.2 Záření beta (β)

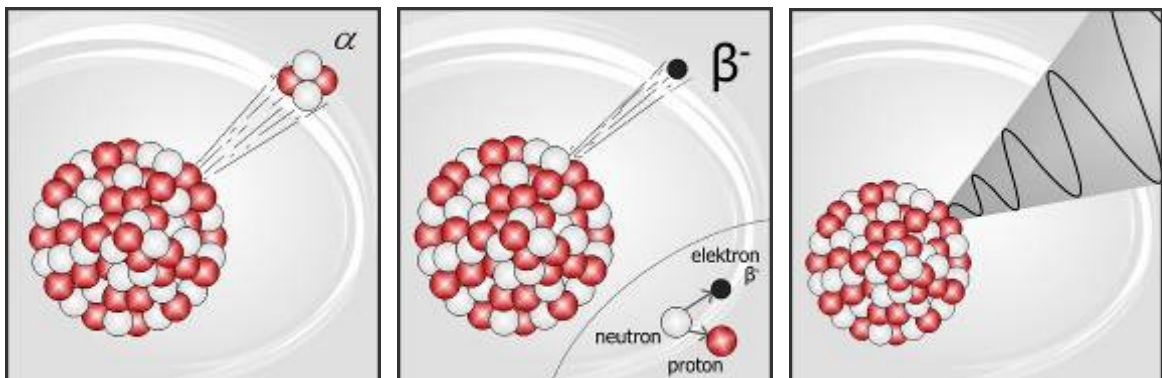
U záření beta rozlišujeme dva druhy. Záření β^- je proud elektronů e^- , které vyletují z jádra atomu. Malá hmotnost částic se projevuje výrazným zakřivením trajektorie částic v jak v magnetickém, tak v elektrickém poli, avšak na opačnou stranu než záření alfa. Energie elektronů záření dosahuje 10 MeV a jejich rychlost se blíží rychlosti světla. Elektrony v jádře vznikají přeměnou z neutronu, za vzniku protonu a antineutrína. K jeho zastavení nebo pohlcení už papír nestačí. Pomůže nám však např. hliníková deska. [20]

Záření β^+ je proud pozitronů e^+ vyzařovaných některými radionuklidy při jaderných přeměnách. Toto záření je však v praxi velmi vzácné a v drtivé většině případů se setkáme s prvním typem záření. [20]

3.1.3 Záření gama (γ)

Gama záření je ve své podstatě elektromagnetické vlnění s vlnovými délkami kratšími než 300 μm . Protože fotony nemají elektrický náboj, neodchyluje se záření gama v elektrickém ani magnetickém poli. Záření gama neexistuje samostatně, ale vždy provází jaderné děje, při nichž vzniká záření alfa nebo beta. [20]

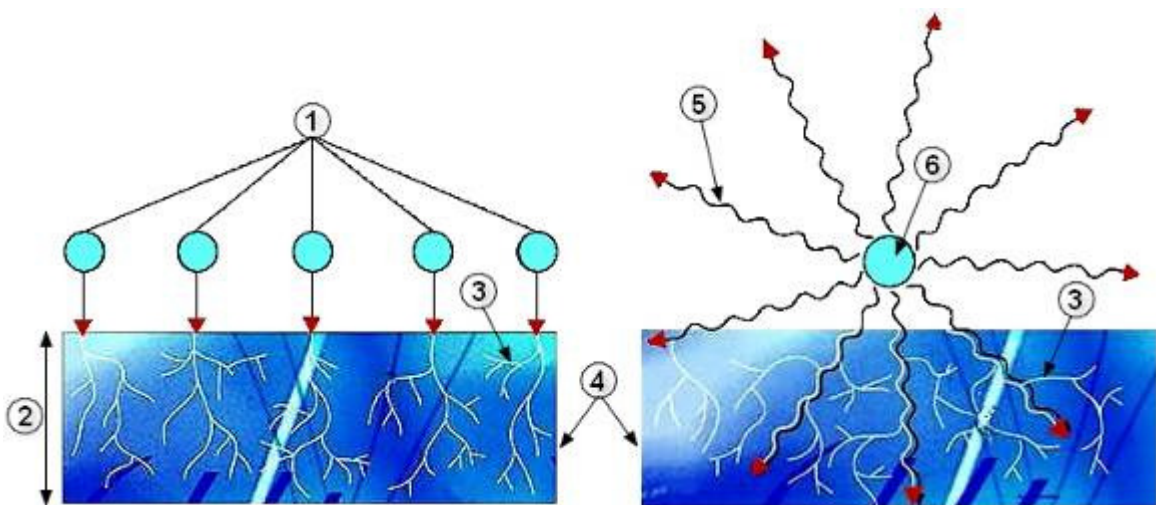
Záření γ je velmi pronikavé, ale méně ionizující. Na pohlcení záření γ je třeba velké masy materiálu. Vhodnější jsou materiály s vyšším atomovým číslem a s vysokou hustotou. Čím energetičtější je záření, tím tlustší stínění je zapotřebí. Schopnost materiálu pohlcovat záření zpravidla vyjadřujeme polotloušťkou materiálu, tj. tloušťkou, po jejímž průchodu se původní intenzita záření sníží na polovinu. Například záření γ , jehož intenzitu 1 cm olova zredukuje na 50 %, bude mít poloviční intenzitu také po průchodu 6 cm betonu. [6]



Obr. 12. Záření alfa, beta a gama [6]

3.2 Rozdíl mezi elektronovým beta a gama zářením

Hlavním rozdílem mezi oběma typy záření je především intenzita dávky ozáření a schopnost proniknout do materiálu. Jedná se buď o elektromagnetické vlny (záření gama) nebo o částicové záření (elektronové - beta záření). Vazebnými technologiemi dojde u polymerních materiálů k radičnímu síťování, které určuje v první řadě dávka ozáření a ta změni vlastnosti materiálu. Materiál absorbuje množství energie na jednotku hmoty. Při průchodu elektronů materiálem následuje aktivace a ionizace molekul v ozářeném materiálu. [14]



Obr. 13. Schéma pronikání elektronového- β a gama- γ záření [14]

1 – primární elektrony, 2 – hloubka proniknutí elektronů,
3 – sekundární elektrony, 4 – ozářený materiál,
5 – gama kvanta, 6 – zdroj záření gama (^{60}Co)

Pronikáním gama kvant do materiálu dochází k různým vzájemně působícím procesům, při nichž vznikají sekundární (excitované) elektrony, které aktivují a ionizují molekuly ozařovaného materiálu. Hlavní rozdíl mezi oběma druhy záření spočívá ve schopnosti pronikání materiálem a intenzitě dávky ozáření. V zařízeních s urychlovači elektronů se pracuje s vysokými intenzitami dávek ozáření, ale s omezenou hloubkou pronikání závislou na energii. [14]

Naproti tomu záření gama má vysokou schopnost penetrace (hloubky pronikání) při relativně nízké intenzitě dávky ozáření. Výkon dávky ozáření je závislý na instalované celkové aktivitě gama zařízení. [14]

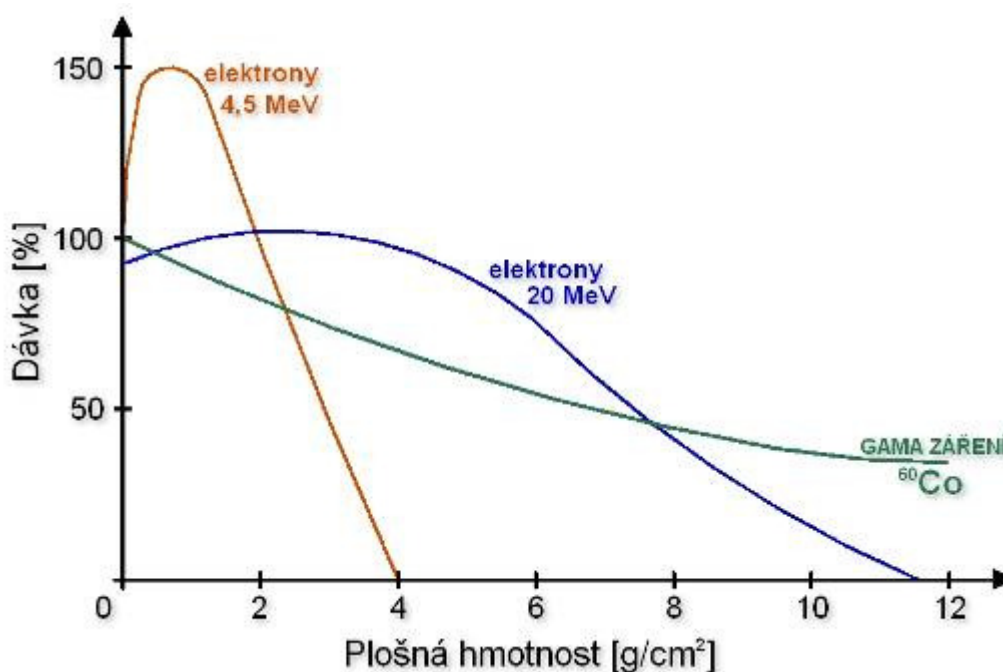
Z hlediska technického použití to znamená, že v urychlovačích elektronů je v průběhu několika sekund dodána dávka, pro kterou by zařízení se zářením gama potřebovalo několik hodin. Proto je v průmyslově využívaných gama zařízeních ozařován větší objem současně. [14]

Tab. 3. Srovnání charakteristik elektronových urychlovačů a gama zařízení [14]

Charakteristika	Elektronový urychlovač	Gama záření
Výkon [kW]	150	15 ÷ 75
Průchodnost [kGy-tun/hod] *	30	1,5
Energie [MeV]	4,5	1,3
Penetrace [cm]	4,0	20
Dávka	150 kGy/s	10 kGy/h

* Množství ozářeného materiálu při dané dávkové intenzitě

Jelikož jsou pro síťování polymerních materiálů potřebné relativně vysoké dávky záření, používá se v současnosti převážně elektronové beta záření. Hlavní oblastí použití gama záření je radiační sterilizace zdravotnických produktů a potravin. Stále více se však využívá i pro síťování plastů, neboť poskytuje oproti elektronovému záření výhody z hlediska větší hloubky proniknutí například u složitých objemných tvarových dílů. [14]

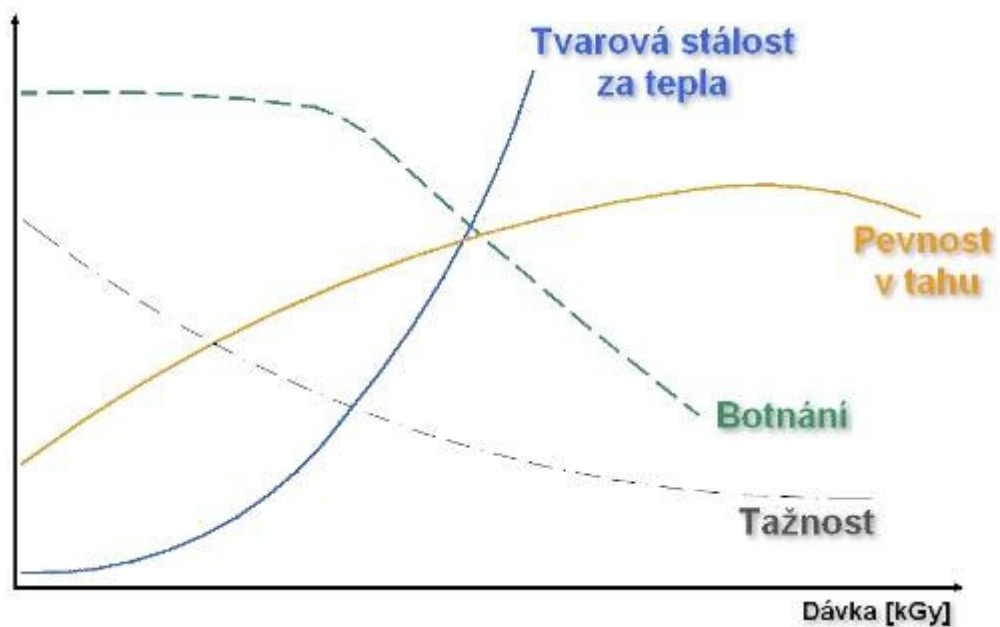


Obr. 14. Schopnost pronikání elektronového- β a gama- γ záření [14]

3.3 Vliv ozařování na vlastnosti polymerů

Některé termoplasty jsou díky radiačnímu síťování převedeny na takové termoplasty, které se v širokých oblastech teplot chovají jako elastomery. Elastomerické vlastnosti se projevují především nad teplotou tání krystalů, respektive teplotou skelného přechodu neupraveného polymeru. [14]

V důsledku radiačního síťování může původně termoplastický výrobek odolávat vyšším teplotám než předtím. Tvarová stálost za působení tepla je značně zlepšena v porovnání s výchozím termoplastickým materiálem. [14]



Obr. 15. Charakteristika vlastností termoplastů na dávce ozáření [14]

3.3.1 Materiály pro radiační síťování

Polymerní materiály vhodné k radiačnímu síťování jsou uvedeny v tabulce níže (Tab. 4.). Vhodný materiál se volí také podle předpokládané oblasti použití výrobku.

Tab. 4. Materiály vhodné pro radiační síťování [15]

TERMOPLASTY	ELASTOMERY
<p>Polyolefiny:</p> <p>CSM, chlorsulfonovaný polyetylen EEA, kopolymer etylenu s akrylátem EPDM, etylenpropylenový kaučuk EPM, etylenpropylenový kaučuk EVA, kopolymer etylenu s vinylacetátem CM, chlorovaný polyetylen PP, polypropylen</p>	<p>ACM, polyakrylátový kaučuk BR, polybutadienový kaučuk CR, polychloroprenový kaučuk FPM, fluor kaučuk IR, polyizoprenový kaučuk NBR, butadien akrylonitrilový kaučuk NR, přírodní kaučuk SBR, butadien styrenový kaučuk SBS, styren-butadien-styrenový kopolymer SI, silikon</p>
<p>Polyestery:</p> <p>PBT, polybutylentereftalát UP, nenasyená polyesterová pryskyřice</p>	<p>Termoplastické elastomery:</p> <p>FPM, fluor kaučuk TPE-E, polyesterový termoplastický elastomer TPE-O, polyolefinický termoplastický elastomer TPE-S, polystyrenový termoplastický elastomer TPE-U, polyuretanový termoplastický elastomer TPE-V, zesíťovaný polyolefinický termoplastický elastomer</p>
<p>Halogenové polymery:</p> <p>ETFE, kopolymer etylenu s tetrafluorethylenem FPM, fluor kaučuk PVC, polyvinylchlorid PVDF, polyvinylidenfluorid</p>	
<p>Další polymery:</p> <p>PA, polyamid (PA 6, PA 11, PA 12, PA 6.6) PVAL, polyvinylalkohol</p>	

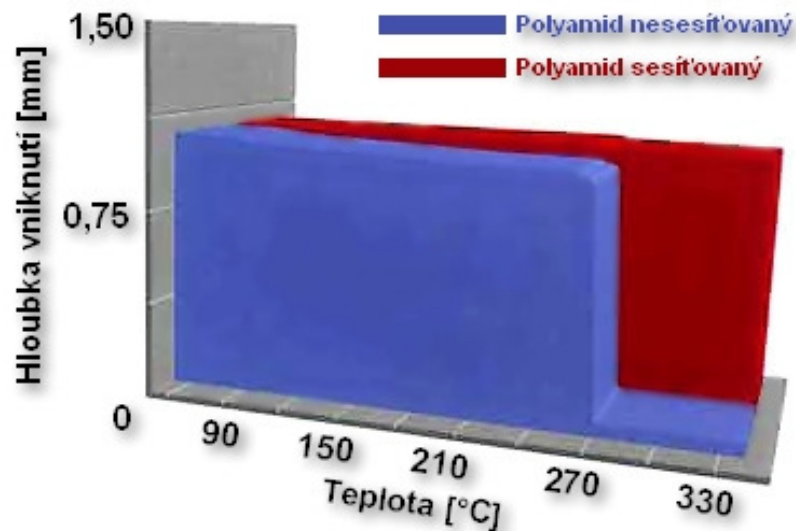
3.3.2 Chemické vlastnosti

Ke zlepšeným chemickým vlastnostem patří: [14]

- snížení rozpustnosti
- zlepšení odolnosti proti bobtnání
- zvýšení odolnosti proti vzniku trhlin způsobených pnutí
- zlepšení odolnosti vůči hydrolyze
- zvýšená olejuvzdornost

3.3.3 Mechanické vlastnosti

Výrazně se ukazuje toto zlepšení např. u smykového modulu jako funkce teploty. Parametrem je dávka ozáření odpovídající stupni zesíťování. Zatímco smykový modul nezesíťovaných termoplastů po překročení teploty přechodu klesne prakticky na nulu, lze u zesíťovaného termoplastu naměřit menší modul, který se v závislosti na stupni zesíťování zvyšuje. [14]



Obr. 16. Termomechanická analýza (TMA) polyamidu [14]

Tečení pod zatížením (creep) může být stanoveno při zkoušce tečení v tahu. Při zkoušce tečení v tahu může být také měřena odolnost proti vzniku trhlin způsobených pnutím.

Radiační síťování mění následující mechanické vlastnosti plastů: [14]

- nárůst modulu
- zvýšení pevnosti z dlouhodobého hlediska
- nárůst tvrdosti (Shore)
- redukce studeného toku - creepu
- zlepšení meze únavy při střídavém ohybu
- zlepšení povrchové pevnosti vůči otiskům a nespojitosti vstřikovaných dílů
- zlepšení odolnosti proti vnitřnímu pnutí a redukce přenosu a růstu
- pokles poměrného prodloužení při přetržení
- zlepšení zotavení materiálu „**memory effect**“
- zlepšení otěruvzdornosti
- zlepšení chování při dlouhodobém zatížení vnitřním tlakem

3.3.4 Tepelné vlastnosti

U tepelných vlastností dochází v důsledku síťování ke: [14]

- zlepšení tvarové stálosti za tepla
- cílenému nastavení tepelné roztažnosti (Hot/Set, Hot/Modul)
- zlepšení trvalé deformace při zatížení tlakem (tahem)
- zvýšení tepelné odolnosti
- zvýšení odolnosti proti vniknutí žhavého drátu
- vyšší odolnost vůči stárnutí

Radiační sítování je vcelku jednoduchá a ekologická metoda se širokou škálou možného využití. V následující tabulce jsou uvedeny vybrané aplikace v průmyslu a vlastnosti, které materiály získají po ozáření.

Tab. 5. Příklad vybraných aplikací a vlastností získaných po ozáření [14]

Aplikace	Materiál	Zlepšené vlastnosti
Palivová potrubí pro automobilový průmysl	PA 6, PA 6.6, PA 11, PA 12	Tepelná odolnost Odolnost proti hydrolyze Pevnost v tlaku Pevnost
Vlnité trubky Tlakové a sací potrubí Ochranné trubky	PE, EVA, TPE	Tepelná odolnost Pevnost v tlaku Odolnost proti okujím ze svařování
Smršťovací trubky Smršťovací hadice	PE	Zotavení materiálu „ memory effect “
Těsnění Profily	PE, TPE	Odolnost proti chemikáliím Tvarová stálost za tepla Tlaková zpětná deformovatelnost Snížené studené tečení – (creep) Možný nárůst tvrdosti Shore
Kabely a izolace vodičů	PE, TPU, PUR, PVC	Tepelná odolnost Odolnost proti okujím ze svařování Odolnost proti chemikáliím Odolnost proti otěru
Hadice pro zdravotnickou techniku	PE	Sterilizovatelnost horkou párou

Beta a gama záření se optimalizují levnější masové nebo konstrukční plasty a propůjčují se jim mechanické, tepelné a chemické vlastnosti vysoce odolných konstrukčních termoplastů. [14]

Při ozařování se používají různé elektronové (beta) zářiče a gama zařízení. V elektronovém urychlovači jsou elektrony nabíjeny energií vlivem vysokého napětí. V gama zařízení je využita energie gama kvant, která vzniká rozpadem radioizotopu kobaltu Co^{60} . [14]

Energie ze záření je materiálem absorbována. Vznikají primární radikály, které spolu reagují při následné chemické reakci a vytvářejí očekávané spojení, tzv. link. Radiační síťování si vystačí většinou bez dalších přísad a probíhá při pokojové teplotě bez dodatečného namáhání výrobků. [14]

Variacemi ozařovacích parametrů ovlivňujeme vlastnosti materiálů přesně podle toho, jak je vyžadováno. Pomocí dodatečných stínících přípravků můžeme dokonce měnit stupeň síťování v ozařovaném dílu. Ozářené produkty nejsou ani radioaktivní a nesmí potom emitovat žádné vlastní záření. [14]

4 STATICKÉ ZKOUŠKY DLOUHODOBÉ

Za účelem získání přesnějších informací o dlouhodobém chování polymerů při napětí nebo deformaci jsou zaváděny speciální dlouhodobé zkoušky. Vynutila si to skutečnost, že celá řada polymerů má sklon téci, tzn. deformovat se za normální teploty již svou vlastní tíhou, tedy při relativně malém zatížení (studený tok). [21]

Tyto zkoušky byly prováděny u kovů; u polymerů se používají teprve několik let, kdy došlo k určitému sjednocení používaných metod. Pro přesné stanovení závislosti deformačních vlastností na čase používáme dvou postupů. Při konstantní teplotě se jedna proměnná – napětí nebo deformace – udržuje konstantní a u druhé proměnné, tj, deformace nebo napětí, se přesně měří její změna v závislosti na čase. [21]

Na změnu deformace při konstantním napětí jsou zaměřeny creepové deformační zkoušky. Naopak na změnu při konstantní deformaci zase zkoušky relaxace napětí.

Klíčovou otázkou u viskoelastických materiálů je, že jejich vlastnosti jsou závislé na teplotě, rychlosti zatěžování, a především času. Proto u krátkodobě trvajících zkoušek nelze předpovědět dlouhodobé chování materiálu. Zkoušky by měli být provedeny tak, že měříme odezvu viskoelastických materiálů v závislosti napětí na čase. [18]

Proto jsou creepové zkoušky vyvinuty pro tento účel. Vyhodnocená data z těchto creepových zkoušek jsou užitečné pro určení modulu tečení a pevnosti materiálů a pro zjištění rozměrových změn v dlouhodobém horizontu. Tyto informace jsou užitečné pro srovnání materiálů, konstrukce dílů a charakterizují nám vlastnosti plastů pro dlouhodobé použití. [18]

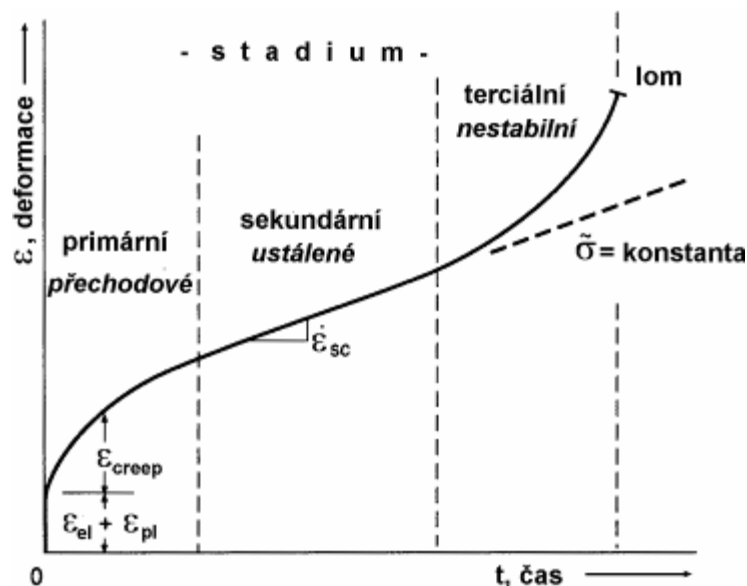
4.1 Creepové zkoušky (tečení)

Creepové zkoušky jsou prováděny především v tahu, i když jsou normovány i zkoušky v ohybu a tlaku, které jsou snadno proveditelné na jednodušším zařízení. Způsob vyhodnocování je však stejný a tahovým deformacím se dává přednost pro jejich větší citlivost a jednodušší mechanismus deformace. [21]

Upevníme li zkušební těleso tak, aby bylo na jednom konci pevně uchyceno a na druhém bylo napínáno konstantní silou, bude se pomalu deformovat. Změna deformace bude dána zvětšováním původní délky l_0 a Δl a je vyjadřována poměrným prodloužením nebo protažením v procentech:

$$\varepsilon_t = \frac{l_0}{\Delta l} \cdot 100 \quad \% \quad (1)$$

Při creepových zkouškách se předpokládá, že zmenšení průřezu zkušebního tělesa je zanedbatelné. Sleduje se protažení zkušebního tělesa v různých časových intervalech a ze získaných hodnot se sestavuje základní creepová křivka (závislost deformace na čase).



Obr. 17. Obecná creepová křivka [22]

Počáteční stadium elastická + plastická deformace a následná kumulace plastické deformace v důsledku creepu. Rychlost deformace $\dot{\varepsilon}$ daná derivací křivky $\varepsilon - t$ je na začátku zkoušky poměrně vysoká. Dále $\dot{\varepsilon}$ klesá a často se stává konstantní v bodě, který označujeme jako konec primárního stadia. Primární stadium někdy označujeme jako přechodové stadium. Druhé stadium (sekundární creep) je charakteristické konstantní

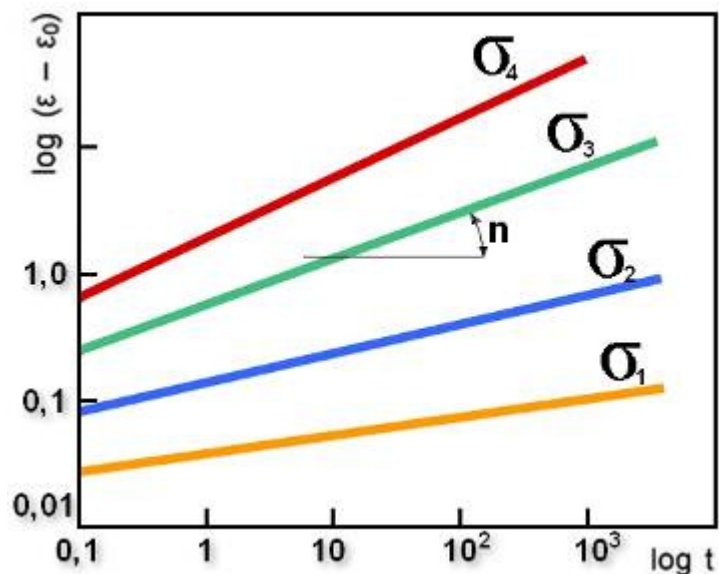
hodnotou $\dot{\epsilon}_{sc}$. Na konci sekundárního stadia $\dot{\epsilon}$ začíná růst a dochází k nestabilnímu chování, jež vede k lomu - terciální creep. [22]

Tvar křivek je dán typem polymeru, zda jsou polymery lineární či rozvětvené, jaký mají stupeň krystalinity apod. Časově závislé chování polymerů se znázorňuje pomocí mechanických modelů, složených z prvků představující pružnou (ocelová pružina) a viskózní deformaci (píst), které lze matematicky popsat. [21]

Pro praktické využití vyhovuje však empiricky odvozený vztah, který popisuje změnu deformace při namáhání tahem a má tvar: [21]

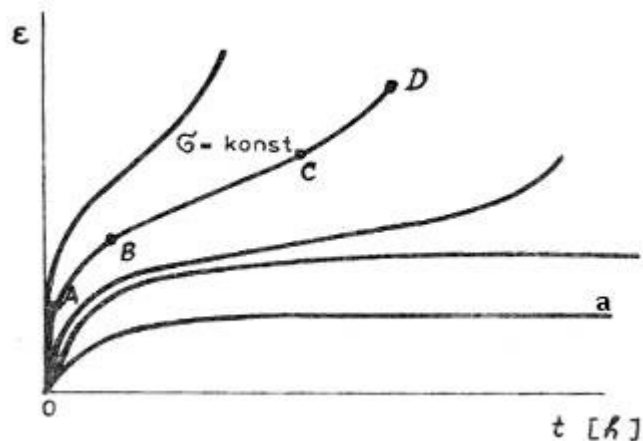
$$\epsilon = \epsilon_0 + m \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^n \quad (2)$$

Vynesením hodnot deformace v logaritmicích souřadnicích $\log(\epsilon - \epsilon_0)$ proti $\log t$ lze graficky vyjádřit průběh creepové deformace přímkou se sklonem n (viz. Obr. 18.)



Obr. 18. Průběh creepové deformace

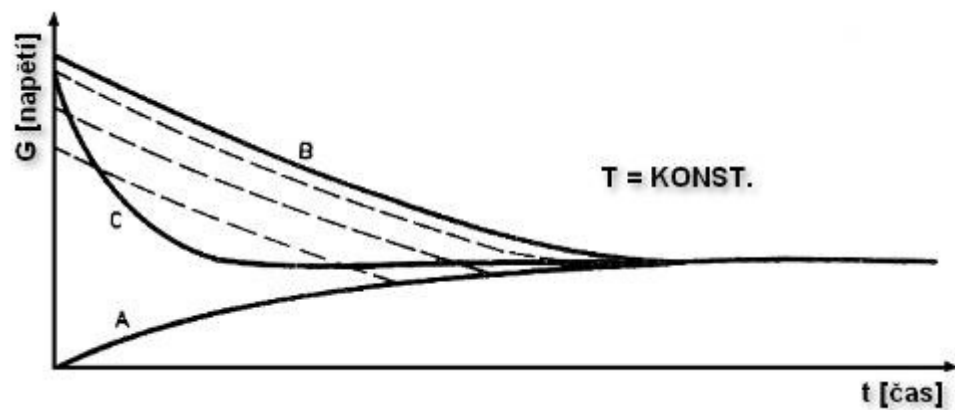
V praxi se vyskytují creepové křivky ve dvou typech. Křivky prvního typu jsou ty, ve kterých se rychlost deformace při konstantním zatížení pozvolna zmenšuje, a to až do jistého času, při kterém rozvoj deformace zaniká. Materiál se v dalším čase zatížení již více nedeformuje a nedojde ani jeho porušení, jak ukazuje Obr. 19, křivky *a*.



Obr. 19. Křivka prvního typu [21]

Creepové křivky druhého typu jsou charakterizovány třemi oblastmi, a to oblastí se zmenšující nerychlostí deformace, která v druhé oblasti přechází do ustáleného tečení a končí v třetí oblasti křehkým, resp. tažným porušením materiálu. Na základě těchto vlastností byly definovány tři mezní stavy polymerních materiálů:

- **První mezní stav** – nastává při malých velikostech napětí, maximální hodnotou jeho vzniku se jeví mez dlouhodobé pevnosti. Deformace lze považovat za viskoelastické (tj. po odlehčení plně vratné). [21]
- **Druhý mezní stav** – je to stav porušení materiálu při dlouhodobém zatížení. Tento hraniční stav vyjadřuje křivka časové pevnosti, která se sestavuje z koncových bodů creepových křivek. Křivka časové pevnosti popisuje pokles meze pevnosti u počáteční okamžité hodnoty k mezi dlouhodobé pevnosti. [21]
- **Třetí mezní stav** – stav, při kterém přechází deformace do oblasti ustáleného tečení. Stav přechodu se vyznačuje změnou povahy časově rozvíjené deformace. Zatímco deformace před dosažením tohoto mezního stavu lze považovat za viskoelastické, v oblasti ustáleného tečení vznikají složky deformace plastického toku, které mají nevratný charakter. [21]



Obr. 20. Diagram mezních stavů [21]

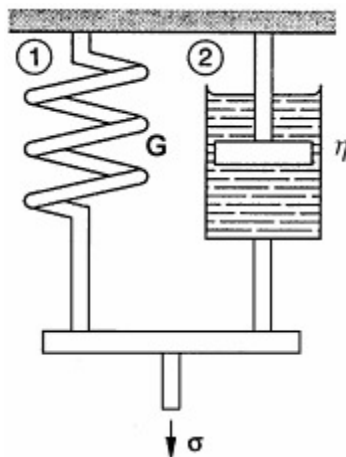
*A – křivka prvního mezního stavu,
B – křivka druhého mezního stavu,
C – křivka třetího mezního stavu*

4.1.1 Creepové vlastnosti polymerů

Jak už bylo zmíněno, tak lze popsat creepové chování různými reologickými modely. Existuje mnoho teoretických a empirických vztahů, které byly navrženy pro závislost napětí na čase pro creepové zkoušení plastů.

Kelvinův model

Nejzákladnější model pro popis creepového chování (tečení). Skládá se s pružiny s modulem G (E) a viskózního elementu se smykovou viskozitou η , zapojených paralelně (vedle sebe). [23]



Obr. 21. Schéma Kelvinova modelu [24]

1 – pružina, 2 - píst

Celkové napětí, působící na model, je součtem napětí na obou základních elementech. Řídící rovnicí pro Kelvinův model tedy je:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon} = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (3)$$

Deformace obou základních elementů se pak rovná:

$$\gamma = \gamma_1 = \gamma_2 \quad (4)$$

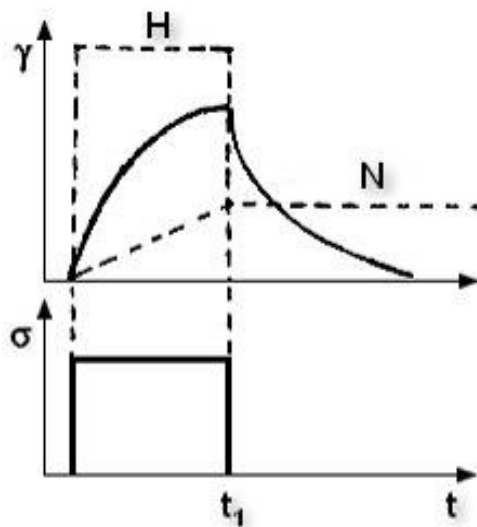
Po úpravě

$$\sigma = G \cdot \gamma + \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} = G \cdot \gamma + G \cdot \tau \cdot \frac{d\gamma}{dt} \quad (5)$$

kde τ označuje tzv. **retardační čas**

Creepová poddajnost $\mathbf{J(t)}$ definujeme tímto vzorcem:

$$J(t) = \frac{1}{G} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (6)$$



Obr. 22. Závislost deformace na čase [24]

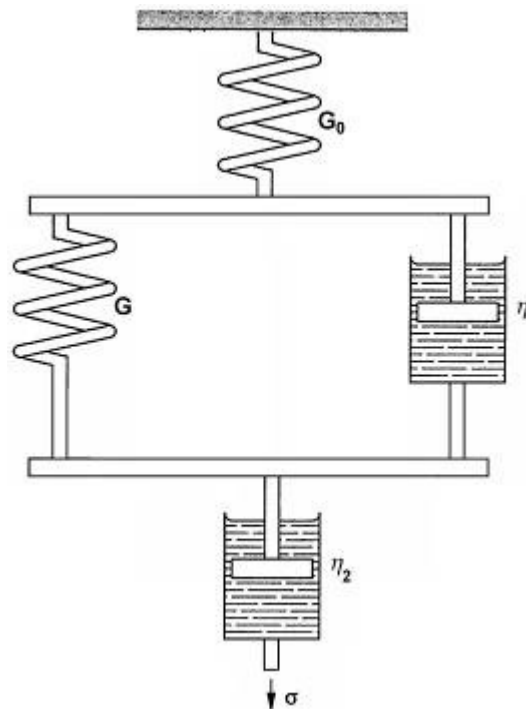
H – průběh deformace Hookovského elementu

N – průběh deformace Newtonského elementu

Na popis mechanických vlastností polymerů, závislých na čase, musíme nevyhnutelně použít dvouparametrové modely, o kterých říkáme, že jsou tzv. **mechanicky ekvivalentní**. Porovnáním creepových měření s teoretickým předpokladem podle empirických vztahů se zjistilo, že jednoduchý Kelvinův model je nepřesný. Proto se konstruuje složitější creepové modely. [23]

Tucketův model

Získáme zapojením pružiny (G_0), Kelvinova modelu (G, η_1) a viskozitního elementu (η_2) do série (viz Obr. 23.) [23]



Obr. 23. Tucketův creepový model

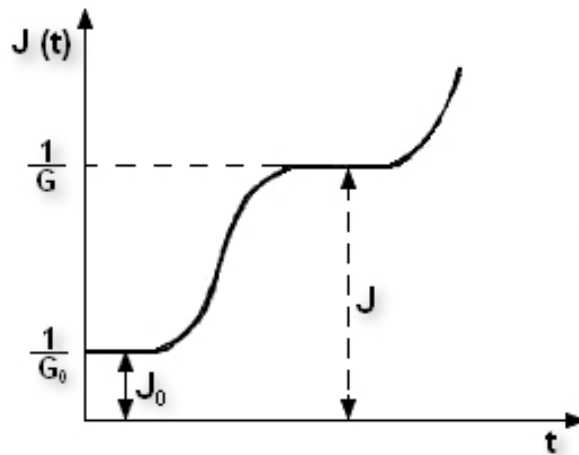
Celková deformace tohoto modelu se bud skládat ze tří složek:

$$\gamma(t) = \frac{\sigma}{G_0} + \frac{\sigma}{G} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \frac{1}{\eta_2} \cdot \sigma t \quad (7)$$

Celková poddajnost Tucketova modelu potom bude:

$$J(t) = \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \frac{t}{\eta_2} \quad (8)$$

Takto definovanou závislost poddajnost Tucketova modelu na čase můžeme vidět na obrázku níže.



Obr. 24. Čas. Závislost creepové poddajnosti

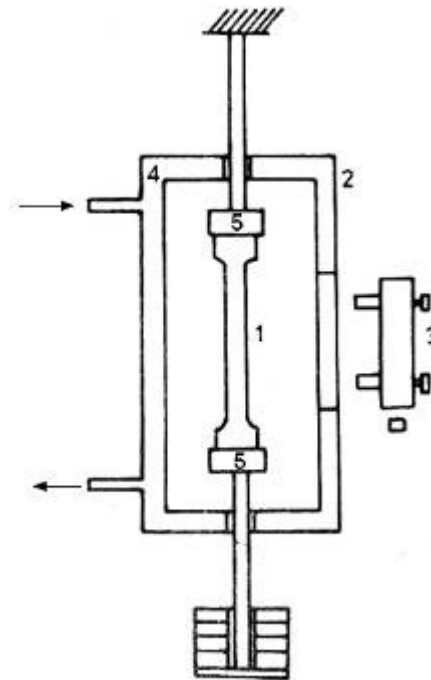
4.1.2 Měření deformace creepové zkoušky

Pro stanovení creepových vlastností jsou vhodná jednoduchá zařízení, aby vydržela spolehlivě dlouhodobé zkoušky i několik let. Používá se uspořádání s přímým zatěžováním, složené z rámu, kde jsou zavěšeny čelisti, které slouží k upínání zkušebních těles, kde na spodních čelistech je ve většině případů zavěšeno (upnuto) závaží. [24]

Jiný mechanismus používá pákový systém se závažím. Náročnější je příslušenství pro klimatizaci, popř. temperaci a pro přesné odečítání zvětšující se deformace. [21]

Termostat musí rovněž splňovat podmínku, aby vydržel pracovat několik tisíc hodin až řadu let, a proto všechny prvky regulačního systému musí být prověřeny a duplicitně osazeny signalizací, která v případě špatného chodu stroje ohlásí varování. [21]

Přesnost zařízení se vyžaduje $\pm 1\%$ celkové měřené deformace. Při zkouškách až do přetržení se obvykle používá katetometr a provede se takové bezpečnostní opatření, které bude zabraňovat při případném přetržení vzorku, poškození zařízení a aby vzniklými rázy nebyl ovlivněn průběh vedlejších měření. [21]



Obr. 25. Schéma stroje

- 1 – zkušební tělísko, 2 – temperační komora,
 3 – katetometr pro optické odečítání průběhu deformace,
 4 – temperační komora, 5 – upínací čelisti

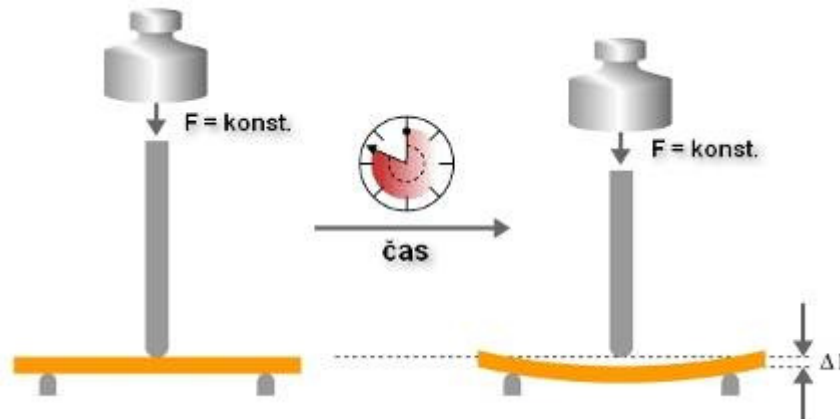
Pro optické měření deformace se vyznačuje na zkušebních tělesech původní délka kovovými svorkami s ryskou nebo se nakreslí inertní stálou barvou jemné vlasové rysky. Zkušební tělesa se před zkouškou proměří, aby mohl být vypočten průřez. Pak se teprve tělesa označují ryskami nebo se na ně lepí odporové tenzometry, které jsou pro sledování deformace vhodné jen tehdy, dají-li se přilepit a pokud měřená deformace spadá do rozsahu tenzometru. [21]

Zatěžování musí být plynulé a bez rázů. Dosažení konstantního zatížení celé série vzorků by nemělo trvat více než 10 vteřin. Časové intervaly pro měření se volí s ohledem na materiál a počáteční průběh deformace. Nejméně třikrát denně se kontroluje teplota a relativní vlhkost okolí vzorku, pokud nejsou automaticky zaznamenávány. [21]

Po přetržení tělesa se zhodnotí povaha lomu. Rovněž se změří průřez a zjišťuje se u orientovaných materiálů, zda nedošlo k vytvoření krčku a neúměrnému zúžení. Tyto výsledky se vypouští nebo se graficky zpracovávají, je-li možno počátek zúžení časově určit a pozdější hodnoty vypustit. [21]

Creepová zkouška v ohybu

Tato zkouška je vhodná především pro krátkodobé zkoušky, kde se z průhybu y sestrojují křivky průhybu v závislosti na čase (může se rovněž vypočítat změna modulu pružnosti).



Obr. 26. Schéma creepové zkoušky v ohybu [25]

Creepová zkouška v ohybu je vhodná zejména pro křehké materiály jako je PS (polystyren), bakelit, apod. Tato měření lze provádět na zařízení pro stanovení pevnosti v ohybu uzpůsobeném na případnou teplotu. Deformace lze snadno měřit tzv. výškovým indikátorem. Rozdíl mezi creepovou zkouškou v ohybu a v tlaku je ten, že při creepovém ohybu se pracuje s o poznání menšími silami a měřicí zařízení má rovněž menší rozměry. Zkouška může být provedena v rozmezí teplot $23\text{ °C} \div 150\text{ °C}$. [25]

Creepová zkouška v tlaku

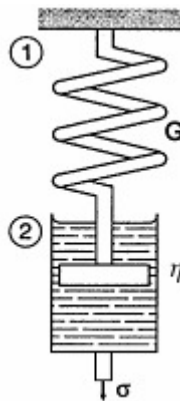
U těchto zkoušek se používá pákový zatěžovací systém a zkušební tělesa mají tvar válečků. Výsledky pokusů se zpracovávají obdobným způsobem jako při creepové zkoušce v tahu. [21]

4.2 Relaxační zkoušky

Relaxace napětí popisuje druh mechanické zkoušky, která sleduje průběh napětí σ v závislosti na experimentálním čase t při konstantním prodloužení (napětí $\sigma(t)$). [23]

Pokles napětí může být vyvolán buď fyzikálními nebo chemickými změnami ve vnitřní struktuře materiálu. Jedná se pak o viskoelastickou neboli fyzikální relaxaci, o chemorelaxaci apod. [21]

Relaxace napětí není veličina konstantní, závisí na mnoha faktorech (teplota, molekulová hmotnost, velikost deformace aj. Napětíovou relaxaci lze charakterizovat pomocí mechanických modelů. Nejjednodušší je model Maxwellův, který má oba elementy pružnosti a tečení zapojené za sebou (Obr. 27)



Obr. 27. Jednoduchý Maxwellův model

Model deformujeme počátečním napětím σ_0 a v čase $t = 0$ dosáhneme deformaci γ_0 . Model se ponechá v deformovaném stavu a sleduje se pokles napětí, potřebného na udržení počáteční deformace. Potom celková deformace Maxwellova modelu je tvořena jednoduchým součtem deformací obou elementů: [23]

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (9)$$

Hookovská složka γ_1 je na čase nezávislá, dostavuje se okamžitě. Naopak toková deformace γ_2 roste lineárně s časem. [23]

$$\gamma(t) = \gamma_1 + \gamma_2(t) \quad (10)$$

$$\gamma(t) = \left(\frac{1}{G} + \frac{t}{\eta} \right) \quad (11)$$

Napětí se v čase $t = 0$ až v t mění z počáteční hodnoty σ_0 až na $\sigma(t)$. Po separaci proměnných σ a t získáme po integraci vztah: [23]

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{G}{\eta}t} \quad (12)$$

Poměr $\frac{\eta}{G} = \tau$ definujeme jako přechodový relaxační čas τ . Je zřejmé, že viskozitu Maxwellovy látky potom zjistíme jako součin $\tau \cdot G = \eta$. Potom: [23]

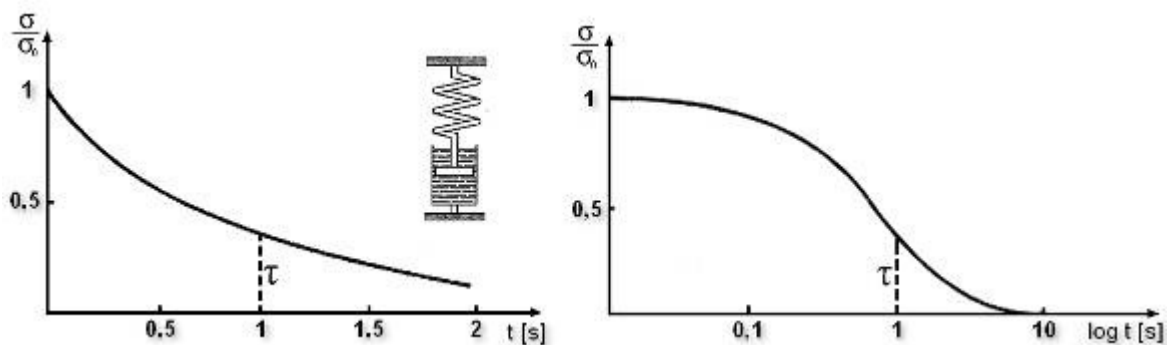
$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (13)$$

Převrácená hodnota relaxační doby je rychlostní konstanta k , která je funkcí absolutní teploty. Funkční závislost k na teplotě lze vyjádřit Arrheniovou rovnicí:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_{AKT}}{RT}} \quad (14)$$

Relaxační doba je čas potřebný k tomu, aby napětí kleslo na $1/e$ násobek původní hodnoty, čili na 36,79 % původní hodnoty.

Většina polymerů má více relaxačních časů. Obecně se množina relaxačních časů blíží nekonečnu a leží v rozmezí mnoha časových řádů; vliv distribuce relaxačních časů je vyjádřen esovitým tvarem křivky.[21]



Obr. 28. Modelová relaxační křivka pro $\tau = 1s$

Měření relaxace napětí může být prováděno kontinuálně nebo diskontinuálně při deformaci zkoušeného tělíska v tahu či tlaku. [21]

Při kontinuální relaxace napětí je zachycen jen podíl původně existujících příčných vazeb, neboli tato metoda zachycuje spíše změny ve zkušebním vzorku, způsobené štěpením vazeb. [21]

Diskontinuální měření relaxace napětí, při kterém je tělísko krátkodobě deformováno a po změření poklesu napětí opět odlehčeno, zahrnuje podíl jak původních tak, nově vzniklých vazeb. [21]

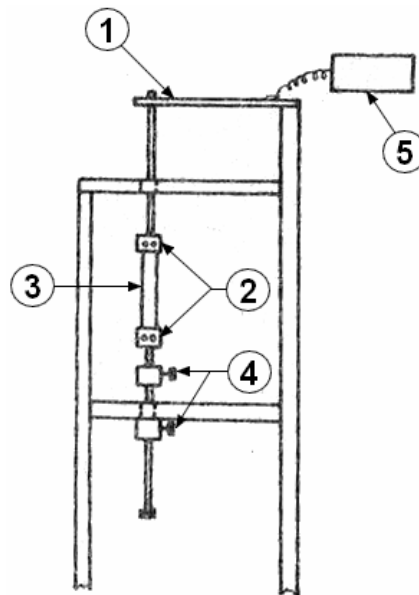
Sledování relaxace napětí se stává užitečnou metodou pro zjišťování nejen fyzikálních změn ve vnitřní struktuře zkušebního tělíska, ale i k zjišťování chemických změn zejména v zesíťovaných makromolekulách, které jsou jinak obtížně zjistitelné. [21]

4.2.1 Měření relaxačního napětí

Přístroje pro měření relaxačního napětí jsou konstrukčně složitější. Vyplývá to z nároků na přesné snímání změny napětí za neustáleného udržování konstantní deformace. [21]

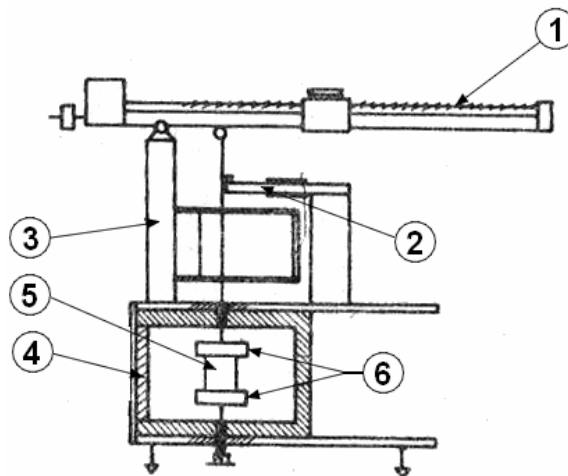
Bylo navrženo několik typů relaxometrů, jak pro měření relaxace v tahu, tak v tlaku, kontinuálních i diskontinuálních. V principu jde vždy o to, že u konstantně deformovaného zkušebního tělíska, uloženého v komoře, kterou lze vytápět, eventuálně do ní zavádět zvolenou atmosféru, se měří závislost napětí na čase. [21]

Relaxometry se neustále vyvíjejí a v posledních typech se zatížení měří magnetickým polem solenoidu, působícím na závaží, které je připevněno na konci zkušebního tělíska. Deformace je automaticky udržována na konstantní hodnotě pomocí fotoelektrického systému s přesností 0,05 mm. Tento přístroj dovoluje automaticky zapisovat relaxogramy. [21]



Obr. 29. Schéma jednoduchého relaxometru v tahu [21]

1 – nosník se snímačem napětí, 2 – čelisti,
3 – zkušební těleso, 4 – systém udržování konstantní síly,
5 – tenzometr napětí s registrací



Obr. 30. Schéma automatického relaxometru v tlaku [21]

1 – páka s automatickým posunem závaží, 2 – indikátor deformace,
3 – tenzometrický snímač, 4 – temperační komora,
5 – zkušební těleso, 6 – teflonové přítlačné desky

Zkušební tělíska pro měření relaxace napětí v tlaku mají zpravidla tvar válečků 20x20 mm, zkušební tělíska pro relaxaci napětí v tahu jsou pásky o tloušťce 0,2 mm. Z toho vyplývá, že měření relaxace v tahu je nejen méně náročné na konstrukci měřicího zařízení, ale i procesy chemorelaxace jsou homogennější ve hmotě zkušebního tělíska. [21]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je zjistit vliv radiačního ozařování polymerů, konkrétně PBT - polybutyltereftalátu, na jejich creepových vlastnostech. Veškerý zpracovávaný materiál byl od firmy PTS.

Zkušební tělíska byla zhotovena v dílně FT UTB ve Zlíně na vstřikovacím stroji značky ARBURG, s označením Allrounder 420C. Forma byla jednonásobná, přičemž jedním výstřikem se zhotovily dvě tělíska - zkušební lopatka a obdélníková tyčinka.

Po zhotovení potřebného množství zkušebních těles se dovezou do německé firmy BGS (Beta Gamma Service) na ozáření. Ozáření proběhne v různých dávkách, a to od 33 kGy od 199 kGy. Poté budou následovat jednotlivá měření creepové zkoušky v tahu na zkonstruovaném jednoduchém měřícím aparátu a jejich následné vyhodnocení.

6 POUŽITÝ MATERIÁL

6.1 Polybutylentereftalát (PBT)

Tento materiál spadá do skupiny polyesterů, které představují velkou a významnou skupinu polymerů, a které obsahují v hlavních řetězcích esterové vazby. PBT je semikrystalický polymerní materiál kombinující vynikající mechanické a elektrické vlastnosti spolu s velkou chemickou odolností vůči rozpouštědlům, chemikáliím a olejům. PBT vyniká svojí velkou výbornou tvarovou stálostí, nízkou nasákavostí a silným izolačním odporem.

6.1.1 Použití PBT

Neplněný PBT má široký rozsah hodnot viskozity, a proto se hodí pro proces vstřikování, vytlačování, ale i vyfukování. Takto se vyrábějí např. tyče, desky aj. Z materiálu, který je vyztužený skelnými vlákny, se vyrábějí kupříkladu automobilové zapalování a části elektrického systému, elektrické a elektronické konektory a zásuvky, spínače, cívky a motorové skříně, kliky apod.

6.1.2 Parametry vstřikovacího stroje pro PBT

Tab. 6. Parametry vstřikovacího stroje pro materiál PBT

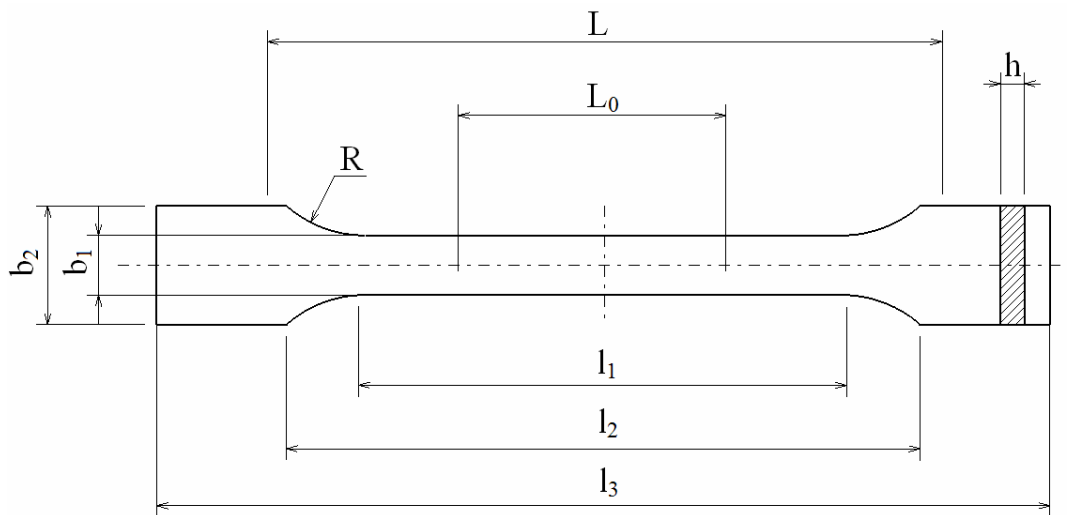
Parametry pro materiál PBT		
Vstřikovací rychlost	60	mm·s ⁻¹
Vstřikovací tlak	80	MPa
Uzavírací síla	950	kN
Doba vstřikování	1,2	s
Doba chlazení	20	s
Teplota formy	70	°C
Dotlak	30	MPa
Dráha dávkování	26	mm
Doba cyklu	58,5	s
Teploty pásem plastikační jednotky		
Teplota pod násypkou	70	°C
Teplotní pásmo 2	220	°C
Teplotní pásmo 3	225	°C
Teplotní pásmo 4	230	°C
Teplotní pásmo 5	240	°C
Teplota trysky	250	°C

7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

7.1 Zkušební tělesa

Ke creepové zkoušce je třeba obdobných zkušebních těles jako pro krátkodobé zkoušky v tahu. Zkušební tělesa jsou ve tvaru oboustranné lopatky. K této diplomové práci byla použita normalizovaná zkušební tělesa, které jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 527.

Všechna zkušební tělesa byla vyrobena vstřikováním. Další způsoby přípravy zkušebních těles jsou například tvářením nebo mechanickým opracováním.



Obr. 31. Rozměry zkušebních těles podle ČSN EN ISO 527 [30]

Tab. 7. Rozměry zkušebních těles, typ 1A [30]

Zkušební tělesa, typ 1A			
Celková délka	l_3	≥ 150	mm
Vzdálenost mezi širokými částmi	l_2	$104 \div 113$	mm
Délka pracovní části	l_1	80 ± 2	mm
Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	L	115 ± 1	mm
Počáteční měřená délka	L_0	$50 \pm 0,5$	mm
Šířka pracovní části	b_1	$10 \div 0,2$	mm
Šířka upínací části	b_2	$20 \div 0,2$	mm
Tloušťka zkušebního tělesa	h	$4 \pm 0,2$	mm
Poloměr zakřivení	R	$20 \div 25$	mm

7.2 Vstřikování zkušebních těles

Veškerá zkušební tělesa byla vyrobena na vstřikovacím stroji firmy ARBURG Allrounder 420C, který je vybaven 32 bitovým multiprocesorovým řídicím systémem SELOGICA. Tento řídicí systém kontroluje správnost všech obsluhou zadávaných dat již přímo během programování.

Kromě standartních úkolů v oblasti zpracování lze stroj použít i pro některé speciální způsoby zpracování. Tím je např. vícekomponentní vstřikování plastů.

Systém řízení pracuje na principu grafického zobrazení všech pracovních cyklů stroje ve formě symbolů postupového diagramu a tyto symboly přehledně zobrazuje na obrazovce výklopného terminálu. Srozumitelné a přehledné zobrazení všech pracovních operací v zorném poli obsluhy umožňuje jednoduché a rychlé ovládání nejkomplexnějších pracovních cyklů stroje. [28]



*Obr. 32. Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420 C
a řídicí systém SELOGICA [28]*

Tab. 8. Technické parametry použitého vstřikovacího stroje [28]

Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420C		
Uzavírací jednotka		
uzavírací síla	1000	max. kN
otevírací síla / zvýšená otevírací síla	35 / 250	max. kN
otevření	500	max. mm
vzdálenost mezi vodícími sloupy	420 x 420	mm
velikost upínací desky	570 x 570	mm
vyhazovací síla	40	max. kN
zdvih vyhazovače	175	max. mm
Hydraulika, pohon		
výkon čerpadla	22	kW
celkový příkon stroje	33,9	kW
Vstřikovací jednotka		
průměr šneku	40	mm
poměr šneku	20	L / D
zdvih šneku	145	max. mm
objem dávky	182	max. cm ³
vstřikovací tlak	2120	max. bar
vstřikovací rychlost (objemová)	168	max cm ³ ·s ⁻¹
zpětný tlak pozitivní / negativní	350 / 160	max. bar
kroučící moment šneku	700	max. Nm
přítláčná síla trysky	70	max. kN
objem násypky	50	l
Olejová náplň a hmotnost		
množství oleje	235	l
hmotnost stroje, bez oleje	3700	kg

8 SÍTOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Připravená zkušební tělesa byla dovezena do německé firmy BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co, KG v Saal am Donau, SRN, kde byla ozářena elektronovým beta zářením s energií 10 MeV. Ozáření proběhlo v šesti různých dávkách a to: 33 kGy, 66 kGy, 99 kGy, 132 kGy, 165 kGy, 198 kGy.

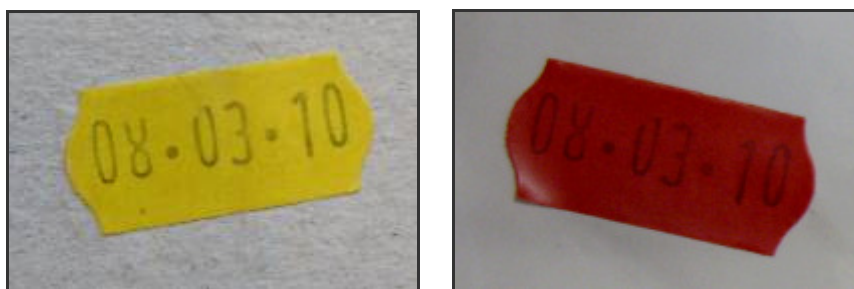
Zkušební tělesa byly za účelem zjednodušení při vyskládávání a za účelem zrychlení práce přelepeny izolační páskou po 25 kusech. Veškerá zkušební tělesa byla vyskládána na palety, aby došlo k co nejlepšímu a nejrovnoměrnějšímu prozáření.



Obr. 33. Zkušební tělesa připravená k radiačnímu ozáření

K dosažení potřebného množství ozáření procházely palety se zkušebními tělesy přes ozařovací zařízení tak dlouho, dokud se nedosáhlo potřebného množství ozáření. S každým průchodem se velikost ozáření zvětšovala o 33 kGy.

Velikost dávek ozáření se pohybovala od 33 kGy do 198 kGy, z toho vyplývá, že palety prošly zařízením šestkrát, přičemž při každém průjezdu se odebrala paleta s požadovaným prozářením.



Obr. 34. Neozářený a ozářený indikátor stupně prozáření

8.1 Měrné jednotky při ozařování materiálů

U radiačního sítování určuje v první řadě dávka ozáření, požadované změny vlastností, tzn. množství absorbované energie záření na měrnou jednotku hmoty. [15]

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

Jednotka intenzity je gray [Gy], dříve to byl rad (Radiation Absorbed Dose). [15]

$$\begin{aligned} 1 \text{ Gy} &= 1 \text{ Joule/kg} = 100 \text{ rad} \\ 10 \text{ kGy} &= 1 \text{ Mrad} \end{aligned}$$

Energie záření absorbovaná výrobkem za časovou jednotku a vztažená na hmotnost je dávková intenzita záření. [15]

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

Penetrace (hloubka pronikání) vysoce energetických elektronů popřípadě gama záření je závislá na jejich energii. Měrná jednotka energie je joule [J], dříve [eV]. [15]

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

Výkon zdroje radioaktivního záření je charakterizován jeho aktivitou. Jednotka pro aktivitu je Becquerel [Bq], dříve: Curie [Ci]. [15]

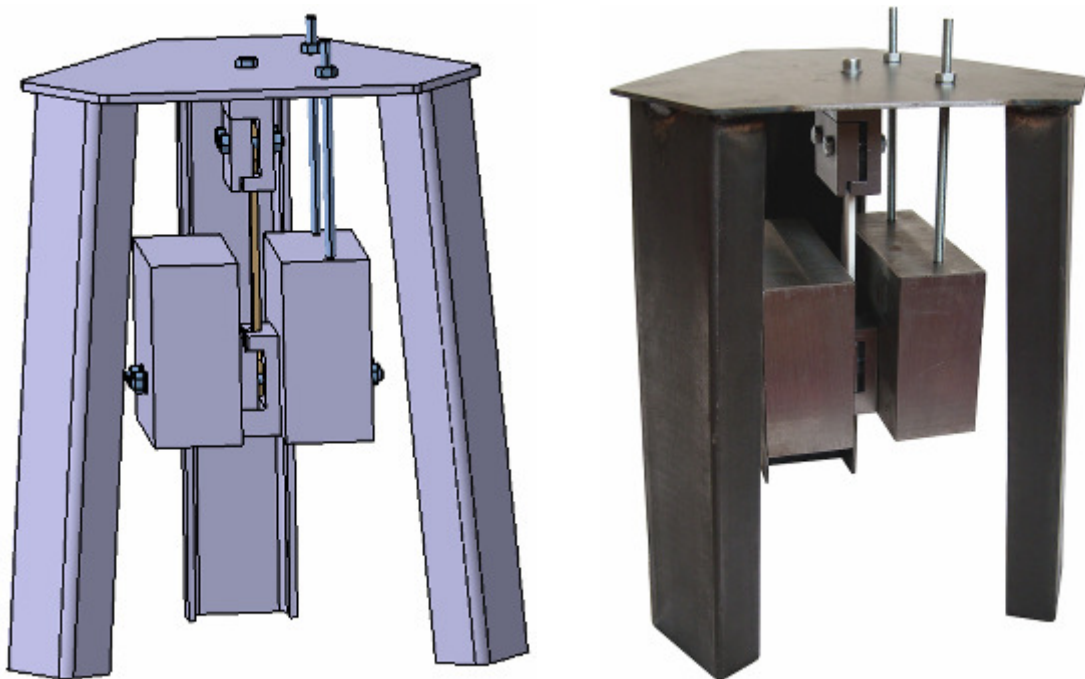
$$\begin{aligned} 1 \text{ Bequerel (Bq)} &= 1 \text{ rozpad/sek.} \\ 1 \text{ Curie (Ci)} &= 3,7 \div 10^{10} \text{ Bq} \end{aligned}$$

9 KONSTRUKCE MĚŘÍCIHO ZAŘÍZENÍ

K této úloze bylo nutné navrhnout a vyrobít jednoduché měřicí zařízení, na kterém by měření probíhalo. Celé měřicí zařízení bylo navrženo v programu CATIA V5R18.

Zařízení se skládá se z měřicího stojanu, čelistí k uchycení zkušebních lopatek příslušného tvaru a závaží, utahovacích šroubů a šroubů na seřízení a přesné ustavení čelistí a závaží do vodorovné polohy. (Obr. 35)

Tyto seřizovací šrouby byly navrženy k tomu, aby nedocházelo k vychylování zkušebních těles z osy kolmé na osu měření, ale rovněž k zajištění vodorovné polohy.

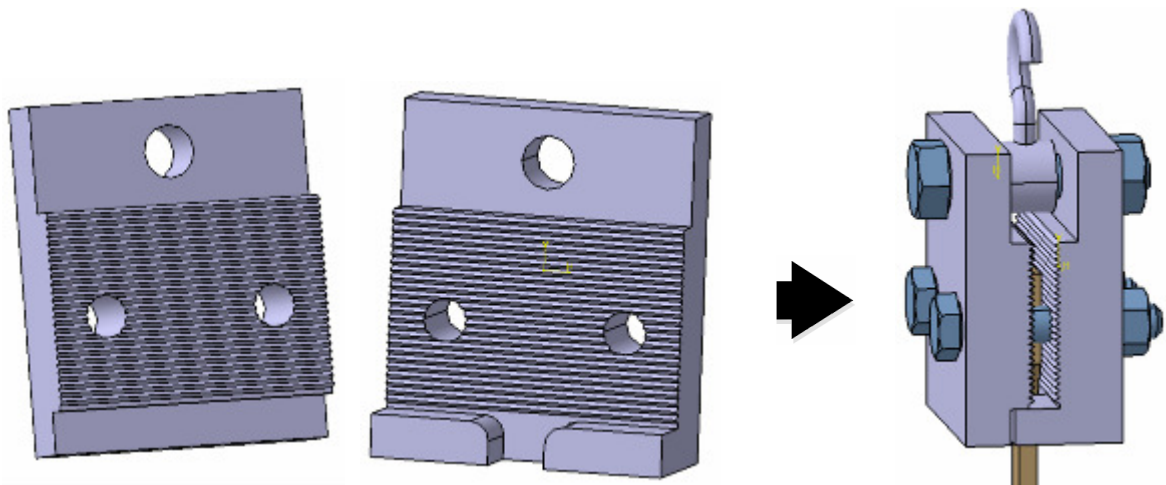


Obr. 35. Zkompletované měřicí zařízení

9.1 Návrh upínacích čelistí

Úkolem bylo navrhnout a zkonstruovat výrobně i funkčně jednoduché upínací čelisti. Čelisti musí být dostatečně tuhé a nesmí u nich dojít k proklouznutí nebo dokonce k uvolnění zkušebního tělesa. Zároveň musí zaručit, aby docházelo k protažení zkušebních těles pouze ve směru kolmém na upínací čelisti. S tímto ohledem bylo navrženo také uchycení čelistí k samotnému měřicímu stojanu.

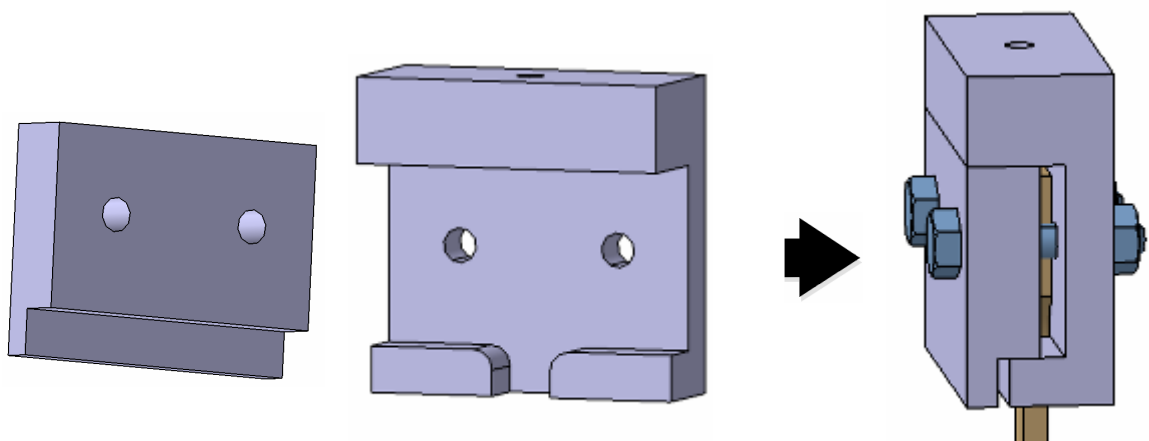
Byly vyhotoveny dva návrhy upínacích čelistí, přičemž se však nakonec vybral druhý typ, který byl jednodušší jak na výrobu, tak i konstrukčně.



Obr. 36. První návrh čelistí

Typ čelistí podle Obr. 36 nebyl na účely měření vhodný. Čelisti by nebyly vhodně připevněny k měřicímu stojanu a mohlo by docházet k výkmitu z kolmé polohy, čímž by mohlo být zapříčiněno zkreslení měřených údajů. Rovněž drážkování by bylo obtížně vyrobitelné.

Proto byl navržen nový typ čelistí, který bude našroubován přímo k měřicímu stojanu, aby bylo zabráněno výkmitu. (Obr. 37)



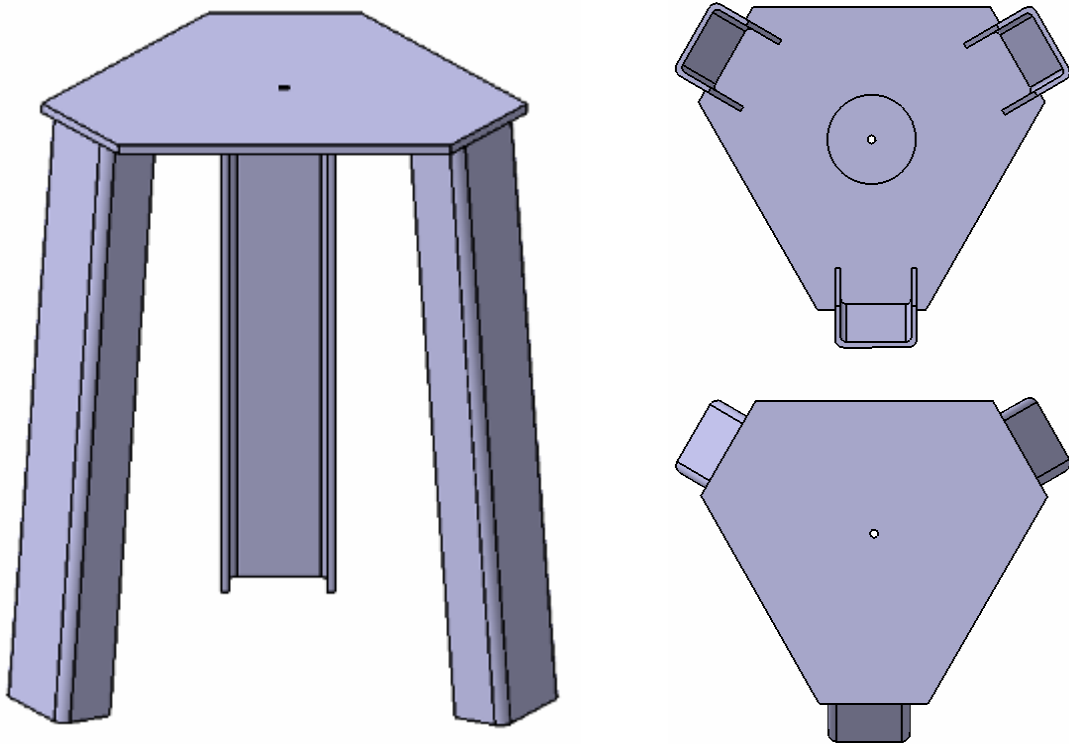
Obr. 37. Druhý návrh čelistí

9.2 Návrh měřicího stojanu

Aby bylo možné provádět měření, bylo rovněž nutné navrhnout a vyrobit vhodný měřicí stojan, na kterém by byly připevněny upínací čelisti se zkušebním tělesem a probíhalo i měření.

Byl zvolen stojan se třemi podpěrami a to především kvůli stabilitě. K horní desce jsou všechny tři nohy přivařeny pod úhlem 5° . K horní desce jsou potom přišroubovány upínací čelisti se zkušebním tělesem.

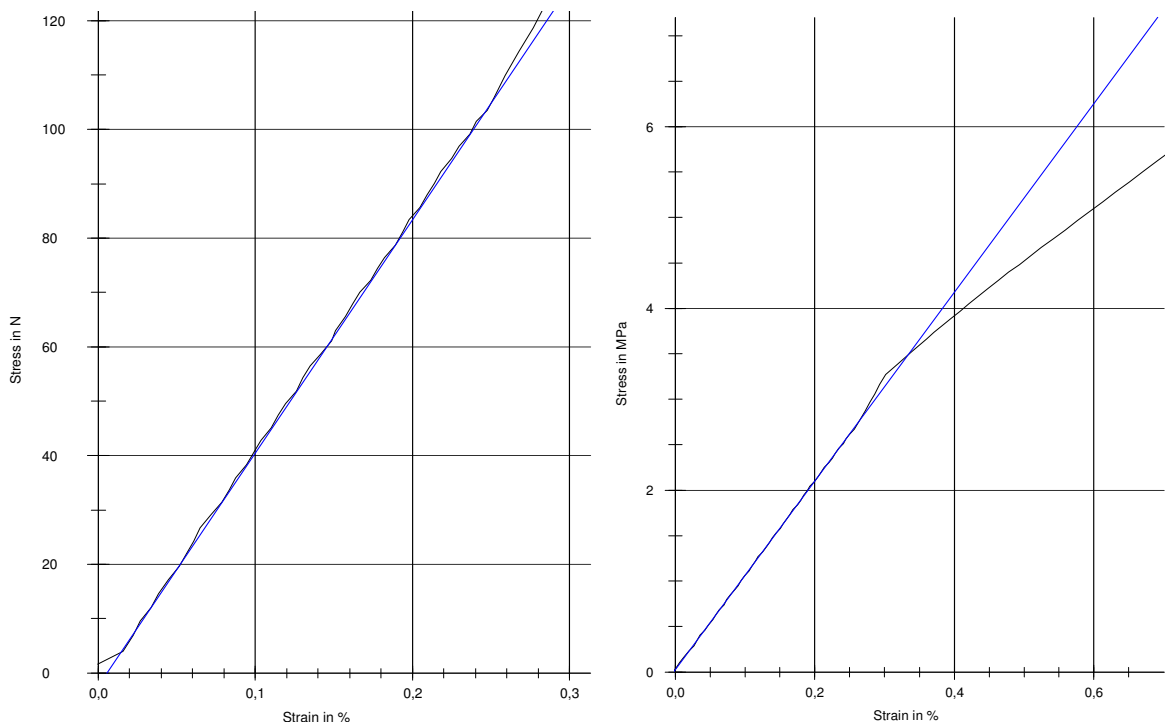
Nohy stojanu jsou vyrobeny z U-profilu a zbroušeny tak, aby byla zajištěna vodorovná poloha stojanu. (Obr. 38)



Obr. 38. Trojnohý stojan pro měření

9.3 Závaží

Při creepové zkoušce se velikost hmotnosti závaží volí tak, aby napětí bylo v oblasti lineárního chování materiálu. V tomto případě se na trhacím stroji provedla tahová zkouška a byl vygenerován graf, kde můžeme vyčíst hmotnost zatížení. Z grafu tahové zkoušky byla zvolena hmotnost závaží 10 kg. Na připojeném grafu, lze pozorovat závislost síly na poměrné deformaci.



Obr. 39. Lineární oblast chování PBT (síla a napětí)

Při výrobě závaží je nutné od celkové hmotnosti 10 kg odečíst hmotnost 0,5 kg, což je hmotnost obou spodních upínacích čelistí.

Tvar závaží byl zvolen jako kvádr, který bude sešroubován po stranách spodních čelistí a to z toho důvodu, aby bylo možné na spodní hranu čelistí připevnit příslušenství laseru na měření prodloužení.

Bylo nutné navrhnout a vypočítat rozměry zkušebního závaží tak, aby hmotnost zátěže byla 10 kg. Tato hmotnost je včetně hmotnosti spodních upínacích čelistí.

Základní rozměry závaží jsou 126x100 mm. Potřebujeme dopočítat poslední rozměr a tím je tloušťka. Hustotu ρ materiálu na výrobu závaží uvažujeme $7800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Budou vyrobeny dva kusy závaží o celkové hmotnosti 9,5 kg.

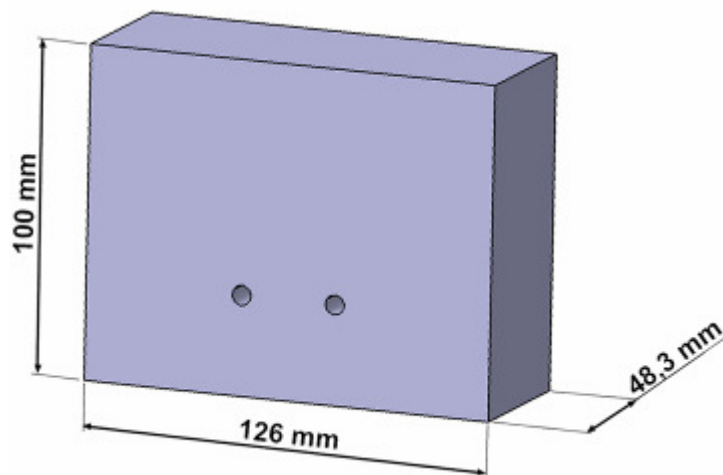
Výpočet rozměrů závaží:

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = \rho \cdot a \cdot b \cdot c \Rightarrow c = \frac{m}{a \cdot b \cdot \rho}$$

$$c = \frac{4,75}{0,126 \cdot 0,1 \cdot 7800}$$

$$c = \underline{48,3 \text{ mm}}$$



Obr. 40. Závaží a jeho rozměry

10 STATISTICKÉ VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Ke zhodnocení výsledků měření bylo použito vztahů statistického vyhodnocování. Bylo použito těchto následujících vzorců:

Aritmetický průměr \bar{x} z počtu naměřených výsledků (n) se vytvoří suma a vydělí se jejich počtem.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (15)$$

Rozptyl s^2 je definován jako střední hodnota kvadrátů odchylek od střední hodnoty.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cdot \bar{x}^2) \quad (16)$$

Směrodatná odchylka s je kvadratický průměr odchylek hodnot od jejich aritmetického průměru.

$$s = \sqrt{s^2} \quad (17)$$

11 POUŽITÁ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

K samotnému měření byl použit laserinterferometr firmy RENISHAW, na kterém bylo měřeno celkové protažení zkušebních těles. Toto zařízení bude popsáno v této kapitole.

11.1 Laseinterferometr RENISHAW XL-80

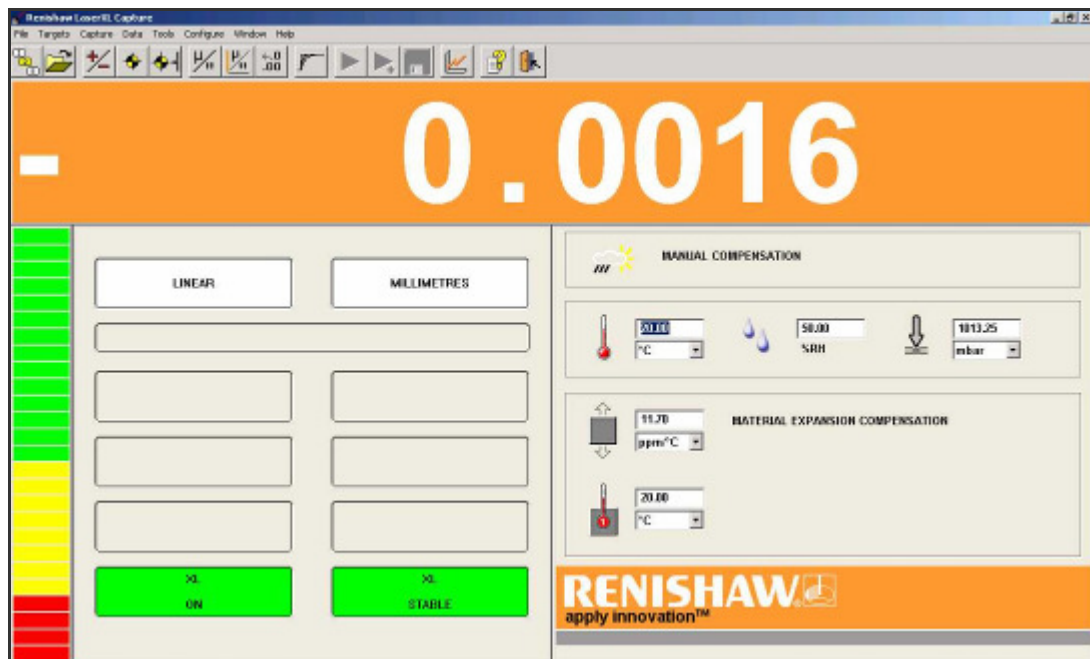
Laser Renishaw XL-80 vytváří svazek s vlnovou délkou, která odpovídá národním i mezinárodním normám. Stabilita vyzařované frekvence je $\pm 0,5 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ v celém rozsahu podmínek měření. Systém čte hodnoty s frekvencí 50 kHz i při maximální rychlosti lineárního měření. Jelikož systém využívá interferometre v celém rozsahu měření (nejen při lineárním), jsou zpracovaná data dosti přesná. [29]



Obr. 41. Laserinterferometr XL-80 se stativem

Laser lze propojit s počítačem, s kterým komunikuje pomocí programu Laser XL™. Tento systém obsahuje moduly pro lineární a úhlová měření, měření rotační osy, rovinnosti, přímosti, kolmosti ale i možnost dynamického měření.

Režim dynamického měření laseru XL-80 dovoluje pracovat se vzorkovací frekvencí 10Hz až 50 kHz a vyhodnotit údaje o polohování, rychlosti a zrychlení. [29]

Obr. 42. Prostředí programu Laser XLTM

Tab. 9. Parametry systému laseru Renishaw XL-80 [29]

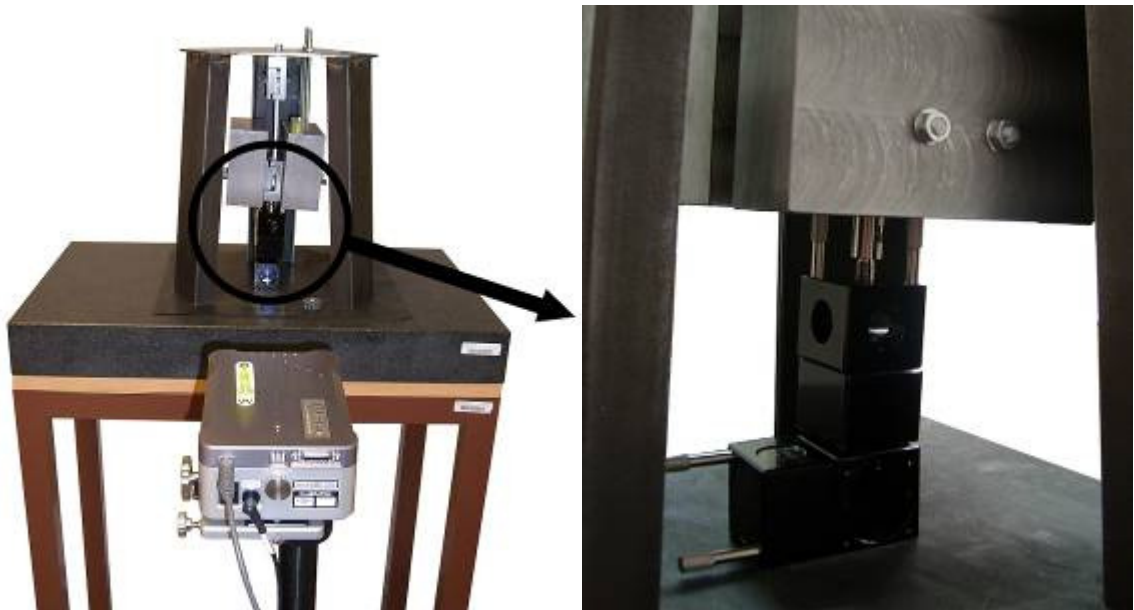
Parametry systému		
Rozsah lineárního měření	80	m
Přesnost lineárního měření	0,5	μmm^{-1}
Přesnost frekvence laseru	0,05	μmm^{-1}
Rozlišení	1	nm
Maximální rychlost snímaného pohybu	4	ms^{-1}
Frekvence snímání dat	10 ÷ 50000	Hz
Doba stabilizace	6	min
Pracovní teplota	0 ÷ 40	°C
Snímače parametrů prostředí	Rozsah	Přesnost
Teplota materiálu [°C]	0 ÷ 55	± 0,1
Teplota vzduchu [°C]	0 ÷ 40	± 0,1
Tlak vzduchu [mbar]	650 ÷ 1150	± 1
Relativní vlhkost nekondenzující [%]	0 ÷ 95	± 6

12 CREEPOVÁ ZKOUŠKA MATERIÁLU

12.1 Měření protažení pomocí laseru Renishaw

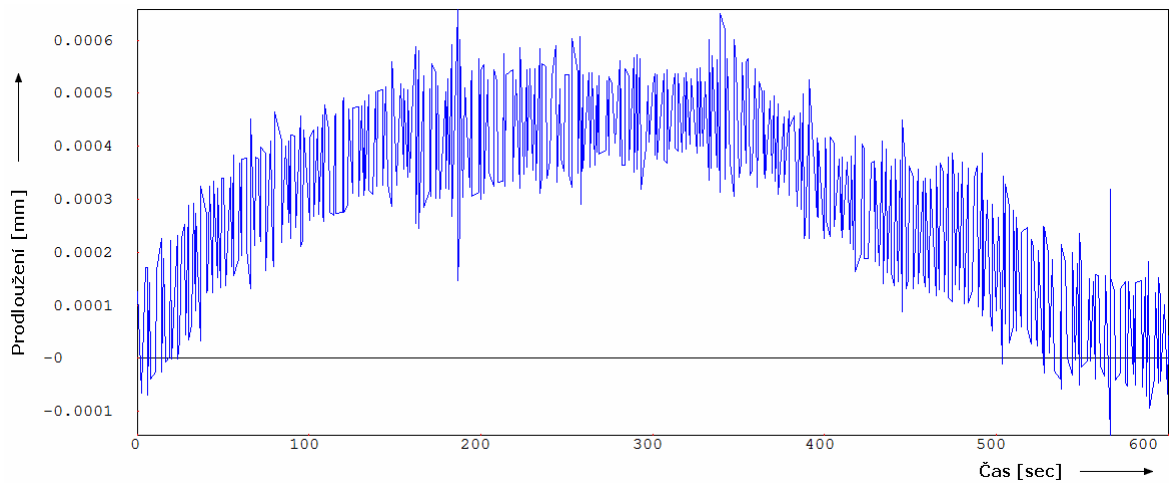
K experimentální části byly provedeny série zkušebních měření, kterými se zjistilo, jaké budou nevhodnější způsob a podmínky měření. Nejprve bylo na laseru RENISHAW provedeno dynamické měření s frekvencí záznamu 1 kHz po dobu 600 s. Z tohoto měření byly vygenerovány grafy pomocí programu Laser XLTM.

Nejprve je nutné nastavit čelisti se závažím i samotné laserové měřicí zařízení do vodorovné polohy, čímž se zajistí přesné ustavení laseru, a tak dojde i k nastavení zkušebního tělesa do osy kolmé na osu měření. Ustavení se provádělo malými vodováhami.



Obr. 43. Vyvážení přístroje a nastavení měřící optiky

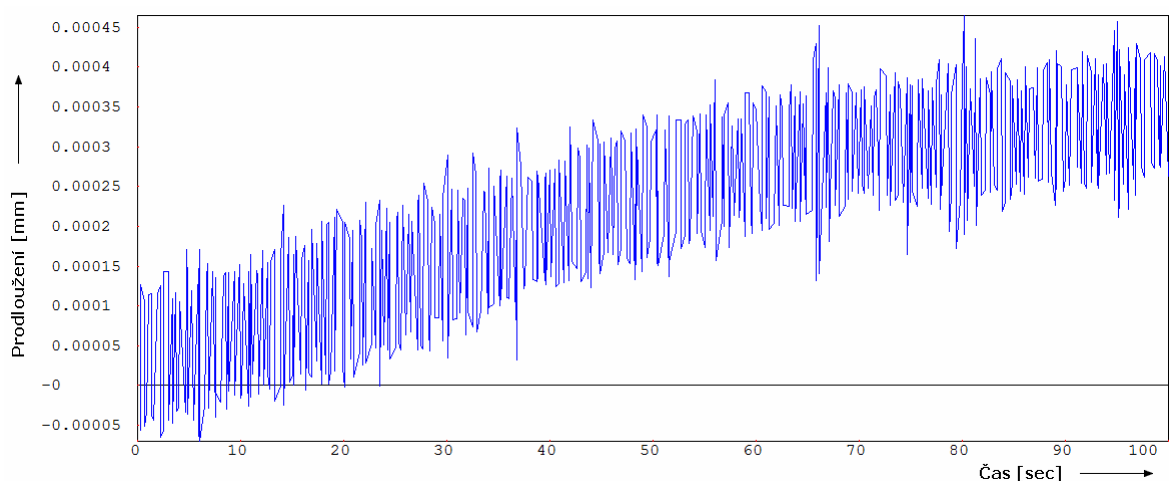
12.1.1 Měření neozářeného PBT s frekvencí záznamu 1 kHz



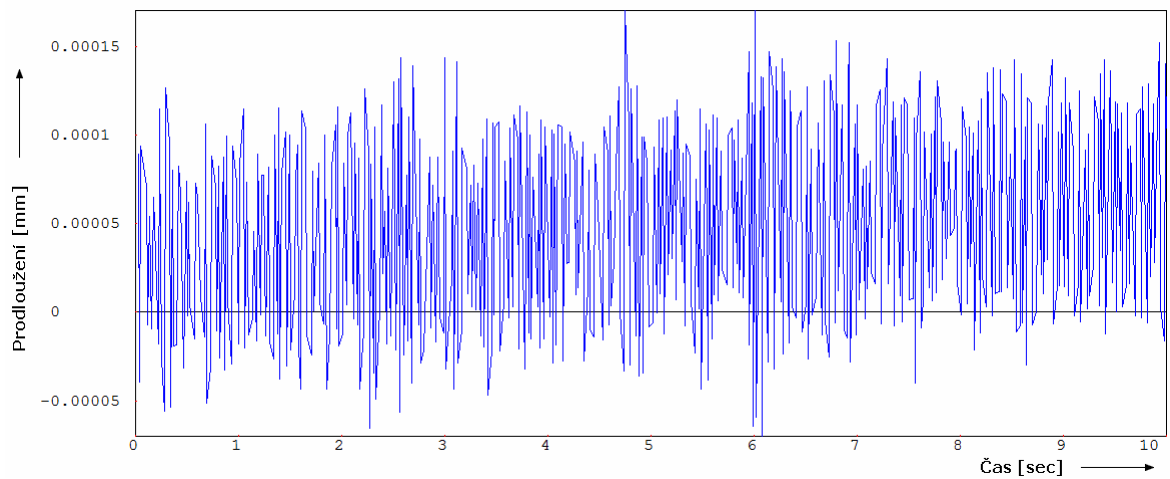
Obr. 44. Graf dynamického měření s frekvencí 1 kHz po dobu 600 s

	Prodloužení [mm]
Max. hodnota	0,000659
Min. hodnota	- 0,000145

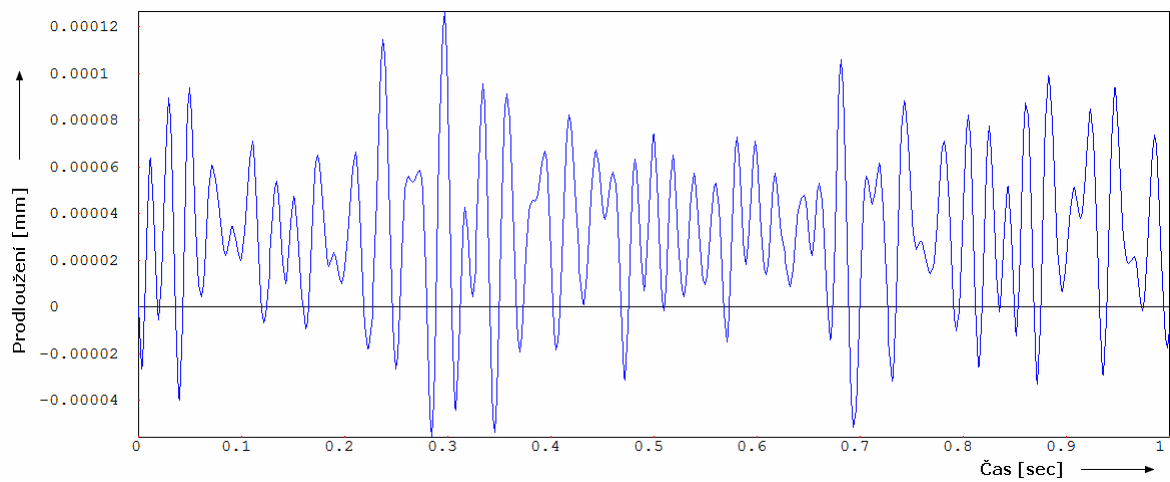
Z grafu je patrné velké kmitání a následné ustálení grafu do nulové polohy. Tento jev mohla způsobit skutečnost, že při měření nebyly ještě na měřicím aparátu našroubovány vyvažovací šrouby na seřízení závaží do vodorovné polohy a tím zajištění kolmosti os zkušebního tělesa a osy měření. Okolní ruchy tak mohly způsobit výkmit a vychýlení.



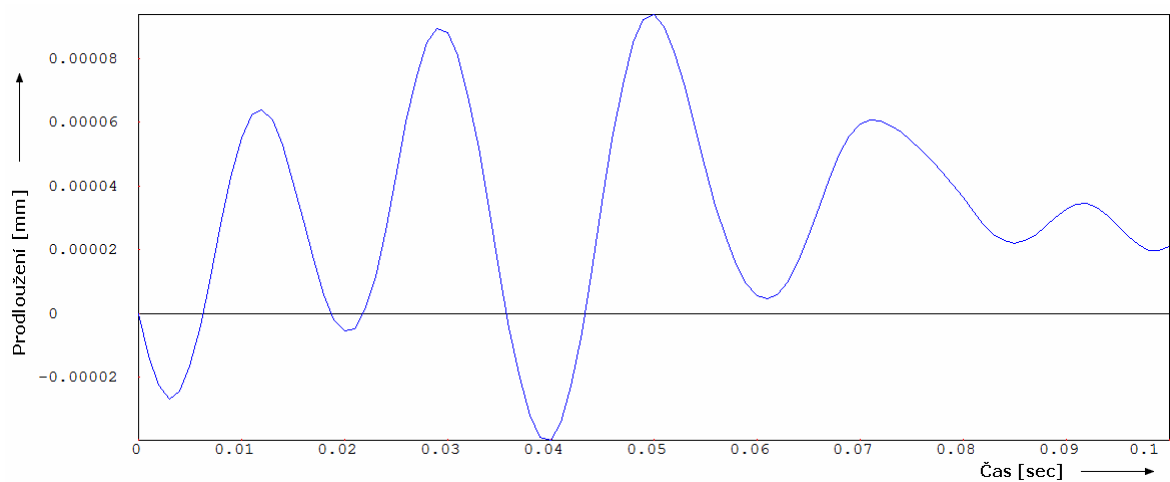
Obr. 45. Graf creepového chování v čase $t = 100s$



Obr. 46. Graf creepového chování v čase $t = 10s$



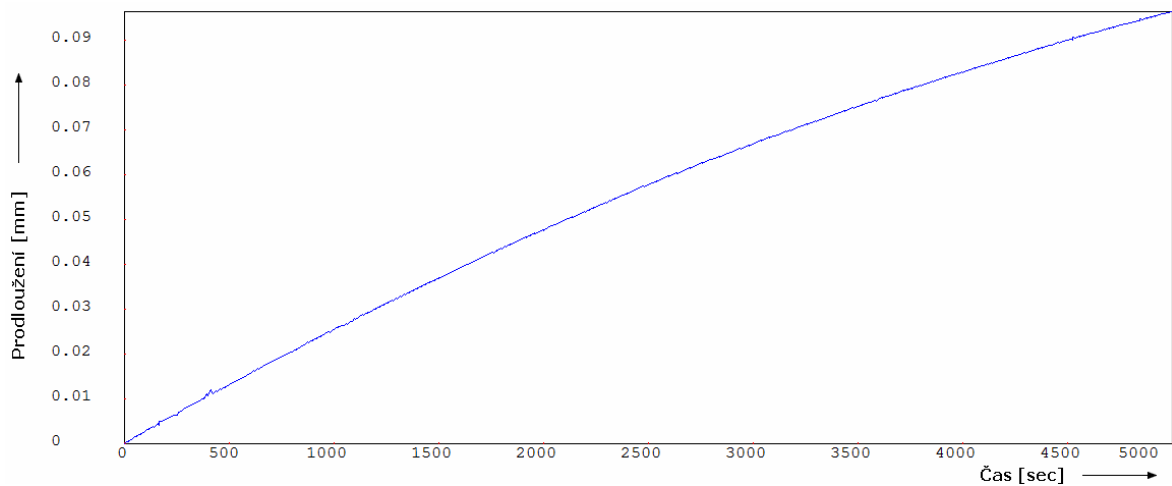
Obr. 47. Graf creepového chování v čase $t = 1s$



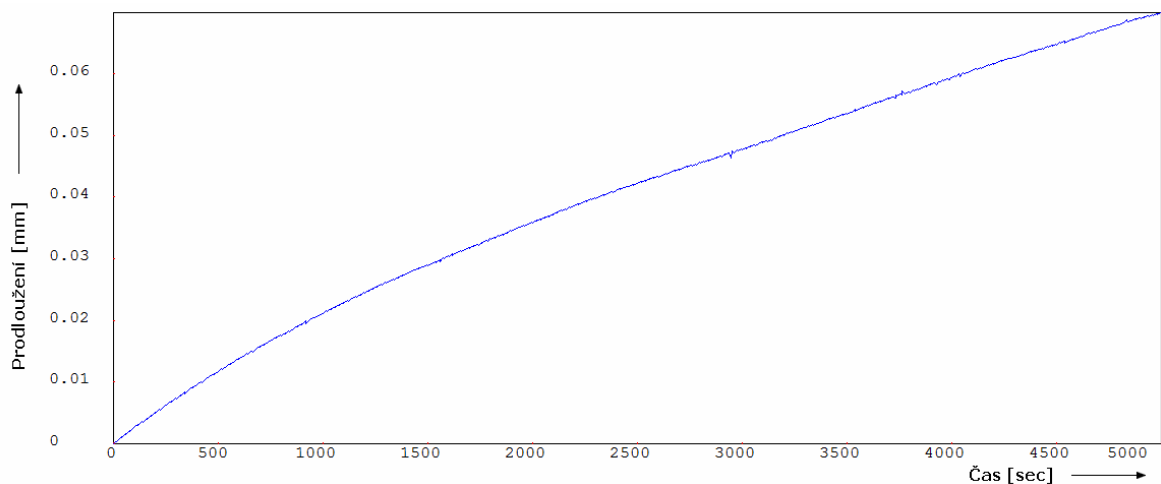
Obr. 48. Graf creepového chování v čase $t = 0,1s$

12.1.2 Měření neozářeného PBT s frekvencí záznamu 10 Hz

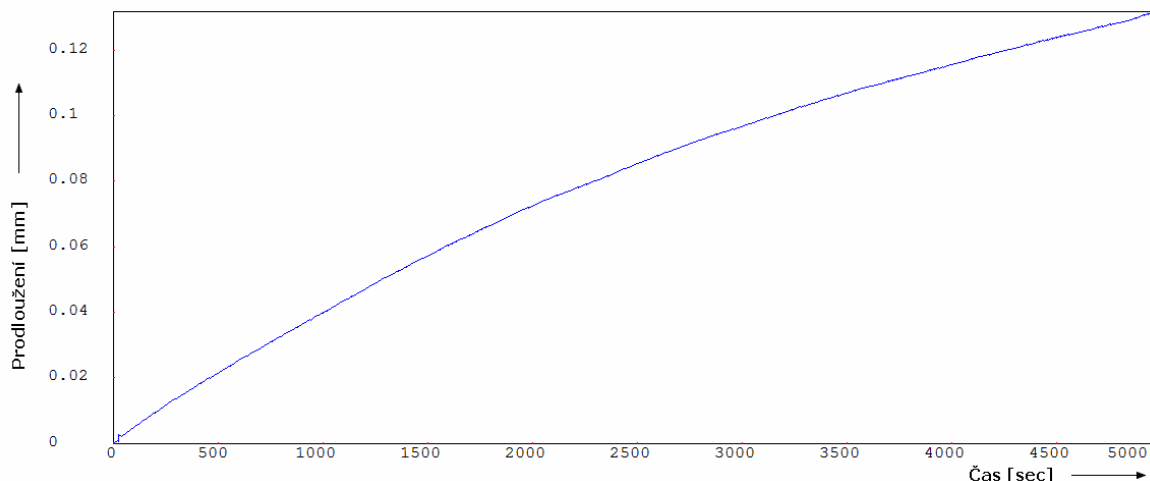
Měřením bylo zjištěno, že u zatíženého materiálu dochází při creepové zkoušce ke kmitání. U předchozího měření při frekvenci 1 kHz byla zjištěna velmi velká hustota kmitů, a proto bylo nutné křivku vyhladit. Toho bylo dosaženo nastavením laserového měřicího zařízení na měření o frekvenci 10 Hz po dobu několika set vteřin. Při této frekvenci byl pokus prováděn 5000s.



Obr. 49. Graf dynamického měření s frekvencí 10 Hz po dobu 5000s (1. měření)



Obr. 50. Graf dynamického měření s frekvencí 10 Hz po dobu 5000s (2. měření)



Obr. 51. Graf dynamického měření s frekvencí 10 Hz po dobu 5000s (3. měření)

Tab. 10. Naměřená a vyhodnocená data odečtená v programu Laser XLTM

	1. měření	2. měření	3. měření		
Čas [sec.]	Protážení [mm]			Ar. průměr [mm]	Směrodatná odchylka
0	0	0	0	0	0
60	0,001746	0,001577	0,003169	0,002164	0,00087445
120	0,003278	0,003107	0,0059	0,004095	0,00156551
180	0,005058	0,004582	0,008617	0,006085667	0,00220508
240	0,006432	0,005937	0,011204	0,007857667	0,00290856
300	0,008084	0,007347	0,013719	0,009716667	0,00348566
600	0,01563	0,013791	0,025389	0,01827	0,00623343
1200	0,030149	0,024571	0,047018	0,033912667	0,01168721
1800	0,043543	0,033256	0,066581	0,047793333	0,01706423
2400	0,055948	0,041058	0,08268	0,059895333	0,0210899
3000	0,066939	0,047818	0,096694	0,070483667	0,02463005
3600	0,076968	0,054909	0,108771	0,080216	0,0270775
4200	0,085836	0,061684	0,119022	0,088847333	0,02878737
4800	0,093972	0,068008	0,128402	0,096794	0,03029574
5000	0,096514	0,069997	0,131853	0,099454667	0,03103267

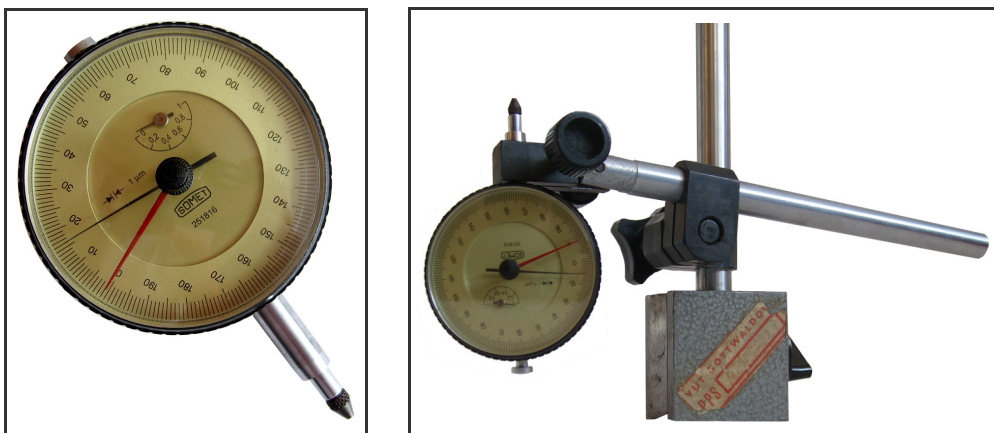
Výsledky měření ukázaly, že pomocí laserového odměřovacího systému lze získat velmi přesné výsledky. Přístroj je mimořádně přesný a citlivý. Dokáže měřit s velmi velkou přesností a zaznamená jakékoliv výchylky způsobené např. vlivem otřesů, kolísáním teploty aj. S ohledem na délku záznamu měření se bude hodit spíše pro krátkodobá měření.

Pro delší časové úseky však není příliš vhodný. U dlouhodobých zkoušek se jeví mnohem výhodnější systém využívající přesných typů číselníkových úchylkoměrů.

12.2 Měření creepové zkoušky pomocí číselníkového úchylkoměru

K samotnému měření bylo nutné zajistit uložení měřícího aparátu v místnosti, která je odizolována od okolních ruchů, ať už nežádoucím kmitáním (vlivy otřesů, apod.), ale také aby vyhovovala také co se týká homogenity prostředí, tj. zabránění kolísání teploty.

Měření se provádělo číselníkovým úchylkoměrem s přesností 0,001 mm a to z toho důvodu, že doba měření je delší než pohotovostní doba laseru Renishaw, která činí 2 hodiny. Po tomto čase se laser vypne a po té by muselo dojít k opětovnému nastavení.



Obr. 52. Úchylkoměr s přesností 0,001 mm se stojanem

S časových důvodů bylo provedeno testování pěti zkušebních těles z materiálu PBT. Měření se provádělo s neozářeným PBT, s PBT ozářeným 33 kGy, 66 kGy a 99 kGy.

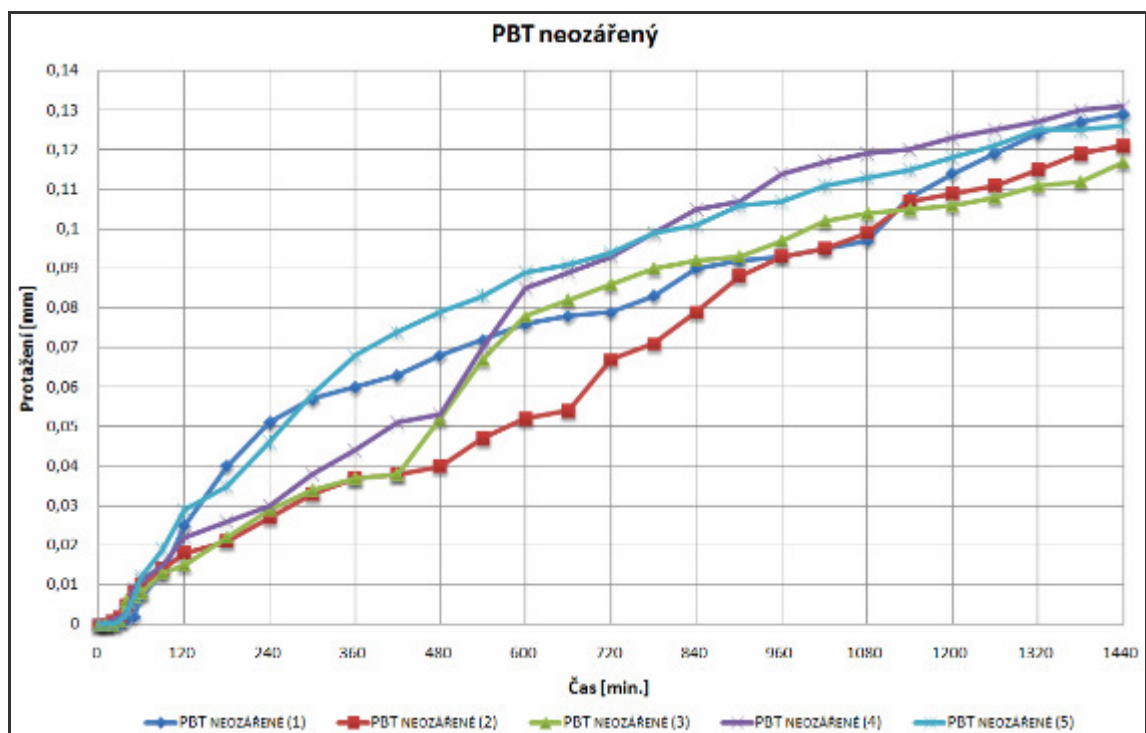


Obr. 53. Měření creepu pomocí číselníkového úchylkoměru a záznam teploty

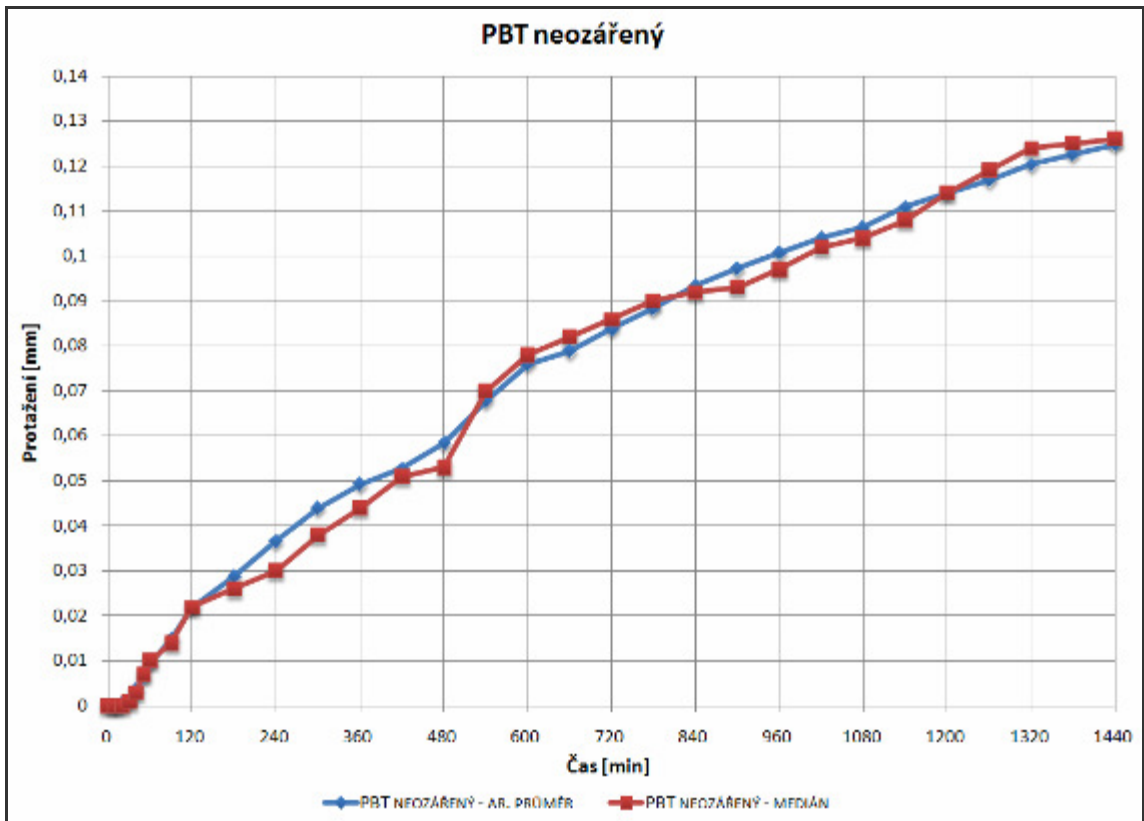
Pro tento typ creepové zkoušky v tahu byla zvolena časová osa 24 hodin, přičemž měření probíhalo v 0 min, 10 min, 20 min, 30 min, 40 min, 50 min, 60 min, 90 min, 120 min a následně každých 60 minut. Bylo rovněž nutné zapisovat teplotu. Měření teploty probíhalo s přesností na 0,1 °C.

Grafy a výpočty byly zpracovány jak v tabulkovém procesoru MS Excel 2003, tak i v programu MS MiniTAB 15.

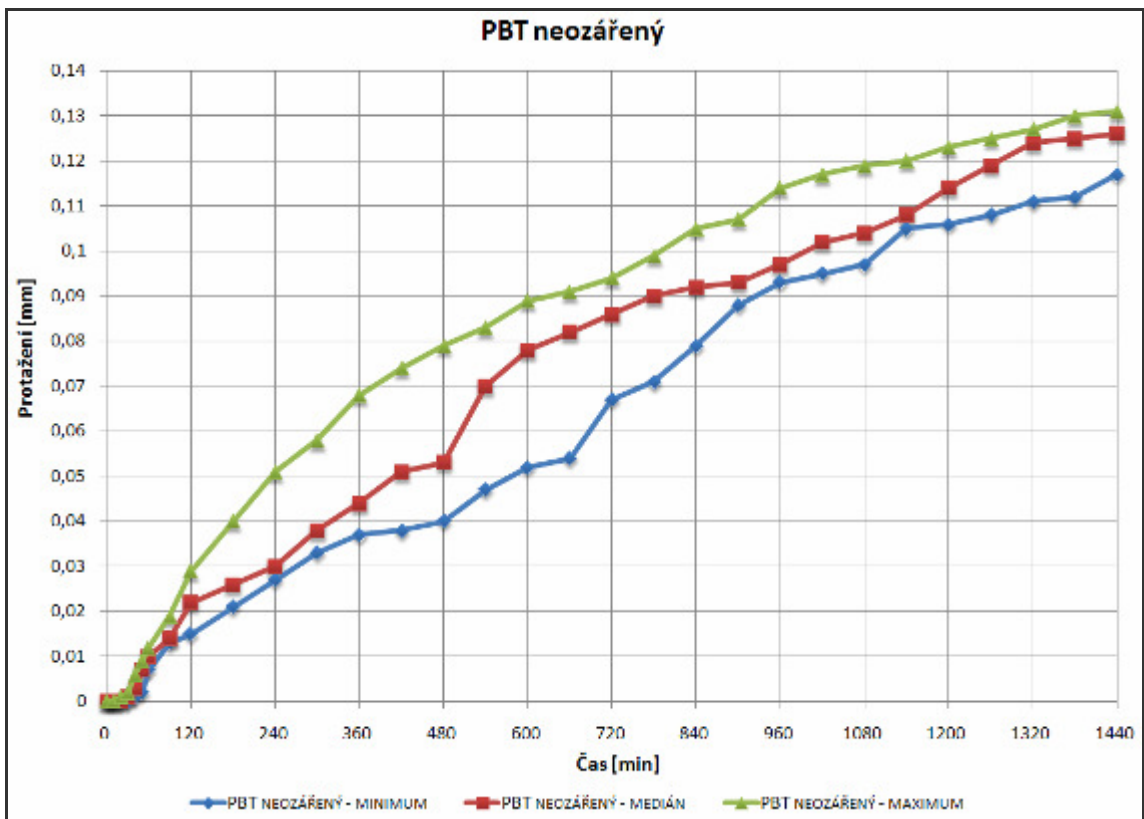
12.2.1 Creepové zkoušky neozářeného PBT



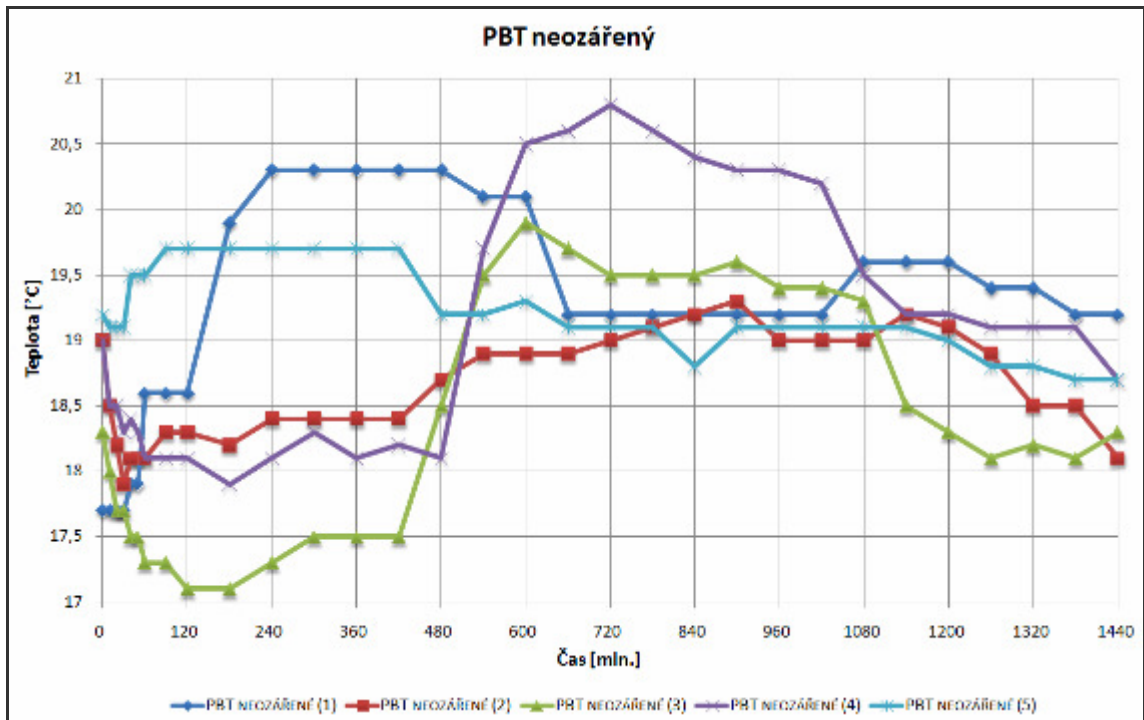
Obr. 54. Creepová zkouška neozářeného PBT



Obr. 55. Porovnání ar. průměru s mediánem u neozářeného PBT



Obr. 56. Porovnání maxima, minima a mediánu neozářeného PBT

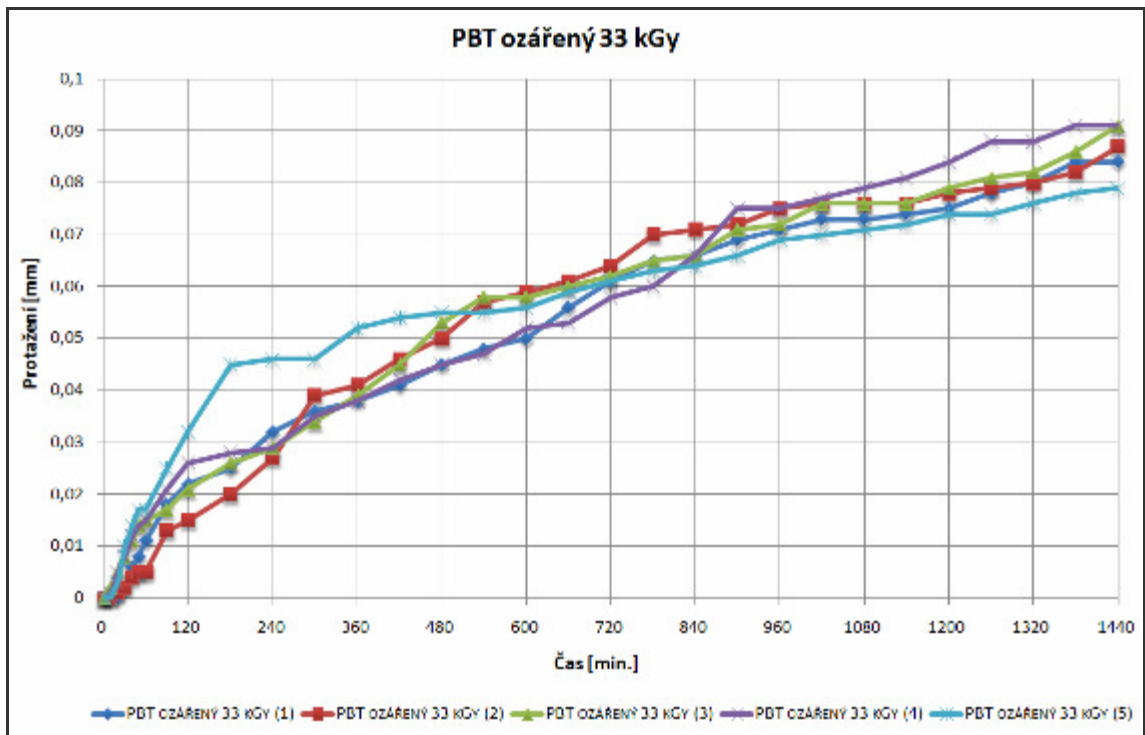


Obr. 57. Sledovaná teplota v místnosti (PBT neozářený)

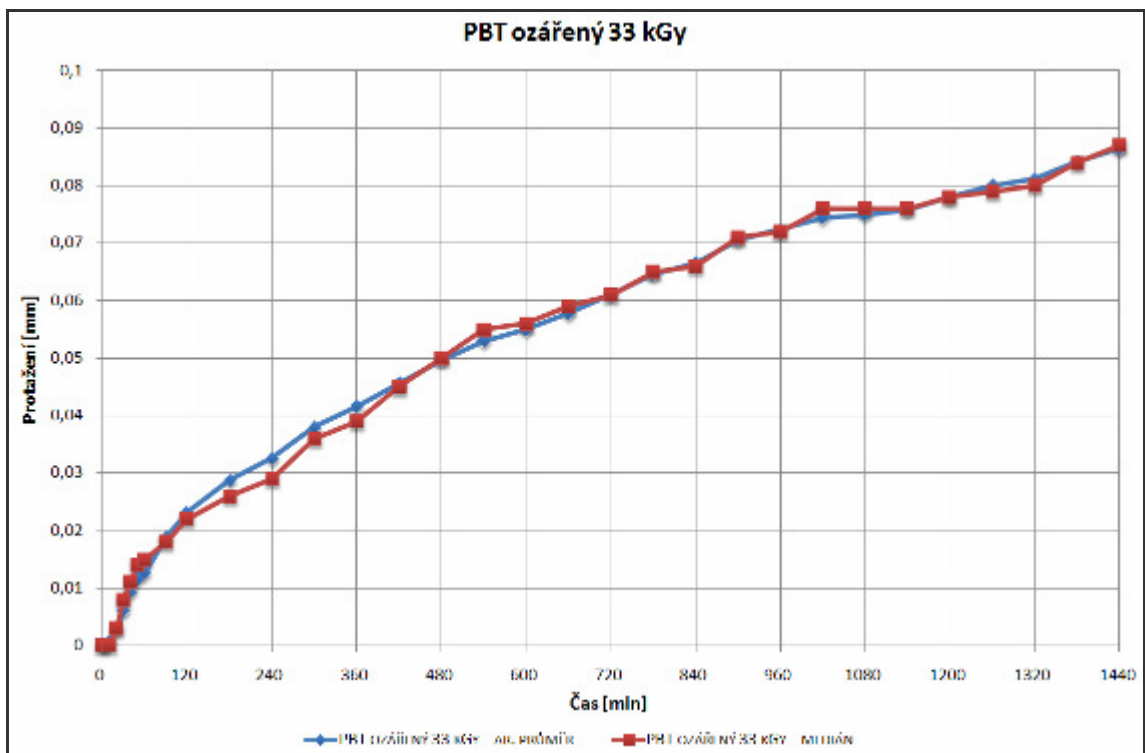
Z grafů lze pozorovat že hodnoty protažení neozářeného PBT se pohybují v rozmezí od 0,117 mm do 0,131 mm. Z grafu teploty v místnosti je patrné, že teplota kolísala. Kolísání teplot bylo v rozmezí od 17,1°C do 20,8°C. Jelikož byl nízký počet měření, byl vytvořen graf, který porovnává aritmetické průměry naměřených hodnot s jejich mediánem.

Vzrůst popř. pokles teplot byl způsoben topením v místnosti, ve které měření probíhalo. Kolísání teplot mohlo rovněž vzniknout při vstupu do místnosti, kdy docházelo k odečítání a zapisování naměřených hodnot.

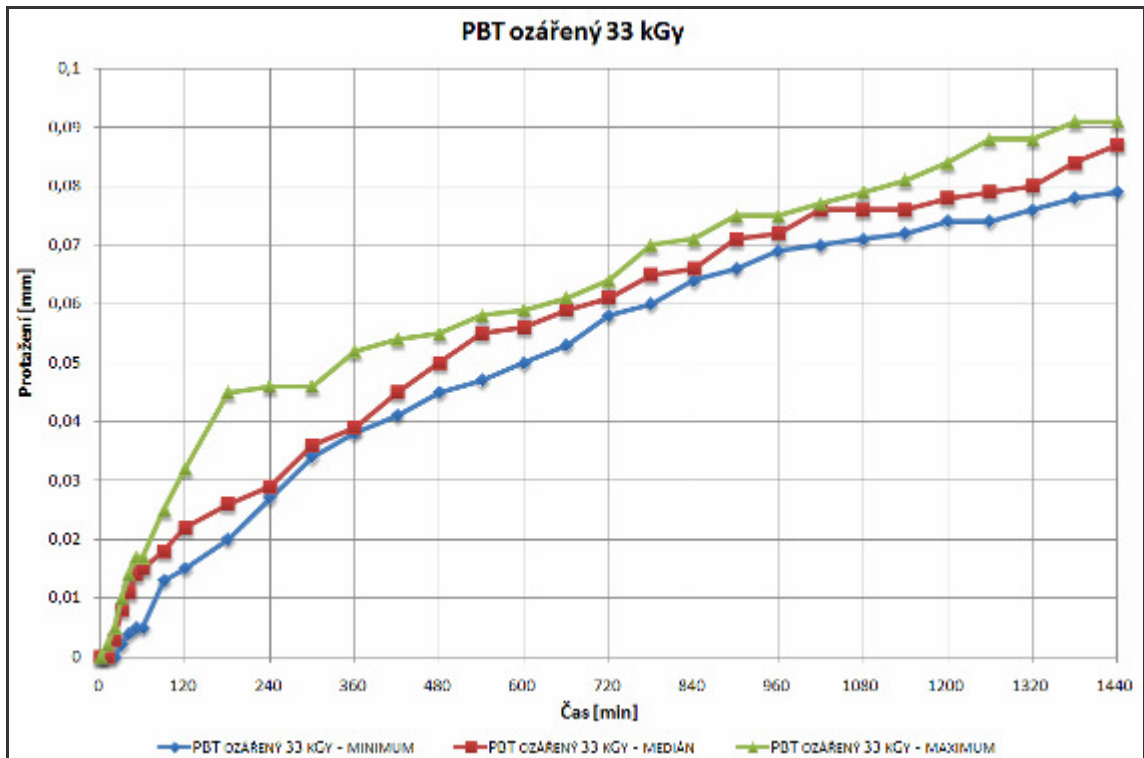
12.2.2 Creepové zkoušky PBT ozářeného 33kGy



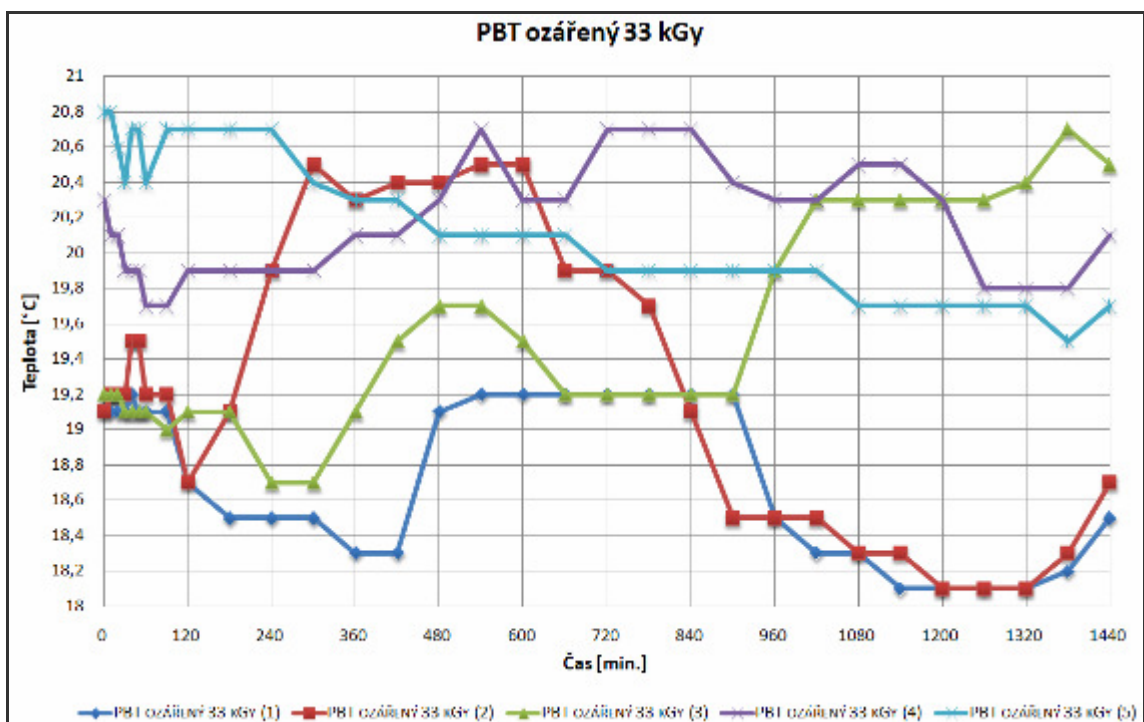
Obr. 58. Creepová zkouška PBT ozářeného 33 kGy



Obr. 59. Porovnání ar. průměru s mediánem u PBT ozářeného 33 kGy



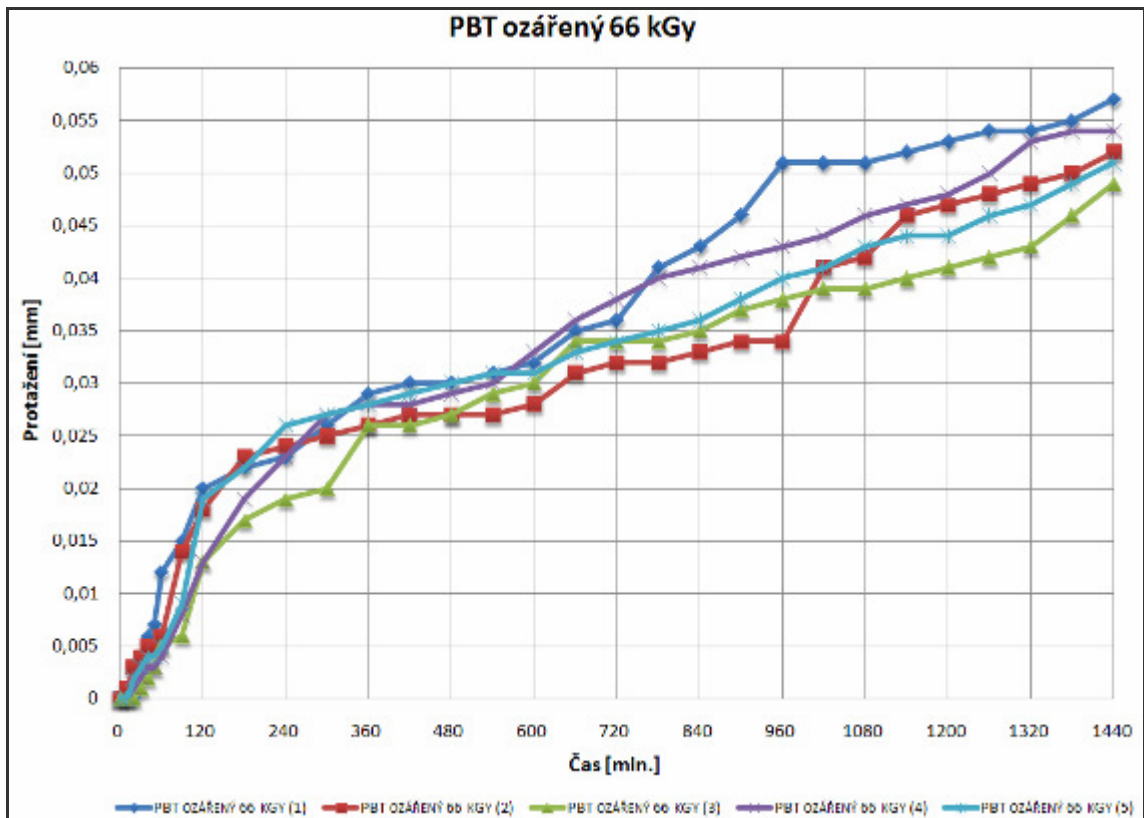
Obr. 60. Porovnání maxima, minima a mediánu PBT ozářeného 33 kGy



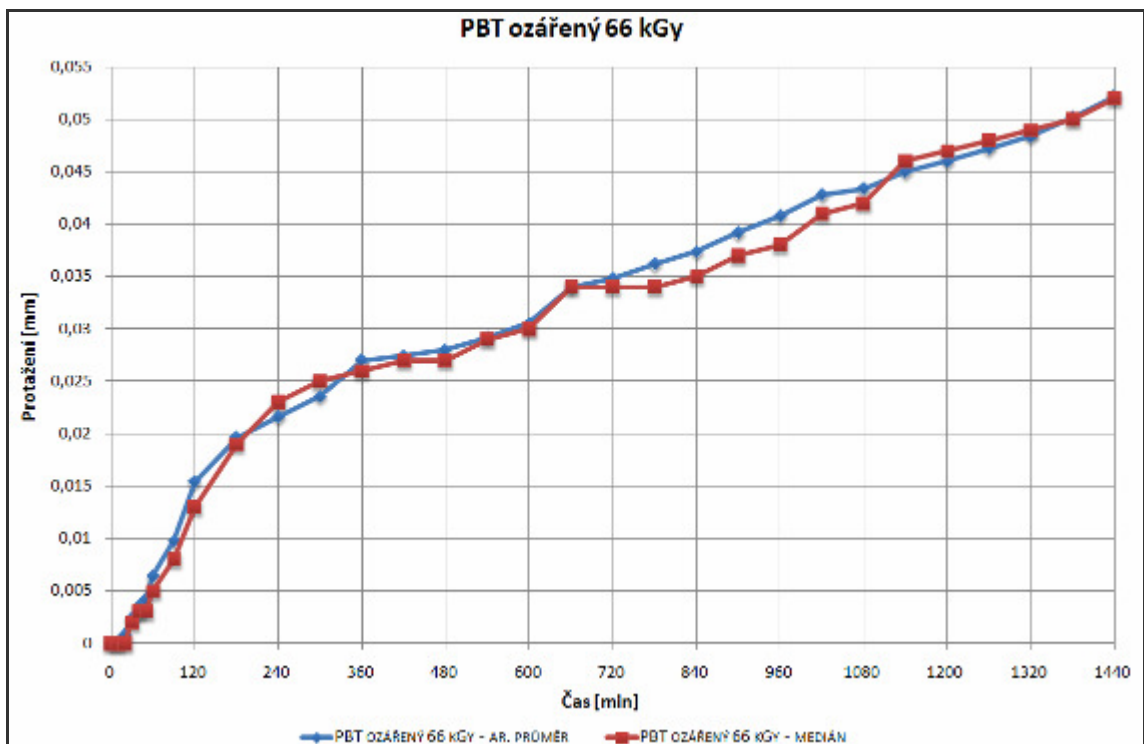
Obr. 61. Sledovaná teplota v místnosti (PBT ozářený 33 kGy)

Z grafů lze pozorovat že hodnoty protažení neozářeného PBT se pohybují v rozmezí od 0,079 mm do 0,091 mm. Z grafu teploty v místnosti je patrné, že teplota kolísala. Kolísání teplot bylo v rozmezí od 18,1°C do 20,8 °C.

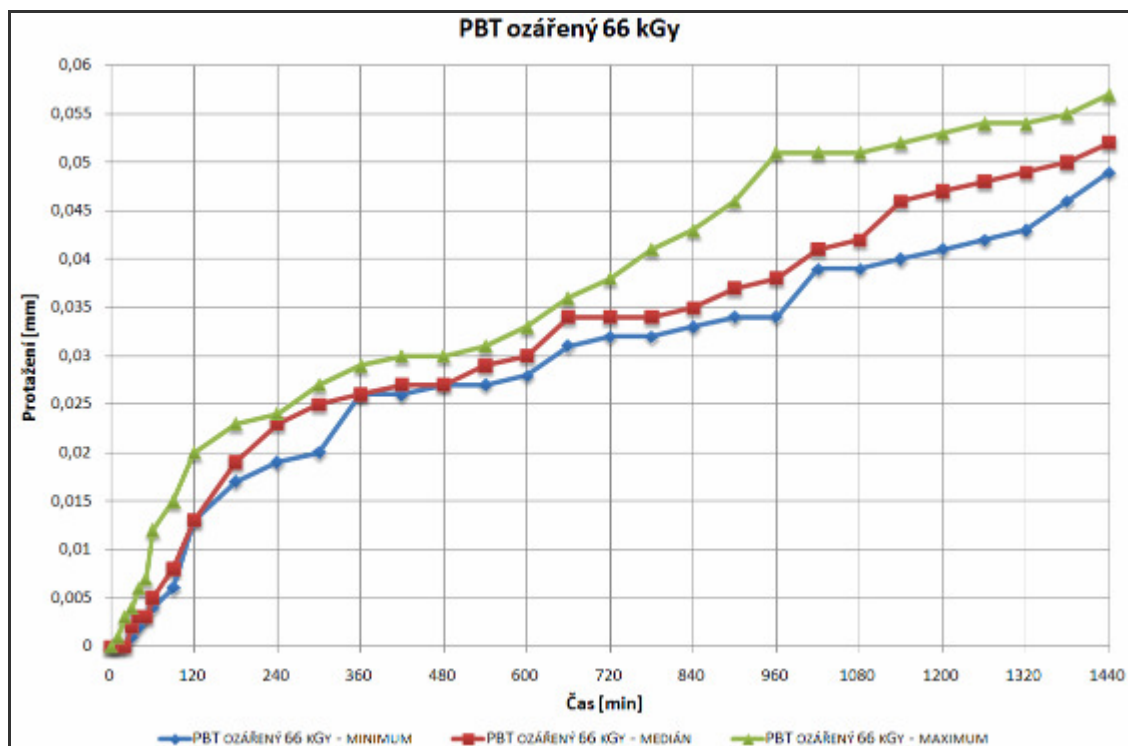
12.2.3 Creepové zkoušky PBT ozářeného 66 kGy



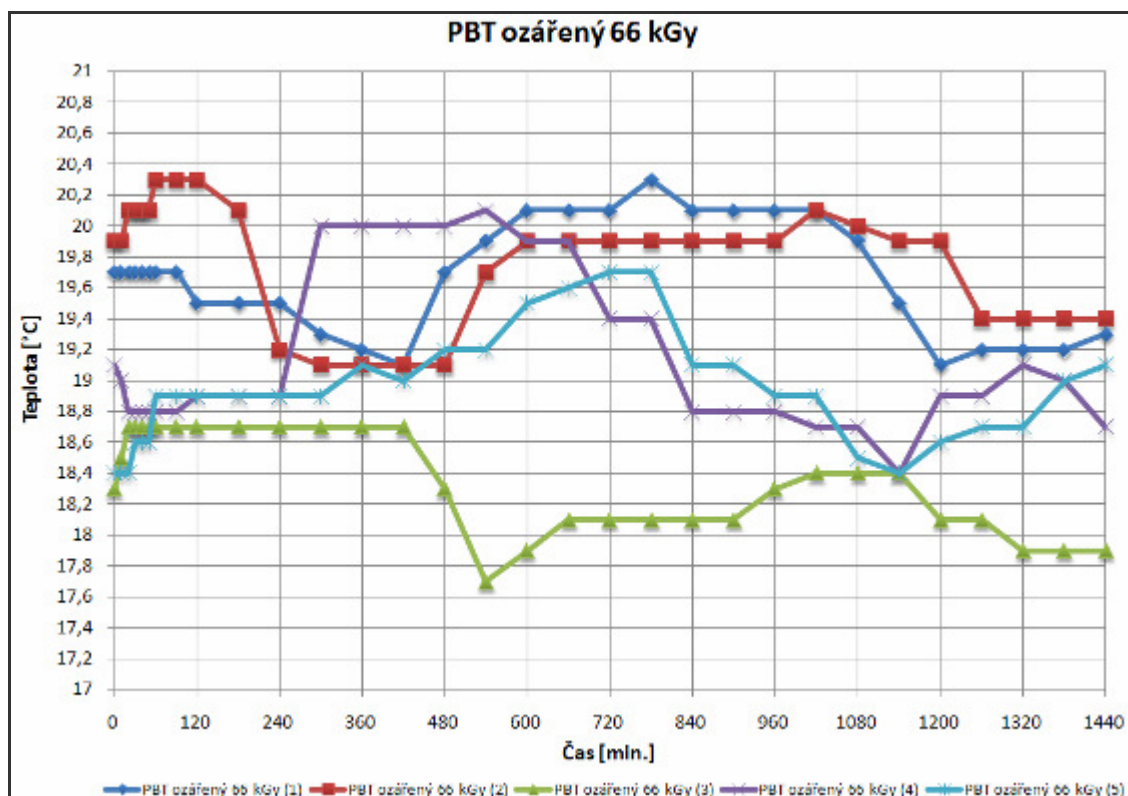
Obr. 62. Creepová zkouška PBT ozářeného 66 kGy



Obr. 63. Porovnání ar. průměru s mediánem u PBT ozářeného 66 kGy



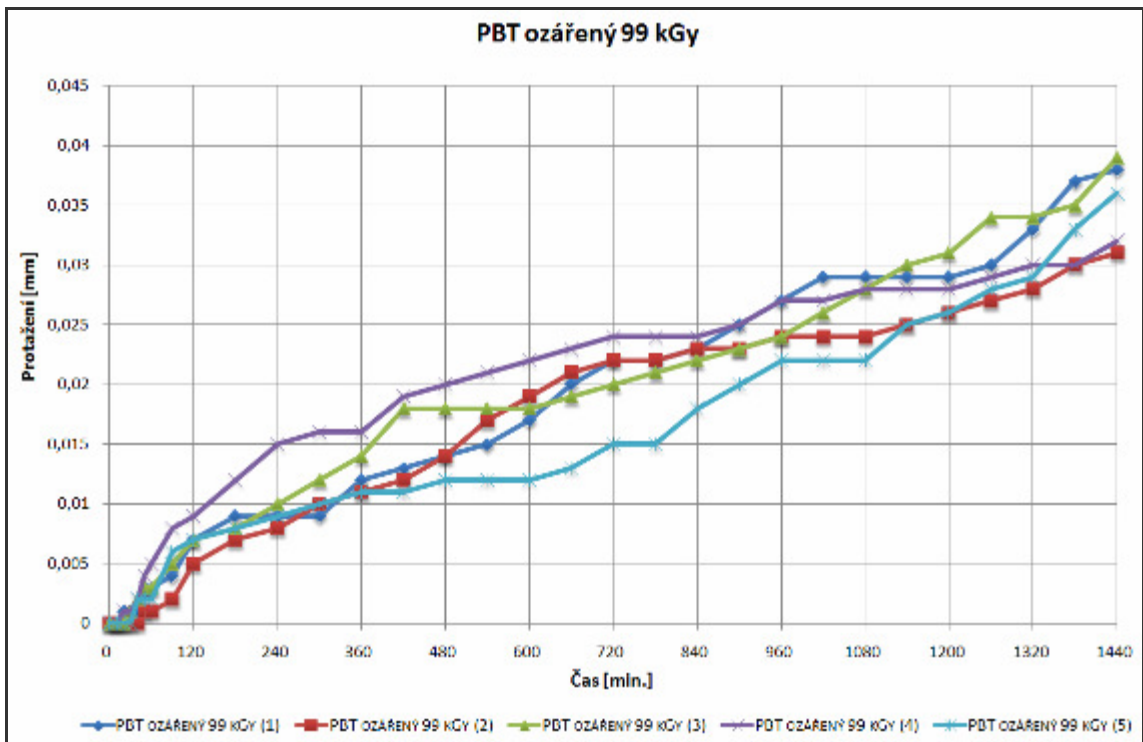
Obr. 64. Porovnání maxima, minima a mediánu PBT ozářeného 66 kGy



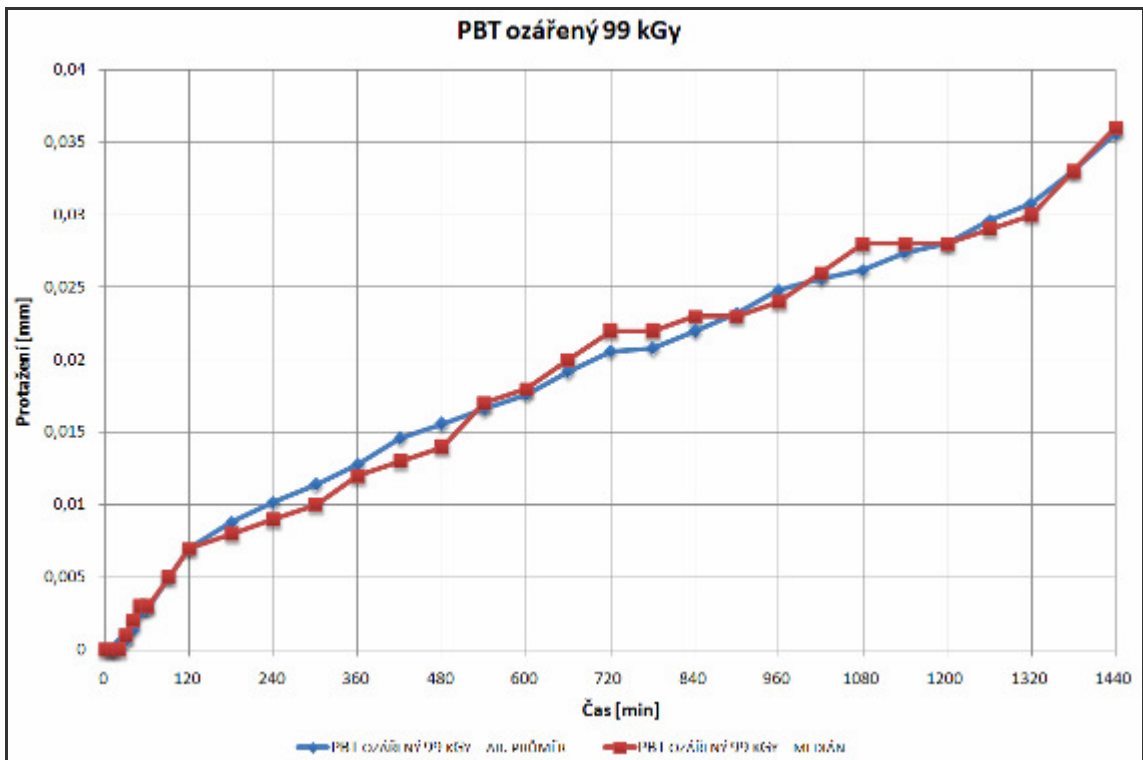
Obr. 65. Sledovaná teplota v místnosti (PBT ozářený 66 kGy)

Z grafů lze pozorovat že hodnoty protažení neozářeného PBT se pohybují v rozmezí od 0,049 mm do 0,057 mm. Z grafu teploty v místnosti je patrné, že teplota kolísala. Kolísání teplot bylo v rozmezí od 17,7°C do 20,3°C.

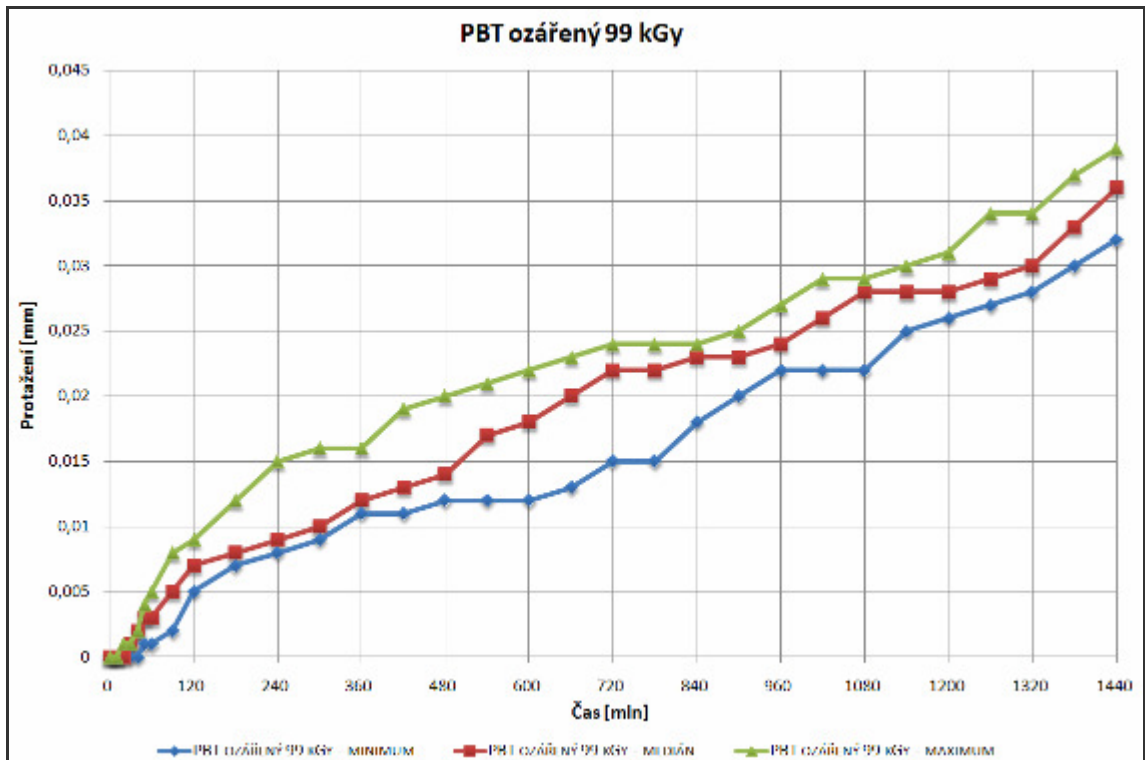
12.2.4 Creepové zkoušky PBT ozářeného 99 kGy



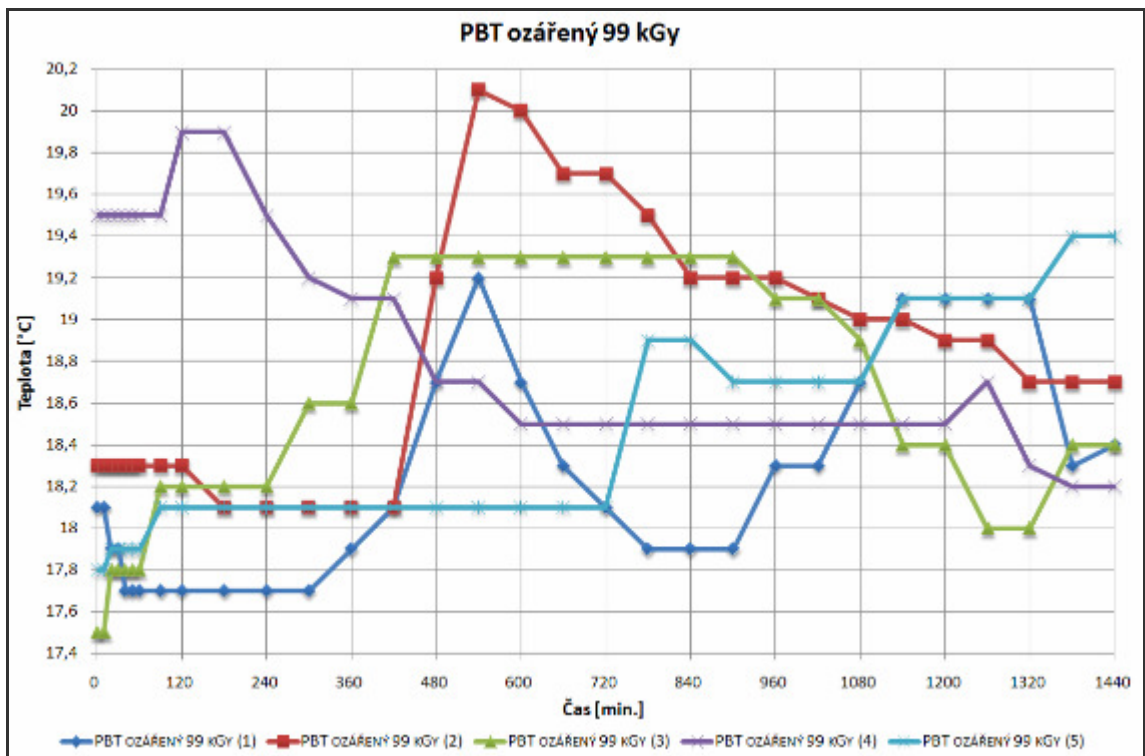
Obr. 66. Creepová zkouška PBT ozářeného 99 kGy



Obr. 67. Porovnání ar. průměru s mediánem u PBT ozářeného 99 kGy



Obr. 68. Porovnání maxima, minima a mediánu PBT ozářeného 99 kGy



Obr. 69. Sledovaná teplota v místnosti (PBT ozářený 99 kGy)

Z grafů lze pozorovat že hodnoty protažení neozařeného PBT se pohybují v rozmezí od 0,032 mm do 0,039 mm. Z grafu teploty v místnosti je patrné, že teplota kolísala. Kolísání teplot bylo v rozmezí od 17,5°C do 20,1°C.

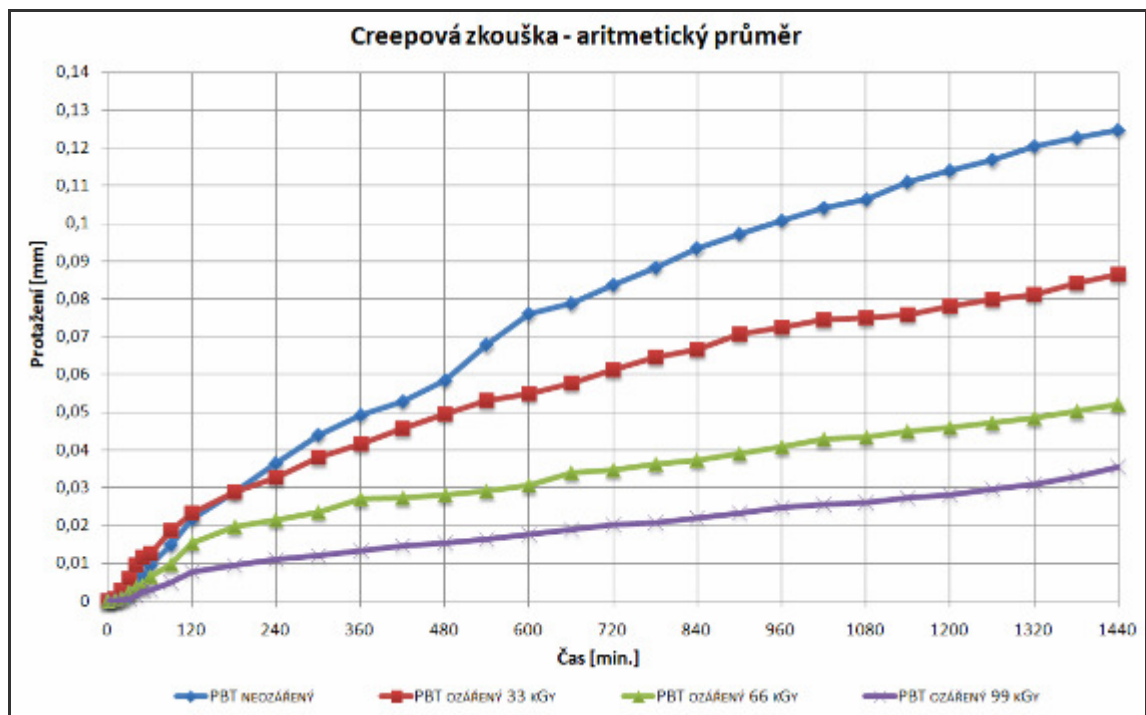
13 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Při porovnání výsledků měření mezi ozářeným a neozařeným PBT lze pozorovat, že protažení zkušebních těles se se zvyšující dávkou ozáření zmenšuje.

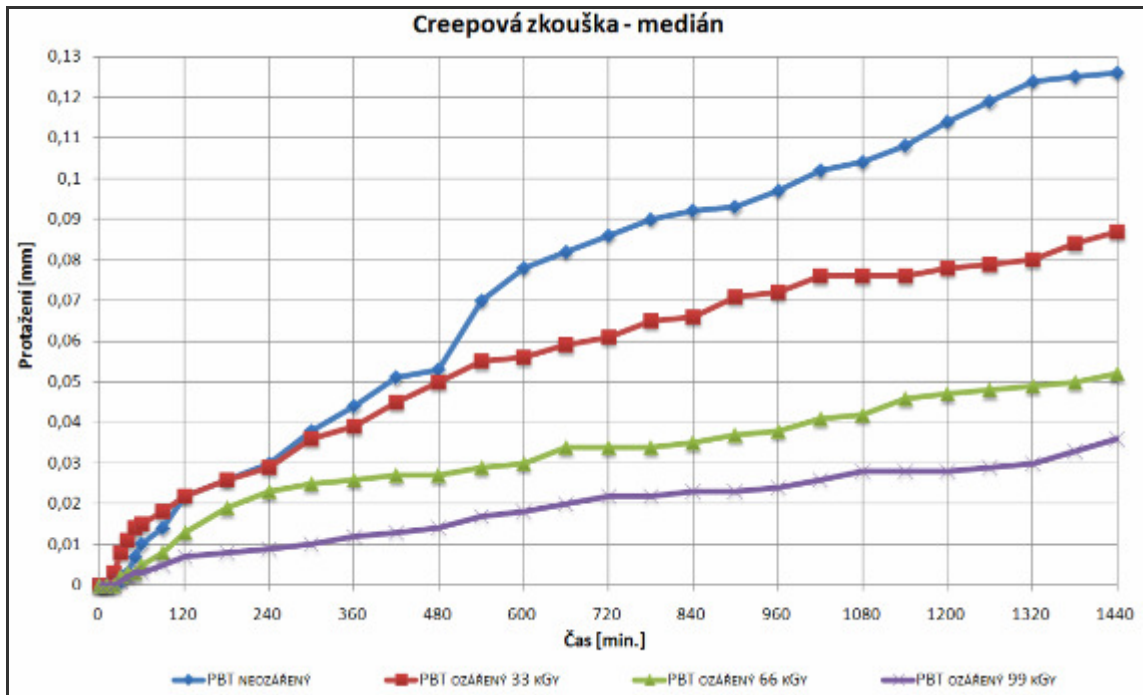
Výsledné hodnoty měření:

Tab. 11. Výsledky měření creepu

Zkoušený materiál	Ar. průměr	Medián	Minimum	Maximum
PBT neozařený	0,1248 mm	0,126 mm	0,117 mm	0,131 mm
PBT ozářený 33 kGy	0,0864 mm	0,087 mm	0,079 mm	0,091 mm
PBT ozářený 66 kGy	0,0522 mm	0,052 mm	0,049 mm	0,057 mm
PBT ozářený 99 kGy	0,0356 mm	0,036 mm	0,032 mm	0,039 mm



Obr. 70. Aritmetické průměry všech naměřených materiálů

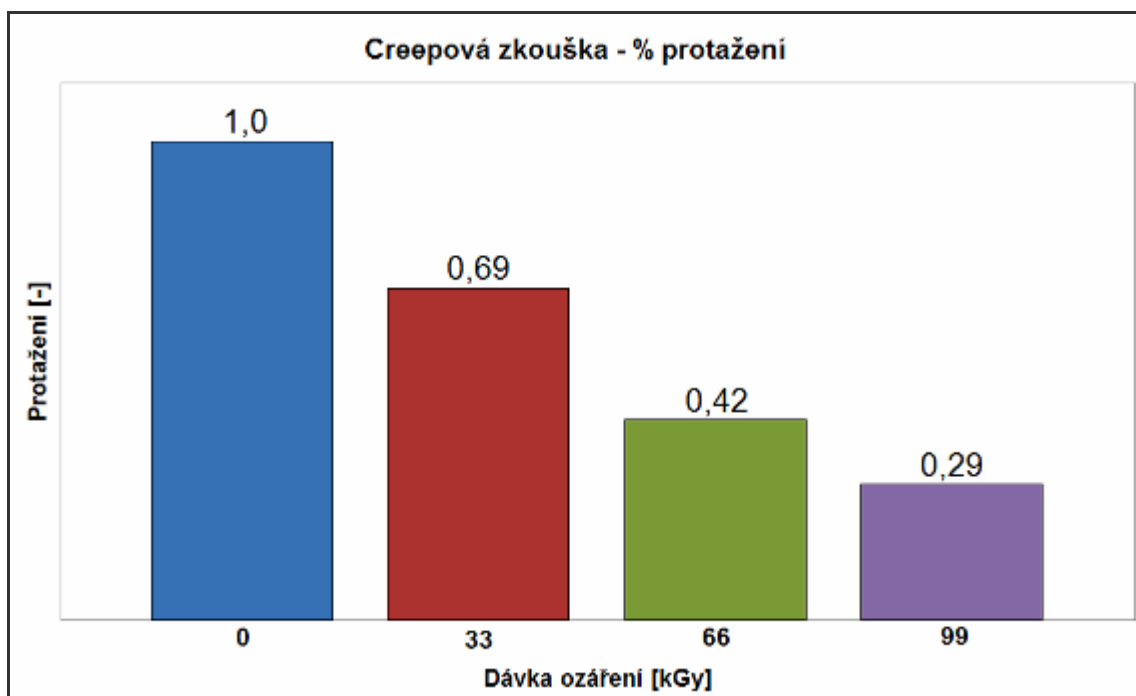


Obr. 71. Mediány všech naměřených materiálů

Při sledování křivek lze pozorovat, že grafy creepových zkoušek jsou rostoucí. Největší počáteční nárůst protažení je u materiálu ozářeného 33 kGy. Tento stav pozorujeme jak u grafu aritmetického průměru, tak i u grafu mediánů všech zkoušených těles.

Ve sledovaném čase je jednoznačně patrný příznivý vliv ozáření materiálu na jeho creepové vlastnosti. Se zvyšující se dávkou ozáření, při stejné velikosti a době zatížení, se velikost protažení výrazně snižuje.

Graf procentuelního protažení (Obr. 72) nám ukazuje jak se měnilo protažení zkoušených materiálů, přičemž hodnota protažení neozářeného PBT je zvolena jako 100%.



Obr. 72. Graf procentuelního protažení zkoušených materiálů

ZÁVĚR

Náplní této diplomové práce bylo navrhnout a zkonstruovat měřící zařízení na měření creepové zkoušky v tahu a zvolit nejvhodnější způsob měření této statické dlouhodobé zkoušky. V praktické části byla provedena měření creepové zkoušky zkušebních těles z PBT (polybutylentereftalátu) a to z neozářeného materiálu a ozářeného dávkami 33 kGy, 66 kGy a 99 kGy.

Samotné měření se provádělo laserovým měřícím zařízením Renishaw XL-80, které se ukázalo jako nevhodné pro měření creepového chování a to zejména kvůli pohotovostnímu režimu laseru, který činí 120 min. Laser se však může hodit při měření protažení zkušebních těles za zvýšených teplot, kde lze předpokládat kratší časy měření.

Další zvolený způsob měření bylo pomocí úchylkoměru. Byl použit číselníkový úchylkoměr s přesností záznamu 0,001 mm. Časová osa pro tento typ měření byla zvolena 24 hodin, přičemž 15 minut před spuštěním měřením bylo k ustavení měřícího stojanu, zajištění kolmosti osy zkušebního tělesa k ose měření, ale také nastavení nulového polohy číselníkového úchylkoměru.

Z důvodu časové náročnosti měření bylo provedeno pouze pro 5 zkušebních těles. Záznam se prováděl v těchto časových intervalech: 0 min, 10 min, 20 min, 30 min, 40 min, 50 min, 60 min, 90 min, 120 min a poté každou započatou hodinu.

Při měření byla rovněž sledována teplota v místnosti, která byla zaznamenávána s přesností na 0,1°C.

Měření PBT pomocí laseru

Měření pomocí laseru je bezdotykové a bylo uskutečněno ve školní laboratoři metrologie.

Při prvním experimentálním měření bylo zjištěno, že zatížený materiál určitým způsobem "kmitá". Bylo proto nutné měření s frekvencí záznamu 1 kHz zmenšit. Následné měření tak probíhalo s frekvencí záznamu 10 Hz. S touto frekvencí byla provedena tři měření, přičemž naměřená data jsou dosti odlišná. To mohlo být způsobeno např. okolními ruchy nebo také nehomogenitou prostředí.

Měření PBT pomocí číselníkového úchylkoměru

Měření bylo prováděno v místnosti, ve které byl zabráněn pohyb osob, aby byly zaručeny stejné podmínky při měření. V místnosti byl umístěn měřicí aparát, číselníkový úchylkoměr se stojanem a teploměr pro sledování teploty v místnosti.

Ze všech naměřených výsledků bylo zjištěno, že s rostoucí dávkou ozáření protažení zkušebních těles klesá. U materiálu ozářeného 33 kGy se ve srovnání s materiálem neozářeným změnilo protažení o téměř 30%. Ve srovnání neozářeného PBT (polybutylentereftalátu) s materiálem ozářeným 66 kGy se jedná o téměř 58% a u materiálu ozářeného 99 kGy je to o 71%.

Dále bylo měřením zjištěno kolísání teplot v místnosti, což má za následek nehomogenity prostředí. Nejmenší naměřená teplota byla 17,1°C a největší 20,8°C, což je kolísání v rozmezí 3,7°C.

Pro další studie creepových zkoušek radiačně ozářených materiálů, by se mělo s tímto jevem počítat a zaručit, co možná nejmenší výkyvy teplot. Toho lze dosáhnout např. měřením v klimatizované místnosti. Zároveň je nutné vyloučit i další vlivy okolního prostředí, jako je např. kmitání způsobené pohybem v místnosti.

V rámci diplomové práce bylo navrženo, vyrobeno a ověřeno zkušební zařízení. Vzhledem k zajímavosti řešení tematiky doporučuji na řešení pokračovat a ověřit možnost dlouhodobých zkoušek i zkoušek za vysokých teplot.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, V.: *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Praha: VŠCHT, 2006. 280 s. ISBN 80-7080-617-6
- [2] BRANDŠTETR, J. a kol.: *Chemie pro posluchače Fakulty strojního inženýrství*. 1. vyd. Brno: VUT 1999. 180 s. ISBN 80-214-1504-5
- [3] *Katedra tváření kovů a plastů: Technická univerzita Liberec*. [online]. [cit. 2009-28-11]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty.htm>
- [4] *FyzVlast3: Pedagogická fakulta*. [online]. [cit. 2009-28-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/FMkomplet3.htm>>
- [5] PROKOPOVÁ, I.: *Makromolekulární chemie*. 2. vyd. Praha: VŠCHT, 2007. 207 s. ISBN 978-80-7080-662-3
- [6] *Wikipedia: Otevřená encyklopedie*. [online]. [cit. 2009-28-11]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org>>
- [7] KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH, D.: *Úvod do studia materiálů*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2005. 191 s. ISBN 80-7080-568-4
- [8] VESELÝ, K.: *Polymery*. 1. vyd. Brno: ČSPCH, 1992. 178 s. ISBN 80-02-500951-7
- [9] RYBNÍKÁŘ, F.: *Makromolekulární chemie*. Zlín: FT VUT, 2000. 105 s. ISBN 80-214-1556-8
- [10] *Výuka: VOŠ restaurátorská*. [online]. [cit. 2009-28-11]. Dostupný z WWW: <<http://vyuka.z-moravec.net>>
- [11] MEISSNER, B., ZILVAR, V.: *Fyzika polymerů. Struktura a vlastnosti polymerních materiálů* 1. vyd. Praha: SNTL, 1987. 308 s. ISBN není
- [12] VÁLEK, M.: *Diplomová práce – Vliv ozařování na mechanické a termomechanické vlastnosti polypropylenu*. Zlín: UTB, 2006. 133 s. ISBN není
- [13] LAMBOROVÁ, R.: *Diplomová práce – Recyklace ozářených polymerů*. Zlín: UTB, 2009. 95 s. ISBN není

- [14] DANĚK, M., MAŇAS, D. Vliv radiačního síťování na vlastnosti. *Plasty: samostatná příloha technického týdeníku*. 2006, č. 23,
- [15] BGS: *Beta gama service*. [online]. [cit. 2009-28-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.bgs.de>>
- [16] ULLMAN, V.: *Jaderná fyzika, radiační fyzika, radioizotopy*. [online]. [cit. 2009-28-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.astronuklfyzika.cz/strana2.htm>>
- [17] *Identifikace typu záření: Fakulta biomedicínského inženýrství*. [online]. [cit. 2009-28-11]. Dostupný z WWW: <<http://nw.fbmi.cvut.cz/e/04-identifikacetypu-zareni/1937.pdf>>
- [18] HYLTON, DONALD C.: *Understanding Plastics Testing*. 1.vyd. Atlanta: Library of Congress, 2004. 93 s. ISBN 1-56990-366-2
- [19] Technická norma: ČSN EN ISO 899-1 (64 0621)
- [20] *Fyzika atomového jádra*. [online]. [cit. 2009-29-11]. Dostupný z WWW: <<http://atomovejadro.wz.cz/>>
- [21] SCHÄTZ, M., VONDRÁČEK, P.: *Zkoušení polymerů*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 1979. 264 s. ISBN není
- [22] *VUT Brno: Ústav materiálových věd a inženýrství*. [online]. [cit. 2009-10-12]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/>>
- [23] ŠIMEK, I.: *Fyzika polymérov*. 2. vyd. Bratislava: SVŠT, 1981. 167 s. ISBN není
- [24] *U of M: Department of Mechanical Engineering*. [online]. [cit. 2009-10-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.me.umn.edu/>>
- [25] *Thermoplastic Testing Center*. [online]. [cit. 2009-10-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.ulttc.com/en/methods/mechanical/>>
- [26] *TZB – info: Novinky ve vícevrstevném potrubí a radiační síťování plastů*. [online]. [cit. 2009-11-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3268>>
- [27] ZÁMORSKÝ, Z.: *Nauka o polymerech II*. 2. vyd. Brno: VUT, 1984. 126 s. ISBN není
- [28] *Arburg*. [online]. [cit. 2010-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.arburg.com>>

[29] *Renishaw*. [online]. [cit. 2010-02-04]. Dostupný z WWW: <<http://renishaw.com>>

[30] Technická norma: ČSN EN ISO 527 (64 0604)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PI	polyimid
PE	polyetylen
HDPE	vysokohustotní polyetylen
POM	polyoxymetylen
PEEK	polyéteréterketon
PTFE	polytetrafluoretylen
PP	polypropylen
PA6	polyamid 6
PA 6.6	polyamid 6.6
PA 11	polyamid 11
PA 12	polyamid 12
PPS	polyetylsulfid
PSU	polysulfon
PC	polykarbonát
PMMA	polymethylmetakrylát
SAN	styren-akrylonitril
ASA	akrylonitril-styren-akrylát
ABS	akrylonitril-butadien-styren
PVC	polyvinylchlorid
PBT	polybutylentereftalát
PET	polyetylentereftalát
PS	polystyren
TMA	termomechanická analýza
T_m	teplota tání [°C]

l_0	počáteční měřená délka [mm]
Δl	změna délky zkušebního tělesa [mm]
ε	poměrné prodloužení (deformace) [%]
σ_0	počáteční napětí [MPa]
σ	smykové napětí [MPa]
γ	rychlost smykové deformace [s^{-1}]
γ_1	hookovská složka deformace [s^{-1}]
γ_2	toková složka deformace [s^{-1}]
G	modul pružnosti ve smyku [MPa]
η	smyková viskozita [Pa·s]
τ	retardační čas
$J(t)$	creepová poddajnost [-]
t	čas [s]
k	rychlostní konstanta [-]
A	frekvenční faktor [s^{-1}]
E_{akt}	aktivační energie [$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$]
R	univerzální plynová konstanta [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$]
T	teplota [$^{\circ}\text{C}$]
m	hmotnost [kg]
V	objem [m^3]
ρ	hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
l_3	celková délka [mm]
l_2	vzdálenost mezi širokými částmi [mm]
l_1	délka pracovní části [mm]
L	počáteční vzdálenost mezi čelistmi [mm]

L_0	počáteční měřená délka [mm]
b_1	šířka pracovní části [mm]
b_2	šířka upínací části [mm]
h	tloušťka zkušebního tělesa [mm]
R	poloměr zakřivení [mm]
\bar{x}	aritmetický průměr
n	počet měření
s^2	rozptyl
s	směrodatná odchylka

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Rozdělení polymerů dle aplikace</i>	13
<i>Obr. 2. Základní klasifikace polymerů</i>	14
<i>Obr. 3. Tvar lineárních makromolekul [4]</i>	15
<i>Obr. 4. Tvar rozvětvených makromolekul [4]</i>	15
<i>Obr. 5. Tvary zesíťovaných makromolekul [4]</i>	16
<i>Obr. 6. Nadmolekulární struktura polymerů [3]</i>	17
<i>Obr. 7. Struktura sítě vytvrzeného reaktoplastu</i>	19
<i>Obr. 8. Schéma vzniku sítě [11]</i>	20
<i>Obr. 9. Materiál před a po radiačním zesíťování [15]</i>	23
<i>Obr. 10. Ozářené konektory z PBT po teplotním zatížení [15]</i>	24
<i>Obr. 11. Ukázka průchodnosti ionizujícího záření</i>	26
<i>Obr. 12. Záření alfa, beta a gama [6]</i>	27
<i>Obr. 13. Schéma pronikání elektronového-β a gama-γ záření [14]</i>	28
<i>Obr. 14. Schopnost pronikání elektronového-β a gama-γ záření [14]</i>	29
<i>Obr. 15. Charakteristika vlastností termoplastů na dávce ozáření [14]</i>	30
<i>Obr. 16. Termomechanická analýza (TMA) polyamidu [14]</i>	32
<i>Obr. 17. Obecná creepová křivka [22]</i>	37
<i>Obr. 18. Průběh creepové deformace</i>	38
<i>Obr. 19. Křivka prvního typu [21]</i>	39
<i>Obr. 20. Diagram mezních stavů [21]</i>	40
<i>Obr. 21. Schéma Kelvinova modelu [24]</i>	40
<i>Obr. 22. Závislost deformace na čase [24]</i>	41
<i>Obr. 23. Tucketův creepový model</i>	42
<i>Obr. 24. Čas. Závislost creepové poddajnosti</i>	43
<i>Obr. 25. Schéma stroje</i>	44
<i>Obr. 26. Schéma creepové zkoušky v ohybu [25]</i>	45
<i>Obr. 27. Jednoduchý Maxwellův model</i>	46
<i>Obr. 28. Modelová relaxační křivka pro $\tau = 1s$</i>	47
<i>Obr. 29. Schéma jednoduchého relaxometru v tahu [21]</i>	49
<i>Obr. 30. Schéma automatického relaxometru v tlaku [21]</i>	49
<i>Obr. 31. Rozměry zkušebních těles podle ČSN EN ISO 527 [30]</i>	53

<i>Obr. 32. Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420 C</i>	54
<i>Obr. 33. Zkušební tělesa připravená k radiačnímu ozáření</i>	56
<i>Obr. 34. Neozářený a ozářený indikátor stupně prozáření</i>	56
<i>Obr. 35. Zkompletované měřící zařízení</i>	58
<i>Obr. 36. První návrh čelistí</i>	59
<i>Obr. 37. Druhý návrh čelistí</i>	59
<i>Obr. 38. Trojnohý stojan pro měření</i>	60
<i>Obr. 39. Lineární oblast chování PBT (síla a napětí)</i>	61
<i>Obr. 40. Závaží a jeho rozměry</i>	62
<i>Obr. 41. Laserinterferometr XL-80 se stativem</i>	64
<i>Obr. 42. Prostředí programu Laser XLTM</i>	65
<i>Obr. 43. Vyvážení přístroje a nastavení měřící optiky</i>	66
<i>Obr. 44. Graf dynamického měření s frekvencí 1 kHz po dobu 600 s</i>	67
<i>Obr. 45. Graf creepového chování v čase $t = 100s$</i>	67
<i>Obr. 46. Graf creepového chování v čase $t = 10s$</i>	68
<i>Obr. 47. Graf creepového chování v čase $t = 1s$</i>	68
<i>Obr. 48. Graf creepového chování v čase $t = 0,1s$</i>	68
<i>Obr. 49. Graf dynamického měření s frekvencí 10 Hz po dobu 5000s (1. měření)</i>	69
<i>Obr. 50. Graf dynamického měření s frekvencí 10 Hz po dobu 5000s (2. měření)</i>	69
<i>Obr. 51. Graf dynamického měření s frekvencí 10 Hz po dobu 5000s (3. měření)</i>	70
<i>Obr. 52. Úchylkoměr s přesností 0,001 mm se stojanem</i>	71
<i>Obr. 53. Měření creepu pomocí číselníkového úchylkoměru a záznam teploty</i>	71
<i>Obr. 54. Creepová zkouška neozářeného PBT</i>	72
<i>Obr. 55. Porovnání ar. průměru s mediánem u neozářeného PBT</i>	73
<i>Obr. 56. Porovnání maxima, minima a mediánu neozářeného PBT</i>	73
<i>Obr. 57. Sledovaná teplota v místnosti (PBT neozářený)</i>	74
<i>Obr. 58. Creepová zkouška PBT ozářeného 33 kGy</i>	75
<i>Obr. 59. Porovnání ar. průměru s mediánem u PBT ozářeného 33 kGy</i>	75
<i>Obr. 60. Porovnání maxima, minima a mediánu PBT ozářeného 33 kGy</i>	76
<i>Obr. 61. Sledovaná teplota v místnosti (PBT ozářený 33 kGy)</i>	76
<i>Obr. 62. Creepová zkouška PBT ozářeného 66 kGy</i>	77
<i>Obr. 63. Porovnání ar. průměru s mediánem u PBT ozářeného 66 kGy</i>	77
<i>Obr. 64. Porovnání maxima, minima a mediánu PBT ozářeného 66 kGy</i>	78

<i>Obr. 65. Sledovaná teplota v místnosti (PBT ozářený 66 kGy)</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 66. Creepová zkouška PBT ozářeného 99 kGy.....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 67. Porovnání ar. průměru s mediánem u PBT ozářeného 66 kGy.....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 68. Porovnání maxima, minima a mediánu PBT ozářeného 99 kGy.....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 69. Sledovaná teplota v místnosti (PBT ozářený 99 kGy)</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 70. Aritmetické průměry všech naměřených materiálů</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 71. Mediány všech naměřených materiálů</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 72. Graf procentuelního protažení zkoušených materiálů</i>	<i>83</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Součinitel teplotní roztažnosti plastů v závislosti na jejich</i>	17
<i>Tab. 2. Základní systematické rozdělení plastů dle chemického složení [3].....</i>	18
<i>Tab. 3. Srovnání charakteristik elektronových urychlovačů a gama zařízení [14]</i>	29
<i>Tab. 4. Materiály vhodné pro radiační sítování [15]</i>	31
<i>Tab. 5. Příklad vybraných aplikací a vlastností získaných po ozáření [14]</i>	34
<i>Tab. 6. Parametry vstřikovacího stroje pro materiál PBT</i>	52
<i>Tab. 7. Rozměry zkušebních těles, typ 1A [30]</i>	53
<i>Tab. 8. Technické parametry použitého vstřikovacího stroje [28]</i>	55
<i>Tab. 9. Parametry systému laseru Renishaw XL-80 [29]</i>	65
<i>Tab. 10. Naměřená a vyhodnocená data odečtená v programu Laser XLTM</i>	70
<i>Tab. 11. Výsledky měření creepu</i>	81

SEZNAM PŘÍLOH

- P I: Certifikát 1/2
- P II: Certifikát 2/2
- P III: Dodací list
- P IV: Naměřené hodnoty creepové zkoušky neozářeného PBT 1/2
- P V: Naměřené hodnoty creepové zkoušky neozářeného PBT 2/2
- P VI: Naměřené hodnoty creepové zkoušky PBT ozářeného 33 kGy 1/2
- P VII: Naměřené hodnoty creepové zkoušky PBT ozářeného 33 kGy 2/2
- P VIII: Naměřené hodnoty creepové zkoušky PBT ozářeného 66 kGy 1/2
- P IX: Naměřené hodnoty creepové zkoušky PBT ozářeného 66 kGy 2/2
- P X: Naměřené hodnoty creepové zkoušky PBT ozářeného 99 kGy 1/2
- P XI: Naměřené hodnoty creepové zkoušky PBT ozářeného 99 kGy 2/2
- P XII: Aritmetické průměry creepových zkoušek
- P XIII: Mediány creepových zkoušek

III. PŘÍLOHY

PŘÍLOHA P I: CERTIFIKÁT 1/2

Zertifikat

BGS

IDEEN PLUS ENERGIE

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

Customer-no. : 330049
Date : 09.03.2010
Page : 1 of 2

Certificate-no.: 30300545

BGS-order-no.: 303.00410.01

Your order.: Testbars...

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12

Type of irradiation:

Electrons

1 piece(s)

1 Box(es)

Energy [MeV]:

10

Min. dose [kGy]:

33,00

Irradiation date:

08.03.2010

measured dose: 35,4 kGy

BGS-order-no.: 303.00410.02

Your order.: Testbars...

Batch: PA6/66/11/12 +PBT

Article: irradiation of samples

Type of irradiation:

Electrons

1 piece(s)

Energy [MeV]:

10

Min. dose [kGy]:

66,00

Irradiation date:

08.03.2010

measured dose: 70,1 kGy

BGS-order-no.: 303.00410.03

Your order.: Testbars...

Batch: PA6/66/11/12 + PBT

Article: irradiation of samples

Type of irradiation:

Electrons

1 piece(s)

Energy [MeV]:

10

Min. dose [kGy]:

99,00

Irradiation date:

08.03.2010

measured dose: 105,5 kGy

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



PŘÍLOHA P II: CERTIFIKÁT 2/2

Zertifikat

BGS

IDEEN PLUS ENERGIE

Certificate-no.: 30300545
Page : 2 of 2**BGS-order-no.:** 303.00410.04**Your order.:** Testbars...

Batch: PA6/66/11/12 + PBT 1 piece(s)

Article: irradiation of samples

Type of irradiation: Electrons

Energy [MeV]: 10

Min. dose [kGy]: 132,00

Irradiation date: 08.03.2010

measured dose: 139,0 kGy

BGS-order-no.: 303.00410.05**Your order.:** Testbars...

Batch: PA6/66/11/12 + PBT 1 piece(s)

PE für Rotation

Article: irradiation of samples

Type of irradiation: Electrons

Energy [MeV]: 10

Min. dose [kGy]: 165,00

Irradiation date: 08.03.2010

measured dose: 173,2 kGy

BGS-order-no.: 303.00410.06**Your order.:** Testbars...

Batch: PA6/66/11/12 1 piece(s)

Article: irradiation of samples

Type of irradiation: Electrons

Energy [MeV]: 10

Min. dose [kGy]: 198,00

Irradiation date: 08.03.2010

measured dose: 207,2 kGy

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

PŘÍLOHA P III: DODACÍ LIST

BGS

IDEEN PLUS ENERGIE

BGS Industriestraße 9 93342 Saal

Tomas Bata University
Faculty of Technology
nam.T.G. Masaryka 275
762 72 Zlin
Tschechische Republik

Telefon +49 (9441) 1777-0
Telefax +49 (9441) 1777-44

Internet: www.bgs.eu
E-Mail: info@bgs.eu

Original
Customer-no. : 330049
Date : 09.03.2010 / sg
Page : 1 of 1

Delivery note-no.: 30300592

BGS-order-no.: 303.00410.01

Your order-no.: Testbars

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12

Quantity delivered:	1 piece(s)	1 Box(es)
---------------------	------------	-----------

BGS-order-no.: 303.00410.02

Your order-no.: Testbars

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12 +PBT

Quantity delivered:	1 piece(s)	
---------------------	------------	--

BGS-order-no.: 303.00410.03

Your order-no.: Testbars

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12 + PBT

Quantity delivered:	1 piece(s)	
---------------------	------------	--

BGS-order-no.: 303.00410.04

Your order-no.: Testbars

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12 + PBT

Quantity delivered:	1 piece(s)	
---------------------	------------	--

BGS-order-no.: 303.00410.05

Your order-no.: Testbars

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12 + PBT

PE für Rotation

Quantity delivered:	1 piece(s)	
---------------------	------------	--

BGS-order-no.: 303.00410.06

Your order-no.: Testbars

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12

Quantity delivered:	1 piece(s)	
---------------------	------------	--

Total quantity:

1 Box(es)

BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG · Sitz Wiehl · Registergericht Köln HRA 16938 · USt.-IdNr.: DE 122 533 721

Persönlich haftender Gesellschafter BGS Beteiligungs GmbH · Sitz Wiehl · Registergericht Köln HRB 38648 · Geschäftsführer: Dr. Andreas Ostrowicki

Volksbank Oberberg eG
Kto. 6 433 014 - BLZ 384 621 35
IBAN Nr. DE 54 38462135 0006433014
BIC Nr. GENODE33WIL

Deutsche Bank Gummersbach
Kto. 0 123 430 - BLZ 384 700 91
IBAN Nr. DE 61 38470091 0012343000
BIC Nr. DEUTDE33384

Commerzbank Gummersbach
Kto. 7 865 777 - BLZ 384 400 16
IBAN Nr. DE 96 38440016 0786577700
BIC Nr. COBADE33384

PŘÍLOHA P IV: NAMĚŘENÉ HODNOTY CREEPOVÉ ZKOUŠKY NEOZÁŘENÉHO PBT 1/2

Naměřené hodnoty protažení neozářeného PBT

	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření		
Čas [min]	Protažení [mm]					Ar. průměr [mm]	Směrod. odchylka
0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0,001	0	0,001	0	0,0004	0,000548
30	0	0,002	0,001	0,002	0,001	0,0012	0,000837
40	0,001	0,005	0,006	0,003	0,003	0,0036	0,001949
50	0,002	0,008	0,007	0,009	0,007	0,0066	0,002702
60	0,007	0,01	0,008	0,011	0,012	0,0096	0,002074
90	0,013	0,014	0,013	0,015	0,019	0,0148	0,00249
120	0,025	0,018	0,015	0,022	0,029	0,0218	0,005541
180	0,04	0,021	0,022	0,026	0,035	0,0288	0,008349
240	0,051	0,027	0,029	0,03	0,046	0,0366	0,011059
300	0,057	0,033	0,034	0,038	0,058	0,044	0,01247
360	0,06	0,037	0,037	0,044	0,068	0,0492	0,014096
420	0,063	0,038	0,038	0,051	0,074	0,0528	0,01577
480	0,068	0,04	0,052	0,053	0,079	0,0584	0,015209
540	0,072	0,047	0,067	0,07	0,083	0,0678	0,013103
600	0,076	0,052	0,078	0,085	0,089	0,076	0,014405
660	0,078	0,054	0,082	0,089	0,091	0,0788	0,014822
720	0,079	0,067	0,086	0,093	0,094	0,0838	0,011167
780	0,083	0,071	0,09	0,099	0,099	0,0884	0,011824
840	0,09	0,079	0,092	0,105	0,101	0,0934	0,010164
900	0,092	0,088	0,093	0,107	0,106	0,0972	0,008701
960	0,093	0,093	0,097	0,114	0,107	0,1008	0,009338
1020	0,095	0,095	0,102	0,117	0,111	0,104	0,009798
1080	0,097	0,099	0,104	0,119	0,113	0,1064	0,00937
1140	0,108	0,107	0,105	0,12	0,115	0,111	0,006285
1200	0,114	0,109	0,106	0,123	0,118	0,114	0,006819
1260	0,119	0,111	0,108	0,125	0,121	0,1168	0,007085
1320	0,124	0,115	0,111	0,127	0,125	0,1204	0,006986
1380	0,127	0,119	0,112	0,13	0,125	0,1226	0,007162
1440	0,129	0,121	0,117	0,131	0,126	0,1248	0,005762

PŘÍLOHA P V: NAMĚŘENÉ HODNOTY CREEPOVÉ ZKOUŠKY NEOZÁŘENÉHO PBT 2/2

Naměřené hodnoty teploty v místnosti u neozářeného PBT

	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření		
Čas [min]	Teplota v místnosti [°C]					Ar. průměr [°C]	Směrod. odchylka
0	17,7	19	18,3	19	19,2	18,64	0,626897
10	17,7	18,5	18	18,5	19,1	18,36	0,536656
20	17,7	18,2	17,7	18,5	19,1	18,24	0,589915
30	17,7	17,9	17,7	18,3	19,1	18,14	0,589915
40	17,9	18,1	17,5	18,4	19,5	18,28	0,756307
50	17,9	18,1	17,5	18,3	19,5	18,26	0,753658
60	18,6	18,1	17,3	18,1	19,5	18,32	0,807465
90	18,6	18,3	17,3	18,1	19,7	18,4	0,87178
120	18,6	18,3	17,1	18,1	19,7	18,36	0,937017
180	19,9	18,2	17,1	17,9	19,7	18,56	1,203329
240	20,3	18,4	17,3	18,1	19,7	18,76	1,219836
300	20,3	18,4	17,5	18,3	19,7	18,84	1,134901
360	20,3	18,4	17,5	18,1	19,7	18,8	1,161895
420	20,3	18,4	17,5	18,2	19,7	18,82	1,147606
480	20,3	18,7	18,5	18,1	19,2	18,96	0,847349
540	20,1	18,9	19,5	19,7	19,2	19,48	0,460435
600	20,1	18,9	19,9	20,5	19,3	19,74	0,638749
660	19,2	18,9	19,7	20,6	19,1	19,5	0,681909
720	19,2	19	19,5	20,8	19,1	19,52	0,739594
780	19,2	19,1	19,5	20,6	19,1	19,5	0,636396
840	19,2	19,2	19,5	20,4	18,8	19,42	0,601664
900	19,2	19,3	19,6	20,3	19,1	19,5	0,484768
960	19,2	19	19,4	20,3	19,1	19,4	0,524404
1020	19,2	19	19,4	20,2	19,1	19,38	0,481664
1080	19,6	19	19,3	19,5	19,1	19,3	0,254951
1140	19,6	19,2	18,5	19,2	19,1	19,12	0,396232
1200	19,6	19,1	18,3	19,2	19	19,04	0,472229
1260	19,4	18,9	18,1	19,1	18,8	18,86	0,482701
1320	19,4	18,5	18,2	19,1	18,8	18,8	0,474342
1380	19,2	18,5	18,1	19,1	18,7	18,72	0,449444
1440	19,2	18,1	18,3	18,7	18,7	18,6	0,424264

PŘÍLOHA P VI: NAMĚŘENÉ HODNOTY CREEPOVÉ ZKOUŠKY PBT OZÁŘENÉHO 33 KGY 1/2

Naměřené hodnoty protažení PBT ozářeného 33 kGy

	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření		
Čas [min]	Protažení [mm]					Ar. průměr [mm]	Směrod. odchylka
0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0,002	0,001	0	0,0006	0,000894
20	0	0,001	0,005	0,005	0,003	0,0028	0,00228
30	0,002	0,002	0,008	0,008	0,01	0,006	0,003742
40	0,006	0,004	0,011	0,012	0,014	0,0094	0,004219
50	0,008	0,005	0,014	0,014	0,017	0,0116	0,00493
60	0,011	0,005	0,015	0,015	0,017	0,0126	0,004775
90	0,018	0,013	0,017	0,021	0,025	0,0188	0,004494
120	0,022	0,015	0,021	0,026	0,032	0,0232	0,006301
180	0,025	0,02	0,026	0,028	0,045	0,0288	0,009524
240	0,032	0,027	0,029	0,029	0,046	0,0326	0,007701
300	0,036	0,039	0,034	0,035	0,046	0,038	0,004848
360	0,038	0,041	0,039	0,038	0,052	0,0416	0,005941
420	0,041	0,046	0,045	0,042	0,054	0,0456	0,005128
480	0,045	0,05	0,053	0,045	0,055	0,0496	0,004561
540	0,048	0,057	0,058	0,047	0,055	0,053	0,005148
600	0,05	0,059	0,058	0,052	0,056	0,055	0,003873
660	0,056	0,061	0,06	0,053	0,059	0,0578	0,003271
720	0,061	0,064	0,062	0,058	0,061	0,0612	0,002168
780	0,065	0,07	0,065	0,06	0,063	0,0646	0,003647
840	0,066	0,071	0,066	0,066	0,064	0,0666	0,002608
900	0,069	0,072	0,071	0,075	0,066	0,0706	0,003362
960	0,071	0,075	0,072	0,075	0,069	0,0724	0,002608
1020	0,073	0,076	0,076	0,077	0,07	0,0744	0,002881
1080	0,073	0,076	0,076	0,079	0,071	0,075	0,003082
1140	0,074	0,076	0,076	0,081	0,072	0,0758	0,003347
1200	0,075	0,078	0,079	0,084	0,074	0,078	0,003937
1260	0,078	0,079	0,081	0,088	0,074	0,08	0,005148
1320	0,08	0,08	0,082	0,088	0,076	0,0812	0,004382
1380	0,084	0,082	0,086	0,091	0,078	0,0842	0,004817
1440	0,084	0,087	0,091	0,091	0,079	0,0864	0,005079

PŘÍLOHA P VII: NAMĚŘENÉ HODNOTY CREEPOVÉ ZKOUŠKY PBT OZÁŘENÉHO 33 KGY 2/2

Naměřené hodnoty teploty v místnosti u PBT ozářeného 33 kGy

Čas [min]	Teplota v místnosti [°C]					Ar. průměr [°C]	Směr. odchylna
	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření		
0	19,1	19,1	19,2	20,3	20,8	19,7	0,712741
10	19,1	19,2	19,2	20,1	20,8	19,68	0,667533
20	19,1	19,2	19,2	20,1	20,6	19,64	0,601997
30	19,1	19,2	19,1	19,9	20,4	19,54	0,523832
40	19,2	19,5	19,1	19,9	20,7	19,68	0,581034
50	19,1	19,5	19,1	19,9	20,7	19,66	0,598665
60	19,1	19,2	19,1	19,7	20,4	19,5	0,501996
90	19,1	19,2	19	19,7	20,7	19,54	0,628013
120	18,7	18,7	19,1	19,9	20,7	19,42	0,775629
180	18,5	19,1	19,1	19,9	20,7	19,46	0,763151
240	18,5	19,9	18,7	19,9	20,7	19,54	0,82365
300	18,5	20,5	18,7	19,9	20,4	19,6	0,843801
360	18,3	20,3	19,1	20,1	20,3	19,62	0,79599
420	18,3	20,4	19,5	20,1	20,3	19,72	0,775629
480	19,1	20,4	19,7	20,3	20,1	19,92	0,474974
540	19,2	20,5	19,7	20,7	20,1	20,04	0,542586
600	19,2	20,5	19,5	20,3	20,1	19,92	0,491528
660	19,2	19,9	19,2	20,3	20,1	19,74	0,458694
720	19,2	19,9	19,2	20,7	19,9	19,78	0,556417
780	19,2	19,7	19,2	20,7	19,9	19,74	0,553534
840	19,2	19,1	19,2	20,7	19,9	19,62	0,611228
900	19,2	18,5	19,2	20,4	19,9	19,44	0,652993
960	18,5	18,5	19,9	20,3	19,9	19,42	0,765245
1020	18,3	18,5	20,3	20,3	19,9	19,46	0,88
1080	18,3	18,3	20,3	20,5	19,7	19,42	0,95163
1140	18,1	18,3	20,3	20,5	19,7	19,38	1,0008
1200	18,1	18,1	20,3	20,3	19,7	19,3	1,003992
1260	18,1	18,1	20,3	19,8	19,7	19,2	0,920869
1320	18,1	18,1	20,4	19,8	19,7	19,22	0,945304
1380	18,2	18,3	20,7	19,8	19,5	19,3	0,944458
1440	18,5	18,7	20,5	20,1	19,7	19,5	0,779744

PŘÍLOHA P VIII: NAMĚŘENÉ HODNOTY CREEPOVÉ ZKOUŠKY PBT OZÁŘENÉHO 66 KGY 1/2

Naměřené hodnoty protažení PBT ozářeného 66 kGy

Čas [min]	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření	Ar. průměr [°C]	Směrod. odchylka
	Protažení [°C]						
0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0,001	0	0	0	0,0002	0,0004
20	0	0,003	0	0	0,001	0,0008	0,001166
30	0,004	0,004	0,001	0,001	0,002	0,0024	0,001356
40	0,006	0,005	0,002	0,002	0,003	0,0036	0,001625
50	0,007	0,005	0,003	0,003	0,003	0,0042	0,0016
60	0,012	0,006	0,005	0,005	0,004	0,0064	0,002871
90	0,015	0,014	0,006	0,006	0,008	0,0098	0,003919
120	0,02	0,018	0,013	0,013	0,013	0,0154	0,003007
180	0,022	0,023	0,017	0,017	0,019	0,0196	0,002498
240	0,023	0,024	0,019	0,019	0,023	0,0216	0,002154
300	0,026	0,025	0,02	0,02	0,027	0,0236	0,003007
360	0,029	0,026	0,026	0,026	0,028	0,027	0,001265
420	0,03	0,027	0,026	0,026	0,028	0,0274	0,001497
480	0,03	0,027	0,027	0,027	0,029	0,028	0,001265
540	0,031	0,027	0,029	0,029	0,03	0,0292	0,001327
600	0,032	0,028	0,03	0,03	0,033	0,0306	0,001744
660	0,035	0,031	0,034	0,034	0,036	0,034	0,001673
720	0,036	0,032	0,034	0,034	0,038	0,0348	0,00204
780	0,041	0,032	0,034	0,034	0,04	0,0362	0,0036
840	0,043	0,033	0,035	0,035	0,041	0,0374	0,003878
900	0,046	0,034	0,037	0,037	0,042	0,0392	0,004261
960	0,051	0,034	0,038	0,038	0,043	0,0408	0,005845
1020	0,051	0,041	0,039	0,039	0,044	0,0428	0,00449
1080	0,051	0,042	0,039	0,039	0,046	0,0434	0,004587
1140	0,052	0,046	0,04	0,04	0,047	0,045	0,004561
1200	0,053	0,047	0,041	0,041	0,048	0,046	0,004561
1260	0,054	0,048	0,042	0,042	0,05	0,0472	0,004665
1320	0,054	0,049	0,043	0,043	0,053	0,0484	0,004716
1380	0,055	0,05	0,046	0,046	0,054	0,0502	0,003816
1440	0,057	0,052	0,049	0,049	0,054	0,0522	0,003059

PŘÍLOHA P IX: NAMĚŘENÉ HODNOTY CREEPOVÉ ZKOUŠKY PBT OZÁŘENÉHO 66 KGY 2/2

Naměřené hodnoty teploty v místnosti u PBT ozářeného 66 kGy

	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření		
Čas [min]	Teplota v místnosti [°C]					Ar. průměr [°C]	Směrod. odchylka
0	19,7	19,9	18,3	19,1	18,4	19,08	0,65238
10	19,7	19,9	18,5	19	18,4	19,1	0,609918
20	19,7	20,1	18,7	18,8	18,4	19,14	0,646838
30	19,7	20,1	18,7	18,8	18,6	19,18	0,604649
40	19,7	20,1	18,7	18,8	18,6	19,18	0,604649
50	19,7	20,1	18,7	18,8	18,6	19,18	0,604649
60	19,7	20,3	18,7	18,8	18,9	19,28	0,620967
90	19,7	20,3	18,7	18,8	18,9	19,28	0,620967
120	19,5	20,3	18,7	18,9	18,9	19,26	0,58515
180	19,5	20,1	18,7	18,9	18,9	19,22	0,515364
240	19,5	19,2	18,7	18,9	18,9	19,04	0,28
300	19,3	19,1	18,7	20	18,9	19,2	0,447214
360	19,2	19,1	18,7	20	19,1	19,22	0,426146
420	19,1	19,1	18,7	20	19	19,18	0,435431
480	19,7	19,1	18,3	20	19,2	19,26	0,581722
540	19,9	19,7	17,7	20,1	19,2	19,32	0,863481
600	20,1	19,9	17,9	19,9	19,5	19,46	0,80399
660	20,1	19,9	18,1	19,9	19,6	19,52	0,727736
720	20,1	19,9	18,1	19,4	19,7	19,44	0,708802
780	20,3	19,9	18,1	19,4	19,7	19,48	0,7494
840	20,1	19,9	18,1	18,8	19,1	19,2	0,73212
900	20,1	19,9	18,1	18,8	19,1	19,2	0,73212
960	20,1	19,9	18,3	18,8	18,9	19,2	0,687023
1020	20,1	20,1	18,4	18,7	18,9	19,24	0,72
1080	19,9	20	18,4	18,7	18,5	19,1	0,701427
1140	19,5	19,9	18,4	18,4	18,4	18,92	0,649307
1200	19,1	19,9	18,1	18,9	18,6	18,92	0,594643
1260	19,2	19,4	18,1	18,9	18,7	18,86	0,449889
1320	19,2	19,4	17,9	19,1	18,7	18,86	0,531413
1380	19,2	19,4	17,9	19	19	18,9	0,521536
1440	19,3	19,4	17,9	18,7	19,1	18,88	0,545527

PŘÍLOHA P X: NAMĚŘENÉ HODNOTY CREEPOVÉ ZKOUŠKY PBT OZÁŘENÉHO 99 KGY 1/2

Naměřené hodnoty protažení PBT ozářeného 99 kGy

	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření		
Čas [min]	Protažení [mm]					Ar. průměr [mm]	Směrod. odchylka
0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0
20	0,001	0	0	0,001	0	0,0004	0,0005477
30	0,001	0	0,001	0,001	0	0,0006	0,0005477
40	0,001	0	0,002	0,002	0,002	0,0014	0,0008944
50	0,003	0,001	0,003	0,004	0,002	0,0026	0,0011402
60	0,003	0,001	0,003	0,005	0,002	0,0028	0,0014832
90	0,004	0,002	0,005	0,008	0,006	0,005	0,0022361
120	0,007	0,005	0,007	0,009	0,007	0,007	0,0014142
180	0,009	0,007	0,008	0,012	0,008	0,0088	0,0019235
240	0,009	0,008	0,01	0,015	0,009	0,0102	0,0027749
300	0,009	0,01	0,012	0,016	0,01	0,0114	0,0027928
360	0,012	0,011	0,014	0,016	0,011	0,0128	0,0021679
420	0,013	0,012	0,018	0,019	0,011	0,0146	0,0036469
480	0,014	0,014	0,018	0,02	0,012	0,0156	0,0032863
540	0,015	0,017	0,018	0,021	0,012	0,0166	0,0033615
600	0,017	0,019	0,018	0,022	0,012	0,0176	0,0036469
660	0,02	0,021	0,019	0,023	0,013	0,0192	0,0037683
720	0,022	0,022	0,02	0,024	0,015	0,0206	0,0034351
780	0,022	0,022	0,021	0,024	0,015	0,0208	0,0034205
840	0,023	0,023	0,022	0,024	0,018	0,022	0,0023452
900	0,025	0,023	0,023	0,025	0,02	0,0232	0,0020494
960	0,027	0,024	0,024	0,027	0,022	0,0248	0,0021679
1020	0,029	0,024	0,026	0,027	0,022	0,0256	0,0027019
1080	0,029	0,024	0,028	0,028	0,022	0,0262	0,0030332
1140	0,029	0,025	0,03	0,028	0,025	0,0274	0,0023022
1200	0,029	0,026	0,031	0,028	0,026	0,028	0,0021213
1260	0,03	0,027	0,034	0,029	0,028	0,0296	0,0027019
1320	0,033	0,028	0,034	0,03	0,029	0,0308	0,0025884
1380	0,037	0,03	0,035	0,03	0,033	0,033	0,0030822
1440	0,038	0,033	0,039	0,032	0,036	0,0356	0,0030496

PŘÍLOHA P XI: NAMĚŘENÉ HODNOTY CREEPOVÉ ZKOUŠKY PBT OZÁŘENÉHO 99 KGY 2/2

Naměřené hodnoty teploty v místnosti u PBT ozářeného 66 kGy

	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření		
Čas [min]	Teplota v místnosti [°C]					Ar. průměr [°C]	Směrod. odchylka
0	18,1	18,3	17,5	19,5	17,8	18,24	0,7668116
10	18,1	18,3	17,5	19,5	17,8	18,24	0,7668116
20	17,9	18,3	17,8	19,5	17,9	18,28	0,7085196
30	17,9	18,3	17,8	19,5	17,9	18,28	0,7085196
40	17,7	18,3	17,8	19,5	17,9	18,24	0,7402702
50	17,7	18,3	17,8	19,5	17,9	18,24	0,7402702
60	17,7	18,3	17,8	19,5	17,9	18,24	0,7402702
90	17,7	18,3	18,2	19,5	18,1	18,36	0,676757
120	17,7	18,3	18,2	19,9	18,1	18,44	0,8473488
180	17,7	18,1	18,2	19,9	18,1	18,4	0,8602325
240	17,7	18,1	18,2	19,5	18,1	18,32	0,6870226
300	17,7	18,1	18,6	19,2	18,1	18,34	0,5770615
360	17,9	18,1	18,6	19,1	18,1	18,36	0,4878524
420	18,1	18,1	19,3	19,1	18,1	18,54	0,60663
480	18,7	19,2	19,3	18,7	18,1	18,8	0,4795832
540	19,2	20,1	19,3	18,7	18,1	19,08	0,742967
600	18,7	20	19,3	18,5	18,1	18,92	0,742967
660	18,3	19,7	19,3	18,5	18,1	18,78	0,6870226
720	18,1	19,7	19,3	18,5	18,1	18,74	0,7266361
780	17,9	19,5	19,3	18,5	18,9	18,82	0,6418723
840	17,9	19,2	19,3	18,5	18,9	18,76	0,5727128
900	17,9	19,2	19,3	18,5	18,7	18,72	0,5674504
960	18,3	19,2	19,1	18,5	18,7	18,76	0,3847077
1020	18,3	19,1	19,1	18,5	18,7	18,74	0,3577709
1080	18,7	19	18,9	18,5	18,7	18,76	0,1949359
1140	19,1	19	18,4	18,5	19,1	18,82	0,3420526
1200	19,1	18,9	18,4	18,5	19,1	18,8	0,3316625
1260	19,1	18,9	18	18,7	19,1	18,76	0,4560702
1320	19,1	18,7	18	18,3	19,1	18,64	0,4878524
1380	18,3	18,7	18,4	18,2	19,4	18,6	0,484768
1440	18,4	18,7	18,4	18,2	19,4	18,62	0,4711688

PŘÍLOHA P XII: ARITMETICKÉ PRŮMĚRY CREEPOVÝCH ZKOUŠEK

Průměrné hodnoty všech zkoušených zkušebních těles

Čas [min.]	PBT neozářený	PBT ozářený 33 kGy	PBT ozářený 66 kGy	PBT ozářený 99 kGy
0	0	0	0	0
10	0	0,0006	0,0002	0
20	0,0004	0,0028	0,0008	0,0004
30	0,0012	0,006	0,0024	0,0006
40	0,0036	0,0094	0,0036	0,0014
50	0,0066	0,0116	0,0042	0,0026
60	0,0096	0,0126	0,0064	0,0028
90	0,0148	0,0188	0,0098	0,005
120	0,0218	0,0232	0,0154	0,0076
180	0,0288	0,0288	0,0196	0,0094
240	0,0366	0,0326	0,0216	0,011
300	0,044	0,038	0,0236	0,012
360	0,0492	0,0416	0,027	0,0134
420	0,0528	0,0456	0,0274	0,0146
480	0,0584	0,0496	0,028	0,0154
540	0,0678	0,053	0,0292	0,0164
600	0,076	0,055	0,0306	0,0176
660	0,0788	0,0578	0,034	0,019
720	0,0838	0,0612	0,0348	0,0202
780	0,0884	0,0646	0,0362	0,0208
840	0,0934	0,0666	0,0374	0,022
900	0,0972	0,0706	0,0392	0,0232
960	0,1008	0,0724	0,0408	0,0248
1020	0,104	0,0744	0,0428	0,0256
1080	0,1064	0,075	0,0434	0,0262
1140	0,111	0,0758	0,045	0,0274
1200	0,114	0,078	0,046	0,028
1260	0,1168	0,08	0,0472	0,0296
1320	0,1204	0,0812	0,0484	0,0308
1380	0,1226	0,0842	0,0502	0,033
1440	0,1248	0,0864	0,0522	0,0356

PŘÍLOHA P XII: MEDIÁNY CREEPOVÝCH ZKOUŠEK

Mediány všech zkoušených zkušebních těles

Čas [min.]	PBT neozářený	PBT ozářený 33 kGy	PBT ozářený 66 kGy	PBT ozářený 99 kGy
0	0	0	0	0
10	0	0	0	0
20	0	0,003	0	0
30	0,001	0,008	0,002	0,001
40	0,003	0,011	0,003	0,002
50	0,007	0,014	0,003	0,003
60	0,01	0,015	0,005	0,003
90	0,014	0,018	0,008	0,005
120	0,022	0,022	0,013	0,007
180	0,026	0,026	0,019	0,008
240	0,03	0,029	0,023	0,009
300	0,038	0,036	0,025	0,01
360	0,044	0,039	0,026	0,012
420	0,051	0,045	0,027	0,013
480	0,053	0,05	0,027	0,014
540	0,07	0,055	0,029	0,017
600	0,078	0,056	0,03	0,018
660	0,082	0,059	0,034	0,02
720	0,086	0,061	0,034	0,022
780	0,09	0,065	0,034	0,022
840	0,092	0,066	0,035	0,023
900	0,093	0,071	0,037	0,023
960	0,097	0,072	0,038	0,024
1020	0,102	0,076	0,041	0,026
1080	0,104	0,076	0,042	0,028
1140	0,108	0,076	0,046	0,028
1200	0,114	0,078	0,047	0,028
1260	0,119	0,079	0,048	0,029
1320	0,124	0,08	0,049	0,03
1380	0,125	0,084	0,05	0,033
1440	0,126	0,087	0,052	0,036