

Mechanické vlastnosti modifikovaných polyolefinů po několikanásobném tepelném zatížení

Bc. Tomáš Kučera

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Tomáš Kučera

Osobní číslo: T12439

Studijní program: N3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Konstrukce technologických zařízení

Forma studia: prezenční

**Téma práce: Mechanické vlastnosti modifikovaných polyolefinů
po několikanásobném tepelném zatížení**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte rešerši na dané téma**
- 2. Připravte zkušební tělesa pro dané zkoušky**
- 3. Provedte experimenty**
- 4. Vyhodnoťte výsledky měření**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Aleš Mizera

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

10. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně dne 28. dubna 2014


.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá studiem mechanických vlastností vybraných modifikovaných polyolefinů po několikanásobném tepelném zatížení. Práce je složena ze dvou částí. První část je literární rešerší a seznamuje čtenáře se základními informacemi o polymerech, sdílení tepla a síťování. Praktická část, experimentální, popisuje použité materiály, udává parametry použitých zařízení, na kterých byly materiály zpracovány. Dále popisuje průběh jednotlivých experimentů a parametry zařízení, na nichž byly experimenty prováděny. Poslední část je věnována diskusi a vyhodnocení výsledků.

Klíčová slova: polymery, ozařování, síťování, tepelná odolnost

ABSTRACT

Subject of this thesis is a study of mechanical properties of selected modified polyolefins after many times thermal load. This thesis contains two parts. First part is summary description, which acquaint readers with the basic information about polymers, heat and cross-linking. Practical part, the experimental, describes used materials, shows parameters of devices which were used for material processing. Furthermore, it describes course of particular experiments and parameters of devices which were used for those experiments. The last part is intended for discussion and evaluation of results.

Keywords: polymers, radiation, cross - linking, thermal stability

Tímto chci poděkovat vedoucímu této diplomové práce Ing. Aleši Mizerovi za aktivní spolupráci, ochotu a cenné připomínky při tvorbě této práce.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 DEFINICE POLYMERŮ	13
1.1 PRIMÁRNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	13
1.1.1 Termoplasty.....	13
1.1.2 Reaktoplasty.....	13
1.1.3 Elastomery.....	14
1.2 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ DLE STRUKTURY.....	14
1.2.1 Amorfnní polymery.....	14
1.2.2 Semikrystalické polymery.....	14
1.3 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ DLE APLIKACE POUŽITÍ.....	15
1.3.1 Komoditní polymery	15
1.3.2 Konstrukční polymery.....	16
1.3.3 Speciální polymery.....	16
2 DEFINICE POLYOLEFINŮ POUŽITÝCH PRO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	17
2.1 POLYETYLEN (PE).....	17
2.1.1 Výroba polyethylenu o nízké hustotě (LDPE)	18
2.1.2 Výroba polyethylenu o vysoké hustotě (HDPE).....	18
3 SDÍLENÍ TEPLA	19
3.1 DRUHY SDÍLENÍ TEPLA	19
3.1.1 Sdílení tepla vedením	19
3.1.2 Sdílení tepla prouděním	19
3.1.3 Sdílení tepla sáláním	19
3.2 OBECNÉ ÚVAHY ŘEŠENÍ VEDENÍ TEPLA V TĚLESECH.....	20
3.3 PŘESTUP A PROSTUP TEPLA	21
3.4 PŮSOBNÍ TEPLoty NA POLYMERy.....	21
3.5 STRUKTURA A TEPELNÁ ODOLNOST.....	22
3.5.1 Tvarová stálost za tepla	23
3.5.2 Chemická stálost za tepla	24
3.5.3 Diagram tepelné stability	25
3.5.4 Termogravimetrická analýza.....	26
3.5.5 Funkční zkoušky	26
4 MODIFIKACE POLYMERŮ	27
4.1 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ	28
4.1.1 Princip radiačního síťování	29
4.1.2 Použití modifikovaných materiálů	31
4.1.3 Materiály pro radiační síťování.....	31
4.1.4 Zlepšení vlastností.....	32
4.1.5 Měrné jednotky techniky radiačního síťování	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	34
5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	35
6 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ A PRINCIP MĚŘENÍ	36

6.1	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ TRHACÍ STROJ ZWICK 1456.....	36
6.1.1	Princip měření na Trhacím stroji ZWICK 1456	38
6.2	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ RÁZOVÉ Kladivo ZWICK HIT50P.....	41
6.2.1	Princip měření na Rázovém kladivu ZWICK HIT50P	43
7	PODSTATA PROVEDENÝCH ZKOUŠEK	45
7.1	PODSTATA TAHOVÉ ZKOUŠKY	45
7.1.1	Deformace polymerů při tahové zkoušce.....	48
7.2	PODSTATA RÁZOVÝCH ZKOUŠEK	49
7.2.1	Rázová zkouška tahem (ISO 8256).....	49
8	POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI.....	51
8.1	NÍZKOHUSTOTNÍ POLYETYLEN: DOW LDPE 780E.....	51
8.1.1	Materiálový list materiálu DOW LDPE 780E	51
8.2	VYSOKOHUSTOTNÍ POLYETYLEN: DOW HDPE 25055E.....	52
8.2.1	Materiálový list materiálu DOW HDPE 25055E.....	52
9	ZKUŠEBNÍ TĚLESA A JEJICH PŘÍPRAVA.....	53
9.1	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES PRO STATICOU ZKOUŠKU V TAHU	54
9.2	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES PRO RÁZOVOU ZKOUŠKU TAHEM.....	57
9.3	MODIFIKACE ZKUŠEBNÍCH TĚLES RADIAČNÍM SÍŤOVÁNÍM	60
9.4	TEPELNÉ ZATÍŽENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	61
10	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	66
10.1	STATICÁ ZKOUŠKA V TAHU MATERIÁLU DOW LDPE 780E.....	67
10.1.1	Modul pružnosti v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles.....	67
10.1.2	Modul pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 90 °C.....	68
10.1.3	Modul pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 140 °C.....	69
10.1.4	Poměrné prodloužení u tepelně nezatížených zkušebních těles.....	70
10.1.5	Poměrné prodloužení po tepelném zatížení 5 x 90 °C	71
10.1.6	Poměrné prodloužení po tepelném zatížení 5 x 140 °C	72
10.1.7	Napětí na mezi kluzu u tepelně nezatížených zkušebních těles	73
10.1.8	Napětí na mezi kluzu po tepelném zatížení 5 x 90 °C	74
10.1.9	Napětí na mezi kluzu po tepelném zatížení 5 x 140 °C	75
10.2	STATICÁ ZKOUŠKA V TAHU MATERIÁLU DOW HDPE 25055E.....	76
10.2.1	Modul pružnosti v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles.....	76
10.2.2	Modul pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 110 °C.....	77
10.2.3	Modul pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 160 °C.....	78
10.2.4	Poměrné prodloužení u tepelně nezatížených zkušebních těles.....	79
10.2.5	Poměrné prodloužení po tepelném zatížení 5 x 110 °C	80
10.2.6	Poměrné prodloužení po tepelném zatížení 5 x 160 °C	81
10.2.7	Napětí na mezi pevnosti u tepelně nezatížených zkušebních těles	82
10.2.8	Napětí na mezi pevnosti po tepelném zatížení 5 x 110 °C.....	83
10.2.9	Napětí na mezi pevnosti po tepelném zatížení 5 x 160 °C.....	84
10.3	RÁZOVÁ ZKOUŠKA TAHEM MATERIÁLU DOW LDPE 780E	85
10.3.1	Rázová houževnatost v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles	85
10.3.2	Rázová houževnatost v tahu po tepelném zatížení 5 x 90 °C	86
10.3.3	Rázová houževnatost v tahu po tepelném zatížení 5 x 140 °C	87

10.4	RÁZOVÁ ZKOUŠKA TAHEM MATERIÁLU HDPE 25055E	88
10.4.1	Rázová houževnatost v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles	88
10.4.2	Rázová houževnatost v tahu po tepelném zatížení 5 x 110 °C	89
10.4.3	Rázová houževnatost v tahu po tepelném zatížení 5 x 160 °C	90
11	DISKUZE VÝSLEDKŮ	91
11.1	POROVNÁNÍ MODULU PRUŽNOSTI V TAHU U MATERIÁLU DOW LDPE 780E V ZÁVISLOSTI NA DÁVCE ZÁŘENÍ A Vlivu TEPELNÉHO ZATÍŽENÍ.....	93
11.2	POROVNÁNÍ MODULU PRUŽNOSTI V TAHU U MATERIÁLU DOW HDPE 25055E V ZÁVISLOSTI NA DÁVCE ZÁŘENÍ A Vlivu TEPELNÉHO ZATÍŽENÍ.....	94
11.3	POROVNÁNÍ POMĚRNÉHO PRODLOUŽENÍ U MATERIÁLU DOW LDPE 780E V ZÁVISLOSTI NA DÁVCE ZÁŘENÍ A Vlivu TEPELNÉHO ZATÍŽENÍ.....	96
11.4	POROVNÁNÍ POMĚRNÉHO PRODLOUŽENÍ U MATERIÁLU DOW HDPE 25055E V ZÁVISLOSTI NA DÁVCE ZÁŘENÍ A Vlivu TEPELNÉHO ZATÍŽENÍ.....	97
11.5	POROVNÁNÍ NAPĚTÍ NA MEZI KLUZU A MEZI PEVNOSTI U MATERIÁLU DOW LDPE 780E V ZÁVISLOSTI NA DÁVCE ZÁŘENÍ A Vlivu TEPELNÉHO ZATÍŽENÍ.....	98
11.6	POROVNÁNÍ NAPĚTÍ NA MEZI PEVNOSTI U MATERIÁLU DOW HDPE 25055E V ZÁVISLOSTI NA DÁVCE ZÁŘENÍ A Vlivu TEPELNÉHO ZATÍŽENÍ.....	99
11.7	POROVNÁNÍ RÁZOVÝCH HOUŽEVNATOSTÍ V TAHU U MATERIÁLU DOW LDPE 780E V ZÁVISLOSTI NA DÁVCE ZÁŘENÍ A Vlivu TEPELNÉHO ZATÍŽENÍ....	100
11.8	POROVNÁNÍ RÁZOVÝCH HOUŽEVNATOSTÍ V TAHU U MATERIÁLU DOW HDPE 25055E V ZÁVISLOSTI NA DÁVCE ZÁŘENÍ A Vlivu TEPELNÉHO ZATÍŽENÍ	101
	ZÁVĚR	102
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	104
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	106
	SEZNAM OBRÁZKŮ	109
	SEZNAM TABULEK.....	113

ÚVOD

Stejně jako je jisté, že člověk byl od pradávna součástí přírody, je jistý i fakt, že byl současně jejím žákem. Od přírody čerpal první znalosti a rozvíjel tak svoje schopnosti, jako je například rozdělování a používání ohně, z materiálů, jež ho obklopovaly, si začal vyrábět primitivní nástroje.

S postupem času tyto vědomosti a schopnosti rozvinul natolik, že dokázal nejen přírodní materiály zpracovávat, zušlechťovat a účinně používat, ale také vyrábět materiály z látek, kterých měl v přírodě dostatek. V této disciplíně se člověk zdokonalil natolik, že dokáže vyrábět látky, které se v přírodě volně nevyskytují, tzv. syntetické materiály, zejména syntetické polymery.

Lidstvo si zvyklo označovat velké epochy svého rozvoje podle materiálu, jenž lidstvu nejvíce sloužil a tyto epochy nejvíce charakterizoval. Hovoříme tedy o dobách kamenných, bronzových a železných. Současně si však málokdo z nás uvědomí a připustí, že žijeme v době polymerní. [1]

V oblasti technických věd je dnes mnoho nevyřešených problémů a otázek, na které odborníci stále hledají odpovědi. Od výrobců strojů a zařízení se požadují vyšší měrné výkony, prosazují se inovativní výrobní technologie, důraz je kladen na zvyšování trvanlivosti a spolehlivosti výrobků, odbourávají se teplotní i hmotnostní omezení v používání jednotlivých materiálů.

Vliv ozařování na polymery v průmyslovém odvětví se za poslední desetiletí rapidně zvýšil. Důvod tohoto nárůstu tkví ve výrazném zlepšení mechanických, chemických i tepelných vlastností. Speciálně modifikované polymery pomoci ozařování tak napomáhají vyjít vstříc trendu zvyšování kvality a postupně nahrazují konvenční materiály. Je tedy žádoucí a velice zajímavé se danou progresivní problematikou zabývat, zkoumat ji a následně rozvíjet.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DEFINICE POLYMERŮ

Polymery jsou chemické látky s neobvyklou škálou vlastností. Obsahují ve svých velkých molekulách převážně atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často i dusíku a jiných prvků.

Ve formě výrobku jsou polymery prakticky v tuhém stavu, v určitém stádiu zpracování za zvýšené teploty a tlaku jsou ve stavu kapalném umožňujícím udělit budoucímu výrobku tvar dle jeho použití. [1]

1.1 Primární rozdělení polymerů

Primárně dělíme polymery na elastomery a plasty, kdy plasty dále dělíme na termoplasty a reaktoplasty.

1.1.1 Termoplasty

Jsou to polymerní materiály, které při působení tepelné energie přecházejí do plastického stavu, do stavu newtonovských kapalin o vysoké viskozitě, které lze snadno tvarovat a zpracovávat nejrůznějšími technologiemi, jako jsou například vstřikování, vytlačování, lisování, vyfukování, apod. Do stavu tuhého termoplasty přecházejí ochlazením pod teplotu tání u semikrystalických polymerů, respektive teplotu viskózního toku u amorfních polymerů. Při ohřívání nedochází ke změnám chemické struktury, lze tedy proces měknutí a následného tuhnutí opakovat. Proces je čistě fyzikální. Mezi základní termoplasty řadíme PE, PP, PVC, PS, PA, apod. [6]

1.1.2 Reaktoplasty

Dříve nazývané termosety, které při působení tepelné energie přecházejí opět do plastického stavu, ovšem pouze na omezenou dobu. Při dalším ohřívání dochází k chemické reakci zvanou vytvrzování, tedy prostorovému zesíťování. Děj je tedy nevratný a vytvrzené výrobky nelze opětovně roztavit, dalším ohřevem dojde k degradaci. Mezi základní reaktoplasty řadíme epoxidové, polyesterové a fenolformaldehydové pryskyřice. [6]

1.1.3 Elastomery

Jsou to polymerní materiály, které při působení tepelné energie přecházejí do plastického stavu, rovněž na omezenou dobu. Při dalším ohřívání dochází k chemické reakci zvanou vulkanizace, tedy prostorovému zesíťování. Mezi základní elastomery řadíme pryž. [6]

1.2 Rozdělení polymerů dle struktury

Dalším základním dělením polymerů je dělení dle struktury, tedy stupně uspořádanosti, kdy polymery dělíme na amorfni a semikrystalické. Čistě krystalické polymery se nevyskytují.

1.2.1 Amorfni polymery

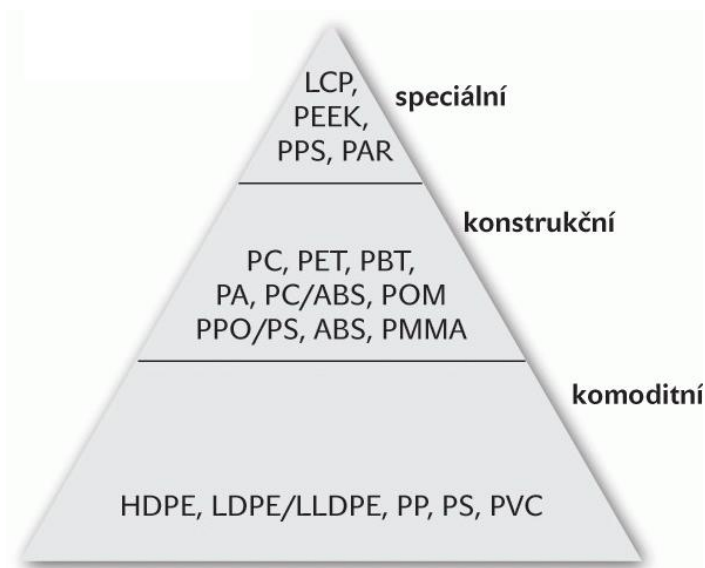
U amorfni polymerů zaujímají makromolekuly nahodilou pozici. Mezi jejich typické vlastnosti patří vysoká tvrdost, křehkost, pevnost či transparentnost tedy propustnost světla. Součinitel teplotní roztažnosti amorfni polymerů je menší, nežli je tomu u semikrystalických polymerů. Použitelnost těchto polymerů je pod teplotou skelného přechodu T_g . Mezi amorfni polymery řadíme PC, PMMA, PS. [6]

1.2.2 Semikrystalické polymery

Tyto polymery vykazují určitý stupeň uspořádanosti, který se označuje jako stupeň krystalinity a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí uložených v oblasti amorfni. Rozmezí stupně krystalinity se pohybuje od 40 % do 90 %. Semikrystalické polymery bývají mléčně zakalené, jsou typické svou houževnatostí, modul pružnosti a pevnost roste se zvyšujícím se stupněm krystalinity. Použitelnost těchto polymerů je dána hranicí do teploty tání T_m . Mezi semikrystalické polymery řadíme PP, PE, PA, POM, PTFE, apod. [6]

1.3 Rozdělení polymerů dle aplikace použití

Existuje řada dalších rozdělení polymerů, jako například dle druhu přísad na plněné a neplněné polymery, dle polaritě na polární a nepolární, dle původu na přírodní a syntetické, avšak zajímavějším rozdělením se jeví dělení dle použití vyráběných dílů, tedy dle budoucí aplikace na polymery komoditní, konstrukční a speciální. [6]



Obr. 1. Pyramida polymerních materiálů uspořádaných podle jejich postavení na trhu [7]

Během sedmdesátých let 20. století prognostici předpověděli, že se materiálová pyramida bude v příštích desetiletích výrazně měnit, že poroste poptávka po kvalitních materiálech. Ve skutečnosti však nastal vývoj opačný, kdy komoditní polymery z velké části zaplnily spektrum vyráběných materiálů. Bylo to umožněno díky nepochybně nízké ceně, ale také řadě modifikací, jež komoditním polymerům otevřela prostor pro nové aplikace. Růst výroby polymerních materiálů ve světě a v EU je pak vyobrazen na obrázku (Obr. 2). [7]

1.3.1 Komoditní polymery

Komoditní polymery zaujímají nejširší prostor z celkového rozdělení polymerů a jejich expanze trvale roste. Jsou charakteristické svými nepříliš kvalitními vlastnostmi a nízkou cenou, kdy jeden kilogram tohoto granulátu nestojí více než dvě eura.

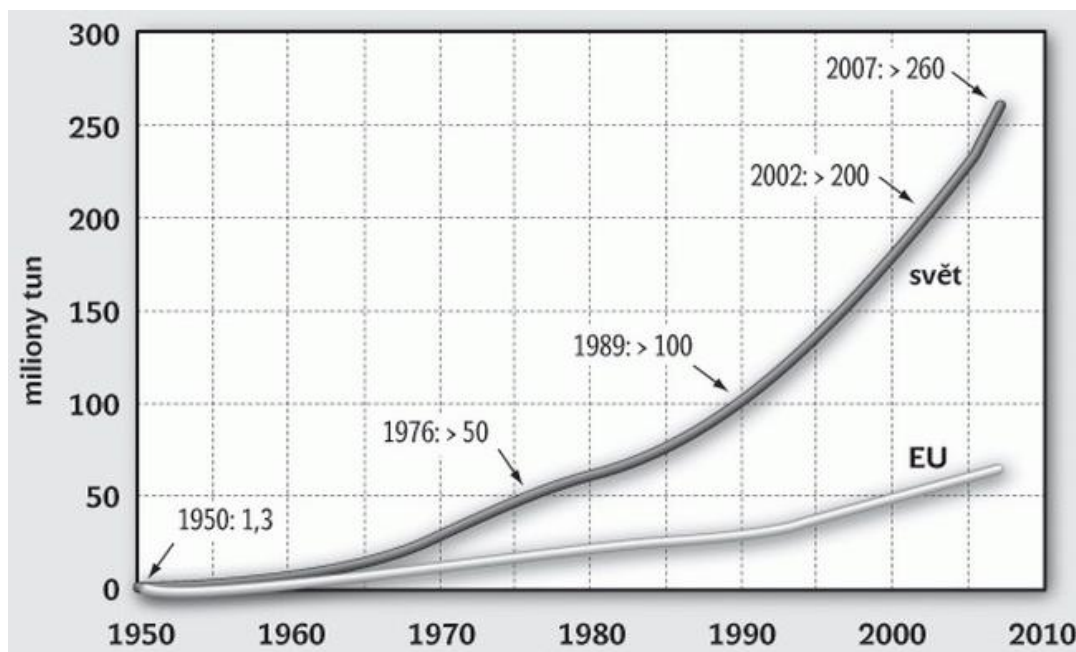
Jde v podstatě o čtyři skupiny polymerů, kde první tvoří polyetyleny (HDPE, LDPE, LLDPE), polypropylen (PP), polystyren (PS) a polyvinylchlorid (PVC). [7]

1.3.2 Konstrukční polymery

Konstrukční polymery jsou typické výbornými mechanickými vlastnostmi i teplotní odolností, proti komoditním jsou ale výrazně dražší. Představitelé konstrukčních polymerů jsou polyamidy (PA6, PA66), polymethylmetakrylát (PMMA), akrylonitrilbutadienstyren (ABS), termoplastický elastomer (TPE), apod. [7]

1.3.3 Speciální polymery

Špičku pyramidy tvoří speciální polymery, které vynikají teplotní i chemickou odolností, dlouhou životností či biologickou snášenlivostí. Pochopitelně tak patří mezi nejdražší polymerní materiály. [7]



Obr. 2. Růst výroby polymerních materiálů ve světě a v EU v průběhu 20. století

2 DEFINICE POLYOLEFINŮ POUŽITÝCH PRO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Kvantitativně největší skupinu syntetických polymerů představují právě polyolefiny, je to způsobeno levnou výrobou a snadnou dostupností surovin pro výrobu monomerů. Jedná se tedy o cenově nejvýhodnější skupinu polymerů. Předností je dobrá zpracovatelnost produktivními technologiemi i výborné využitelné výsledné vlastnosti. Největší význam polyolefinů připadá na PE a PP, načež PE se dále budeme zabývat. [2]

2.1 Polyetylen (PE)

Rozdíly ve struktuře PE se nejvíce projevují v hustotě, dělí se tedy na PE o nízké hustotě (LDPE) jehož hustota při 23 °C je pod 0,94 g.cm⁻³, zpravidla 0,92 g.cm⁻³ a PE o vysoké hustotě (HDPE), jehož hustota dosahuje při 23 °C hodnotu nad 0,94 g.cm⁻³, zpravidla 0,96 g.cm⁻³. V menším objemu výroby je znám zajímavý lineární PE o nízké hustotě (LLDPE).

PE je látkou tuhou, elastickou, téměř transparentní nebo s mléčným zákalem mající voskovitý charakter. Všechny typy PE mají vysokou krystalinitu, vysokou houževnatost a tažnost. Je zdravotně nezávadný, je velmi stálý proti chemickým činidlům, má však omezenou schopnost proti oxidačním činidlům. Použitelnost je omezena nízkým bodem měknutí. Jednotlivé druhy PE se liší zejména ve stupni větvení, který ovlivňuje rozsah krystalinity a hustotu.

PE se zpracovává obvyklými metodami, jako jsou vstřikování, vytlačování a vyfukování přičemž převážná část produkce je zpracovávána na fólie pro obalový průmysl a oplášťování vodičů pro průmysl elektrotechnický, dále se vyrábí duté nádoby či trubky. Význam použitých technologií pro zpracování PE uvádí tabulka (Tab. 1).

Pro spojování dílců z polyolefinů se jako nejvhodnější metodou jeví svařování. Při lepení se kvůli nepolární chemické struktuře vyskytují potíže. [2]

Tab. 1. Zpracování PE ve světě

Technologie	LDPE	HDPE
Vstřikování	10 %	38 %
Vytlačování	86 %	20 %
Vyfukování	4 %	42 %
Teplota zpracování	160 až 260 °C	180 až 280 °C

V následující tabulce (Tab. 2) jsou materiály LDPE a HDPE srovnávány dle základních vlastností. [2]

Tab. 2 Srovnání LDPE a HDPE

Označení	Krystalinita [%]	Hustota [g.cm ⁻³]	Teplota tání [°C]	Mez pevnosti v tahu [MPa]
LDPE	50 až 65	0,945 až 0,955	125 až 130	20 až 46
HDPE	80 až 95	0,95 až 0,97	134 až 146	24 až 33

2.1.1 Výroba polyetylenu o nízké hustotě (LDPE)

Za běžných podmínek je etylen velmi obtížně polymerovatelným monomerem. Za pomoci vysokých tlaků a teplot se tedy vyrábí LDPE polymerací, kdy se vyčištěný etylen mísí s kyslíkem, moderněji s peroxidy v trubkových reaktorech. [2]

2.1.2 Výroba polyetylenu o vysoké hustotě (HDPE)

HDPE se vyrábí polymerací pomocí nízkotlakého Zieglerova postupu nebo středotlakého postupu firmy Phillips využívajícím katalyzátory. [2]

3 SDÍLENÍ TEPLA

3.1 Druhy sdílení tepla

V technické praxi existují tři základní druhy sdílení tepla, o nichž bude v následujících kapitolách obecně pojednáváno.

3.1.1 Sdílení tepla vedením

První způsob je sdílení tepla vedením neboli kondukcí. Je vyznačováno tím, že je vázáno na látku, vedení tepla se tedy může dít pouze mezi bezprostředně sousedícími částicemi hmoty v důsledku tepelného pohybu strukturních částic hmoty (molekul, atomů a volných elektronů). V ryzí formě se uskutečňuje sdílení tepla vedením v tuhých tělesech či velmi tenkých nepohybujících se vrstvách kapalin a plynů. [4], [5]

3.1.2 Sdílení tepla prouděním

Druhým způsobem sdílení tepla je proudění neboli konvekce. U tohoto způsobu se teplo šíří účinkem tepelné vodivosti a bezprostředního směšování molárních (složek tvořených velkým počtem molekul) částí prostředí z jedné oblasti prostoru do druhé, přitom přenášejí svoji tepelnou energii. Konvekce nastává v pohybujiících se kapalinách a je doprovázena současně vedením tepla od jedné částice k druhé, protože v proudící látce neexistuje teplotní rovnováha. Dále k tomuto jevu dochází i v pohybujiících se plynech či sytkých látkách. [4], [5]

3.1.3 Sdílení tepla sáláním

Třetím způsobem sdílení tepla je sálání neboli tepelné záření. Sálání je elektromagnetické vlnění o určitém rozsahu vlnových délek. Proces sálání mezi dvěma tělesy je velice složitý, sestává se z vyzařování, pohlcování a propouštění vyzařované energie. Určitá část tepelné energie tělesa se přeměňuje v zářivou energii, ta prochází prostorem a při dopadu na druhé těleso se částečně nebo zcela opět mění v tepelnou energii. Sálání může probíhat i tehdy, kdy prostor mezi oběma tělesy není vyplněn žádnou látkou, tedy ve vakuu. [4], [5]

3.2 Obecné úvahy řešení vedení tepla v tělesech

Sdílení tepla vedením v tuhých tělesech znamená transport tepelné energie ve směru klesající teploty, děje se mezi bezprostředně sousedícími částicemi tělesa.

Výpočetní řešení sdílení tepla kondukcí je založeno na dvou empirických ověřených zákonech. Prvním z nich je základní zákon vedení tepla, jenž vyjadřuje závislost mezi tepelnými toky a tepelnými spády. Druhý zákon představuje zákon o zachování energie, aplikovaný pro tepelné jevy. Následně z těchto zákonů lze odvodit parciální diferenciální rovnice pro rozdělení teplot v tělesech.

Řešení problému kondukce může být převedeno na řešení diferenciálních rovnic s faktem přihlídnutí k počátečním a okrajovým podmínkám na povrchu tělesa. K takovému řešení lze využít tři možných cest.

První z nich je nalezení analytických řešení diferenciálních rovnic, druhou možností je použití přibližných výpočetních nebo grafických metod. Poslední možnost spočívá v experimentálním řešení problému pomocí modelové nebo analogové metody.

Každá z výše uvedených cest má své výhody a nevýhody, je nutné volit pro každý případ nejvhodnější způsob řešení dané úlohy. Například analytické řešení je výhodné pro získání závislosti teplotních polí na všech parametrech. Numerické nebo grafické přibližné metody je vhodné použít v takovém případě, kdy se řeší jednotlivý speciální problém a není nutné brát zřetel na změny parametrů. V případech vedení tepla, kde má být vyšetřován vliv změn parametrů jsou vhodné elektrické analogové metody výhodné pro jednoduchost a přesnost elektrických veličin. [4]

3.3 Přestup a prostup tepla

Výměnu tepla mezi stěnou tuhého tělesa a kapalinou nebo plynem ji obtékající nazýváme přestupem tepla. Sdílení tepla mezi dvěma prostředími oddělenými stěnou (obvykle z pevné látky) nazýváme prostupem tepla.

Při praktických výpočtech ustálených (stacionárních) pochodů, které probíhají při přestupu či prostupu tepla se ustálily tyto dva vztahy:

$$Q = \alpha \cdot (t_{stř} - t) \cdot A \cdot \tau \quad (1)$$

$$Q = k \cdot (t_1 - t_2) \cdot A \cdot \tau \quad (2)$$

Koeficient α představuje součinitel přestupu tepla a koeficient k zastupuje součinitel prostupu tepla.

Tyto vztahy nevyjadřují skutečnou závislost tepelného toku na fyzikálních vlastnostech, teplotě a rozměrech těles, u kterých dochází ke sdílení tepla. Jsou formálními výpočtovými vztahy, které transformují výpočtové složitosti sdílení tepla na stanovení veličin α a k závislých na rozměrech ploch zúčastněných v procesu sdílení tepla a na rozdílu teplot (teplotním spádu). [5]

3.4 Působení teploty na polymery

Důsledek zvýšené teploty se u polymerů může projevit dvěma způsoby.

V prvním případě dochází k měknutí polymeru, popřípadě se díky přijatému teplu zvyšuje kinetická energie makromolekulárního řetězce až do takového stavu, kdy překoná přitažlivé síly a polymer se chová jako kapalina.

V druhém případě dochází ke změně struktury polymeru. Určité makromolekulární látky se štěpí na nízkomolekulární produkty, případně až na monomer, aniž by došlo ke změně chemického složení. Konstatujeme, že tyto látky depolymerují. [1]

Ve výše uvedených případech se jedná o degradaci polymeru. Následující tabulka (Tab. 3) demonstruje základní tepelné vlastnosti vybraných polymerů.

Tab. 3. Přehled tepelných vlastností vybraných polymerů [2]

Polymer	Teplota použití [°C]			Koeficient lineární roztažnosti [K ⁻¹ .10 ⁶]	Tepelná vodivost [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
	maximální krátkodobě	maximální dlouhodobě	minimální dlouhodobě		
LDPE	80 až 90	60 až 75	-50	240	0,32 až 0,40
HDPE	90 až 120	70 až 80	-50	140 až 200	0,38 až 0,51
PP	140	100	0/ -30	150 až 180	0,17 až 0,22
PB	130	90	0	150	0,2
PS	60 až 80	50 až 70	-10	60 až 80	0,14 až 0,18
SAN	95	85	-20	70 až 80	0,15 až 0,20
ABS	85 až 100	75 až 85	-40	50 až 110	0,16 až 0,19
PVC	75 až 100	65 až 85	-5	70 až 80	0,14 až 0,17
PTFE	300	250	-200	100	0,25
PMMA	85 až 100	65 až 90	-40	70	0,18
POM	110 až 140	90 až 110	-60	90 až 140	0,25 až 0,30
PC	160	135	-100	60 až 70	0,21
PA6	140 až 180	80 až 100	-30	70 až 120	0,21 až 0,29

3.5 Struktura a tepelná odolnost

Pro mnohé oblasti budoucího použití je odolnost polymeru proti zvýšeným teplotám rozhodujícím faktorem. Pojmu odolnosti se v některých případech rozumí jako krátkodobá, jindy jako trvalá tepelná odolnost.

Je zapotřebí se vyvarovat srovnávání vysoké tepelné odolnosti s vysokým bodem tání T_m . Známe polymery s relativně vysokým bodem tání a teplotou skelného přechodu, které jsou odbourávány již při teplotách 100 a 200 °C (polyvinylalkohol) a tedy nemohou být považovány za zvláště tepelně odolné. Proti tomu existují polymery, jejichž teplota tání je hluboko pod 0 °C, ztrácejí tedy svou tvarovou stálost již při nízkých teplotách, aniž bychom přitom dokázali zjistit stopy degradace při relativně vysokých teplotách. Z tohoto důvodu rozlišujeme tvarovou stálost za tepla a chemickou stálost za tepla. [2]

3.5.1 Tvarová stálost za tepla

Tvarovou stálost za tepla označujeme schopnost tuhého tělesa zachovat si svůj tvar při vlivu deformujících sil a je popsána modulem pružnosti. Čím je vyšší, tím větší je odpor proti deformaci a tím lepší tvarová stálost. Nízkomolekulární látky se při přechodu z tuhého do kapalného stavu vyznačují úplnou ztrátou tvarové stálosti, u polymerů i v tavenině je zachována určitá elasticita. Použití teploty tání, respektive měknutí polymerů, jako míru pro teplotu ztráty tvarové stálosti je nemyslitelné, protože u polymerů nesouhlasí teplota, při které se tvar zcela ztrácí a teplota, do které zůstává zachována tvarová stálost.

U polymerů můžeme i pod teplotou skelného přechodu pozorovat trvalou deformaci, u které rozsah závisí na velikosti deformující síly a době jejího působení. Dokázány jsou případy, kdy se například PMMA či silikátová skla během měsíců až let nevratně přetvářejí při pokojové teplotě.

Pro exaktní popis tvarové stálosti za tepla musíme tedy hodnotit buď závislost deformace na čase při konstantním zatížení, nebo závislost deformace na zatížení při konstantní době působení zatížení za různých teplot. V praxi je pak dostatečné, když polymerní zkušební tělísko vystavíme při konstantním zatížení vzrůstající teplotě do doby, než tělísko dosáhne stanovené deformace.

Pomocí velikosti tělíska, velikosti zatížení a rychlosti zahřívání získáme numerické hodnoty, které slouží jako míra tvarové stálosti za tepla. Rozlišujeme tvarovou stálost za tepla podle Martense, Vicata a normy ISO R 75.

Teplota skelného přechodu má však tu výhodu, že představuje fyzikálně jednoznačně definovanou veličinu, která připouští lehce povrechní definici tvarové stálosti za tepla (není přihlíženo k vlivu deformující síly a času). Teplotu skelného přechodu můžeme tedy využít jako porovnávací míru pro tvarovou stálost za tepla.

Porovnání tvarových stálostí za tepla podle Martense, Vicata a normy ISO R 75 proti T_g a T_m sledujeme v následující tabulce (Tab. 4). [2]

Tab. 4. Hodnoty tvarových stálostí za tepla

Polymer	Tvarová stálost za tepla [°C]			T _g [°C]	T _m [°C]
	Dle Martense	Dle Vicata	Dle ISO R 75		
LDPE	-	93	41	-122	110
HDPE	-	120	45	-120	135
PP	-	105	60	-8	160
PS	77	100	83	90	95
SAN	77	99	86	-	106
ABS	75	101	91	-	110
PVC	65	80	72	80	78
PMMA	-	90	65	90	115
POM	65	155	85	0	168
PC	120	150	135	140	140
PA6	53	160	95	40	200
PA66	55	185	108	50	250

3.5.2 Chemická stálost za tepla

Zahřívání polymeru má za následek ztrátu modulu pružnosti, a tím tedy i tvarové stálosti. Může také ale dojít k chemickým změnám makromolekul, tedy ke štěpení řetězců, síťování, k oxidačním, cyklickým a jiným reakcím. Následek těchto reakcí jsou nežádoucí změny užitných vlastností.

U fyzikální tepelné odolnosti, tedy tvarové stálosti za tepla, dochází k přechodu ze sklovitého nebo částečně krystalického stavu do stavu elasticko-plastického v určitém tepelném rozmezí (5 až 10 °C), u chemické tepelné odolnosti (odolnosti proti tepelné degradaci) tomu tak není. Chemické reakce vedoucí k nežádoucím změnám vlastností toto rozmezí nemají, nebo je minimální. Tyto reakce zpočátku při nízké teplotě probíhají pomalu, se zvyšující se teplotou se proces zrychluje. Vzrůst reakční rychlosti je kvantifikován aktivační energií příslušné reakce.

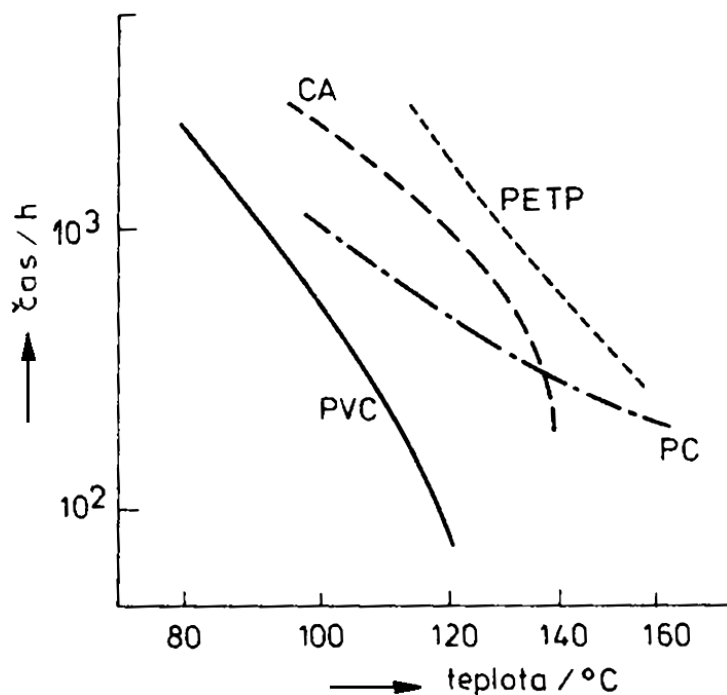
Při dlouhodobém působení nízkých teplot na daný polymer pozorujeme shodné změny jako při působení vysokých teplot v krátkém čase. Nelze tedy konstatovat, že polymer má chemickou tepelnou odolnost například do 150 °C nebo 200 °C. Je zapotřebí podotknout, jak dlouhou dobu může být polymer vystaven teplotě 150 °C nebo 200 °C, aniž by došlo k poškození, které je měřitelné.

K úplnému údaji ohledně chemické odolnosti musíme uvést i konkrétní vlastnosti hodnotící stálost polymeru, například elektrickou pevnost, mechanickou pevnost, barvu, lesk, apod. Dále prostředí, ve kterém se polymer vyskytuje (na vzduchu, v inertním plynu, ve vakuu, na světle, v prostředí vodní páry, aj.). Obzvláště světlo a kyslík představují hlavní faktory, na nichž závisí tepelná odolnost polymerů. [2]

3.5.3 Diagram tepelné stability

Tepelnou stabilitu polymerů popisujeme logaritmickým diagramem, který udává závislost doby tepelného působení trvající do prvotního poškození na teplotě. K poškození nedochází v jeden moment, ale velmi zvolna. Je tedy nutné přesně uvést změnu vlastnosti, kterou hodnotíme, například pokles meze pevnosti v tahu na 65 %, jak je znázorněno na obrázku (Obr. 3).

Tvorba takového digramu je časově i pracovně náročná, proto pro zjednodušení zjistíme potřebné hodnoty, například do 30 dnů a pro delší časový úsek s určitou pravděpodobností zbývající hodnoty získáme extrapolací. [2]



Obr. 3. Diagram tepelné stability

3.5.4 Termogravimetrická analýza

Další metodou znázorňující tepelnou odolnost se zabývá termogravimetrie. Základem je rozmělněný vzorek polymeru, který se pozvolna vyhřívá rychlostí 100 °C za jednu hodinu a je zaznamenáván úbytek hmotnosti. Protože ale diference hmotnosti nepopisuje zachování užitných vlastností při zvýšených teplotách, jsou takto získané výsledky pouze orientační, použitelné například pro srovnávání relativní teplotní odolnosti polymerů. Tepelný oxidační úbytek může být vyvažován oxidačním přírůstkem. [2]

3.5.5 Funkční zkoušky

Nejpodstatnější funkční zkoušky se v praxi provádějí přímo na modelovém zařízení, kde se pozoruje souhrn vlastností a získává přesný obraz týkající se použitelnosti jednotlivých materiálů za zvýšených teplot. Takovéto zkoušky se provádí za zvýšených teplot pro urychlení stárnutí a následně se extrapolují do teplot nižších.

Velký důraz odolnosti proti tepelnému stárnutí je kladen zejména u elektroizolačních materiálů v oblasti silnoproudé elektrotechniky. Měří se takové vlastnosti, které jsou funkčně důležité, v případě elektroizolačních materiálů je to elektrická pevnost, mechanická pevnost či tažnost. Vybrat správné kritérium bývá složitý problém.

Zrychlené zkoušky se pak provádějí v takovém rozmezí teplot, aby při nejnižší zkušební teplotě (obvykle o 20 °C vyšší než maximální provozní teplota) bylo dosaženo větší životnosti než 5 000 hodin a opačně aby při nejvyšší zkušební teplotě bylo dosaženo životnosti nejméně 100 hodin. Zkušební tělesa se poté podrobí testu stárnutí nejméně při třech teplotách, rozdíl mezi nimi činí obvykle 20 °C. Z takto získaných údajů životnosti za různých teplot se vypočte čára životnosti. Materiály zařazené do teplotně odolných jsou charakterizovány teplotním indexem a teplotním profilem. Teplotní index je teplota ve °C, která odpovídá životnosti 20 000 hodin, teplotní profil definuje čáru životnosti.

Významnou roli u vyhodnocování životnosti polymerů za zvýšené teploty má i fakt, zda je materiál vystaven vlhkému nebo suchému teplu. Pokud je polymer často ochlazován a znovu ohříván, dojde k rozrušení rychleji, nežli při vystavení konstantní maximální teplotě po stejnou dobu. [2]

4 MODIFIKACE POLYMERŮ

Modifikací polymerů rozumíme jako záměrnou přeměnu polymerů, kterou provádíme, abychom získali nový polymerní materiál s odlišnými vlastnostmi. Protože na vlastnosti polymerních materiálů jsou kladeny stále vyšší nároky v závislosti na rozšiřujících oblastech použití, význam modifikace polymerů tedy neustále vzrůstá.

Pro získání modifikovaných polymerů se používá fyzikální, mechanomechanické a chemické modifikace.

a) Fyzikální modifikace

Jedná se o nejjednodušší způsob modifikace, který nabývá stále širšího uplatnění. Princip této modifikace spočívá ve smíšení dvou nebo více polymerů. Výsledkem jsou pak směsi s vynikajícími mechanickými vlastnostmi.

b) Mechanochemická modifikace

K této modifikaci dochází reakcí aktivních částic, které vznikají při mechanické destrukci makromolekulárních řetězců. Využívá se mechanické degradace směsi polymerů a mechanické degradace polymeru v přítomnosti monomeru. V obou těchto případech současně probíhá řada reakcí vedoucích mimo jiné ke vzniku roubovaných nebo blokových kopolymerů, které se liší svojí strukturou a délkou bloků. Výstupní produkt tedy není ze strukturního hlediska jednotný ani jednoznačně definovatelný.

c) Chemická modifikace

Při této modifikaci dochází k úmyslné přeměně chemické struktury vlivem působení účinných chemických látek či reakčních podmínek. Chemické reakce lze rozdělit dle hlediska střední molekulové hmotnosti na reakce, které probíhají při zachování této hmotnosti, dále na reakce, které vedou ke změnám střední molekulové hmotnosti a konečně na reakce, které probíhají při síťování polymerů. Posledními zmíněnými reakcemi se dále budeme intenzivněji zabývat. [1]

4.1 Radiační síťování polymerů

S pojmem síťování se můžeme setkat v různorodých oblastech i mimo oblast technickou. Například rybář teprve spojením vláken, tedy zesíťováním, získá svou síť. V oblasti technické v důsledku zesíťování vzniká například pryž z kaučuku pomocí procesu, jejž nazýváme vulkanizace. Přitom se pryž od kaučuku výrazně liší, pryž je schopna odolávat většímu zatížení.

V oblasti plastů rozumíme síťování jako chemickému procesu, během jehož průběhu dochází k chemickému spojování molekul. Ideální proces nastane tehdy, dojde-li k začlenění všech molekul do sítě a proces je spuštěn ozářením.

Mezi nejdůležitější vlastnosti síťovaného systému pak řadíme tažnost a pružnost. Tyto vlastnosti přetrvávají i při dlouhodobém teplotním a mechanickém zatížení. Pro síťování obvykle není zapotřebí žádných dalších přísad, pouze v určitých případech je nutný přídavek pomocného síťovacího činidla. Samotný proces je proveden až po zpracovatelském procesu, tedy po vstřikování, vytlačování nebo vyfukování.

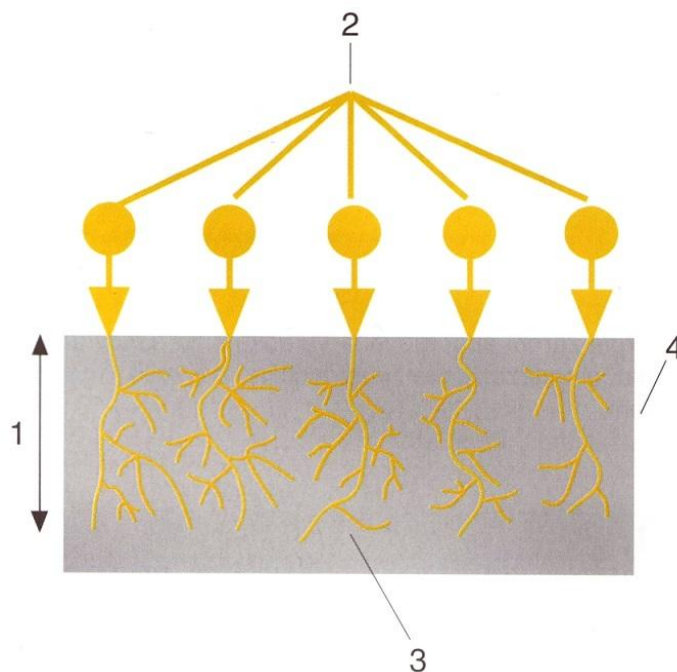
Radiační síťování probíhá při pokojové teplotě a nedochází k dodatečnému namáhání výrobků. Lze měnit stupeň zesíťování v ozařovaném dílu a přizpůsobovat vlastnosti materiálu dle zadaných požadavků.

Primárně je využíváno záření beta, gama, na základě svých energií iniciují chemické procesy, v ozařovaných produktech nevzniká radioaktivita. [3]

4.1.1 Princip radiačního sítování

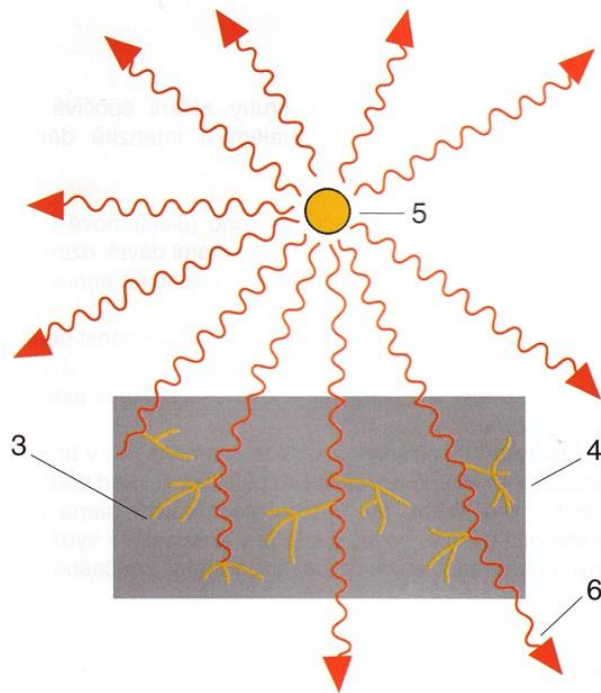
Princip radiačního sítování spočívá v ionizujícím záření působícím na ozařovaný produkt, které dle svého účinku dělíme na částicové záření (elektronové – beta záření) nebo elektromagnetické vlny (záření gama). Při hledání hlavního rozdílu mezi těmito záření dojdeme k faktu, že se tyto záření liší primárně schopností pronikat ozařovaným materiálem a dále také v intenzitě dávky ozáření.

U beta záření dochází pronikáním elektronů do materiálu k aktivaci a ionizaci molekul v ozařovaném výrobku, viz. následující obrázek (Obr. 4).



Obr. 4. Princip beta záření. 1 - hloubka vniknutí elektronů, 2 – primární elektrony, 3 – sekundární elektrony, 4 – ozářený materiál.

U záření gama jsou v důsledku interaktivních procesů pronikáním gama kvant do materiálu produkovány sekundární elektrony. Ty způsobí opětovnou aktivaci a ionizaci molekul ozařovaného výrobku, viz. obrázek (Obr. 5).



Obr. 5. Princip gama záření. 5 – zapouzdřený zdroj záření Co^{60} , 6 – γ – kvanta.

Pro beta záření využíváme zařízení s urychlovači elektronů, které pracují s vysokými intenzitami dávek záření, které mají ale omezenou hloubku vniknutí, jenž je závislá na energii.

Zařízení produkující gama záření mají vysokou schopnost penetrace i při relativně nízké intenzitě dávky záření. Závislost výkonu dávky záření spočívá v celkové aktivitě zdroje záření.

V technické praxi výše uvedeným odstavcům rozumíme tak, že v urychlovačích elektronů při beta záření je dávka dodána v několika sekundách, zatímco stejná dávka by v zařízení s gama zářením byla dodána v několika hodinách.

Protože pro radiační síťování polymerních výrobků je zapotřebí relativně vysoké dávky záření, využívá se převážně beta záření. Pouze v oblasti tvarově složitých dílců se využívá gama záření právě kvůli příznivé větší hloubce vniknutí. Gama záření se v současnosti používá také hlavně v oblasti radiační sterilizace. [3]

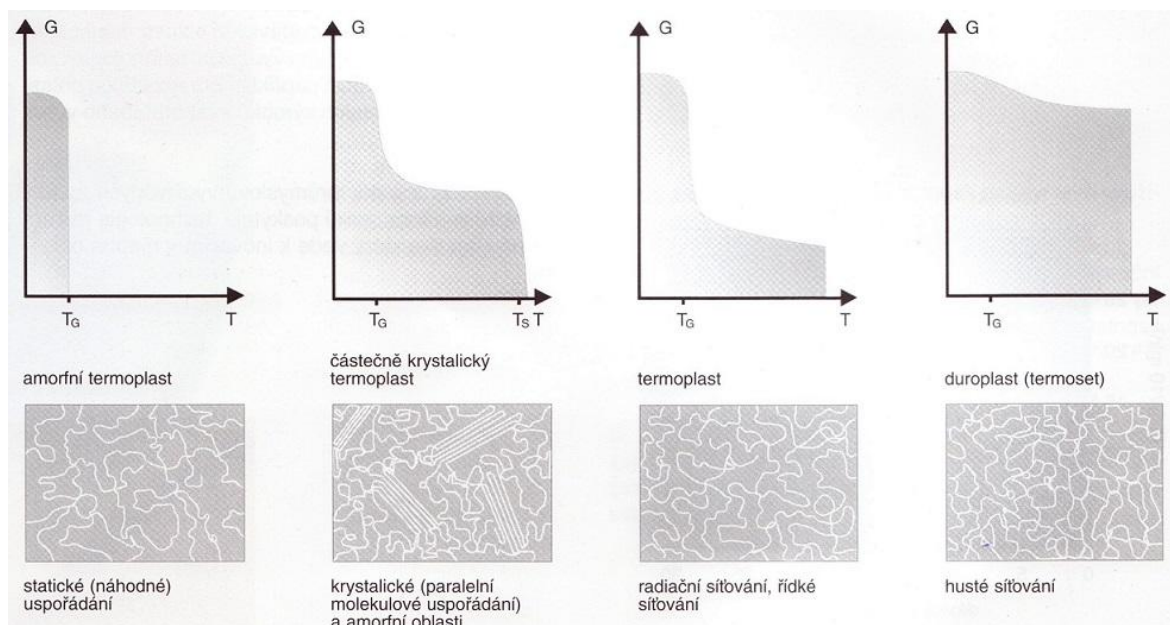
4.1.2 Použití modifikovaných materiálů

V oblasti radiačního síťování pocházejí první zkušenosti ze sféry trubek, hadic a izolací kabelů, tedy dílů vyráběných vytlačováním. Pozitivní zkušenosti byly následně přeneseny na díly vyráběné vstřikováním, tím došlo k uvolnění počtu zajímavých aplikací.

Výstřiky jsou určeny pro elektrotechnický průmysl, kde je potřeba odolávat krátkodobému vysokému teplotnímu zatížení. Mechanické a chemické odolnosti se využívá u uzávěrů v obalové technice. Žádoucí je také zmenšení trvalé deformace při tlakovém namáhání u těsnících a tlumících prvků. Výhodou procesu je možnost zastínění částí ozařovaných dílů šablonami, v těchto výrobcích pak dosahujeme různorodých vlastností. Typické je použití spojení tvrdých a měkkých oblastí v jednom výrobku. [3]

4.1.3 Materiály pro radiační síťování

Výběrem vhodného materiálu rozhodujeme o požadovaných užitečných vlastnostech výrobků. Materiály v této oblasti využívané jsou kategorie termoplastů jako polyolefiny (LDPE, HDPE, LLDPE, PP), halogenové polymery (PVC a jeho směsi, FPM), konstrukční termoplasty (PA6, PA66, PVAL), elastomery (NR, SBR) a termoplastické elastomery. V řadě případů také bývají reaktoplasty nahrazeny zesíťovanými termoplasty. [3]



Obr. 6. Druhy uspořádání v různých ozařovaných materiálech

4.1.4 Zlepšení vlastností

Díky radiačnímu síťování se určité termoplasty chovají v širokém teplotním rozsahu jako elastomery. Ozářený výrobek dobře odolává vyšším teplotám, kdy je výrazně zlepšena tvarová stálost za tepla. Smykový modul se s dávkou ozáření značně liší, kdy u nezesíťovaného výrobku klesne při vysoké teplotě prakticky na 0 MPa, u zesíťovaného má vyšší hodnotu než je 0 MPa a nižší hodnotu než původní, v závislosti na stupni zesíťování se tato hodnota zvyšuje.

Radiační síťování má tedy příznivý vliv na změnu následujících mechanických vlastností polymerních výrobků:

- zvýšení pevnosti,
- zvýšení pevnosti studených spojů,
- zvýšení tvrdosti,
- nárůst Youngova modulu pružnosti,
- zlepšení meze únavy (při střídavém ohybu),
- redukce studeného toku (krípu),
- zlepšení otěruvzdornosti,
- zlepšení chování při dlouhodobém zatížení vnitřním tlakem.

Radiační síťování má také příznivý vliv na změnu těchto tepelných vlastností:

- zvýšení tvarové stálosti za tepla,
- zvýšení odolnosti vůči hoření,
- zvýšení odolnosti proti působení žhavým drátem.

I na změnu následujících chemických vlastností polymerních výrobků:

- zvýšení odolnosti proti botnání, hydrolýze, olejům,
- zvýšení odolnosti proti vzniku trhlin způsobených pnutími a šíření těchto trhlin. [3]

4.1.5 Měrné jednotky techniky radiačního sít'ování

U technologie radiačního sít'ování určuje požadované vlastnosti dávka ozáření, tedy množství absorbované energie záření na měrnou jednotku hmoty.

Jednotkou intenzity záření je gray (Gy), dříve to byl rad.

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ Joule.kg}^{-1}$$

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

Hloubka pronikání neboli penetrace vysoce energetických elektronů nebo gama záření je závislá na jejich energii. Měrnou jednotkou energie je Joule (J), dříve to byl elektronvolt (eV).

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

Vztáhneme – li energii záření absorbovanou výrobkem za časovou jednotku k hmotnosti, získáme dávkovou intenzitu záření.

$$1 \text{ Gy.s}^{-1} = 1 \text{ Watt.kg}^{-1} = 0,36 \text{ Mrad.h}^{-1} [3]$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo stanovení mechanických vlastností dvou vybraných typů polymerních materiálů LDPE (DOW LDPE 780E) a HDPE (DOW HDPE 25055E) v závislosti na vlivu dávky ozáření a několikanásobného tepelného zatížení.

Zkušební tělesa byla modifikována radiačním sítováním dávkami záření (33 kGy, 66 kGy, 99 kGy, 132 kGy, 165 kGy a 198 kGy). Zkušební tělesa z materiálu DOW LDPE 780E byla také vystavena několikanásobnému tepelnému zatížení v teplotní komoře (5 x 90 °C a 5 x 140 °C). Zkušební tělesa z materiálu DOW HDPE 25055E byla vystavena několikanásobnému tepelnému zatížení v teplotní komoře (5 x 110 °C a 5 x 160 °C).

Mechanické vlastnosti byly testovány na speciálních zařízeních. Na trhacím stroji ZWICK 1456 byla provedena tahová zkouška a na rázovém kladivu ZWICK HIT50P byla provedena zkouška rázové pevnosti v tahu. Pomocí tahové zkoušky byly stanoveny mechanické vlastnosti u testovaných zkušebních těles, jako jsou modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu, napětí na mezi kluzu a poměrné prodloužení. Pomocí rázové zkoušky tahem byla stanovena mechanická vlastnost u testovaných zkušebních těles, a to rázová houževnatost v tahu.

Naměřené výsledky byly numericky i graficky znázorněny, porovnány a vyhodnoceny.

6 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ A PRINCIP MĚŘENÍ

V následující kapitole budou podrobně popsána použitá měřicí zařízení, jejich konstrukce a parametry, dále pak princip vlastního měření na daném zařízení.

6.1 Měřicí zařízení Trhací stroj ZWICK 1456

Trhací stroj ZWICK 1456, viz. obrázek (Obr. 7), je univerzální testovací stroj vyvinutý a vyrobený německou společností ZWICK. Je předurčen k testování polymerů, pryží a kompozitních materiálů na polymerní bázi. Výměnné upínací prvky poskytují možnost provádět tyto zkoušky:

- **statická zkouška v tahu,**
- statická zkouška v tlaku,
- statická zkouška v ohybu,
- statická zkouška ve smyku,
- měření creepu.

Flexibilní montážní systém umožňuje rychlou a snadnou výměnu upínacích čelistí a zkušebních přípravků a provádět různé druhy zkoušek. Pro statickou zkoušku v tahu bylo použito klínových upínacích čelistí, jež tvoří masivní základny s vyměnitelnými či pevnými vložkami. Ovládací jednotka čelistí slouží k otevírání a zavírání upínacích čelistí. Klínové čelisti jsou výhodné zejména pro takové zkušební tělesa, která mají tendenci se smršťovat v průběhu zkoušky, konstrukce čelistí zajišťuje automatické stahování a tedy kompenzaci zmenšující se tloušťky zkušebního tělesa.

Snímače síly jsou vytvořeny na osově a rotačně symetrickém principu, nejsou proto citlivé vůči příčným silám. Snímač dráhy je založen na funkci kontaktního průtahoměru, který umožňuje dlouhou pracovní dráhu pro přímé měření u zkušebních těles, jež vykazují velké deformace. Snímače dráhy disponují velmi nízkým mechanickým odporem.

Výkonný pohon umožňuje zkušebnímu stroji dosažení vysoké rychlosti provádění zkoušek či zpětného chodu, jež zkracuje dobu zkušebního cyklu a zvyšuje produktivitu zkoušek.



Obr. 7. Trhací stroj ZWICK 1456 [17]

Regulační technika disponuje vysokou rychlostí měření, přesností a rychlým řízením. Regulační technika je k rámu upevněna vertikálně a díky tomu je lépe chráněna před otřesy, před vniknutím nečistotami a vodivými částicemi.

Trhací stroj ve své výbavě také obsahuje teplotní komoru, která umožňuje testování mechanických vlastností při nízkých i vysokých teplotách, tato možnost ale v rámci této diplomové práce využita nebyla.

Výstup naměřených dat poskytuje externí PC s nainstalovaným softwarem testXpert, který byl vytvořen na platformě Microsoft Windows. Ovládání tohoto softwaru je jednoduché, flexibilní, uživatelsky přívětivé, výkonné a okamžitě poskytuje spolehlivé numerické i grafické zobrazení naměřených dat. [8]

Tab. 5. Základní parametry Trhacího stroje ZWICK 1456

Parametr	Hodnota
Snímač síly	2,5 kN, 25 kN
Maximální rychlost posuvu	800 mm.min ⁻¹
Výška zkušebního prostoru	1 470 mm
Teplotní rozsah zkoušek	- 70 °C až 290 °C

6.1.1 Princip měření na Trhacím stroji ZWICK 1456

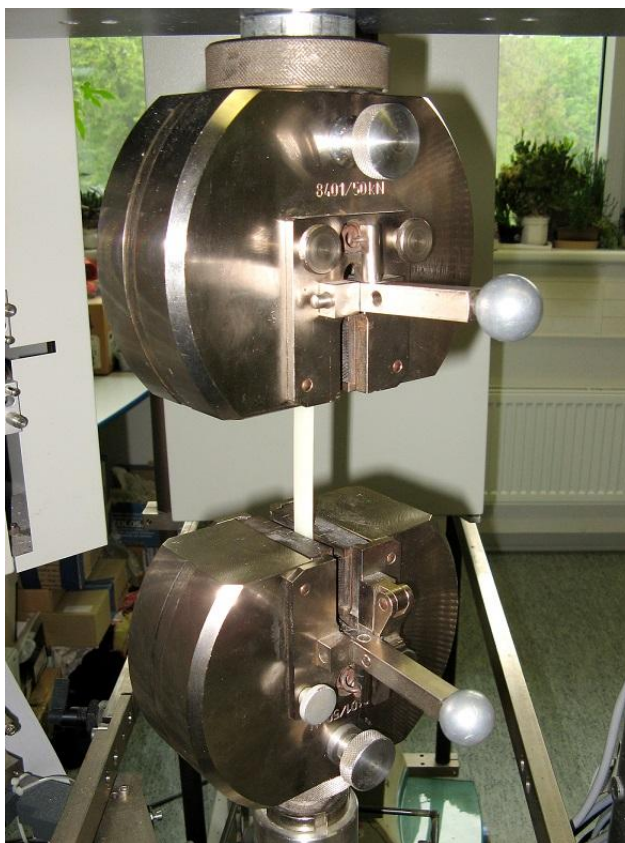
Princip statické zkoušky v tahu na Trhacím stroji ZWICK 1456 začíná ve vložení polymerního zkušebního tělesa do klínových upínacích čelistí. Tyto čelisti mají díky využití klínového principu při upínání větší sílu předpětí. Ta se na zkušební těleso přenáší pomocí vřetena posunem těla vůči vložkám. Hlavní upínací síly je dosaženo teprve při tahovém zatížení díky klínovému účinku. Po vynulování zatěžující síly prostřednictvím tlačítka „Force 0“ (klávesa F2) a spuštěním samotné zkoušky prostřednictvím tlačítka „Start“ (klávesa Shift + F10) se upínací čelisti pohybují proti sobě dle přednastavené rychlosti posuvu 50 mm.min⁻¹ a dochází k deformaci, prodlužování zkušebního tělesa. Kontaktní průtahoměry pohybující se společně s deformovaným zkušebním tělesem zajišťují část budoucího vyhodnocení zkoušky.



Obr. 8. Klínové upínací čelisti

Statická zkouška v tahu končí v okamžiku přetržení zkušebního tělesa, systém díky kontaktním průtahoměrům a snímačům síly numericky zobrazuje pomocí softwaru testXpert naměřená data jako jsou modul pružnosti v tahu, poměrné prodloužení, mez pevnosti v tahu, mez kluzu v tahu. Naměřená data jsou také graficky zobrazena formou tahové křivky každého zkušebního tělesa. Po vrácení upínacích čelistí do původní přednastavené polohy prostřednictvím tlačítka „LE“ (klávesa F3) a vyjmutí zdeformovaného zkušebního tělesa lze celý cyklus opakovat.

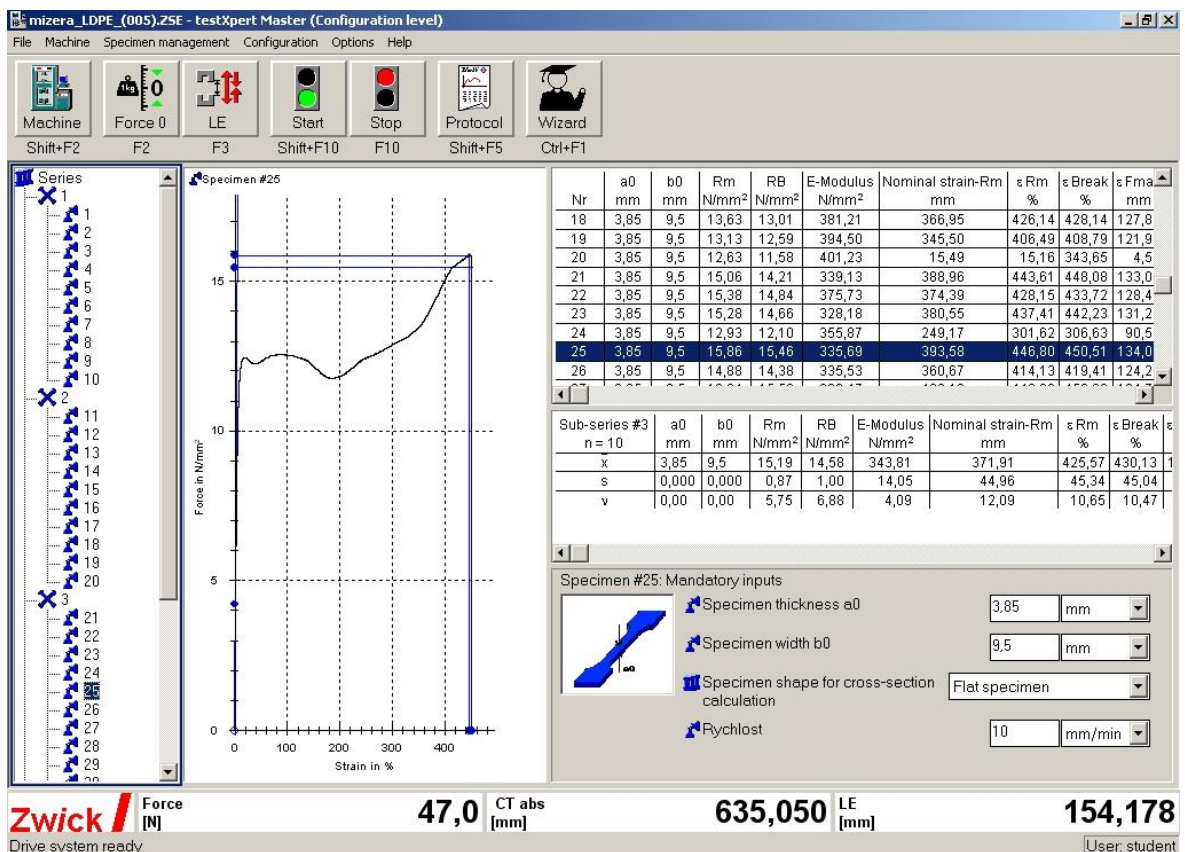
Upnutí zkušebního tělesa v klínových upínacích čelistech před provedením statické zkoušky v tahu lze pozorovat na obrázku (Obr. 9).



Obr. 9. Upnutí zkušebního tělesa v klínových upínacích čelistech

Na následujícím obrázku (Obr. 10) je pak náhled do softwaru testXpert, kde je jasně zobrazena tahová křivka konkrétního zkušební tělesa, dále pak vyobrazena naměřená data formou jednotlivých parametrů a ovládací prvky daného softwaru.

Zde se jednalo o materiál DOW LDPE 780E. Ostatní zkušební tělesa tohoto materiálu vykazovala podobný průběh tahové křivky, kdy napětí na mezi pevnosti by nebylo správně vyhodnocované z důvodu velkého rozptylu hodnot dle chování materiálu polyetylenu o nízké hustotě. Z tohoto důvodu bylo tedy u materiálu DOW LDPE 780E vyhodnocováno jasně definované napětí na mezi kluzu.

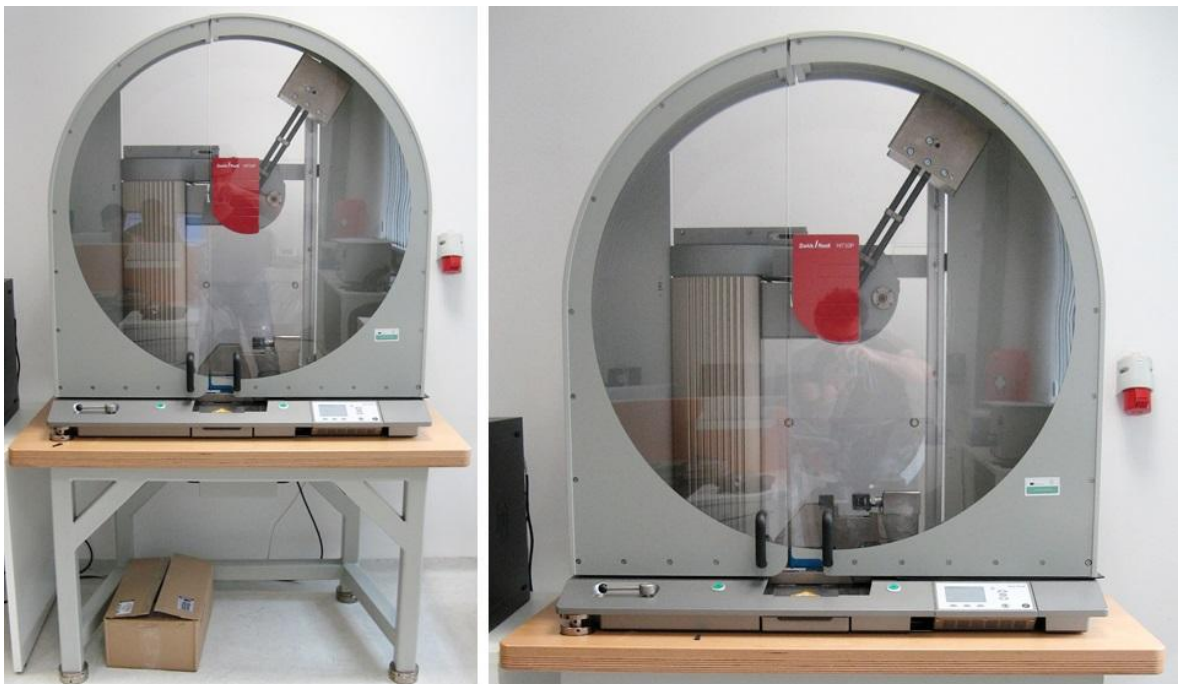


Obr. 10. Náhled do prostředí softwaru testXpert

6.2 Měřicí zařízení Rázové kladivo ZWICK HIT50P

Rázové kladivo ZWICK HIT50P, viz. obrázek (Obr. 11), pro zkoušku rázové/vrubové houževnatosti a rázové pevnosti v tahu všech polymerních materiálů, je do detailů vyvinuto německou společností ZWICK přesně podle požadavků zákazníka dle mezinárodních norem a je snadno integrovatelné do zkušebních laboratoří. Rázové kladivo je vybaveno variabilními kyvadly a nástroji pro uchycení umožňující čtyři druhy zkoušek:

- zkouška metodou Charpy (ISO 179-1, ASTM D 6110),
- zkouška metodou Izod (ISO 180, ASTM D 256),
- zkouška metodou Dynstat (DIN 53435),
- **rázová zkouška tahem (ISO 8256, ASTM D 1822).**



Obr. 11. Rázové kladivo ZWICK HIT50P

Měřicí zařízení vyniká masivním rámem a stabilní podporou, základová deska je vyrobena s ohledem na tlumení vibrací způsobených hmotou kladiva v kontaktu se zkušebním tělesem v průběhu zkoušky.

Pro výrobu kyvadel byly použity dvojité karbonové tyče, což zabezpečuje vysokou tuhost, pevnost ve směru rázu a velkou koncentraci v místě úderu, minimální ztráty energie.

Kyvadlo je v horní úvrati západkou bezpečně uchyceno. Brzda kyvadla je kotoučová, materiál obložení zabezpečuje minimální opotřebení. Ovládací prvky jsou optimálně umístěny pro snadnou obsluhu měřicího zařízení a splňují ergonomické standardy.

Zařízení je vybaveno rychloupínacím mechanismem pro snadnou a rychlou výměnu nástrojů při potřebě provedení jiného druhu zkoušky. Díky podpurným montážním přípravkům je po výměně dosaženo přesné požadované polohy. Brzda kyvadla je kotoučová, materiál obložení zabezpečuje minimální opotřebení.

Pohyblivé senzory umožňují systému zachycovat kvalitní naměřená data, která jsou okamžitě graficky znázorněna. Elektronika obsahující digitální snímač s velkým rozlišením zabezpečuje přesné měření úhlu kyvu. Z důvodu připojení k laboratorním informačním systémům je součástí rozhraní RS232 a USB port s technologií „Plug and Play“ pro připojení k PC.

Měřicí zařízení umožňuje také zkoušky při nízkých teplotách, kdy se využívá chladicího zařízení a digitálního teploměru pro sledování teploty. [8], [9]

Základní parametry Rázového kladiva ZWICK HIT50J jsou uvedeny v tabulce (Tab. 6).

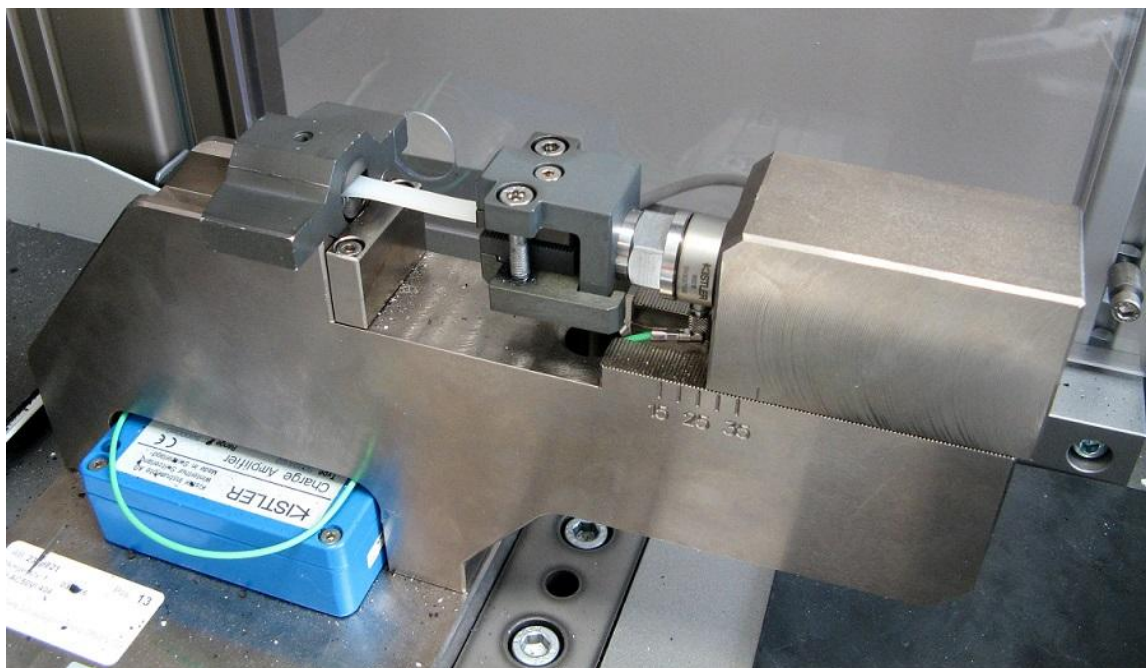
Tab. 6. Základní parametry Rázového kladiva ZWICK HIT50P

Parametr	Hodnota
Maximální energie	50 J
Maximální dopadová rychlost	2,2 až 3,8 m.s ⁻¹
Výška zařízení	1170 mm
Šířka zařízení	1 180 mm
Hloubka zařízení	500 mm
Rozhraní	USB, RS232
Elektrické napětí	230 V

6.2.1 Princip měření na Rázovém kladivu ZWICK HIT50P

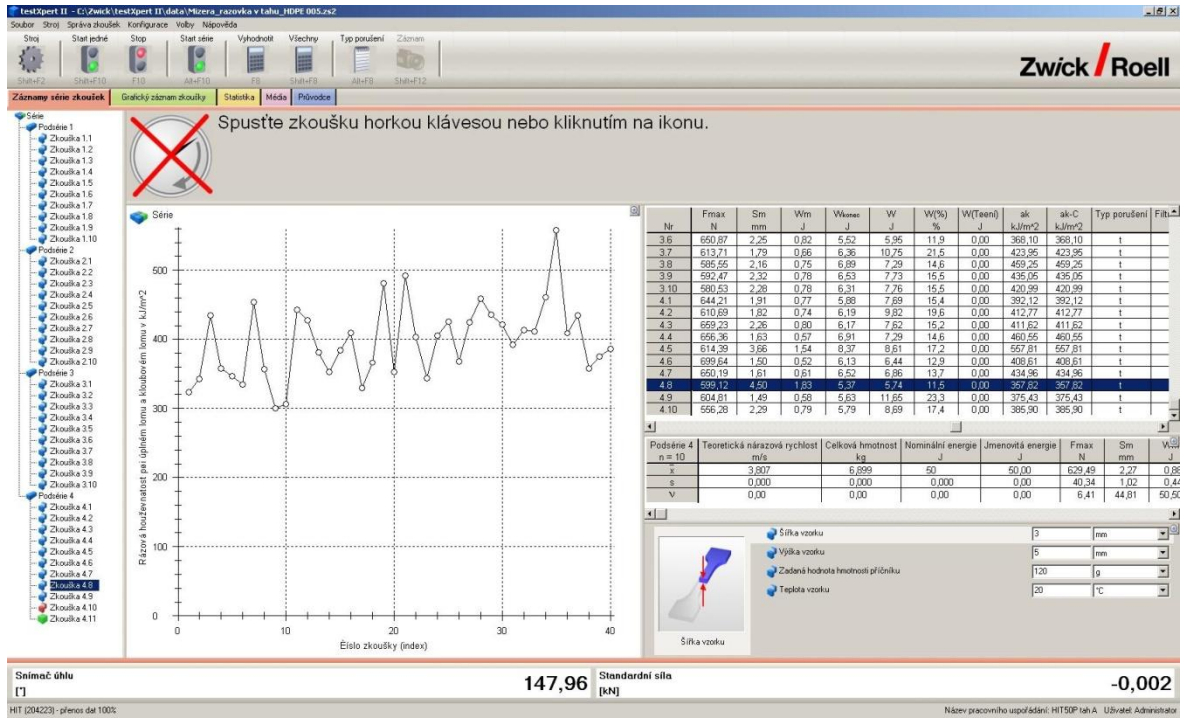
Při rázové zkoušce tahem je nutné umístit zkušební těleso do přípravku upínacího zařízení, zde je uchyceno silově pomocí válcových šroubů s vnitřním šestihranem, poté pomocí stejných šroubů uchytit přípravek do samotného upínacího zařízení a následně odjistit kyvadlo. Před samotným odjištěním je zapotřebí v softwaru testXpert II spustit zkoušku tlačítky „Start jedné“ (klávesa Shift + F10) a v další nabídce vybrat možnost „Tvárný lom“. Nyní obsluha měřícího zařízení musí z hlediska bezpečnosti stlačit obě zelená tlačítka na zařízení a po těchto krocích dochází k uvolnění kyvadla. Kyvadlo koná rotační pohyb kolem své osy a při kontaktu se zkušebním tělesem jej deformuje, prodlužuje, na rozdíl od statické zkoušky v tahu se ale nyní jedná o dynamický proces, působení rázu v minimálním časovém intervalu. Pomocí snímače je změřený přebytek kyvadla a je příslušným softwarem testXpert II vyhodnocena nárazová práce, která byla potřebná pro deformaci zkušebního tělesa. Volně se pohybující kyvadlo je vhodné zabrzdit kotoučovou brzdou. Kyvadlo je po provedení experimentu nutné dopravit do horní úvratě. Po demontáži přípravku z upínacího zařízení, vyjmutí deformovaného zkušebního tělesa z přípravku a vložení nového zkušebního tělesa do přípravku lze celý cyklus opakovat.

Na následujícím obrázku (Obr. 12) je zobrazeno umístění zkušebního tělesa v upínacím zařízení před dopadem kyvadla.



Obr. 12. Umístění zkušebního tělesa v upínacím zařízení před dopadem kyvadla

Na obrázku (Obr. 13) je náhled do prostředí softwaru testXpert II využívaném pro zobrazení naměřených dat, zde konkrétně u materiálu DOW HDPE 25055E.



Obr. 13. Náhled do prostředí softwaru testXpert II pro rázovou zkoušku tahem

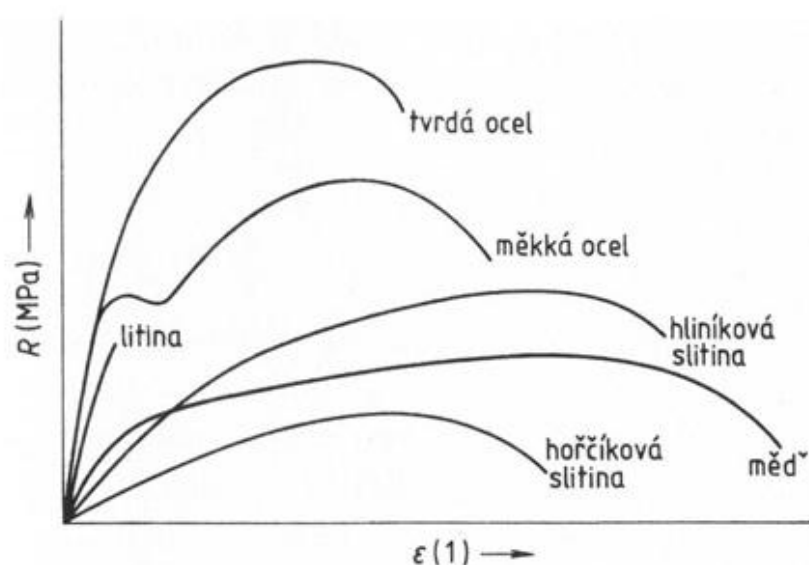
7 PODSTATA PROVEDENÝCH ZKOUŠEK

V následující kapitole budou podrobněji popsány teoretické podstaty zkoušek, které přímo souvisely s vlastním měřením při praktické části této diplomové práce.

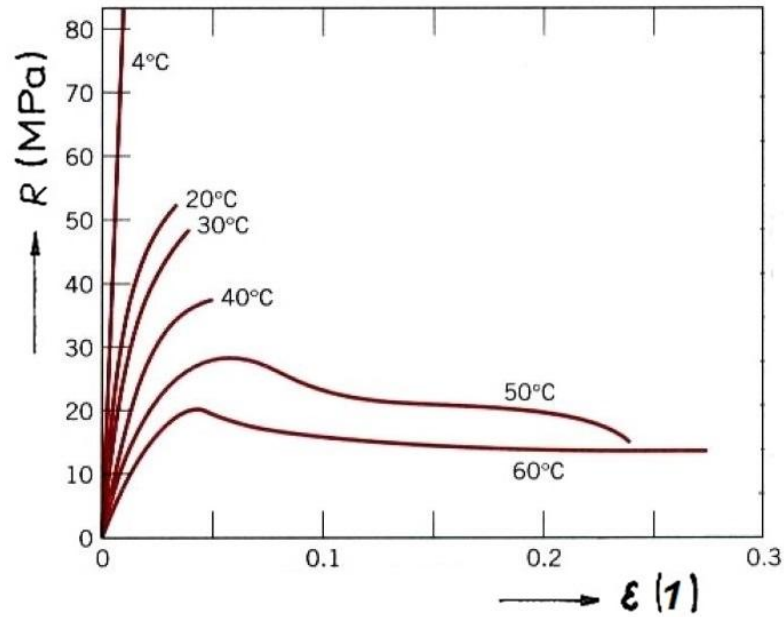
7.1 Podstata tahové zkoušky

Tahová zkouška se provádí na trhacím stroji a spočívá v deformaci normalizovaného zkušební tělesa o daném tvaru a rozměrech tahovým zatížením obvykle až do přetržení. Sleduje se závislost tahového napětí na poměrném prodloužení. Napětím se rozumí smluvní napětí, tj. poměr síly působící na zkušební těleso k ploše průřezu nedeformovaného zkušební tělesa. Je nutné upřesňovat, o jaké napětí se jedná, protože zkušební těleso je deformováno až do přetržení, kdy rozdíl mezi původním průřezem a průřezem při přetržení bývá značný. Deformace je tedy nutné při tahové zkoušce považovat za velké deformace a zavedené smluvní napětí přísně odlišovat od skutečného napětí ve zkušebním tělese. [11]

Výsledkem tahové zkoušky je tahová křivka, jež vyjadřuje závislost tahového napětí na poměrném prodloužení. Tahová křivka je pro každý materiál odlišná, obecně platí, že čím tvrdší materiál (Obr. 14) či nižší teplota (Obr. 15), tím má strmější charakter.

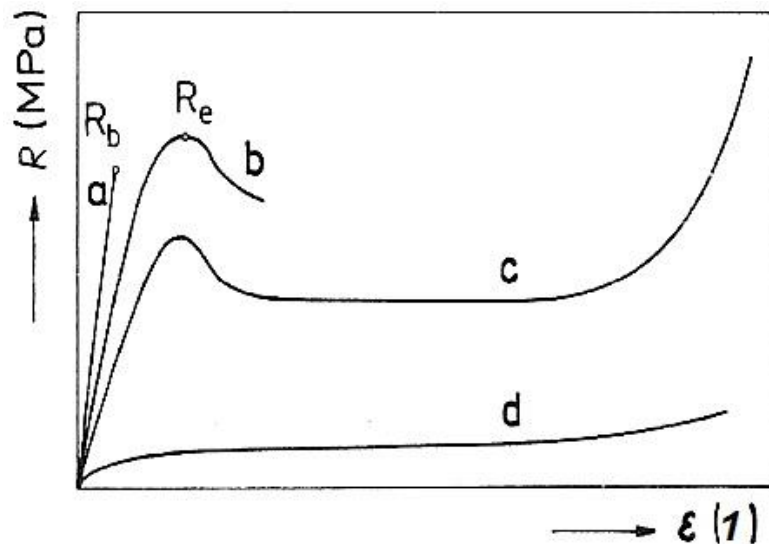


Obr. 14. Tahové křivky kovových materiálů [12]



Obr. 15. Tahové křivky při různých teplotách [13]

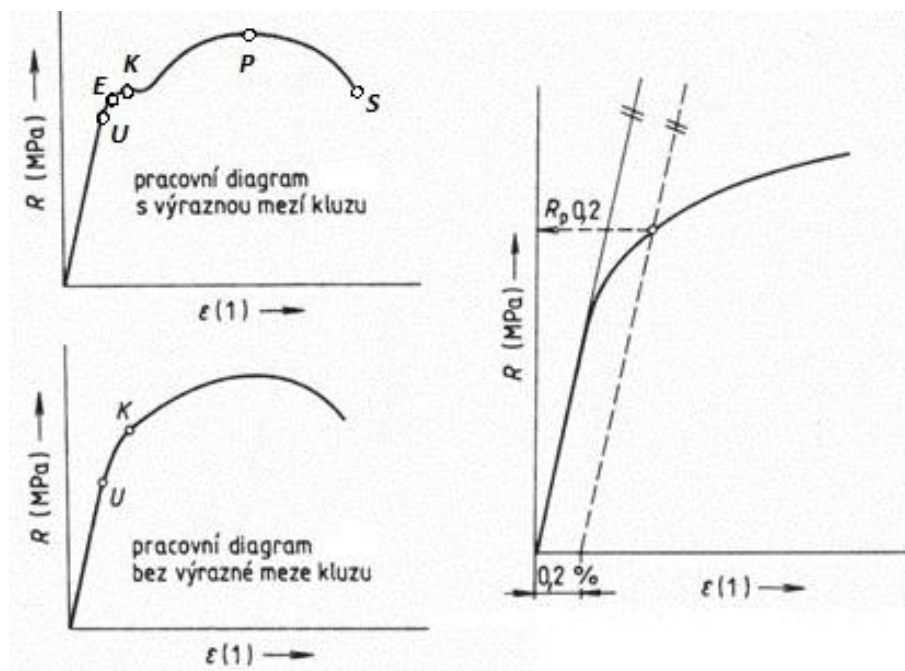
Tahové křivky různých polymerních materiálů jsou uvedeny na obrázku (Obr. 16).



Obr. 16. Tahové křivky polymerních materiálů: a – křehké reaktoplasty a amorfní termoplasty, b – termoplasty s omezenou možností orientace makromolekul a střední houževnatostí, c – termoplasty s dobrou možností orientace makromolekul a větší houževnatostí (zejména semikrystalické), d – pryže [14]

Počátek tahové křivky má přímkový charakter, kdy napětí je úměrné deformaci a platí v této oblasti Hookeův zákon. Konec přímkového charakteru je označován jako mez úměrnosti (U) a od tohoto bodu se může materiál chovat elasticky (pružně) až do meze pružnosti (E), tzn., že po uvolnění zatěžující síly zkušební těleso zaujme svou původní délku. Po překročení meze pružnosti začne materiál téci, označujeme tuto oblast jako mez kluzu (K), která je charakteristická poklesem napětí při zvětšující se deformaci. U některých materiálů je obtížné stanovit mez kluzu a je tedy nutné se řídit pravidlem, kdy se tento bod stanovuje jako napětí, pro které deformace po odlehčení dosahuje hodnoty 0,2 %. Mez pevnosti (P) představuje maximální smluvní napětí na tahové křivce. Po překročení meze pevnosti začne příčný průřez prudce klesat, až dojde k úplnému přetržení zkušebního tělesa (S). [11]

Jednotlivé meze na tahové křivce a stanovení meze kluzu v pracovním diagramu bez výrazné meze kluzu lze pozorovat na obrázku (Obr. 17).

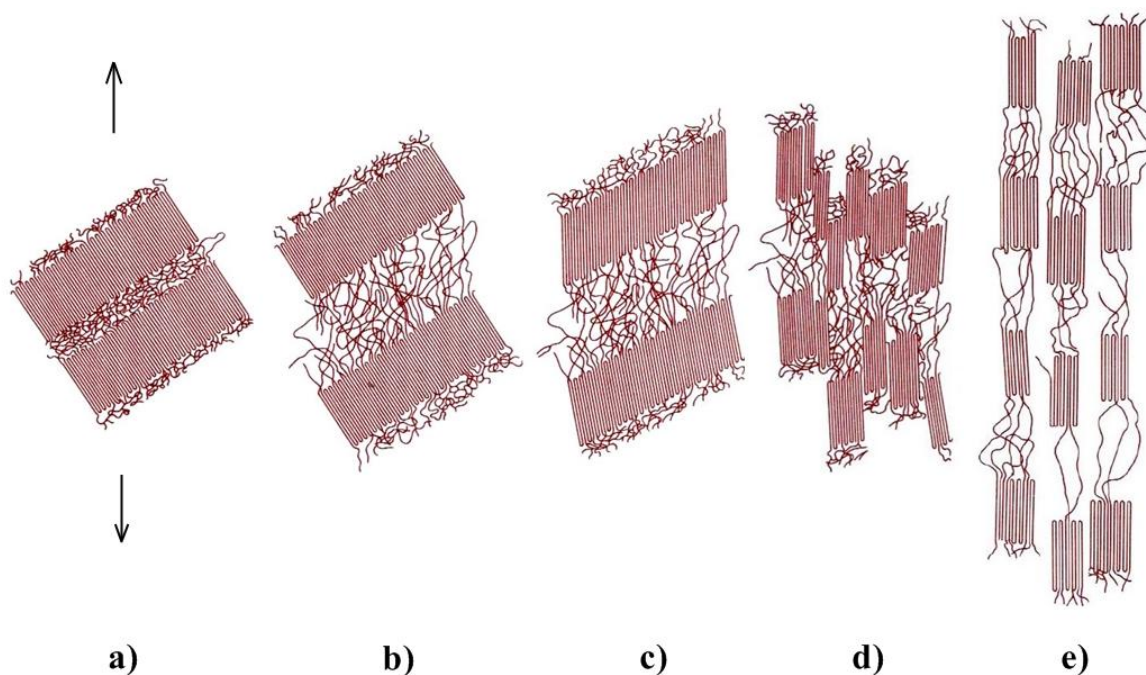


Obr. 17. Tahová křivka s vyznačenými mezemi a stanovení meze kluzu [12]

7.1.1 Deformace polymerů při tahové zkoušce

Schematické znázornění deformace polymerů (amorfní i krystalické oblasti) při tahové zkoušce je vyobrazeno na obrázku (Obr. 18).

Na počátku deformace odpovídá struktura polymeru případu „a)“ tj. v oblasti mezi krystalickými oblastmi se nachází amorfní oblasti. V prvním stádiu deformace (elastická oblast „b)“ dochází k malému prodloužení řetězců, které mezi sebou vážou krystalické oblasti. Během druhého stádia „c)“ v počátku plastické oblasti dochází k naklánění lamelárních krystalických vrstev. Ve třetím stádiu „d)“ dochází již k separaci jednotlivých krystalických bloků. Na závěr deformace „e)“ pak dochází k orientaci krystalických segmentů a řetězců makromolekul v amorfní oblasti do směru působícího napětí. [13]



Obr. 18. Schematické znázornění deformace polymerů při tahové zkoušce

7.2 Podstata rázových zkoušek

Houževnatost spolu s pevností patří k nejdůležitějším materiálovým charakteristikám. Představuje schopnost materiálu odolávat iniciaci a šíření trhliny. Houževnatost je tedy energie, kterou je materiál schopen lokálně absorbovat, než dojde k jeho porušení.

Zkoušky nám poskytují některé z informací o chování polymerů při nárazu. Výsledky jsou závislé na zkušební metodě, podmínkách provedení zkoušky, druhu polymeru, jeho složení, tvaru zkušebního tělesa či teplotě. Volbou aditiv lze houževnatost ovlivnit.

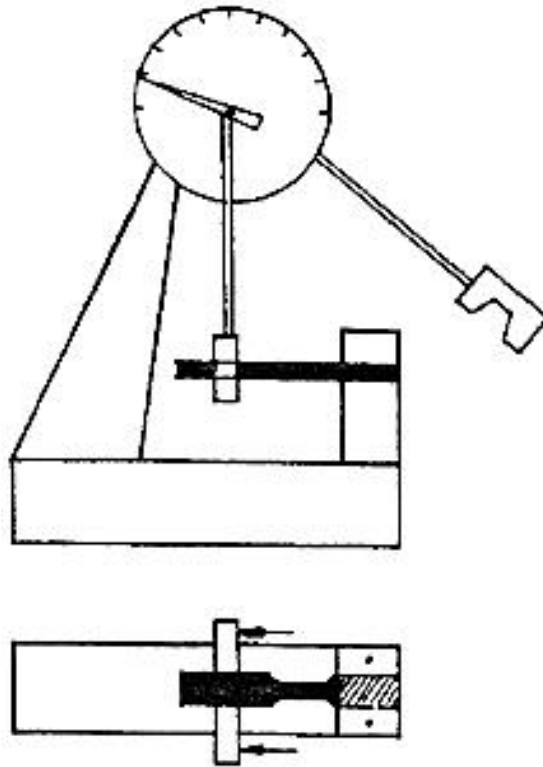
Rázová houževnatost představuje energii spotřebovanou na porušení zkušebního tělesa vztaženou na plochu kritického průřezu zkušebního tělesa za předepsaných podmínek. Označuje se a_n ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$).

7.2.1 Rázová zkouška tahem (ISO 8256)

Pro stanovení a prezentaci srovnatelných jednobodových hodnot podle normy ISO 10350-1 se upřednostňuje metoda Charpy podle ISO 179-1. Tyto zkoušky se obvykle provádějí na zkušebních tělesech neopatřených vruby orientovaných úzkou stranou vůči kyvadlu. Nedojde - li k rozlomení zkušebních těles nyní, provádí se zkoušky zkušebních těles opatřených vruby, přestože výsledky zkoušek nelze bezprostředně srovnávat. V případě, že materiál má velice houževnatý charakter a nedojde k lomu zkušebního tělesa ani nyní, nachází uplatnění zkouška rázem v tahu. [10]

Zkoušky rázem v tahu se využívají ke stanovení odporu materiálu vůči přetržení při vysokých rychlostech. Lze je také popsat jako tahové zkoušky prováděné při vysoké rychlosti deformace. Rázovou zkouškou v tahu se zkoušejí vysoce houževnaté polymery. Práce vynaložená na přetržení měřené části tělesa je rovna součinu působící síly a prodloužení (spotřebované energii a deformace tělesa).

Rázové kladivo, upínání zkušebních těles a směr působení rázu při rázové zkoušce tahem lze pozorovat na obrázku (Obr. 19). [14]



Obr. 19. Rázové kladivo, upínání zkušebního tělesa a směr působení rázu při rázové zkoušce tahem

8 POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI

Pro praktickou část byly zajištěny tyto dva druhy materiálů LDPE a HDPE od americké společnosti DOW.

8.1 Nízkohustotní polyetylen: DOW LDPE 780E

Tento materiál je snadno zpracovatelný vstřikováním, kdy teplota taveniny se pohybuje mezi 140 °C a 250 °C, teplota formy je v rozmezí 10 °C až 50 °C a vstřikovací tlak 50 MPa až 150 MPa.

Materiál se vyznačuje excelentní schopností téci, dobrou tuhostí a dobrým povrchovým leskem. Své možnosti uplatnění skýtá v nádobách, hračkách, ve výrobcích pro domácí potřeby, volnočasové aktivity. [15]

8.1.1 Materiálový list materiálu DOW LDPE 780E

V následující tabulce (Tab. 7) je uveden materiálový list od výrobce DOW obsahující selektované fyzikální, mechanické a teplotní vlastnosti materiálu DOW LDPE 780E. [15]

Tab. 7. Materiálový list DOW LDPE 780E

Fyzikální vlastnosti	Hodnota
Hustota	0,923 g.cm ⁻³
Index toku (190 °C/2,16 kg)	20 g.10 min ⁻¹
Smrštění v podélném směru	2,3 %
Smrštění v příčném směru	1,5 %
Délka toku ve spirále (1200 bar)	8,5 cm
Mechanické vlastnosti	Hodnota
Modul pružnosti v tahu	164 MPa
Napětí na mezi kluzu	8,2 MPa
Napětí v tahu (při přetržení)	10,5 MPa
Tažnost	700 %
Tvrдость (Shore D)	49
Teplotní vlastnosti	Hodnota
Teplota měknutí (dle Vicata)	93 °C

8.2 Vysokohustotní polyetylen: DOW HDPE 25055E

Je materiál taktéž snadno zpracovatelný vstřikováním, vyvinutý pro předání výborných mechanických vlastností, vyznačuje se vysokým povrchovým leskem vstřikovaných dílů. Nejširší oblast použití nacházíme v potravinářských obalech, výrobcích pro domácí potřeby. [16]

8.2.1 Materiálový list materiálu DOW HDPE 25055E

V následující tabulce (Tab. 8) je uveden materiálový list od výrobce DOW obsahující selektované fyzikální, mechanické a teplotní vlastnosti materiálu DOW HDPE 25055E. [16]

Tab. 8. Materiálový list DOW HDPE 25055E

Fyzikální vlastnosti	Hodnota
Hustota	0,953 g.cm ⁻³
Index toku (190 °C/2,16 kg)	25 g.10 min ⁻¹
Smrštění v podélném směru	2,1 %
Smrštění v příčném směru	-
Délka toku ve spirále (1200 bar)	109 cm
Mechanické vlastnosti	Hodnota
Modul pružnosti v tahu	870 MPa
Napětí na mezi kluzu	25 MPa
Napětí v tahu (při přetržení)	27 MPa
Tažnost	200 %
Tvrdost (Shore D)	65
Teplotní vlastnosti	Hodnota
Teplota měknutí (dle Vicata)	124 °C

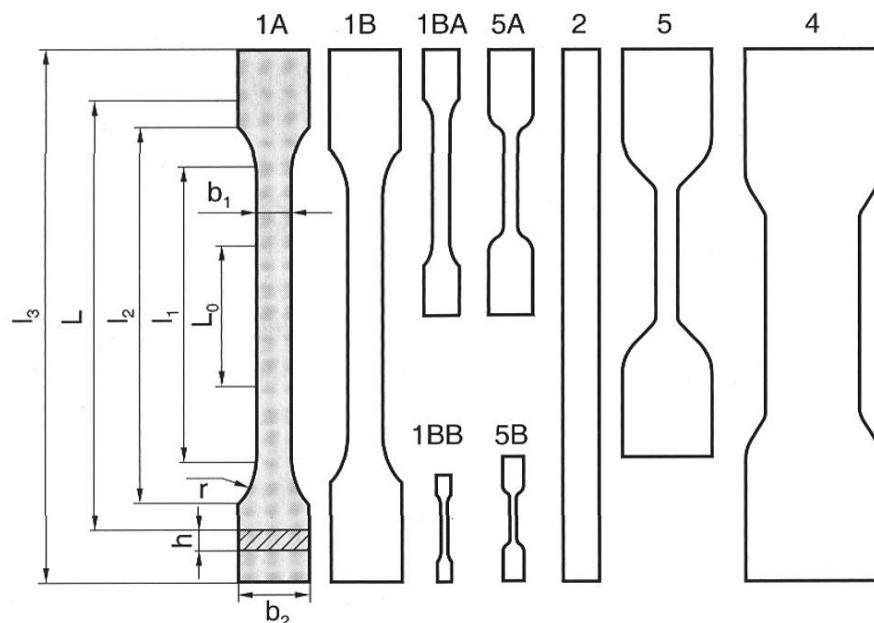
9 ZKUŠEBNÍ TĚLESA A JEJICH PŘÍPRAVA

V procesu přípravy zkušebních těles bylo výhradně využíváno laboratoří a dílen Ústavu výrobního inženýrství při Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně a společnosti BGS Beta – Gamma - Service GmbH se sídlem v Německu.

Tvar a rozměry zkušebních těles pro tahové zkoušky jsou přesně definovány normou pro konkrétní polymerní materiál. Obvykle se používají zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek. Tento tvar je zvolen záměrně, protože umožňuje dostatečně pevné uchycení zkušebního tělesa v upínacích čelistech a napětí je přitom koncentrováno do zúžené části zkušebního tělesa.

Pro statickou zkoušku v tahu bylo dle následujícího obrázku (Obr. 20) použito zkušebního tělesa typu 1A, jeho hlavní rozměry jsou $b_1 = 10$ mm, $b_2 = 20$ mm, $h = 4$ mm, $l_1 = 80$ mm, $l_2 = 110$ mm, $l_3 = 150$ mm. Zkušební tělesa pro tento typ zkoušky podléhají normě ČSN EN ISO 527 - 1, 2.

Pro rázovou zkoušku tahem bylo dle následujícího obrázku (Obr. 20) použito zkušebního tělesa typu 1BA, jeho hlavní rozměry jsou $b_1 = 5$ mm, $b_2 = 10$ mm, $h = 3$ mm, $l_1 = 30$ mm, $l_2 = 55$ mm, $l_3 = 80$ mm. Zkušební tělesa pro tento typ zkoušky podléhají normě ČSN EN ISO 294 - 2.



Obr. 20. Různé tvary polymerních zkušebních těles pro statickou zkoušku v tahu a rázovou zkoušku tahem [18]

9.1 Výroba zkušebních těles pro statickou zkoušku v tahu

Zkušební tělesa pro provedení statické zkoušky v tahu byla vyrobena na vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 420 C (Obr. 21) ve vstřikovací formě pro výrobu zkušebních těles v klasickém normovaném provedení jedna lopatka pro tahovou zkoušku a jeden trámeček pro zkoušku vrubové houževnatosti.



Obr. 21. Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420 C

Zkušební tělesa (Obr. 22) byla vyrobena společně v jednom cyklu vstřikovacího procesu. Následně byly pomocí štípacích kleští odstraněny vtokové zbytky od zkušebních těles a zkušební tělesa byla systematicky popsána pro snadnou orientaci během příští manipulace.



Obr. 22. Vpravo zkušební těleso pro statickou zkoušku v tahu

Na následujícím obrázku (Obr. 23) je pohled do dělicí roviny otevřené vstřikovací formy. Jedná se o vstřikovací formu se studeným vtokovým systémem, válcovými vyhazovači a přidržovačem vtoku. Vstřikovací forma je temperovaná vodou jedním temperačním okruhem. Rozvodový kanál vtokového systému má kruhový průřez. Materiál tvarových desek vstřikovací formy je nástrojová ocel 19 552.



Obr. 23. Vstřikovací forma ve vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 420 C

Tabulka (Tab. 9) obsahuje procesní parametry při vstřikování zkušebních těles.

Tab. 9. Tabulka parametrů při vstřikování

Parametr	DOW LDPE 780 E	DOW HDPE 25055 E
Vstřikovací rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	60	60
Vstřikovací tlak [MPa]	80	80
Doba chlazení [s]	20	20
Teplota formy [$^{\circ}\text{C}$]	40	40
Celkový čas dotlaku [s]	25,1	25,1
Zdvih šneku [mm]	15	15
Teploty pásem plastikační jednotky	DOW LDPE 780 E	DOW HDPE 25055 E
Teplota pod násypkou [$^{\circ}\text{C}$]	60	60
Teplotní pásmo 2 [$^{\circ}\text{C}$]	190	200
Teplotní pásmo 3 [$^{\circ}\text{C}$]	195	205
Teplotní pásmo 4 [$^{\circ}\text{C}$]	200	210
Teplotní pásmo 5 [$^{\circ}\text{C}$]	205	225
Teplota trysky [$^{\circ}\text{C}$]	210	230

V následující tabulce (Tab. 10) jsou uvedeny parametry uzavírací a vstřikovací jednotky vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420 C a některé další parametry charakterizující tento vstřikovací stroj.

Tab. 10. Parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420 C [19]

Sledované parametry uzavírací jednotky	Hodnota
Uzavírací síla	max 1 000 kN
Maximální rozměr formy	420 x 420 x 500 mm
Vzdálenost otevření	max 500 mm
Vyhazovací síla	max 40 kN
Zdvih vyhazovače	max 175 mm
Sledované parametry vstřikovací jednotky	Hodnota
Průměr šneku	35/40/45 mm
Krouticí moment šneku	max 480/550/610 Nm
Poměr L/D	23/20/18
Vstřikovaný objem	max 139/182/230 cm ³
Vstřikovací tlak	max 2500/2120/1670 bar
Obvodová rychlost šneku	max 47/53/60 m.min ⁻¹
Ostatní sledované parametry	Hodnota
Celkový příkon stroje	33,9 kW
Elektrický proud	16 A
Kapacita zásobníku materiálu	50 l
Celková hmotnost stroje	3 700 kg

9.2 Výroba zkušebních těles pro rázovou zkoušku tahem

Zkušební tělesa pro provedení rázových zkoušek tahem byla vyrobena na vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 170 U (Obr. 24) ve vstřikovací formě pro výrobu zkušebních tělísek v menším než předchozím normovaném provedení jedna lopatka pro rázovou zkoušku tahem a jeden trámeček pro zkoušku vrubové houževnatosti.



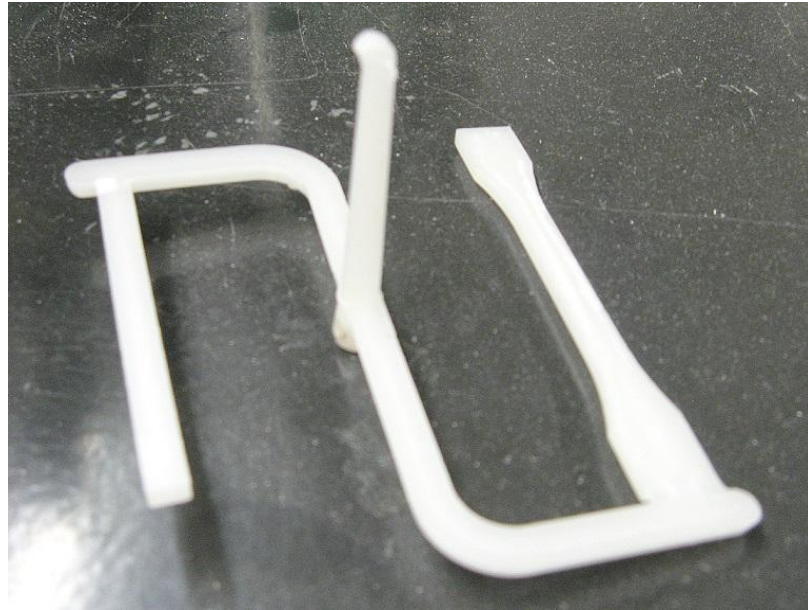
Obr. 24. Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 170 U – v popředí

Základní technické údaje vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 170 U jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 11).

Tab. 11. Parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 170 U

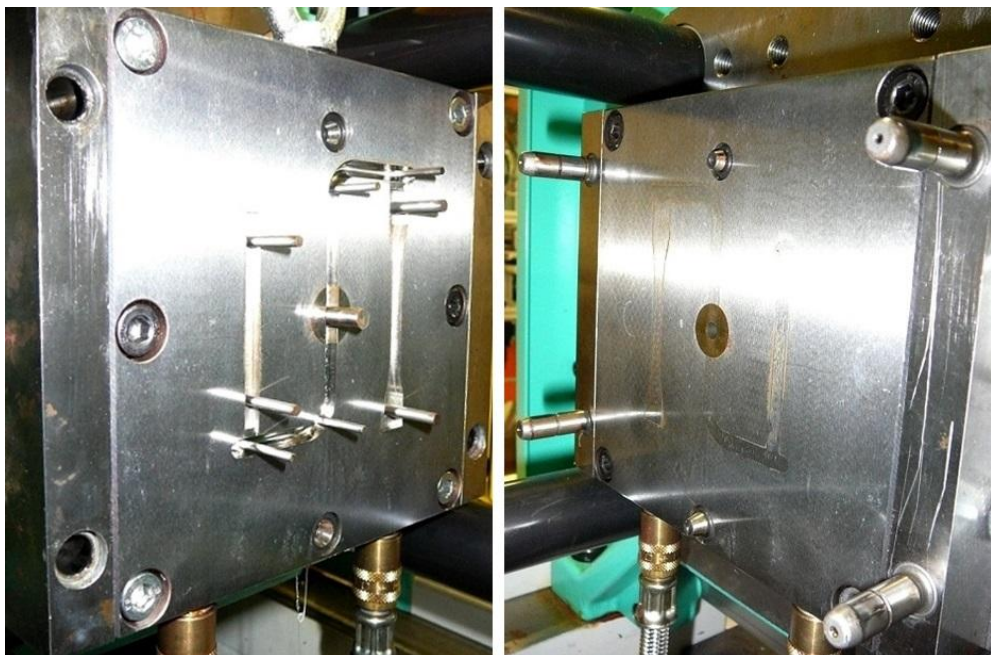
Parametr	Hodnota
Uzavírací síla	150 kN
Maximální rozměr formy	170 x 170 x 200 mm
Průměr šneku	22 mm
Maximální vstřikovaný objem	34 cm ³

Zkušební tělesa (Obr. 25) byla vyrobena společně v jednom cyklu vstřikovacího procesu. Následně byly pomocí štípacích kleští odstraněny vtokové zbytky od zkušebních těles a zkušební tělesa byla systematicky popsána pro snadnou orientaci pro příští manipulaci.



Obr. 25. Vpravo zkušební těleso pro rázovou zkoušku tahem

Na následujícím obrázku (Obr. 26) je pohled do dělicí roviny otevřené vstříkovací formy. Jedná se o vstříkovací formu se studeným vtokovým systémem, válcovými vyhazovači a přidržovačem vtoku. Vstříkovací forma je temperovaná vodou jedním temperačním okruhem. Rozvodový kanál vtokového systému má kruhový průřez.



Obr. 26. Vstříkovací forma ve vstříkovacím stroji ARBURG Allrounder 170 U

9.3 Modifikace zkušebních těles radiačním sít'ováním

Takto připravené zkušební tělesa pro materiál DOW LDPE 780E i DOW HDPE 25055E byly odeslány do německé společnosti BGS Beta – Gamma – Service GmbH (Obr. 27), která se specializuje na modifikaci polymerních materiálů radiačním sít'ováním. Praktický proces od dodání materiálu určeného k ozařování je jednoduchý. Zkušební tělesa dodaná v kartonových krabicích přepraví vysokozdvizný vozík na úložné místo, odkud manipulátor přepravuje dle požadavků jednotlivé krabice na automatický dopravník. Ten dopravuje materiál určený k ozařování do průběžné ozařovací komory, kde za chodu dopravníku dochází k samotnému ozařování elektronovým Beta zářením. Počet vstupů krabic do ozařovací komory, tedy výsledné dávky ozáření je dán požadavkem zákazníka. Jedna dávka ozáření představuje hodnotu 33 kGy. V našem případě byl požadavek na ozáření 33 kGy, 66 kGy, 99 kGy, 132 kGy, 165 kGy a 198 kGy, jednalo se tedy o ozáření našich zkušebních těles 1x až 6x elektronovým Beta zářením. Krabice jsou následně ovinuty fólií a připraveny k expedici zákazníkovi. [20]

Pro budoucí srovnání naměřených hodnot je dávka ozáření etalonových zkušebních těles, tedy nemodifikovaných, 0 kGy.



Obr. 27. Společnost BGS Beta – Gamma – Service GmbH

9.4 Tepelné zatížení zkušebních těles

Již zpět dopravená ozářená zkušební tělesa bylo potřeba vystavit tepelnému zatížení, které bylo uskutečněno v teplotní komoře Mora 4807, viz. obrázek (Obr. 28).



Obr. 28. Teplotní komora Mora 4807

Teplotní komora Mora 4807 je multifunkční trouba elektrického typu, ovládá se pomocí tlačítek, obsahuje ukazatel námi nastavené teploty a zvolené funkce, přesnou elektronickou regulaci teploty. Disponuje teleskopickými výsuvnými rošty, katalytickými samočisticími vložkami, třemi tvrzenými skly dvířek, pěti polohami bočních vodicích mřížek, velkým průhledem dovnitř trouby a vnitřním osvětlením.

Základní technické parametry teplotní komory Mora 4807 jsou uvedeny v tabulce (Tab. 12). [21]

Tab. 12. Parametry horkovzdušné trouby Mora 4807

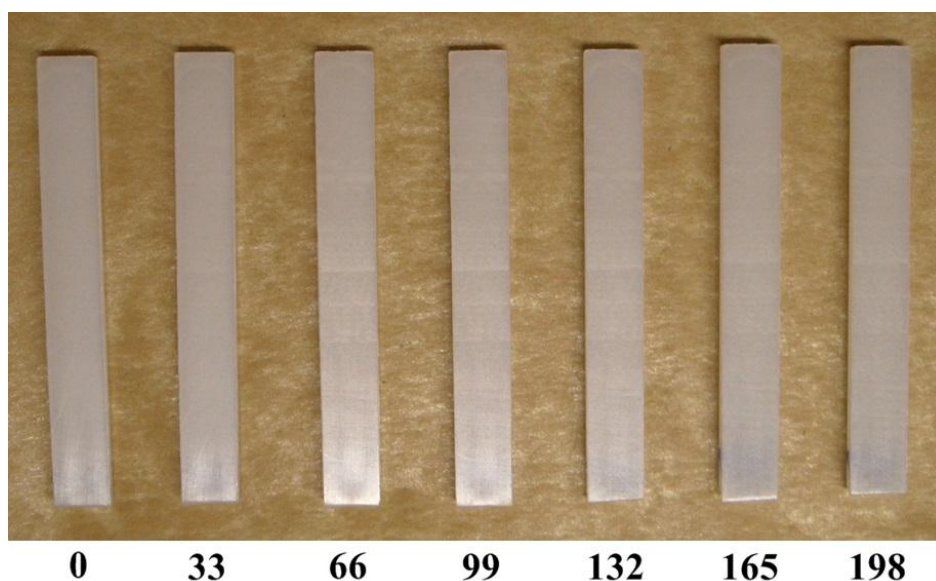
Parametr	Hodnota
Objem	58 l
Příkon	3,5 kW
Elektrické napětí	230 V
Maximální teplota ohřevu	250 °C
Energetická třída	A

Zkušební tělesa z materiálu DOW LDPE 780E byla pětinasobně vystavena teplotám 90 °C a 140 °C v časových intervalech po jedné hodině.

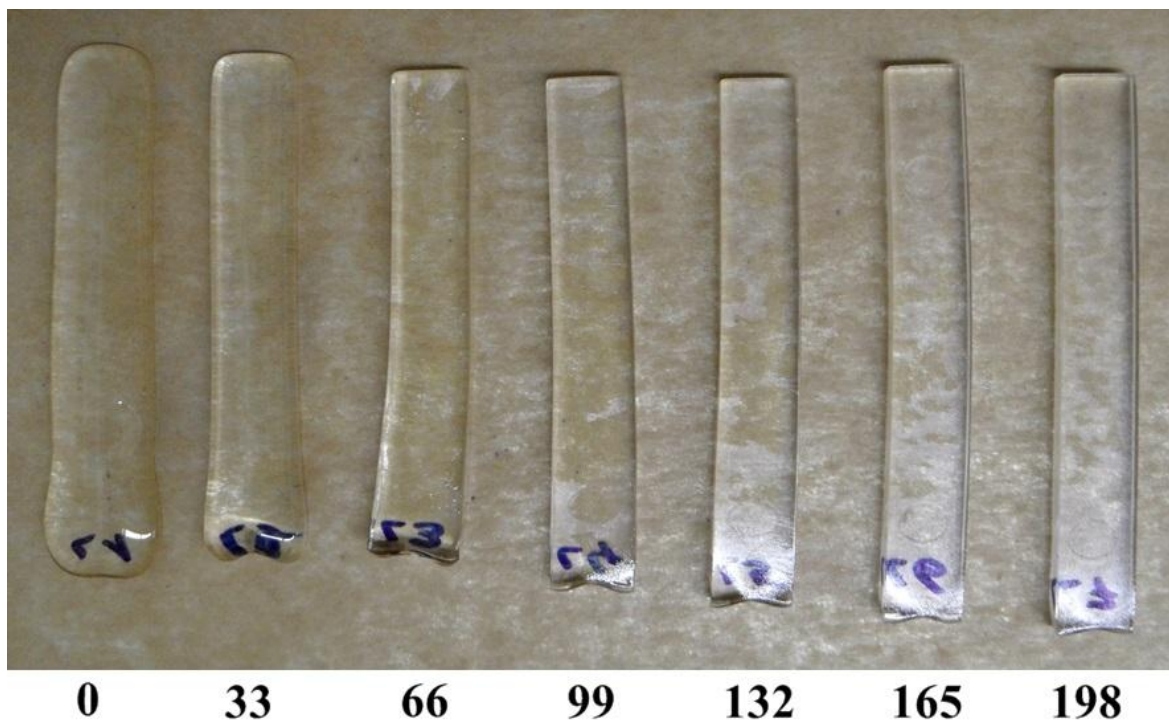
Zkušební tělesa z materiálu DOW HDPE 25055E byla pětinasobně vystavena teplotám 110 °C a 160 °C v časových intervalech po jedné hodině.

Pro budoucí srovnání naměřených hodnot je teplota etalonových zkušebních těles, tedy tepelně nezatížených, 23 °C.

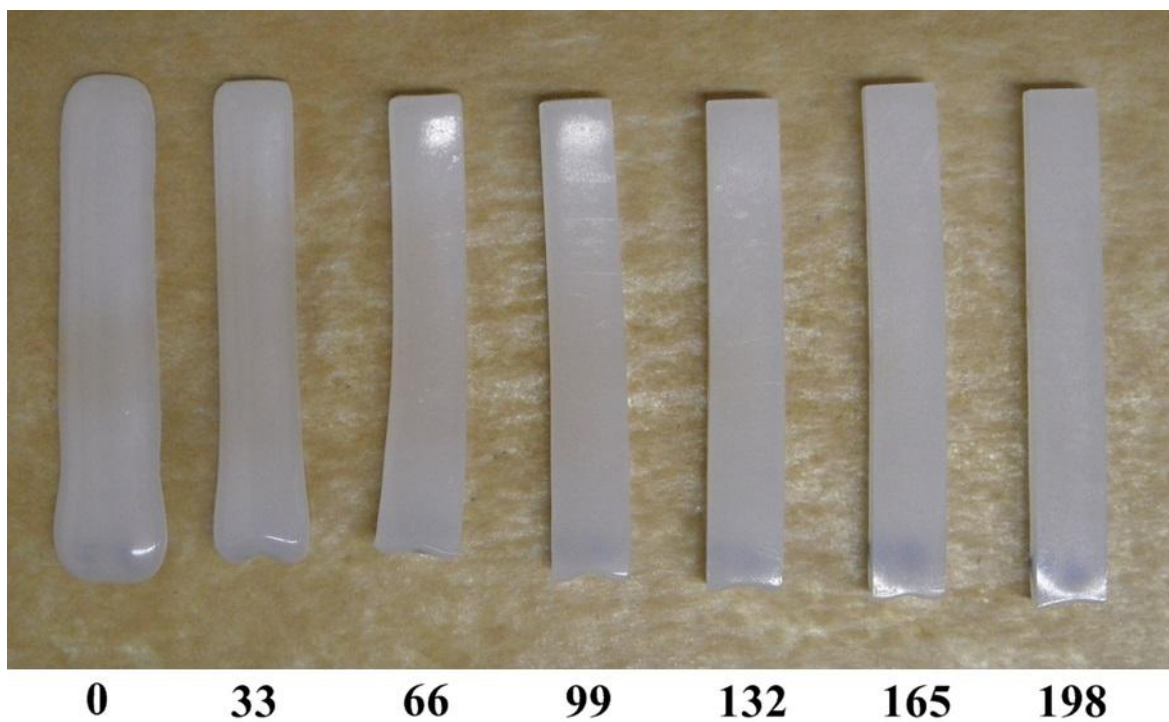
Na následujících obrázcích lze pozorovat zkušební tělesa obou polymerních materiálů sledované před vlivem tepelného zatížení, těsně po vlivu tepelného zatížení a po ochlazení na pokojovou teplotu po vlivu tepelného zatížení v závislosti na dávce záření od 0 kGy po 198 kGy. Jde o zkušební tělesa pro zkoušku vrubové houževnatosti, která nebyla předmětem této diplomové práce.



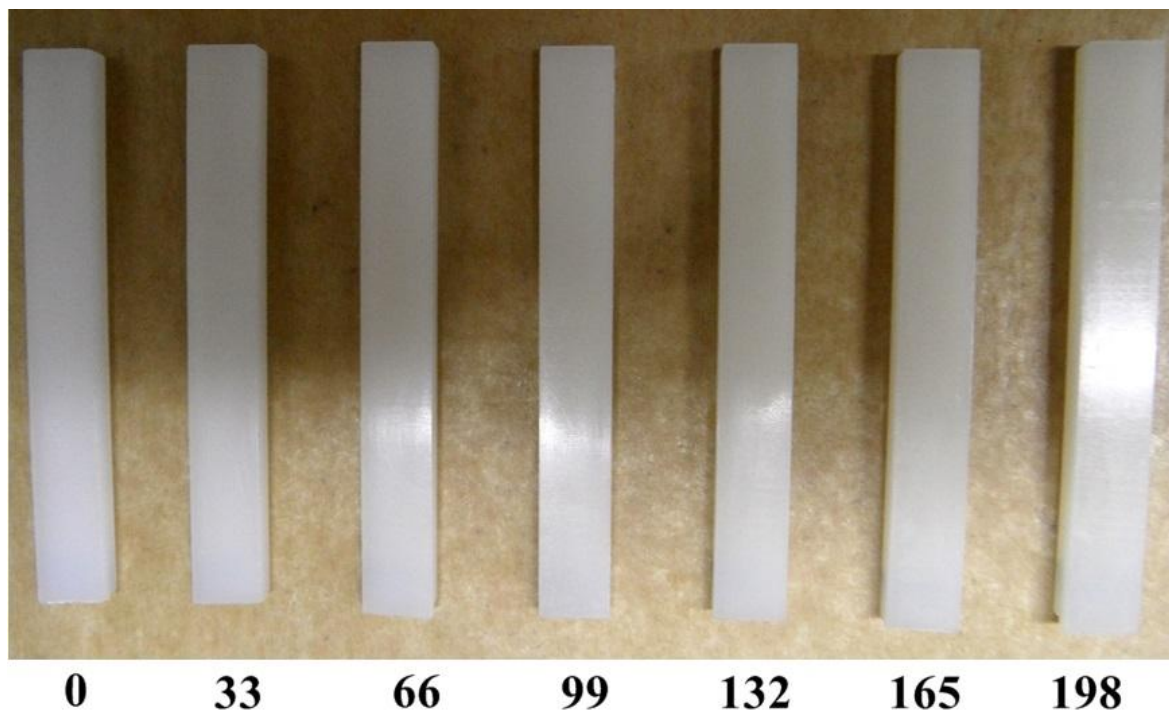
Obr. 29. Zkušební tělesa materiálu DOW LDPE 780E před vlivem tepelného zatížení v závislosti na dávce záření v jednotkách kGy



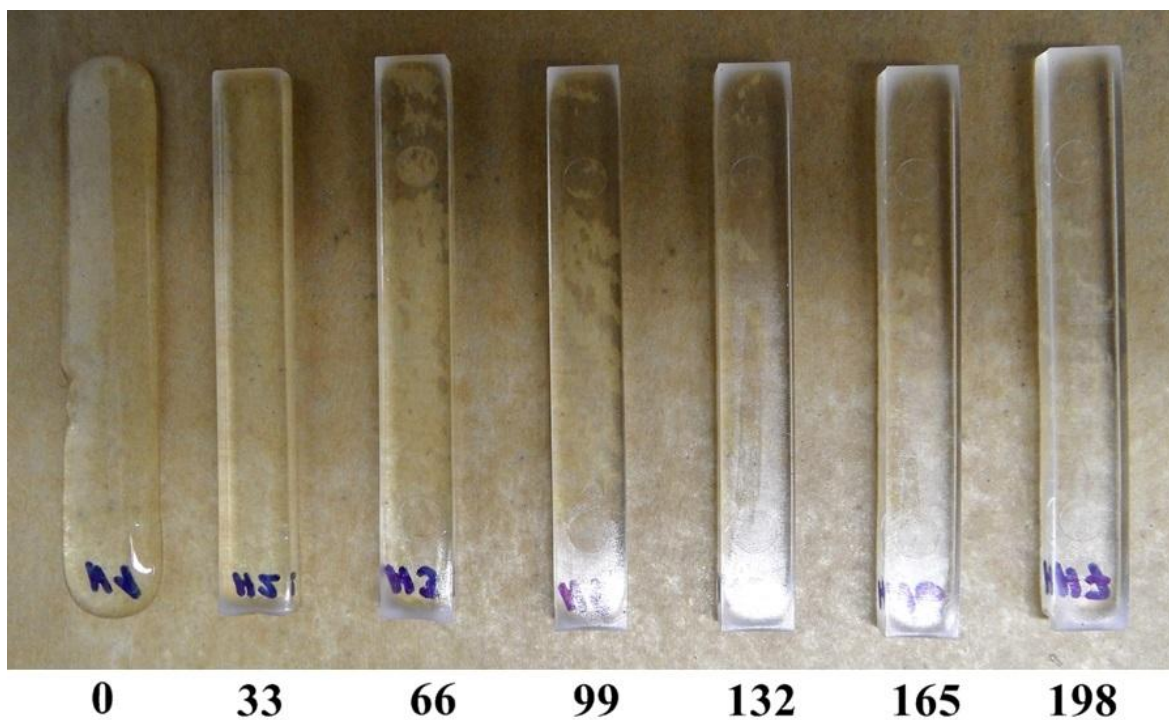
Obr. 30. Zkušební tělesa materiálu DOW LDPE 780E těsně po vlivu tepelného zatížení v závislosti na dávce záření v jednotkách kGy



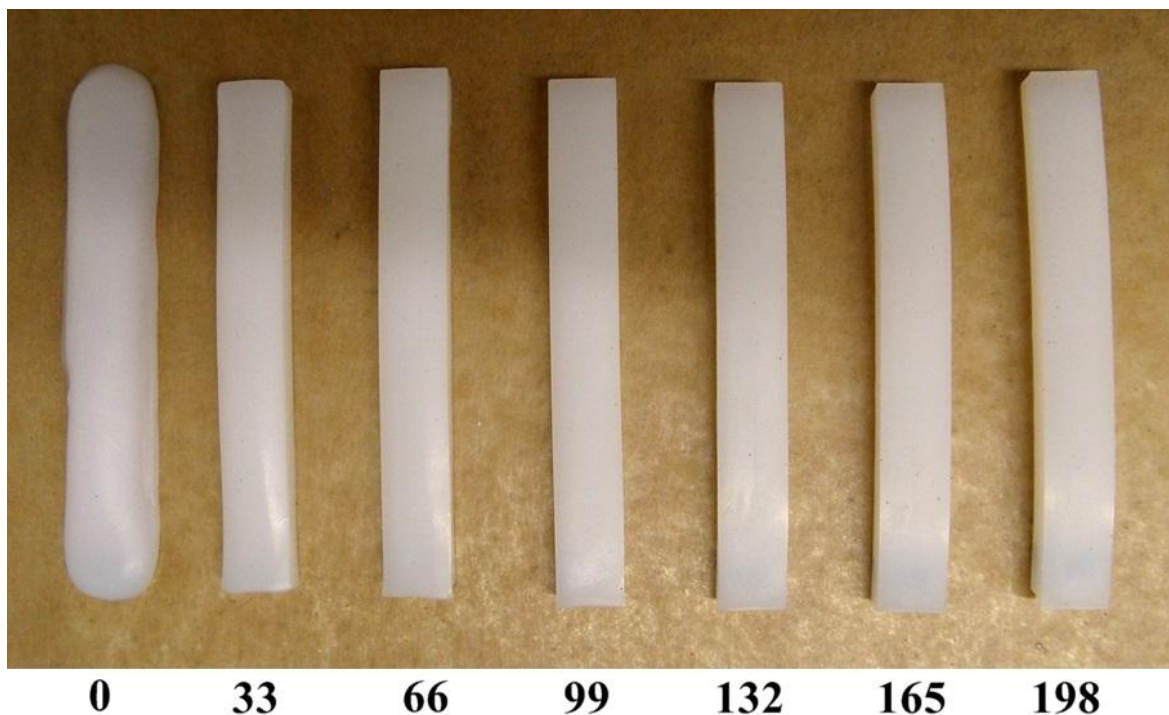
Obr. 31. Zkušební tělesa materiálu DOW LDPE 780E po ochlazení na pokojovou teplotu po vlivu tepelného zatížení v závislosti na dávce záření v jednotkách kGy



Obr. 32. Zkušební tělesa materiálu DOW HDPE 25055E před vlivem tepelného zatížení v závislosti na dávce záření v jednotkách kGy



Obr. 33. Zkušební tělesa materiálu DOW HDPE 25055E těsně po vlivu tepelného zatížení v závislosti na dávce záření v jednotkách kGy



Obr. 34. Zkušební tělesa materiálu DOW HDPE 25055E po ochlazení na pokojovou teplotu po vlivu tepelného zatížení v závislosti na dávce záření v jednotkách kGy

Z předchozích obrázků lze jasně pozorovat výraznou deformaci po tepelném zatížení nemodifikovaného, tedy radiačně nezesíťovaného, zkušební tělesa s nulovou dávkou záření a částečnou deformaci, která se zmenšovala se zvyšující se dávkou záření u ostatních zkušebních těles.

Na obrázcích pořízených těsně po vlivu tepelného zatížení lze také pozorovat fakt, že strukturu materiálu zkušebních těles v tuto chvíli ovládala amorfnní fáze a zkušební tělesa tak vykazovala transparentní charakter. Před vlivem tepelného zatížení a po ochlazení na pokojovou teplotu vykazoval polymerní materiál zakalený charakter, byl zde tedy určitý podíl krystalické a určitý podíl amorfnní fáze, tj. semikrystalické fáze.

10 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V následující kapitole jsou zobrazeny dílčí naměřené výsledky pro statickou zkoušku v tahu i rázovou zkoušku tahem. Výsledky měření jsou prostřednictvím aritmetického průměru \bar{x} a směrodatné odchylky s zobrazeny numericky formou tabulek a graficky formou sloupcových grafů.

Pomocí aritmetického průměru zahrnujeme všechna pozorování. Počítá se tak, že se všechny sledované hodnoty dané statistické proměnné sečtou a poté se součet dělí počtem hodnot n , tedy:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

Směrodatná odchylka je definována jako druhá odmocnina z rozptylu, tj.:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

Mezi hlavní vlastnosti směrodatné odchylky patří fakt, že tato odchylka má stejné měrné jednotky jako sledovaná číselná proměnná ve statistickém souboru. Směrodatná odchylka může také nabývat vždy pouze kladných hodnot.

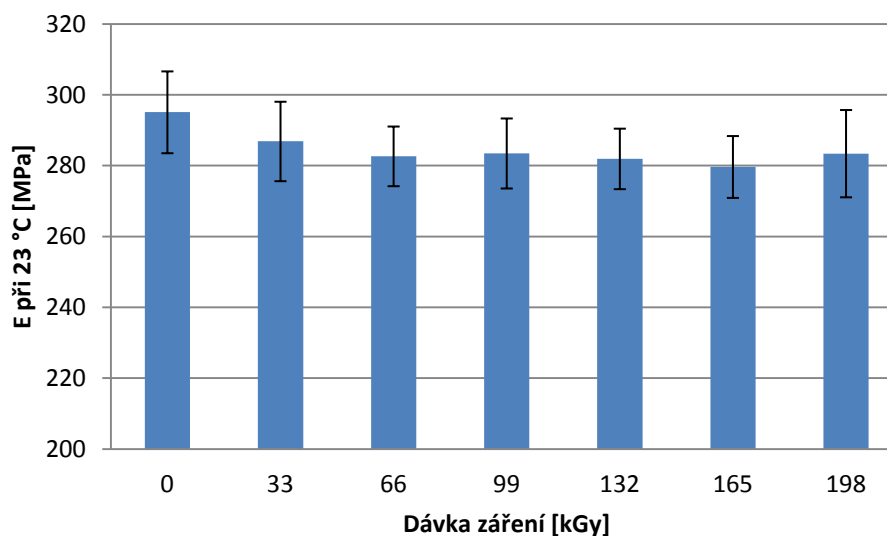
Mezi další statistickou charakteristiku, kterou bylo nutné využít v rámci této diplomové práce, bylo vylučování hrubých chyb. Hrubé chyby se ze souboru vylučují kvůli ovlivnění správnosti konečného výsledku, nepoužíváme je tedy ke zpracování statistických údajů.

10.1 Statická zkouška v tahu materiálu DOW LDPE 780E

10.1.1 Modul pružnosti v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles

Tab. 13. Tabulka naměřených modulů pružnosti v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E

Dávka záření [kGy]	E při 23 °C [MPa]
0	295,1 ± 11,6
33	286,9 ± 11,2
66	282,7 ± 8,4
99	283,5 ± 9,9
132	281,9 ± 8,5
165	279,7 ± 8,7
198	283,4 ± 12,3



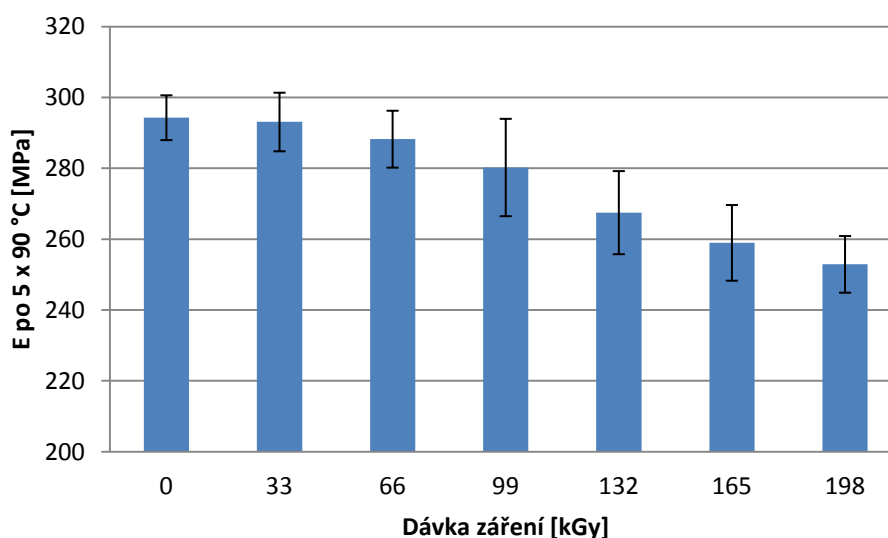
Obr. 35. Závislost modulu pružnosti na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro tepelně nezatížený materiál DOW LDPE 780E vykazují nejnížší hodnotu modulu pružnosti $279,7 \pm 8,7$ MPa zkušební tělesa s dávkou záření 165 kGy, naopak nejvyšší hodnotu modulu pružnosti $295,1 \pm 11,6$ MPa vykazují zkušební tělesa nemoifikovaná, tedy s nulovou dávkou záření.

10.1.2 Modul pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 90 °C

Tab. 14. Tabulka naměřených modulů pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Dávka záření [kGy]	E po 5 x 90 °C [MPa]
0	294,3 ± 6,3
33	293,1 ± 8,3
66	288,2 ± 8,0
99	280,2 ± 13,7
132	267,5 ± 11,7
165	259,0 ± 10,7
198	252,9 ± 8,0



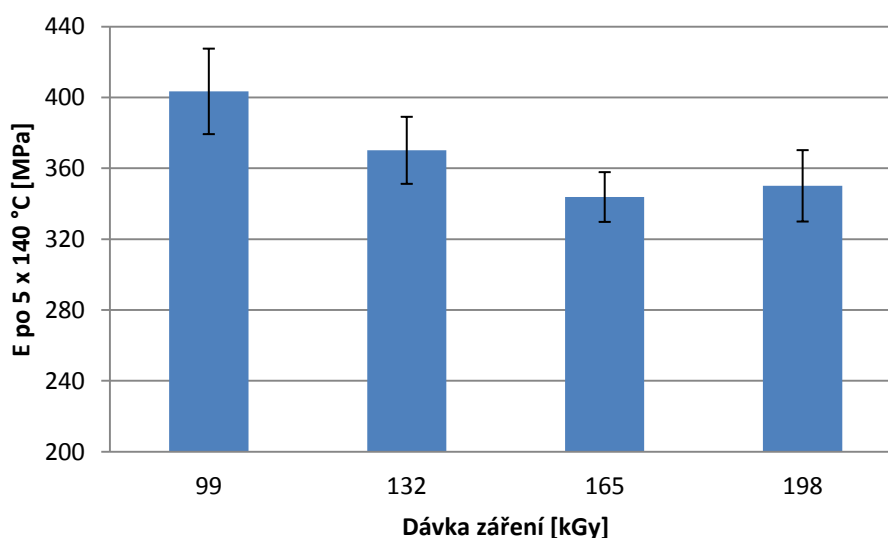
Obr. 36. Závislost modulu pružnosti na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro materiál DOW LDPE 780E po tepelném zatížení 5 x 90 °C vykazují nejnížší hodnotu modulu pružnosti 252,9 ± 8,0 MPa zkušební tělesa s dávkou záření 198 kGy, naopak nejvyšší hodnotu modulu pružnosti 294,3 ± 6,3 MPa vykazují zkušební tělesa nemoifikovaná, tedy s nulovou dávkou záření.

10.1.3 Modul pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 140 °C

Tab. 15. Tabulka naměřených modulů pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Dávka záření [kGy]	E po 5 x 140 °C [MPa]
0	-
33	-
66	-
99	403,4 ± 24,1
132	370,2 ± 18,9
165	343,8 ± 14,1
198	350,1 ± 20,2



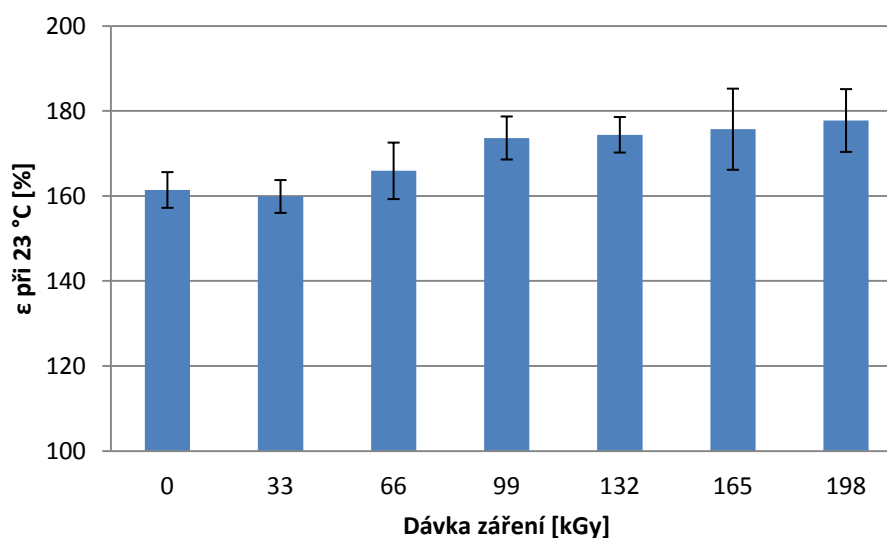
Obr. 37. Závislost modulu pružnosti na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro materiál DOW LDPE 780E po tepelném zatížení 5 x 140 °C vykazují nejnižší hodnotu modulu pružnosti 343,8 ± 14,1 MPa zkušební tělesa s dávkou záření 165 kGy, naopak nejvyšší hodnotu modulu pružnosti 403,4 ± 24,1 MPa vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 99 kGy. Zkušební tělesa s nižší a nulovou dávkou záření byla po vlivu tepelného zatížení 5 x 140 °C značně tvarově deformovaná a nevhodná pro další pokračování ve zkouškách.

10.1.4 Poměrné prodloužení u tepelně nezatížených zkušebních těles

Tab. 16. Tabulka naměřených poměrných prodloužení u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E

Dávka záření [kGy]	ϵ při 23 °C [%]
0	161,4 ± 4,2
33	159,9 ± 3,9
66	165,9 ± 6,6
99	173,7 ± 5,1
132	174,4 ± 4,2
165	175,7 ± 9,5
198	177,8 ± 7,4



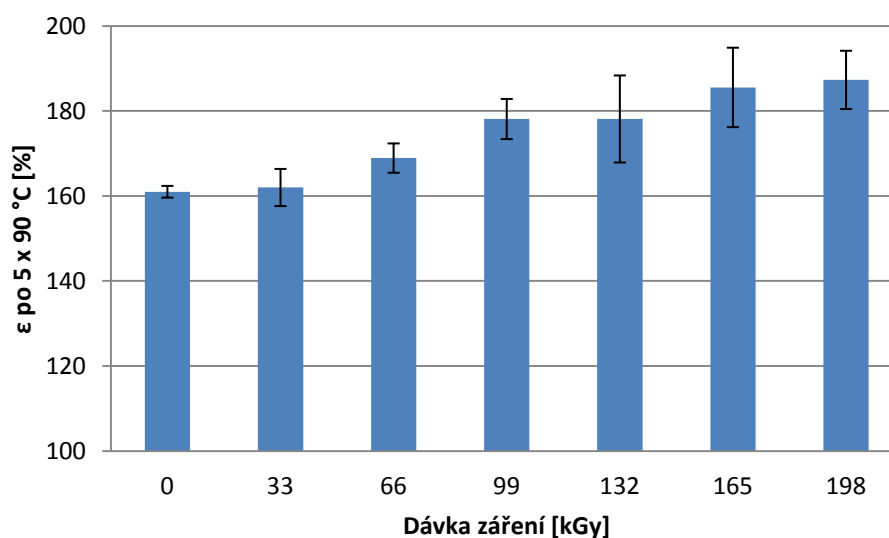
Obr. 38. Závislost poměrného prodloužení na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro tepelně nezatížený materiál DOW LDPE 780E vykazují nejnižší hodnoty poměrného prodloužení $159,9 \pm 3,9$ % zkušební tělesa s dávkou záření 33 kGy, naopak nejvyšší hodnotu poměrného prodloužení $177,8 \pm 7,4$ % vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 198 kGy.

10.1.5 Poměrné prodloužení po tepelném zatížení 5 x 90 °C

Tab. 17. Tabulka naměřených poměrných prodloužení po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Dávka záření [kGy]	ϵ po 5 x 90 °C [%]
0	161,0 ± 1,4
33	162,0 ± 4,4
66	168,2 ± 3,5
99	178,1 ± 4,7
132	178,1 ± 10,2
165	185,5 ± 9,3
198	187,3 ± 6,9



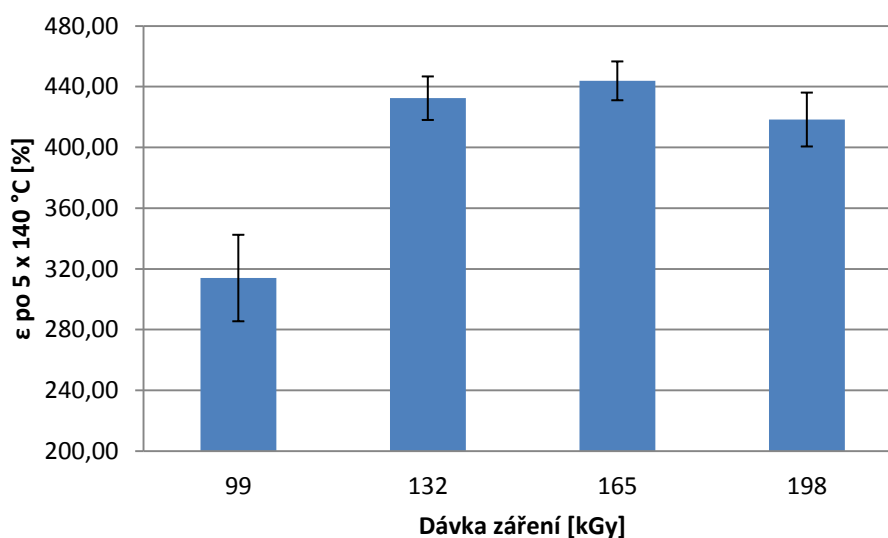
Obr. 39. Závislost poměrného prodloužení na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro materiál DOW LDPE 780E po tepelném zatížení 5 x 90 °C vykazují nejnižší hodnotu poměrného prodloužení 161,0 ± 1,4 % zkušební tělesa nemodifikovaná, tedy s nulovou dávkou záření, naopak nejvyšší hodnotu poměrného prodloužení 187,3 ± 6,9 % vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 198 kGy.

10.1.6 Poměrné prodloužení po tepelném zatížení 5 x 140 °C

Tab. 18. Tabulka naměřených poměrných prodloužení po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Dávka záření [kGy]	ϵ po 5 x 140 °C [%]
0	-
33	-
66	-
99	314,0 ± 28,5
132	432,4 ± 14,3
165	443,9 ± 12,8
198	418,4 ± 17,7



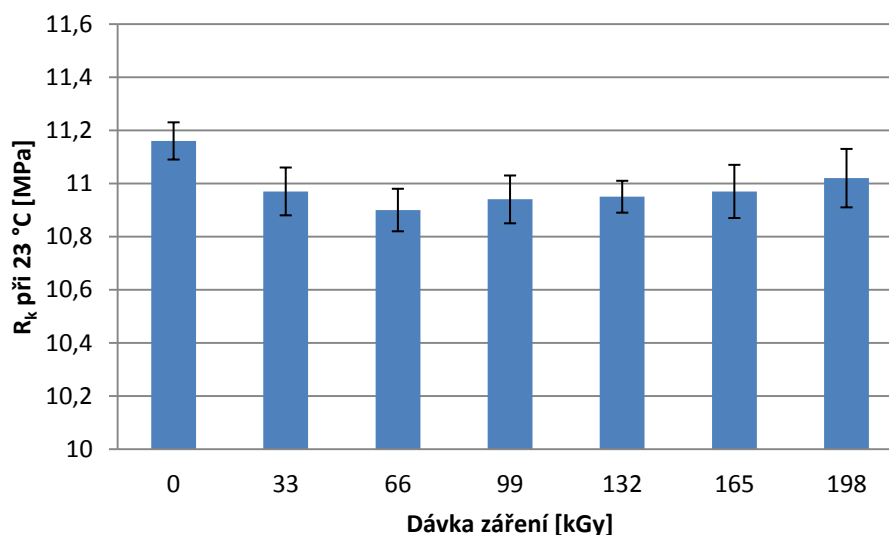
Obr. 40. Závislost poměrného prodloužení na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro materiál DOW LDPE 780E po tepelném zatížení 5 x 140 °C vykazují nejnižší hodnotu poměrného prodloužení 314,0 ± 28,5 % zkušební tělesa s dávkou záření 99 kGy, naopak nejvyšší hodnotu poměrného prodloužení 443,9 ± 12,8 % vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 165 kGy. Zkušební tělesa s nižší a nulovou dávkou záření byla po vlivu tepelného zatížení 5 x 140 °C značně tvarově deformovaná a nevhodná pro další pokračování ve zkouškách.

10.1.7 Napětí na mezi kluzu u tepelně nezatížených zkušebních těles

Tab. 19. Tabulka naměřených napětí na mezi kluzu u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E

Dávka záření [kGy]	R_k při 23 °C [MPa]
0	$11,2 \pm 0,1$
33	$11,0 \pm 0,1$
66	$10,9 \pm 0,1$
99	$10,9 \pm 0,1$
132	$11,0 \pm 0,1$
165	$11,0 \pm 0,1$
198	$11,0 \pm 0,1$



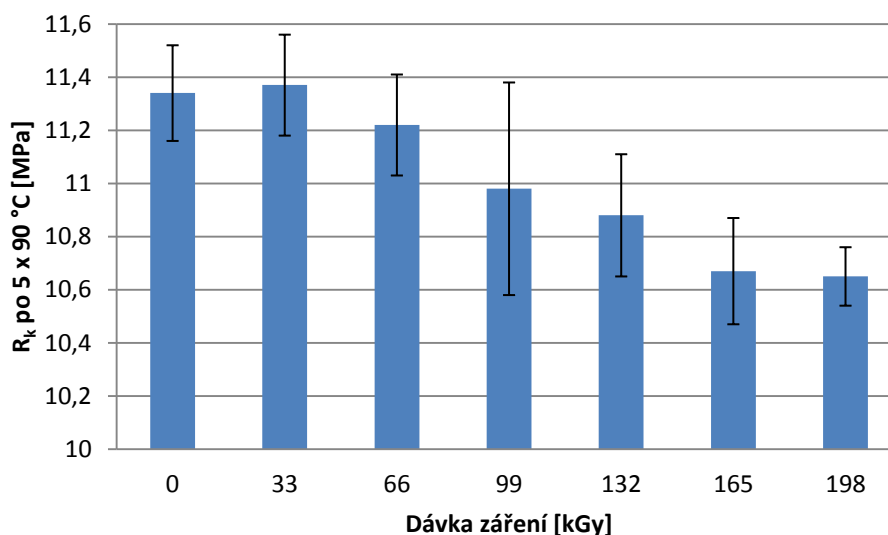
Obr. 41. Závislost napětí na mezi kluzu na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro tepelně nezatížený materiál DOW LDPE 780E vykazují nejnižší hodnotu napětí na mezi kluzu $10,9 \pm 0,1$ MPa zkušební tělesa s dávkou záření 66 kGy, naopak nejvyšší hodnotu napětí na mezi kluzu $11,2 \pm 0,1$ MPa vykazují zkušební tělesa nemodifikovaná, tedy s nulovou dávkou záření.

10.1.8 Napětí na mezi kluzu po tepelném zatížení 5 x 90 °C

Tab. 20. Tabulka naměřených napětí na mezi kluzu po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Dávka záření [kGy]	R _k po 5 x 90 °C [MPa]
0	11,3 ± 0,2
33	11,4 ± 0,2
66	11,2 ± 0,2
99	11,0 ± 0,4
132	10,9 ± 0,2
165	10,8 ± 0,2
198	10,7 ± 0,1



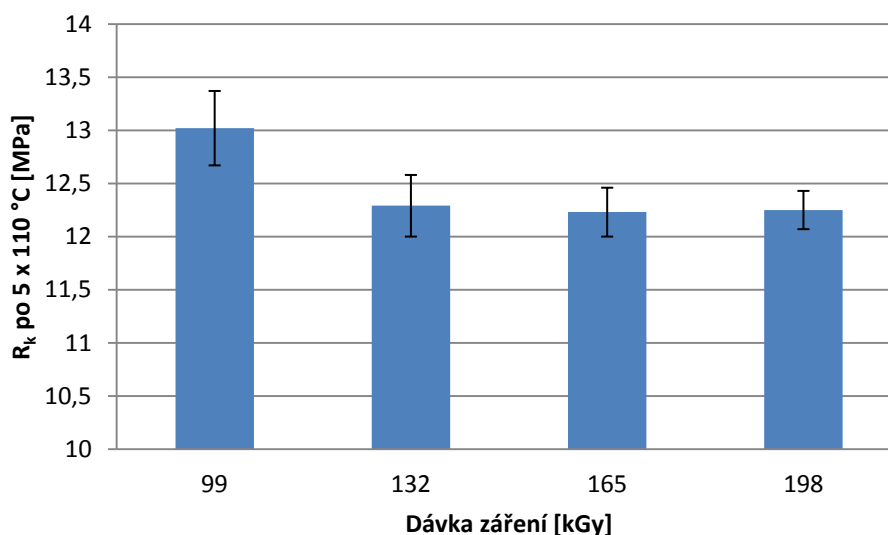
Obr. 42. Závislost napětí na mezi kluzu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro materiál DOW LDPE 780E po tepelném zatížení 5 x 90 °C vykazují nejnižší hodnotu napětí na mezi kluzu 10,7 ± 0,1 MPa zkušební tělesa s dávkou záření 198 kGy, naopak nejvyšší hodnotu napětí na mezi kluzu 11,4 ± 0,2 MPa vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 33 kGy.

10.1.9 Napětí na mezi kluzu po tepelném zatížení 5 x 140 °C

Tab. 21. Tabulka naměřených napětí na mezi kluzu po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Dávka záření [kGy]	R_k po 5 x 140 °C [MPa]
0	-
33	-
66	-
99	13,0 ± 0,4
132	12,3 ± 0,3
165	12,2 ± 0,2
198	12,3 ± 0,2



Obr. 43. Závislost napětí na mezi kluzu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E

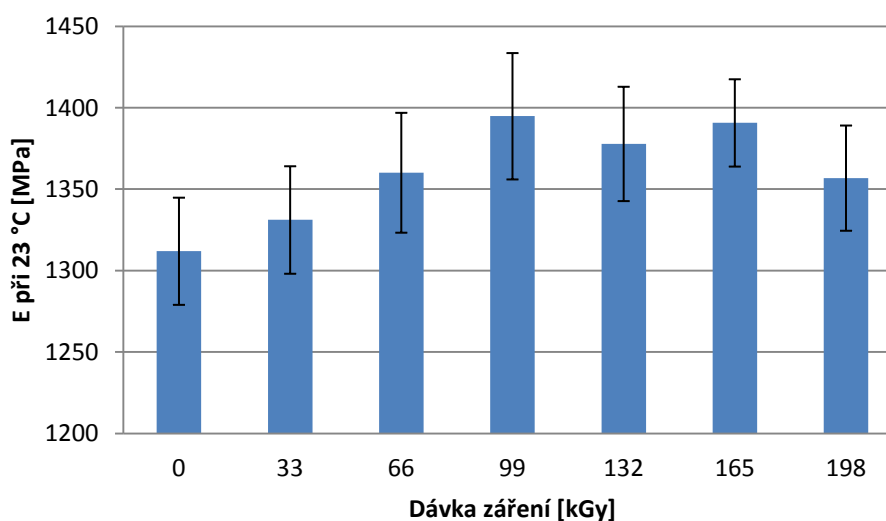
Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro materiál DOW LDPE 780E po tepelném zatížení 5 x 140 °C vykazují nejnižší hodnotu napětí na mezi kluzu 12,2 ± 0,2 MPa zkušební tělesa s dávkou záření 165 kGy, naopak nejvyšší hodnotu modulu pružnosti 13,0 ± 0,4 MPa vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 99 kGy. Zkušební tělesa s nižší a nulovou dávkou záření byla po vlivu tepelného zatížení 5 x 140 °C značně tvarově deformovaná a nevhodná pro další pokračování ve zkouškách.

10.2 Statická zkouška v tahu materiálu DOW HDPE 25055E

10.2.1 Modul pružnosti v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles

Tab. 22. Tabulka naměřených modulů pružnosti v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E

Dávka záření [kGy]	E při 23 °C [MPa]
0	1311,9 ± 32,9
33	1331,1 ± 33,0
66	1360,1 ± 36,8
99	1394,8 ± 38,8
132	1377,8 ± 35,1
165	1390,7 ± 26,8
198	1356,8 ± 32,3



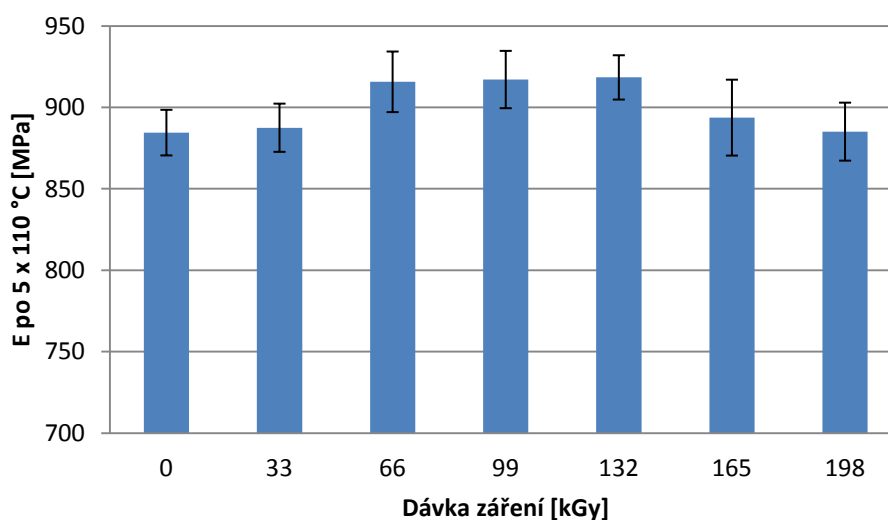
Obr. 44. Závislost modulu pružnosti na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro tepelně nezatížený materiál DOW HDPE 25055E vykazují nejnižší hodnotu modulu pružnosti $1311,9 \pm 32,9$ MPa zkušební tělesa nemodifikovaná, tedy s nulovou dávkou záření, naopak nejvyšší hodnotu modulu pružnosti $1394,8 \pm 38,8$ MPa vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 99 kGy.

10.2.2 Modul pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 110 °C

Tab. 23. Tabulka naměřených modulů pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Dávka záření [kGy]	E po 5 x 110 °C [MPa]
0	884,5 ± 14,0
33	887,5 ± 14,8
66	915,7 ± 18,6
99	917,1 ± 17,6
132	918,4 ± 13,6
165	893,7 ± 23,3
198	885,1 ± 17,8



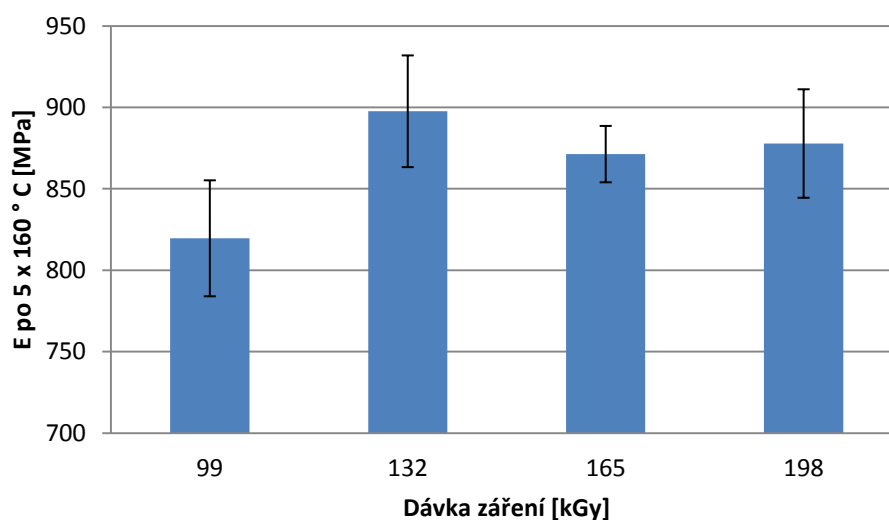
Obr. 45. Závislost modulu pružnosti na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro materiál DOW HDPE 25055E po tepelném zatížení 5 x 110 °C vykazují nejnižší hodnotu modulu pružnosti 884,5 ± 14,0 MPa zkušební těleso nemoifikovaná, tedy s nulovou dávkou záření, naopak nejvyšší hodnotu modulu pružnosti 918,4 ± 13,6 MPa vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 132 kGy.

10.2.3 Modul pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 160 °C

Tab. 24. Tabulka naměřených modulů pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Dávka záření [kGy]	E po 5 x 160 °C [MPa]
0	-
33	-
66	-
99	819,6 ± 35,6
132	897,6 ± 34,3
165	871,3 ± 17,3
198	877,8 ± 33,3



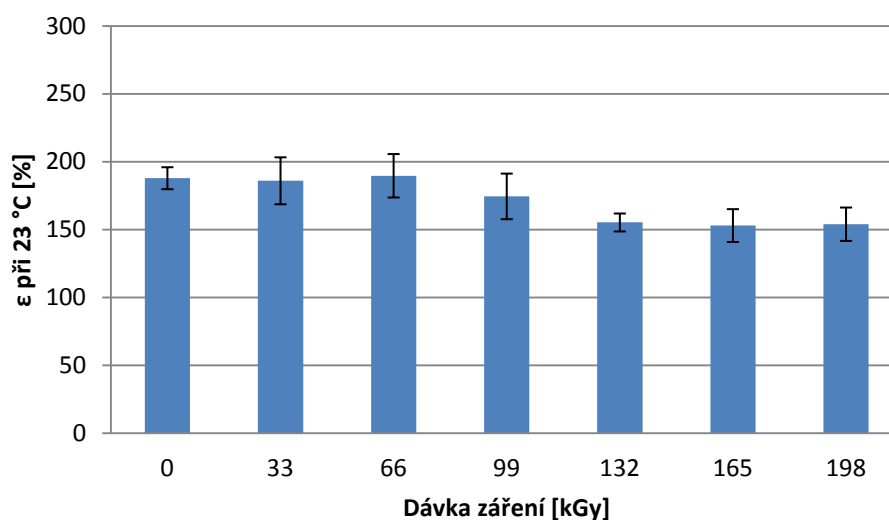
Obr. 46. Závislost modulu pružnosti na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro materiál DOW HDPE 25055E po tepelném zatížení 5 x 160 °C vykazují nejnižší hodnotu modulu pružnosti 819,6 ± 35,6 MPa zkušební tělesa s dávkou záření 99 kGy, naopak nejvyšší hodnotu modulu pružnosti 897,6 ± 34,3 MPa vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 132 kGy. Zkušební tělesa s nižší a nulovou dávkou záření byla po vlivu tepelného zatížení 5 x 160 °C značně tvarově deformovaná a nevhodná pro další pokračování ve zkouškách.

10.2.4 Poměrné prodloužení u tepelně nezatížených zkušebních těles

Tab. 25. Tabulka naměřených poměrných prodloužení u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E

Dávka záření [kGy]	ϵ při 23 °C [%]
0	187,8 ± 8,1
33	185,9 ± 17,3
66	189,6 ± 16,0
99	174,4 ± 16,8
132	155,2 ± 6,6
165	152,9 ± 12,1
198	153,9 ± 12,3



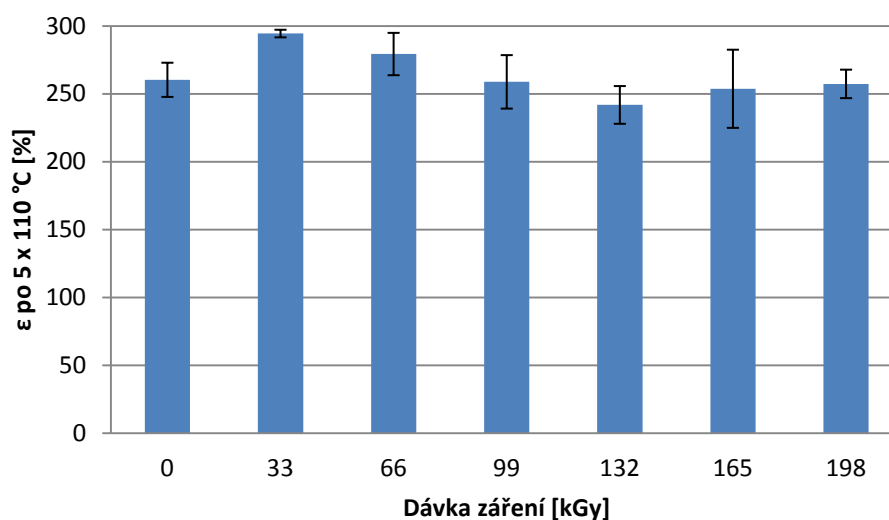
Obr. 47. Závislost poměrného prodloužení na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro tepelně nezatížený materiál DOW HDPE 25055E vykazují nejnížší hodnotu poměrného prodloužení $152,9 \pm 12,1$ % zkušební tělesa s dávkou záření 165 kGy, naopak nejvyšší hodnotu poměrného prodloužení $189,6 \pm 16,0$ % vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 66 kGy.

10.2.5 Poměrné prodloužení po tepelném zatížení 5 x 110 °C

Tab. 26. Tabulka naměřených poměrných prodloužení po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Dávka záření [kGy]	ϵ po 5 x 110 °C [%]
0	260,3 ± 12,6
33	294,4 ± 2,8
66	279,3 ± 15,6
99	258,8 ± 19,7
132	241,8 ± 13,9
165	253,7 ± 28,8
198	257,3 ± 10,5



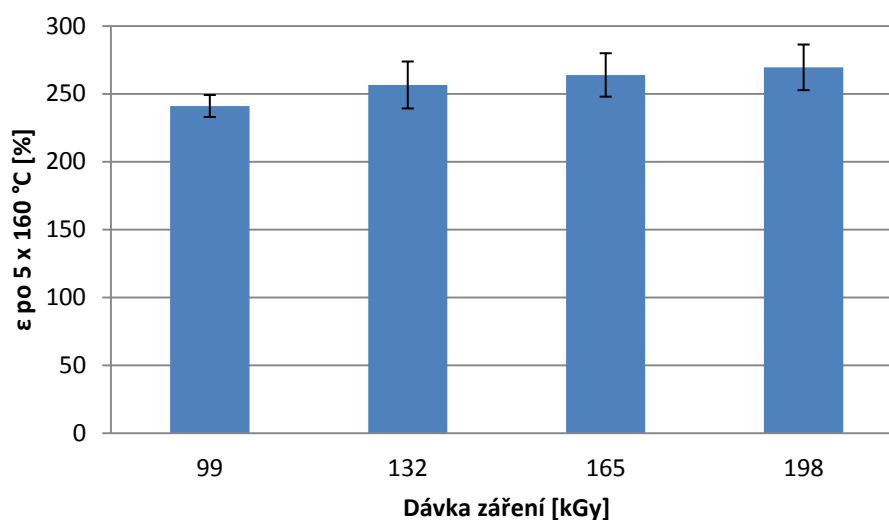
Obr. 48. Závislost poměrného prodloužení na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro materiál DOW HDPE 25055E po tepelném zatížení 5 x 110 °C vykazují nejnižší hodnotu poměrného prodloužení 241,8 ± 13,9 % zkušební tělesa s dávkou záření 132 kGy, naopak nejvyšší hodnotu poměrného prodloužení 294,4 ± 2,8 % vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 33 kGy.

10.2.6 Poměrné prodloužení po tepelném zatížení 5 x 160 °C

Tab. 27. Tabulka naměřených poměrných prodloužení po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Dávka záření [kGy]	ϵ po 5 x 160 °C [%]
0	-
33	-
66	-
99	241,0 ± 20,7
132	256,5 ± 21,2
165	263,9 ± 18,4
198	269,5 ± 26,1



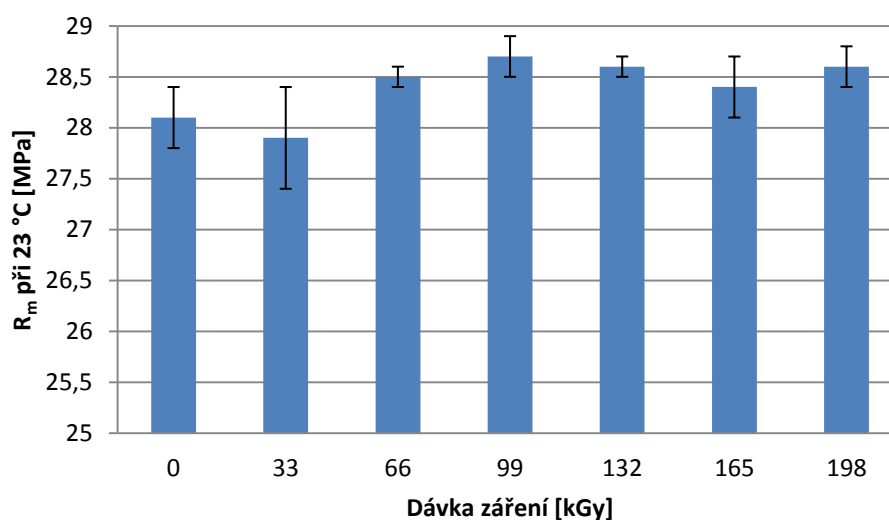
Obr. 49. Závislost poměrného prodloužení na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro materiál DOW HDPE 25055E po tepelném zatížení 5 x 160 °C vykazují nejnižší hodnotu poměrného prodloužení 241,0 ± 20,7 % zkušební tělesa s dávkou záření 99 kGy, naopak nejvyšší hodnotu poměrného prodloužení 269,5 ± 26,1 % vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 198 kGy. Zkušební tělesa s nižší a nulovou dávkou záření byla po vlivu tepelného zatížení 5 x 160 °C značně tvarově deformovaná a nevhodná pro další pokračování ve zkouškách.

10.2.7 Napětí na mezi pevnosti u tepelně nezatížených zkušebních těles

Tab. 28. Tabulka naměřených napětí na mezi pevnosti u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E

Dávka záření [kGy]	R_m při 23 °C [MPa]
0	$28,1 \pm 0,3$
33	$27,9 \pm 0,5$
66	$28,5 \pm 0,1$
99	$28,7 \pm 0,2$
132	$28,6 \pm 0,1$
165	$28,4 \pm 0,3$
198	$28,6 \pm 0,2$



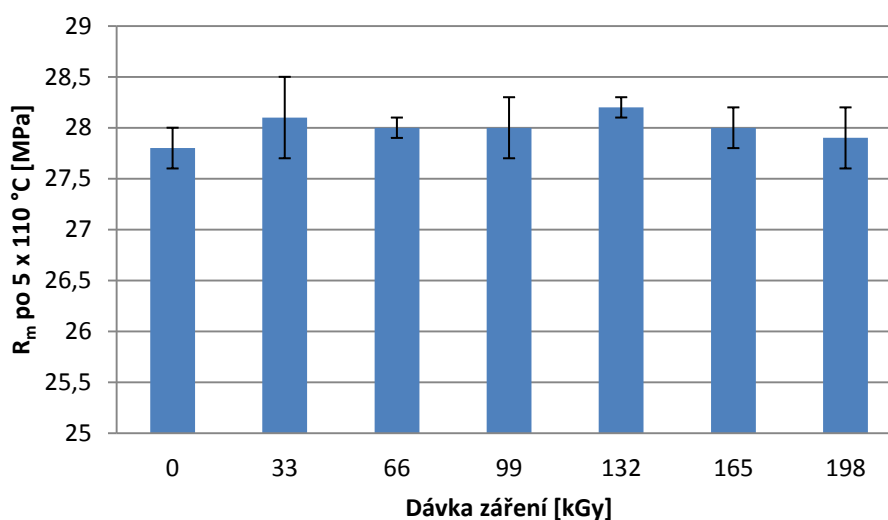
Obr. 50. Závislost napětí na mezi kluzu na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro tepelně nezatížený materiál DOW HDPE 25055E vykazují nejnižší hodnotu napětí na mezi kluzu $27,9 \pm 0,5$ MPa zkušební tělesa s dávkou záření 33 kGy, naopak nejvyšší hodnotu napětí na mezi kluzu $28,7 \pm 0,2$ MPa vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 99 kGy.

10.2.8 Napětí na mezi pevnosti po tepelném zatížení 5 x 110 °C

Tab. 29. Tabulka naměřených napětí na mezi pevnosti po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Dávka záření [kGy]	R _m po 5 x 110 °C [MPa]
0	27,8 ± 0,2
33	28,1 ± 0,4
66	28,0 ± 0,1
99	28,0 ± 0,3
132	28,2 ± 0,1
165	28,0 ± 0,2
198	27,9 ± 0,3



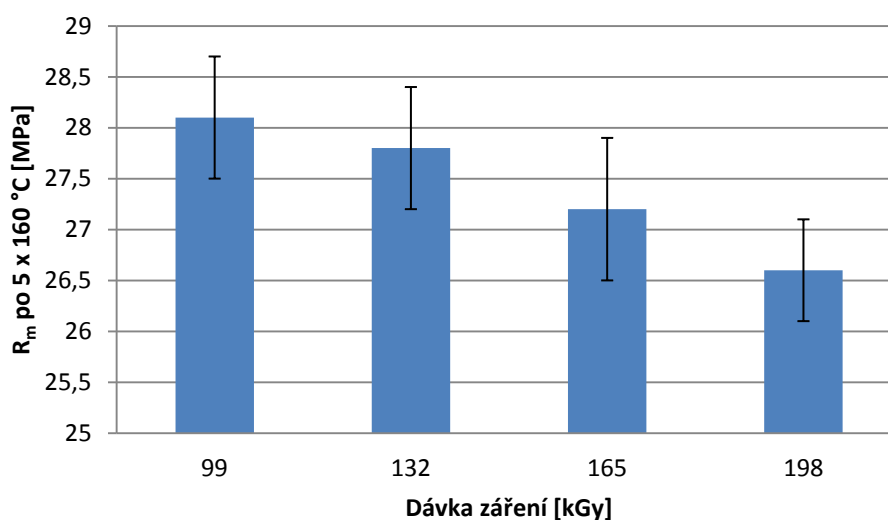
Obr. 51. Závislost napětí na mezi pevnosti na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro materiál DOW HDPE 25055E po tepelném zatížení 5 x 110 °C vykazují nejnižší hodnotu napětí na mezi kluzu $27,8 \pm 0,2$ MPa zkušební tělesa nemodifikovaná, tedy s nulovou dávkou záření, naopak nejvyšší hodnotu napětí na mezi kluzu $28,2 \pm 0,1$ MPa vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 132 kGy.

10.2.9 Napětí na mezi pevnosti po tepelném zatížení 5 x 160 °C

Tab. 30. Tabulka naměřených napětí na mezi pevnosti po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Dávka záření [kGy]	R _m po 5 x 160 °C [MPa]
0	-
33	-
66	-
99	28,1 ± 0,6
132	27,8 ± 0,6
165	27,2 ± 0,7
198	26,6 ± 0,5



Obr. 52. Závislost napětí na mezi kluzu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

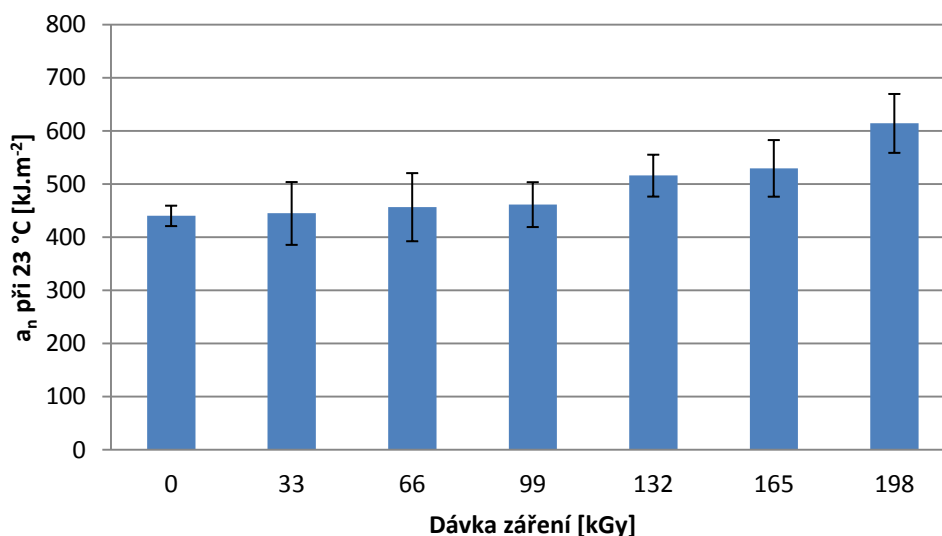
Z výsledků měření statické zkoušky v tahu vyplynulo, že pro materiál DOW HDPE 25055E po tepelném zatížení 5 x 160 °C vykazují nejnižší hodnotu napětí na mezi kluzu $26,6 \pm 0,5$ MPa zkušební tělesa s dávkou záření 198 kGy, naopak nejvyšší hodnotu modulu pružnosti $28,1 \pm 0,6$ MPa vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 99 kGy. Zkušební tělesa s nižší a nulovou dávkou záření byla po vlivu tepelného zatížení 5 x 160 °C značně tvarově deformovaná a nevhodná pro další pokračování ve zkouškách.

10.3 Rázová zkouška tahem materiálu DOW LDPE 780E

10.3.1 Rázová houževnatost v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles

Tab. 31. Tabulka naměřených rázových houževnatostí v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E

Dávka záření [kGy]	a_n při 23 °C [kJ.m ⁻²]
0	440,1 ± 19,2
33	444,7 ± 59,1
66	456,5 ± 64,1
99	461,3 ± 42,2
132	515,8 ± 39,5
165	529,5 ± 53,3
198	614,1 ± 55,4



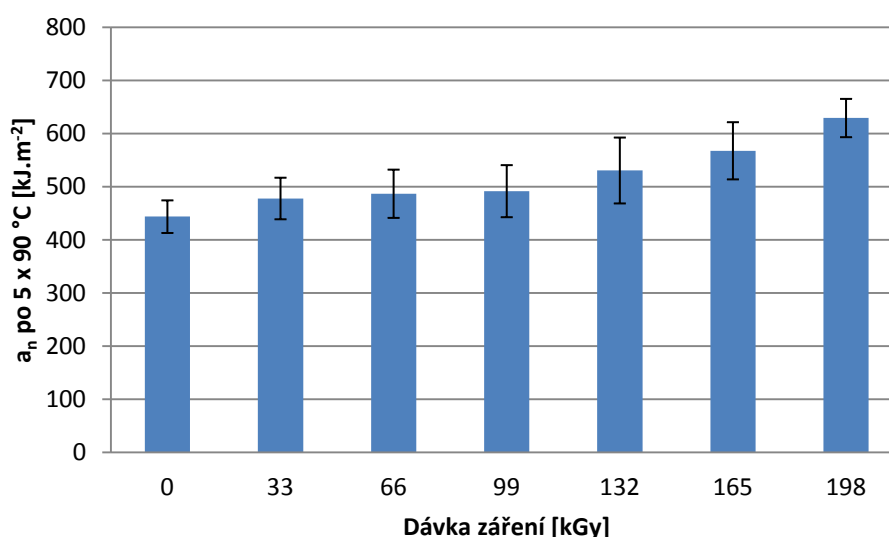
Obr. 53. Závislost rázové houževnatosti v tahu na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E

Z výsledků měření rázové zkoušky tahem vyplynulo, že pro tepelně nezatížený materiál DOW LDPE 780E vykazují nejnižší hodnotu rázové houževnatosti v tahu $440,1 \pm 19,2$ kJ.m⁻² nemodifikovaná zkušební tělesa, tedy s dávkou záření 0 kGy, naopak nejvyšší hodnotu poměrného prodloužení $614,1 \pm 55,4$ kJ.m⁻² vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 198 kGy.

10.3.2 Rázová houževnatost v tahu po tepelném zatížení 5 x 90 °C

Tab. 32. Tabulka naměřených rázových houževnatostí v tahu po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Dávka záření [kGy]	a_n po 5 x 90 °C [kJ.m ⁻²]
0	443,5 ± 30,7
33	477,7 ± 39,1
66	486,66 ± 45,4
99	491,5 ± 49,0
132	530,4 ± 62
165	567,5 ± 53,8
198	629,1 ± 36,0



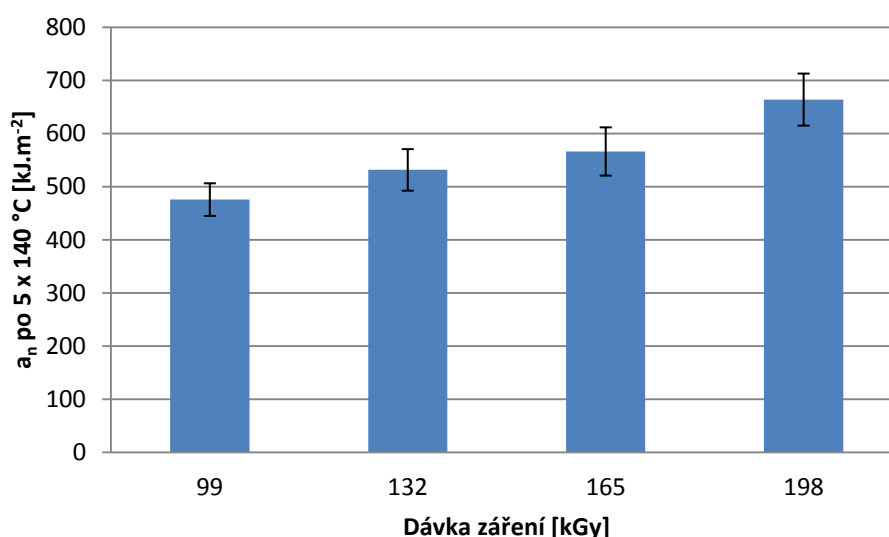
Obr. 54. Závislost rázové houževnatosti v tahu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Z výsledků měření rázové zkoušky tahem vyplynulo, že pro materiál DOW LDPE 780E po tepelném zatížení 5 x 90 °C vykazují nejnižší hodnotu rázové houževnatosti v tahu 443,5 ± 30,7 kJ.m⁻² nemodifikovaná zkušební tělesa, tedy s dávkou záření 0 kGy, naopak nejvyšší hodnotu rázové houževnatosti v tahu 629,1 ± 36,0 kJ.m⁻² vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 198 kGy.

10.3.3 Rázová houževnatost v tahu po tepelném zatížení 5 x 140 °C

Tab. 33. Tabulka naměřených rázových houževnatostí v tahu po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E

Dávka záření [kGy]	a_n po 5 x 140 °C [kJ.m ⁻²]
0	-
33	-
66	-
99	475,6 ± 32,3
132	531,5 ± 56,0
165	566,2 ± 61,7
198	663,8 ± 56,1



Obr. 55. Závislost rázové houževnatosti v tahu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E

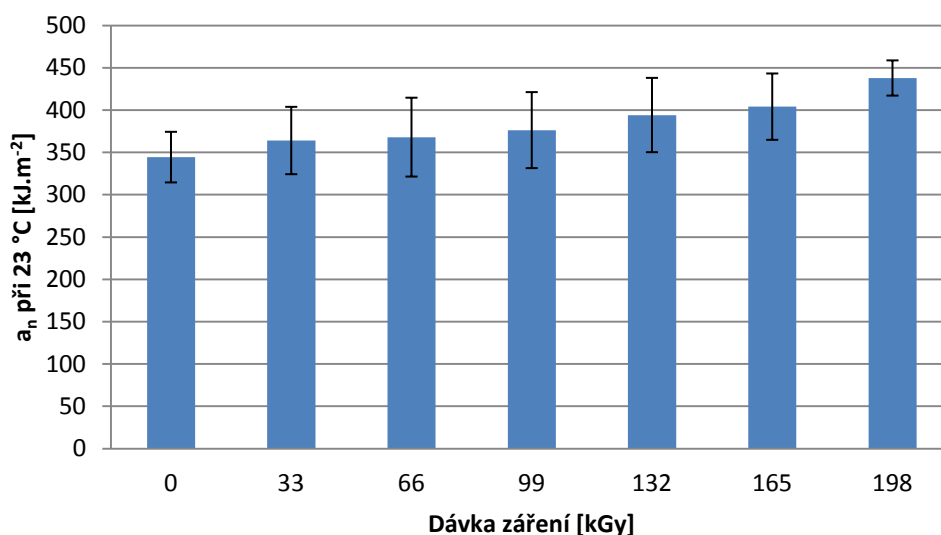
Z výsledků měření rázové zkoušky tahem vyplynulo, že pro materiál DOW LDPE 780E po tepelném zatížení 5 x 140 °C vykazují nejnižší hodnotu rázové houževnatosti v tahu 475,6 ± 32,3 kJ.m⁻² zkušební tělesa s dávkou záření 99 kGy, naopak nejvyšší hodnotu rázové houževnatosti v tahu 663,8 ± 56,1 kJ.m⁻² vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 198 kGy. Zkušební tělesa s nižší a nulovou dávkou záření byla po vlivu tepelného zatížení 5 x 140 °C značně tvarově deformovaná a nevhodná pro další pokračování ve zkouškách.

10.4 Rázová zkouška tahem materiálu HDPE 25055E

10.4.1 Rázová houževnatost v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles

Tab. 34. Tabulka naměřených rázových houževnatostí v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E

Dávka záření [kGy]	a_n při 23 °C [kJ.m ⁻²]
0	344,4 ± 29,9
33	364,0 ± 39,8
66	368,0 ± 46,6
99	376,3 ± 44,9
132	394,1 ± 43,9
165	404,0 ± 39,2
198	437,9 ± 20,8



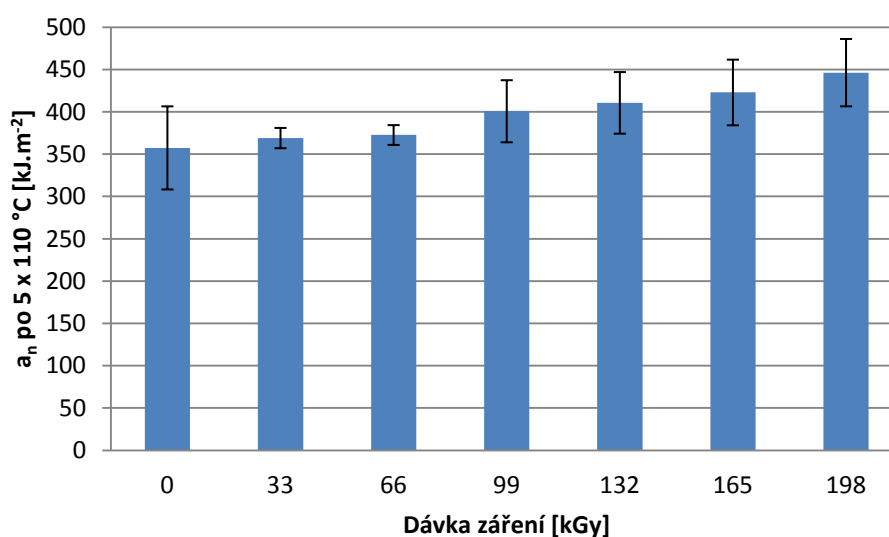
Obr. 56. Závislost rázové houževnatosti v tahu na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E

Z výsledků měření rázové zkoušky tahem vyplynulo, že pro tepelně nezatížený materiál DOW HDPE 25055E vykazují nejnižší hodnotu rázové houževnatosti v tahu $344,4 \pm 29,9$ kJ.m⁻² nemodifikovaná zkušební tělesa, tedy s dávkou záření 0 kGy, naopak nejvyšší hodnotu poměrného prodloužení $437,9 \pm 20,8$ kJ.m⁻² vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 198 kGy.

10.4.2 Rázová houževnatost v tahu po tepelném zatížení 5 x 110 °C

Tab. 35. Tabulka naměřených rázových houževnatostí v tahu po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Dávka záření [kGy]	a_n po 5 x 110 °C [kJ.m ⁻²]
0	357,4 ± 49,1
33	369,0 ± 12,0
66	372,6 ± 11,7
99	400,7 ± 36,7
132	410,6 ± 36,4
165	422,9 ± 38,8
198	446,3 ± 39,8



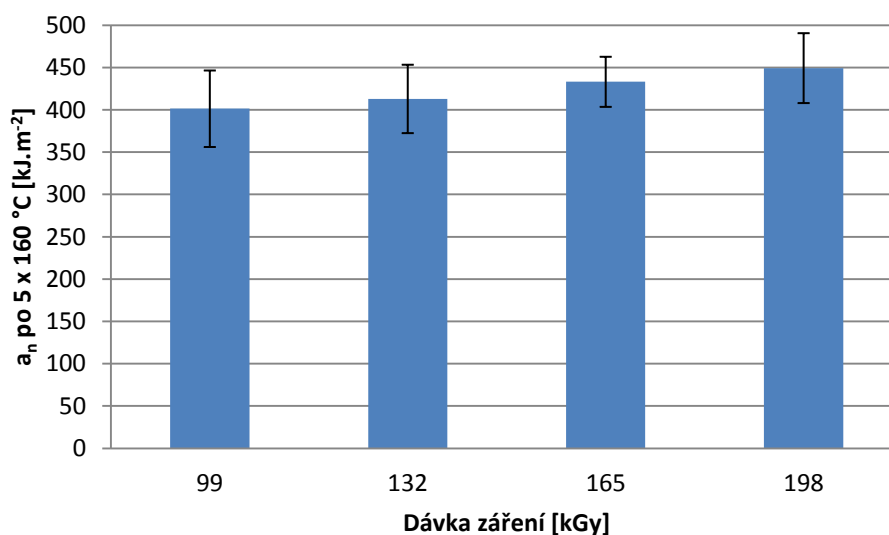
Obr. 57. Závislost rázové houževnatosti v tahu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Z výsledků měření rázové zkoušky tahem vyplynulo, že pro materiál DOW HDPE 25055E po tepelném zatížení 5 x 110 °C vykazují nejnižší hodnotu rázové houževnatosti v tahu 357,4 ± 49,1 kJ.m⁻² nemodifikovaná zkušební tělesa, tedy s dávkou záření 0 kGy, naopak nejvyšší hodnotu rázové houževnatosti v tahu 446,3 ± 39,8 kJ.m⁻² vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 198 kGy.

10.4.3 Rázová houževnatost v tahu po tepelném zatížení 5 x 160 °C

Tab. 36. Tabulka naměřených rázových houževnatostí v tahu po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Dávka záření [kGy]	a_n po 5 x 140 °C [kJ.m ⁻²]
0	-
33	-
66	-
99	401,3 ± 45,2
132	412,9 ± 40,4
165	433,1 ± 29,6
198	449,3 ± 41,3



Obr. 58. Závislost rázové houževnatosti v tahu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E

Z výsledků měření rázové zkoušky tahem vyplynulo, že pro materiál DOW HDPE 25055E po tepelném zatížení 5 x 160 °C vykazují nejnižší hodnotu rázové houževnatosti v tahu $401,3 \pm 45,2$ kJ.m⁻² zkušební tělesa s dávkou záření 99 kGy, naopak nejvyšší hodnotu rázové houževnatosti v tahu $449,3 \pm 41,3$ kJ.m⁻² vykazují zkušební tělesa s dávkou záření 198 kGy. Zkušební tělesa s nižší a nulovou dávkou záření byla po vlivu tepelného zatížení 5 x 160 °C značně tvarově deformovaná a nevhodná pro další pokračování ve zkouškách.

11 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Pro praktickou část diplomové práce byly použity dva vybrané typy polymerních materiálů LDPE (DOW LDPE 780E) a HDPE (DOW HDPE 25055E). Zkušební tělesa byla vyrobena na vstřikovacích strojích ARBURG Allrounder 420 C a ARBURG Allrounder 170 U umístěných v dílnách Ústavu výrobního inženýrství.

Zkušební tělesa byla modifikována radiačním sít'ováním, konkrétně beta zářením o maximální energii 10 MeV dávkami záření 33 kGy, 66 kGy, 99 kGy, 132 kGy, 165 kGy a 198 kGy. Modifikace zkušebních těles pomocí radiačního sít'ování proběhla v německé společnosti BGS Beta – Gamma – Service GmbH. Hodnota nemodifikovaných, tedy radiačně nezesít'ovaných etalonových zkušebních těles je 0 kGy.

Dále byla zkušební tělesa tepelně namáhána v teplotní komoře MORA 4807 po dobu jedné hodiny při teplotě 90 °C a 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E a při 110 °C a 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E. Po ochlazení zkušebních těles na pokojovou teplotu se tento proces opakoval pětkrát. Hodnota tepelně nezát'ížených etalonových zkušebních těles představovala hodnotu 23 °C.

Mechanické zkoušky probíhaly při pokojové teplotě na modifikovaných a nemodifikovaných zkušebních tělesech, která byla rovněž tepelně zat'ížená i tepelně nezát'ížená. Statická zkouška v tahu byla uskutečněna na Trhacím stroji ZWICK 1456 v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství, rázová zkouška tahem na Rázovém kladivu ZWICK HIT50P ve Vědecko – technickém parku CEBIA – Tech při Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně.

Pomocí tahové zkoušky byly stanoveny mechanické vlastnosti u testovaných zkušebních těles, jako jsou modul pružnosti v tahu, poměrné prodloužení, napětí na mezi kluzu a napětí na mezi pevnosti. Pomocí rázové zkoušky tahem byla stanovena mechanická vlastnost u testovaných zkušebních těles, a to rázová houževnatost v tahu.

V následující tabulce (Tab. 37) jsou uvedeny jednotlivé mechanické vlastnosti obou sledovaných materiálů a jejich extrémy, při které dávce záření a při kterém tepelném zat'ížení bylo dosaženo nejvyššího růstu a poklesu konkrétní mechanické vlastnosti.

Pomocí této tabulky byla určena optimální dávka záření a hodnota tepelného zat'ížení, u kterých bylo zjištěno nejvyšší zlepšení mechanických vlastností. Reprezentativním tělesem se tedy jeví dávka záření 99 kGy po tepelném zat'ížení 5 x 140 °C pro materiál DOW

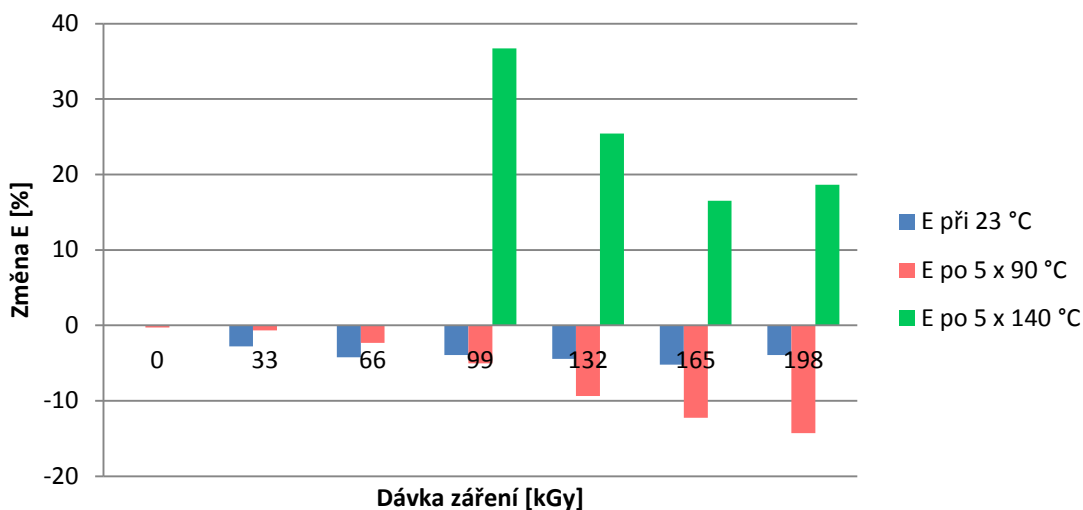
LDPE 780E a dávka záření 99 kGy po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.

V následujících komentářích budou uvedeny pro dané mechanické vlastnosti nejvyšší růsty a nejvyšší poklesy vzhledem k etalonovým zkušební tělesům, tedy radiačně nezesíťovaných s nulovou dávkou záření (0 kGy) a tepelně nezatížených (při pokojové teplotě 23 °C) bez ohledu na reprezentativní těleso. Dále budou pro dané mechanické vlastnosti porovnávány výsledky reprezentativních těles od výsledků etalonových zkušebních těles.

Tab. 37. Tabulka pro určení reprezentativního tělesa

Mechanická vlastnost	Materiál	Extrém	Dávka záření	Tepelné zatížení
Modul pružnosti	DOW LDPE 780E	Nejvyšší růst	99 kGy	5 x 140 °C
		Nejvyšší pokles	198 kGy	5 x 90 °C
	DOW HDPE 25055E	Nejvyšší růst	99 kGy	23 °C
		Nejvyšší pokles	99 kGy	5 x 160 °C
Poměrné prodloužení	DOW LDPE 780E	Nejvyšší růst	165 kGy	5 x 140 °C
		Největší pokles	33 kGy	23 °C
	DOW HDPE 25055E	Nejvyšší růst	33 kGy	5 x 110 °C
		Nejvyšší pokles	165 kGy	23 °C
Napětí na mezi kluzu	DOW LDPE 780E	Nejvyšší růst	99 kGy	5 x 140 °C
		Nejvyšší pokles	198 kGy	5 x 90 °C
Napětí na mezi pevnosti	DOW HDPE 25055E	Nejvyšší růst	99 kGy	23 °C
		Nejvyšší pokles	198 kGy	5 x 160 °C
Rázová houževnatost v tahu	DOW LDPE 780E	Nejvyšší růst	198 kGy	5 x 140 °C
		Nejvyšší pokles	0 kGy	23 °C
	DOW HDPE 25055E	Nejvyšší růst	198 kGy	5 x 160 °C
		Nejvyšší pokles	0 kGy	23 °C

11.1 Porovnání modulu pružnosti v tahu u materiálu DOW LDPE 780E v závislosti na dávce záření a vlivu tepelného zatížení



Obr. 59. Procentuální změna modulu pružnosti na dávce záření vztahovaná vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW LDPE 780E

Nejvyššího nárůstu modulu pružnosti proti etalonovému zkušebnímu tělesu, tedy při nulové dávce záření (0 kGy) a při tepelném nezatížení (při 23 °C) bylo dosaženo u materiálu DOW LDPE 780E s dávkou záření 99 kGy a po tepelném zatížení 5 x 140 °C. Hodnota nárůstu proti etalonu byla o 37 %.

Naopak nejvyšší pokles modulu pružnosti proti etalonu byl zaznamenán u materiálu DOW LDPE 780E s dávkou záření 198 kGy po tepelném zatížení 5 x 90 °C. Hodnota poklesu proti etalonu byla o 14 %.

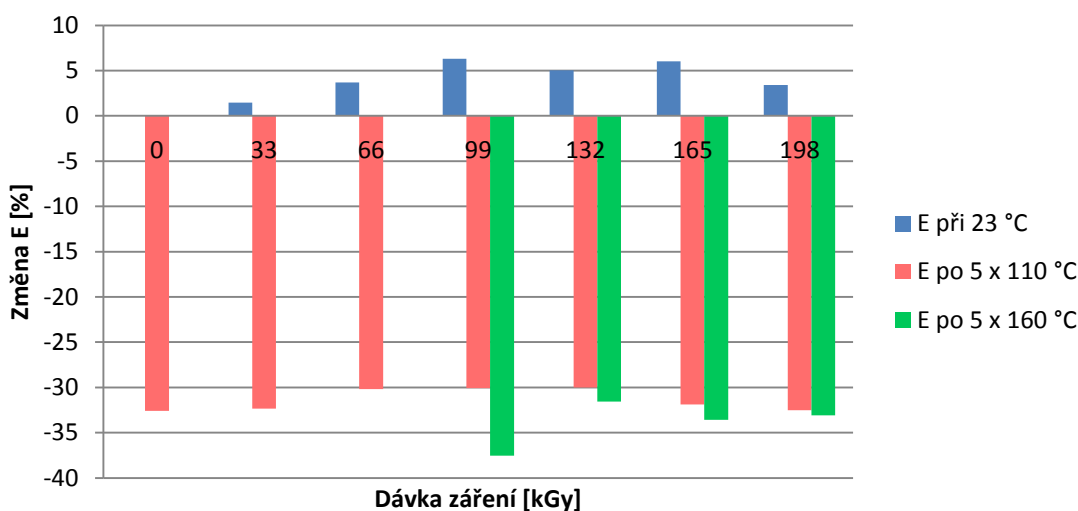
Zkušební tělesa nemodifikovaná, tedy s nulovou dávkou záření (0 kGy) a modifikovaná, tedy radiačně zesíťovaná s dávkou záření 33 kGy a 66 kGy byla po vlivu tepelného zatížení 5 x 140 °C značně tvarově deformovaná a nevhodná pro další pokračování ve zkouškách. Tato skutečnost poskytuje cenné informace, do jaké míry lze strukturu materiálu modifikovat po tepelném zatížení v závislosti na dávce záření tak, aby si zkušební těleso zachovalo svůj původní tvar. Tento případ byl zaznamenán u všech zkušebních těles vystavených tomuto tepelnému zatížení s nulovou dávkou záření a

uvedenými dávkami záření a vyskytuje se u všech následujících sledovaných mechanických vlastností.

Recipročně tak všechna následující grafická zobrazení mechanických vlastností pro materiál DOW LDPE 780E neobsahují výsledky měření při dávkách záření 0 kGy, 33 kGy a 66 kGy po tepelném zatížení 5 x 140 °C.

Hodnota nárůstu modulu pružnosti reprezentativního tělesa s dávkou záření 99 kGy po tepelném zatížení 5 x 140 °C proti etalonu byla o 37 %.

11.2 Porovnání modulu pružnosti v tahu u materiálu DOW HDPE 25055E v závislosti na dávce záření a vlivu tepelného zatížení



Obr. 60. Procentuální změna modulu pružnosti na dávce záření vztahovaná vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW HDPE 25055E

Nejvyššího nárůstu modulu pružnosti proti etalonovému zkušebnímu tělesu, tedy při nulové dávce záření (0 kGy) a při tepelném nezatížení (při 23 °C) bylo dosaženo u materiálu DOW HDPE 25055E s dávkou záření 99 kGy a po tepelném nezatížení, tedy při 23 °C. Hodnota nárůstu proti etalonu byla o 6 %.

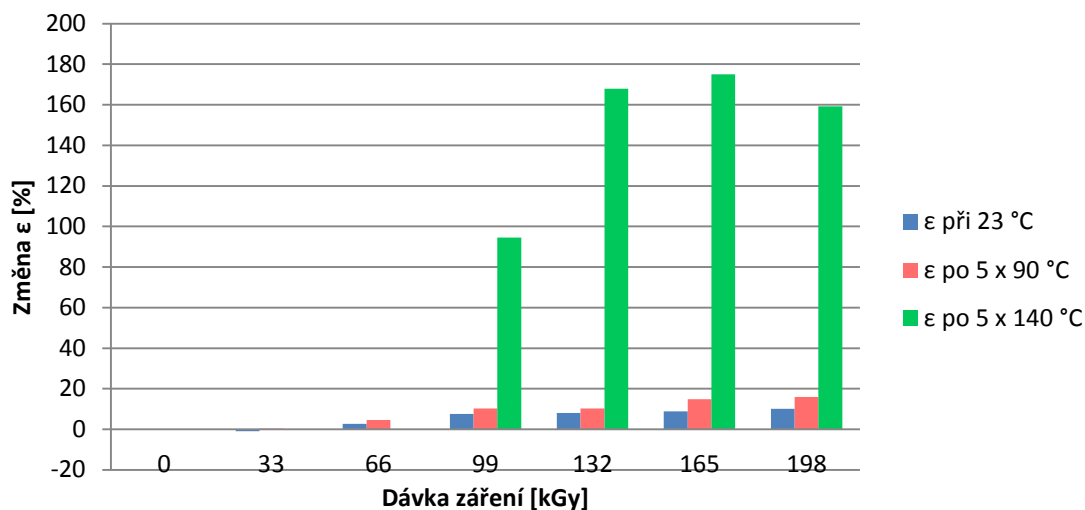
Naopak nejvyšší pokles modulu pružnosti byl zaznamenán u materiálu DOW HDPE 25055E s dávkou záření 99 kGy po tepelném zatížení 5 x 160 °C. Hodnota poklesu proti etalonu byla o 38 %.

Zkušební tělesa nemodifikovaná, tedy s nulovou dávkou záření (0 kGy) a modifikovaná, tedy radiačně zesíťovaná s dávkou záření 33 kGy a 66 kGy byla po vlivu tepelného zatížení 5 x 160 °C značně tvarově deformovaná a nevhodná pro další pokračování ve zkouškách. Tato skutečnost poskytuje cenné informace, do jaké míry lze strukturu materiálu modifikovat po tepelném zatížení v závislosti na dávce záření tak, aby si zkušební těleso zachovalo svůj původní tvar. Tento případ byl zaznamenán u všech zkušebních těles vystavených tomuto tepelnému zatížení s nulovou dávkou záření a uvedenými dávkami záření a vyskytuje se u všech následujících sledovaných mechanických vlastností.

Recipročně tak všechna následující grafická zobrazení mechanických vlastností pro materiál DOW HDPE 25055E neobsahuje výsledky měření při dávkách záření 0 kGy, 33 kGy a 66 kGy po tepelném zatížení 5 x 160 °C.

Nárůst modulu pružnosti reprezentativního tělesa s dávkou záření 99 kGy po tepelném zatížení 5 x 160 °C proti etalonu nebyl zaznamenán, naopak byla zaznamenána hodnota poklesu modulu pružnosti o 38 %.

11.3 Porovnání poměrného prodloužení u materiálu DOW LDPE 780E v závislosti na dávce záření a vlivu tepelného zatížení



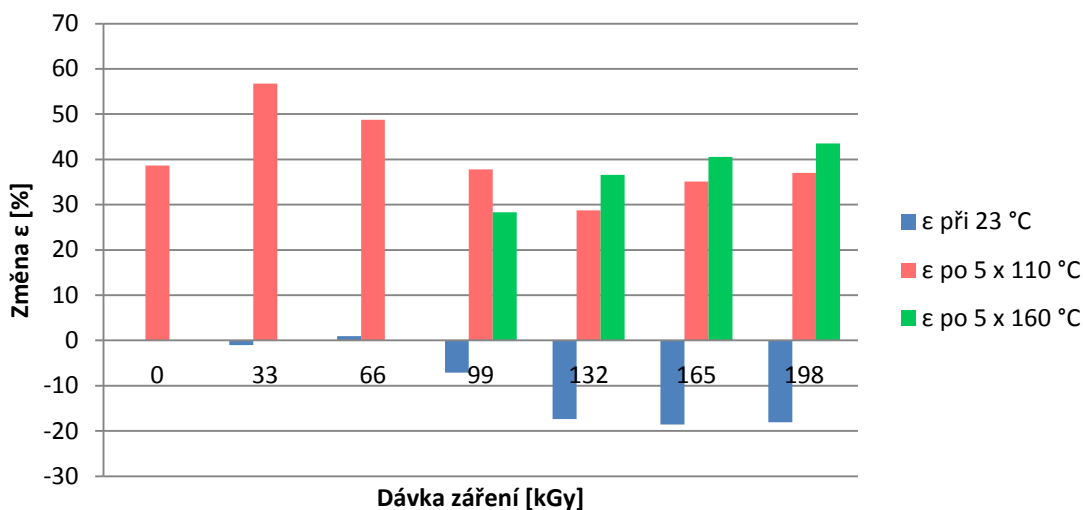
Obr. 61. Procentuální změna poměrného prodloužení na dávce záření vztážená vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW LDPE 780E

Nejvyššího nárůstu poměrného prodloužení proti etalonu bylo dosaženo u materiálu DOW LDPE 780E s dávkou záření 165 kGy a po tepelném zatížení 5 x 140 °C. Hodnota nárůstu proti etalonu byla o 175 %.

Naopak nejvyšší pokles poměrného prodloužení proti etalonu byl zaznamenán u materiálu DOW LDPE 780E s dávkou záření 33 kGy po tepelném nezatížení, tedy při 23 °C. Hodnota poklesu proti etalonu byla o 1 %.

Hodnota nárůstu poměrného prodloužení reprezentativního tělesa s dávkou záření 99 kGy po tepelném zatížení 5 x 140 °C proti etalonu byla o 95 %.

11.4 Porovnání poměrného prodloužení u materiálu DOW HDPE 25055E v závislosti na dávce záření a vlivu tepelného zatížení



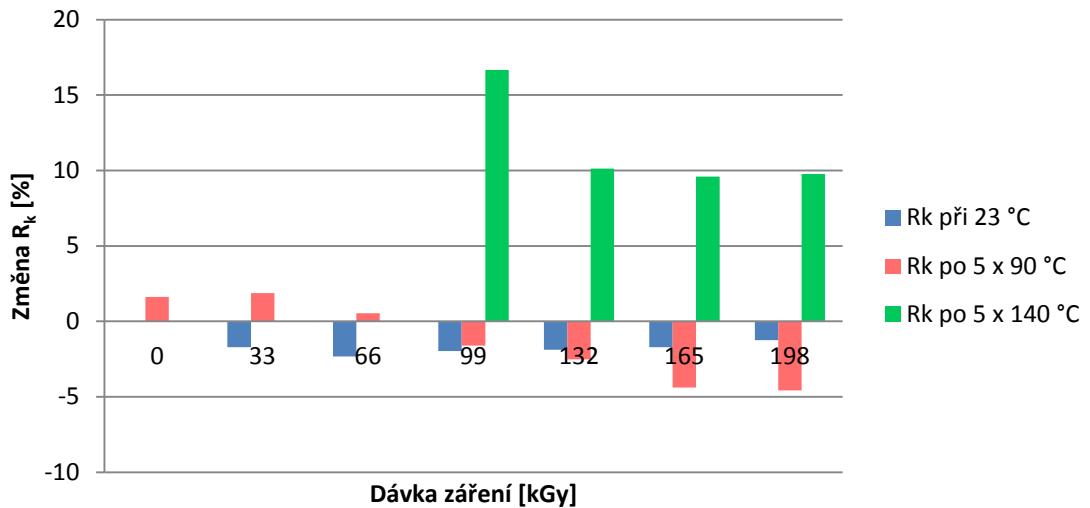
Obr. 62. Procentuální změna poměrného prodloužení na dávce záření vztahovaná vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW HDPE 25055E

Nejvyššího nárůstu poměrného prodloužení proti etalonu bylo dosaženo u materiálu DOW HDPE 25055E s dávkou záření 33 kGy a po tepelném zatížení 5 x 110 °C. Hodnota nárůstu proti etalonu byla o 57 %.

Naopak nejvyšší pokles poměrného prodloužení proti etalonu byl zaznamenán u materiálu DOW HDPE 25055E s dávkou záření 165 kGy po tepelném nezatížení, tedy při 23 °C. Hodnota poklesu proti etalonu byla o 19 %.

Hodnota nárůstu poměrného prodloužení reprezentativního tělesa s dávkou záření 99 kGy po tepelném zatížení 5 x 160 °C proti etalonu byla o 28 %.

11.5 Porovnání napětí na mezi kluzu a mezi pevnosti u materiálu DOW LDPE 780E v závislosti na dávce záření a vlivu tepelného zatížení



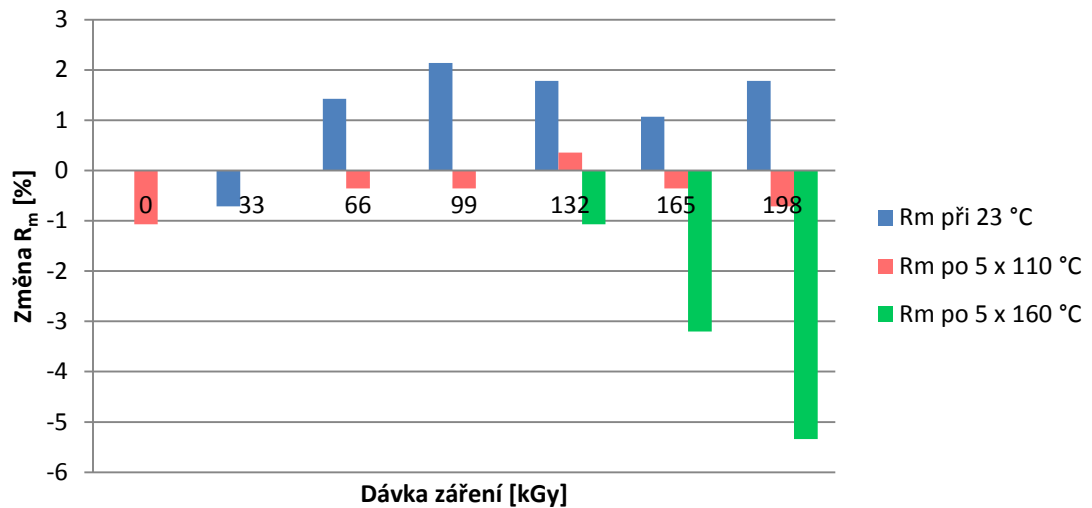
Obr. 63. Procentuální změna napětí na mezi kluzu na dávce záření vztahovaná vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW LDPE 780E

Nejvyššího nárůstu napětí na mezi kluzu proti etalonu bylo dosaženo u materiálu DOW LDPE 780E s dávkou záření 99 kGy a po tepelném zatížení 5 x 140 °C. Hodnota nárůstu proti etalonu byla o 17 %.

Naopak nejvyšší pokles napětí na mezi kluzu proti etalonu byl zaznamenán u materiálu DOW LDPE 780E s dávkou záření 198 kGy po tepelném zatížení 5 x 90 °C. Hodnota poklesu proti etalonu byla o 5 %.

Hodnota nárůstu napětí na mezi kluzu reprezentativního tělesa s dávkou záření 99 kGy po tepelném zatížení 5 x 140 °C proti etalonu byla o 17 %.

11.6 Porovnání napětí na mezi pevnosti u materiálu DOW HDPE 25055E v závislosti na dávce záření a vlivu tepelného zatížení



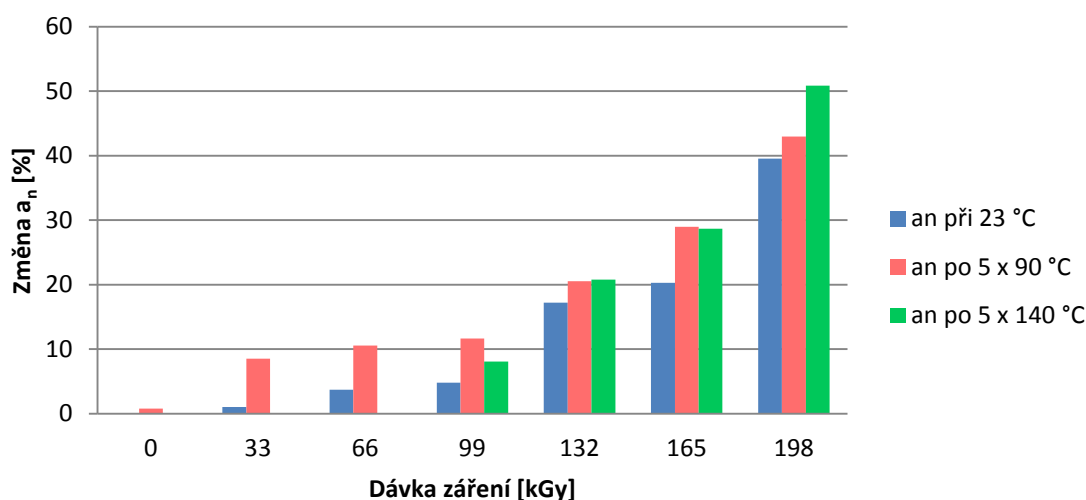
Obr. 64. Procentuální změna napětí na mezi pevnosti na dávce záření vztažená vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW HDPE 25055E

Nejvyššího nárůstu napětí na mezi pevnosti proti etalonu bylo dosaženo u materiálu DOW HDPE 25055E s dávkou záření 99 kGy a po tepelném nezatížení, tedy při 23 °C. Hodnota nárůstu proti etalonu byla o 2 %.

Naopak nejvyšší pokles napětí na mezi pevnosti proti etalonu byl zaznamenán u materiálu DOW HDPE 25055E s dávkou záření 198 kGy po tepelném zatížení 5 x 160 °C. Hodnota poklesu proti etalonu byla o 5 %.

Hodnota nárůstu napětí na mezi pevnosti v tahu reprezentativního tělesa s dávkou záření 99 kGy po tepelném zatížení 5 x 160 °C proti etalonu je nulová, protože hodnoty napětí na mezi pevnosti reprezentativního tělesa a etalonu se shodují.

11.7 Porovnání rázových houževnatostí v tahu u materiálu DOW LDPE 780E v závislosti na dávce záření a vlivu tepelného zatížení



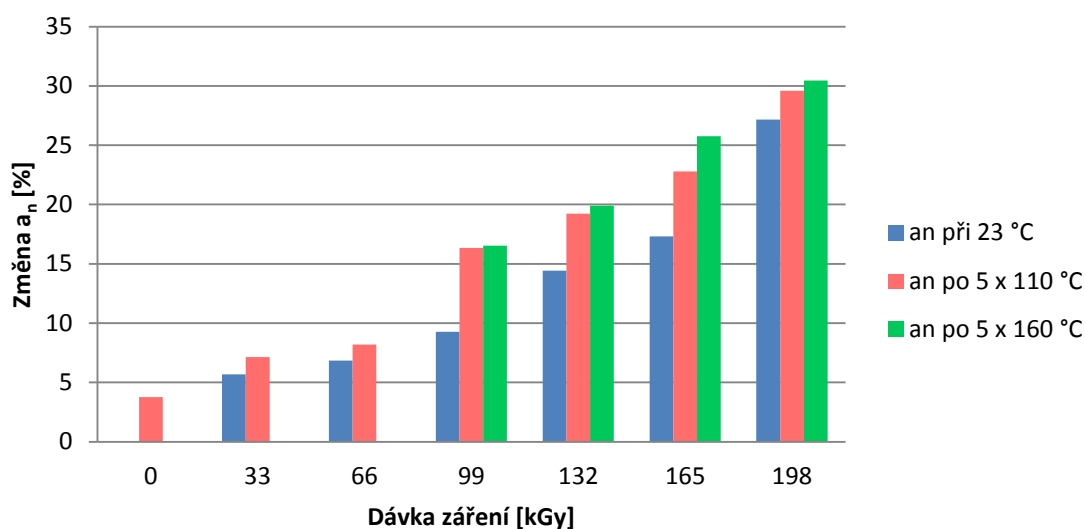
Obr. 65. Procentuální změna rázové houževnatosti v tahu na dávce záření vztahovaná vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW LDPE 780E

Nejvyššího nárůstu rázové houževnatosti v tahu proti etalonu bylo dosaženo u materiálu DOW LDPE 780E s dávkou záření 198 kGy a po tepelném zatížení 5 x 140 °C. Hodnota nárůstu proti etalonu byla o 51 %.

Naopak nebyl zaznamenán žádný pokles u rázové houževnatosti v tahu proti etalonu u materiálu DOW LDPE 780E, protože nejnižší hodnotu rázové houževnatosti v tahu představuje samotný etalon.

Hodnota nárůstu rázové houževnatosti v tahu reprezentativního tělesa s dávkou záření 99 kGy po tepelném zatížení 5 x 140 °C proti etalonu byla o 8 %.

11.8 Porovnání rázových houževnatostí v tahu u materiálu DOW HDPE 25055E v závislosti na dávce záření a vlivu tepelného zatížení



Obr. 66. Procentuální změna rázové houževnatosti v tahu na dávce záření vztažená vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW HDPE 25055E

Nejvyššího nárůstu rázové houževnatosti v tahu proti etalonu bylo dosaženo u materiálu DOW HDPE 25055E s dávkou záření 198 kGy a po tepelném zatížení 5 x 140 °C. Hodnota nárůstu proti etalonu byla o 30 %.

Naopak nebyl zaznamenán žádný pokles u rázové houževnatosti v tahu proti etalonu u materiálu DOW LDPE 780E, protože nejnižší hodnotu rázové houževnatosti v tahu představuje samotný etalon.

Hodnota nárůstu rázové houževnatosti v tahu reprezentativního tělesa s dávkou záření 99 kGy po tepelném zatížení 5 x 160 °C proti etalonu byla o 17 %.

ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se zabývá studiem mechanických vlastností modifikovaných polyolefinů radiačním sítováním po několikanásobném tepelném zatížení.

V teoretické části bylo pojednáváno o základních definicích polymerních materiálů a jejich rozdělení pro uvedení do dané problematiky i pro čtenáře nezabývajícími se těmito materiály. Byly charakterizovány materiály související s obsahem této práce. Byl popsán proces a základní druhy sdílení tepla, možnosti řešení úloh v této problematice, byly definovány pojmy, jako je přestup a prostup tepla. Dále bylo popisováno působení teploty na polymery a tepelná odolnost polymerů. V konečné fázi teoretické části diplomové práce byly jasně definovány možnosti modifikace polymerních materiálů radiačním sítováním, principy jednotlivých druhů záření, přidaná hodnota této technologie, oblast použití a měrné jednotky techniky radiačního sítování pro lepší orientaci v oblasti dávek záření zmiňovaných v praktické části diplomové práce.

Pro praktickou část diplomové práce byly použity dva vybrané typy polymerních materiálů LDPE (DOW LDPE 780E) a HDPE (DOW HDPE 25055E). Zkušební tělesa byla modifikována radiačním sítováním variabilním počtem konstantních dávek záření, zkušební tělesa byla také vystavena vlivu několikanásobného tepelného zatížení při různých teplotách v časových intervalech po jedné hodině.

Zkušební tělesa byla podrobena statické zkoušce v tahu, kde byly sledovány mechanické vlastnosti, jako jsou modul pružnosti, poměrné prodloužení, napětí na mezi kluzu a napětí na mezi pevnosti. Zkušební tělesa byla také podrobena rázové zkoušce tahem, kde byla sledována mechanická vlastnost rázová houževnatost v tahu.

Dle numerických a grafických výsledků měření a při porovnání mechanických vlastností u jednotlivých materiálů vyplynulo, že nejlepšími výsledky bylo dosaženo u zkušebních těles modifikovaných dávkou záření 99 kGy vystavených tepelnému zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E a u zkušebních těles modifikovaných dávkou záření 99 kGy vystavených tepelnému zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E. Tyto případy, jež vykazovaly neoptimálnější výsledky sledovaných mechanických vlastností, byly označeny jako reprezentativní tělesa a následně porovnány s etalonovými zkušebními tělesy, tedy bez modifikace radiačním sítováním při nulové dávce záření a bez několikanásobného tepelného zatížení při 23 °C.

Naměřené výsledky dokázaly, že lepších mechanických vlastností bylo dosaženo u materiálu DOW HDPE 25055E než u materiálu DOW LDPE 780E.

Přítomnost radiačního síťování měla na zkušební tělesa značný pozitivní vliv, protože u materiálu DOW LDPE 780E po tepelném zatížení 5 x 140 ° C a u materiálu DOW HDPE 25055E po tepelném zatížení 5 x 160 ° C zkušební tělesa nemoifikovaná či modifikovaná s nízkým počtem dávek záření 33 kGy a 66 kGy značně změnila svůj tvar, stala se neshodnými kusy a nebyla schopna pokračovat v experimentu.

Rozdílné mechanické vlastnosti sledovaných polymerních materiálů mohly být způsobeny odlišnými vlastnostmi při modifikaci radiačním síťováním a jejich změnou struktury vlivem několikanásobného tepelného zatížení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, V. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. 280 s. ISBN 80-7080-617-6
- [2] MLEZIVA, Josef. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 1. vyd. Praha: Sobotáles, 1993, 525 s. ISBN 8090157041.
- [3] BGS. *Ideen plus energie: Radiační síťování plastů*. [s. l.]: BGS, © 2010
- [4] SÝKORA, Karel a Josef KALČÍK. *Technická termomechanika*. 1. vyd. Praha: Academia, 1973, 536 s.
- [5] KUTATELADZE, Samson Semenovič a V. BORIŠANSKIJ. *Průručka sdílení tepla*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962, 527 s.
- [6] *TU Liberec, Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit. 2013-11-08]. Dostupný z WWW:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [7] *Materiály z velkých molekul* [online]. [cit. 2013-11-10]. Dostupný z WWW:
<http://www.vesmir.cz/clanek/quo-vaditis-polymery>
- [8] *Zwick, Zkušební stroje a systémy* [online]. [cit. 2014-04-07]. Dostupný z WWW:
<http://www.zwick.cz/cs/produkty.html>
- [9] *Zwick, HIT50P* [online]. [cit. 2014-04-05]. Dostupný z WWW:
http://www.zwick.com/no_cache/en/applications.html?tx_z7treedependingdownloads_pi1%5Bfile%5D=109
- [10] *Zwick, Rázové zkoušky* [online]. [cit. 2014-04-06]. Dostupný z WWW:
<http://www.zwick.cz/cs/oblasti-pouziti/plasty/termoplasticke-a-tvrditelne-hmoty/zkousky-razem.html>
- [11] *Physics, Tahová zkouška* [online]. [cit. 2014-04-05]. Dostupný z WWW:
http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_6
- [12] *Strojírenská technologie, Vlastnosti materiálů* [online]. [cit. 2014-04-05]. Dostupný z WWW:
http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php

- [13] *Západočeská Univerzita, Statické zkoušky* [online]. [cit. 2014-04-05]. Dostupný z WWW: http://www.ateam.zcu.cz/download/Staticke_zkouseni_plasty.pdf
- [14] *Technická Univerzita v Liberci, Základní mechanické vlastnosti polymerů a jejich hodnocení* [online]. [cit. 2014-04-06]. Dostupný z WWW: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NEkM/NeM%20Kro/Mechanice%20vlastnosti%20polymeru.ppt
- [15] *DOW, LDPE* [online]. [cit. 2014-04-05]. Dostupný z WWW: <http://www.dow.com/polyethylene/ap/en/prod/ldpe.htm>
- [16] *DOW, HDPE* [online]. [cit. 2014-04-05]. Dostupný z WWW: <http://www.dow.com/polyethylene/eu/en/prod/hdpe.htm>
- [17] *UTB ve Zlíně, Přístrojové vybavení ústavu výrobního inženýrství* [online]. [cit. 2014-04-07]. Dostupný z WWW: <http://www.utb.cz/file/40095/>
- [18] *UTB ve Zlíně, Statické zkoušky* [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupný z WWW: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [19] *Arburg, Technické údaje Arburg Allrounder 420 C* [online]. [cit. 2014-04-15]. Dostupný z WWW: <http://www.bgk.uni-obuda.hu/ggyt/targyak/seged/bagim1ennb/522541.pdf>
- [20] *BGS, The Saal location at a glance* [online]. [cit. 2014-04-05]. Dostupný z WWW: http://www.bgs.eu/standort_saal.html?&L=1
- [21] *Idnes.cz, Mora* [online]. [cit. 2014-04-05]. Dostupný z WWW: <http://produkty.topkontakt.idnes.cz/p/trouba-mora-4807-nerez/472618/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla.
A	[m ²]	Teplosměnná plocha.
<i>ABS</i>	[-]	Akrylonitrilbutadienstyren.
a_n	[kJ.m ⁻²]	Rázová houževnatost v tahu.
<i>ASTM</i>	[-]	Americká norma.
b_1, b_2	[mm]	Šířka zkušebního tělesa.
<i>BGS</i>	[-]	Německá společnost poskytující radiační síťování.
<i>CEBIA - Tech</i>	[-]	Centrum bezpečnostních, informačních a pokročilých technologií.
<i>DIN</i>	[-]	Německá národní norma.
<i>DOW</i>	[-]	Americký výrobce polymerních materiálů.
ε	[-]	Poměrné prodloužení.
ε	[%]	Poměrné prodloužení vyjádřené v procentech.
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu.
E	[-]	Mez pružnosti.
<i>EU</i>	[-]	Evropská unie.
<i>Force 0</i>	[-]	Vynulování aplikovaného zatížení.
<i>FPM</i>	[-]	Fluoropolymer.
h	[mm]	Výška průřezu zkušebního tělesa.
<i>HDPE</i>	[-]	Vysokohustotní polyetylen.
<i>ISO</i>	[-]	Mezinárodní norma.
k	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	Součinitel prostupu tepla.
K	[-]	Mez kluzu.
l_1, l_2, l_3	[mm]	Délka zkušebního tělesa.
<i>LDPE</i>	[-]	Nízkohustotní polyetylen.

<i>LE</i>	[-]	Tlačítko k vrácení upínacích čelistí do původní polohy.
<i>LLDPE</i>	[-]	Lineární nízkohustotní polyetylen.
<i>NR</i>	[-]	Přírodní kaučuk.
<i>P</i>	[-]	Mez pevnosti.
<i>PA</i>	[-]	Polyamid.
<i>PA6</i>	[-]	Polyamid 6.
<i>PA66</i>	[-]	Polyamid 66.
<i>PC</i>	[-]	Polykarbonát.
<i>PC</i>	[-]	Osobní počítač.
<i>PE</i>	[-]	Polyetylen.
<i>PMMA</i>	[-]	Polymethylmetakrylát.
<i>POM</i>	[-]	Polyoxymetylen.
<i>PP</i>	[-]	Polypropylen.
<i>PS</i>	[-]	Polystyren.
<i>PTFE</i>	[-]	Polytetrafluoretylen.
<i>PVC</i>	[-]	Polyvinylchlorid.
<i>Q</i>	[J]	Množství tepla.
<i>R</i>	[MPa]	Tahové napětí.
<i>R_e</i>	[MPa]	Napětí na mezi pružnosti.
<i>R_k</i>	[MPa]	Napětí na mezi kluzu.
<i>R_m</i>	[MPa]	Napětí na mezi pevnosti.
<i>RS232</i>	[-]	Sériový port.
<i>S</i>	[-]	Přetržení zkušebního tělesa.
<i>SBR</i>	[-]	Styren – butadienový kaučuk.
<i>Start</i>	[-]	Spuštění tahové zkoušky.
<i>τ</i>	[s]	Čas.

t, t_1, t_2	[°C]	Teplota.
T_f	[°C]	Teplota tečení.
T_g	[°C]	Teplota skelného přechodu.
T_m	[°C]	Teplota tání.
TPE	[-]	Termoplastický elastomer.
$t_{stř}$	[°C]	Střední teplota.
U	[-]	Mez úměrnosti.
USB	[-]	Univerzální sériová sběrnice.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Pyramida polymerních materiálů uspořádaných podle jejich postavení na trhu [7]	15
Obr. 2. Růst výroby polymerních materiálů ve světě a v EU v průběhu 20. století	16
Obr. 3. Diagram tepelné stability	25
Obr. 4. Princip beta záření. 1 - hloubka vniknutí elektronů, 2 – primární elektrony, 3 – sekundární elektrony, 4 – ozářený materiál.....	29
Obr. 5. Princip gama záření. 5 – zapouzdřený zdroj záření Co^{60} , 6 – γ – kvanta.	30
Obr. 6. Druhy uspořádání v různých ozařovaných materiálech	31
Obr. 7. Trhací stroj ZWICK 1456 [17].....	37
Obr. 8. Klínové upínací čelisti	38
Obr. 9. Upnutí zkušební tělesa v klínových upínacích čelistech	39
Obr. 10. Náhled do prostředí softwaru testXpert.....	40
Obr. 11. Rázové kladivo ZWICK HIT50P	41
Obr. 12. Umístění zkušební tělesa v upínacím zařízení před dopadem kyvadla	43
Obr. 13. Náhled do prostředí softwaru testXpert II pro rázovou zkoušku tahem.....	44
Obr. 14. Tahové křivky kovových materiálů [12]	45
Obr. 15. Tahové křivky při různých teplotách [13]	46
Obr. 16. Tahové křivky polymerních materiálů: a – křehké reaktoplasty a amorfnní termoplasty, b – termoplasty s omezenou možností orientace makromolekul a střední houževnatostí, c – termoplasty s dobrou možností orientace makromolekul a větší houževnatostí (zejména semikrystalické), d – pryže [14]	46
Obr. 17. Tahová křivka s vyznačenými mezemi a stanovení meze kluzu [12]	47
Obr. 18. Schematické znázornění deformace polymerů při tahové zkoušce	48
Obr. 19. Rázové kladivo, upínání zkušební tělesa a směr působení rázu při rázové zkoušce tahem	50
Obr. 20. Různé tvary polymerních zkušebních těles pro statickou zkoušku v tahu a rázovou zkoušku tahem [18]	53
Obr. 21. Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420 C.....	54
Obr. 22. Vpravo zkušební těleso pro statickou zkoušku v tahu.....	55
Obr. 23. Vstřikovací forma ve vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 420 C	56
Obr. 24. Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 170 U – v popředí	58
Obr. 25. Vpravo zkušební těleso pro rázovou zkoušku tahem	59

Obr. 26. Vstřikovací forma ve vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 170 U	59
Obr. 27. Společnost BGS Beta – Gamma – Service GmbH	60
Obr. 28. Teplotní komora Mora 4807	61
Obr. 29. Zkušební tělesa materiálu DOW LDPE 780E před vlivem tepelného zatížení v závislosti na dávce záření v jednotkách kGy.....	62
Obr. 30. Zkušební tělesa materiálu DOW LDPE 780E těsně po vlivu tepelného zatížení v závislosti na dávce záření v jednotkách kGy	63
Obr. 31. Zkušební tělesa materiálu DOW LDPE 780E po ochlazení na pokojovou teplotu po vlivu tepelného zatížení v závislosti na dávce záření v jednotkách kGy	63
Obr. 32. Zkušební tělesa materiálu DOW HDPE 25055E před vlivem tepelného zatížení v závislosti na dávce záření v jednotkách kGy	64
Obr. 33. Zkušební tělesa materiálu DOW HDPE 25055E těsně po vlivu tepelného zatížení v závislosti na dávce záření v jednotkách kGy	64
Obr. 34. Zkušební tělesa materiálu DOW HDPE 25055E po ochlazení na pokojovou teplotu po vlivu tepelného zatížení v závislosti na dávce záření v jednotkách kGy	65
Obr. 35. Závislost modulu pružnosti na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E	67
Obr. 36. Závislost modulu pružnosti na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E.....	68
Obr. 37. Závislost modulu pružnosti na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E.....	69
Obr. 38. Závislost poměrného prodloužení na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E	70
Obr. 39. Závislost poměrného prodloužení na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E	71
Obr. 40. Závislost poměrného prodloužení na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E	72
Obr. 41. Závislost napětí na mezi kluzu na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E	73
Obr. 42. Závislost napětí na mezi kluzu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E	74

Obr. 43. Závislost napětí na mezi kluzu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E	75
Obr. 44. Závislost modulu pružnosti na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E.....	76
Obr. 45. Závislost modulu pružnosti na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E	77
Obr. 46. Závislost modulu pružnosti na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E	78
Obr. 47. Závislost poměrného prodloužení na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E.....	79
Obr. 48. Závislost poměrného prodloužení na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	80
Obr. 49. Závislost poměrného prodloužení na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	81
Obr. 50. Závislost napětí na mezi kluzu na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E.....	82
Obr. 51. Závislost napětí na mezi pevnosti na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	83
Obr. 52. Závislost napětí na mezi kluzu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	84
Obr. 53. Závislost rázové houževnatosti v tahu na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E	85
Obr. 54. Závislost rázové houževnatosti v tahu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E	86
Obr. 55. Závislost rázové houževnatosti v tahu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E	87
Obr. 56. Závislost rázové houževnatosti v tahu na dávce záření u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E.....	88
Obr. 57. Závislost rázové houževnatosti v tahu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	89
Obr. 58. Závislost rázové houževnatosti v tahu na dávce záření po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	90

Obr. 59. Procentuální změna modulu pružnosti na dávce záření vztažená vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW LDPE 780E.....	93
Obr. 60. Procentuální změna modulu pružnosti na dávce záření vztažená vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW HDPE 25055E	94
Obr. 61. Procentuální změna poměrného prodloužení na dávce záření vztažená vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW LDPE 780E.....	96
Obr. 62. Procentuální změna poměrného prodloužení na dávce záření vztažená vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW HDPE 25055E	97
Obr. 63. Procentuální změna napětí na mezi kluzu na dávce záření vztažená vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW LDPE 780E.....	98
Obr. 64. Procentuální změna napětí na mezi pevnosti na dávce záření vztažená vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW HDPE 25055E	99
Obr. 65. Procentuální změna rázové houževnatosti v tahu na dávce záření vztažená vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW LDPE 780E	100
Obr. 66. Procentuální změna rázové houževnatosti v tahu na dávce záření vztažená vůči etalonu pro různá tepelná zatížení u materiálu DOW HDPE 25055E.....	101

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Zpracování PE ve světě	18
Tab. 2 Srovnání LDPE a HDPE.....	18
Tab. 3. Přehled tepelných vlastností vybraných polymerů [2]	22
Tab. 4. Hodnoty tvarových stálostí za tepla.....	24
Tab. 5. Základní parametry Trhacího stroje ZWICK 1456	38
Tab. 6. Základní parametry Rázového kladiva ZWICK HIT50P	42
Tab. 7. Materiálový list DOW LDPE 780E.....	51
Tab. 8. Materiálový list DOW HDPE 25055E	52
Tab. 9. Tabulka parametrů při vstřikování	56
Tab. 10. Parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420 C [19].....	57
Tab. 11. Parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 170 U	58
Tab. 12. Parametry horkovzdušné trouby Mora 4807	62
Tab. 13. Tabulka naměřených modulů pružnosti v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E	67
Tab. 14. Tabulka naměřených modulů pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E	68
Tab. 15. Tabulka naměřených modulů pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E	69
Tab. 16. Tabulka naměřených poměrných prodloužení u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E	70
Tab. 17. Tabulka naměřených poměrných prodloužení po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E	71
Tab. 18. Tabulka naměřených poměrných prodloužení po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E	72
Tab. 19. Tabulka naměřených napětí na mezi kluzu u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E	73
Tab. 20. Tabulka naměřených napětí na mezi kluzu po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E.....	74
Tab. 21. Tabulka naměřených napětí na mezi kluzu po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E.....	75
Tab. 22. Tabulka naměřených modulů pružnosti v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E.....	76

Tab. 23. Tabulka naměřených modulů pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	77
Tab. 24. Tabulka naměřených modulů pružnosti v tahu po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	78
Tab. 25. Tabulka naměřených poměrných prodloužení u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E.....	79
Tab. 26. Tabulka naměřených poměrných prodloužení po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	80
Tab. 27. Tabulka naměřených poměrných prodloužení po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	81
Tab. 28. Tabulka naměřených napětí na mezi pevnosti u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E.....	82
Tab. 29. Tabulka naměřených napětí na mezi pevnosti po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	83
Tab. 30. Tabulka naměřených napětí na mezi pevnosti po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	84
Tab. 31. Tabulka naměřených rázových houževnatostí v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW LDPE 780E	85
Tab. 32. Tabulka naměřených rázových houževnatostí v tahu po tepelném zatížení 5 x 90 °C pro materiál DOW LDPE 780E	86
Tab. 33. Tabulka naměřených rázových houževnatostí v tahu po tepelném zatížení 5 x 140 °C pro materiál DOW LDPE 780E	87
Tab. 34. Tabulka naměřených rázových houževnatostí v tahu u tepelně nezatížených zkušebních těles pro materiál DOW HDPE 25055E.....	88
Tab. 35. Tabulka naměřených rázových houževnatostí v tahu po tepelném zatížení 5 x 110 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	89
Tab. 36. Tabulka naměřených rázových houževnatostí v tahu po tepelném zatížení 5 x 160 °C pro materiál DOW HDPE 25055E.....	90
Tab. 37. Tabulka pro určení reprezentativního tělesa.....	92