

Vliv teplotního zatížení na mechanické vlastnosti modifikovaných polyolefinů

Bc. Ondřej Hubáček

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. Ondřej Hubáček**

Osobní číslo: **T12457**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv teplotního zatížení na mechanické vlastnosti modifikovaných polyolefinů**

Zásady pro vypracování:

- 1.) Vypracujte rešerši na dané téma
- 2.) Připravte zkušební tělesa pro dané zkoušky
- 3.) Proveďte 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

Příjmení a jméno: **Hubáček Ondřej**

Obor: Výrobní inženýrství

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 1.5.2014


.....

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

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

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

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

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

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

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

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

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí 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 teplotním zatížení. Práce je složena ze dvou částí. První část je literární rešerší a seznamuje čtenáře se základními informacemi o polymerech, ionizačním záření, síťování a zkoušení materiálů. 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, teplotní odolnost

ABSTRACT

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

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

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Aleši Mizerovi, za odbornou pomoc, ochotu, vynaložený čas a cenné rady při zpracování diplomové práce a vyhodnocování naměřených výsledků. Dále mé poděkování patří firmě BGS Beta-Gama-Service GmbH & Co. KG, která zprostředkovala ozáření zkušebních těles.

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

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD | 10 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 11 |
| 1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ A JEJICH POUŽITÍ | 12 |
| 1.1 PODLE APLIKACE..... | 13 |
| 1.1.1 Komoditní polymery | 13 |
| 1.1.2 Konstrukční polymery..... | 14 |
| 1.1.3 Speciální polymery..... | 14 |
| 1.2 PODLE PŮSOBNÍ TEPLoty | 15 |
| 1.2.1 Termoplasty..... | 15 |
| 1.2.2 Reaktoplasty | 16 |
| 1.2.3 Kaučuky, pryže a elastomery | 16 |
| 1.3 PODLE STUPNĚ USPOŘÁDANOSTI | 16 |
| 1.3.1 Amorfní plasty | 16 |
| 1.3.2 Krystalické (semikrystalické) plasty | 17 |
| 2 MODIFIKACE POLYMERŮ | 18 |
| 2.1 FYZIKÁLNÍ MODIFIKACE..... | 18 |
| 2.2 CHEMICKÁ MODIFIKACE..... | 18 |
| 2.3 MECHANOCHEMICKÁ MODIFIKACE..... | 19 |
| 2.4 RADIČNÍ SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ | 19 |
| 2.4.1 Změny vlastností uradiačně síťovaných polymerů | 20 |
| 3 METODY ZJIŠTĚNÍ TEPLoty TÁNÍ POLYMERŮ | 22 |
| 3.1 DIFERENČNÍ SKENOVACÍ KALORIMETRIE (DSC)..... | 22 |
| 3.1.1 Přístroje pro DSC | 22 |
| 3.2 TERMOMECHANICKÁ ANALÝZA (TMA) | 23 |
| 3.2.1 Přístroje pro TMA | 24 |
| 3.2.2 Popis měření TMA..... | 24 |
| 4 METODY MĚŘENÍ TVARŮ PLOCH | 26 |
| 4.1 DOTYKOVÉ SNÍMACÍ SYSTÉMY | 26 |
| 4.2 BEZDOTYKOVÉ SNÍMACÍ SYSTÉMY | 26 |
| 4.2.1 Optické 3D skenery..... | 27 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST | 29 |
| 5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE | 30 |
| 6 POUŽITÉ STROJE ZAŘÍZENÍ | 31 |
| 6.1 VSTŘIKOVACÍ STROJ ARBURG ALLROUNDER 420C..... | 31 |
| 6.1.1 Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C | 32 |
| 6.2 HORKOVZDUŠNÁ KOMORA MORA 4807 | 32 |
| 6.2.1 Technické parametry horkovzdušné komory MORA 4807 | 33 |
| 6.3 TRHACÍ ZAŘÍZENÍ ZWICK ROELL 1456..... | 34 |
| 6.3.1 Technické parametry trhacího zařízení ZWICK ROELL1456. | 35 |
| 6.4 RÁZOVÉ KLADIVO ZWICK ROELL HIT50P | 36 |
| 6.4.1 Technické parametry rázového kladiva ZWICK ROELLHIT50P..... | 37 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 7 | POUŽITÉ MATERIÁLY | 39 |
| 7.1 | NÍZKOHUSTOTNÍ POLYETYLEN: LDPE DOW 780E | 39 |
| 7.2 | VYSOKOHUSTOTNÍ POLYETYLEN: HDPE DOW 25055E | 39 |
| 8 | PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES..... | 41 |
| 9 | VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT | 45 |
| 9.1 | TAHOVÁ ZKOUŠKA | 45 |
| 9.1.1 | Výsledky tahových zkoušek u teplotně nezatěžovaného materiálu LDPE | 45 |
| 9.1.2 | Výsledky tahových zkoušek materiálu LDPE po teplotním zatížení 90°C..... | 49 |
| 9.1.3 | Výsledky tahových zkoušek materiálu LDPE po teplotním zatížení 140°C..... | 53 |
| 9.1.4 | Srovnání výsledků tahových zkoušek materiálu LDPE | 58 |
| 9.1.5 | Výsledky tahových zkoušek u teplotně nezatěžovaného materiálu HDPE | 61 |
| 9.1.6 | Výsledky tahových zkoušek materiálu HDPE teplotně zatíženého 110°C..... | 64 |
| 9.1.7 | Výsledky tahových zkoušek materiálu HDPE po teplotním zatížení 160°C..... | 67 |
| 9.1.8 | Srovnání výsledků tahových zkoušek materiálu HDPE..... | 71 |
| 9.2 | VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST | 74 |
| 9.2.1 | Výsledky vrubové houževnatosti v tahu materiálu LDPE u teplotně nezatěžovaných těles..... | 74 |
| 9.2.2 | Výsledky vrubové houževnatosti v tahu materiálu LDPE teplotně zatíženého 90°C | 75 |
| 9.2.3 | Výsledky vrubové houževnatosti v tahu materiálu LDPE po teplotním zatížení 140°C | 76 |
| 9.2.4 | Srovnání výsledků vrubové houževnatosti v tahu materiálu LDPE..... | 77 |
| 9.2.5 | Výsledky vrubové houževnatosti v tahu materiálu HDPE u teplotně nezatěžovaných těles..... | 78 |
| 9.2.6 | Výsledky vrubové houževnatosti v tahu materiálu HDPE po teplotním zatížení 110°C | 79 |
| 9.2.7 | Výsledky vrubové houževnatosti v tahu materiálu HDPE teplotně zatíženého 160°C | 80 |
| 9.2.8 | Srovnání výsledků vrubové houževnatosti v tahu materiálu HDPE | 81 |
| | ZÁVĚR | 82 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 84 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 86 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 88 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 91 |

ÚVOD

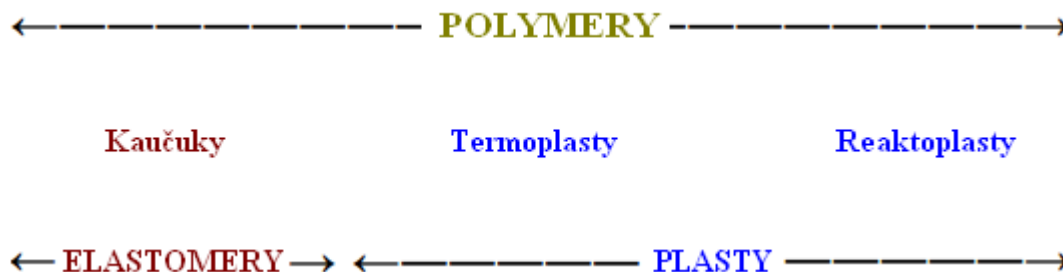
V dnešní době nás polymerní materiály obklopují na každém kroku našeho života. Jako malé děti si hrajeme s hračkami vyrobenými z polymerních materiálů, používáme denně PET láhve pro uchovávání nápojů a v neposlední řadě využíváme polymerní fólie, krabičky, kelímky atd. k balení různých potravin. S přirůstajícími roky člověka touha po hraní narůstá, a proto hledá zálibu ve sportech, autech či elektronice. Jen těžko bychom hledali zálibu, ve které bychom nenašli ani kousek polymerního materiálu. Zde by mohla být na místě otázka, proč tomu tak je? Polymerní materiály jsou poměrně snadno dostupné materiály, které se člověk naučil velice efektivně využívat, kvůli jejím výborným mechanickým a hlavně chemickým vlastnostem. Na druhou stranu polymerní materiály mají poměrně nízkou teplotní odolnost oproti standardním materiálům, jako jsou kovy, keramika atd. Nízká teplotní odolnost polymerů omezuje použití těchto materiálů tam kde je vysoká provozní teplota. A proto se snažíme modifikovat polymerní materiály tak, aby v těchto vysokých provozních teplotách mohly pracovat bez jakýchkoliv omezení. Jednou z metod modifikací polymerních materiálů je radiační síťování pomocí beta záření. Kdy vysokoenergetické záření způsobí síťování polymerního materiálu. Z termoplastu se stává již netavitelný, tedy běžnými metodami nezpracovatelný materiál. Proto je nutné volit polymerní materiály a jejich modifikaci tak, abychom jsme maximalizovali délku životnosti výrobku, protože po uplynutí této doby nastává otázka, co se s tímto výrobkem bude dít dále?

Diplomová práce se zabývá vlivem teplotního zatížení na mechanické vlastnosti radiačně modifikovaných polymerních materiálů, zejména polyolefinů, které jsou jedním z nejvíce využívaných materiálů v oblasti radiačního síťování. Čtenář se v této práci seznámí s polymery, jejich modifikací a měřením mechanických vlastností. V závěru práce jsou vyhodnocena data z tahové zkoušky a rázové zkoušky v tahu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ A JEJICH POUŽITÍ

Polymery jsou chemické látky, které vynikají díky svým obrovským molekulám neobvykle širokou škálou vlastností. Polymery se dělí na elastomery a plasty.[1]



Obr. 1. Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty.[1]

V současné době existuje na trhu několik tisíc různých druhů plastů. V technické praxi však výrazné uplatnění má jen několik desítek druhů plastů. Z celkového objemu světové produkce plastů představuje skoro 80 % jen šest druhů plastů a 70 % výroby jen tři druhy, a to polyolefiny, styrenové hmoty a polyvinylchlorid. Sortiment termoplastů se neustále rozšiřuje, a to v podstatě dvěma směry, kdy jednou cestou je výroba stále nových polymerů a druhou cestou je modifikace dosavadních polymerů. Toto zvyšování počtu materiálů má své výhody pro konstrukci a výrobu dílů z plastů, aniž by došlo k výrazné změně ceny, na druhé straně to klade zvýšené nároky na znalosti konstruktérů.

Při volbě materiálu je potřeba vedle vlastností a ceny, vzít v úvahu i jeho zpracovatelnost, která výrazně ovlivňuje fyzikální vlastnosti konečného výrobku, ale i technologické podmínky, konstrukční řešení nástroje a volbu stroje. Vlastnosti a odolnost polymerů jsou v podstatě dány jejich chemickou strukturou, ale mohou být do značné míry ovlivněny i zpracovatelským procesem.

Výhody a nevýhody plastů lze shrnout do následujících bodů. Mezi výhody patří nízká měrná hmotnost, výborné zpracovatelské vlastnosti, vysoký izolační odpor a mají výbornou korozní odolnost, tlumí rázy, chvění, atd. Nevýhodou jsou nízké mechanické a časově závislé vlastnosti, ekologická zatížitelnost, apod.[2]

1.1 Podle aplikace

1.1.1 Komoditní polymery

Nejdéle a v největších objemech zpracovávané plasty pro velmi široké spektrum výrobků. Horší mechanické vlastnosti, teplotní a chemická odolnost jsou neustálým vývojem (kompozity, směsi s jinými materiály atd.) postupně eliminovány tyto inovované materiály pak přesahují do skupin konstrukčních materiálů. Patří mezi ně polyolefiny (PE, PP), polystyrén (PS), polyvinylchlorid (PVC), fenolformaldehydové (PF) a močovinoformaldehydové pryskyřice (UF). [4]

- **Polyetylén**

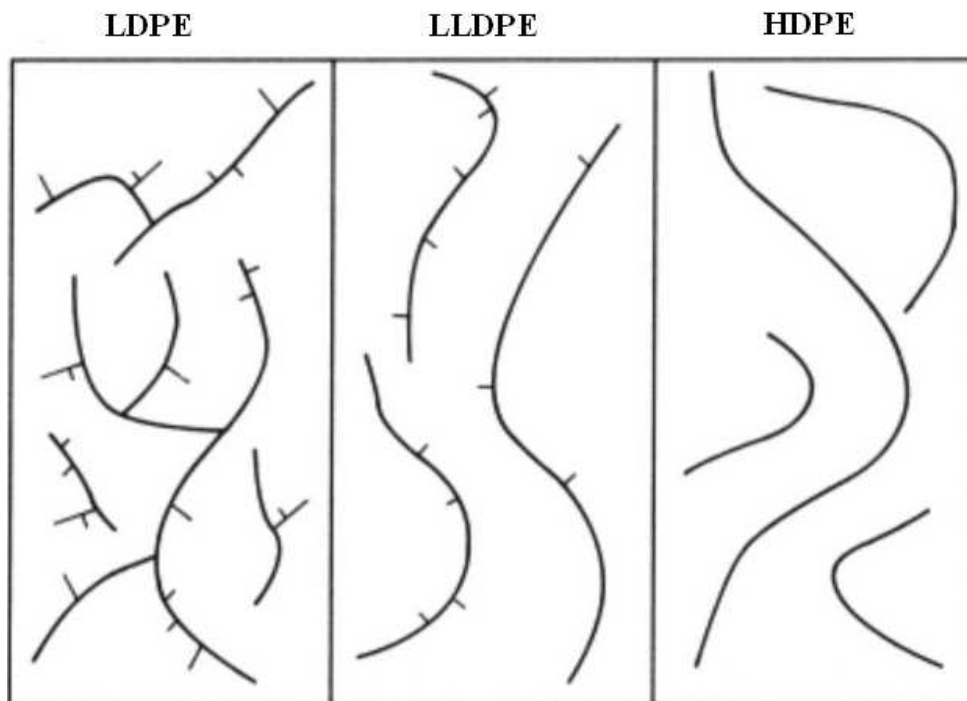
Polyetylén je celosvětově nejvíce rozšířený vyráběný polymer. Může být vyráběn ve formě měkkých, flexibilních i pevných, tvrdých a odolných výrobků. Lze ho nalézt v předmětech všech rozměrů s jednoduchým nebo složitým designem. Mimo jiné může také být součástí každodenních předmětů, obalů, potrubí a hraček. Polyetylénové výrobky stále nahrazují tradiční materiály jako např. papír nebo kovy. Existují tři hlavní typy polyetylénů. Všechny tyto typy jsou používány ve více než 90 % všech aplikacích polyetylénu.[5]

Tři nejběžnější typy polyetylénu:

- Rozvětvený – nízkohustotní **LDPE** (Low – Density Polyethylen)
- Lineární – nízkohustotní **LLDPE**(Linear – Low – Density Polyethylen)
- Lineární – vysokohustotní **HDPE** (High – Density Polyethylen)

Tab. 1. Vlastnosti lineárního (LLDPE , HDPE) a rozvětveného (LDPE) polyetylénu.[6]

| Druh polyetylénu | Hustota (ρ) [g/cm ³] | Teplota tání (T_m) [°C] | Pevnost(σ) [MPa] | Modul pružnosti (E) [MPa] |
|--|--|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| LDPE – rozvětvený, nízkohustotní polyetylén | 0,915 - 0,930 | 110 - 115 | 8 - 10 | 100 - 200 |
| LLDPE – lineární, nízkohustotní polyetylén | 0,870 - 0,965 | 120 - 160 | 10 - 30 | 160 - 200 |
| HDPE – lineární, vysokohustotní polyetylén | 0,940 - 0,970 | 130 - 135 | 20 - 30 | 700 - 1000 |



Obr. 2. Struktura řetězců polyethylenu.[5]

Existují však i další typy polyethylénu jako:

- Polyetylén o střední hustotě **MDPE** (Middle – Density Polyethylen)
- Polyetylén o velmi vysoké hustotě **UHMWPE** (Ultra High Molecular Weight Polyethylen)[6]

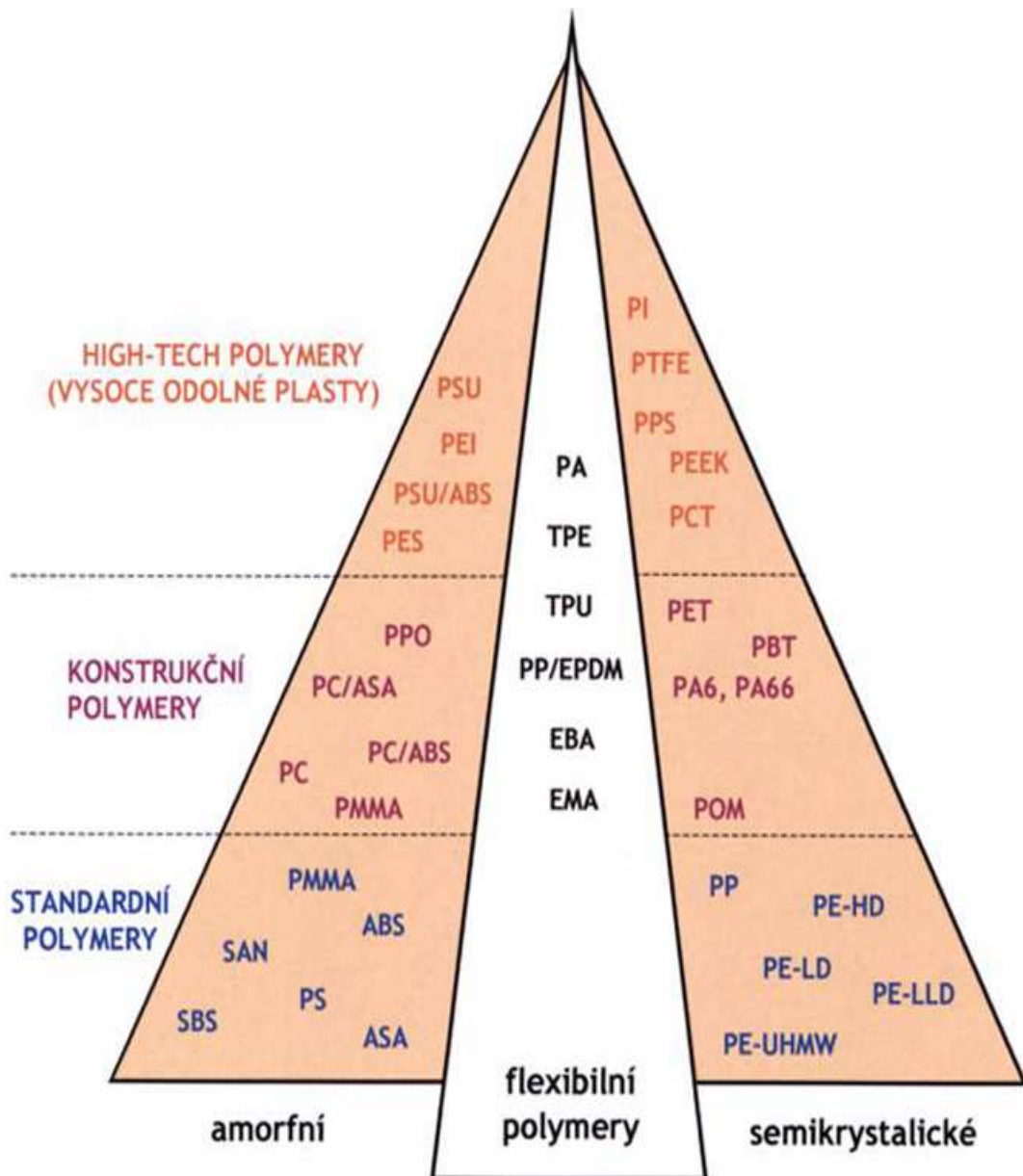
1.1.2 Konstrukční polymery

Jedná se o více specializované plasty s požadovanými mechanickými i jinými vlastnostmi pro určité skupiny technických výrobků. Lze mezi ně zařadit polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyoxymetylen (POM), polymetylmetakrylát (PMMA), terpolymer ABS, polyfenilénoxid (PPO), polyuretan (PU), epoxidové (EP) a polyesterové (UP) pryskyřice. [2]

1.1.3 Speciální polymery

Ve značné míře jsou vyvinuty přímo na požadavky zákazníků pro úzce specializované aplikace. Dle typů jsou to materiály s výbornými mechanickými vlastnostmi a vysokou teplotní odolností. Relativně menší zpracovaná množství se s rozšiřováním nových apli-

kací budou neustále zvyšovat. Mezi speciální polymery lze zařadit polysulfon (PSU), polyfenylénsulfid (PPS), poly tetrafluoretylén (PTFE), polyimidy (PI) a další.[2], [4]



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

1.2 Podle působení teploty

1.2.1 Termoplasty

Jedná se o polymerní materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu, do stavu vysoce viskózních neneutronovských kapalin, kde je lze snadno tvarovat a zpracovávat různými technologiemi. Do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání T_m (semikrystalické plasty), resp. teplotu viskózního toku T_f (amorfní plasty). Protože při

zahřívání nedochází k chemickým změnám, lze proces měknutí a následného tuhnutí opakovat teoreticky bez omezení. Jedná se pouze o fyzikální proces. K termoplastům patří většina zpracovávaných hmot, jako je polyetylén (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA), atd.[2]

1.2.2 Reaktoplasty

Jedná se o polymerní materiály, dříve nazývané termosety, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvarovat, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury, k tzv. vytvrzování. Výrobek je možno považovat za jednu velkou makromolekulu. Ochlazování reaktoplastů probíhá mimo nástroj, neboť zajištění rychlého ohřevu formy pro vytvrzení a následné rychlé ochlazení materiálu by bylo obtížné a hlavně velmi ekonomicky nevýhodné. Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit, dalším zahříváním dojde k rozkladu hmoty (degradaci). Zde patří fenolformaldehydové, epoxidové, polyesterové pryskyřice, apod.[2]

1.2.3 Kaučuky, pryže a elastomery

Jedná se o polymerní materiály, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvarovat, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury, probíhá tzv. vulkanizace. U elastomerů na bázi termoplastů nedochází k chemickým změnám, proces měknutí a následného tuhnutí lze opakovat teoreticky bez omezení, probíhá zde pouze fyzikální děj.[2]

1.3 Podle stupně uspořádanosti

1.3.1 Amorfní plasty

Makromolekuly zaujmají zcela nahodilou pozici. Zde patří např. PS, PMMA, PC, apod. Jsou charakteristické tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností a modulem pružnosti. Amorfní plasty jsou vzhledem k nízkému indexu lomu (1,4 až 1,6) průhledné, resp. dle propustnosti světla čiré (92 % propustnosti světla), transparentní anebo průhledné (60 % propustnosti světla). Součinitel teplotní roztažnosti je menší, než u semikrystalických polymerů. Použitelnost amorfních polymerů je do teploty skelného přechodu T_g . [2]

1.3.2 Krystalické (semikrystalické) plasty

Plasty, které vykazují určitý stupeň uspořádanosti. Ten se označuje jako stupeň krystalinity (pohybuje se od 40 do 90 %) a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí, uložených mezi oblastmi amorfními. Nemůže nikdy dosáhnout 100 %, proto se krystalické plasty označují jako semikrystalické. Patří sem PE, PP, PA, PTFE, POM, atd. Jsou mléčně zakalené, index lomu je větší a jsou charakterizovány svou houževnatostí, pevností a modul pružnosti roste se stupněm krystalinity. Použitelnost semikrystalických plastů je do teploty tání T_m . [2]

2 MODIFIKACE POLYMERŮ

Modifikace polymerů je velmi široký pojem, který zahrnuje velký počet způsobů fyzikálních a chemických přeměn polymerů. Jedná se o záměrnou přeměnu polymerů prováděnou za účelem získání nového polymerního materiálu s odlišnými vlastnostmi. Vzhledem ke stále stoupajícím nárokům na vlastnosti polymerů v souvislosti se stále se rozšiřujícími oblastmi jejich použití význam modifikace polymerů neustále vzrůstá.

Rozlišujeme několik způsobů modifikace polymerů:

- **Fyzikální modifikace** – mechanickým smíšením dvou nebo více polymerů,
- **Chemická modifikace** – na základě chemických reakcí účinných látek s reaktivními skupinami polymerních řetězců,
- **Mechanochemická modifikace** – při níž mechanickou cestou, např. intenzivním hnětením, za podmínek a přítomnosti látek usnadňující destrukci, zreagují s přítomným monomermem schopným polymerace. [7]

2.1 Fyzikální modifikace

Tento nejjednodušší způsob nabývá stále širšího uplatnění. Mechanickým smíšením dvou nebo více polymerů se mnohdy získají směsi s vynikajícími mechanickými vlastnostmi. [7]

2.2 Chemická modifikace

Chemickou modifikací se rozumí úmyslná přeměna chemické struktury působením účinných chemických látek nebo reakčních podmínek. Z hlediska délky makromolekulárních řetězců (střední molekulové hmotnosti) lze chemické reakce polymerů rozdělit na:

- Reakce probíhající za zachování střední molekulové hmotnosti polymeru, za tzv. polymeranalogické přeměny,
- Reakce vedoucí ke změnám střední molekulové hmotnosti polymeru, k nimž patří i reakce probíhající při mechanochemické modifikaci a reakce probíhající při síťování polymerů.[7]

2.3 Mechanochemická modifikace

K mechanochemické modifikaci polymerů dochází reakcí aktivních částic, které vznikají při mechanické destrukci makromolekulárních řetězců. Používá se při ní dvou základních metod:

- Mechanické degradace směsí polymerů,
- Mechanické degradace polymeru v přítomnosti monomeru.

V případě degradace směsí polymerů vznikají modifikované polymery kombinací makroradikálů nebo reakcí makroradikálů s mechanicky aktivovanými polymerními řetězci.

V druhém případě vznikají makroradikály iniciující polymeraci přítomného monomeru.

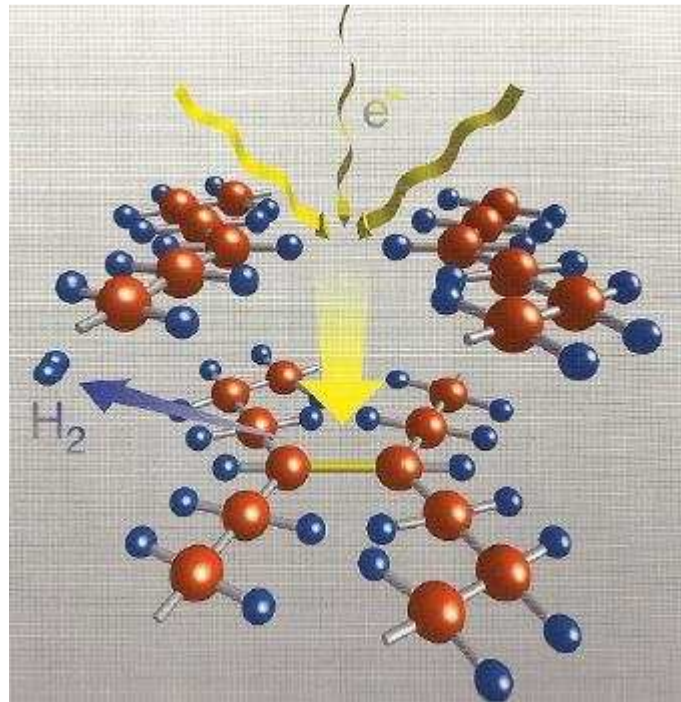
Jak v prvním či druhém případě probíhá množství reakcí, které vedou mimo jiné ke vzniku roubovaných nebo blokových kopolymerů s rozdílnou strukturou či délkou bloků.[7]

2.4 Radiační síťování polymerů

Radiační síťování je technologie, která umožňuje dosáhnout zlepšení mechanických, chemických, ale také teplotních vlastností plastů za pomoci beta nebo gama záření. To umožňuje v některých případech použití levnějších polymerů, které touto modifikací dosáhnou vlastností drahých konstrukčních a speciálních termoplastů.

Velkou výhodou této modifikace polymerů je to, že proces radiačního síťování probíhá až po výrobním procesu. Modifikace je prováděna na již tvarově dokončeném výrobku. Síťovací reakce je spuštěna dodáním energie. Dodáním přesně určené dávky tohoto záření je řízen síťovací proces a tím i výsledné vlastnosti daného materiálu.

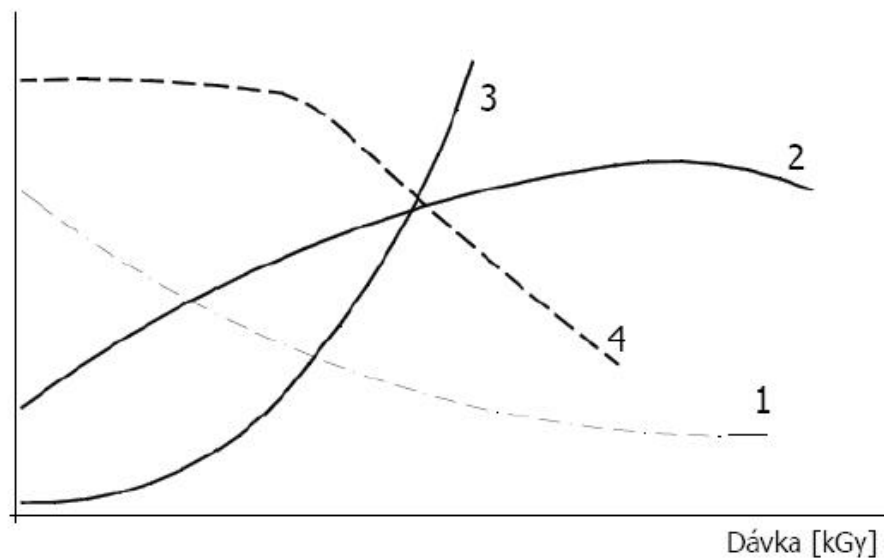
Základním předpokladem je, aby materiál po dobu ionizačního záření síťoval, a ne degradoval. U některých polymerů je však nutno použít pomocného síťovací činidla. Interakcí záření s polymerem vznikají polymerní radikály, ty pomocí rekombinace vytvoří v řetězci síť a to spojením dvou volných radikálů mezi sousedními řetězci za vzniku vazby C-C. Radiační síťování se provádí nejčastěji beta nebo gama zářením.[6], [9], [10]



Obr. 4. Schéma radiačního sítěvání elektronovým zářením.[3]

2.4.1 Změny vlastností uradiačně sítěvaných polymerů

Ozařováním dochází u polymerů nejčastěji ke změnám mechanickým, chemickým a tepelným.



Obr. 5. Vlastnosti polymerů v závislosti na dávce záření.[10]

1 – tažnost, 2 – pevnost v tahu, 3 – tvarová stálost, 4 – botnání

a) Změny mechanických vlastností:

- zvýšení pevnosti,
- pokles poměrného prodloužení (tažnosti) při přetržení,
- redukce studeného toku (creepu),
- zlepšení meze únavy (při střídavém ohybu),
- zvýšení pevnosti studených spojů,
- nárůst tvrdosti,
- zlepšení oteřuvzdornosti,
- zlepšení chování při dlouhodobém zatížení vnitřním přetlakem.

b) Změny tepelných vlastností:

- zlepšení tvarové stálosti za tepla,
- zlepšení trvalé deformace při zatížení tlakem (tahem),
- zvýšení teplotní odolnosti,
- vyšší odolnosti proti stárnutí.

c) Změny chemických vlastností

- snížení rozpustnosti,
- zlepšení odolnosti proti botnání,
- zvýšení odolnosti proti trhlinám způsobeným pnutím,
- zvýšení olejuvzdornosti.[10]

3 METODY ZJIŠTĚNÍ TEPLoty TÁNÍ POLYMERŮ

Termická analýza (thermal analysis-TA) je experimentální metodika, která umožňuje měření fyzikálních vlastností látek (polymerů, kopolymerů a jejich směsí) v závislosti na teplotě nebo na čase.[11]

3.1 Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)

Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) je metodou, která zaznamenává energii nutnou k držení nulové teplotní difference mezi látkou měřenou a referenční, tudíž sleduje kompenzační tepelný tok v závislosti na teplotě (či čase).[11]

Měřením lze zjistit:

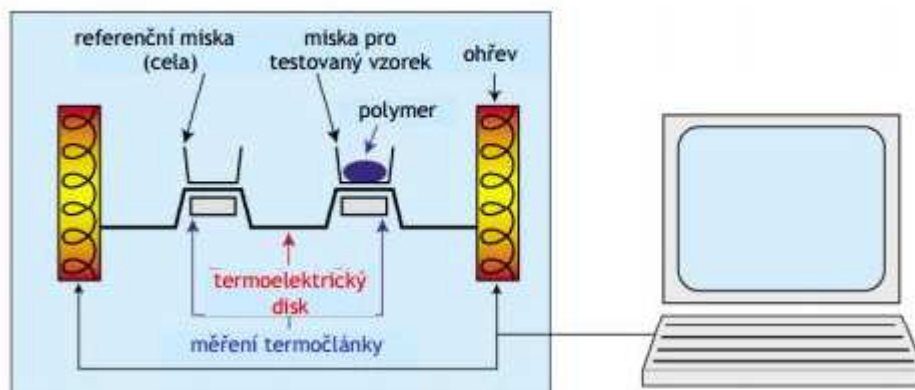
- bod tání T_m ,
- teplotu skelného přechodu T_g ,
- teplotu krystalizace polymeru T_c ,
- energii absorbovanou,
- energii uvolněnou,
- tepelnou kapacitu.

Používají se dvě varianty DSC:

- DSC s tepelným tokem,
- DSC s kompenzací příkonu.[8]

3.1.1 Přístroje pro DSC

Zařízení pro DSC s kompenzací příkonu se skládá ze dvou oddělených obvodů, kontrolního a řídicího. Každé těleso má svůj nosič. Nosiče obsahují teplotní čidla a topná tělíska. Tělesa jsou od sebe dokonale izolována, aby se zabránilo tepelnému toku mezi nimi. Kontrolní obvod měří průměrnou teplotu těles a automaticky vyrovnává tepelný výkon tak, že se průměrná teplota zvyšuje lineárně. Řídicí obvod pak zaznamenává rozdíly teplot mezi měřeným a srovnávacím tělesem, určuje, který má vyšší teplotu a automaticky kompenzuje tyto teplotní rozdíly. Zařízení pro DSC s tepelným tokem se skládá z měřicí hlavy s držákem pro těleso a srovnávací látku, pece, termostatu, zdroje plynů a zdroje napětí. Měřené signály jsou zaznamenávány v počítači. [16]



Obr. 6. Schéma principu metody DSC.[15]

3.2 Termomechanická analýza (TMA)

Termomechanická analýza (TMA) měří deformace při statickém či dynamickém zatížení v závislosti na čase či teplotě. TMA vyžaduje velmi citlivé měření změn rozměrů tělesa, to je následně podrobena konstantnímu zatížení.

Pomocí této metody můžeme sledovat proces krystalizace, stanovení krystalického podílu, teplotu tání, objemovou i lineární roztažnost.

TMA slouží k charakterizaci pevných látek, která je založena na měření změny výšky studovaného tělesa (expanze, kontrakce) v závislosti na teplotě, čase a vložené síle.

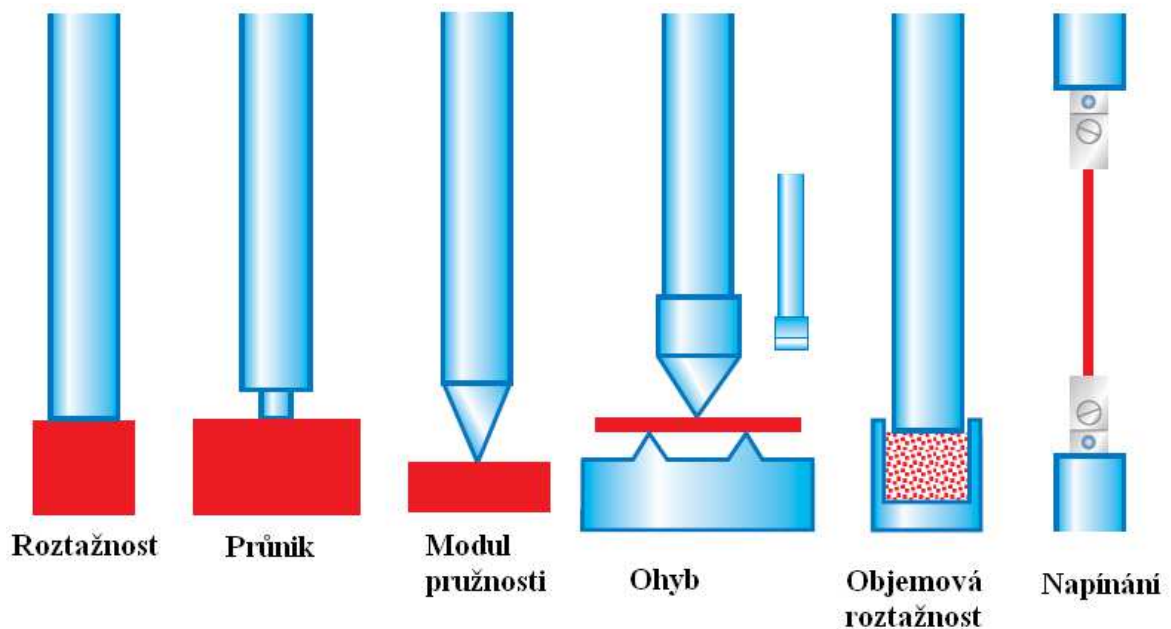
Podle použité metody měření lze analýzou naměřených dat naměřit:

- koeficient tepelné roztažnosti v daném teplotním intervalu
- průběh koeficientu tepelné roztažnosti v závislosti na teplotě
- bod měknutí a tání materiálu
- teplotu skelného přechodu
- viskozitu tuhých látek
- objemovou relaxaci nekystalických materiálů (smrštění)
- moduly pružnosti
- změnu viskoelastických vlastností látek
- změnu rozměru vzorku v závislosti na stupni dehydratace, botnání v rozpouštědle apod.
- zbytkové pnutí v materiálu

Při sledování termomechanických vlastností pomocí TMA lze za vnější faktory působící na materiál považovat zvolenou sílu a teplotu. Sílu je možno měnit podle zvoleného režimu působení a to na statickou nebo dynamickou. U statického podnětu se jeho velikost v čase nemění, u dynamického se velikost mění buď periodicky, nebo neperiodicky. Statické a dynamické vlastnosti materiálu se číselně liší jak z termodynamických důvodů, tak i v důsledku viskoelastického chování polymerního materiálu. [8],[11],[12]

3.2.1 Přístroje pro TMA

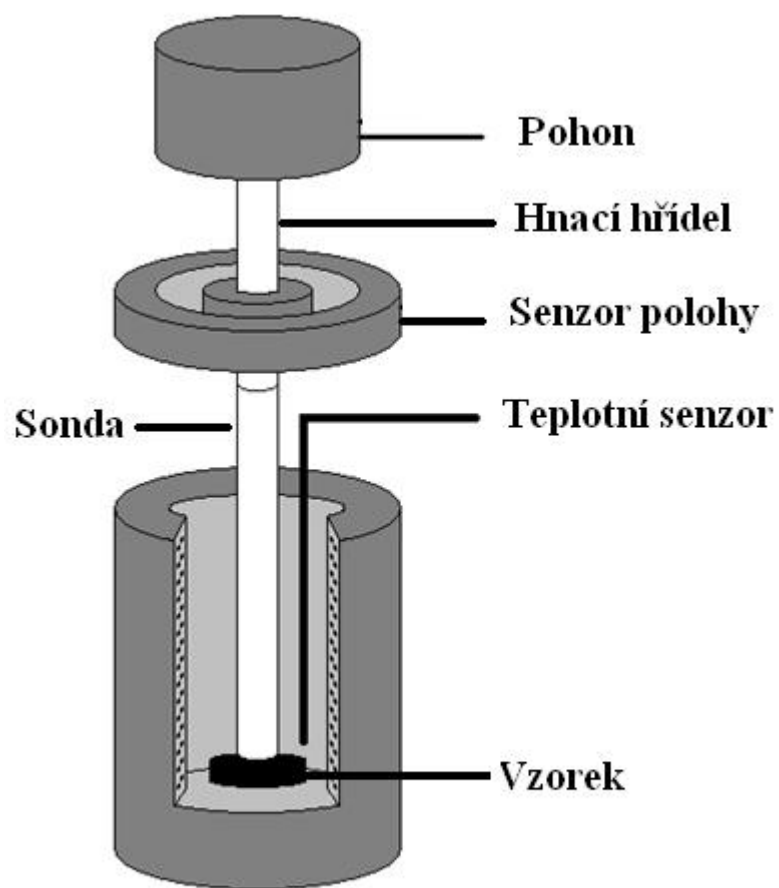
Zařízení používané pro termomechanickou analýzu pracují na několika různých principech viz. Obr. 7.



Obr. 7. Metody termomechanické analýzy.[13]

3.2.2 Popis měření TMA

Těleso je umístěno v ochranném křemíkovém obalu – křemenné destičky, křemenné mis-tičky – podle použité metodiky, který zajišťuje ochranu proti spleení tělesa a měřicího zařízení – pece, které bývají vertikální. Pec bývá zpravidla vyrobena z korundové kera-miky, teplotní program je zajišťován pomocí čidla a termočlánu umístěného v bezpro-střední blízkosti tělesa viz Obr 8. Následně zařízení začne působit silou, která je vyvolá-vaná pomocí lineárního motoru, který zabezpečuje plynulé zatěžování naprogramovanou silou. Při měření lze buď sledovat změnu výšky na teplotě při konstantní rychlosti ohře-vu, nebo změnu výšky v závislosti na čase při konstantní teplotě.[12]



Vyhřívaná komora

Obr. 8. Příklad přístroje pro TMA.[14]

4 METODY MĚŘENÍ TVARŮ PLOCH

4.1 Dotykové snímací systémy

V současné době jsou dotykové snímací systémy v praxi často používány. Jejich společnou vlastností je, že na získání informací o tvaru a rozměrech dílců je potřebný fyzický kontakt dotyku s měřenou součástí.



Obr. 9. Dotyková spínací sonda.[21]

Funkce sondy funguje tak, že v momentě, kdy se dotyk dotkne měřené plochy, sonda vydá signál, dojde k okamžitému zastavení pohybu a následně k odečtení aktuálních souřadnic z odměřovacího systému stroje.[21]

4.2 Bezdotykové snímací systémy

U bezdotykových snímačů se využívají různé fyzikální principy snímání. Nejčastěji používané jsou optické, ale ve specifických aplikacích se využívají i principy indukční, kapacitní, ultrazvukové, magnetické atd. Jejich použití se odvíjí od typu měřených předmětů a většinou jsou navržena jednoduše.

Hlavním představitelem tohoto měření jsou optické systémy. Bezdotykové systémy pro 3D měření můžeme jinak nazvat jako skenery. Bezdotykové skenery nevyžadují fyzický kontakt s povrchem předmětu.

Bezdotykové skenery lze podle použité technologie snímání rozdělit na:

- optické,
- laserové,
- mechanické,
- destruktivní,
- ultrazvukové,
- rentgenové.

Podle konstrukce lze skenery rozdělit na:

- Stacionární (pevné) – Jsou vázány na jedno místo a skenovaný předmět se musí dopravit k nim.
- Mobilní (přenosné) – Lze je snadno přenášet a dopravit ke skenovanému předmětu. Mají menší rozměry a lze je rychle smontovat.

Způsoby skenování předmětu:

- Otáčející se – Zařízení stojí a měřený předmět se otáčí.
- Stojící (nehybné) – Zařízení se otáčí a měřený předmět stojí.[21]

4.2.1 Optické 3D skenery

Optické skenery pracují na principu bezdotykového snímání, digitalizují vnější povrch a dokážou rozpoznávat i textury povrchu.

Princip činnosti optických skenerů spočívá v tom, že skenovaný objekt je snímán z několika úhlů. Při každém natočení se součástka naskenuje (vyfotí) a data se odešlou do PC kde se zpracují.

Příklady optických systémů:

- **Optický měřicí systém TRITOP**

Systém TRITOP (obr. 10) je fotogrammetrický přenosný optický měřicí systém, který je určený pro bezkontaktní měření polohy a deformace diskrétních bodů (případně kontrastních čar). Pracuje na triangulačním principu a ze vztahů mezi úhly se vypočítají prostorové souřadnice zjištěného geometrického prvku. Systém je určený pro měření kontroly kvality, deformační analýzy a digitalizace.



Obr. 10. Zařízení TRITOP.[22]

Zařízení umožňuje měřit i např. deformace objektu a to ve dvou fázích (deformovaném nebo nedeformovaném stavu).

Deformovaný stav – lze dosáhnout při provozu působením vnějších sil nebo tepelným zatěžováním, následně systém deformace vyhodnotí a odešle (např. do řídicího střediska), kde se přijmou potřebné opatření.[21]

- **ATOS (Advanced Topometric Sensor)**

Zařízení ATOS je mobilní bezdotykový optický 3D skener určený pro nejrůznější aplikace. Jeho vysoká výkonnost, velké rozlišení a široká flexibilita měřicích objemů umožňují přesnou a efektivní kontrolu kvality výroby. Nejširší využití systému ATOS je v oblastech CAD, CAM a FEM, kde je vyžadováno měření reálných objektů a jejich následné srovnání s teoretickým modelem. Všechny systémy ATOS mohou být doplněny o počítačem řízený rotační stůl, což je vhodné pro opakovaná měření stejných dílů. [22]



Obr. 11. Zařízení ATOS.[22]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

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

Zkušební tělesa byla modifikována radiačním sítováním dávkami záření o hodnotách 33, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy. Poté zkušební tělesa byla teplotně zatěžována po dobu 1 hodiny v teplotní komoře teplotami 90 a 140 °C u materiálu LDPE a u materiálu HDPE byly použity teploty 110 a 160 °C. Tělesa pak byla ochlazená na pokojovou teplotu (23°C) při které se prováděly samotné zkoušky.

Následné mechanické vlastnosti zkušebních těles byly testovány na vhodných zařízeních, konkrétně se jednalo o tahové zkoušky a zkoušky rázové houževnatosti v tahu. Naměřená data byla numericky a graficky zaznamenána a vyhodnocena.

6 POUŽITÉ STROJE A ZAŘÍZENÍ

Pro realizaci diplomové práce bylo použito několik druhů strojních zařízení. Nejdříve byla zhotovena zkušební tělesa na vstřikovacím stroji ARBURG ALLROUNDER 420C. Dále pro potřebný ohřev těles byla použita horkovzdušná komora MORA 4807, následné zkoušky probíhaly na zařízení ZWICK ROEL 1456 k měření tahových a tlakových sil a také na rázovém kladivu ZWICK ROELL HIT50P.

6.1 Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420C

Tento vstřikovací stroj je vhodný ke zpracování všech běžných termoplastů. U vstřikovacího stroje ARBURG 420C (Obr. 12) se spojuje nejosvědčenější technika s inovačním 32bitovým multiprocessorovým řídicím systémem SELOGICA umožňující snadné, rychlé a přehledné programování a tím tak zajistí jednoduché a efektivní ovládání stroje. Vstřikovací stroj také obsahuje obrazovku s výklopným terminálem, kde jsou přehledně vyobrazeny informace z klávesnice pomocí jednoduchých grafických symbolů.

Tato výkonná kombinace je robustní, má dlouhou životnost a díky své flexibilitě a konstrukci je předurčena pro univerzální řešení všech úkolů v oblasti vstřikování. Modulární koncepce umožňuje velké množství různých, individuálně konfigurovatelných kombinací. Řídicí systém, hydraulika, rozměry upínacích desek, uzavírací síly i vstřikovací jednotky jsou k dispozici ve formě modulů v montážních stupních, vyhovujících požadavkům praxe.[17]



Obr. 12. Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420C.[9]

6.1.1 Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C

Tab. 2. Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C.[17]

| Typ stroje | Allrounder 420C | |
|---|-----------------|---------------------------------------|
| Uzavírací jednotka | | |
| Uzavírací síla | 1000 | max. kN |
| Otevírací síla / zvýšená otevírací síla | 35 / 250 | max. kN |
| Otevření | 500 | max. mm |
| Vzdálenost mezi vodícími sloupy | 420 x 420 | mm |
| Velikost upínací desky (šířka x výška) | 570 x 570 | mm |
| Vyhazovací síla | 40 | max. kN |
| Zdvih vyhazovače | 175 | max. mm |
| Vstřikovací jednotka | | |
| Průměr šneku | 40 | mm |
| Poměr šneku | 20 | L / D |
| Zdvih šneku | 145 | max. mm |
| Objem dávky | 182 | max. cm ³ |
| Vstřikovací tlak | 2120 | max. bar |
| Vstřikovací rychlost (objemová) | 168 | max. cm ³ .s ⁻¹ |
| Zpětný tlak pozitivní / negativní | 350 / 160 | max. bar |
| Krouticí moment šneku | 700 | max. Nm |
| Přítlačná síla trysky | 70 | max. kN |
| Objem násypky | 50 | l |
| Hydraulika, pohon | | |
| Výkon čerpadla | 15 | kW |
| Celkový příkon stroje | 23,9 | kW |

6.2 Horkovzdušná komora MORA 4807

Zkušební tělesa byla v horkovzdušné komoře ohřívána na teplotu 90,110,140 a 160°C po dobu 60 minut. Teplotu v komoře bylo možno regulovat elektronicky a to v rozmezí od 50 do 250 °C ± 5°C



Obr. 13. Horkovzdušná komora MORA 4807
[18]

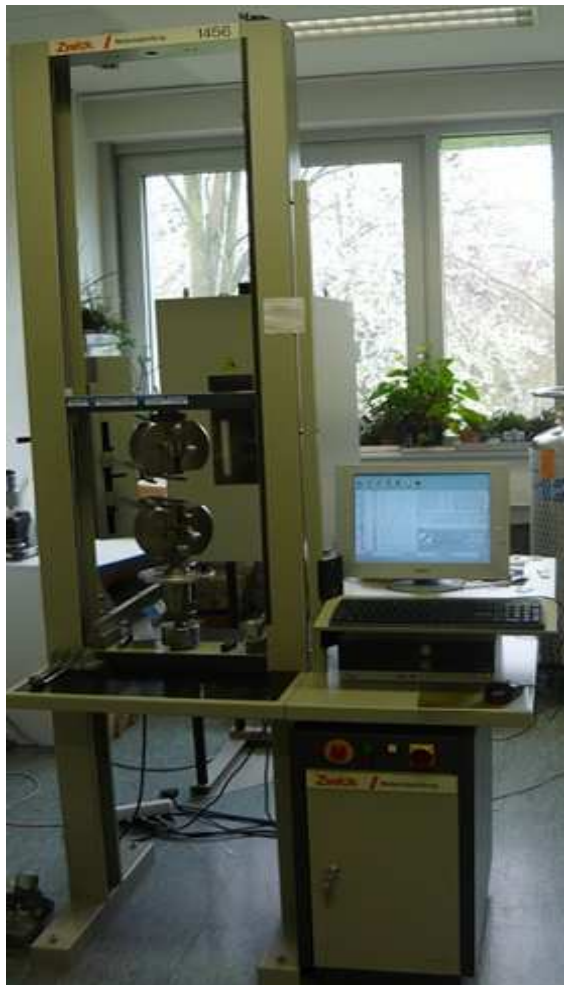
6.2.1 Technické parametry horkovzdušné komory MORA 4807

Tab. 3. Technické parametry horkovzdušné trouby MORA 4807.[18]

| Typ zařízení | MORA 4807 | |
|--|-------------------|----------|
| Vnější rozměry (v / š / h) | (594 / 594 / 535) | mm |
| Vnitřní rozměry (v / š / h) | (460 / 350 / 395) | mm |
| Objem | 58 | l |
| Min. / max. teplota v troubě | 50 - 250 | °C |
| | El. Příkon | W |
| Horní dolní topné těleso | 2100 | |
| Horní dolní topné těleso s ventilátorem | 2125 | |
| Dolní topné těleso s ventilátorem | 1125 | |
| Topné těleso velkého grilu | 2200 | |
| Topné těleso grilu | 1200 | |
| Topné těleso velkého grilu s ventilátorem | 2225 | |
| Kruhové topné těleso | 2300 | |
| Kruhové topné těleso + dolní topné těleso + ventilátor | 3425 | |
| Ventilátor | 25 | |
| Osvětlení | 25 | |
| Celkový | 3500 | |

6.3 Trhací zařízení ZWICK Roell 1456

Pro zkoušení pevnosti v tahu bylo použito zařízení ZWICK ROELL 1456 (obr. 14). Zkušební tělesa byla upnuta na trhacím stroji a zatěžovány jednoosým tahem až do jejich přetržení. Naměřená data byla zpracována softwarem Test Expert, který byl součástí vybavení trhacího zařízení.



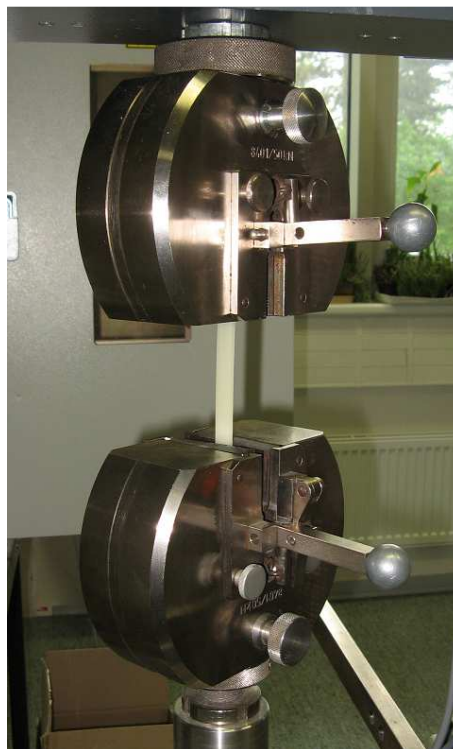
Obr. 14. Trhací zařízení ZWICK ROELL 1456.

6.3.1 Technické parametry trhacího zařízení ZWICK ROELL1456.

Tab. 4. Technické parametry trhacího zařízení ZWICK ROELL 1456.[19]

| Měřicí zařízení | ZWICK ROELL 1456 | |
|-------------------------------------|------------------|----------------------|
| Rozměry a hmotnost stroje | | |
| Strojová výška | 1284 | mm |
| Celková výška | 2012 | mm |
| Celková šířka | 630 | mm |
| Šířka pracovního prostoru | 420 | mm |
| Hmotnost | 150 | kg |
| Dynamika stroje | | |
| Maximální zkušební síla | 20 | kN |
| Maximální rychlost posuvu příčnicku | 750 | mm.min ⁻¹ |

Před provedením samotné tahové zkoušky, se zkušební tělesa upnula do mechanických čelistí (Obr. 15).

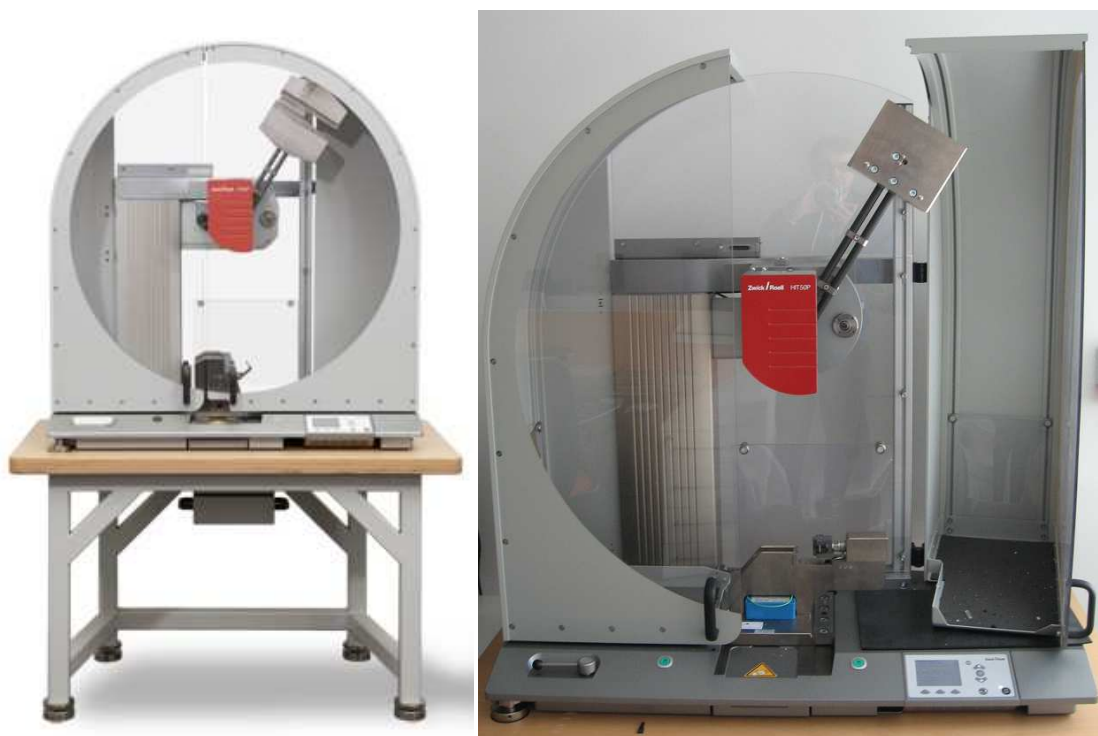


Obr. 15. Upnutí zkušebního tělesa v čelistech.

6.4 Rázové kladivo ZWICK ROELL HIT50P

Rázové kladivo ZWICK ROELL HIT50P (Obr. 16) má díky výměnnému příslušenství větší možností použití, jako je měření vrubové houževnatosti, vrubové houževnatosti v tahu, rázové houževnatosti a rázové houževnatosti v tahu.

Na zkušebních tělesech byly prováděny zkoušky rázové houževnatosti v tahu a následná naměřená data byla zaznamenána a vyhodnocena pomocí softwaru Testxpert II (Obr. 17), který byl součástí příslušenství.

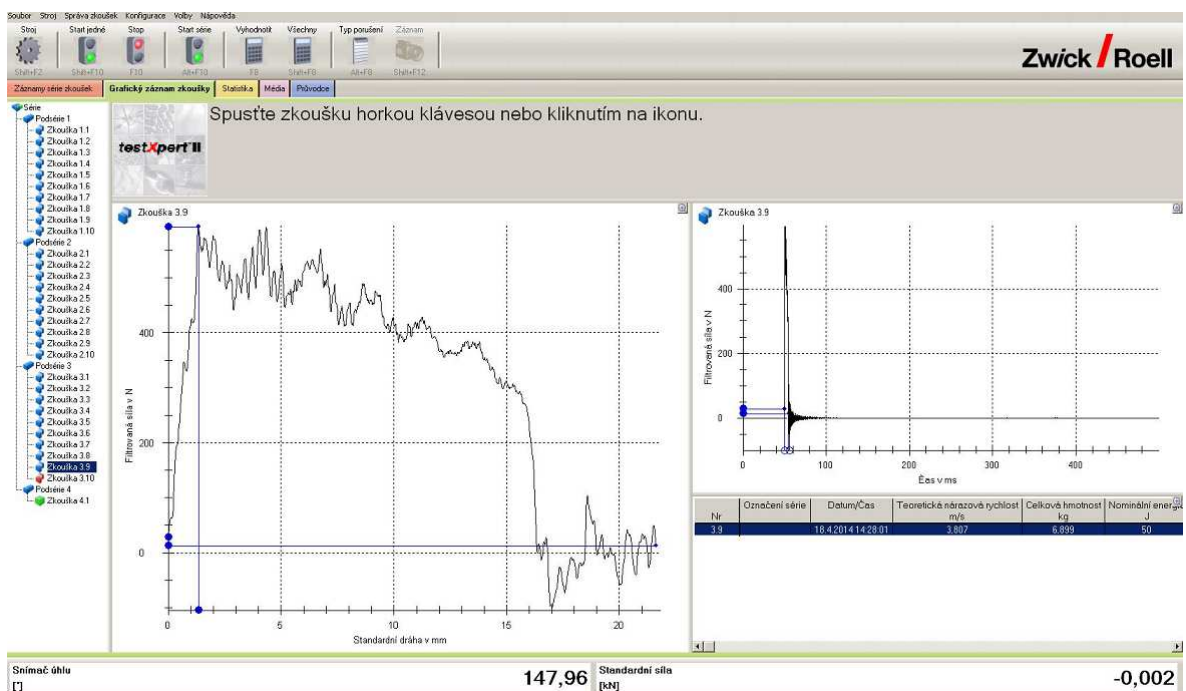


Obr. 16. Rázové kladivo ZWICK ROELL HIT50P [20].

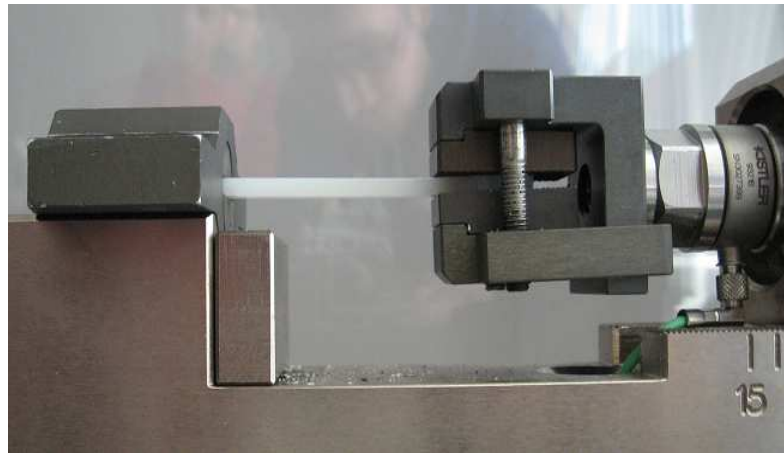
6.4.1 Technické parametry rázového kladiva ZWICK ROELLHIT50P

Tab. 5. Technické parametry rázového kladiva ZWICK ROELL HIT50P.[20]

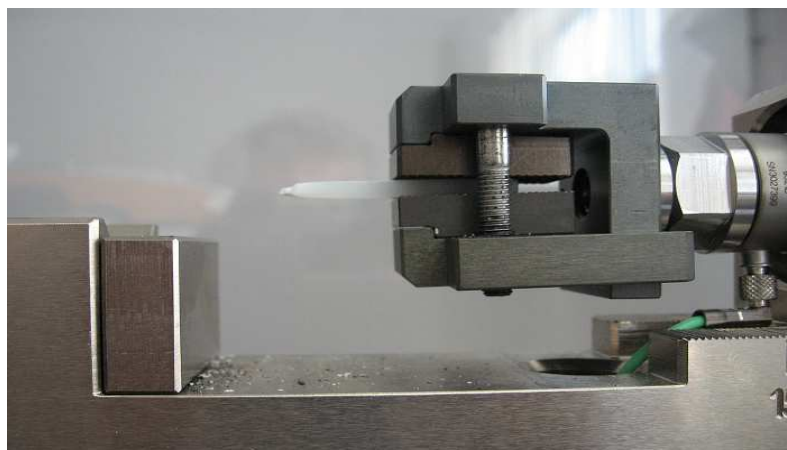
| Měřicí zařízení | ZWICK ROELL HIT50P | |
|--------------------------------------|---|-----|
| Maximální nárazová energie | 50 | J |
| Nárazová rychlost | 2,2 – 3,8 | m/s |
| Výška x Šířka x Hloubka | 1170 x 1180 x 500 | mm |
| Hmotnost se stolem bez příslušenství | 500 | kg |
| Rozhraní | RS232, USB | |
| Síťové napětí | 100 až 240 V, 50/60 Hz, 70 W | |
| Výsledky měření | nárazová energie [%], absolutní nárazová energie, rázová houževnatost | |
| Jednotky | SI, metrické, imperiální | |
| Řídící funkce | korekce tření, vertikální poloha kyvadla, doba kyvu | |
| Bezpečnostní zařízení | bezpečnostní kryt | |



Obr. 17. Vyobrazené prostředí použitého softwaru Testxpert II



Obr. 18. Připravené těleso pro zkoušku vrubové houževnatosti v tahu.



Obr. 19. Těleso po provedení zkoušky vrubové houževnatosti v tahu.

7 POUŽITÉ MATERIÁLY

Pro zhotovení zkušebních těles byly použity materiály LDPE a HDPE od amerického výrobce DOW, jejich vlastnosti jsou uvedeny v následujících tabulkách. (Tab. 6. a 7.)

7.1 Nízkohustotní polyetylen: LDPE DOW 780E

Jedná se o materiál, který je snadno zpracovatelný vstřikováním, teplota taveniny se pohybuje rozmezí od 140 do 250 °C, vstřikovací tlak 50 MPa až 150 MPa a teplota formy je v rozsahu 10 až 50 °C. [23]

Tab. 6. Materiálový list LDPE DOW 780E. [23]

| Materiál | LDPE DOW 780E | |
|----------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Fyzikální vlastnosti | | |
| Hustota | 0,923 | g.cm ⁻³ |
| Smrštění v podélném směru | 2,3 | % |
| Smrštění v příčném směru | 1,5 | % |
| Délka toku ve spirále (1200 bar) | 8,5 | cm |
| Index toku (190 °C/2,16 kg) | 20 g.10 min ⁻¹ | |
| Mechanické vlastnosti | | |
| 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 | | |
| Teplota měknutí (dle Vicata) | 93 | °C |

7.2 Vysokohustotní polyetylen: HDPE DOW 25055E

Také se jedná o materiál, který je snadno zpracovatelný vstřikováním, jež je vyvinutý pro předání výborných mechanických vlastností a vyznačuje se vysokým povrchovým leskem vstřikovaných dílů. Jeho oblast použití lze nalézt v potravinářských obalech či výrobcích pro domácí potřeby. [24]

Tab. 7. Materiálový list HDPE DOW 25055E. [24]

| Materiál | | HDPE DOW 25055E |
|----------------------------------|--|-------------------------------|
| Fyzikální vlastnosti | | |
| Hustota | 0,953 | $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ |
| Smrštění v podélném směru | 2,1 | % |
| Smrštění v příčném směru | - | % |
| Délka toku ve spirále (1200 bar) | 109 | cm |
| Index toku (190 °C/2,16 kg) | 25 $\text{g}\cdot 10 \text{ min}^{-1}$ | |
| Mechanické vlastnosti | | |
| 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 | | |
| Teplota měknutí (dle Vicata) | 124 | °C |

8 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

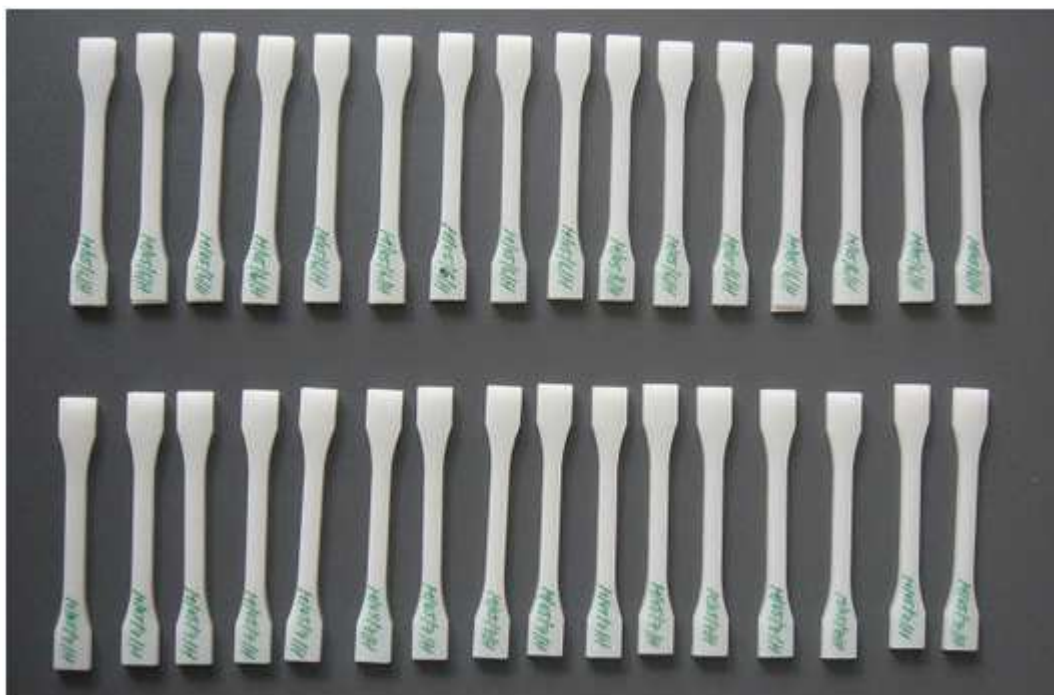
Zkušební tělesa (Obr. 20), která byla použita pro provedení mechanických zkoušek, byla vystříknuta na vstřikovacím stroji ARBURG 420C (Obr. 12) ve vstřikovací formě pro výrobu normovaných zkušebních těles (Obr. 21). Vystříknuta byla tělesa jak pro tahovou zkoušku, tak pro zkoušku rázové houževnatosti. Po ochlazení výstřiků byly pomocí štípacích kleští odstraněny nepotřebné vtokové zbytky od zkušebních těles. Následně tělesa byla systematicky roztríděna a popsána pro snadnou manipulaci pro nadcházející měření (Obr. 22).



Obr. 20. Vystříknutá zkušební tělesa pro rázovou houževnatost.



Obr. 21. Dutina vstřikovací formy na normovaná tělesa pro tahovou zkoušku.



Obr. 22. Roztříděná a popsaná tělesa pro rázovou zkoušku v tahu.

Po vyrobení a roztřídění zkušebních těles následovala modifikace radiačním síťováním, která byla provedena v německé společnosti BGS Beta – Gamma – Service GmbH (Obr. 23) v dávkách ozáření 33, 66, 99, 132, 165 a 198kGy avšak pro následná měření byla použita i tělesa bez modifikace dávky ozáření (0 kGy).

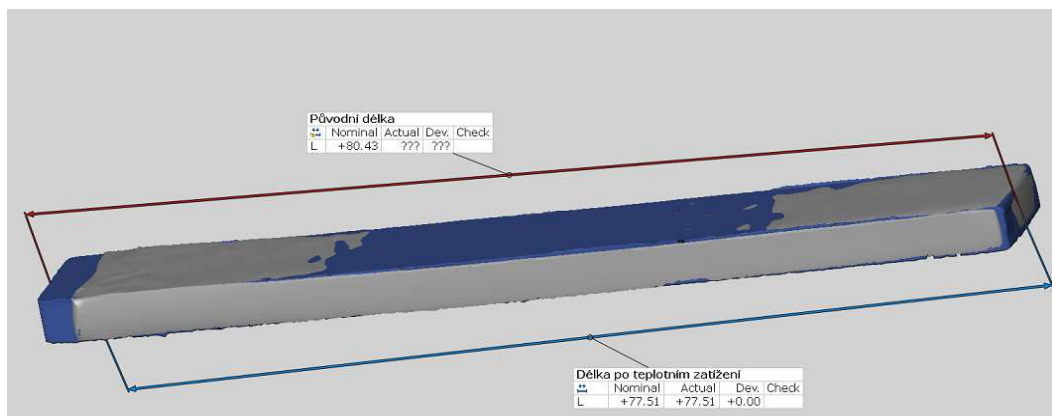


Obr. 23. Sídlo společnosti BGS-Beta Gamma Service GmbH.

Poté následovalo teplotní zatěžování zkušebních těles v horkovzdušné komoře MORA 4807 (Obr. 13). Tělesa byla teplotně zatěžována 1 hodinu, materiál LDPE při teplotách 90 a 140°C a materiál HDPE při teplotách 110 a 160°C.

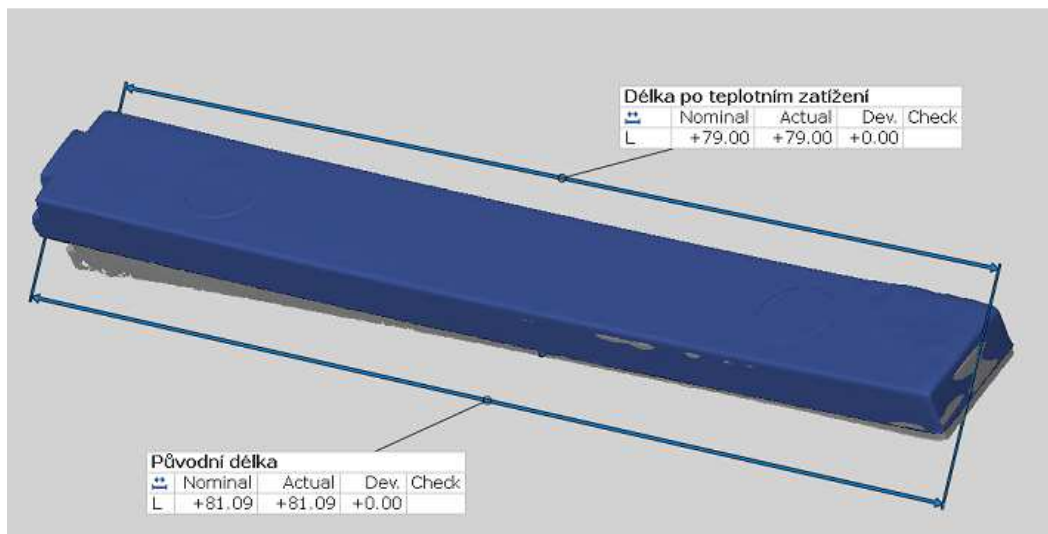
Po teplotním zatěžování došlo u těles jak z materiálu LDPE, tak HDPE k rozměrovým změnám, které jsou patrné na fotografiích z 3D skeneru (Obr. 24, Obr. 25).

- Těleso LDPE 99kGy 140°C - Původní rozměr: L=80,43 mm, rozměr po teplotním zatížení: L=77,51 mm.



Obr. 24. Změna rozměrů tělesa LDPE s dávkou ozáření 99kGy po teplotním zatížení 140°C.

- Těleso HDPE 198kGy 160°C - Původní rozměr: L=81,09mm, Rozměr po teplotním zatížení: L=79,00 mm.



Obr. 25. Změna rozměrů tělesa HDPE s dávkou ozáření 198kGy po teplotním zatížení 160°C

Po uplynutí 1 hodiny došlo k ochlazení těles na pokojovou teplotu (23°C) a při této teplotě byly provedeny mechanické zkoušky.

9 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Naměřené hodnoty z měřících zařízení byly zaznamenány do tabulek a grafů. U hodnot byl následně stanoven aritmetický průměr (Rov. 1) a směrodatná odchylka (Rov. 2).

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

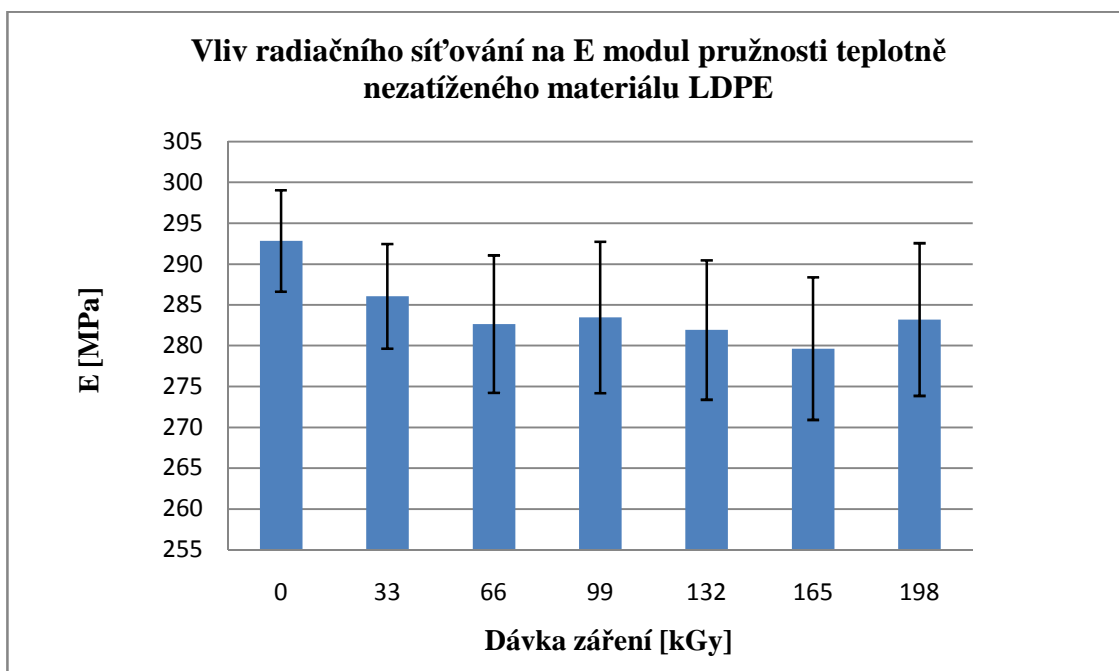
$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

9.1 Tahová zkouška

9.1.1 Výsledky tahových zkoušek u teplotně nezatěžovaného materiálu LDPE

Tab. 8. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (E - modul pružnosti) [MPa] | s ± |
|-----------------------|--|--------|
| 0 | 292,8 | 6,2 |
| 33 | 286,1 | 6,4 |
| 66 | 282,7 | 8,4 |
| 99 | 283,5 | 9,9 |
| 132 | 281,9 | 8,5 |
| 165 | 279,6 | 8,7 |
| 198 | 283,2 | 9,3 |

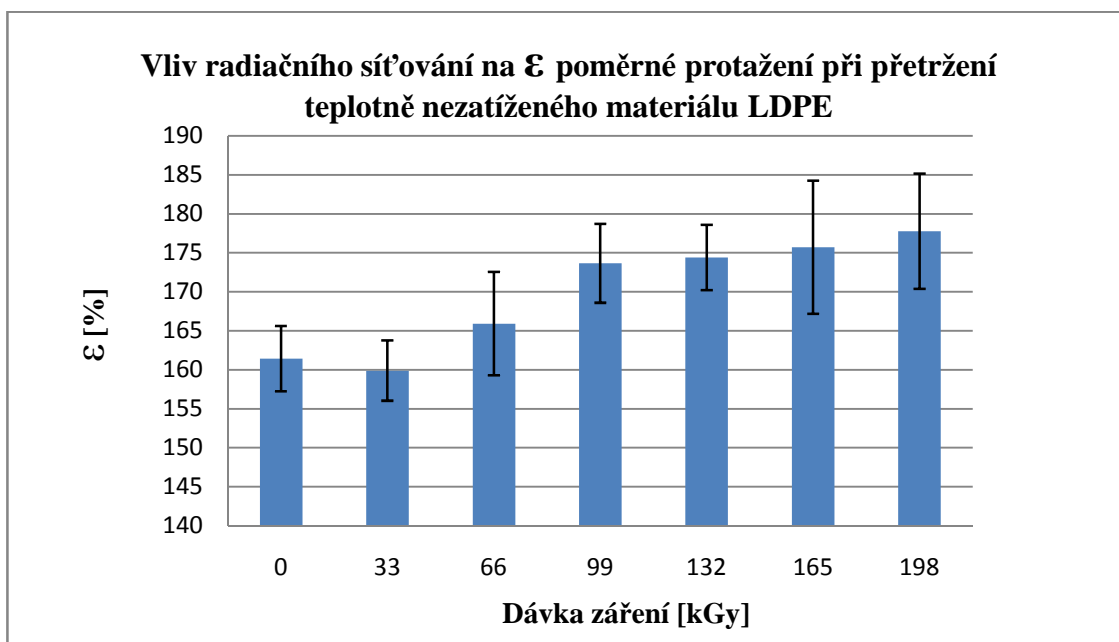


Obr. 26. Závislost modulu pružnosti na hodnotě radiačního síťování u teplotně nezátížených těles.

Největší naměřená hodnota modulu pružnosti byla zjištěna u základních neozářených těles a to $E=292,8\text{MPa}$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených hodnotou 165kGy $E=279,6\text{MPa}$ (Tab. 8, Obr. 26).

Tab. 9. Průměrné hodnoty poměrného protažení při přetržení v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezátížených těles.

| Dávka záření [kGy] | $\bar{\epsilon}$ (ϵ - poměrné protažení při přetržení) [%] | s \pm |
|--------------------|--|---------|
| 0 | 161,4 | 4,2 |
| 33 | 159,9 | 3,9 |
| 66 | 165,9 | 6,6 |
| 99 | 173,6 | 5,1 |
| 132 | 174,4 | 4,2 |
| 165 | 175,7 | 8,5 |
| 198 | 177,8 | 7,4 |

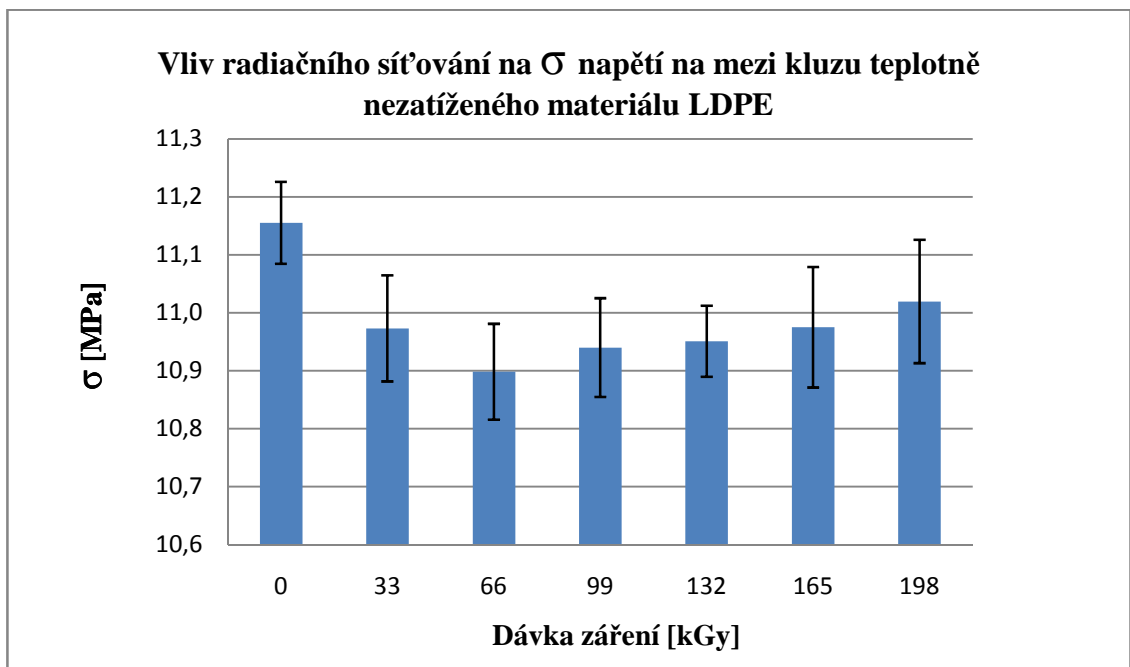


Obr. 27. Závislost poměrného protažení při přetržení na hodnotě radičního sít'ování u teplotně nezatěžovaných těles.

Největší naměřená hodnota poměrného protažení při přetržení byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 198kGy a to $\epsilon=177,8\%$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených hodnotou 33kGy $\epsilon=159,9\%$ (Tab. 9, Obr. 27).

Tab. 10. Průměrné hodnoty napětí na mezi kluzu v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (σ -napětí na mezi kluzu) [MPa] | s ± |
|-----------------------|--|--------|
| 0 | 11,2 | 0,1 |
| 33 | 11,0 | 0,1 |
| 66 | 10,9 | 0,1 |
| 99 | 10,9 | 0,1 |
| 132 | 11,0 | 0,1 |
| 165 | 11,0 | 0,1 |
| 198 | 11,0 | 0,1 |

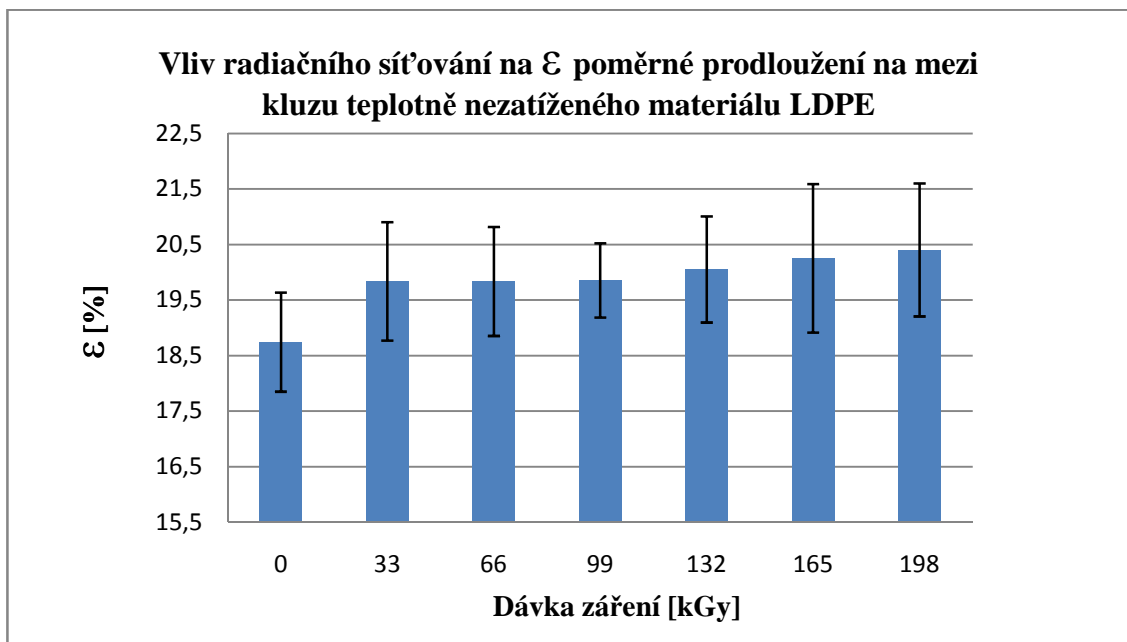


Obr. 28. Závislost napětí na mezi kluzu na hodnotě radičního sít'ování u teplotně nezatížených těles.

Největší naměřená hodnota napětí na mezi kluzu byla zjištěna u neozářených těles a to $\sigma=11,2\text{MPa}$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených hodnotou 66kGy $\sigma=10,9\text{MPa}$ (Tab. 10, Obr. 28).

Tab. 11. Průměrné hodnoty poměrného protažení na mezi kluzu v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatížených těles.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (ε – poměrné protažení na mezi kluzu) [%] | s ± |
|-----------------------|--|--------|
| 0 | 18,7 | 0,9 |
| 33 | 19,8 | 1,1 |
| 66 | 19,8 | 1,0 |
| 99 | 19,9 | 0,7 |
| 132 | 20,1 | 1,0 |
| 165 | 20,3 | 1,3 |
| 198 | 20,4 | 1,2 |



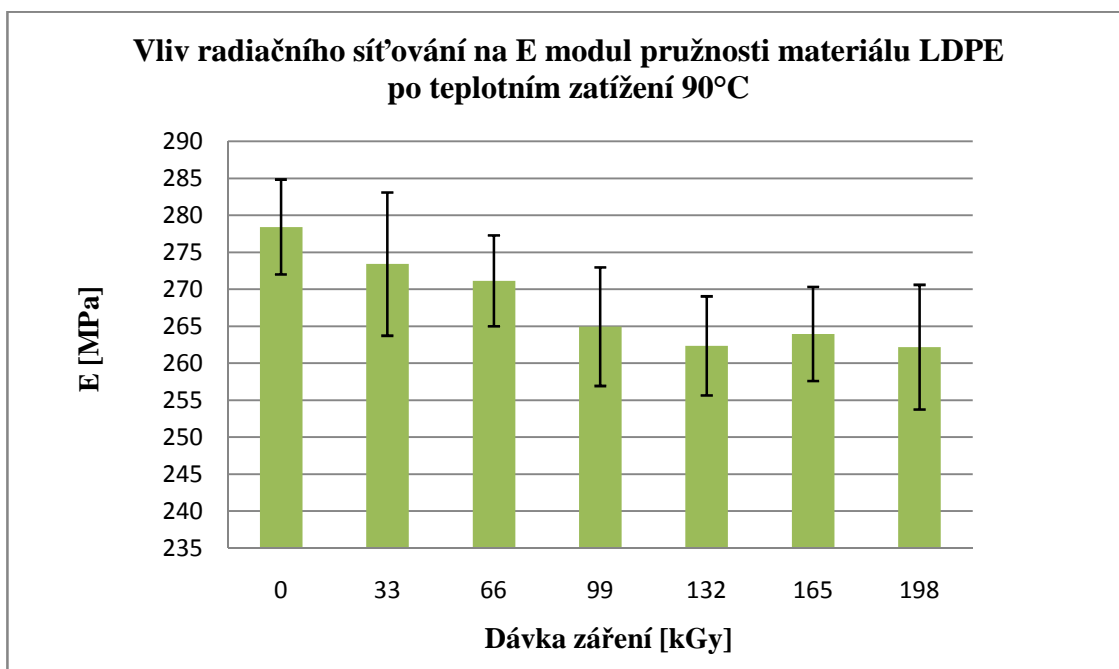
Obr. 29. Závislost poměrného prodloužení na mezi kluzu na hodnotě radičního sítování u teplotně nezatěžovaných těles.

Největší naměřená hodnota poměrného prodloužení byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 198kGy to $\varepsilon=20,4$ MPa, naopak nejnižší hodnota u základních neozářených těles $\varepsilon=18,7$ MPa (Tab. 11, Obr. 29).

9.1.2 Výsledky tahových zkoušek materiálu LDPE po teplotním zatížení 90°C

Tab. 12. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 90°C.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (E - modul pružnosti) [MPa] | s ± |
|--------------------|--|-----|
| 0 | 278,4 | 6,4 |
| 33 | 273,4 | 9,7 |
| 66 | 271,1 | 6,1 |
| 99 | 264,9 | 8,0 |
| 132 | 262,4 | 6,7 |
| 165 | 264,0 | 6,4 |
| 198 | 262,2 | 8,4 |

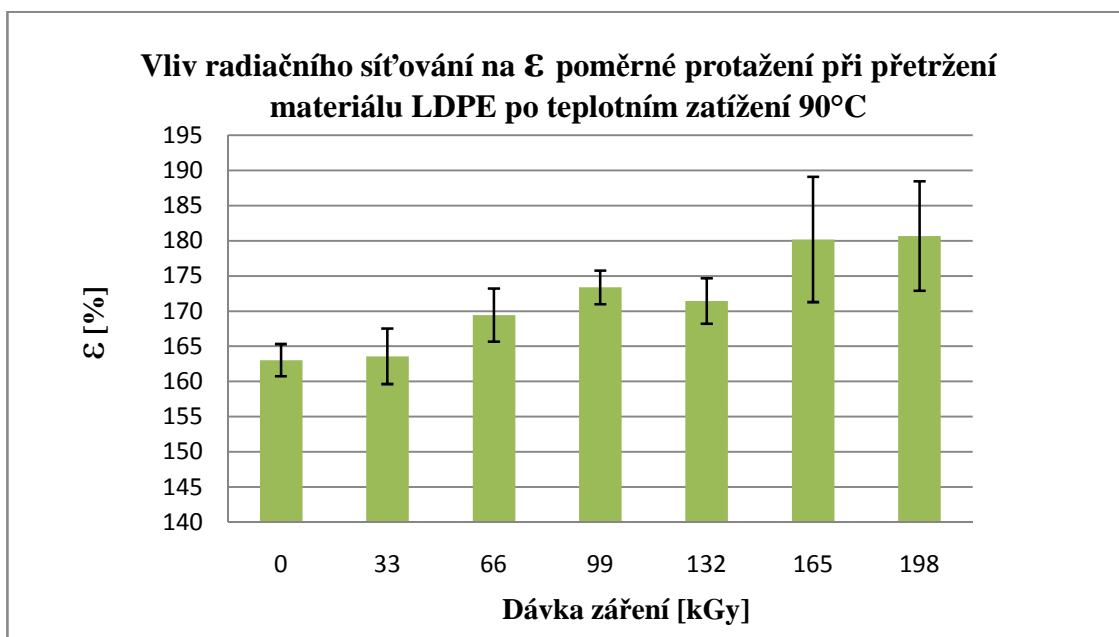


Obr. 30. Závislost modulu pružnosti na hodnotě radiačního sít'ování u těles po teplotním zatížení 90°C.

Největší naměřená hodnota modulu pružnosti u těles po teplotním zatížení 90°C byla zjištěna u základních neozářených těles a to $E=278,4\text{MPa}$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených hodnotou 165kGy $E=262,2\text{MPa}$ (Tab. 12, Obr. 30).

Tab. 13. Průměrné hodnoty poměrné protažení při přetržení v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 90°C.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (ϵ - protažení při přetržení) [%] | s \pm |
|--------------------|---|---------|
| 0 | 163,0 | 2,3 |
| 33 | 163,6 | 3,9 |
| 66 | 169,4 | 3,8 |
| 99 | 173,4 | 2,4 |
| 132 | 171,4 | 3,2 |
| 165 | 180,2 | 8,9 |
| 198 | 180,7 | 7,8 |

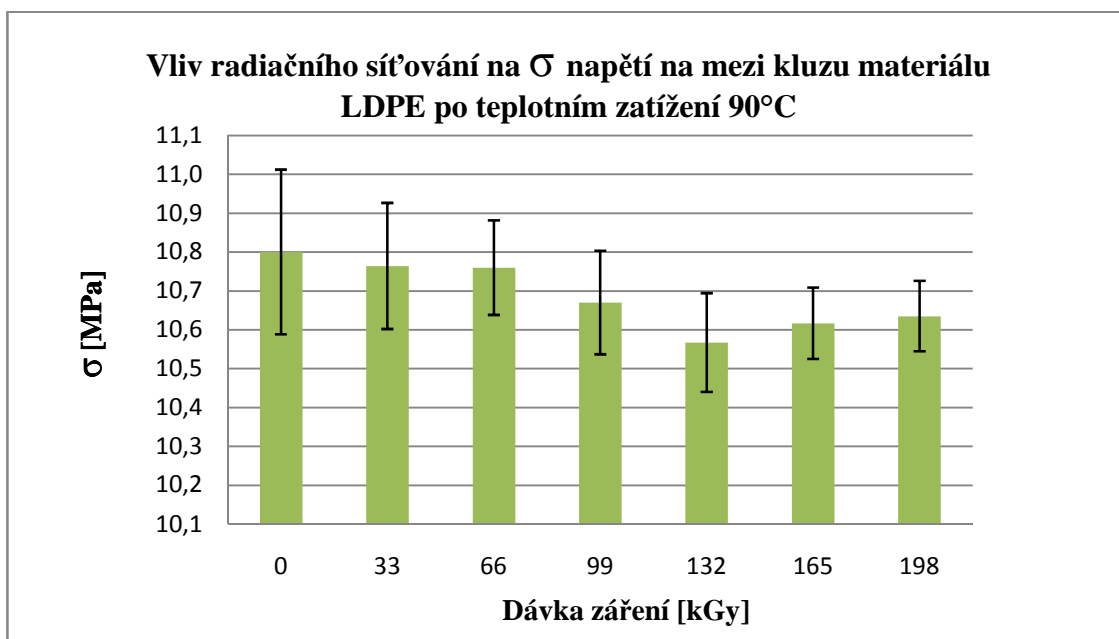


Obr. 31. Závislost poměrného protažení při přetržení na hodnotě radičního sít'ování u těles po teplotním zatížení 90°C

Největší naměřená hodnota poměrného protažení při přetržení u těles po teplotním zatížení 90°C byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 198kGy a to $\epsilon=180,7\%$, naopak nejnižší hodnota u neozářených těles $\epsilon =163\%$ (Tab. 13, Obr. 31).

Tab. 14. Průměrné hodnoty napětí na mezi kluzu v závislosti na dávce ozáření u těles teplotně zatěžovaných 90°C.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (σ -napětí na mezi kluzu) [MPa] | s \pm |
|--------------------|---|---------|
| 0 | 10,8 | 0,2 |
| 33 | 10,8 | 0,2 |
| 66 | 10,8 | 0,1 |
| 99 | 10,7 | 0,1 |
| 132 | 10,6 | 0,1 |
| 165 | 10,6 | 0,1 |
| 198 | 10,6 | 0,1 |

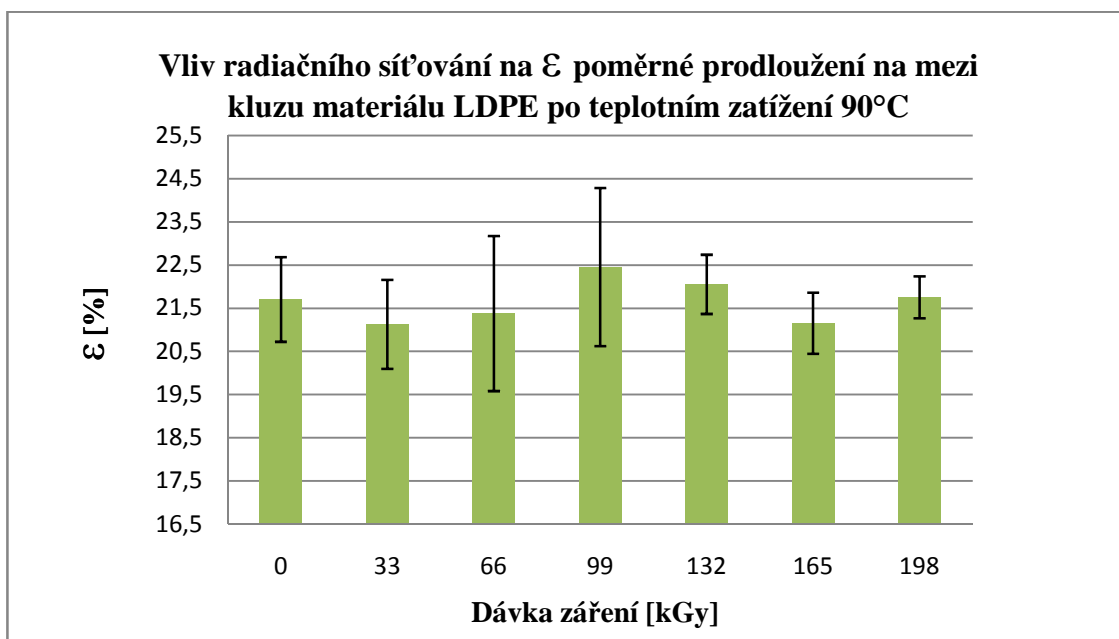


Obr. 32. Závislost napětí na mezi kluzu na hodnotě radičního sít'ování u těles po teplotním zatížení 90°C.

Největší naměřená hodnota napětí na mezi kluzu u těles po teplotním zatížení 90°C byla zjištěna u neozářených těles a to $\sigma=10,8\text{MPa}$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených hodnotou 132kGy $\sigma=10,6\text{MPa}$ (Tab. 14, Obr. 32).

Tab. 15. Průměrné hodnoty poměrného prodloužení na mezi kluzu v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 90°C.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (ε – poměrné prodloužení na mezi kluzu) [%] | s [-] |
|--------------------|--|-------|
| 0 | 21,7 | 1,0 |
| 33 | 21,1 | 1,0 |
| 66 | 21,4 | 1,8 |
| 99 | 22,5 | 1,8 |
| 132 | 22,1 | 0,7 |
| 165 | 21,2 | 0,7 |
| 198 | 21,8 | 0,5 |



Obr. 33. Závislost poměrného prodloužení na mezi kluzu na hodnotě radičního sít'ování u těles po teplotním zatížení 90°C.

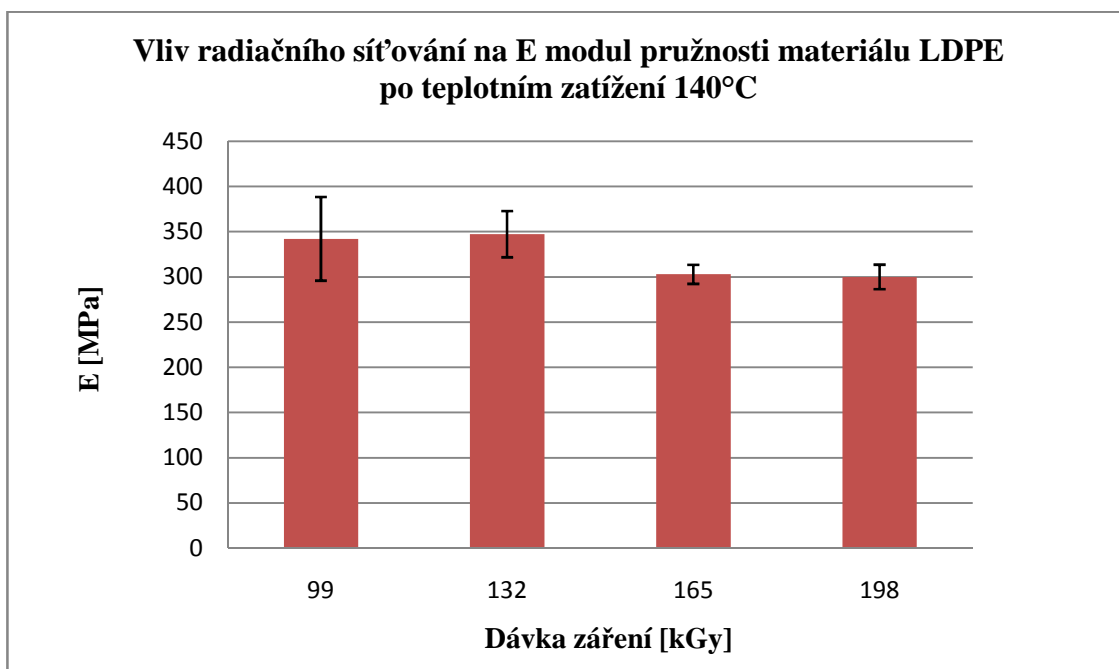
Největší naměřená hodnota poměrného prodloužení u těles po teplotním zatížení těles 90°C byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 99kGy a to $\varepsilon=22,5\%$, naopak nejnižší hodnota u těles s hodnotou ozáření 33kGy $\varepsilon=21,1\%$ (Tab. 15, Obr. 33).

9.1.3 Výsledky tahových zkoušek materiálu LDPE po teplotním zatížení 140°C

U těles z materiálu LDPE po teplotním zatížení teplotou 140°C, bylo po ohřevu možné z důvodů tvarových změn použít pouze tělesa ozářená hodnotou 99, 132, 165 a 198 kGy.

Tab. 16. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 140°C.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (E - modul pružnosti) [MPa] | s ± |
|-----------------------|---|--------|
| 0 | - | - |
| 33 | - | - |
| 66 | - | - |
| 99 | 342,1 | 46,2 |
| 132 | 347,3 | 25,6 |
| 165 | 302,9 | 10,6 |
| 198 | 300,0 | 13,6 |

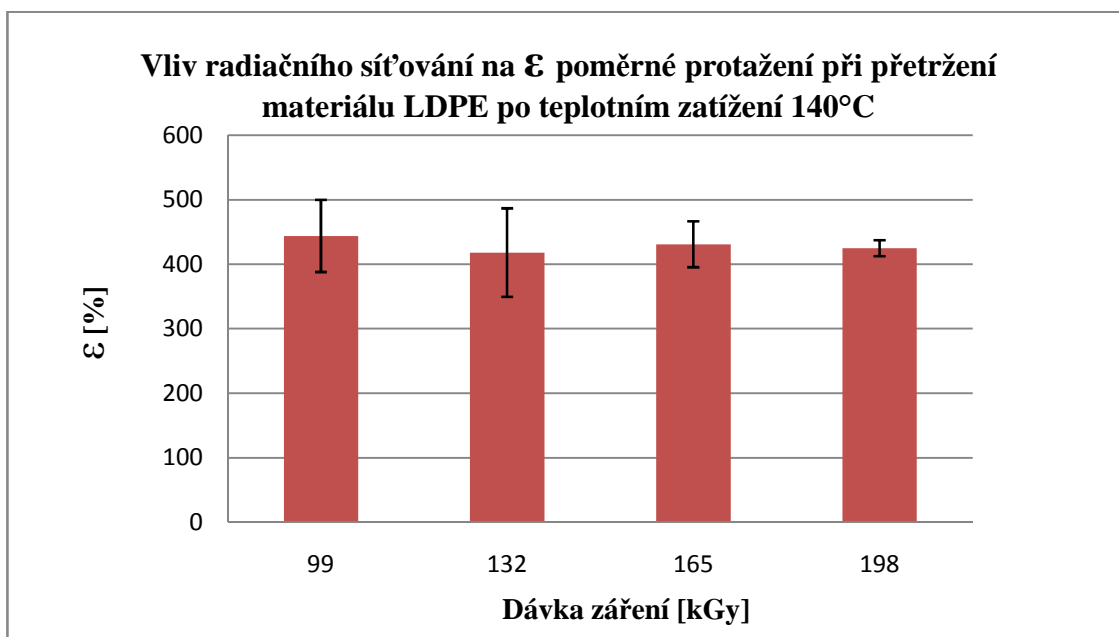


Obr. 34. Závislost modulu pružnosti na hodnotě radiačního sít'ování u těles po teplotním zatížení 140°C.

Největší naměřená hodnota modulu pružnosti u těles po teplotním zatížení 140°C byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 132kGy a to $E=347,3\text{MPa}$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených hodnotou 198kGy $E=300\text{MPa}$ (Tab. 16, Obr. 34).

Tab. 17. Průměrné hodnoty poměrného protažení při přetržení v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 140°C.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (ε – poměrné protažení při přetržení) [%] | s ± |
|-----------------------|--|--------|
| 0 | - | - |
| 33 | - | - |
| 66 | - | - |
| 99 | 443,7 | 55,8 |
| 132 | 417,9 | 68,6 |
| 165 | 430,9 | 35,6 |
| 198 | 424,8 | 12,4 |

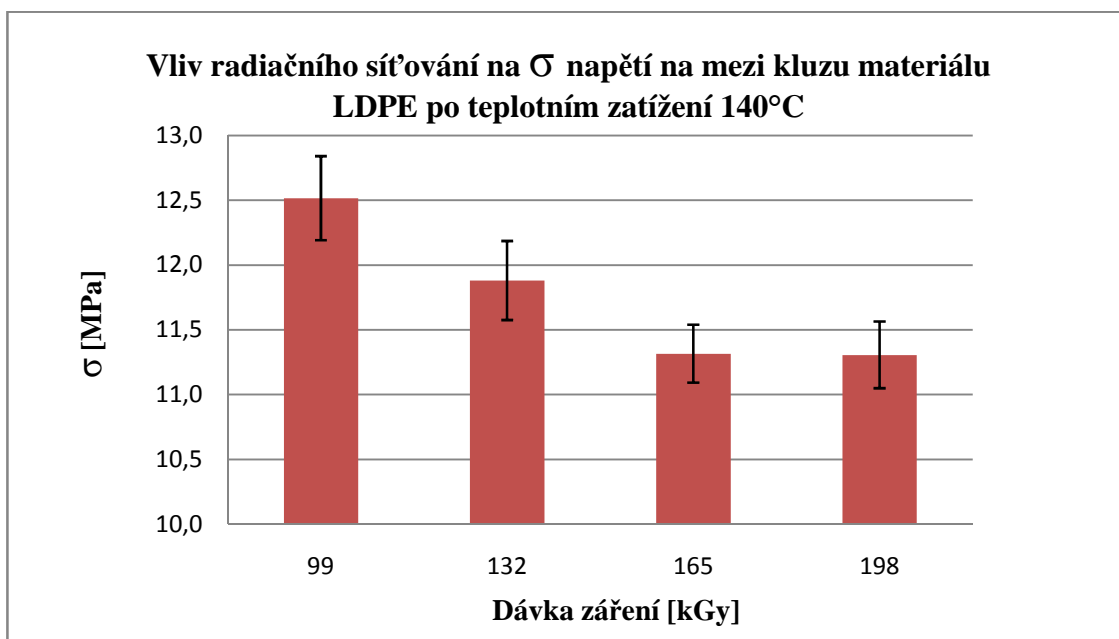


Obr. 35. Závislost poměrného protažení při přetržení na hodnotě radičního sít'ování u těles po teplotním zatížení 140°C

Největší naměřená hodnota poměrného protažení při přetržení u těles po teplotním zatížení 140°C byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 99kGy a to $\epsilon=443,7\%$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených 132kGy $\epsilon=417,9\%$ (Tab. 17, Obr. 35).

Tab. 18. Průměrné hodnoty napětí na mezi kluzu v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 140°C.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (σ -napětí na mezi kluzu) [MPa] | s \pm |
|--------------------|---|---------|
| 0 | - | - |
| 33 | - | - |
| 66 | - | - |
| 99 | 12,5 | 0,3 |
| 132 | 11,9 | 0,3 |
| 165 | 11,3 | 0,2 |
| 198 | 11,3 | 0,3 |

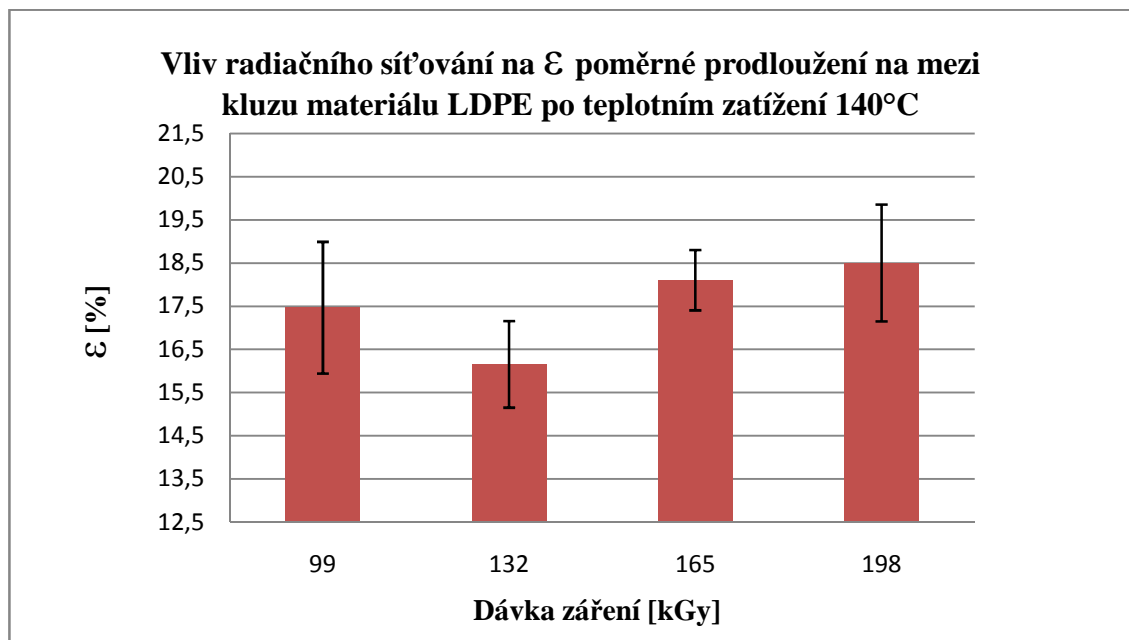


Obr. 36. Závislost napětí na mezi kluzu na hodnotě radičního sít'ování u těles po teplotním zatížení 140°C.

Největší naměřená hodnota napětí na mezi kluzu u těles po teplotním zatížení 160°C byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 99kGy a to $\sigma=12,5\text{MPa}$, naopak nejnižší hodnota u těles s hodnotou ozáření 198kGy $\sigma =11,3\text{MPa}$ (Tab. 18, Obr. 36).

Tab. 19. Průměrné hodnoty poměrného prodloužení na mezi kluzu v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 140°C.

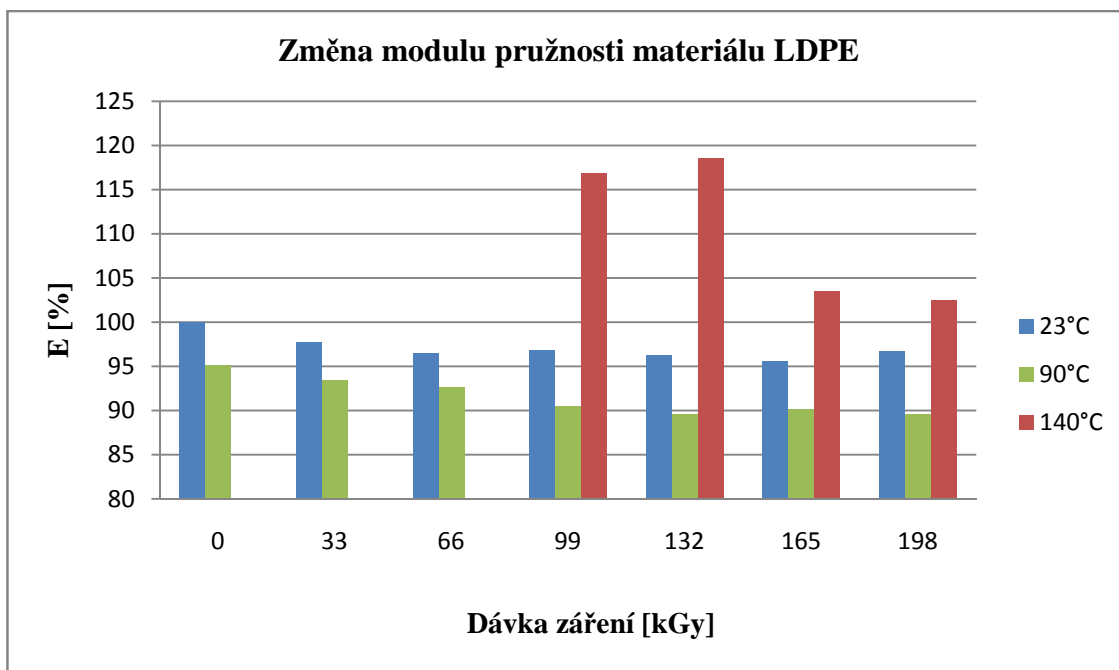
| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (ε – poměrné prodloužení na mezi kluzu) [%] | s ± |
|-----------------------|--|--------|
| 0 | - | - |
| 33 | - | - |
| 66 | - | - |
| 99 | 17,5 | 1,5 |
| 132 | 16,2 | 1,0 |
| 165 | 18,1 | 0,7 |
| 198 | 18,5 | 1,4 |



Obr. 37. Závislost poměrného prodloužení na mezi kluzu na hodnotě radičního sítování u těles po teplotním zatížení 140°C.

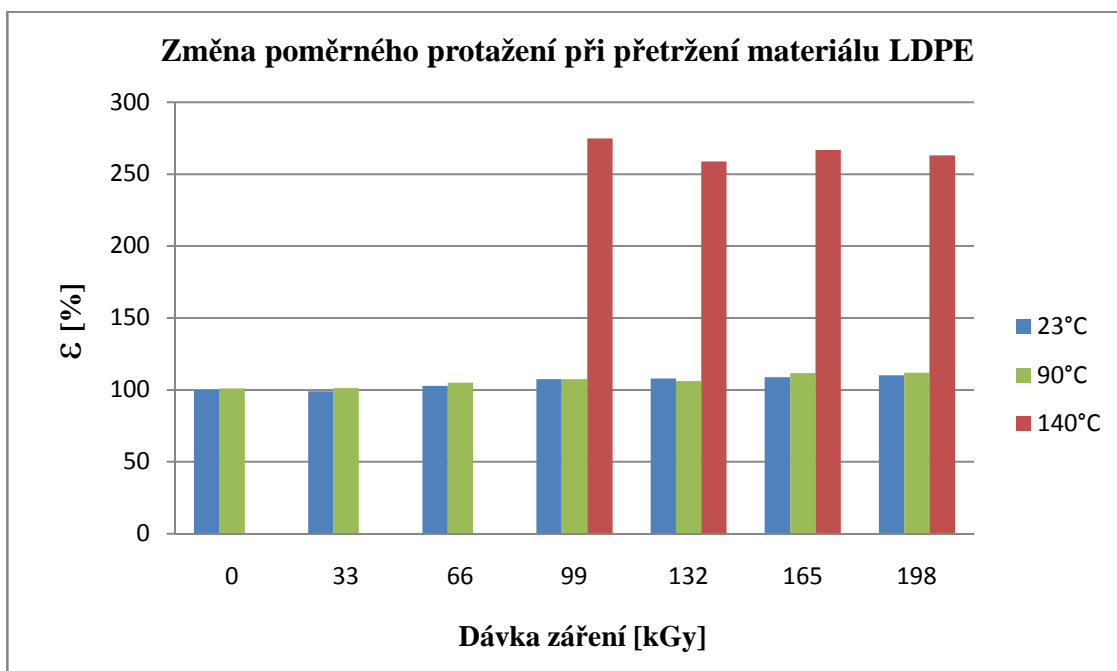
Největší naměřená hodnota poměrného prodloužení u těles po teplotním zatížení 140°C byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 198kGy a to $\epsilon=18,5\%$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených 132kGy $\epsilon=16,2\%$ (Tab. 19, Obr. 37).

9.1.4 Srovnání výsledků tahových zkoušek materiálu LDPE



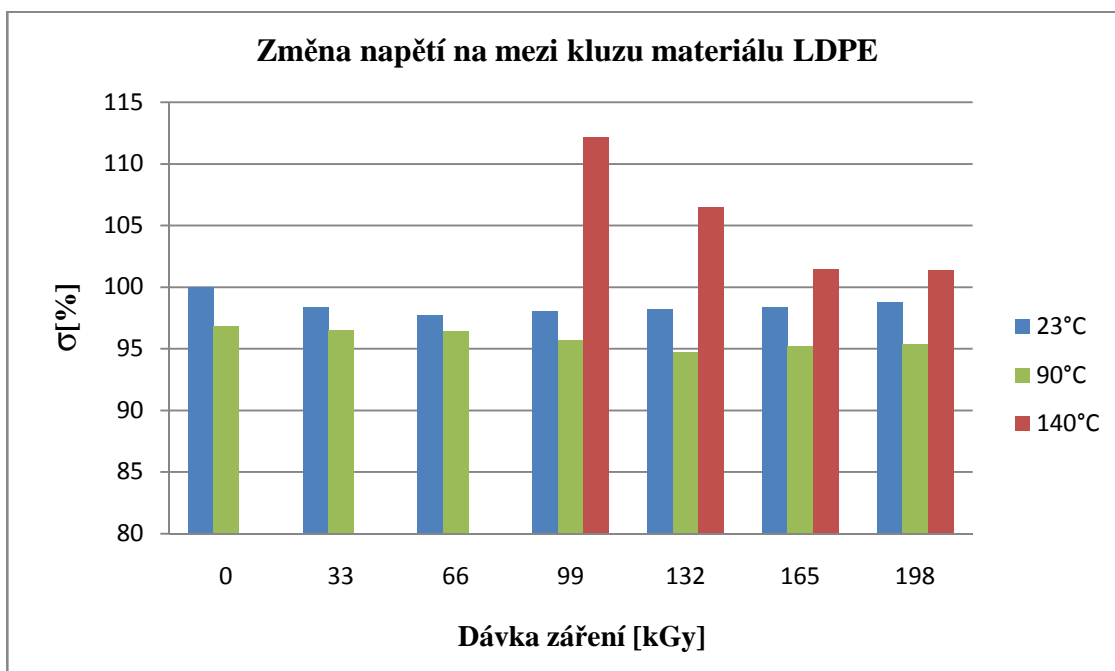
Obr. 38. Srovnání všech hodnot modulu pružnosti materiálu LDPE

Při srovnání všech výsledků modulu pružnosti materiálu LDPE všech teplotně zatěžovaných i nezatěžovaných těles bylo zjištěno, že nejvyšších naměřených hodnot dosahují tělesa, která byla teplotně zatěžována 140°C s hodnotou ozáření 132kGy a to $E=347,3\text{MPa}$, což je o 18,6% více než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa. Naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny u těles teplotně zatěžovaných 90°C s hodnotou ozáření 198kGy $E=262,2\text{MPa}$, což je o 8,4% méně než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa (Tab. 12, Tab. 16, Obr. 30, Obr. 34, Obr. 38).



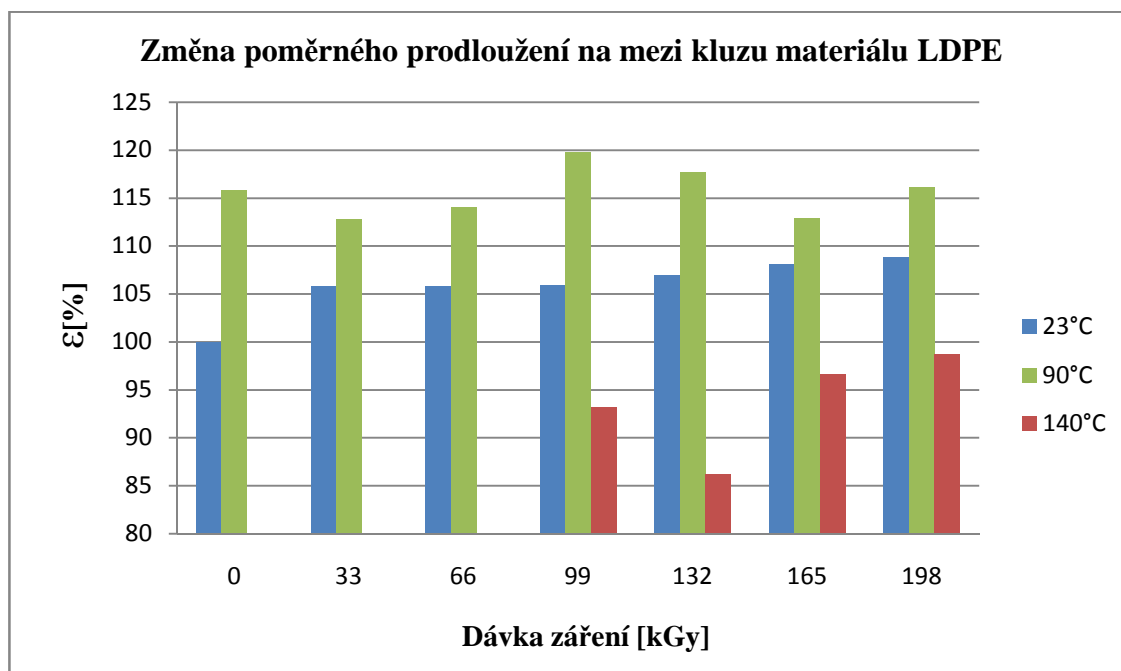
Obr. 39. Srovnání všech hodnot poměrného protažení při přetržení materiálu LDPE

Při srovnání všech výsledků poměrného protažení při přetržení materiálu LDPE všech teplotně zatěžovaných i nezatěžovaných těles bylo zjištěno, že nejvyšších naměřených hodnot dosahují tělesa teplotně namáhaná 160°C s hodnotou ozáření 99kGy a to $\epsilon=443,7\%$, což je o 174,9% více než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa. Naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny u teplotně nezatěžovaných těles s hodnotou ozáření 33kGy u kterých byly naměřeny hodnoty $\epsilon=159,9\%$ což je o 0,5% méně než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa (Tab. 9, Tab. 17, Obr. 27, Obr. 35, Obr. 39).



Obr. 40. Srovnání všech hodnot napětí na mezi kluzu materiálu LDPE

Při srovnání všech výsledků napětí na mezi kluzu materiálu LDPE všech teplotně zatěžovaných i nezatěžovaných těles bylo zjištěno, že nejvyšších naměřených hodnot dosahují teplotně zatěžovaná tělesa 140°C s hodnotou ozáření 99kGy a to $\sigma=12,5\text{MPa}$, což je o 12,2% více než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa. Naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny u těles, která byla teplotně zatěžována 90°C s hodnotou ozáření 132kGy $\sigma =10,6\text{MPa}$, což je o 5,3% méně než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa (Tab. 14, Tab. 18, Obr. 32, Obr. 36, Obr. 40).



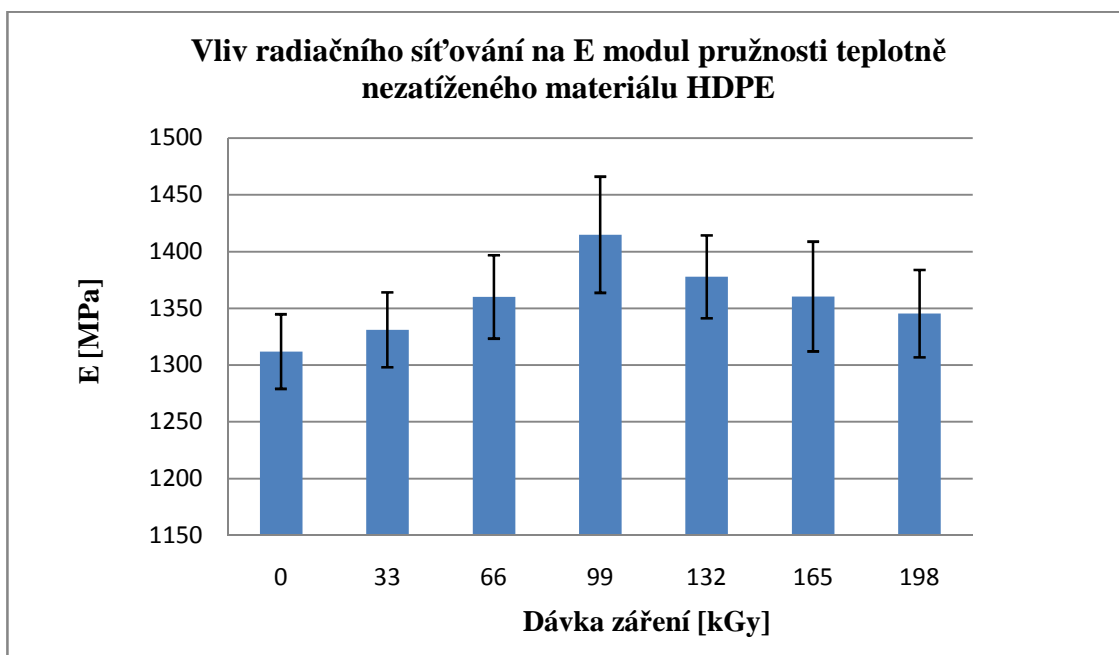
Obr. 41. Srovnání všech hodnot poměrného prodloužení na mezi kluzu materiálu LDPE

Při srovnání všech výsledků poměrného prodloužení na mezi kluzu materiálu LDPE všech teplotně zatěžovaných i nezatěžovaných těles bylo zjištěno, že nejvyšších naměřených hodnot dosahují teplotně zatěžovaná tělesa 90°C s hodnotou ozáření 99kGy a to $\varepsilon=22,5\%$, což je o 19,8% více než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa. Naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny u těles, která byla teplotně zatěžována 140°C s hodnotou ozáření 132kGy $\varepsilon=16,2\%$, což je o 13,8% méně než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa (Tab. 15, Tab. 19, Obr. 33, Obr. 37, Obr. 41).

9.1.5 Výsledky tahových zkoušek u teplotně nezatěžovaného materiálu HDPE

Tab. 20. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (E - modul pružnosti) [MPa] | s ± |
|--------------------|--|------|
| 0 | 1311,9 | 32,9 |
| 33 | 1331,1 | 33,0 |
| 66 | 1360,1 | 36,8 |
| 99 | 1414,9 | 51,2 |
| 132 | 1377,8 | 36,6 |
| 165 | 1360,4 | 48,4 |
| 198 | 1345,3 | 38,6 |

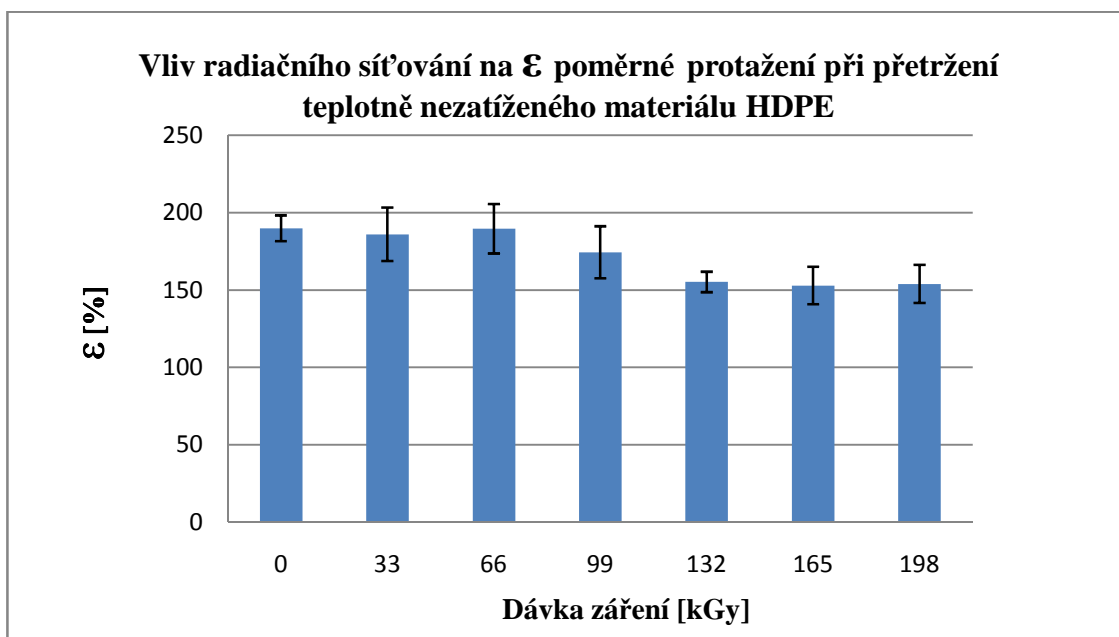


Obr. 42. Závislost modulu pružnosti na hodnotě radiačního síťování u teplotně nezátížených těles.

Největší naměřená hodnota modulu pružnosti byla zjištěna u těles s hodnotou ozáření 99kGy a to $E=1414,9\text{MPa}$, naopak nejnižší hodnota byla zjištěna u základních neozářených těles $E=1311,9\text{MPa}$ (Tab. 20, Obr. 42).

Tab. 21. Průměrné hodnoty poměrného protažení při přetržení v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezátížených těles.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (ϵ – poměrné protažení při přetržení) [%] | s ± |
|-----------------------|---|--------|
| 0 | 189,8 | 8,3 |
| 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 |

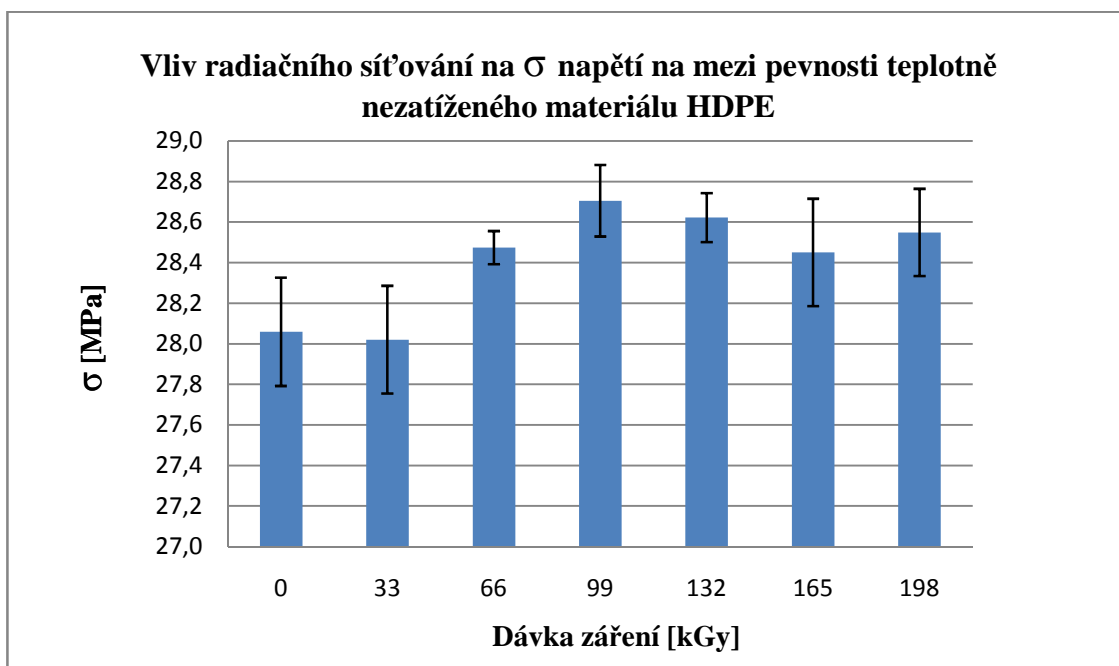


Obr. 43 Závislost poměrného protažení při přetržení na hodnotě radiačního sít'ování u teplotně nezatěžovaných těles.

Největší naměřená hodnota poměrného protažení při přetržení byla zjištěna u základních neozářených těles a to $\varepsilon=189,8\%$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených hodnotou 165kGy $\varepsilon=152,9\%$ (Tab. 21, Obr. 43).

Tab. 22. Průměrné hodnoty napětí na mezi pevnosti v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (σ -napětí na mezi pevnosti) [MPa] | s ± |
|-----------------------|---|--------|
| 0 | 28,1 | 0,3 |
| 33 | 28,0 | 0,3 |
| 66 | 28,5 | 0,1 |
| 99 | 28,7 | 0,2 |
| 132 | 28,6 | 0,1 |
| 165 | 28,5 | 0,3 |
| 198 | 28,5 | 0,2 |



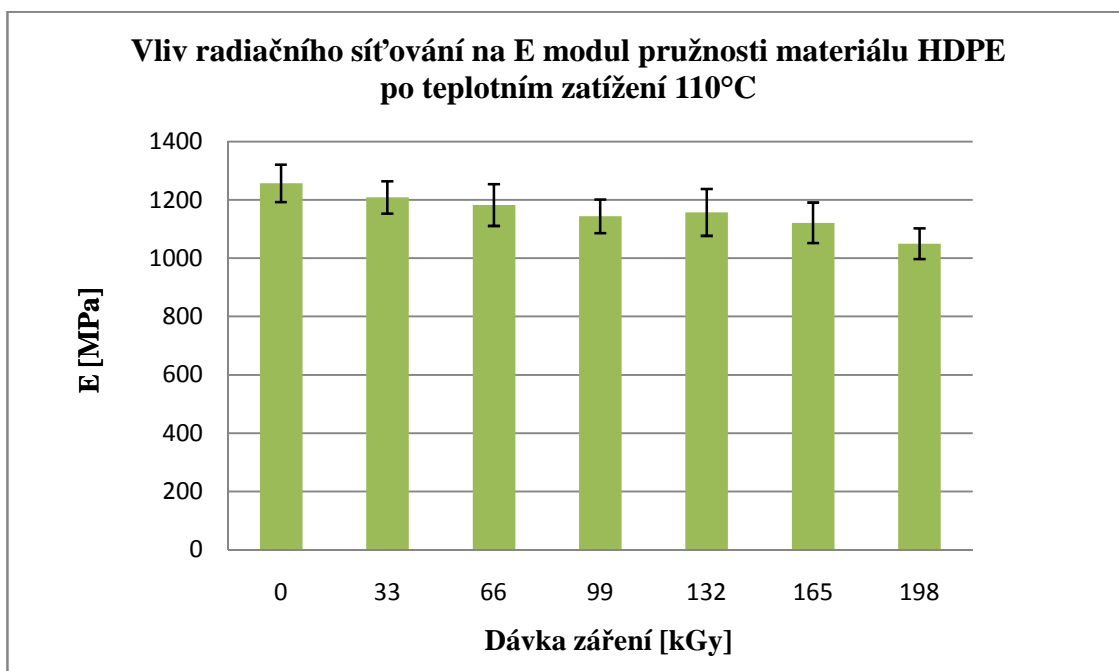
Obr. 44. Závislost napětí na mezi pevnosti na hodnotě radičního sít'ování u teplotně nezatěžovaných těles.

Největší naměřená hodnota napětí na mezi pevnosti byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 99kGy a to $\sigma=28,7\text{MPa}$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených hodnotou 33kGy $\sigma =28\text{MPa}$ (Tab. 22, Obr. 44).

9.1.6 Výsledky tahových zkoušek materiálu HDPE teplotně zatíženého 110°C

Tab. 23. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na dávce ozáření u těles teplotně zatěžovaných 110°C.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (E - modul pružnosti) [MPa] | s ± |
|-----------------------|---|--------|
| 0 | 1256,8 | 64,2 |
| 33 | 1208,5 | 55,3 |
| 66 | 1182,4 | 71,5 |
| 99 | 1144,0 | 57,5 |
| 132 | 1157,3 | 80,5 |
| 165 | 1121,5 | 69,5 |
| 198 | 1049,7 | 52,8 |

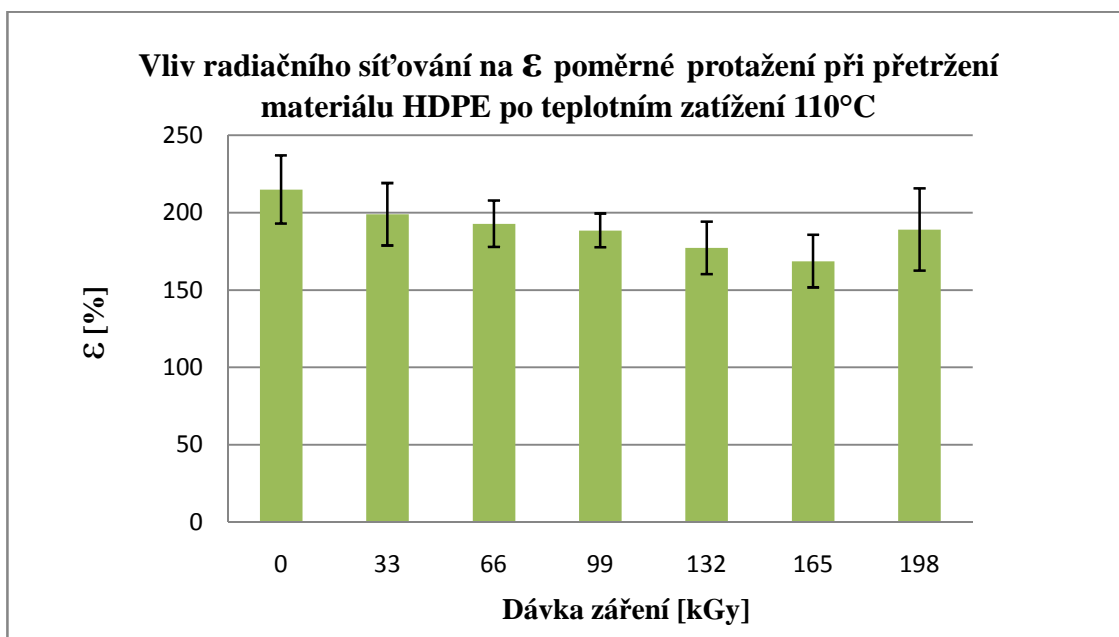


Obr. 45. Závislost modulu pružnosti na hodnotě radiačního sít'ování u těles po teplotním zatížení 110°C.

Největší naměřená hodnota modulu pružnosti u těles po teplotním zatížení 110°C byla zjištěna u základních neozářených těles a to $E=1256,8\text{MPa}$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených hodnotou 198kGy $E=1049,7\text{MPa}$ (Tab. 23, Obr. 45).

Tab. 24. Průměrné hodnoty poměrného protažení při přetržení v závislosti na dávce ozáření u těles teplotně zatěžovaných 110°C.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (ε – poměrné protažení při přetržení) [%] | s ± |
|-----------------------|--|--------|
| 0 | 214,9 | 22,0 |
| 33 | 198,9 | 20,1 |
| 66 | 192,8 | 15,0 |
| 99 | 188,5 | 10,9 |
| 132 | 177,1 | 16,9 |
| 165 | 168,6 | 17,0 |
| 198 | 189,1 | 26,5 |

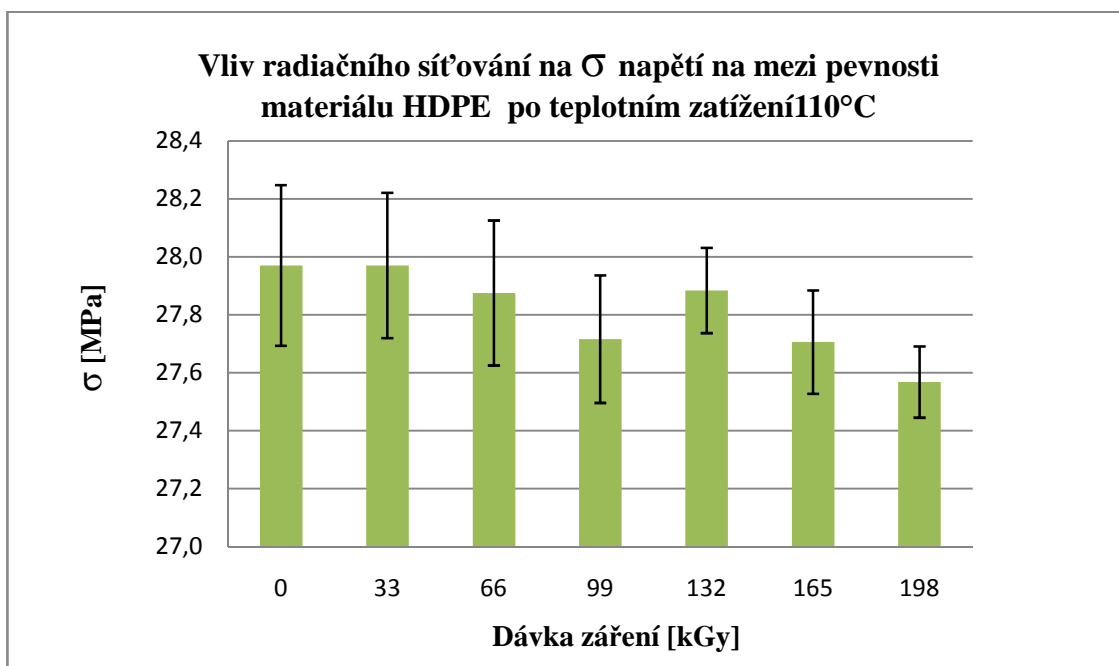


Obr. 46. Závislost poměrného protažení při přetržení na hodnotě radiačního sít'ování u těles po teplotním zatížení 110°C.

Největší naměřená hodnota poměrného protažení při přetržení u těles po teplotním zatížení 110°C byla zjištěna u základních neozářených těles to $\epsilon=214,9$ %, naopak nejnižší hodnota u ozářených těles 165kGy $\epsilon =168,6$ % (Tab. 24, Obr. 46).

Tab. 25. Průměrné hodnoty napětí na mezi pevnosti v závislosti na dávce ozáření po teplotním zatížení 110°C.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (σ -napětí na mezi pevnosti) [MPa] | s \pm |
|--------------------|--|---------|
| 0 | 28,0 | 0,3 |
| 33 | 28,0 | 0,3 |
| 66 | 27,9 | 0,3 |
| 99 | 27,7 | 0,2 |
| 132 | 27,9 | 0,1 |
| 165 | 27,7 | 0,2 |
| 198 | 27,6 | 0,1 |



Obr. 47. Závislost napětí na mezi pevnosti na hodnotě radiačního sít'ování u těles po teplotním zatížení 110°C.

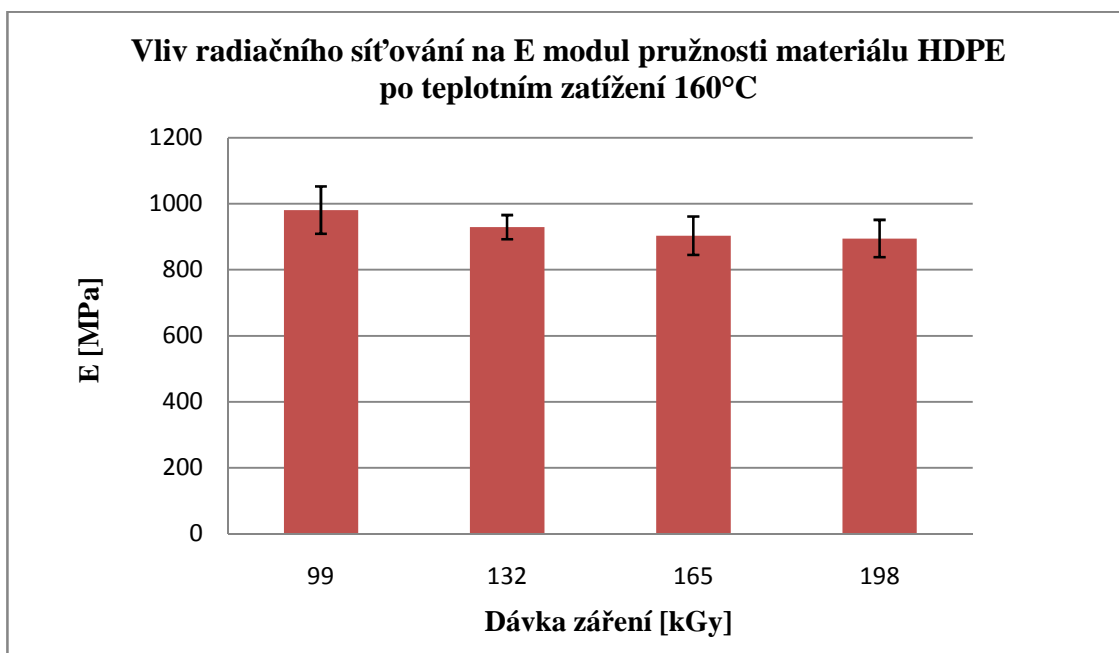
Největší naměřená hodnota napětí na mezi kluzu u těles po teplotním zatížení 110°C byla zjištěna shodně jak u základních neozářených těles, tak i u těles ozářených hodnotou 33kGy a to $\sigma=28\text{MPa}$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených hodnotou 198kGy $\sigma=27,6\text{MPa}$ (Tab. 25, Obr. 47).

9.1.7 Výsledky tahových zkoušek materiálu HDPE po teplotním zatížení 160°C

Také i u těles z HDPE po teplotním zatížení teplotou a to 160°C, bylo po ohřevu možné z důvodů tvarových změn použít pouze tělesa ozářená hodnotou 99, 132, 165 a 198 kGy.

Tab. 26. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 160°C.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (E - modul pružnosti) [MPa] | s ± |
|--------------------|--|------|
| 0 | - | - |
| 33 | - | - |
| 66 | - | - |
| 99 | 980,7 | 71,9 |
| 132 | 929,2 | 36,4 |
| 165 | 903,2 | 58,0 |
| 198 | 894,6 | 56,7 |

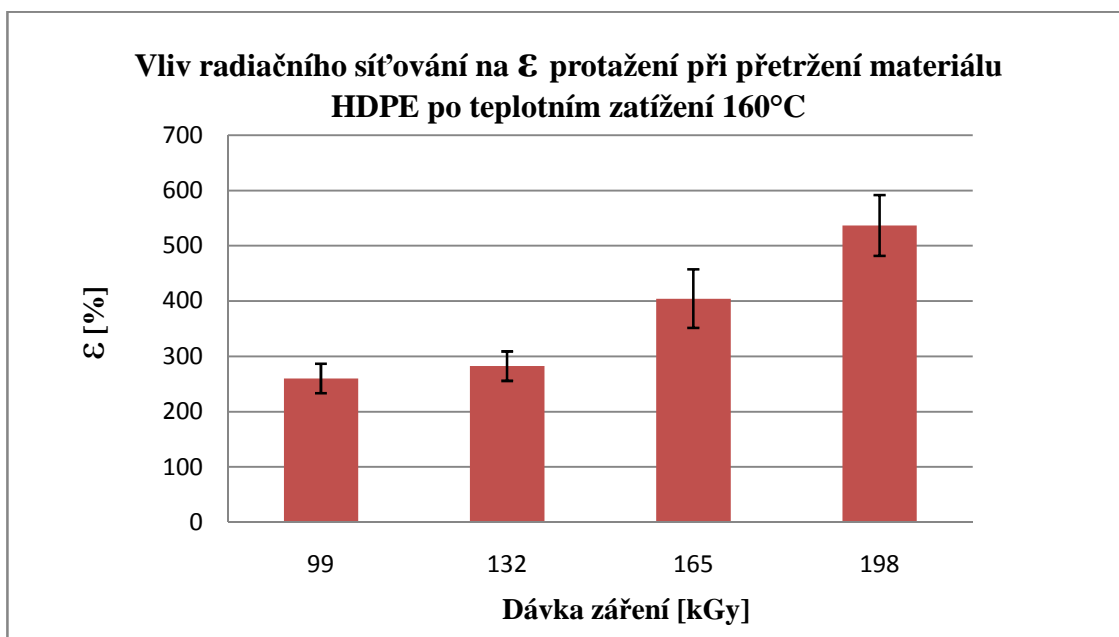


Obr. 48. Závislost modulu pružnosti na hodnotě radiačního sít'ování u těles po teplotním zatížení 160°C.

Největší naměřená hodnota modulu pružnosti u těles po teplotním zatížení 160°C byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 99kGy a to $E=980,7\text{MPa}$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených hodnotou 198kGy $E=894,6\text{MPa}$ (Tab. 26, Obr. 48).

Tab. 27. Průměrné hodnoty poměrného protažení při přetržení v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 160°C.

| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (ϵ – poměrné protažení při přetržení) [%] | s ± |
|--------------------|---|------|
| Základní | - | - |
| 33 | - | - |
| 66 | - | - |
| 99 | 260,1 | 26,7 |
| 132 | 282,4 | 26,6 |
| 165 | 404,2 | 53,0 |
| 198 | 536,6 | 54,9 |

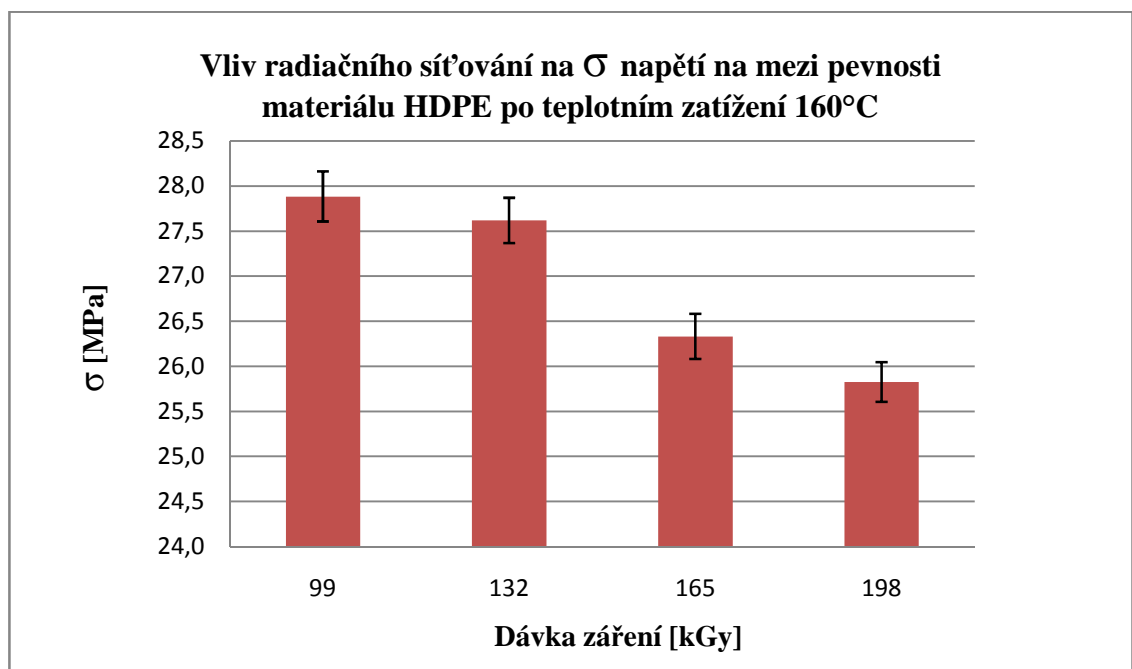


Obr. 49. Závislost poměrného protažení při přetržení na hodnotě radiačního síťování u těles po teplotním zatížení 160°C

Největší naměřená hodnota poměrného protažení při přetržení u těles po teplotním zatížení 160°C byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 198kGy a to $\epsilon=536,6\%$, naopak nejnižší hodnota u těles ozářených 99kGy $\epsilon=260,1\%$ (Tab. 27, Obr. 49).

Tab. 28. Průměrné hodnoty napětí na mezi pevnosti v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 160°C.

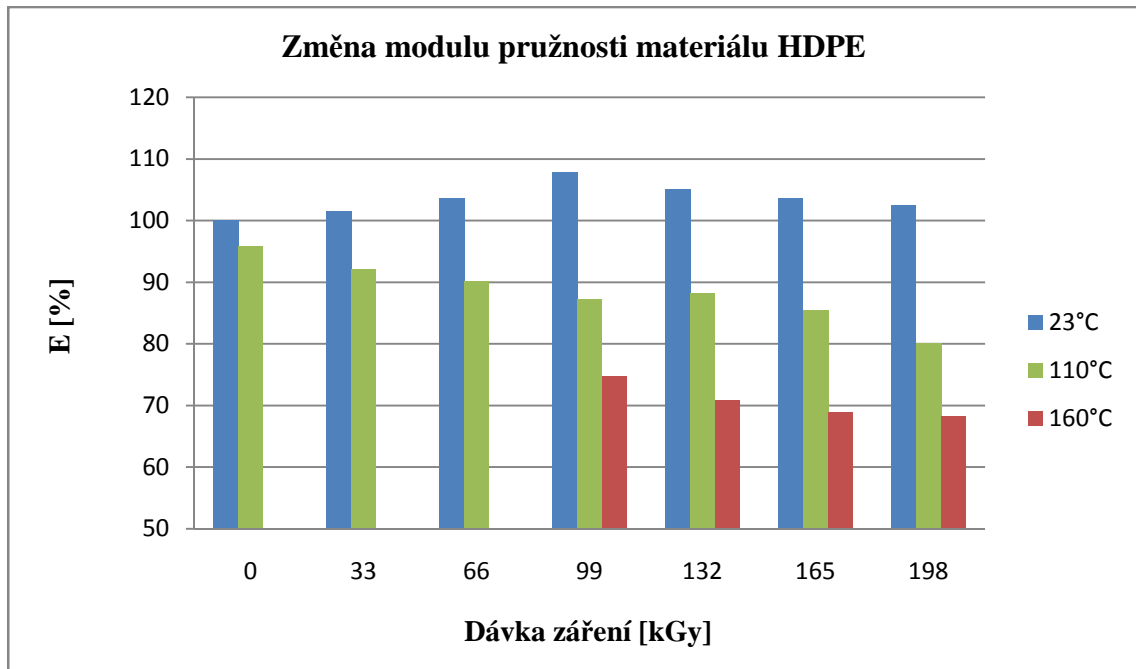
| Dávka záření [kGy] | \bar{x} (σ -napětí na mezi pevnosti) [MPa] | s \pm |
|--------------------|--|---------|
| 0 | - | - |
| 33 | - | - |
| 66 | - | - |
| 99 | 27,9 | 0,3 |
| 132 | 27,6 | 0,4 |
| 165 | 26,3 | 0,4 |
| 198 | 25,8 | 0,4 |



Obr. 50. Závislost napětí na mezi pevnosti na hodnotě radiačního síťování u těles po teplotním zatížení 160°C.

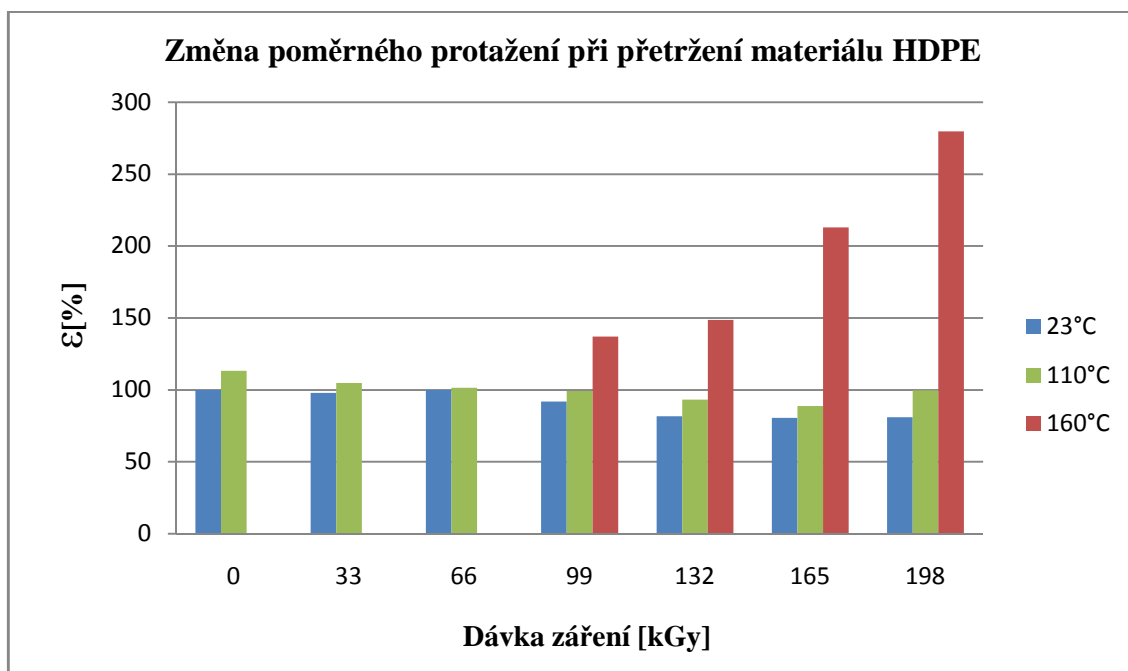
Největší naměřená hodnota napětí na mezi pevnosti u těles po teplotním zatížení 160°C byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 99kGy a to $\sigma=27,9\text{MPa}$, naopak nejnižší hodnota u těles s hodnotou ozáření 198kGy $\sigma =25,8\text{MPa}$ (Tab. 28, Obr. 50).

9.1.8 Srovnání výsledků tahových zkoušek materiálu HDPE



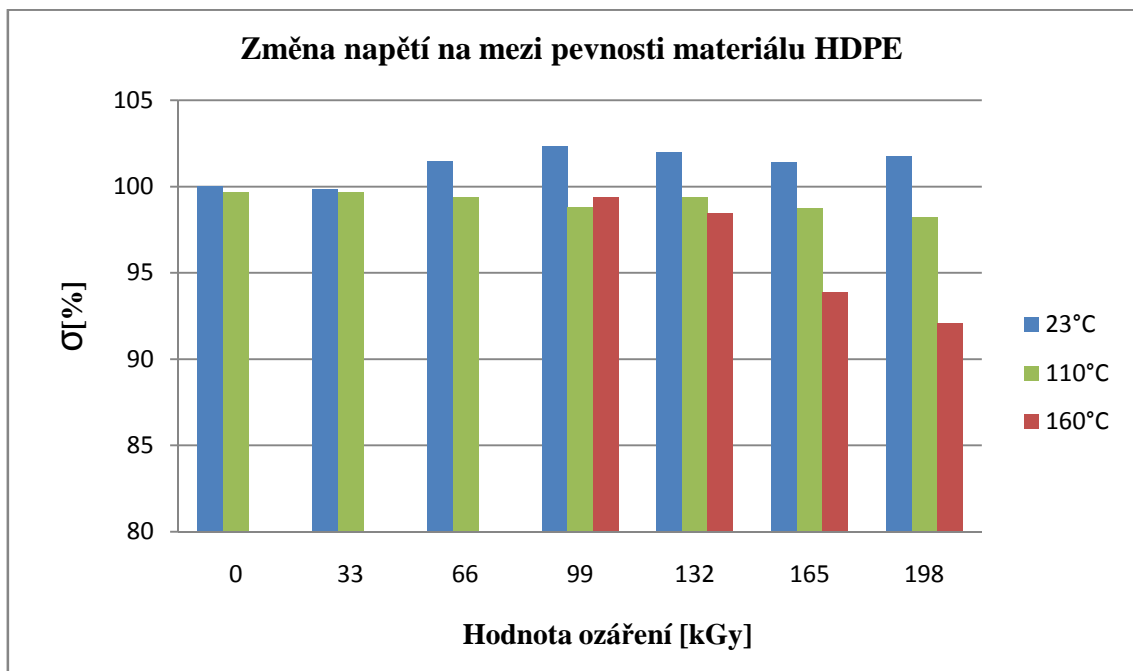
Obr. 51. Srovnání všech hodnot modulu pružnosti materiálu HDPE

Při srovnání všech výsledků modulu pružnosti materiálu HDPE všech teplotně zatěžovaných i nezatěžovaných těles bylo zjištěno, že nejvyšších naměřených hodnot dosahují tělesa, která nebyla teplotně namáhána s hodnotou ozáření 99kGy a to $E=1414,9$ MPa, což je o 7,9% více než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa. Naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny u těles teplotně zatěžovaných 160°C s hodnotou ozáření 198kGy u kterých byly naměřeny hodnoty $E=894,6$ MPa, což je o 31,8% méně než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa (Tab. 20, Tab. 26, Obr. 42, Obr. 48, Obr. 51).



Obr. 52. Srovnání všech hodnot poměrného protažení při přetržení materiálu HDPE

Při srovnání všech výsledků poměrného protažení při přetržení materiálu HDPE všech teplotně zatěžovaných i nezatěžovaných těles bylo zjištěno, že nejvyšších naměřených hodnot dosahují tělesa teplotně zatíženého 160°C s hodnotou ozáření 198kGy a to $\epsilon=536,6\%$, což je o 179,8% více než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa. Naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny u teplotně nezatěžovaných těles s hodnotou ozáření 165kGy u kterých byly naměřeny hodnoty $\epsilon=152,9\%$, což je o 19,4% méně než u základního neozářeného teplotně n nezatíženého tělesa (Tab. 21, Tab. 27, Obr. 43, Obr. 49, Obr. 52).



Obr. 53. Srovnání všech hodnot napětí na mezi kluzu materiálu HDPE

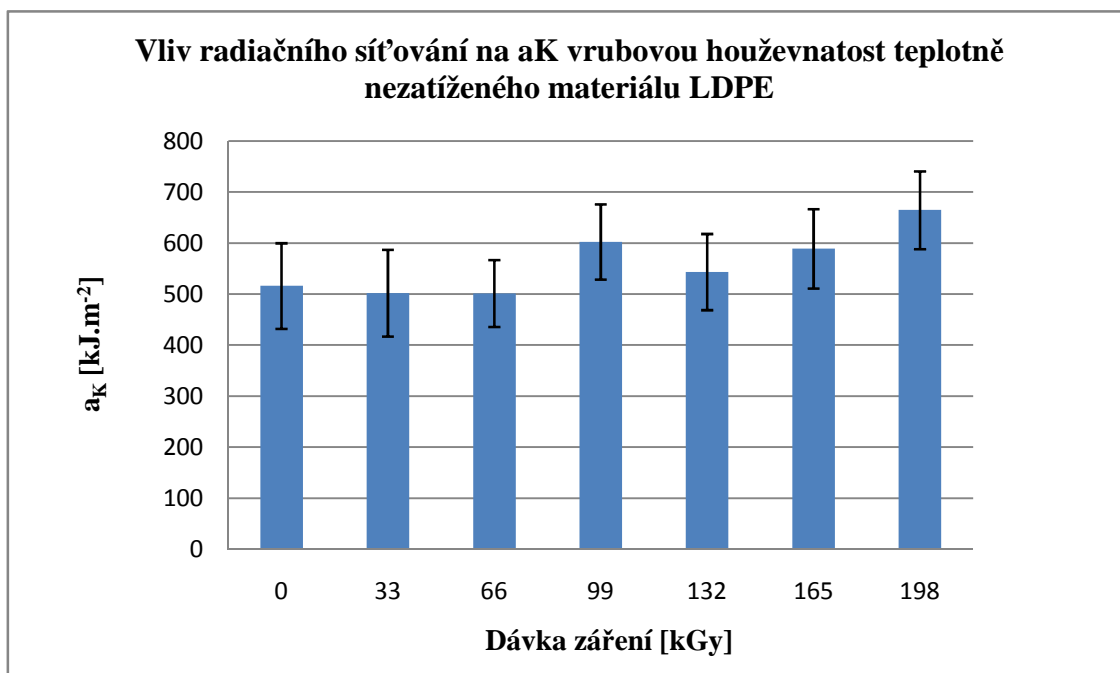
Při srovnání všech výsledků napětí na mezi pevnosti materiálu HDPE všech teplotně zatěžovaných i nezatěžovaných těles bylo zjištěno, že nejvyšších naměřených hodnot dosahují teplotně nezatíženého tělesa s hodnotou ozáření 99kGy a to $\sigma=28,7\text{MPa}$ což je o 2,3% více než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa. Naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny u těles, která byla teplotně zatěžována 160°C s hodnotou ozáření 198kGy u kterého zároveň byly naměřeny nejnižší hodnoty $\sigma=25,8\text{MPa}$, což je o 8% méně než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa (Tab. 22, Tab. 28, Obr. 44, Obr. 50, Obr. 53).

9.2 Vrubová houževnatost

9.2.1 Výsledky vrubové houževnatosti v tahu materiálu LDPE u teplotně nezatěžovaných těles.

Tab. 29. Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.

| Dávka záření kGy | \bar{x} (a_K Vrubová houževnatost) [kJ.m ⁻²] | s [-] |
|---------------------|--|------------|
| 0 | 516,3 | 83,9 |
| 33 | 502,2 | 85,1 |
| 66 | 501,5 | 65,5 |
| 99 | 602,5 | 73,7 |
| 132 | 543,7 | 74,7 |
| 165 | 589,2 | 77,8 |
| 198 | 664,8 | 76,2 |



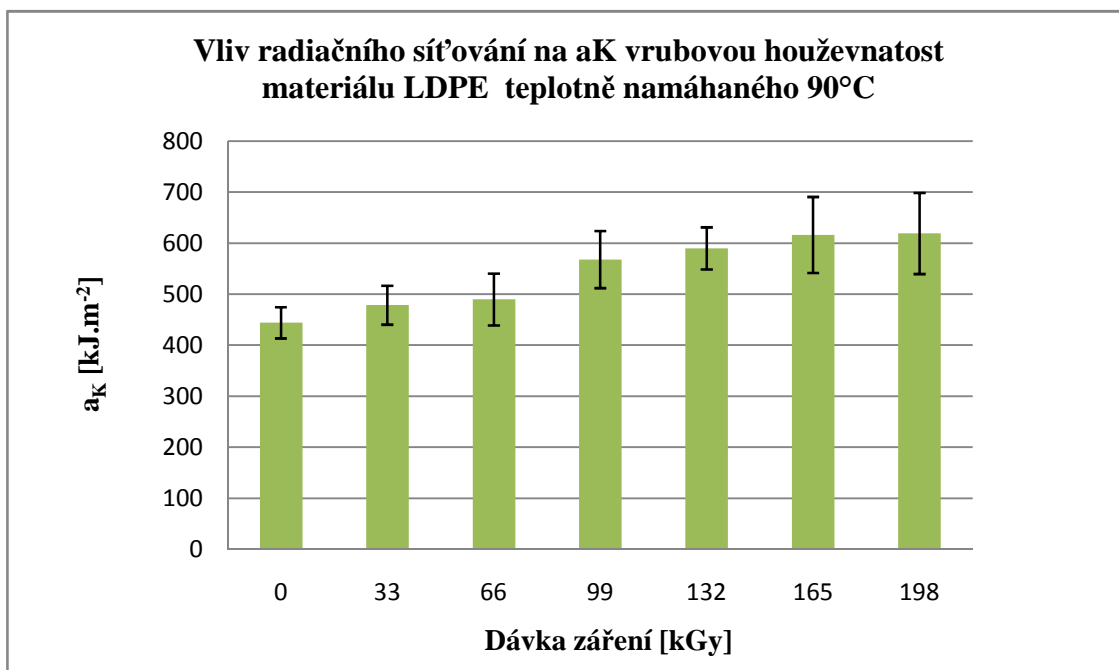
Obr. 54. Závislost vrubové houževnatosti na hodnotě radiačního síťování u teplotně nezatěžovaných těles.

Největší naměřená hodnota vrubové houževnatosti v tahu byla zjištěna u těles s hodnotou ozáření 198kGy a to $a_K=664,8\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$, naopak nejnižší hodnota byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 66kGy $a_K=501,5\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (Tab. 29, Obr. 54).

9.2.2 Výsledky vrubové houževnatosti v tahu materiálu LDPE teplotně zatíženého 90°C

Tab. 30. Průměrné hodnoty rázové houževnatosti v závislosti na dávce ozáření po teplotním zatížení 90°C.

| Dávka záření kGy | \bar{x} (a_K Vrubová houževnatost) [kJ.m ⁻²] | s [-] |
|---------------------|--|------------|
| 0 | 444,3 | 30,7 |
| 33 | 478,8 | 38,1 |
| 66 | 489,8 | 50,7 |
| 99 | 568,1 | 56,0 |
| 132 | 590,1 | 41,2 |
| 165 | 616,4 | 74,6 |
| 198 | 619,4 | 79,6 |



Obr. 55. Závislost vrubové houževnatosti na hodnotě radičního síťování u těles po teplotním zatížení 90°C

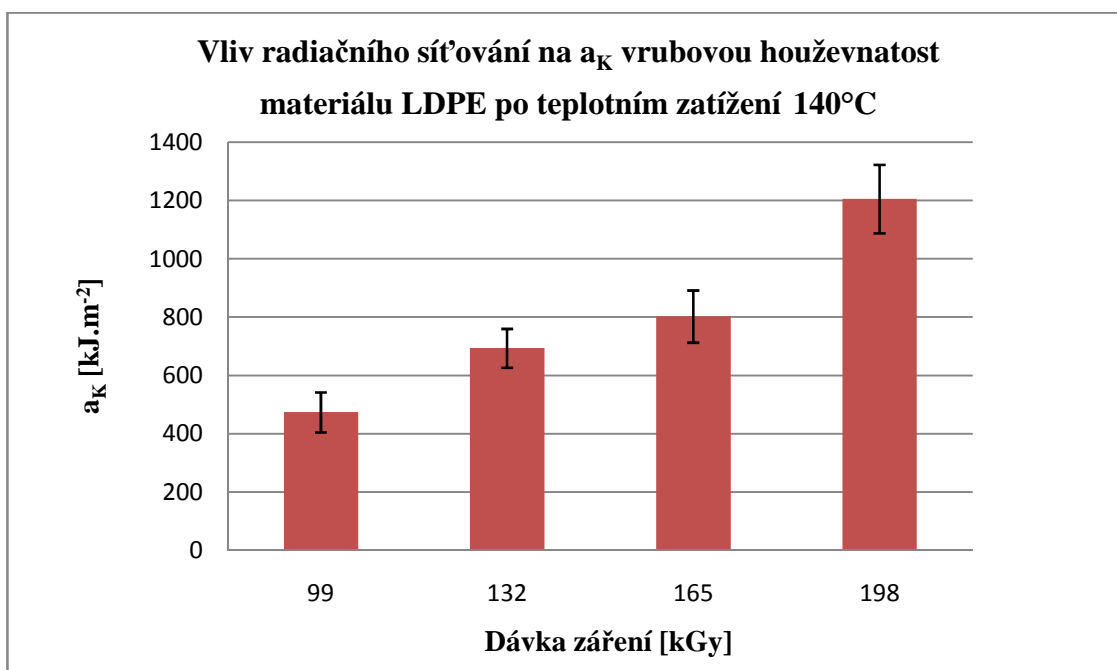
Největší naměřená hodnota vrubové houževnatosti v tahu u těles po teplotním zatížení

90°C byla zjištěna u těles s hodnotou ozáření 198kGy a to $a_K=619,4\text{kJ.m}^{-2}$, naopak nejnížší hodnota byla zjištěna u základních neozářených těles $a_K=501,5\text{kJ.m}^{-2}$ (Tab. 30, Obr. 55).

9.2.3 Výsledky vrubové houževnatosti v tahu materiálu LDPE po teplotním zatížení 140°C

Tab. 31. Průměrné hodnoty rázové houževnatosti v závislosti na dávce ozáření po teplotním zatížení 140°C

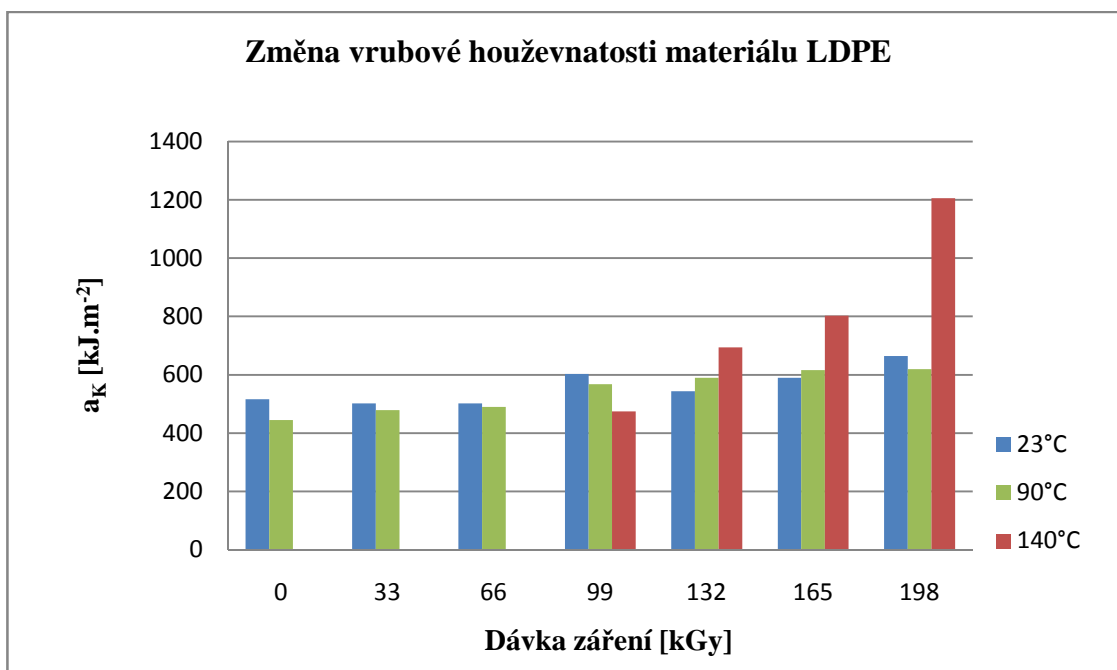
| Dávka záření kGy | \bar{x} (a_K Vrubová houževnatost) [kJ.m ⁻²] | s [-] |
|---------------------|--|------------|
| 0 | - | - |
| 33 | - | - |
| 66 | - | - |
| 99 | 473,9 | 68,6 |
| 132 | 693,7 | 66,7 |
| 165 | 802,9 | 89,5 |
| 198 | 1205,9 | 117,8 |



Obr. 56. Závislost vrubové houževnatosti na hodnotě radiačního síťování po teplotním zatížení 140°C

Největší naměřená hodnota vrubové houževnatosti v tahu u těles po teplotním zatížení 140°C byla zjištěna u těles s hodnotou ozáření 198kGy a to $a_K=1205,9\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$, naopak nejnižší hodnota byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 99kGy $a_K=473,9\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (Tab. 31, Obr. 56).

9.2.4 Srovnání výsledků vrubové houževnatosti v tahu materiálu LDPE



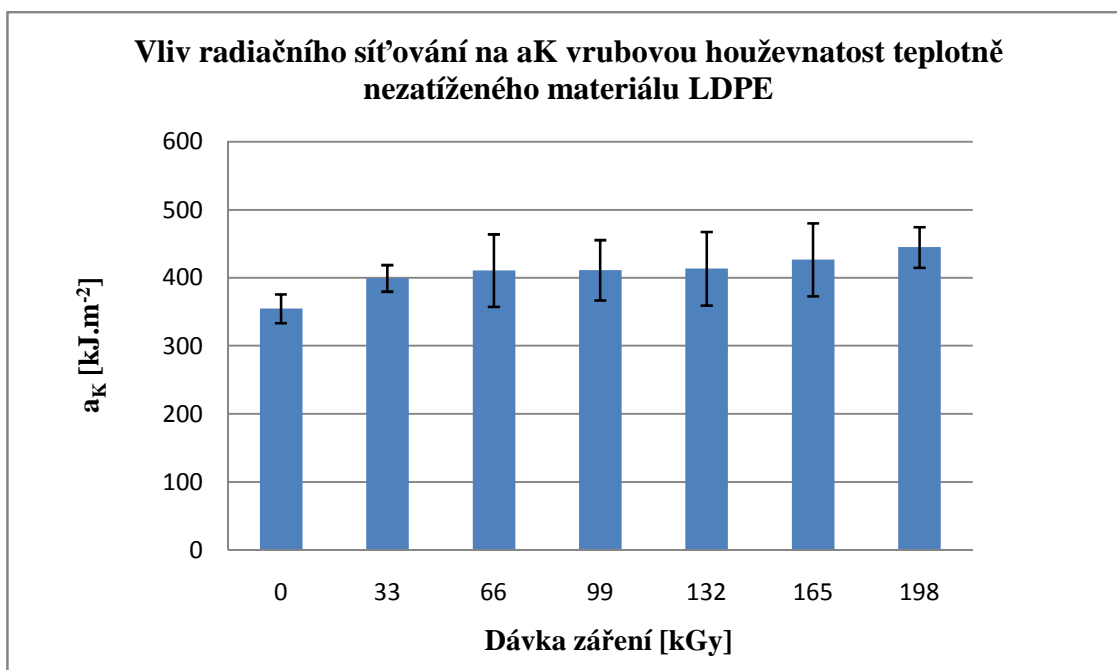
Obr. 57. Srovnání hodnot vrubové houževnatosti materiálu LDPE

Při srovnání výsledků vrubové houževnatosti v tahu materiálu LDPE všech teplotně zatěžovaných i nezatěžovaných těles bylo zjištěno, že nejvyšších naměřených hodnot dosahují tělesa s teplotním zatížením 140°C s hodnotou ozáření 198kGy a to $a_K=1205,9\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ což je o 133,6% více než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa. Naopak nejnižších hodnot bylo zjištěno u základního neozářeného tělesa s teplotním namáháním 90°C $a_K=501,5\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ což je 13,9% méně než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa. (Tab. 30, Tab. 31, Obr. 55, Obr. 56, Obr. 57)

9.2.5 Výsledky vrubové houževnatosti v tahu materiálu HDPE u teplotně nezatěžovaných těles.

Tab. 32. Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.

| Dávka záření kGy | \bar{x} (a_K Vrubová houževnatost) [kJ.m ⁻²] | s [-] |
|---------------------|--|------------|
| 0 | 354,94 | 21,19 |
| 33 | 399,64 | 19,49 |
| 66 | 411,00 | 53,39 |
| 99 | 411,51 | 44,38 |
| 132 | 413,76 | 53,98 |
| 165 | 427,04 | 53,64 |
| 198 | 445,06 | 29,88 |



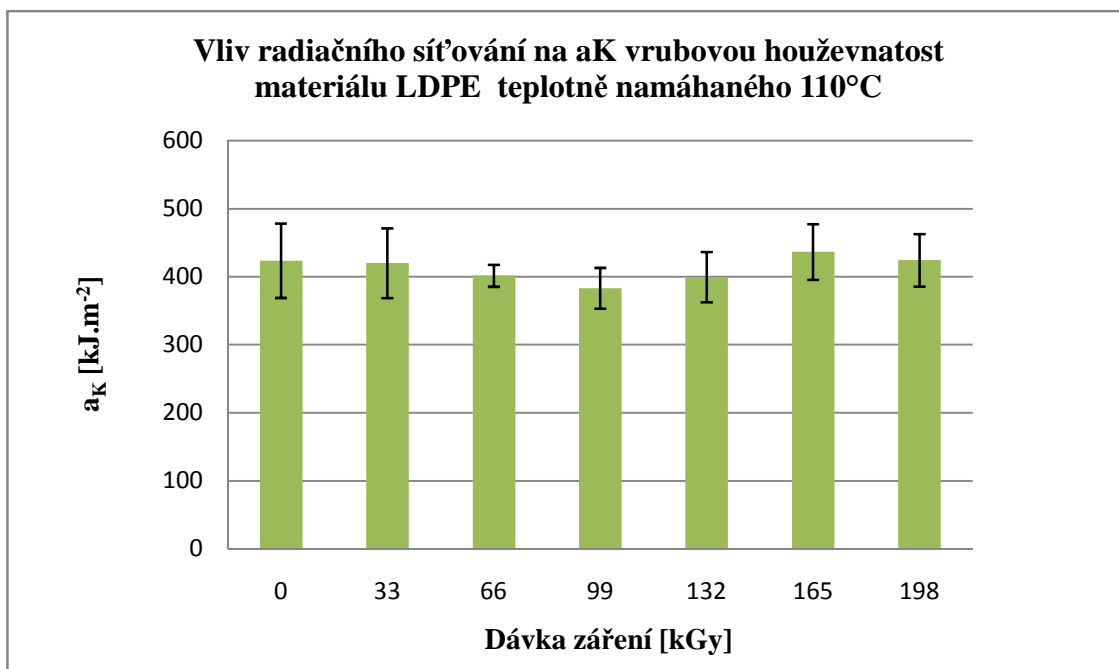
Obr. 58. Závislost vrubové houževnatosti na hodnotě radiačního síťování u teplotně nezatěžovaných těles.

Největší naměřená hodnota vrubové houževnatosti v tahu byla zjištěna u těles s hodnotou ozáření 198kGy a to $a_K = 445,1 \text{ kJ.m}^{-2}$, naopak nejnižší hodnota byla zjištěna u základních neozářených těles $a_K = 354,9 \text{ kJ.m}^{-2}$ (Tab. 32, Obr. 58).

9.2.6 Výsledky vrubové houževnatosti v tahu materiálu HDPE po teplotním zatížení 110°C

Tab. 33. Průměrné hodnoty rázové houževnatosti v závislosti na dávce ozáření po teplotním zatížení 110°C.

| Dávka záření kGy | \bar{x} (a_K Vrubová houževnatost) [kJ.m ⁻²] | s [-] |
|---------------------|--|------------|
| 0 | 423,6 | 54,7 |
| 33 | 420,2 | 51,3 |
| 66 | 401,7 | 16,1 |
| 99 | 383,3 | 29,9 |
| 132 | 399,6 | 36,9 |
| 165 | 436,6 | 41,0 |
| 198 | 424,4 | 38,6 |



Obr. 59. Závislost vrubové houževnatosti na hodnotě radiačního síťování u těles po teplotním zatížení 110°C

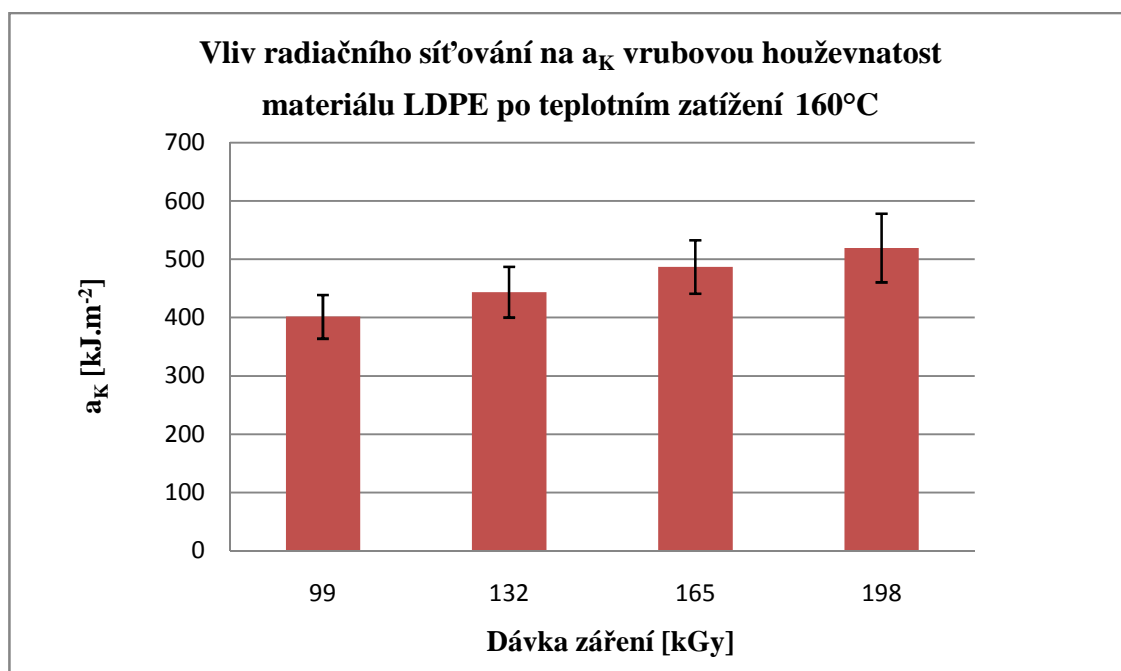
Největší naměřená hodnota vrubové houževnatosti v tahu po teplotním zatížení

110°C byla zjištěna u těles s hodnotou ozáření 165kGy a to $a_K=436,6\text{kJ.m}^{-2}$, naopak nejnižší hodnota byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 99kGy $a_K=383,3\text{kJ.m}^{-2}$ (Tab. 33, Obr. 59).

9.2.7 Výsledky vrubové houževnatosti v tahu materiálu HDPE teplotně zatíženého 160°C

Tab. 34. Průměrné hodnoty rázové houževnatosti v závislosti na dávce ozáření po teplotním zatížení 160°C

| Dávka záření kGy | \bar{x} (a_K Vrubová houževnatost) [kJ.m ⁻²] | s [-] |
|---------------------|--|------------|
| 0 | - | - |
| 33 | - | - |
| 66 | - | - |
| 99 | 401,6 | 37,5 |
| 132 | 443,8 | 43,5 |
| 165 | 487,1 | 45,8 |
| 198 | 519,6 | 58,8 |

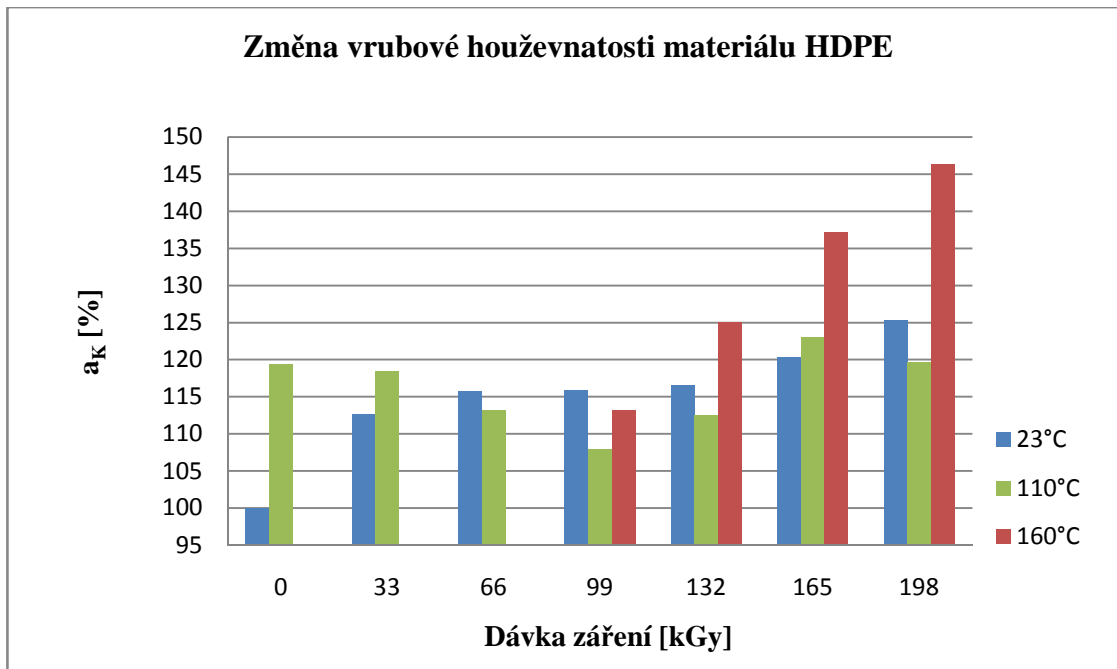


Obr. 60. Závislost vrubové houževnatosti na hodnotě radiačního síťování u těles teplotně zatěžovaných 160°C

Největší naměřená hodnota vrubové houževnatosti v tahu u těles po teplotním zatížení

160°C byla zjištěna u těles s hodnotou ozáření 198kGy a to $a_K = 519,6 \text{ kJ.m}^{-2}$, naopak nejnižší hodnota byla zjištěna u těles ozářených hodnotou 99kGy $a_K = 401,6 \text{ kJ.m}^{-2}$ (Tab. 34, Obr. 60).

9.2.8 Srovnání výsledků vrubové houževnatosti v tahu materiálu HDPE



Obr. 61. Srovnání hodnot vrubové houževnatosti materiálu HDPE

Při srovnání výsledků vrubové houževnatosti v tahu materiálu HDPE všech teplotně zatěžovaných i nezatěžovaných těles bylo zjištěno, že nejvyšších naměřených hodnot dosahuje tělesa s teplotním zatížením 160°C s hodnotou ozáření 198kGy a to $a_K=519,6\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ což je o 46,8% více než u základního neozářeného teplotně nezatíženého tělesa, u kterého zároveň byly naměřeny nejnižší hodnoty $a_K=354,9\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$. (Tab. 32, Tab. 34, Obr. 55, Obr. 57, Obr. 61).

ZÁVĚR

Náplní diplomové práce bylo zjistit vliv teplotního zatížení na mechanické vlastnosti u modifikovaných polyolefinů. Kdy v praktické části byly nejdříve pro mechanické zkoušky vystříknuty na vstřikovacím stroji ARBURG 420C zkušební tělesa ze dvou druhů polymerů a to konkrétně z materiálu LDPE a HDPE. Poté tato tělesa byla použita pro měření, ale zároveň některá byla modifikována radiačním sít'ováním v dávkách záření o hodnotách 33, 66, 99, 132, 165 a 198kGy. Následně probíhalo teplotní zatěžování těles v horkovzdušné troubě MORA 4807 teplotami 90 a 140 °C materiál LDPE, a teplotami 110 a 160°C materiál HDPE vždy po dobu 1hodiny. Tělesa se po teplotním namáhání ochladila na pokojovou teplotu (23°C) a následovaly mechanické zkoušky na trhacím zařízení ZWICK 1456 a také na rázovém kladivu ZWICK HIT 50P.

Před samotným započítáním mechanických zkoušek teplotně zatížených těles, bylo nutné vyloučit tělesa po teplotním zatížení 140 °C u LDPE a 160°C u HDPE, všechny neozářená tělesa a tělesa s ozářením nižší jak 99kGy jelikož došlo po teplotním zatížení ke tvarovým změnám a tělesa tak nemohla být použita.

U tahových zkoušek materiálu LDPE byly vyhodnocovány veličiny jako Modul pružnosti, Protážení při přetržení, Napětí na mezi kluzu a Poměrné prodloužení na mezi kluzu.

U tahových zkoušek materiálu HDPE byly vyhodnocovány veličiny Modul pružnosti, Protážení při přetržení a Napětí na mezi pevnosti.

V rázových zkouškách materiálu LDPE a HDPE pak byla u obou vyhodnocována hodnota Vrubové houževnatosti v tahu.

Nejvyšší naměřené hodnoty z tahových zkoušek materiálu LDPE: Z měření bylo zjištěno nejvyššího Modulu pružnosti u těles po teplotním zatížení 140°C s dávkou ozáření 132kGy $E=347,3\text{MPa}$; nejvyšší hodnoty Protážení při přetržení dosahují tělesa po teplotním namáhání 140°C s dávkou ozáření 99kGy $\varepsilon=443,7\%$; u Napětí na mezi kluzu bylo nejvyšších hodnot naměřeno u těles po teplotním zatížení 140°C po dávce záření 99kGy $\sigma=12,5\text{MPa}$ a u veličiny Poměrného prodloužení na mezi kluzu bylo nejvyšších hodnot dosaženo u těles po teplotním namáhání 90°C s dávkou záření 99kGy.

U vyhodnocovaných veličin materiálu LDPE bylo zjištěno, že nejvyšších naměřených hodnot dosahují tělesa po nejvyšším teplotním zatížení 140°C, nejčastěji s dávkou záření

99kGy, avšak u hodnot Poměrného prodloužení na mezi kluzu to bylo po teplotním zatížení 90°C.

Nejvyšší naměřené hodnoty z tahových zkoušek materiálu HDPE: Z měření bylo zjištěno nejvyššího Modulu pružnosti u těles bez vystavení teplotnímu zatížení s dávkou ozáření 99kGy $E=1414,9\text{MPa}$; nejvyšší hodnoty Protážení při přetržení dosahují tělesa po teplotním namáhání 160°C s dávkou ozáření 198kGy $\varepsilon=536,6\%$; u Napětí na mezi pevnosti bylo nejvyšších hodnot naměřeno u teplotně nezatežovaných těles po dávce záření 99kGy $\sigma=28,7\text{MPa}$.

U vyhodnocovaných veličin materiálu HDPE bylo zjištěno, že nejvyšších naměřených hodnot dosahují tělesa shodně s dávkou záření 99kGy, která nebyla teplotně namáhána, avšak u hodnot Protážení při přetržení to platí pro tělesa po nejvyšším teplotním zatížení a to 160°C s maximální dávkou 198kGy.

U rázové houževnatosti v tahu těles z HDPE byla zjištěna nejvyšší naměřená hodnota u těles vystavených teplotnímu zatížení 160°C s hodnotou ozáření 198kGy $a_K=354,9\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$; u těles z LDPE to bylo po zatížení 140°C při dávce záření 198kGy $a_K=1205,9\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$.

U zkoušek rázové houževnatosti u obou materiálů tedy vyplynulo, že nejvyšších naměřených hodnot bylo dosaženo se vzrůstající dávkou radiačního záření až na hodnotu 198kGy při vzrůstajícím teplotním namáháním až na maximální hodnotu 140°C u LDPE a 160°C u HDPE.

Z naměřených a vyhodnocených hodnot lze vypožorovat u jednotlivých materiálů a vyhodnocených veličin jak dochází ke změnám hodnot v závislosti na hodnotách teplotního zatížení ve °C a zároveň dávkách záření kGy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠVORČÍK, V., Polymery, Fakulta: VŠCHT [online]. [cit. 2013-11-9] Dostupný z: <http://vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>
- [2] LENFELD, P. *Technologie II: Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit. 2013-11-9]. Dostupný z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [3] VACULÍK, J., Diplomová práce – Vlastnosti radiačně síťovaných polymeru. Zlín: UTB, 2010. 123 s.
- [4] AUFFAHRTOVÁ, P. Bakalářská práce – Vlastnosti radiačně síťovaných polymerů. Zlín: UTB, 2011. 95 s.
- [5] POLYOLEFINY, polyethylen polypropylen. Výroba, vlastnosti, použití. In: [online]. [cit. 2014-02-10]. Dostupné z: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/PE%20a%20PP2013.pdf>
- [6] LAMBOROVÁ, R. Diplomová práce – Recyklace ozářených polymerů. Zlín: UTB, 2008. 95 s.
- [7] DUCHÁČEK, V. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2nd ed. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [8] SCHINDLEROVÁ, L. Diplomová práce – Vliv radiačního síťování na vlastnosti vybraných polymerů. Zlín: UTB, 2011. 82 s.
- [9] KABELÁČ, J., Diplomová práce – Vlastnosti modifikovaných termoplastů po tepelném zatížení. Zlín: UTB, 2013. 88 s.
- [10] ADAMEK, R., Diplomová práce – Vliv záření na vlastnosti vybraných plastů. Zlín: UTB, 2008. 135 s.
- [11] VONDRÁČEK, P., et al. *Metody studia a charakterizace struktury polymerů*. 1st ed. Praha: VŠCHT Praha v Čs. redakce VN MON, 1988. 235 p.
- [12] VANÍČEK, J. *Metody termické analýzy. 6. Termická gravimetrie a termická mechanická analýza* [online]. <http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/20060106/prednaska6.pdf>
- [13] TMA PT-productbrochure, 2014. Linseisthermalanalysis. <http://www.dilatometer.com/product-brochures.html>

- [14] Termomechanicalanalysis, 2014. sump4.com.
<http://www.sump4.com/downloads/TMA.ppt>
- [15] Diferenciální skenovací kalorimetrie, 2014. Katedra strojírenské technologie.
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p4/DSC.pdf
- [16] PINKAS, J., LOSOS, Z. Termická analýza. *Úloha 8. Termická analýza* [online].
Dostupné z:http://sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf/Uloha8_Termanal.pdf
- [17] HUBÁČEK, O., Bakalářská práce – Lepení LLDPE. Zlín: UTB, 2012. 68 s.
- [18] MIZERA, Aleš. Diplomová práce - Teplotní odolnost vybraných polymerů.
Zlín: UTB, 2011. 171 s.
- [19] ACHILLESOVÁ, Jana. Diplomová práce - Vlastnosti radiačně síťovatelných materiálů v aplikacích pro světlomety. Zlín: UTB, 2013. 115 s.
- [20] SEDLÁČEK, Jan. Diplomová práce - Vliv radiačního síťování na rázovou zkoušku v tahu vybraných polymerních materiálů. Zlín: UTB, 2013. 78 s.
- [21] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch. Ostrava: VŠB – TUO, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4. Dostupné z:
http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE_FINAL.pdf
- [22] MCAE Systems (MechanicalComputerAidedEngineering). [online]. [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/3d-skener>
- [23] DOW, LDPE [online]. [cit. 2014-04-21]. Dostupný z:
<http://www.dow.com/polyethylene/ap/en/prod/ldpe.htm>
- [24] DOW, HDPE [online]. [cit. 2014-04-21]. Dostupný z:
<http://www.dow.com/polyethylene/eu/en/prod/hdpe.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | | |
|---------------|-----|-------------------------------------|
| <i>Obr.</i> | [-] | Obrázek. |
| <i>Tab.</i> | [-] | Tabulka. |
| <i>DP</i> | [-] | Diplomová práce. |
| δ | [-] | Střední kvadratická chyba. |
| <i>kGy</i> | [-] | kiloGray (jednotka dávky ozáření). |
| \bar{x} | [-] | Aritmetický průměr. |
| <i>PE</i> | [-] | Polyethylen. |
| <i>PP</i> | [-] | Polypropylen. |
| <i>PS</i> | [-] | Polystyren. |
| <i>PU</i> | [-] | Polyuretan. |
| <i>PVC</i> | [-] | Polyvinylchlorid. |
| <i>PA</i> | [-] | Polyamid. |
| <i>PC</i> | [-] | Polykarbonát. |
| <i>POM</i> | [-] | Polyoxymehtylen. |
| <i>PTFE</i> | [-] | Polytetrafluorethylen. |
| <i>PMMA</i> | [-] | Polymethylmetakrylát. |
| <i>LDPE</i> | [-] | Nízkohustotní polyethylen. |
| <i>LLDPE</i> | [-] | Lineární nízkohustotní polyethylen. |
| <i>HDPE</i> | [-] | Vysokohustotní polyethylen. |
| <i>MDPE</i> | [-] | Polyetylén o střední hustotě. |
| <i>UHMWPE</i> | [-] | Polyetylén o velmi vysoké hustotě. |
| <i>ABS</i> | [-] | Akrylonitrilbutadienstyren. |
| <i>PI</i> | [-] | Polyimid. |
| <i>EP</i> | [-] | Epoxidová pryskyřice. |
| <i>PF</i> | [-] | Fenolformaldehydová pryskyřice. |

| | | |
|----------------------|-----------------------|---|
| <i>UF</i> | [-] | Močovinoformaldehydová pryskyřice. |
| <i>UP</i> | [-] | Polyesterová pryskyřice. |
| <i>PSU</i> | [-] | Polysulfon. |
| <i>PPS</i> | [-] | Polyfenylsulfid. |
| <i>PPO</i> | [-] | Polyfenilenoxid. |
| <i>t</i> | [°C] | Teplota. |
| <i>T_f</i> | [°C] | Teplota tečení. |
| <i>T_m</i> | [°C] | Teplota tání. |
| <i>T_g</i> | [°C] | Teplota skelného přechodu. |
| <i>PC</i> | [-] | Osobní počítač. |
| <i>CAD</i> | [-] | Počítačem podporované projektování. |
| <i>CAM</i> | [-] | Počítačová podpora obrábění. |
| <i>FEM</i> | [-] | Metoda konečných prvků. |
| <i>TA</i> | [-] | Termická analýza. |
| <i>TMA</i> | [-] | Termomechanická analýza. |
| <i>DSC</i> | [-] | Diferenční skenovací kalorimetrie. |
| <i>σ</i> | [MPa] | Pevnost v tahu. |
| <i>ε</i> | [-] | Poměrné prodloužení. |
| <i>E</i> | [MPa] | Modul pružnosti v tahu. |
| <i>a_k</i> | [kJ.m ⁻²] | Vrubová houževnatost. |
| <i>L</i> | [mm] | Délka |
| <i>DOW</i> | [-] | Americký výrobce polymerních materiálů. |
| <i>MORA</i> | [-] | Český výrobce kuchyňských elektrospotřebičů. |
| <i>BGS</i> | [-] | Německá společnost poskytující radiální síťování. |
| <i>ZWICK</i> | [-] | Německý výrobce zkušebních zařízení. |
| <i>ARBURG</i> | [-] | Německý výrobce vstřikovacích strojů. |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| <i>Obr. 1. Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty.[1]</i> | 12 |
| <i>Obr. 2. Struktura řetězců polyetyleny.[5]</i> | 14 |
| <i>Obr. 3. Rozdělení polymerů dle jejich aplikace a nadmolekulární struktury.[3]</i> | 15 |
| <i>Obr. 4. Schéma radiačního síťování elektronovým zářením.[3]</i> | 20 |
| <i>Obr. 5. Vlastnosti polymerů v závislosti na dávce záření.[10]</i> | 20 |
| <i>Obr. 6. Schéma principu metody DSC.[15]</i> | 23 |
| <i>Obr. 7. Metody termomechanické analýzy.[13]</i> | 24 |
| <i>Obr. 8. Přístroj pro TMA.[14]</i> | 25 |
| <i>Obr. 9. Dotyková spínací sonda.[21]</i> | 26 |
| <i>Obr. 10. Zařízení TRITOP.[22]</i> | 28 |
| <i>Obr. 11. Zařízení ATOS.[22]</i> | 28 |
| <i>Obr. 12. Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420C.[9]</i> | 31 |
| <i>Obr. 13. Horkovzdušná komora MORA 4807 [18]</i> | 33 |
| <i>Obr. 14. Trhací zařízení ZWICK ROELL 1456.</i> | 34 |
| <i>Obr. 15. Upnutí zkušební tělesa v čelistech.</i> | 35 |
| <i>Obr. 16. Rázové kladivo ZWICK ROELL HIT50P [20].</i> | 36 |
| <i>Obr. 17. Vyobrazení prostředí použitého softwaru Testxpert II</i> | 37 |
| <i>Obr. 18. Připravené těleso pro zkoušku vrubové houževnatosti v tahu.</i> | 38 |
| <i>Obr. 19. Těleso po provedení zkoušky vrubové houževnatosti v tahu.</i> | 38 |
| <i>Obr. 20. Vystříknutá zkušební tělesa pro rázovou houževnatost.</i> | 41 |
| <i>Obr. 21. Dutina vstřikovací formy na normovaná tělesa pro tahovou zkoušku.</i> | 42 |
| <i>Obr. 22. Roztříděná a popsána tělesa pro rázovou zkoušku v tahu.</i> | 42 |
| <i>Obr. 23. Sídlo společnosti BGS-Beta Gamma Service GmbH.</i> | 43 |
| <i>Obr. 24. Změna rozměrů tělesa LDPE s dávkou ozáření 99kGy po teplotním zatížení 140°C.</i> | 43 |
| <i>Obr. 25. Změna rozměrů tělesa HDPE s dávkou ozáření 198kGy po teplotním zatížení 160°C.</i> | 44 |
| <i>Obr. 26. Závislost modulu pružnosti na hodnotě radiačního síťování u teplotně nezatěžovaných těles.</i> | 46 |
| <i>Obr. 27. Závislost poměrného protažení při přetržení na hodnotě radiačního síťování u teplotně nezatěžovaných těles.</i> | 47 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Obr. 28. Závislost napětí na mezi kluzu na hodnotě radiačního sířování u teplotně nezatěžovaných těles.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Obr. 29. Závislost poměrného prodloužení na mezi kluzu na hodnotě radiačního sířování u teplotně nezatěžovaných těles.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Obr. 30. Závislost modulu pružnosti na hodnotě radiačního sířování u těles po teplotním zatížení 90°C.</i> | <i>50</i> |
| <i>Obr. 31. Závislost poměrného protažení při přetržení na hodnotě radiačního sířování u těles po teplotním zatížení 90°C.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Obr. 32. Závislost napětí na mezi kluzu na hodnotě radiačního sířování u těles po teplotním zatížení 90°C.</i> | <i>52</i> |
| <i>Obr. 33. Závislost poměrného prodloužení na mezi kluzu na hodnotě radiačního sířování u těles po teplotním zatížení 90°C.</i> | <i>53</i> |
| <i>Obr. 34. Závislost modulu pružnosti na hodnotě radiačního sířování u těles po teplotním zatížení 140°C.</i> | <i>54</i> |
| <i>Obr. 35. Závislost poměrného protažení při přetržení na hodnotě radiačního sířování u těles po teplotním zatížení 140°C.....</i> | <i>55</i> |
| <i>Obr. 36. Závislost napětí na mezi kluzu na hodnotě radiačního sířování u těles po teplotním zatížení 140°C.</i> | <i>56</i> |
| <i>Obr. 37. Závislost poměrného prodloužení na mezi kluzu na hodnotě radiačního sířování u těles po teplotním zatížení 140°C.</i> | <i>57</i> |
| <i>Obr. 38. Srovnání všech hodnot modulu pružnosti materiálu LDPE.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Obr. 39. Srovnání všech hodnot poměrného protažení při přetržení materiálu LDPE.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Obr. 40. Srovnání všech hodnot napětí na mezi kluzu materiálu LDPE.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Obr. 41. Srovnání všech hodnot poměrného prodloužení na mezi kluzu materiálu LDPE.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Obr. 42. Závislost modulu pružnosti na hodnotě radiačního sířování u teplotně nezatěžovaných těles.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Obr. 43. Závislost poměrného protažení při přetržení na hodnotě radiačního sířování u teplotně nezatěžovaných těles.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Obr. 44. Závislost napětí na mezi pevnosti na hodnotě radiačního sířování u teplotně nezatěžovaných těles.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Obr. 45. Závislost modulu pružnosti na hodnotě radiačního sířování u těles po teplotním zatížení 110°C.</i> | <i>65</i> |

| | |
|--|-----------|
| <i>Obr. 46. Závislost poměrného protažení při přetržení na hodnotě radiačního síťování u těles po teplotním zatížení 110°C.</i> | <i>66</i> |
| <i>Obr. 47. Závislost napětí na mezi pevnosti na hodnotě radiačního síťování u těles po teplotním zatížení 110°C.</i> | <i>67</i> |
| <i>Obr. 48. Závislost modulu pružnosti na hodnotě radiačního síťování u těles po teplotním zatížení 160°C.</i> | <i>68</i> |
| <i>Obr. 49. Závislost poměrného protažení při přetržení na hodnotě radiačního síťování u těles po teplotním zatížení 160°C.</i> | <i>69</i> |
| <i>Obr. 50. Závislost napětí na mezi pevnosti na hodnotě radiačního síťování u těles po teplotním zatížení 160°C.</i> | <i>70</i> |
| <i>Obr. 51. Srovnání všech hodnot modulu pružnosti materiálu HDPE.</i> | <i>71</i> |
| <i>Obr. 52. Srovnání všech hodnot poměrného protažení při přetržení materiálu HDPE.</i> | <i>72</i> |
| <i>Obr. 53. Srovnání všech hodnot napětí na mezi kluzu materiálu HDPE.</i> | <i>73</i> |
| <i>Obr. 54. Závislost vrubové houževnatosti na hodnotě radiačního síťování u teplotně nezatěžovaných těles.</i> | <i>74</i> |
| <i>Obr. 55. Závislost vrubové houževnatosti na hodnotě radiačního síťování u těles po teplotním zatížení 90°C.</i> | <i>75</i> |
| <i>Obr. 56. Závislost vrubové houževnatosti na hodnotě radiačního síťování po teplotním zatížení 140°C.</i> | <i>76</i> |
| <i>Obr. 57. Srovnání hodnot vrubové houževnatosti materiálu LDPE.</i> | <i>77</i> |
| <i>Obr. 58. Závislost vrubové houževnatosti na hodnotě radiačního síťování u teplotně nezatěžovaných těles.</i> | <i>78</i> |
| <i>Obr. 59. Závislost vrubové houževnatosti na hodnotě radiačního síťování u těles po teplotním zatížení 110°C.</i> | <i>79</i> |
| <i>Obr. 60. Závislost vrubové houževnatosti na hodnotě radiačního síťování u těles teplotně zatěžovaných 160°C.</i> | <i>80</i> |
| <i>Obr. 61. Srovnání hodnot vrubové houževnatosti materiálu HDPE.</i> | <i>81</i> |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| <i>Tab. 1. Vlastnosti lineárního (LLDPE , HDPE) a rozvětveného (LDPE) polyetylénu.[6]</i> | 13 |
| <i>Tab. 2. Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C.[17].....</i> | 32 |
| <i>Tab. 3. Technické parametry horkovzdušné trouby MORA 4807.[18].....</i> | 33 |
| <i>Tab. 4. Technické parametry trhacího zařízení ZWICK ROELL 1456.[19].....</i> | 35 |
| <i>Tab. 5. Technické parametry rázového kladiva ZWICK ROELL HIT50P.[20]</i> | 37 |
| <i>Tab. 6. Materiálový list LDPE DOW 780E. [23]</i> | 39 |
| <i>Tab. 7. Materiálový list HDPE DOW 25055E. [24]</i> | 40 |
| <i>Tab. 8. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.....</i> | 45 |
| <i>Tab. 9. Průměrné hodnoty poměrného protažení při přetržení v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.....</i> | 46 |
| <i>Tab. 10. Průměrné hodnoty napětí na mezi kluzu v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.....</i> | 47 |
| <i>Tab. 11. Průměrné hodnoty poměrného protažení na mezi kluzu v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.</i> | 48 |
| <i>Tab. 12. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 90°C.</i> | 49 |
| <i>Tab. 13. Průměrné hodnoty poměrné protažení při přetržení v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 90°C.</i> | 50 |
| <i>Tab. 14. Průměrné hodnoty napětí na mezi kluzu v závislosti na dávce ozáření u těles teplotně zatěžovaných 90°C.</i> | 51 |
| <i>Tab. 15. Průměrné hodnoty poměrného prodloužení na mezi kluzu v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 90°C.....</i> | 52 |
| <i>Tab. 16. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 140°C.</i> | 53 |
| <i>Tab. 17. Průměrné hodnoty poměrného protažení při přetržení v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 140°C.</i> | 54 |
| <i>Tab. 18. Průměrné hodnoty napětí na mezi kluzu v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 140°C.</i> | 55 |
| <i>Tab. 19. Průměrné hodnoty poměrného prodloužení na mezi kluzu v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 140°C.....</i> | 56 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Tab. 20. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Tab. 21. Průměrné hodnoty poměrného protažení při přetržení v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Tab. 22. Průměrné hodnoty napětí na mezi pevnosti v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Tab. 23. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na dávce ozáření u těles teplotně zatěžovaných 110°C.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Tab. 24. Průměrné hodnoty poměrného protažení při přetržení v závislosti na dávce ozáření u těles teplotně zatěžovaných 110°C.</i> | <i>65</i> |
| <i>Tab. 25. Průměrné hodnoty napětí na mezi pevnosti v závislosti na dávce ozáření po teplotním zatížení 110°C.</i> | <i>66</i> |
| <i>Tab. 26. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 160°C.</i> | <i>67</i> |
| <i>Tab. 27. Průměrné hodnoty poměrného protažení při přetržení v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 160°C.</i> | <i>68</i> |
| <i>Tab. 28. Průměrné hodnoty napětí na mezi pevnosti v závislosti na dávce ozáření u těles po teplotním zatížení 160°C.</i> | <i>69</i> |
| <i>Tab. 29. Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.....</i> | <i>74</i> |
| <i>Tab. 30. Průměrné hodnoty rázové houževnatosti v závislosti na dávce ozáření po teplotním zatížení 90°C.</i> | <i>75</i> |
| <i>Tab. 31. Průměrné hodnoty rázové houževnatosti v závislosti na dávce ozáření po teplotním zatížení 140°C</i> | <i>76</i> |
| <i>Tab. 32. Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti v závislosti na dávce ozáření u teplotně nezatěžovaných těles.....</i> | <i>78</i> |
| <i>Tab. 33. Průměrné hodnoty rázové houževnatosti v závislosti na dávce ozáření po teplotním zatížení 110°C.</i> | <i>79</i> |
| <i>Tab. 34. Průměrné hodnoty rázové houževnatosti v závislosti na dávce ozáření po teplotním zatížení 160°C</i> | <i>80</i> |